

PREDIKSI KINERJA STRUKTUR RUMAH RISHA TERHADAP BEBAN GEMPA INDONESIA DENGAN MENGGUNAKAN *CAPACITY SPECTRA METHOD (CSM)*

Oleh : **Cecep Bakheri Bachroni**

Pusat Litbang Peremukiman Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan – Kab. Bandung 40393

E-mail: cecep_bakheri@yahoo.com

Tanggal masuk naskah: 21 Desember 2007, Tanggal revisi terakhir : 21 Juli 2008

Abstrak

*Terdapat beberapa keunikan pada struktur bangunan rumah yang tersusun dari panel risha, yaitu: 1) ukuran penampang melintang untuk balok pinggir sangat langsing dengan ukuran 10 cm x 30 cm (lebar balok 1/3 dari tinggi balok), 2) luas penampang melintang yang langsing ini terpotong oleh coakan sedemikian sehingga membentuk huruf C, 3) pada setiap komponen balok atau kolom terdapat sambungan ditengah (tengah bentang pada balok atau ditengah tinggi pada kolom). Ketiga hal yang unik tersebut berpengaruh pada kinerja struktur bangunan secara keseluruhan terhadap beban lateral dan vertikal yang harus dipikulnya. Tulisan ini menyajikan mengenai kinerja struktur bangunan rumah yang tersusun dari panel risha dengan menggunakan metode spektra kapasitas (*Capacity Spectrum Method, CSM*) dari ATC 40. Struktur dimodelkan sebagai bangunan tinggal satu lantai (luas 36 m²), dua lantai (luas 72 m²) tanpa dan dengan dinding, dengan masing-masing dari model tersebut dirancang kerusakan terjadi pada penampang balok/kolom tepat pada penampang huruf C. Hasil prediksi menunjukkan: 1) mode keruntuhan komponen-komponen struktur balok dan kolom dari susunan panel risha adalah mode keruntuhan geser, 2) kemampuan deformasi maksimum pada struktur rangka rumah 2 lantai dengan kerusakan dalam katagori kerusakan ringan, sangat kecil yaitu 3,8 cm, 3) struktur rumah dua lantai, luas lantai total 72 m², tanpa dinding, struktur ini aman bila dibangun di wilayah gempa 1 sampai dengan 5 pada kondisi tanah lkeras sampai lunak, dan aman dibangun di wilayah gempa 6 untuk kondisi tanah keras, 4) untuk struktur rumah dua lantai yang dipasang dinding dari pasangan bata merah dapat menambah kekakuan struktur bangunan sehingga dapat mengurangi simpangan perlu, ketika diuji dengan beban gempa wilayah 6 pada kondisi tanah lunak, struktur ini memiliki kinerja sangat baik, maka dapat dibangun diseluruh wilayah gempa Indonesia, 5) struktur rumah satu lantai tanpa dinding, luas lantai 36 m², dibebani dengan beban gempa wilayah 6 pada kondisi tanah lunak. Pada simpangan perlu, tidak terjadi kerusakan berat di hampir seluruh komponen strukturnya, dengan demikian struktur ini dapat dibangun diseluruh wilayah gempa Indonesia dengan kondisi tanah keras, sedang dan lunak.*

Kata kunci : *Panel risha, struktur rumah, kinerja struktur, spektra kapasitas*

Abstract

Structure of house was made of panel Risha have three unique, there are: 1) cross section of the beam or the column was very slime, 2) The cross section area reduced such that forms capital C in shape, 3) at every beam or column has connection in the middle. Those of three unique will influence to the performance of the structure as a whole when it receive vertical or lateral load. This paper presents a prediction on the

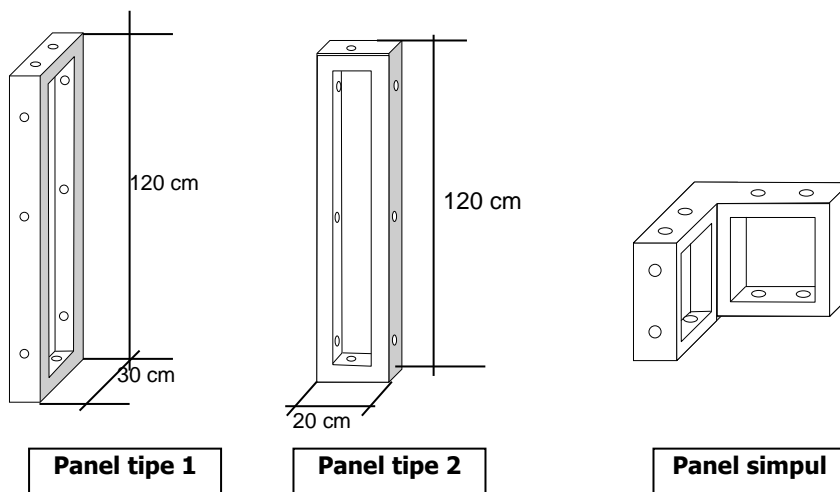
structure performance was composed of panel risha by using Capacity Spectra Method (CSM) of ATC 40 was used. Structure model of one story house with plan area of 36 m² and 72 m² (two story), without and with infill wall were used. The damage was designed to occur in the cross section of beam/column that have letter " C " in shape. The prediction results reveals that: 1) Failure mode of beam/column that assembled of risha panels is shear in mode, 2) Deformation capacity for open frame two story house is 3,8 cm, 3) The structure without wall has a good performance in the zone 1 to zone 5 with all of soil condition according to the Indonesia's seismic map, while in zone 6 the structure has a good performance is only in hard soil area, 4) the structure can be constructed on the whole of Indonesia's seismic zone and all of soil condition when in fill wall was set up in the frame, 5) as well as for one story structure without infill wall, can be constructed in all of Indonesia's seismic zone with any soil condition.

Key words : Panel risha, Structure of house, structure performance

PENDAHULUAN

Struktur bangunan rumah risha adalah struktur yang komponen balok dan kolomnya tersusun dari panel-panel risha, struktur ini memiliki beberapa keunikan, yaitu: 1) ukuran penampang melintang untuk balok termasuk ukuran langsing yaitu 10 cm x 30 cm (lebar balok 1/3 dari tinggi balok), 2) luas penampang melintang yang langsing ini terpotong oleh coakan sedemikian sehingga membentuk huruf C, 3) pada

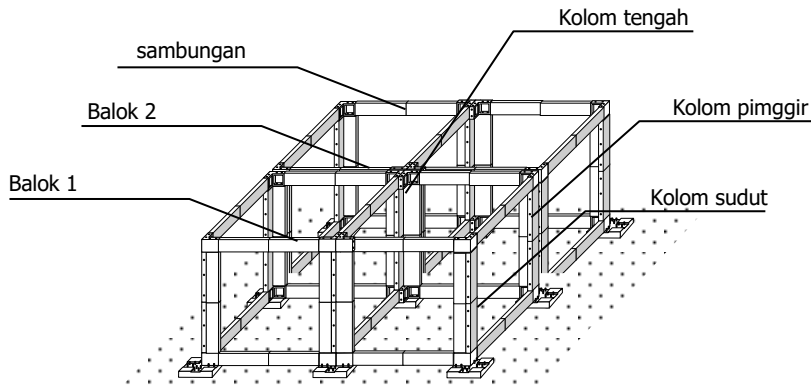
komponen balok atau kolom terdapat sambungan ditengah (tengah bentang pada balok atau ditengah tinggi pada kolom). Sedangkan bagian tengah panel berupa pelat beton tebal 2 cm diberi tulangan susut Φ 6 mm – 20 cm kearah memanjang panel dan Φ 6 mm – 20 cm kearah lebar panel. Panel tipe 2, sama dengan panel tipe 1 tetapi lebarnya hanya 20 cm. Panel simpul, panel bentuk L 30 cm x 30 cm, tinggi 120 cm seperti terlihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tipe panel RISHA

Bila panel – panel tersebut digabungkan kearah memanjang dan kearah lebar yang saling tegak lurus pada struktur bangunan, maka gabungan panel-panel tersebut dapat difungsikan sebagai balok

bila dipasang mendatar, dan berfungsi sebagai kolom bila dipasang vertikal, untuk sambungan digunakan sambungan baut, sebagai ilustrasi dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Sistem Struktur Panel Risha

Bangunan rumah risha pada dasarnya dirancang untuk rumah *knock-down*, yang dapat dibangun dan dibongkar serta dapat dikembangkan dengan mudah baik pada komponen struktural maupun komponen non-strukturalnya, dalam pengembangannya pun tidak terlalu banyak membuang bahan yang sudah terpasang. Oleh karena itu, panel-panel risha dirancang dalam ukuran relatif kecil dan ringan sedemikian rupa sehingga dapat diangkat oleh satu orang pekerja.

Pendiriannya cukup mudah dengan waktu yang relatif singkat. Penghematan dapat diperoleh dari kecepatan pendiriannya dan penggunaan bahan bangunan karena ukuran komponen dan ruang bangunan dirancang modular. Tapi disini lain struktur ini memiliki kelemahan yang cukup signifikan dengan penampang melintang komponen balok dan kolom yang langsing serta banyaknya sambungan baik pada komponen strukturnya sendiri

maupun sambungan antar komponen struktur. Tulisan ini menyajikan mengenai prediksi melalui pengkajian kinerja struktur bangunan rumah risha terhadap gaya gempa Indonesia dengan menggunakan *Capacity Spectrum Method (CSM)*.

Sesuai dengan perencanaan dari panel Risha, pada penghitungan ini menggunakan mutu beton $f'c=250$ kg/cm² (25 Mpa), mutu baja $f'=2400$ kg/cm² (240 Mpa). Tulangan utama menggunakan baja tulangan \varnothing 8 mm dan sengkang \varnothing 6 mm, keduanya tulangan polos. Untuk struktur model digunakan model-model struktur rumah tinggal Risha yang telah banyak dibangun di lapangan seperti di Aceh, Medan, Sulawesi. Tipe-tipe rumah Risha yang telah dibangun tersebut pada umumnya tipe 36 luas lantai 36m². Tipe 72 luas lantai 72 m² (tipe 36 dua lantai). Dalam perkembangannya saat ini rumah Risha tersebut telah dibangun dengan menggunakan dinding dari conblock.

Tulisan ini tidak dimaksudkan untuk menilai atau mengevaluasi hasil penelitian yang dilakukan dilaboratorium, tetapi untuk mengevaluasi perilaku struktur rumah Risha yang telah terbangun, dengan mengambil parameter mutu beton dan mutu baja serta dimensi tulangan dari disain panel Risha.

Permasalahan

Bentuk penampang melintang komponen dan sambungan-sambungan pada struktur rumah risha menjadi pusat kelemahan pada kestabilan struktur dan akan mengurangi ketegaran bangunan pada saat memikul beban lateral, yang pada akhirnya berpengaruh pada kinerja struktur.

Jenis sambungan apapun pada struktur bangunan rumah dan gedung harus lebih kuat dari komponen struktur yang disambungkan, sehingga apabila terjadi keruntuhan pada bangunan risha ini tidak terjadi kerusakan pada sambungannya, tetapi pada komponen struktur yang disambung.

Untuk itu, perlu dilakukan pengkajian kinerja dan perilaku struktur secara keseluruhan terhadap beban-beban gempa Indonesia, bila kerusakan terjadi tepat pada penampang melintang panel Risha yang memiliki coakan (membentuk huruf "C").

Metode Pengkajian

Sasaran prediksi meliputi pengamatan pola runtuh pada komponen kolom dan balok, penelusuran kapasitas struktur dan pengamatan kinerja model struktur rumah risha terhadap gaya gempa di seluruh zona gempa Indonesia.

Pengamatan pola runtuh untuk komponen balok dan kolom dilakukan dengan mengamati kurva momen kurvatur penampang melintang pada

setiap jenis komponen struktur, yaitu hubungan kekuatan dengan kerusakan yang digambarkan dengan nilai *curvature*-nya. Analisis ini dilakukan menggunakan program komputer ETAB 8.5.3.

Penelusuran kapasitas dan perilaku runtuh struktur rumah secara keseluruhan dilakukan melalui pengamatan grafik hubungan gaya geser dengan simpangan lateral yang dihitung dengan analisa non-linier (*push over*) menggunakan program komputer ETAB 8.5.3.

Pengamatan kinerja struktur secara numeric dilakukan dengan menggunakan *Capacity Spectrum Method (CSM)*, yaitu kurva kapasitas struktur (kurva hubungan beban dengan lendutan) dioverlay-kan pada kurva spektra gempa Indonesia setelah direduksi oleh rasio damping efektif dari struktur yang ditinjau. Beban gempa yang digunakan adalah sesuai dengan SNI 03-1726-2002, Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung. Kinerja struktur ditentukan oleh perpotongan kedua kurva tersebut.

Agar kerusakan terjadi pada bagian penampang melintang yang membentuk huruf "C" dari komponen panel risha, maka dalam analisis numerik ini mengasumsikan bahwa semua sambungan baik pada balok dan kolom serta sambungan antara balok dan kolom adalah terjepit sempurna.

Asumsi ini sesuai dengan pengamatan penulis dari hasil pengujian yang dilakukan di laboratorium struktur Pusat litbang permukiman melalui pengamatan kerusakan pada uji lentur komponen balok yang terbuat dari susunan panel risha. Hasil uji tersebut menunjukkan

bahwa pada beban runtuh kerusakan tidak terjadi pada sambungan.

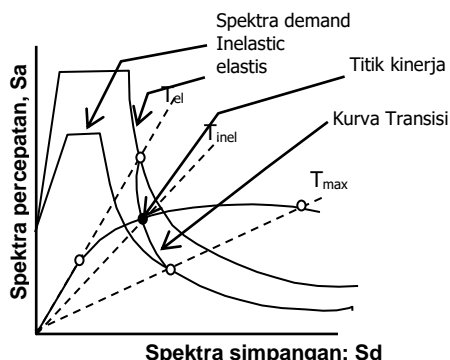
Sebagai beban lateral diasumsikan bangunan terletak disemua wilayah gempa Indonesia dengan kondisi tanah keras sedang dan lunak, kemudian dipilih di wilayah gempa mana dan pada kondisi tanah apa struktur bangunan ini dapat dibangun dengan aman.

Lingkup Kajian

Pengkajian ini hanya memfokuskan pada bentuk penampang melintang panel risha terhadap kinerja struktur Rumah Risha secara keseluruhan.

KAJIAN PUSTAKA

Metode spektra kapasitas adalah suatu metode untuk menentukan kinerja bangunan terhadap gaya gempa, apakah bangunan tersebut dapat menahan gaya gempa rencana tanpa runtuh atau tidak. Bila bangunan dapat menahan gaya gempa tanpa runtuh, maka harus diperiksa tingkat kerusakannya. Tipe kerusakan yang tidak dapat diterima adalah kerusakan berat yang ditandai dengan terjadinya *spalling* pada selimut beton, tulangan putus pada tulangan utama atau tulangan sengkang. Metode ini menggunakan analisa statik non-linier untuk mengestimasi kinerja kegempaan struktur. Seperti ditunjukkan pada gambar 3, kinerja struktur diestimasi sebagai respon maksimum gedung dalam satuan simpangan lateral oleh perpotongan spektrum kapasitas yang merupakan kinerja gedung secara keseluruhan dengan respon spektrum tereduksi (spektrum demand) dari gempa rencana.



Gambar 3. Kurva Kapasitas Vs Demand

Dua elemen kunci utama dari prosedur perencanaan berbasis kinerja, yaitu: *demand* (Perlu) dan kapasitas. *Demand* adalah representasi dari gerakan tanah gempa. Kapasitas representasi dari kemampuan struktur menahan gaya gempa *demand*. Kinerja struktur bangunan tergantung pada bagaimana kapasitas dapat memenuhi demand. Dengan kata lain struktur harus memiliki kapasitas menahan gempa demand sehingga kinerja struktur sesuai dengan tujuan dari yang direncanakan. Prosedur analisa non linier menggunakan metode pushover, seperti metode spektrum kapasitas terlebih dahulu harus menentukan tiga elemen utama: kapasitas, demand (simpangan), dan kinerja.

Kapasitas: Kapasitas struktur tergantung pada kapasitas kekuatan dan deformasi masing-masing komponen struktur. Untuk menentukan kapasitas diluar batas elastis diperlukan analisa nonlinier seperti prosedur pushover. Prosedur ini menggunakan serangkaian analisa elastis *sequential*, disuperimposkan untuk memperkirakan diagram kapasitas gaya dan simpangan struktur. Model matematis struktur dimodifikasi untuk memperhitungkan ketahanan tereduksi dari komponen-komponen

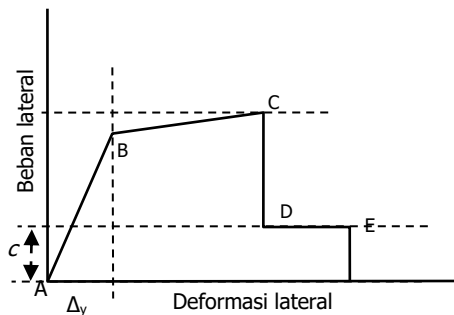
yang mengalami leleh. Distribusi gaya lateral diaplikasikan juga sampai dengan komponen-komponen yang mengalami leleh bertambah. Prosedur ini terus dilanjutkan sehingga struktur mencapai ketidakstabilannya dan batas-batas yang ditentukan sebelumnya dapat dicapai.

Demand (simpangan yang diperlukan): Gerakan tanah selama gempa menimbulkan pola simpangan horizontal yang kompleks di dalam struktur yang bervariasi dengan waktu. Metode analisa linier tradisional menggunakan gaya lateral untuk represent kondisi desain. Untuk metode non-linier lebih mudah dan lebih langsung menggunakan satu set simpangan lateral sebagai kondisi desain. Untuk struktur dan gerakan tanah yang ada, simpangan *demand* adalah estimasi dari respon gedung maksimum yang diharapkan pada saat dan selama gerakan tanah.

Kinerja: Pengamatan kinerja struktur dilakukan pada saat menentukan kurva kapasitas dan kurva *demand*. Pengamatan kinerja meliputi pemeriksaan kerusakan komponen struktural dan non-struktural yang tidak rusak melebihi batas yang dapat diterima sesuai dengan tujuan kinerjanya terhadap gaya dan simpangan yang merupakan simpangan *demand*.

Gambar 4 mengilustrasikan kurva hubungan beban dan deformasi yang dapat digunakan untuk komponen beton bertulang. Hubungan tersebut digambarkan oleh respon linier dari A (komponen tanpa beban) ke titik leleh efektif B, respon linier pada kekakuan tereduksi dari B ke C, penurunan ketahanan terhadap beban lateral secara tiba-tiba ke titik D, respon pada ketahanan tereduksi di titik E, dan selanjutnya hilang seluruh ketahanan-

nya. Berikut titik-titik utama yang berkaitan dengan kurva hubungan beban dengan deformasi tersebut diatas:



Gambar 4. Kurva Beban dan Deformasi untuk Komponen Beton Bertulang

Titik A sesuai dengan kondisi tanpa beban, beban gravitasi dapat menimbulkan gaya-gaya dan deformasi awal yang harus diperhitungkan pada model struktur. Jadi, beban lateral dapat berawal pada suatu titik yang bukan dari titik pusat kurva (titik 0).

Landaian dari titik A ke titik B merupakan kekakuan awal komponen struktur yang diwakili oleh harga *secant* yang ditentukan oleh titik leleh efektif dari komponen struktur. Untuk komponen struktur yang didominasi lentur, kekakuan ini kira-kira sesuai dengan kekakuan retak penuh. Untuk komponen struktur yang didominasi keruntuhan geser, kekakuannya dapat diperkirakan sesuai dengan kekakuan sebelum retak. Harga kekakuan dapat ditentukan sebagai fungsi sifat bahan, dimensi komponen struktur, kuantitas tulangan, kondisi batas, dan tegangan serta level deformasi yang dicapai.

Titik B memiliki resistansi sama dengan kekuatan leleh nominal. Tetapi biasanya nilai ini kurang dari kekuatan nominal.

Landaian dari titik B ke titik C, dengan mengabaikan efek beban gravitasi yang bekerja melalui simpangan lateral, harga ini biasanya diambil 5 % sampai dengan 10% (Park and Pauly) dari kekakuan awal. *Strain hardening* ini, yang diamati untuk seluruh komponen beton bertulang, bisa memiliki efek penting pada redistribusi gaya-gaya dalam diantara komponen struktur yang berdekatan.

Ordinat pada titik C sesuai dengan kekuatan nominal yang ditentukan dari ordinat titik B dan landaian setelah pembebanan B, tetapi hasilnya harus diperiksa untuk menjamin bahwa level gaya final yang mengikuti *strain hardening* konsisten dengan ketahanan yang diharapkan untuk level deformasi. *Strain hardening* yang melewati kekuatan nominal harus dihindarkan.

Absis titik C sesuai dengan deformasi pada mulai menurunnya kekuatan yang signifikan. Diluar deformasi ini, pada beban siklik bolak-balik, kestabilan komponen struktur tidak dapat dijamin lagi. Untuk komponen struktur yang getas, deformasi ini sama seperti deformasi pada kekuatan leleh yang dicapai. Untuk komponen lentur, deformasi ini lebih besar dari deformasi leleh.

Berkurangnya ketahanan dari titik C ke titik D merupakan keruntuhan awal komponen struktur, keruntuhan tersebut bersamaan dengan terjadinya fenomena seperti putusnya tulangan longitudinal, *spalling* selimut beton, atau keruntuhan geser tiba-tiba setelah leleh pertama terjadi. Ketahanan terhadap beban lateral setelah Titik C biasanya tidak *reliable* tidak dapat diandalkan. Komponen-komponen utama sistem penahan gaya lateral tidak diizinkan berdeformasi melebihi titik ini.

Ketahanan tersisa dari titik D ke titik E bisa bernilai nol atau tidak bernilai nol, tidak ada informasi yang spesifik mengenai ini, maka ketahanan tersisa dapat diambil 20 % dari kekuatan nominal (ATC 40, bab 9, hal 9-28).

Titik E adalah titik yang menentukan kapasitas deformasi maksimum. Deformasi yang melebihi titik ini tidak diijinkan karena beban gravitasi tidak dapat lagi ditahan. Keruntuhan awal pada titik C mengakibatkan hilangnya ketahanan terhadap beban gravitasi, dimana kasus E adalah titik yang memiliki deformasi sama dengan pada titik C dan ketahanannya nol.

Untuk komponen struktur sederhana, seperti kantilever vertikal, hubungan antara daktilitas *curvature* dan daktilitas simpangan dapat diekspresikan dengan sederhana disepanjang tinggi struktur.

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y}$$

Δ_m = simpangan maksimum

Δ_y = simpangan leleh

Simpangan leleh. Distribusi *curvature* aktual pada leleh akan nonlinier sebagai akibat dari pengkakuan tension lokal diantara retakan, Tetapi, mengacu kepada perkiraan linier, simpangan leleh dapat diestimasi oleh persamaan berikut:

$$\Delta_y = \phi_y l / 3$$

ϕ_y = Curvatur leleh

l = tinggi struktur

Simpangan maksimum. Distribusi *curvature* pada simpangan maksimum Δ_m sesuai dengan *curvature* maksimum di dasar kantilever. Untuk perhitungan, panjang sendi plastis l_p ditentukan oleh *curvature* plastis-nya $\phi_p = \phi - \phi_e$ diperhitungkan sama dengan *curvature*

plastis maksimum $\varphi - \varphi_e$. Panjang sendi plastis dipilih sedemikian sehingga simpangan plastis di top kantilever, sama seperti yang diambil dari distribusi curvature aktual. Rotasi plastis, θ_p , yang terjadi pada panjang sendi plastis ekuivalen diberikan dalam bentuk persamaan berikut

$$\theta_p = \varphi_p \cdot \ell_p = (\varphi_m - \varphi_y) \ell_p$$

dengan:

φ_p = curvatur plastis

φ_m = curvatur maksimum

ℓ_p = panjang sendi plastis

Rotasi ini merupakan indikator penting dari kapasitas penampang komponen struktur dalam mempertahankan deformasi *inelastis* komponen struktur agar tetap dalam kondisi stabil. Dengan asumsi pusat rotasi plastis berada di tengah panjang sendi plastis, simpangan plastis menjadi sebagai berikut:

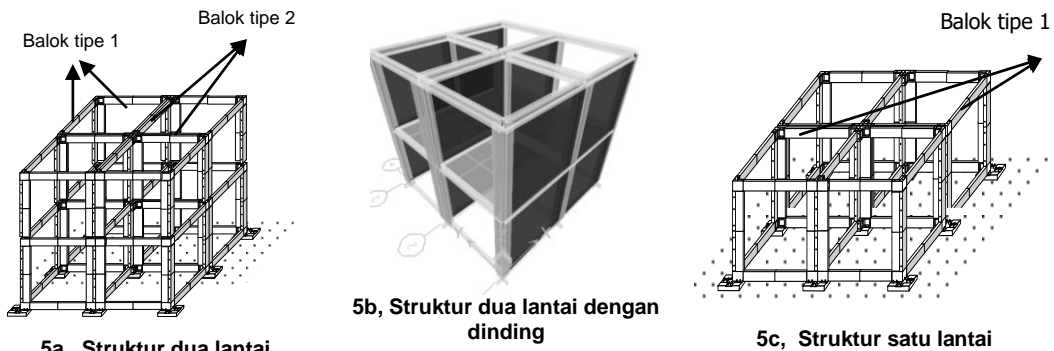
$$\Delta_p = \theta_p (\ell - 0,5 \ell_p) = (\varphi_m - \varphi_y) \ell_p (\ell - 0,5 \ell_p)$$

Estimasi panjang sendi plastis efektif dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\ell_p = 0,08 l + 0,022 d_b f_y \text{ (cm)}$$

STRUKTUR MODEL

Sesuai dengan yang telah dibangun dilapangan (di Aceh, Medan dan Sulawesi), rumah tinggal dengan komponen risha ini telah berkembang menjadi rumah dua lantai (sesuai dengan yang diperkenankan), maka dalam penghitungannya struktur rumah risha dimodelkan sebagai struktur dua lantai dengan denah bangunan berbentuk persegi empat berukuran 600 x 600 cm, luas lantai total 72 m². Model struktur yang dikaji adalah model struktur dua lantai tanpa dinding, model struktur dua lantai dengan dinding dan model struktur satu lantai tanpa dinding seperti ditunjukkan pada gambar 5.



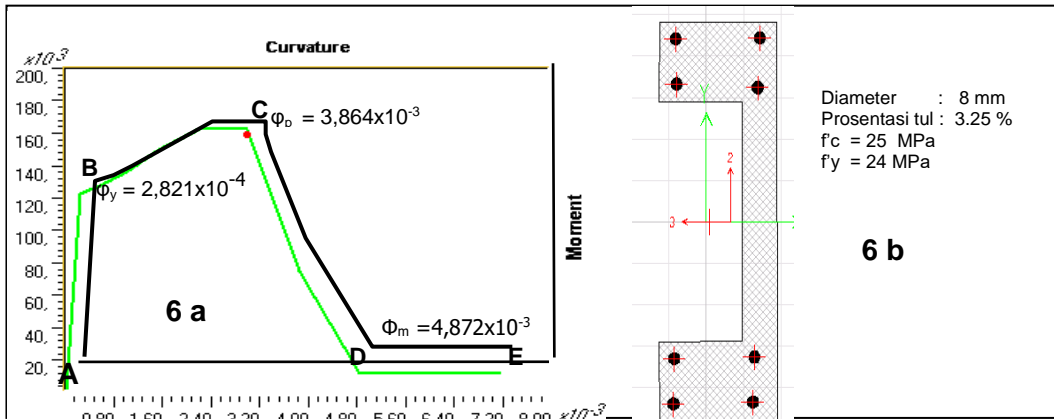
Gambar 5. Model Struktur Rumah Risha yang Dikaji

HASIL DAN ANALISIS

Perilaku dan Kapasitas Komponen Struktur

Dengan memperhatikan ilustrasi struktur rumah risha pada gambar 2, berikut

diuraikan perilaku dan kapasitas masing-masing komponen struktur balok dan kolom rumah tinggal yang tersusun dari panel-panel risha tersebut.



Gambar 6: Penampang Balok Tipe 1 dan Kurva Momen Kurvatur

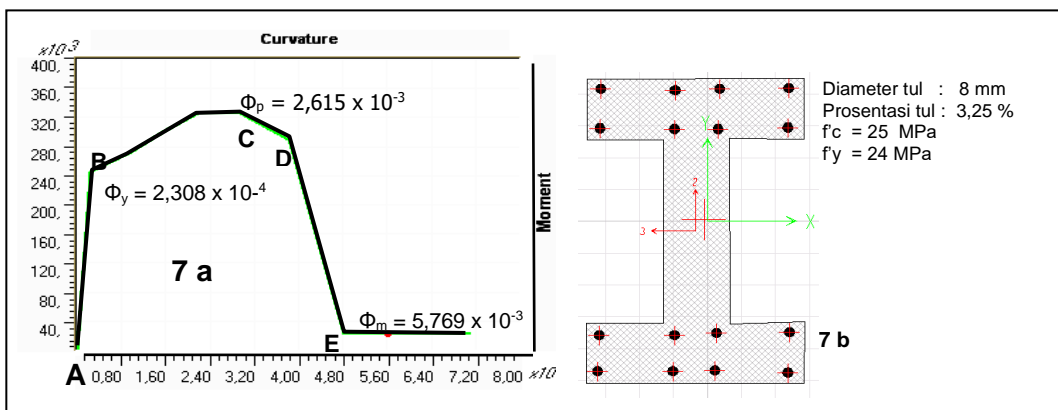
Balok 1 pada gambar 6b, merupakan balok yang disusun dari dua panel risha tipe 1 yang disambung ke arah longitudinal sehingga panjangnya menjadi 2,4 m.

Dari penampang melintang, tulangan atas dan tulangan bawah dipasang tulangan 4 Φ 8 mm dengan luas tulangan 4.0192 cm² atau sama dengan 3,25 % dari luas penampang melintang panel. Tulangan sengkang digunakan tulangan polos Φ 6 mm jarak 20 cm. Dengan bentuk penampang dan susunan tulangan seperti ini, lalu dianalisis menggunakan program ETAB 8.5.3, diperoleh kurva momen dan Curvatur

pada gambar 6a. Dari kurva tersebut diperoleh:

Curvature Leleh, $\phi_y = 2,821 \times 10^{-4}$, curvature pada beban puncak, $\phi_p = 3,864 \times 10^{-3}$, kurvatur maksimum $\phi_m = 4,872 \times 10^{-3}$. Setelah dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan pada pasal kepustakaan diatas, diperoleh: daktilitas curvature, $\mu_\phi = \phi_m / \phi_y = 7,30$; daktilitas simpangan $\mu_\Delta = 2,15$ cm; kapasitas putaran plastis $\theta_p = 0.0034$ Radian.

Dari grafik momen-curvatur pada Gambar 6, sisa kekuatan menahan gaya lateral setelah runtuh adalah 6 % yang ditunjukkan oleh titik D.



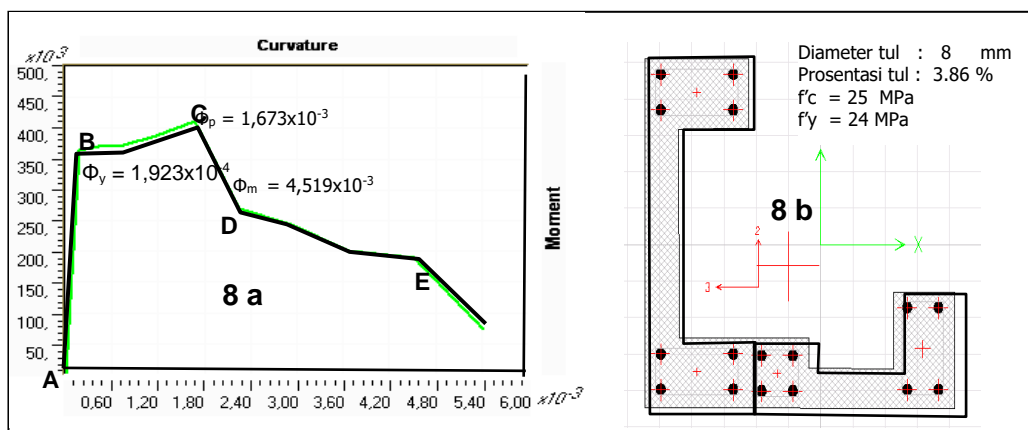
Gambar 7: Penampang Balok Tipe Dua dan Kurva Momen Kurvatur

Balok 2 pada gambar 7b, merupakan gabungan empat panel risha tipe 1 yang digabung sedemikian rupa sehingga penampang melintang balok-2 membentuk huruf " I " dengan panjang 2,4 m.

Jumlah tulangan pada penampang melintang 16Φ8 mm dengan luas tulangan 8.0384 cm² atau sama dengan 3,25 % dari luas penampang melintang balok. Tulangan sengkang digunakan tulangan Φ 6 mm jarak 20 cm. Dengan penampang melintang dan susunan tulangan seperti ini dan dianalisis menggunakan analisis momen dan curvatur diperoleh kurva pada gambar 7a. Dari kurva tersebut diperoleh: Curvature Leleh $\Phi_y = 2,308 \times 10^{-4}$, curvature pada beban puncak $\Phi_p = 2,615 \times 10^{-3}$, kurvatur maksimum $\Phi_m = 5,769 \times 10^{-3}$, daktilitas curvature, $\mu_\phi = \Phi_m / \Phi_y = 8,8$ dan daktilitas simpangan, $\mu_\Delta = 2,43$ dengan kapasitas putaran plastis, $\theta_p = 0,0051$ Radian. Dari grafik

diperoleh sisa kekuatan setelah runtuh 9 % (yang disyaratkan 20%)

Kolom Sudut, kolom sudut pada gambar 8 merupakan gabungan panel tipe-1 dengan panel tipe-2, tulangan utama 16Φ8 mm dengan luas tulangan 8.0384 cm² atau sama dengan 3,73 % dari luas penampang melintang kolom. Tulangan sengkang digunakan tulangan Φ6mm jarak 20 cm. Dengan penampang melintang dan susunan tulangan seperti ini dan dianalisis menggunakan momen dan Curvature diperoleh kurva pada gambar 8. Dari kurva tersebut diperoleh: Curvature Leleh, $\Phi_y = 1,923 \times 10^{-4}$, Curvatur pada beban puncak $\Phi_p = 1,673 \times 10^{-3}$, Curvature maksimum, $\Phi_m = 4,519 \times 10^{-3}$, daktilitas curvature, $\mu_\phi = \Phi_m / \Phi_y = 11,5$ dan daktilitas simpangan, $\mu_\Delta = 2,91$ dengan kapasitas putaran plastis, $\theta_p = 0,0082$ Radian. Dari grafik diperoleh sisa kekuatan setelah runtuh 17,85 % (yang disyaratkan minimum 20%).



Gambar 8. Penampang Kolom Sudut dan Kurva Momen Curvature

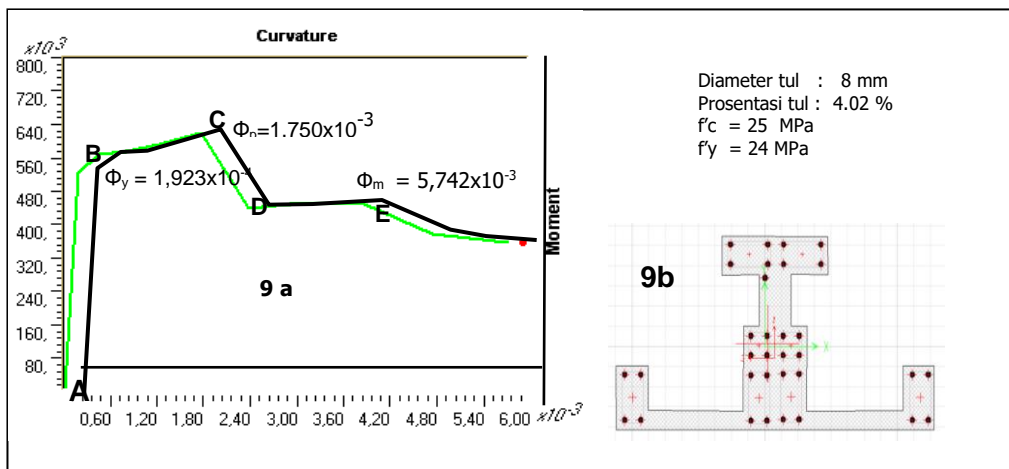
Kolom pinggir, kolom pinggir pada gambar 9 merupakan gabungan dari 2 tipe panel, yaitu panel tipe-1 dengan panel tipe-2, tulangan utama 32Φ8 mm dengan luas tulangan 23.420 cm² atau

sama dengan 4,02 % dari luas penampang melintang kolom.

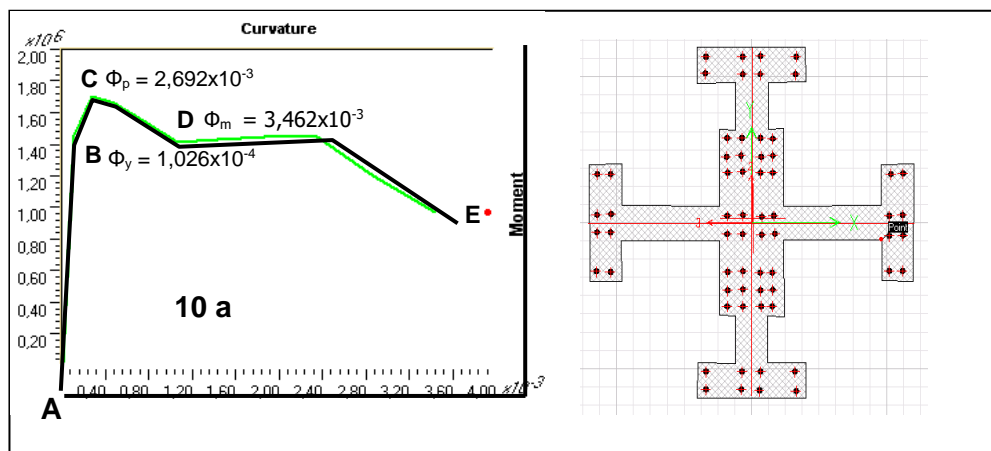
Tulangan sengkang digunakan tulangan Φ6mm jarak 20 cm. dan dianalisis menggunakan momen dan Curvature diperoleh kurva pada gambar 9. Dari

kurva tersebut diperoleh: Curvature Leleh, $\Phi_y = 1,923 \times 10^{-4}$, Curvatur pada beban puncak $\Phi_p = 1,750 \times 10^{-3}$, Curvature maksimum, $\Phi_m = 5,742 \times 10^{-3}$. daktilitas curvature, $\mu_\phi = \Phi_{pc} / \Phi_y = 10,99$. Daktilitas simpangan, $\mu_\Delta = 2,81$ dengan kapasitas putaran plastis, $\theta_p = 0,0078$ Radian. Dari grafik diperoleh sisa kekuatan setelah runtuh 52 % (yang disyaratkan minimum 20%).

Kolom dalam (internal), merupakan gabungan dari 2 panel tipe-1 dengan 2 panel tipe-2, tulangan utama 64 Φ 8 mm dengan luas tulangan 46,84 atau sama dengan 4,02 % dari luas penampang melintang kolom. Tulangan sengkang digunakan tulangan Φ 6mm jarak 20 cm. dan dianalisis menggunakan momen dan *Curvature* diperoleh kurva pada gambar 10.



Gambar 9. Penampang Kolom Pinggir dan Kurva Momen *Curvature*



Gambar 10. Penampang Kolom Tengah dan Kurva Momen *Curvature*

Dari kurva tersebut diperoleh: Curvature Leleh, $\Phi_y = 1,026 \times 10^{-4}$, Curvatur pada

beban puncak, $\Phi_p = 2,692 \times 10^{-3}$, Curvature maksimum, $\Phi_m = 3,462 \times 10^{-3}$

³, daktilitas curvature, $\mu_{\phi} = \Phi_m / \Phi_y = 3,81$. Daktilitas simpangan, $\mu_{\Delta} = 1,5$, dengan kapasitas putaran plastis, $\theta_p = 0,0041$ Radian. Dari grafik diperoleh sisa kekuatan setelah runtuh 66 % (yang disyaratkan minimum 20%).

Perilaku Non-linier Struktur (Push Over Curve)

Analisa dilakukan mulai dari beban gempa terberat, yaitu beban gempa di wilayah enam pada kondisi tanah lunak, tanah sedang dan tanah keras sampai dengan wilayah terkecil. Gambar 11 adalah kurva hubungan beban lateral dengan simpangan lateral untuk struktur yang dibebani dengan beban gempa di zona 6 dengan kondisi tanah lunak (kode uji Risha 2L6). Diperoleh catatan dari analisa bahwa : 1) balok-balok dilantai 2 tidak kuat, ditandai dengan nilai "Column P-M-M Interaction Ratio" yang melebihi 1%, yaitu untuk masing-masing balok pinggir, dan balok tengah sebesar 1,06 % dan 1,25%. 2) Sendi plastis di ujung-ujung balok dan kolom terbentuk oleh gaya geser yang memungkinkan untuk terjadi keruntuhan getas didaerah sendi plastis dari komponen balok dan kolom.

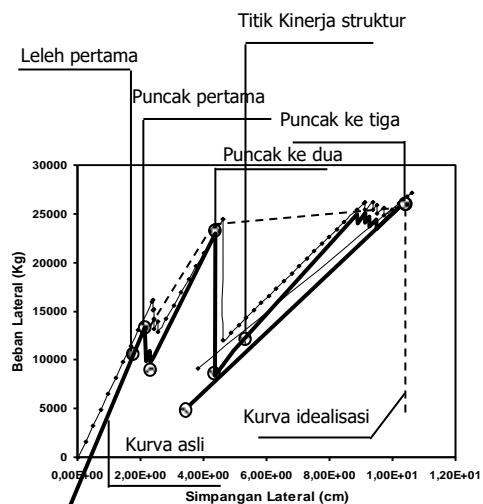
Memperhatikan kurva pada Gambar 11, kurva tersebut berbentuk gigi gergaji, bentuk ini disebabkan oleh terjadinya proses perpindahan gaya-gaya "dalam" dari komponen struktur yang telah mengalami kerusakan kemunduran ke komponen struktur yang masih utuh. Kemunduran ini terjadi secara getas disebabkan oleh bentuk penampang balok dan kolom. Turunnya beban secara drastis yang pertama disebabkan oleh terjadinya kerusakan berat pada seluruh balok di lantai 1, balok-balok ini tidak lagi dapat menahan beban lateral kemudian beban tersebut disalurkan ke balok-balok dilantai 2, pada gambar

terlihat beban naik kembali hingga mencapai kapasitas puncaknya pada balok di lantai 2 kemudian terjadi kemunduran beban secara drastis yang kedua, setelah seluruh balok di lantai dua tersebut rusak berat (tidak mampu menahan gaya lateral), pada saat ini beban dipikul oleh kolom-kolom di lantai 1 dan beban terlihat naik kembali sampai puncak yang ketiga setelah kolom di lantai satu mencapai beban puncak dan kemudian struktur bangunan secara keseluruhan tidak mampu lagi menahan gaya lateral sehingga beban turun drastis dan ketahanan struktur yang tersisa 33% dari beban puncak yang ketiga, pembebanan terhenti. Kurva tersebut terbentuk dari garis-garis linier, ini disebabkan oleh gaya geser yang mendominasi keruntuhan (keruntuhan yang dikendalikan oleh gaya geser).

Urutan keruntuhan dimulai dari terjadinya leleh pertama pada ujung-ujung balok pinggir dan balok dalam dilantai 1, pada tahap pembebanan ke 9 dengan simpangan 1,9967 cm dan beban yang dicapai sebesar 13620,55 kg (13,6 Tf). Pada tahap pembebanan yang ke 11, ujung-ujung balok pinggir dilantai 2 telah mencapai kapasitas puncak dengan simpangan lateral yang dicapai sebesar 2,3802 cm dan beban sebesar 15145,16 kgf (15,15 Tf), pada tahap pembebanan ke 12 terjadi kerusakan berat pada kedua balok tersebut sehingga balok-balok tersebut tidak mampu lagi memikul gaya-gaya lateral dan gravitasi, pada saat inilah mulai terjadi pemindahan gaya-gaya "dalam" dari balok yang rusak ke balok yang masih utuh. Kerusakan berat pada kedua balok tersebut terjadi pada saat besaran gaya dan simpangan yang dicapai sama seperti pada tahap pembebanan yang ke 11 (tahap

pembebanan ke 11 dan ke 12 dalam gambar 9 terlihat berimpit). Penurunan kapasitas menahan gaya lateral secara drastis yang pertama kali terjadi pada tahap pembebanan ke 18, dimana ujung-ujung pada semua balok di lantai 2 mengalami kerusakan berat, besar beban dan simpangan yang tercatat pada tahap pembebanan ini adalah 2,5518 cm dan 12094,61 kgf masing-masing untuk simpangan dan beban. Setelah tahap pembebanan ke 18, beban mulai naik kembali, ini karena proses penyaluran gaya-gaya "dalam" dari balok rusak ke balok utuh, hingga mencapai tahap pembebanan ke 27. Pada tahap ini kapasitas maksimum telah dicapai oleh balok tengah di lantai 2, berlanjut dengan turunnya kapasitas beban yang sangat drastis di tahap pembebanan ke 28, dimana pada tahap ini kerusakan berat telah terjadi pada seluruh ujung-ujung setiap balok dilantai 2, dengan demikian sampai dengan tahapan beban ke 28 ini kondisi seluruh balok, baik dilantai satu dan 2 telah mengalami rusak berat (tidak mampu menahan gaya lateral dan gravitasi). Namun demikian, karena sampai dengan tahapan beban ini tidak ada satupun kerusakan terjadi pada kolom, maka beban pada balok-balok yang rusak disalurkan pada kolom-kolom, oleh karenanya beban setelah tahapan ini naik kembali hingga mencapai tahapan beban ke 58 yang merupakan beban maksimum dan simpangan maksimum. Simpangan maksimum yang dicapai pada tahap beban ke 58 ini adalah 10,999 cm dan beban maksimum 27219,41 kgf, Keruntuhan total pada struktur secara keseluruhan di capai setelah terjadi kerusakan berat pada kolom tengah di lantai 1 dengan kemunduran beban hingga 9121,668 kgf (kurang lebih 33% dari beban maksimum), pada tahap

pembebanan ke 59 atau tahap pembebanan terakhir. Pada kondisi struktur bangunan ini tidak mampu lagi menahan beban lateral, meskipun kerusakan berat yang terjadi hanya pada seluruh baloknya saja, pada kolom terjadi kerusakan berat hanya pada kolom tengah dilantai 1 (lantai dasar).



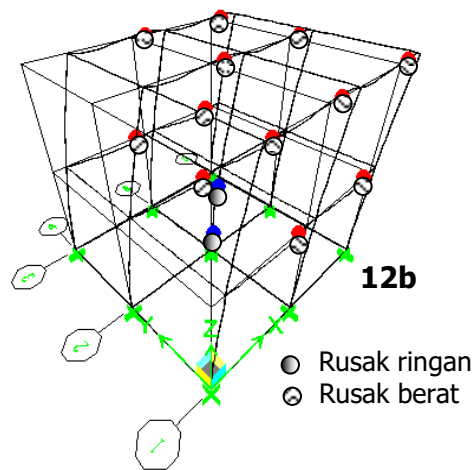
Gambar 11. Kurva Push Over Struktur pada Gempa Zona 6 Kondisi Tanah Lunak (Kode Struktur Risha 2L6)

Kinerja Struktur

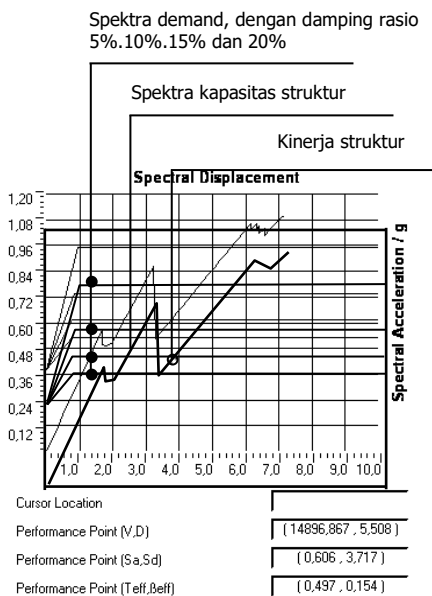
Gambar 12 adalah gambar kurva spektrum kapasitas struktur bangunan dan lokasi kerusakan pada komponen struktur. Kinerja struktur bangunan dinyatakan oleh titik potong antara kurva kapasitas dengan kurva *demand*, yaitu terdapat pada simpangan 5,5788 cm dan beban lateral 15121,06 kgf seperti terlihat pada gambar 12 a.

Pada simpangan demand 5,5788 cm tersebut kerusakan berat terjadi pada seluruh balok baik dilantai satu maupun lantai dua serta rusak ringan pada satu kolom, yaitu kolom tengah. Komponen-komponen struktur yang mengalami rusak berat dan rusak ringan dapat

dilihat pada gambar 12b. Bila memperhatikan gambar 6 dan gambar 7 diatas kurva momen vs *curvature* balok pinggir dan balok tengah, kerusakan yang terjadi belum melampaui kriteria kerusakan yang dapat diterima, walaupun balok-balok tersebut dalam kondisi rusak berat tetapi masih mampu menahan gaya lateral dan vertikal (gravitasi). Ketentuan dari ATC 40 mengenai *Seismic evaluation and retrofit of concrete building*, disebutkan bahwa simpangan perlu tidak diizinkan melebihi simpangan yang menimbulkan kerusakan berat pada komponen struktur bangunannya. Bila ketentuan tersebut diterapkan pada sistem struktur ini, maka struktur rumah Risha 2 lantai tanpa dinding memiliki kinerja yang baik bila dibangun di zona 6 gempa indonesia dengan kondisi tanah lunak.

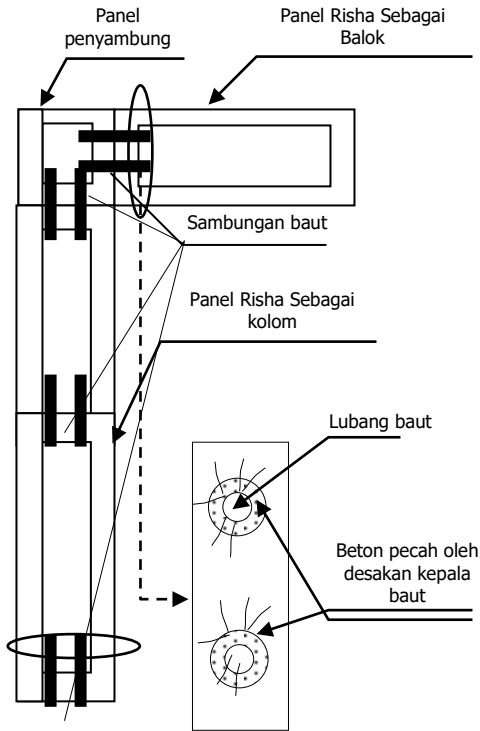


Gambar 12. Kurva Kapasitas vs Demand dalam Format ADRS pada Gempa Zona 6 Kondisi Tanah Lunak

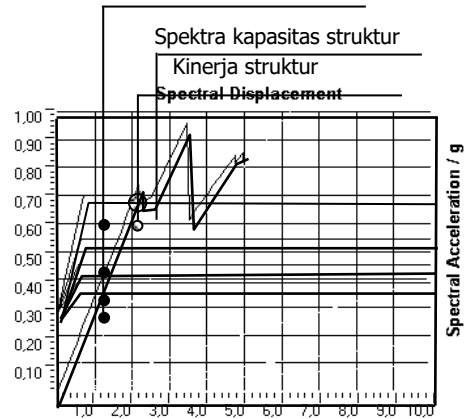


12a

Hasil uji laboratorium dengan menggunakan benda uji skala penuh, struktur ini mampu memikul beban gempa untuk seluruh wilayah gempa Indonesia. Ketidak selarasan ini terjadi disebabkan oleh perbedaan asumsi, dimana dalam perhitungan dalam model komputer seluruh sambungan dianggap jepit sempurna, oleh karenanya kerusakan akan terjadi pada panel RISHA, sedangkan pada model struktur uji laboratorium diuji dengan kondisi struktur model apa adanya dan kerusakan yang terjadi tidak didominasi pada panel RISHA tapi pada sambungan baut antara komponen balok dan kolom, dimana beton disekitar baut pecah oleh desakan kepala baut seperti diperlihatkan gambar sketsa berikut (Sketsa ini diperoleh dari hasil pengamatan penulis saat mengikuti dua kali uji struktur risa skala penuh dan satu kali uji struktur risa dua dimensi dengan dinding pengisi bata merah di laboratorium struktur pusat litbang permukiman).

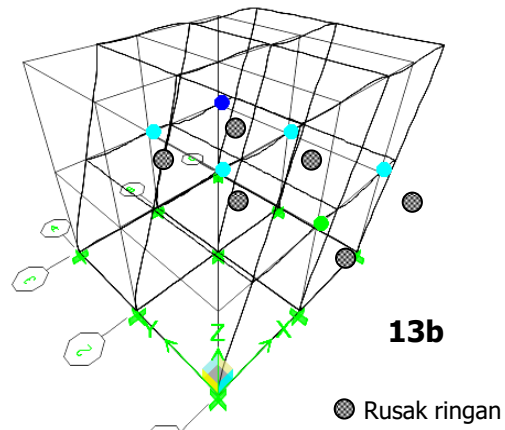


Spektra demand, dengan damping rasio 5%.10%.15% dan 20%



Cursor Location	(9,06 , 3,779E-01)
Performance Point (V,D)	(21120,459 , 2,937)
Performance Point (S _a ,S _d)	(0,700 , 2,075)
Performance Point (T _{eff} ,β _{eff})	(0,345 , 0,050)

13a



13b

● Rusak ringan

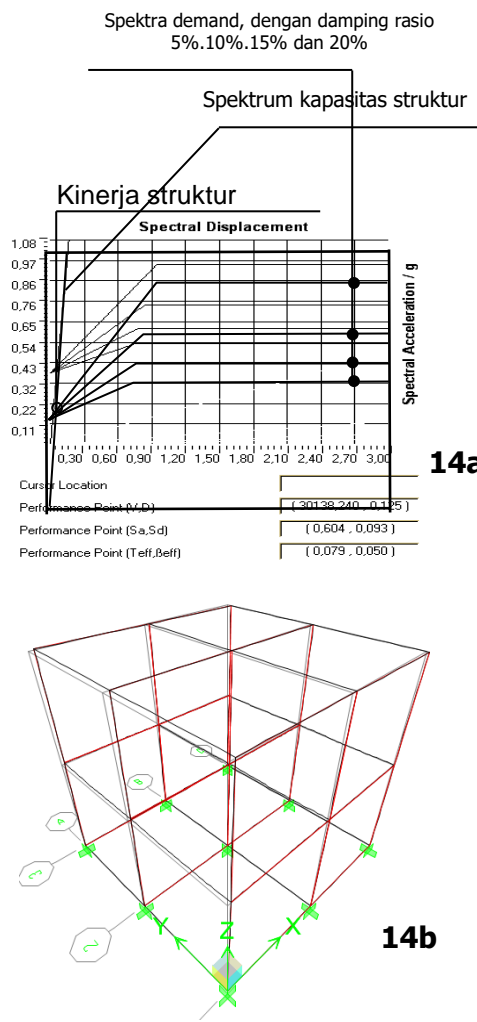
Struktur model yang sama seperti diatas, tetapi dibebani dengan beban gempa yang lebih rendah, yaitu dengan beban gempa di zona 6 kondisi tanah sedang dan keras serta zona 5 kondisi tanah lunak dan sedang. Hasil perhitungan menunjukkan, setelah beban gempa diturunkan hingga beban gempa di zona 5 kondisi tanah sedang, kinerja struktur masih tidak aman bila dibangun di wilayah-wilayah gempa tersebut. Tetapi memiliki keamanan yang baik bila dibangun di daerah zona gempa 5 dengan kondisi tanah keras, seperti diperlihatkan pada Gambar 13.

Gambar 13. Kurva Kapasitas vs Demand dalam Format ADRS pada Gempa Zona 5 Kondisi Tanah Keras

Titik kinerja berada pada 2,937 cm untuk simpangan dan untuk simpangan sebesar itu diperlukan beban sebesar 21,1 Tf seperti terbaca pada gambar 13a. Kondisi komponen struktur pada simpangan perlu sebesar 2,937 cm ini hanya menimbulkan kerusakan ringan

pada balok-balok di lantai-1 seperti terlihat pada gambar 13b, Dengan demikian struktur rumah Risha 2 lantai tanpa dinding (72 m2) akan aman bila dibangun sampai dengan di zona 5 gempa Indonesia dengan kondisi tanah keras.

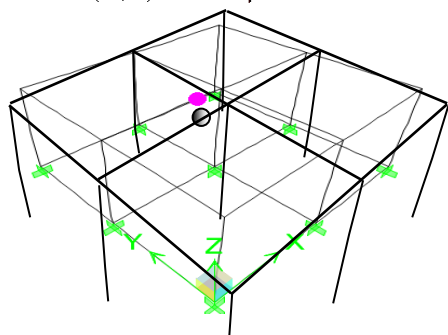
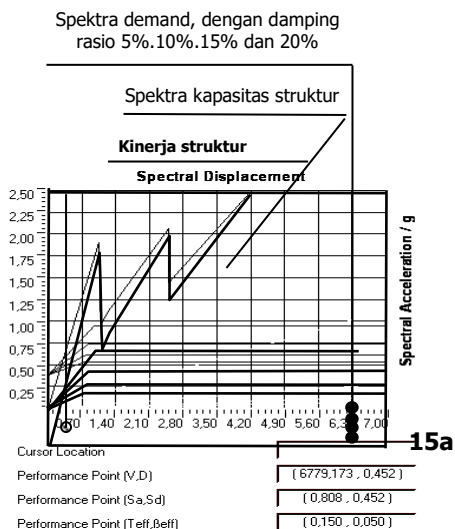
Struktur model yang sama seperti diatas, kemudian dipasang dinding, untuk mengetahui pengaruh dinding pada perilaku runtuh struktur. Dinding dipasang pada setiap frame arah X (karena arah gaya yang digunakan hanya arah x), atau arah gaya searah dengan sumbu X seperti pada gambar 5. Bahan dinding yang digunakan adalah pasangan conblock dengan properties: 1) masa per satuan volume 120 kg/m³, 2) berat persatuan volume 1200 kg/m³, 3) dan modulus elastisitas 2,04x 10⁸ kg/m². Beban yang digunakan adalah beban gempa di wilayah 6 pada kondisi tanah lunak. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dengan menambah dinding pasangan *con-block* pada frame kekakuan struktur bertambah, dan mereduksi simpangan yang dibutuhkan, dari Gambar 14 terbaca kinerja struktur yaitu simpangan *demand* 0,125 cm dan gaya lateral yang dibutuhkan untuk membuat simpangan sebesar 0,125 cm tersebut adalah 30,138 Tonf, lihat gambar 14a. Pada simpangan perlu 0,125 cm, dari gambar 14b tidak ada tanda kerusakan pada komponen struktur, ini berarti struktur risha dua lantai dengan dinding, sangat aman bila dibangun diseluruh wilayah gempa Indonesia.



Gambar 14. Kurva Kapasitas VS Demand Struktur dengan Dinding, dalam Format ADRS pada Gempa Zona 6 Tanah Lunak

Struktur rumah dengan denah yang sama seperti diatas, tapi untuk satu lantai (36 m2) dengan kode struktur uji Risha 2L6. 1 Lt, diuji dalam kondisi tanpa dinding dengan beban gempa wilayah 6 kondisi tanah lunak. Hasil uji menunjukkan bahwa struktur ini memiliki kinerja yang baik sehingga dapat

dibangun diseluruh wilayah gempa di Indonesia seperti dapat dilihat pada



Gambar 15. Kurva Kapasitas vs Demand Struktur Bangunan Satu Lantai dalam Format ADRS pada Zona Gempa 6 Tanah Lunak

Gambar 15. Titik kinerja tercatat 0,425 cm dengan beban 6,8 Tf, kerusakan yang terjadi hanya berupa leleh pada balok tengah saja, sedang komponen yang lainnya masih utuh seperti terlihat pada Gambar 15b. Dengan demikian struktur rumah risha satu lantai tanpa dinding dapat digunakan diseluruh wilayah gempa Indonesia.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Komponen-komponen struktur Rumah Risha memiliki mode keruntuhan geser, ditunjukkan oleh parameter kapasitas simpangan setiap komponen struktur yang rendah, yaitu : kapasitas rotasi I, rasio daktilitas curvatur dan daktilitas simpangan serta daktilitas simpangan.
2. Kemampuan deformasi maksimum pada struktur rangka dua lantai dengan luas bangunan 36 m² atau luas lantai 72 m² tanpa dinding dengan tidak menimbulkan kerusakan berat pada komponen struktur adalah 3,8 cm. Deformasi jauh lebih kecil dibandingkan dengan yang diperkenankan untuk struktur ini, yaitu 30 cm (0,05 x 600 cm).
3. Struktur rangka tanpa dinding dua lantai, seperti tersebut pada butir 2, masih aman bila dibangun di wilayah gempa 1 sampai dengan wilayah gempa 5 pada kondisi tanah sedang sampai lunak dan wilayah 6 pada kondisi tanah keras saja.
4. Struktur rangka dua lantai dengan dinding dari pasangan conblock dapat menambah kekakuan struktur bangunan. Dengan bertambahnya kekakuan, maka simpangan perlu untuk mengantisipasi gaya gempa menjadi berkurang. Setelah dihitung dengan beban gempa di wilayah 6 pada kondisi tanah lunak simpangan perlu hanya 0,125 cm. Dengan simpangan sebesar ini tidak menimbulkan kerusakan pada semua komponen strukturnya, maka struktur rumah dua lantai dengan dinding pasangan bata merah memiliki kinerja sangat baik

sehingga dapat dibangun diseluruh wilayah gempa Indonesia.

5. Struktur rumah satu lantai tanpa dinding, luas lantai 36 m², dibebani dengan beban gempa wilayah 6 kondisi tanah lunak. Dari hasil uji menunjukkan, pada simpangan perlu tidak terjadi kerusakan berat di hampir seluruh komponen strukturnya. Dengan demikian struktur rumah satu lantai dengan komponen dari panel Risha dapat dibangun diseluruh wilayah gempa Indonesia dengan kondisi tanah keras, sedang dan lunak.
6. Hasil perhitungan ini hanya berlaku untuk struktur model rumah Risha yang dihitung, dan belum memperhitungkan bukaan dinding serta ketidak simetrisan tata letak dinding.
7. Apabila mungkin terjadi perbedaan kinerja struktur yang dihitung dengan metoda CSM dengan dari hasil uji laboratorium skala penuh, itu disebabkan oleh perbedaan pengendali kerusakan yang terjadi pada komponen struktur setelah struktur model mencapai beban runtuh. Pada analisis dengan menggunakan metode CSM, kerusakan komponen struktur dikendalikan oleh penampang melintang panel yang berbentuk huruf "C" yang menyebabkan kegagalan geser.

Saran

1. Perencanaan rumah risha harus mengikuti ketentuan pedoman teknis Bangunan tahan gempa, mengingat struktur ini rentan terhadap ketidakstabilan.
2. Bangunan rumah risha tidak digunakan untuk bangunan tiga lantai atau lebih, untuk bangunan sarana umum yang melebihi

bentang modul 3 m disarankan untuk dihitung ulang.

3. Mengingat keberhasilan struktur ini tertumpu pada metoda pendirian dan pengencangan baut pada sambungan, maka pengawasan pada pekerjaan ini harus lebih mendapat perhatian khusus.
4. Perlu dilakukan ulang desain rangkaian penulangan untuk mendapatkan jumlah tulangan yang lebih sedikit dengan rangkaian yang lebih sederhana, tetapi tidak menurunkan kinerja yang ada.
5. Karena penampang panel RISHA cukup langsing ditambah dengan adanya pengurangan luas penampang melintang panel, maka perlu dicari sistim sambungan antar panel sedemikian rupa sehingga kerusakan yang terjadi tidak pada panel RISHA tapi justru pada alat penyambung (baut) nya. Sambungan seperti ini yang telah dikenal dan diterapkan pada bangunan 20 lantai, yaitu jenis sambungan yang dikenal dengan nama sambungan HYBRID. Tapi pada sambungan jenis ini keutamaan terdapat pada kekuatan tekan beton.

DAFTAR PUSTAKA

- ATC 40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building, 1996
- Hiroshi KURAMOTO and Masanomi TESHIGAWARA, Conversion of Structural System of Building Into SDOF System, Lecture note IISEE, 1996
- Pusat Litbang Permukiman, Pengembangan Rumah Sederhana Sehat (RISHA), