

PERILAKU *CROSS-LAMINATED TIMBER* (CLT) SEBAGAI MATERIAL UTAMA BANGUNAN TINGKAT MENENGAH TAHAN GEMPA DI INDONESIA

Ika Rahmawati Suyanto*

Peneliti / Sekolah Vokasi/Departemen Teknik Sipil / Universitas Gadjah Mada

*Korespondensi: ika.rahmawati.s@mail.ugm.ac.id

ABSTRACT

Cross-laminated timber (CLT) is made up of multilayered timber stacked perpendicularly, which improved the dimensional stability and allowing CLT to has high bearing capacity in its two direction. Despite all the advantages, CLT has not yet gain much attention in Indonesian, especially the utilization in mid-rise building construction. In order to have a better understanding about CLT as main structural element, the behaviour of mid-rise building made of CLT was assessed by running a 3D model of 5-story building by combining building code in Indonesia with CLT parameter from previous researcher as well as recommended adjustment from previous researchers. The research shows that CLT building statisfy the allowable parameter for mid-rise building in Indonesia.

Keywords: *Cross-laminated timber, seismic resistant building, wooden shearwall*

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini, kebutuhan akan tempat tinggal kian meningkat sedangkan lahan yang tersedia semakin sempit. Maka dalam suatu daerah padat penduduk, sering kali dijumpai dibangun hunian bertingkat seperti apartemen guna mengoptimalkan penggunaan lahan terbatas agar dapat menampung lebih banyak orang. Di sisi lain, tingginya tingkat aktivitas konstruksi menimbulkan sebuah kekhawatiran akan limbah yang dihasilkan baik selama proses konstruksi maupun limbah dari gedung lama yang dibongkar dan atau dihancurkan [1]. Isu ini erat kaitannya terhadap konsep pembangunan berkelanjutan. Menanggapi isu tersebut, kayu kembali dipertimbangkan sebagai bahan bangunan [2].

Pada dasarnya, sejak dahulu kayu telah digunakan sebagai bahan bangunan. Selain ringan, kayu memiliki keunggulan berupa harga yang murah, mudah didapatkan, dan mudah dikerjakan dalam banyak desain. Namun, kayu merupakan bahan yang cenderung mudah terbakar dan mudah lapuk terutama di daerah beriklim tropis. Akibatnya, banyak bangunan khususnya di daerah padat penduduk yang menggunakan beton yang dinilai lebih tahan lama.

Cross-laminated timber (CLT) adalah salah satu jenis kayu laminasi dikembangkan untuk mengeliminasi kelemahan yang sebelumnya ada pada material kayu [3]. Dalam proses fabrikasi, CLT ditekan sedemikian rupa sehingga lebih padat hingga pori-pori pada kayu menjadi sangat kecil. Hal ini membuat CLT tidak mudah terbakar [4].

Pada dasarnya di Indonesia, terutama pada bangunan tingkat menengah, kayu laminasi umumnya dipakai sebagai komponen non-struktural seperti dinding partisi maupun fasad. Pada penelitian ini, kegunaan kayu laminasi CLT dipelajari secara lebih lanjut sebagai komponen struktural yang mampu menahan gaya lateral sesuai dengan standar bangunan tahan gempa di Indonesia.

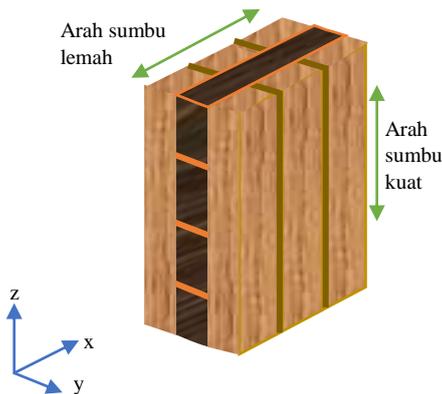
Tujuan dari penelitian ini adalah mengamati perilaku dari bangunan tingkat menengah yang tersusun dari panel-panel CLT terhadap standar standar bangunan yang berlaku di Indonesia dengan pemodelan 3D menggunakan SAP2000.

