

PERILAKU STATIK DAN DINAMIK DINDING GESER RANGKA *LAMINATED VENEER LUMBER* DENGAN PANEL *FIBER CEMENT BOARD*
The Static And Dynamic Behavior Of Shear Wall With Laminated Veneer Lumber Frame And Fiber Cement Board Sheathed

Maryoko Hadi

Pusat Litbang Permukiman, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum

Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan, Kabupaten Bandung 40393

E-mail : maryokohadi@puskim.pu.go.id

Diterima : 11 Agustus 2014; Disetujui : 13 Oktober 2014

Abstrak

*Dinding geser dengan dan tanpa bukaan telah lazim digunakan sebagai elemen struktural, baik sebagai dinding maupun partisi antar ruang pada rumah tinggal di Indonesia. Rumah harus tetap berdiri ketika gempa bumi datang dan menimbulkan gaya inersia yang mendorong rumah pada arah horisontal. Tipe alternatif struktur komposit yang terbuat dari kayu dan bahan berbasis semen diharapkan dapat memenuhi kebutuhan rumah tahan gempa di Indonesia. Untuk dapat memahami mekanisme ketahanan dinding geser terhadap gaya gempa, diperlukan kajian perilaku terhadap beban siklik statik, dan beban dinamik. Kajian ekperimental statik dan dinamik dengan spesimen skala-penuh dilakukan pada dinding geser yang terbuat dari rangka kayu rekayasa Laminated Veneer Lumber (LVL) berbahan dasar kayu Sengon (*Paraserianthes Falcataria*) dan kayu Karet (*Hevea Brasiliensis*), dengan panel penutup rangka Fiber Cement Board (FCB). Analisis hasil uji dengan pendekatan teoritis, dilakukan untuk dapat memprediksi kekakuan awal statis dan kuat leleh serta sifat dinamik dasar dinding geser LVL & FCB. Untuk perilaku statik, hasil yang baik diperoleh dari perbandingan antara hasil pengujian dan prediksi teoritis berdasarkan model mekanika yang diusulkan. Sedangkan, untuk perilaku dinamik, hasil tidak cukup baik karena ada efek lentur dan guling pada spesimen. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini akan berguna untuk praktisi dan perancang struktur dalam merancang struktur rumah kayu tahan gempa dengan kinerja tinggi namun dengan biaya konstruksi rendah.*

Kata kunci : Perilaku dinding geser komposit, tahan gempa, LVL, FCB, model mekanika

Abstract

*The shear wall with and without openings that served as a structural element or/and partition wall was utilized in a low-cost housing for the low-income people in Indonesia. The houses, however, should be withstood from earthquake inertial force, so there must be no casualties when disaster struck. The alternative types of composite structure made of wood and cement based building materials needed to meet with the high demand for earthquake-resistant houses in Indonesia. In order to understand the mechanism of earthquake resisting performance of shear wall, we needs to investigate behavior of shear walls not only for cyclic static but also for dynamic loading. In this study, the series of full-scale experiment on timber frame shear walls with and without openings, compose of Laminated Veneer Lumber (LVL) engineered wood (*Paraserianthes Falcataria* and *Hevea Brasiliensis*) and sheathed by Fiber Cement Board (FCB), was carried out. By analyzing testing result using theoretical approaches, intended to predict static initial stiffness and yielding strength as well as basic dynamic properties shear walls. For static behavior, good agreements were obtain from comparison between experiment and theoretical prediction based on mechanical model. While, for dynamic behavior, agreement was not sufficient due to the effect of bending and rocking of actual test specimens. The information obtain by this study will be useful for practical engineers or structural designers to design the high performance earthquake resisting timber houses with a low construction cost.*

Keywords : Composite shear wall behavior, earthquake-resistant, LVL, FCB, mechanical mode

PENDAHULUAN

Kebutuhan rumah di Indonesia bagi masyarakat berpenghasilan rendah meningkat dari tahun ke tahun, sehingga desain rumah dengan persyaratan tahan gempa, sehat, sederhana dan cepat dalam proses konstruksi dengan biaya konstruksi yang rendah sangat diperlukan. Untuk tujuan ini, telah dilakukan penelitian eksperimental dan analitis

dinding geser yang terbuat dari kayu rekayasa LVL dan papan serat semen (*Fiber Cement Board*; FCB) sebagai penutup dinding satu sisi tanpa dan dengan bukaan untuk diterapkan sebagai elemen struktural pada rumah kayu tahan gempa sistem struktur panel yang murah. Sementara dalam situasi desain yang sebenarnya, perlu untuk merancang berbagai jenis dinding geser yang

memiliki bukaan jendela atau dan pintu. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, dilakukan pengkajian pada dinding geser dengan, dan tanpa bukaan.

Penelitian mengenai struktur rumah kayu yang dirancang dengan memanfaatkan dinding geser dengan dan tanpa bukaan terbuat dari rangka kayu dan berbagai bahan penutup telah dilakukan di masa lalu oleh banyak peneliti (Cheung, Itani, Lindt, Sugiyama, 1988, 1982, 2004, 1995). Dalam penelitian ini, tidak hanya sifat statik tetapi juga mengenai sifat dinamik dasar seperti frekuensi alami dan koefisien redaman, yang diperkirakan untuk memahami pengaruh bukaan dinding pada sifat mekanis dasar dinding geser berpenutup FCB dengan pengikat paku, untuk dipasang di rumah-rumah hunian kayu.

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental yang dilanjutkan dengan membandingkan hasil eksperimental dengan hasil prediksi secara teoritis.

Dalam kajian eksperimental, dilakukan uji bahan, uji dinamik dan uji siklik statik terhadap spesimen dinding geser rangka kayu LVL dan panel penutup FCB. Sedangkan pada kajian teori, dilakukan penyusunan model mekanika untuk memprediksi perilaku spesimen dinding geser ketika diberikan beban horisontal gempa pada arah sejajar dinding.

Identifikasi bahan yang digunakan dalam pembuatan spesimen dilakukan dengan kompilasi data sekunder.

Bahan Rangka Kayu LVL

Kayu rekayasa LVL terbuat dari kayu Sengon (*Paraserianthes Falcataria*) dan kayu Karet (*Hevea Braziliensis*) dengan ukuran batang 45×90×3.000 mm digunakan sebagai bahan rangka (Gambar 1). Data sifat mekanis dan fisis bahan tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1 Sifat Mekanis dan Fisis Bahan LVL

Properties	Nilai	Satuan
Kadar air	10.7	(%)
Kerapatan	540	(kg/m ³)
Modulus elastisitas lentur;	7511	(MPa)
Modulus patah lentur;	62.2	(MPa)

Sumber : Tjondro, 2006



Gambar 1 Kayu LVL yang Digunakan untuk Rangka Dinding Geser



Gambar 2 Papan Semen FCB Digunakan untuk Panel Penutup Rangka Dinding Geser

Bahan Penutup Rangka Panel FCB

Bahan penutup rangka adalah FCB dengan kandungan Silika (35 % berat), Kalsium (35 % berat), bahan kertas dan serat kayu (15 % berat) dan bahan lainnya (15 % berat) diproduksi oleh perusahaan Jepang dengan ukuran 1.800×900×12 mm seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. Sifat mekanis FCB dicantumkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Sifat Fisik dan Mekanik FCB

Properti	Nilai	Satuan
Kerapatan	1220	(kg/m ³)
Modulus Elastisitas; MOE ⁽¹⁾	31.67	(kN/mm ²)
Modulus Geser; G ⁽¹⁾	700	(N/mm ²)

⁽¹⁾Katalog Produsen (tidak diterbitkan)

Pengikat Paku

Paku berbahan baja digunakan sebagai pengikat pada sambungan antar komponen rangka, dan dengan panel penutup. Dua jenis paku digunakan pada spesimen dinding geser, adapun spesifikasi paku dicantumkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Spesifikasi Paku

Nama	Diameter (mm)	Panjang (mm)	Keterangan
N75	2.85	75	Antara penutup dan batang rangka
N100	3.7	100	Antara batang rangka

Paku N100 digunakan untuk pengikat antar batang rangka kayu LVL dan paku kepala ganda yang setara dengan N75 yang ditunjukkan pada Gambar 3, digunakan sebagai pengikat antara penutup rangka FCB dengan batang rangka dinding geser. Paku kepala ganda digunakan untuk kemudahan dalam pembongkaran spesimen.



Gambar 3 Paku yang Digunakan untuk Mengikat Penutup Dinding dengan Rangka Kayu

Metoda Uji Bahan

Studi eksperimental di laboratorium dimulai dengan uji geser paku tunggal koneksi antara LVL dan FCB dilakukan untuk mendapatkan hubungan beban dan selip yang terjadi, yang mendominasi perilaku non-linear dari dinding geser. Ukuran LVL adalah 45 × 90 × 300 mm dan FCB dengan tebal 12 mm, diikat dengan menggunakan paku kepala ganda N75 seperti yang ditunjukkan pada Gambar

4. Uji kecepatan adalah 1 mm per menit pada *Universal Testing Machine* (UTM).



Gambar 4 Spesimen Uji Geser Paku Tunggal Antara LVL dan FCB yang Diikat Oleh Paku N75 Kepala Ganda, Paralel Arah Serat Di Bawah Mesin Uji



Gambar 5 Spesimen Uji Geser Paku Tunggal Antara LVL dan FCB yang Diikat Oleh Paku N75 Kepala Ganda, Tegak Lurus Arah Serat Di Bawah Mesin Uji

Metode Uji Dinamik Menggunakan Alat Eksitasi Goyang

Uji dinamik dilakukan untuk mendapatkan nilai-nilai frekuensi alami dan faktor redaman pada setiap spesimen, pengujian dilakukan sebelum pelaksanaan uji siklik statik. Hal ini dilakukan karena uji dinamik merupakan uji yang tidak merusak spesimen. Pengujian dilakukan dengan memasang spesimen pada landasan rangka baja reaksi dengan menggunakan 4 baut angker baja, sehingga diasumsikan posisi spesimen tidak bergeser ketika dibebani secara horisontal. Mesin penggoyang dipasang di bagian atas spesimen dengan kencang, sehingga spesimen bebas untuk bergoyang horisontal pada arah yang sama ketika beban statik horisontal bekerja.

Uji dinamik dilakukan dengan menggunakan mesin eksitasi goyang portabel (DTH-500-30, *Asahi-Corp.*) yang ditunjukkan pada gambar 6, dapat menghasilkan getaran horisontal harmonis. Eksitasi Nominal mesin adalah 490 N, percepatan maksimum nominal tanpa beban mati adalah 7.3 m/s^2 dan berat bagian bergerak dari mesin itu 27kg (mesin), 40kg (berat tambahan), sehingga berat total 67kg.



Gambar 6 Mesin Eksitasi Goyang Portabel Tipe DTH-500-30, Buatan Asahi, Jepang

Metode Uji Siklik Statik

Metode uji untuk spesimen dinding geser skala penuh dilakukan pada rangka baja uji struktur yang kaku. Sebagai beban yang diberikan pada

spesimen berupa dongkrak hidrolik dengan kapasitas 500 kN yang dapat bergerak dorong dan tarik sebagai simulasi siklik statik dan kapasitas 500 mm untuk langkah beban. Pembebanan diberikan pada arah sejajar dinding, tanpa ada beban gravitasi tambahan. Metode pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini tentatif ditentukan sesuai dengan metode pengujian dinding geser di *Laboratory of Structural Function, Kyoto University*. Pada pengujian ini, hanya satu beban siklik di setiap target deformasi sudut digunakan, seperti yang ditunjukkan pada berikut;

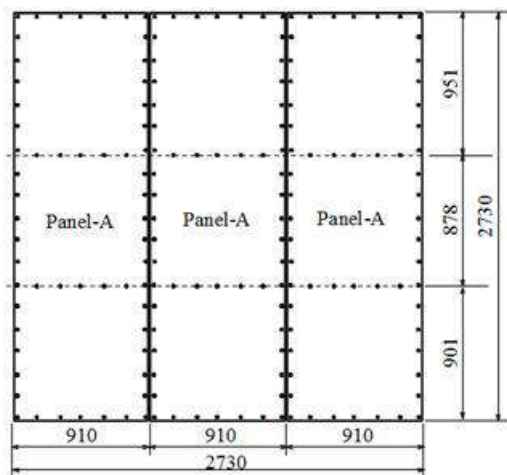
Siklus 1 : $0 \rightarrow + 1/300 \text{ rad} \rightarrow - 1/300 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Siklus 2 : $0 \rightarrow + 1/200 \text{ rad} \rightarrow - 1/200 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Siklus 3 : $0 \rightarrow + 1/150 \text{ rad} \rightarrow - 1/150 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Siklus 4 : $0 \rightarrow + 1/100 \text{ rad} \rightarrow - 1/100 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Siklus 5 : $0 \rightarrow + 1/75 \text{ rad} \rightarrow - 1/75 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Siklus 6 : $0 \rightarrow + 1/60 \text{ rad} \rightarrow - 1/60 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Siklus 7 : $0 \rightarrow + 1/30 \text{ rad} \rightarrow - 1/30 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Siklus 8 : $0 \rightarrow + 1/15 \text{ rad} \rightarrow - 1/15 \text{ rad} \rightarrow 0$
 Pembebanan akhir : $0 \rightarrow + P_{\max} \rightarrow - P_{\max} \rightarrow 0$

Pembebanan ini dilakukan sampai spesimen mengalami keruntuhan dan tidak memiliki lagi kekuatan untuk menahan beban.

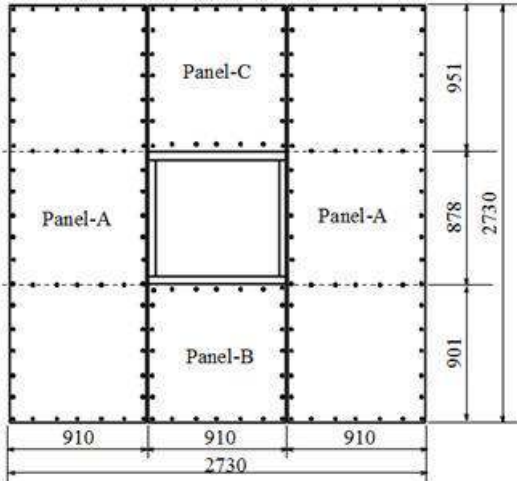
Spesimen Dinding Geser

Tiga jenis spesimen dinding geser telah disiapkan, terdiri dari kayu LVL berpenampang $45 \times 90 \text{ mm}$ sebagai batang rangka yang diikat dengan paku N100 dan panel FCB sebagai penutup rangka pada satu sisi dengan ukuran $910 \times 2730 \text{ mm}$ dipaku pada batang rangka oleh paku N75 berkepala ganda. Jarak antar paku di semua jenis dinding geser adalah 150 mm. Spesimen dinding geser tanpa bukaan disebut sebagai SWS (Gambar 7).

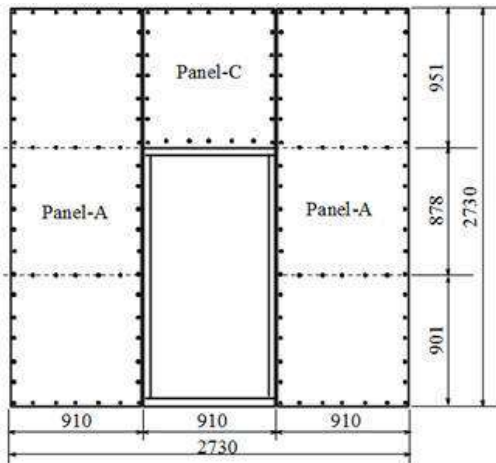
Tipe dinding geser dengan bukaan jendela disebut sebagai SWWOS, di mana ukuran bukaan adalah $910 \times 878 \text{ mm}$ (Gambar 8). Dan tipe dinding geser dengan bukaan pintu disebut sebagai SWDOS; ukuran bukaan adalah $910 \times 1777 \text{ mm}$ (Gambar 9).



Gambar 7 Spesimen Tipe Dinding Geser Tanpa Bukaan (SWS)

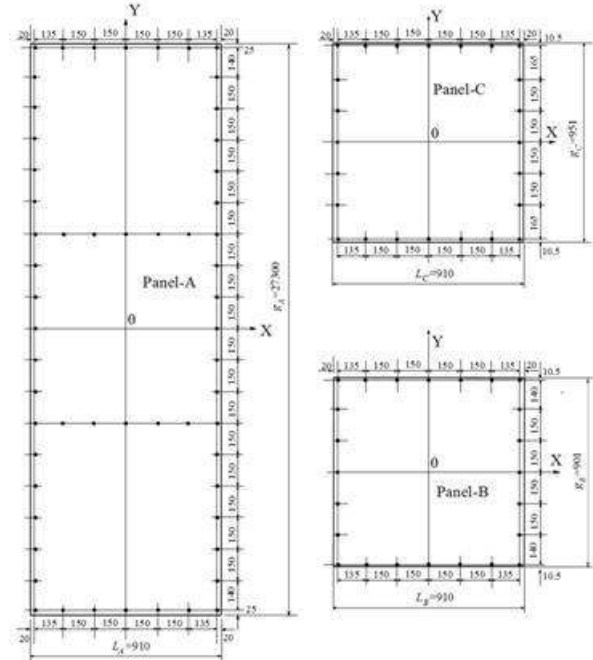


Gambar 8 Spesimen Dinding Geser Tipe Bukaannya Jendela (Swwos)

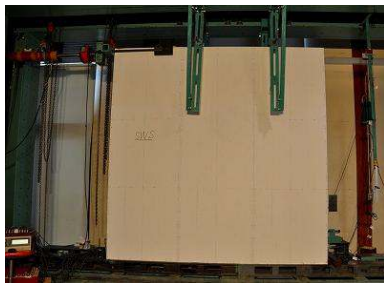


Gambar 9 Spesimen Dinding Geser Tipe Bukaannya Pintu (Swdos)

Semua spesimen terdiri dari tiga ukuran panel FCB yaitu; panel A, panel B dan C memiliki pola pemakuan berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Berdasarkan tiga macam panel, model mekanika dibentuk untuk memprediksi kinerja dinding geser terhadap beban siklik statik pada tiga dinding geser yang berbeda.



Gambar 10 Pola Pemakuan Pada Panel A, B dan C



Gambar 11 Spesimen Dinding Geser Tanpa Bukaannya (Sw) Siap Diuji



Gambar 12 Spesimen Dinding Geser Dengan Bukaannya Jendela (Swwos) Siap Diuji



Gambar 13 Spesimen Dinding Geser Dengan Bukaannya Pintu (Swdos) Siap Uji

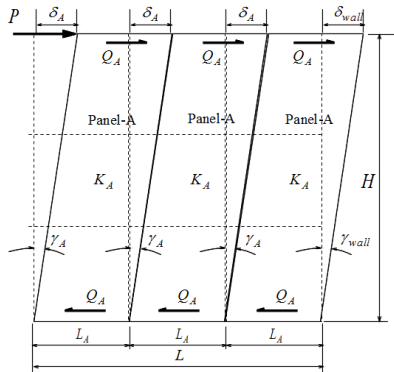
HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi Teori dan Analitik

Model mekanika dari masing-masing dinding geser ditentukan dengan mengambil bukaan sebagai pertimbangan untuk memprediksi kinerja

fundamental dari masing-masing dinding geser. Untuk melakukan proses perhitungan yang sederhana, panel individu diasumsikan berbagi sudut deformasi geser yang sama dengan satu sama lain dalam kondisi elastik, setidaknya sampai hampir terjadinya kelelahan.

Model Mekanika Tipe Dinding Tanpa Bukaannya (SWO)



Gambar 14 Model Mekanika Pada Tipe Dinding Tanpa Bukaannya Dengan Tiga Buah Panel A

Pada jenis dinding geser tanpa bukaannya, mekanisme distribusi gaya dan responnya diasumsikan bahwa tiga panel yang sama berbagi dengan deformasi geser yang sama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14 dari kondisi ekuilibrium momen eksternal dan internal sesuai dengan persamaan (1).

$$PH = 3(Q_A H) \tag{1}$$

Pada kondisi kompatibilitas semua panel harus berbagi sudut deformasi yang sama,

$$\frac{w_{wall}}{H} = \frac{A}{H} \tag{2}$$

Kekakuan geser panel-A dinyatakan dalam persamaan (3) dan (4) sesuai dengan saran yang dibuat oleh Murakami dan Inayama (1999).

$$A = \frac{1}{K_A} Q_A = H \left(\frac{1}{G_{CFB} \cdot t \cdot L_A} + \frac{1}{K_{nA}} \right) Q_A$$

$$\rightarrow \frac{1}{K_A} = H \left(\frac{1}{G_{CFB} \cdot t \cdot L_A} + \frac{1}{K_{nA}} \right) \tag{3}$$

$$K_{nA} = \frac{1}{H} \frac{K_{si}(y_i - y_0)^2 + K_{si}(x_i - x_0)^2}{K_{si}(y_i - y_0)^2 + K_{si}(x_i - x_0)^2}$$

$$= \frac{K_s}{H} \times \frac{I_y \times I_x}{I_y + I_x} \tag{4}$$

$$I_x = (x_i - x_0)^2 \quad I_y = (y_i - y_0)^2$$

dimana,

- G_{CFB} : kekakuan geser FCB (N/mm²)
- t : ketebalan PSS (mm)
- L_A : panjang Panel-A (mm)

K_s : modulus selip paku ketika mengikat FCB dengan rangka LVL (N/mm)

K_A : kekakuan geser total panel-A (N/mm)

K_{nA} : kekakuan geser parsial panel-A karena selip paku (N/mm)

x_i, y_i : koordinat x,y paku ke i nail pada Panel-A (Lihat Gambar 10)

x_0, y_0 : pusat rotasi Panel-A (Lihat Gambar 10)

Akhirnya, hubungan antara gaya geser eksternal p dan dinding sudut rotasi γ_{wall} diperoleh sebagai,

$$P = 3Q_A = 3K_A A = 3K_A H \gamma_{wall} = K_{Global} \times \gamma_{wall} \tag{5}$$

$$K_{Global} = 3K_A H \tag{6}$$

Gaya yang bekerja pada paku ke i pada arah x dinyatakan dalam persamaan (7) dengan asumsi masing-masing modulus selip memiliki nilai yang sama dari K_s ;

$$p_{xi} = K_{si}(y_i - y_0) = K_s (y_i - y_0) \tag{7}$$

sudut rotasi arah x dinyatakan dalam persamaan (8);

$$x = \frac{Qg}{K_{si}(y_i - y_0)^2} = \frac{Q_A H}{K_s I_y} \tag{8}$$

Dengan mengkombinasikan persamaan (7) dan (8), diperoleh gaya yang bekerja pada paku ke i pada arah x, P_{xi}

$$p_{xi} = K_s (y_i - y_0) \frac{Q_A H}{K_s I_y} = \frac{Q_A H (y_i - y_0)}{I_y} \tag{9}$$

Dengan cara yang sama, paku ke i arah y dengan kekuatan P_{yi} dan rotasi sudut θ_y dinyatakan sebagai persamaan (10) dan (11);

$$p_{yi} = K_{si}(x_i - x_0) = K_s (x_i - x_0) \tag{10}$$

$$y = \frac{Qg}{K_{si}(x_i - x_0)^2} = \frac{QH}{K_s I_x} \tag{11}$$

Kombinasi dari persamaan (10) dan (11), diperoleh;

$$p_{yi} = K_s (x_i - x_0) \frac{QH}{K_s I_x} = \frac{QH (x_i - x_0)}{I_x} \tag{12}$$

Gaya resultan pada setiap sudut Panel-A, yang mungkin memberikan pelelehan penutup rangka yang dipaku, dihitung sebagai persamaan (13),

$$\begin{aligned}
 p_{c \text{ resultant}} &= \sqrt{p_{xc}^2 + p_{yc}^2} \\
 &= \sqrt{\frac{Q_A H (y_c - y_0)^2}{I_y} + \frac{Q_A H (x_c - x_0)^2}{I_x}} \\
 &= Q_A H \sqrt{\frac{(y_c - y_0)^2}{I_y} + \frac{(x_c - x_0)^2}{I_x}} \dots\dots\dots(13)
 \end{aligned}$$

Di sisi lain, hubungan antara gaya geser pada Panel-A dan kekuatan eksternal adalah;

$$Q_A = \frac{P}{3} \dots\dots\dots(14)$$

Oleh karena itu, beban leleh pada spesimen dinding geser tanpa bukaan akan diprediksi oleh persamaan (15).

$$\begin{aligned}
 \frac{PH}{3} \sqrt{\left(\frac{y_c - y_0}{I_y}\right)^2 + \left(\frac{x_c - x_0}{I_x}\right)^2} &= f_{\text{naill-u}} \\
 \rightarrow P_y &= \frac{3f_{\text{naill-u}}}{H \sqrt{\left(\frac{y_c - y_0}{I_y}\right)^2 + \left(\frac{x_c - x_0}{I_x}\right)^2}} = \frac{3f_{\text{naill-u}}}{HZ_c} \dots\dots\dots(15)
 \end{aligned}$$

dimana,

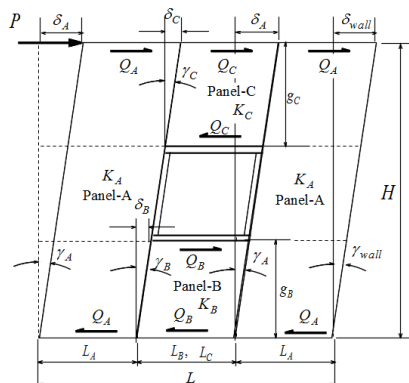
x_c, y_c : koordinat paku pada setiap pojok panel-A (mm)

$f_{\text{naill-u}}$: Kekuatan Ultimate FCB yang dipaku pada rangka LVL dan nilai ini harus ditentukan oleh hasil uji paku geser tunggal (N).

$$Z_c = \sqrt{\frac{(y_c - y_0)^2}{I_y} + \frac{(x_c - x_0)^2}{I_x}}$$

Model Mekanika Spesimen Tipe Buka Jendela SWWOS

Model mekanika dinding geser dengan bukaan jendela yang terdiri dari panel-A, B dan C ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15 Model Mekanika Dinding Geser Dengan Bukaan Jendela (SWWOS) Yang Tersusun Dari Panel-A, Panel-B Dan Panel-C

Kesetimbangan momen memberikan,

$$PH = 2(Q_A H) + Q_B g_B + Q_C g_C \dots\dots\dots(16)$$

kondisi kompatibilitas memberikan persamaan,

$$\frac{\delta_{\text{wall}}}{H} = \frac{\delta_A}{H} = \frac{\delta_B}{g_B} = \frac{\delta_C}{g_C} \dots\dots(17)$$

kekakuan geser,

$$\frac{\delta_A}{K_A} = \frac{1}{K_A} = H \frac{1}{G_{CFB} \times L_A} + \frac{1}{K_{nA}} \dots\dots\dots(18)$$

$$\frac{\delta_B}{K_B} = \frac{1}{K_B} = g_B \frac{1}{G_{CFB} \times L_B} + \frac{1}{K_{nB}} \dots\dots\dots(19)$$

$$\frac{\delta_C}{K_C} = \frac{1}{K_C} = g_C \frac{1}{G_{CFB} \times L_C} + \frac{1}{K_{nC}} \dots\dots\dots(20)$$

$$K_{nA} = \frac{K_s}{H} \times \frac{I_y \times I_x}{I_y + I_x} \dots\dots\dots(21)$$

$$K_{nB} = \frac{K_s}{g_B} \times \frac{I_y \times I_x}{I_y + I_x} \dots\dots\dots(22)$$

$$K_{nC} = \frac{K_s}{g_C} \times \frac{I_y \times I_x}{I_y + I_x} \dots\dots\dots(23)$$

Dari persamaan (16) ke (20), jumlah total gaya geser eksternal P dapat dinyatakan sebagai fungsi dari kekakuan masing-masing panel dan dimensinya sebagai,

$$\begin{aligned}
 P &= K_{\text{Global}} \times \delta_{\text{wall}} \\
 K_{\text{Global}} &= \frac{2K_A H^2 + K_B g_B^2 + K_C g_C^2}{H} \dots\dots\dots(24)
 \end{aligned}$$

Pada saat yang sama, gaya geser individu pada setiap panel dapat dinyatakan dengan menggunakan kekakuan global dari total dinding geser sebagai berikut;

$$Q_A = K_A \delta_{\text{wall}} = K_A H \frac{P}{K_{\text{Global}}} \dots\dots(25)$$

$$Q_B = K_B \frac{\delta_B}{g_B} = K_B g_B \frac{P}{K_{\text{Global}}} \dots\dots(26)$$

$$Q_C = K_C \frac{\delta_C}{g_C} = K_C g_C \frac{P}{K_{\text{Global}}} \dots\dots(27)$$

Dengan menulis kembali persamaan (13),

$$p_{c \text{ resultant}} = \sqrt{p_{xc}^2 + p_{yc}^2} = Q_A H Z_c \dots\dots\dots(13)$$

Persamaan untuk memprediksi leleh dari setiap panel, yang mungkin disebabkan oleh situasi akhir paku pada setiap sudut panel, diperoleh;

untuk Panel-A :

$$f_{nail\ u} = Q_A H Z_{cA} = K_A H^2 \frac{P_y}{K_{Global}} Z_{cA}$$

$$P_{yA} = \frac{f_{nail\ u} \times K_{Global}}{K_A H^2 Z_{cA}} \dots\dots\dots(28)$$

untuk Panel-B :

$$f_{nail\ u} = Q_B g_B Z_{cB} = K_B g_B^2 \frac{P_y}{K_{Global}} Z_{cB}$$

$$P_{yB} = \frac{f_{nail\ u} \times K_{Global}}{K_B g_B^2 Z_{cB}} \dots\dots\dots(29)$$

untuk Panel-C :

$$f_{nail\ u} = Q_C g_C Z_{cC} = K_C g_C^2 \frac{P_y}{K_{Global}} Z_{cC}$$

$$P_{yC} = \frac{f_{nail\ u} \times K_{Global}}{K_C g_C^2 Z_{cC}} \dots\dots\dots(30)$$

Dengan demikian, leleh pada dinding geser tipe bukaan jendela akan diprediksi sebagai nilai minimum dari persamaan (28) ke (30).

$$P_{y\ Window} = Min\{P_{yA}, P_{yB}, P_{yC}\} \dots\dots\dots(31)$$

Tipe Bukaan Pintu (SWDOS)

Untuk jenis dinding geser dengan bukaan pintu, yang terdiri dari dua panel A, dan satu panel C, ditunjukkan pada Gambar 15.

Ekuilibrium momen memberi,

$$PH = 2(Q_A H) + Q_C g_C \dots\dots\dots(32)$$

Kondisi kompatibilitas memberikan persamaan,

$$\frac{Wall}{H} = \frac{A}{H} = \frac{C}{g_C} \dots\dots\dots(33)$$

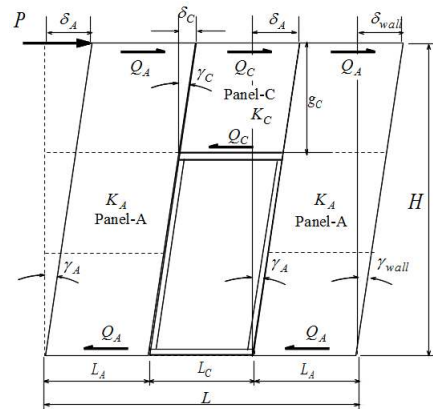
Kekakuan geser pada setiap panel adalah,

$$\frac{A}{Q_A} = \frac{1}{K_A} = H \frac{1}{G_{CFB} \times L_A} + \frac{1}{K_{nA}} \div \dots\dots\dots(34)$$

$$\frac{C}{Q_C} = \frac{1}{K_C} = g_C \frac{1}{G_{CFB} \times L_C} + \frac{1}{K_{nC}} \div \dots\dots\dots(35)$$

$$K_{nA} = \frac{K_s}{H} \times \frac{I_y \times I_x}{I_y + I_x} \dots\dots\dots(36)$$

$$K_{nC} = \frac{K_s}{g_C} \times \frac{I_y \times I_x}{I_y + I_x} \dots\dots\dots(37)$$



Gambar 15 Model Mekanika Dinding Geser Tipe Dengan Bukaan Pintu (SWDOS) Yang Terdiri Dari Panel-A Dan Panel-C

Dari persamaan (32) ke (35), jumlah gaya geser eksternal P dapat dinyatakan sebagai fungsi dari kekakuan masing-masing panel dan dimensinya sebagai,

$$P = K_{Global} \times wall$$

$$K_{Global} = \frac{2K_A H^2 + K_C g_C^2}{H} \dots\dots\dots(38)$$

Pada saat yang sama, gaya geser individu pada setiap panel dapat dinyatakan dengan menggunakan kekakuan global dari total dinding geser sebagai berikut;

$$Q_A = K_A \frac{A}{H} = K_A \frac{A}{H} H = K_A H \frac{wall}{H} = K_A H \frac{P}{K_{Global}} \dots\dots\dots(39)$$

$$Q_C = K_C \frac{C}{g_C} = K_C \frac{C}{g_C} g_C = K_C g_C \frac{wall}{g_C} = K_C g_C \frac{P}{K_{Global}} \dots\dots\dots(40)$$

Persamaan untuk memprediksi kondisi leleh untuk masing-masing panel, yang mungkin disebabkan oleh situasi akhir paku di tiap sudut panel, diperoleh;

untuk Panel-A

$$f_{nail\ u} = Q_A H Z_{cA} = K_A H^2 \frac{P_y}{K_{Global}} Z_{cA}$$

$$P_{yA} = \frac{f_{nail\ u} \times K_{Global}}{K_A H^2 Z_{cA}} \dots\dots\dots(41)$$

untuk Panel-C :

$$f_{nail\ u} = Q_C g_C Z_{cC} = K_C g_C^2 \frac{P_y}{K_{Global}} Z_{cC}$$

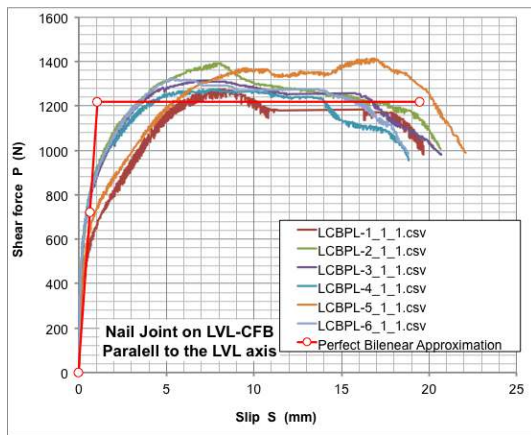
$$P_{yC} = \frac{f_{nail\ u} \times K_{Global}}{K_C g_C^2 Z_{cC}} \dots\dots\dots(42)$$

Dengan demikian, kondisi leleh pada dinding geser tipe bukaan pintu akan diprediksi sebagai nilai minimum dari persamaan (41) dan (42).

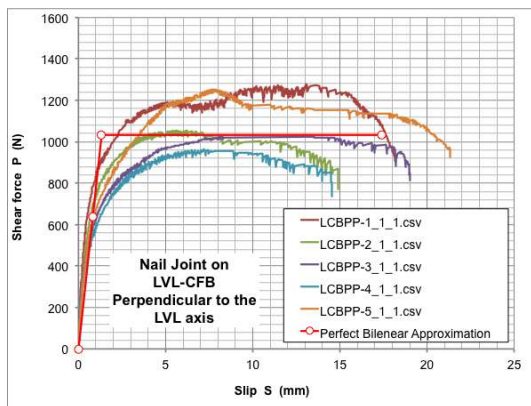
$$P_{y Door} = \text{Min}\{P_{yA}, P_{yC}\} \dots\dots\dots (43)$$

Uji Sambungan Dengan Pengikat Paku

Modulus selip dan kekuatan ultimit dari geser paku tunggal pada sambungan LVL dengan penutup dinding FCB yang dievaluasi sesuai dengan metode berdasarkan pendekatan prinsip kesetaraan energi menggunakan hubungan bilinear seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16 dan 17.



Gambar 16 Hasil Uji Geser Paku Tunggal Pada Koneksi Kayu LVL Dan Panel FCB Pada Arah Sejajar Serat Kayu LVL



Gambar 17 Hasil Uji Geser Paku Tunggal Pada Koneksi Kayu LVL Dan Panel FCB Pada Arah Tegak Urus Serat Kayu LVL

Untuk perhitungan kekakuan dinding geser, nilai rata-rata kekakuan awal diperkirakan dari hasil uji pengikatan kayu dengan paku, baik arah beban paralel dan tegak lurus serat kayu LVL digunakan sebagai modulus selip, sedangkan untuk prediksi beban leleh spesimen dinding geser, nilai kekuatan paku ultimit yang paling rendah digunakan, hal ini diperoleh dari hasil uji paku dengan arah beban tegak lurus serat kayu LVL, yaitu;

$$K_s = 1.04 \text{ kN / mm}, f_{nail-u} = 1.03 \text{ kN}$$

Perbandingan Antara Hasil Uji Statik Dan Prediksi Secara Teoritis

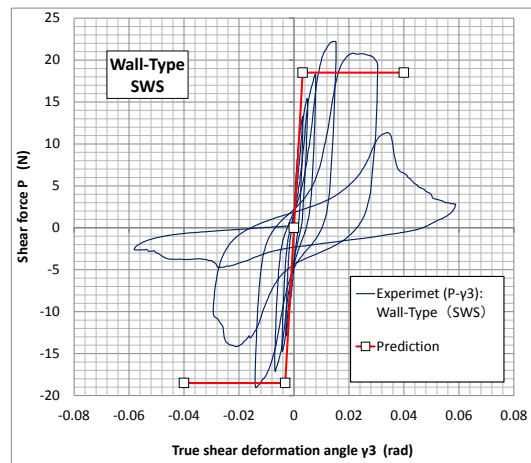
Kerusakan khas yang terjadi pada ketiga spesimen menunjukkan kesamaan, yaitu kegagalan pertama terjadi pada paku yang berlokasi disudut panel dengan merobek dari panel. Ditunjukkan pada Gambar 18,19,21,22,24,25.



Gambar 18 Kondisi Spesimen Dinding Geser Pada Akhir Pengujian



Gambar 19 Panel FCB Terkoyak Dan Terlepas Dari Batang Rangka Kayu LVL



Gambar 20 Perbandingan Antara Perhitungan Dan Pengamatan Pada Spesimen Dinding Geser Tipe Tanpa Bukaan (SWS)

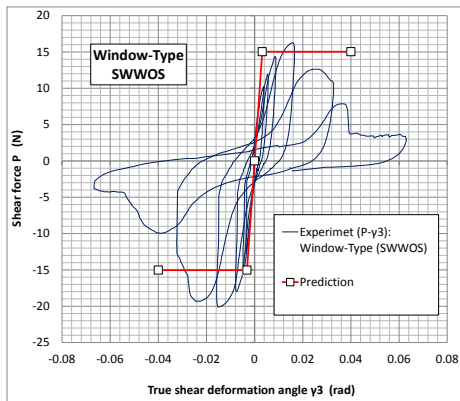
Gambar 20, 23 dan 26 menunjukkan perbandingan antara beban yang diamati (P), hubungan antara sudut deformasi akibat geser murni (γ_3) dengan hasil prediksi menggunakan, persamaan (5) dan (15) untuk spesimen dinding geser tipe tanpa bukaan (SWS), persamaan (24) dan (31) untuk spesimen dinding geser tipe dengan bukaan (SWWOS) dan persamaan (38) dan (43) untuk spesimen dinding geser tipe dengan tipe bukaan pintu (SWDOS).



Gambar 21 Kondisi Akhir Pengujian Spesimen Dinding Geser Dengan Bukaan Jendela (SWWOS)



Gambar 22 Panel-B Terlepas Dari Rangka Kayu LVL Dinding Geser Dengan Bukaannya Jendela (SWWOS)



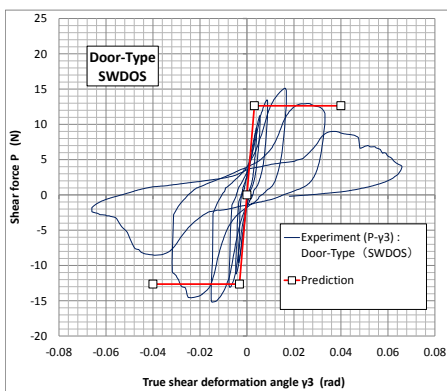
Gambar 23 Perbandingan Antara Perhitungan Dan Pengamatan Pada Spesimen Dinding Geser Tipe Dengan Bukaannya Jendela (SWWOS).



Gambar 24 Kondisi Akhir Pengujian Spesimen Dinding Geser Dengan Bukaannya Pintu (SWDOS)



Gambar 25 Panel-B Terlepas Dari Rangka Kayu LVL Spesimen Dinding Geser

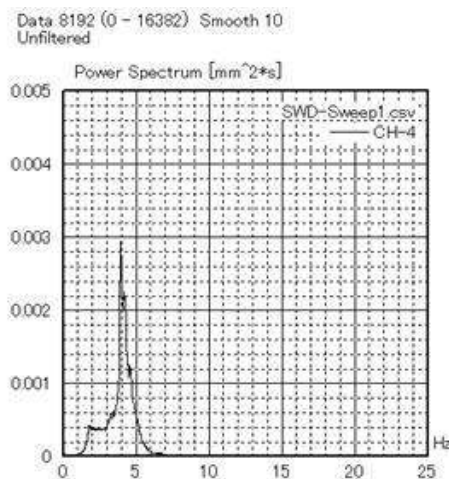


Gambar 26 Perbandingan Antara Perhitungan Dan Pengamatan Pada Spesimen Dinding Geser Tipe Dengan Bukaannya Pintu (SWDOS)

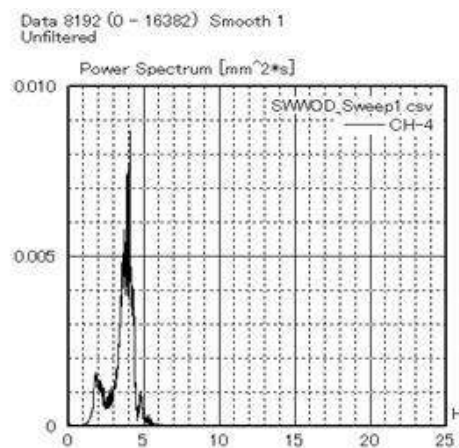
Dengan kemiripan hasil prediksi dengan hasil pengujian struktur di laboratorium, maka persamaan yang dibangun berdasarkan kaidah mekanika dapat di gunakan dalam proses perancangan struktur dinding geser rangka kayu LVL atau sejenis dengan panel penutup FCB atau sejenis, dengan menggunakan parameter modulus selip paku yang diperoleh dari pengujian bahan rangka dan panelnya.

Uji Dinamik

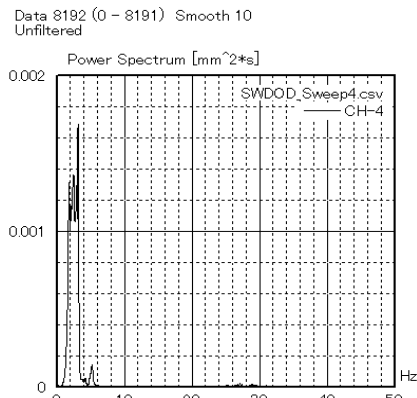
Gambar 27, 28 dan 29 menunjukkan diagram spektrum spesimen untuk dinding geser (SWD), (SWWOD) dan (SWDOD). Frekuensi alami spesimen dinding tanpa bukaannya adalah 4.31Hz dan itu tertinggi di antara tiga spesimen, seperti yang diharapkan. Frekuensi alami tipe bukaannya jendela adalah 3.86Hz dan itu adalah nilai tengah di antara ketiganya dan tipe bukaannya pintu adalah 3.14Hz dan itu adalah yang terendah seperti yang diharapkan.



Gambar 27 Diagram Spektrum Spesimen Dinding Geser Tipe Tanpa Bukaannya SWD



Gambar 28 Diagram Spektrum Spesimen Dinding Geser Tipe Dengan Bukaannya Jendela SWWOD



Gambar 29 Diagram Spektrum Spesimen Dinding Geser Tipe Dengan Buka Pintu SWDOD

Menurut teori (Mario Paz, 2008), frekuensi alami f struktur dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (44).

$$T = 2\pi\sqrt{m / K_{Global}} \text{ (sec.)}$$

$$f = 1/T \text{ (Hz)} \dots\dots\dots(44)$$

dimana,
 m : massa spesimen termasuk bobot mesin penggoyang (N . sec² / m)
 K_{Global} : kekakuan geser murni global spesimen yang berasal dari bagian sebelumnya di mana efek dari rotasi dasar dan lentur tidak disertakan (N / m).

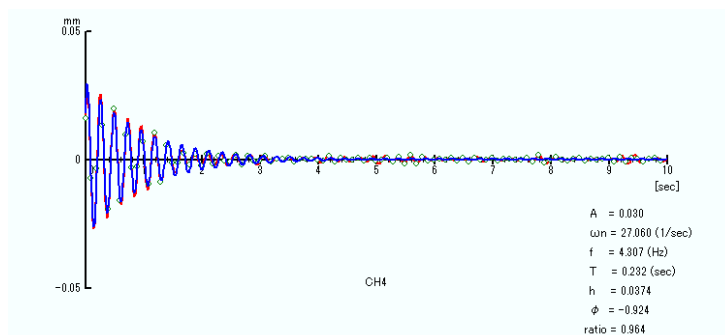
Perbandingan antara frekuensi alami yang dihitung dengan persamaan (44) dan hasil pengukuran langsung tercantum pada Tabel 4.

Ada perbedaan nilai frekuensi alami hasil perhitungan dan pengukuran antara 32% hingga 52%. Beberapa alasan untuk perbedaan ini dapat dijelaskan karena adanya efek lentur pada sambungan komponen struktural (tidak rigid penuh) dan mekanisme guling dari spesimen. Sedangkan frekuensi alami yang diperoleh dari perhitungan, hanya menggunakan kekakuan geser murni pada masing-masing spesimen.

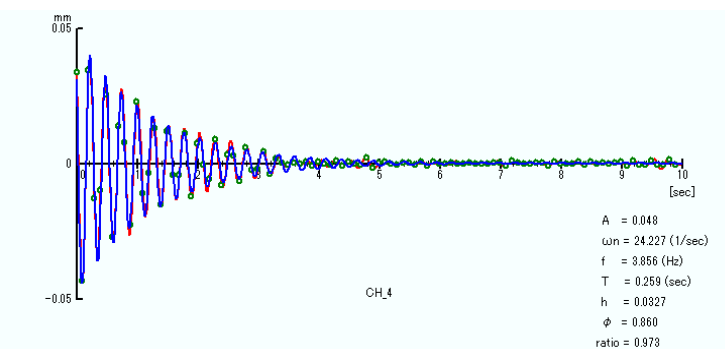
Gambar 30, 31 dan 32 menunjukkan fenomena getaran bebas yang diperoleh setelah pengujian getaran yang dipaksa menggunakan mesin penggoyang dengan frekuensi konstan sesuai frekuensi alami kemudian berhenti dengan tiba-tiba untuk memperkirakan koefisien redaman. Koefisien redaman yang diperoleh dari hasil pengukuran untuk setiap spesimen adalah; 3,7%, 3,3% dan 3,6%.

Tabel 4 Perbandingan Frekuensi Alami Antara Hasil Penghitungan Dan Pengukuran

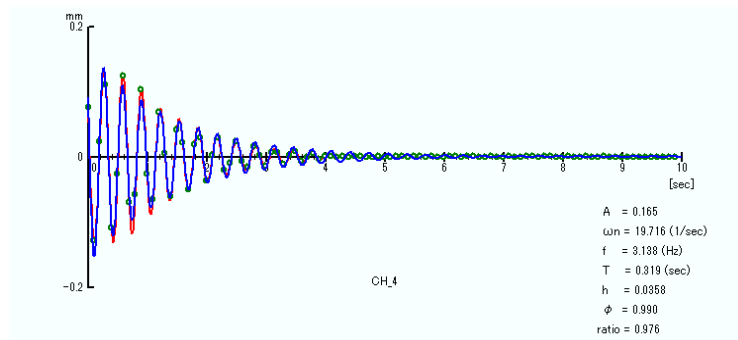
		Tipe Dinding	Tipe Jendela	Tipe Pintu
W _{sheath}	kgf	54.6	49.1	49.1
W _{frame}	kgf	49.1	49.1	49.1
Machine	kgf	67.0	67.0	67.0
Total	kgf	170.7	165.3	165.3
K _{Global}	kN/rad	5837	4743	3987
K _{Global}	N/m	2138095	1737180	1460444
m	N.sec ² /m	1675	1621	1621
T	sec	0.176	0.192	0.209
f=1/T	Hz	5.69	5.21	4.78
Pengukuran (Hz)		4.31	3.86	3.14
Perhitungan/ Pengukuran		1.32	1.35	1.52



Gambar 30 Kurva Getaran Bebas Pada Spesimen Dinding Geser Tipe Dinding SWD



Gambar 31 Kurva Getaran Bebas Pada Spesimen Dinding Geser Tipe Jendela SWWOD



Gambar 32 Kurva Getaran Bebas Pada Spesimen Dinding Geser Tipe Pintu SWDOD

KESIMPULAN

Model mekanika yang diajukan dalam penelitian ini dapat memprediksi perilaku dinding geser ketika memikul beban horisontal siklik statik gempa. Sementara dalam kasus-kasus beban dinamis, kesepakatan antara eksperimen dan prediksi karena teori tidak selalu cukup karena perhitungan teoritis hanya bisa memprediksi kekakuan geser murni dinding geser, sedangkan nilai eksperimen diamati dianggap melibatkan efek lain.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada *Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)* untuk dukungan finansial dalam penelitian ini. Penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Kohei Komatsu yang telah membimbing dalam pelaksanaan penelitian ini dan Satoru Murakami yang telah membantu dalam proses pengujian di *Laboratory of Structural Function, RISH, Kyoto University, Jepang*. Terima kasih kepada Pusat Litbang Permukiman, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum untuk kesempatan yang diberikan dalam melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Breyer, Donald E., Fridley, Kenneth J., Cobeen, Kelly E., Pollock, David G., 2007, "*Design of Wood Structures; ASD/LRFD*", The McGraw-Hill Companies, Inc, USA.
- Cheung, C. K., Itani, R. Y., and Polensek, A., 1988, "*Characteristics of wood diaphragms : Experimental and parametric studies.*" *Wood Fiber Sci.*, 20(4), 438-456.
- Chopra, Anil. K, 1995, "*Dinamic of Structure; Theory and Aplication to Earthquake Engineering*", Prentice-Hall. Inc, A Simon & Schuster Company.
- doi : 10.1061/~ASCE1084-0680~2004!9 : 1~44
- H. Sugiyama, and T. Matsumoto, 1993, "A Simplified Method of Calculating the Shear

Strength of a Plywood-Sheathed Shear Wall with Opening II. Analysis of the shear resistance and deformation of a shear wall with openings", *Journal of the Japan Wood Research Society*, 39(8), 924-929.

- H. Sugiyama, and T. Matsumoto, 1993, "A Simplified Method of Calculating the Shear Strength of a Plywood-Sheathed Shear Wall with Opening I. Evaluation of the racking load of a shear wall with openings", *Journal of the Japan Wood Research Society*, 39(1), 75-79.
- H. Sugiyama, and T. Matsumoto, 1994, "A Simplified Method of Calculating the Shear Strength of a Plywood-Sheathed Shear Wall with Openings III. Analyses of the shear resistance of a wall and of the strength behavior of panel elements", *Journal of the Japan Wood Research Society*, 40(3), 280-286.
- HOWTEC, 2008, "Allowable Design Method for Conventional Wooden Post & Beam Construction".
- Itani, R.Y., Tuomi, R.L., and McCutcheon, W.J., 1982, "Methodology to Evaluate Racking Resistance of Nailed Walls", *Forest Products Journal*, Vol. 32, No. 1, pp. 30-36.
- J.W. van de Lindt, 2004, "Evolution of Wood Shear Wall Testing, Modeling, and Realibility Analysis, Bibliography, Practice Periodical on Structural Design and Construction", ASCE February.
- M. Hadi, S. Murakami, A. Kitamori, W.-S. Chang and K. Komatsu, 2010, "*Performance of Shear Wall Composed of LVL and Cement Fiber Board Sheathing*", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 463-469, vol.9 no.2.
- M. Murakami and M. Inayama, 1999, "*Formulate to Predict The Elastic and Plastic Behaviour of Shearwall with any Nailing Arrangement Pattern*", *Journal of Structural and Construction Engineering. Transactions of AIJ* (519), 87-93.
- Mario Paz and William Leigh, 2008, "Structural Dynamics; Theory and Computation", 5th edition, Springer.

- Thandavammoorthy, T. S., 2005, "Analysis of Structures", Oxford University Press, New Delhi, India.
- Williamson, Thomas G., 2002, "Apa Engineered Wood Handbook", The McGraw-Hill Companies, Inc, USA.
- Y. A. Tjondro, M. Hadi, 2006, "*Mechanical properties and behavior of Falcataria-Rubber Wood LVL*", Proceeding of 19th Australasian, Conference On The Mechanics of Structures and Materials, Chrischurch, New Zealand.