Sebagai batasan masalah, pemodelan ini berfokus pada perilaku struktur CLT di atas tanah. Sedangkan untuk perilaku, dimensi, dan kapasitas fondasi tidak tercakup dalam studi ini.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi *Cross-Laminated Timber*

Cross-laminated timber (CLT) adalah kayu laminasi yang tersusun dari minimum 3 lapis *plywood* dengan arah serat kayu yang berbeda antar lapisannya [5]. Arah serat yang berbeda membuat CLT lebih optimal untuk digunakan sebagai komponen struktural berbentuk panel, tidak seperti glulam yang umum digunakan sebagai komponen kolom dan balok.



Gambar 1. Penampang CLT

Panel CLT memiliki sumbu lemah dan sumbu kuat sehingga penentuan arah pemasangan panel menjadi penting baik dalam pemodelan dan pelaksanaan dilapangan.

2.2 Penyesuaian Parameter Untuk Struktur

Cross-Laminated Timber

Dalam standar bangunan tahan gempa Indonesia, gaya geser akibat gempa yang mengenai struktur harus didesain dengan koefisien modifikasi respon yang sesuai, R , faktor amplifikasi defleksi, C_d , dan faktor kuat lebih sistem, Ω_0 . Berdasarkan SNI 1726:2012 [6], digunakan nilai $C_d = 2$ dan $\Omega_0 = 2,5$ untuk sistem dinding rangka ringan dengan panel geser. Sementara itu diambil nilai $R = 2$ untuk CLT yang mengacu pada Pei, et al [7].

Pada panel elemen dengan bukaan seperti jendela, Dujic [8] menyatakan bahwa nilai kekakuan geser dan kekuatan geser sangat bergantung pada rasio luas bukaan terhadap luas panel. Pada model ini, dinding CLT yang terjepit oleh kusen pintu diasumsikan sebagai dinding non-struktural sehingga tidak ditampilkan pada pemodelan 3D (lihat Gambar 2). Sedangkan untuk dinding dengan

jendela, kapasitas dari panel CLT didekati dengan faktor pengali sebesar 0,5.

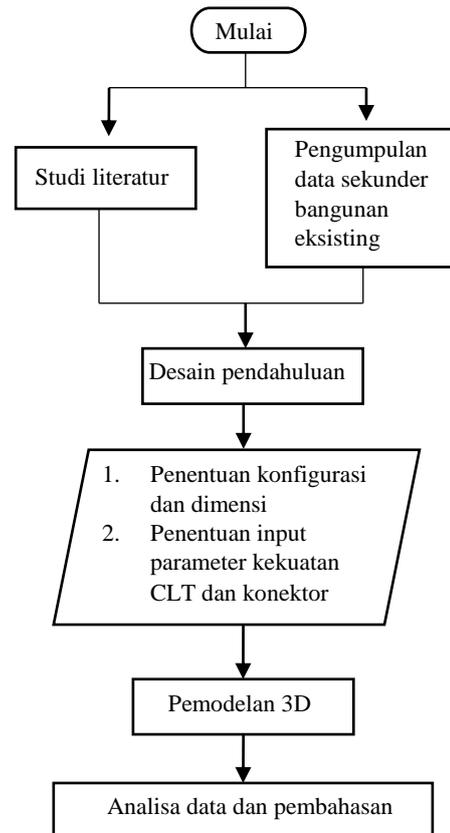


Gambar 2. CLT Dengan Pintu

Di samping itu, dalam memodelkan material perlu adanya *input* berupa nilai perbandingan antara penyempitan atau kontraksi dengan regangan longitudinal yang dikenal sebagai rasio poisson. Maldonado dan Chui [9] mengusulkan nilai rasio poisson untuk CLT sebesar $\nu = 0,3$.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Bagan Alur Penelitian



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan sehingga pemodelan dapat menggambarkan perilaku yang lebih mendekati keadaan yang sesungguhnya. Adapun tahapan penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3**.

3.2 Menentukan Properti Kekuatan Cross-Laminated Timber

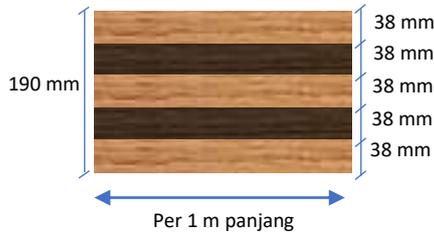
CLT memiliki kekuatan yang berbeda pada tiap sumbunya sesuai dengan komposisi lapisan kayu beserta arah seratnya atau lebih dikenal dengan istilah anisotropik. Kekuatan CLT yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada jenis CLT yang umum berada di pasaran dunia yaitu CLT Grade E1 yang terbuat dari *Black Spruce Pine*. Besarnya parameter kapasitas CLT Grade E1 dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Kekuatan CLT Grade E1 di Sumbu Kuat

$f_{b,0}$ Mpa	E_0 Mpa	$f_{t,0}$ Mpa	$f_{c,0}$ Mpa	$f_{v,0}$ Mpa	$f_{s,0}$ Mpa	G_0 Mpa
28,3	11722	19,9	23,6	2,9	0,97	732,6

Tabel 2. Kekuatan CLT Grade E1 di Sumbu Lemah

$f_{b,0}$ Mpa	E_0 Mpa	$f_{t,0}$ Mpa	$f_{c,0}$ Mpa	$f_{v,0}$ Mpa	$f_{s,0}$ Mpa	G_0 Mpa
7,2	8274	3,6	8,5	2,9	0,96	517,1



Gambar 3. Panel Dinding dan Lantai CLT

Modulus elastisitas efektif, EI_{eff} , suatu panel CLT dapat dihitung dengan Persamaan 1. Sedangkan untuk kekakuan geser efektif, GA_{eff} , dapat ditentukan sebagai berikut:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2 \quad (1)$$

$$GA_{eff} = \frac{a^2}{\left(\frac{h_i}{2G_i b}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i}\right) + \left(\frac{h_n}{2G_n b}\right)} \quad (2)$$

dengan:

E_i = modulus elastisitas

b = lebar lapisan

A_i = luas penampang panel

z_i = jarak dari titik pusat penampang panel

h = tebal lapisan

a = total tebal seluruh lapisan

Nilai modulus elastisitas dan kekakuan geser penampang berbeda pada arah sumbu kuatnya dan arah sumbu lemah. Maka, penentuan arah pemasangan panel akan mempengaruhi perilaku struktur.

Kapasitas dalam menahan gaya tegak lurus bidang (*out-of-plane*) ditentukan oleh modulus elastisitas tekuk arah x , E_{rx} , dan arah y , E_{ry} serta ditentukan oleh modulus geser bidang zx , G_{zx} , dan bidang yz , G_{yz} . Okabe et. al [10] mengulkan nilai E_{rx} , E_{ry} , G_{zx} , dan G_{zy} melalui persamaan berikut:

$$E_{rx} = \frac{(EI)_{effx}}{I_{fullx}} \quad E_{ry} = \frac{(EI)_{effy}}{I_{fully}} \quad (3)$$

$$G_{zx} = \frac{(GA)_{effy}}{I_{fully}} \quad G_{yz} = \frac{(EI)_{effx}}{I_{fullx}} \quad (4)$$

dengan I_{fullx} adalah inersia utuh penampang arah x dan I_{fully} adalah inersia utuh penampang arah y .

Dalam penelitian Yasumura, et al [11] mengusulkan bahwa kapasitas dalam menahan gaya sebidang (*in-plane*) ditentukan oleh modulus elastisitas arah x , E_x , dan arah y , E_y serta ditentukan oleh modulus geser bidang xy , G_{xy} . Nilai E_x , E_y , dan G_{xy} didapatkan sebagai berikut:

$$E_x = \frac{\sum_i E_{x,i}}{n_p} \quad E_y = \frac{\sum_i E_{y,i}}{n_p} \quad (5)$$

$$G_{xy} = \frac{E_y}{e_1} \quad (6)$$

dengan:

$E_{x,i}$ = modulus elastisitas pada tiap lapisan yang memiliki serat searah arah x

$E_{y,i}$ = modulus elastisitas pada tiap lapisan yang memiliki serat searah arah y

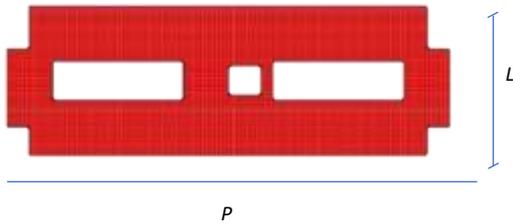
n_p = jumlah lapisan

e_1 = 16 (untuk CLT produk Amerika)

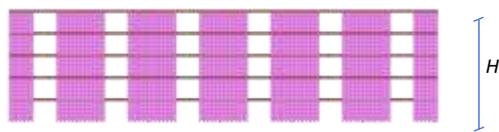
3.3 Pemodelan Dengan SAP2000

Penelitian ini menggunakan studi kasus sebuah gedung asrama di Yogyakarta. Gedung 5 lantai dengan panjang, $P = 60$ m, dan lebar, $L = 19,2$ m, dirancang menggunakan panel CLT tanpa adanya elemen balok dan kolom

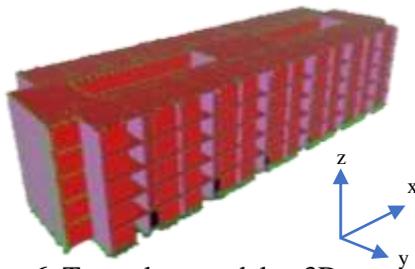
melainkan dinding dan slab saja seperti yang tampak pada **Gambar 4-6**. Input pembebanan yang digunakan dalam pemodelan merujuk pada peraturan SNI 1727:2013 [12].



Gambar 4. Tampak atas lantai tipikal (tampak XY)



Gambar 5. Tampak depan (tampak XZ) dengan tinggi, $H = 14$ m



Gambar 6. Tampak pemodelan 3D

Kekuatan panel CLT yang digunakan sebagai *input* dalam SAP2000 didapatkan dari Persamaan dengan penyesuaian notasi. Nilai modulus elastisitas CLT dan modulus geser pada arah sumbu lokalnya berturut-turut dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tiap panel CLT dihubungkan dengan baut dan plat penyambung yang terbuat dari baja. Dalam pemodelan menggunakan SAP2000, sambungan ini dimodelkan dengan menggunakan *link* dengan kekuatan yang mengacu pada Gavric [13] dan disesuaikan dengan sumbu lokal pada SAP2000.

Tabel 3. Nilai Modulus Elastisitas Panel CLT Tanpa Bukaannya

Modulus geser		
Notasi	Input SAP2000	Nilai Mpa
E_{rx}	E_{12}	439.556
E_{ry}	E_{13}	102.670
$(E_x + E_y)/2$	E_{23}	77.285

Tabel 4. Nilai Modulus Geser Panel CLT Tanpa Bukaannya

Modulus geser		
Notasi	Input SAP2000	Nilai Mpa
G_{xy}	G_{12}	439.556
G_{zx}	G_{13}	102.670
G_{yz}	G_{23}	77.285

Konektor pada CLT diklasifikasikan ke dalam tiga kategori berdasarkan jenis elemen yang disambung yaitu konektor dinding-lantai, konektor dinding-dinding tegak lurus, dan konektor CLT dan beton yang diasumsikan merupakan lantai kerja di mana struktur CLT akan berdiri. Adapun input kekuatan *link* dapat dilihat pada **Tabel 5-7**.

Tabel 5. Notasi dan Input Kekuatan *Link* Dinding-Lantai

SAP2000	Gavric	Nilai
Stiffness U1	$kel.3$	2,98 kN/mm
Stiffness U2	$kel.2$	1,10 kN/mm
Stiffness U3	$kel.1$	Rigid
Damping coefficient U1	v_3	1,74 %
Damping coefficient U2	v_2	11,70 %
Damping coefficient U3	v_1	-

Tabel 6. Notasi dan Input Kekuatan *Link* Dinding-dinding Tegak Lurus

SAP2000	Gavric	Nilai
Stiffness U1	$kel.3$	2,90 kN/mm
Stiffness U2	$kel.2$	1,49 kN/mm
Stiffness U3	$kel.1$	1,30 kN/mm
Damping coefficient U1	v_3	12,66%
Damping coefficient U2	v_2	1,15%
Damping coefficient U3	v_1	10,41%

Tabel 7. Notasi dan Input Kekuatan *Link* CLT dan Beton

SAP2000	Gavric	Nilai
Stiffness U1	$kel.3$	2,09 kN/mm
Stiffness U2	$kel.2$	2,53 kN/mm
Stiffness U3	$kel.1$	Rigid

3.4 Kontrol Dimensi Penampang CLT yang Menahan Lentur

Dimensi penampang CLT harus dikontrol terhadap kapasitasnya agar tidak terjadi kegagalan sobek [14]. Tahanan terhadap

momen lentur dihitung dengan batasan sebagai berikut:

$$M_b \leq 1,72 S_{eff} \quad (7)$$

$$S_{eff} = \frac{2(EI)_{eff}}{E_i a} \quad (8)$$

dengan:

M_b = Momen hasil analisa 3D

S_{eff} = modulus penampang efektif

Sedangkan untuk batas tahanan terhadap geser tegak lurus bidang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V_{plannar} \leq 1,36 \left(\frac{lb}{Q} \right)_{eff} \quad (9)$$

$$\left(\frac{lb}{Q} \right)_{eff} = \frac{EI_{eff}}{\sum_{i=1}^{n/2} E_i h_i z_i} \quad (10)$$

dengan $V_{plannar}$ adalah gaya geser hasil analisa dinamik.

Batas defleksi pada elemen lentur dapat dicari dengan pendekatan sebagai berikut:

$$\Delta = \frac{K_i w l^2}{EI_{app}} \quad (11)$$

$$EI_{app} = \frac{EI_{eff}}{1 + \frac{K_s EI_{eff}}{GA_{eff} L^2}} \quad (12)$$

dengan:

$$K_i = (6/5)(k_s / k_b)$$

w = beban merata

l = panjang elemen

3.5 Kontrol Dimensi Penampang CLT yang Menahan Aksial-Lentur

Berdasarkan SNI 7973:2013 [15] Standar bangunan kayu, kapasitas komponen yang menahan aksial-lentur dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$\left[\frac{F}{2,16 A_{parallel}} \right]^2 + M_{CLT} \leq 1,0 \quad (13)$$

$$M_{CLT} = \frac{M_b + P \times e \left(1 + \frac{0,234F}{P_{cE}} \right)}{1,72 S_{eff} \left(1 - \frac{F}{P_{cE}} \right)} \quad (14)$$

$$P_{cE} = \frac{0,822 E_{min}'}{(l_e/d)^2} \quad (15)$$

dengan:

F = gaya aksial

P_{cE} = beban tekuk kritis

$A_{parallel}$ = luas lapisan yang arah seratnya paralel dengan beban yang ditanggung

e = eksentrisitas gaya aksial diukur tegak lurus terhadap panel

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan terhadap berat struktur, didapati bahwa total berat struktur yang tersusun dari panel-panel CLT lebih ringan, yaitu sebesar hanya $\pm 25\%$ dari berat struktur beton bertulang. Adapun perbedaan teknis struktur beton bertulang dengan struktur CLT dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Perbandingan Struktur Dengan Beton Bertulang dan CLT

Data teknis	Beton bertulang	CLT
Berat struktur	51883,4 kN	10223,59 kN
Tebal slab	± 12 cm	± 19 cm
Tebal dinding	± 20 cm	± 19 cm
Elemen lentur	Kolom	Slab CLT
Elemen aksial-lentur	Balok	Dinding CLT

Berat struktur yang lebih ringan berakibat pada nilai beban lateral yang lebih kecil. Beban lateral yang bekerja pada struktur didistribusikan secara vertikal pada tiap lantai sebagai beban diafragma seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 9**. Sedangkang dari hasil analisis didapatkan kapasitas geser per lantainya sekitar 5345,65 kN.

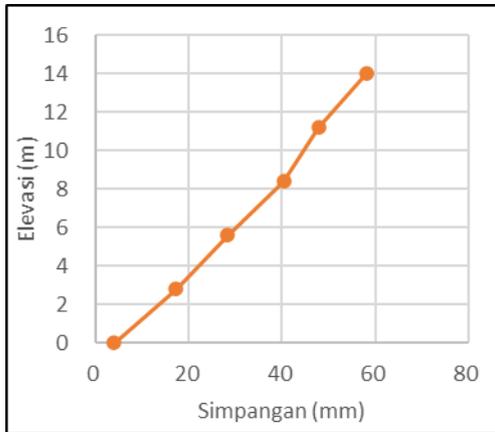
Tabel 9. Beban Lateral Desain Pada Diafragma Arah x dan Arah y

Lantai ke-	F_x kN	F_y kN
5	306,69	601,39
4	384,89	769,78
3	216,50	433,00
2	96,22	192,44
1	24,06	48,11

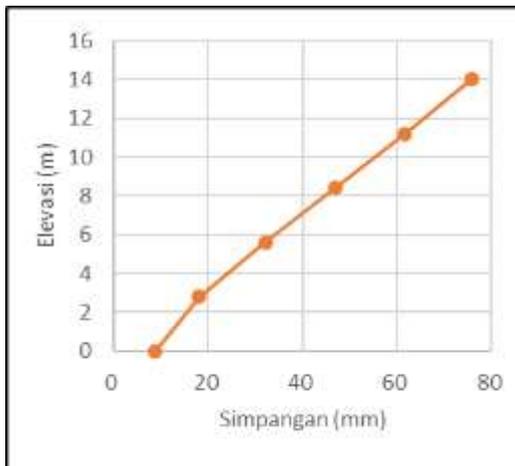
Ketika struktur dikenai beban lateral, maka struktur akan berdeformasi atau menyimpang searah dengan arah beban. Simpangan terbesar pada ujung bangunan akibat beban lateral arah x dapat dilihat pada **Gambar 7**. Sedangkan simpangan terbesar arah y dapat dilihat pada **Gambar 8**.

Gambar 7 dan **Gambar 8** menunjukkan bahwa simpangan pada arah y lebih besar dibandingkan arah x. Hal ini dikarenakan lebar gedung hanya sekitar 0,33 dari panjang bangunan sehingga mengindikasikan kekakuan yang lebih kecil. Perbandingan nilai simpangan

yang telah dikalikan dengan faktor amplifikasi, C_d , terhadap batas sesuai SNI 1726:2012 [16] dapat dilihat pada **Tabel 10**.



Gambar 7. Grafik Simpangan Pada Arah x



Gambar 8. Grafik Simpangan Pada Arah y

Tabel 10. Simpangan Antar Lantai

Lantai	Simpangan arah x		Simpangan arah y	
	Output rad	Batas rad	Output rad	Batas rad
5	0,007	0,02	0,010	0,02
4	0,008	0,02	0,010	0,02
3	0,008	0,02	0,010	0,02
2	0,008	0,02	0,010	0,02
1	0,010	0,02	0,006	0,02

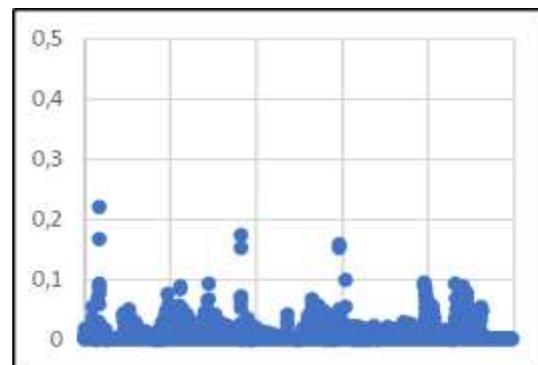
*batas simpangan mengacu pada SNI 1726:2012

Selain itu, dari hasil analisa 3D didapatkan nilai gaya-gaya yang bekerja. Pada panel dinding CLT tanpa bukaan, interaksi akibat aksial-lentur setelah analisa dengan Persamaan 13 dapat dilihat pada **Gambar 9**, sedangkan untuk panel dinding CLT dengan bukaan dapat dilihat pada **Gambar 10**. Dari hasil ini didapatkan bahwa gaya aksial-lentur

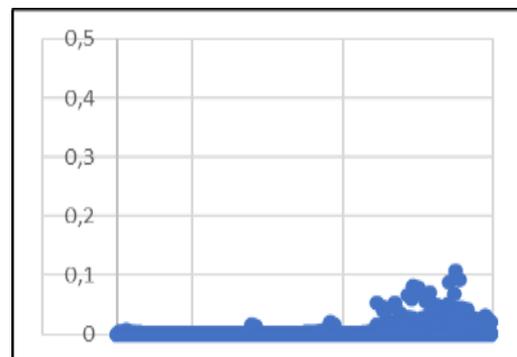
yang mengenai panel masih lebih kecil dari pada kapasitasnya.

Gambar 9 dan **Gambar 10** menunjukkan gaya yang bekerja pada elemen aksial-lentur masih jauh lebih kecil dari pada kapasitas panel, baik pada panel tanpa bukaan atau panel dengan bukaan.

Pada elemen lentur atau pelat, tercatat hasil gaya dalam terbesar adalah 233,84 kNm/m sedangkan kapasitas elemen adalah sebesar 292,28 kNm/m. Pada penelitian ini, pelat dimodelkan sebagai rigid sehingga perhitungan terhadap kebutuhan sambungannya tidak termasuk dalam lingkup pembahasan.



Gambar 9. Grafik Gaya yang Bekerja Pada Elemen Dinding Tanpa Bukaan



Gambar 10. Grafik Perbandingan Gaya yang Bekerja dan Kapasitas Elemen Dinding Dengan Bukaan

Selanjutnya, dari hasil analisa gaya-gaya terbesar yang bekerja pada panel, didapatkan pula total kebutuhan konektor di tiap lantai. Hal ini dapat dilihat pada **Tabel 11**.

Hasil analisa terhadap defleksi terbesar yang terjadi pada panel lantai adalah sebesar 8,6 mm, sedangkan batas defleksi maksimum yang diizinkan adalah 68 mm. Sehingga dapat dikatakan dengan pelat setebal 190 mm tanpa

balok mampu menahan beban terbesar bangunan.

Tabel 11. Jumlah Konektor yang Dibutuhkan per Lantai

Lantai ke-	Gaya geser kN	Jumlah konektor Unit
5	1572,25	96
4	3584,73	216
3	4716,75	284
2	5219,87	316
1	5345,65	322

5. KESIMPULAN

Hasil analisa dengan pemodelan 3D menggunakan *software* SAP2000 menunjukkan bahwa bangunan dengan CLT menghasilkan berat struktur yang lebih ringan dibandingkan dengan beton. Di samping itu simpangan antar lantai bangunan dengan CLT akibat beban seismik masih memenuhi batas persyaratan. Hal ini mengindikasikan bahwa CLT dapat digunakan sebagai material utama bangunan kelas menengah yang mampu menahan beban lateral.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lu, W., Chen X., Peng., & Shen, L. Benchmarking construction waste management performance using big data. *Resources, Conservation, and Recycling Journal*, v.105, pp 49-58, 2015.
- [2] Lehmann, S. Sustainable Construction for Urban Infill Development using Engineered Massive Wood Panel Systems, *Sustainability Journal*, v.4, n.10, pp 2707-2742, 2012.
- [3] Brandner, R., et al, Cross laminated timber (CLT): overview and development, *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 74, n. 3, pp 331-351, 2016.
- [4] Brandon, D. & Dagenais, C. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings Phase 2: Task 5: Experimental Study of Delamination of Cross Laminated Timber in Fire. Fire Protection Research Foundation.
- [5] Julien, F. Manufacturing cross-laminated timber (CLT): technological and economic analysis, report to Quebec Wood Export Bureau. Quebec. 2010
- [6] SNI 1726:2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung
- [7] Pei, S., Lindt, J. W., & Popovski, M. Approximate R-Factor for Cross-Laminated Timber Walls in Multisrotty Buildings. *Journal of Architectural Engineering, ASCE*, 19(4), 245-255, 2013
- [8] Dujic, B. Shear capacity of Cross-Laminated Wooden Walls. *Doctoral dissertation: University of Ljubljana, Slovenia*, 2006.
- [9] Maldonado, S. A., & Chui, Y. H. Vibrational Performance of Cross-Laminated Timber, 2012
- [10] Okabe, M., Yasumura, M. Kobayashi, K., Fujita, K. Prediction of bending stiffness and moment carrying capacity of sugi cross-laminated timber. *Journal of Wood Science*, 60(1).
- [11] Yasumura, M., Kenji, K., Okabe, M., Miyake, T., & Matsumoto, K. Full scale tests and numerical analysis of Low-Rise CLT Structures under Lateral Loading. *J. Struct. Eng* 142 (4), 2015
- [11] Sni 1727:2013 Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain
- [13] Gagnon, S., Popovski, M., & Pirvu, C. CLT Handbook Canadian Edition. Quebec: FPInnovations, 2011
- [14] Gavric, I. Seismic Behaviour of Cross-Laminated Timber for Buildings. *Dissertation University of Trieste Italy*, 2009.
- [15] SNI 7973:2013 Spesifikasi desain untuk konstruksi kayu
- [16] SNI 1726:2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung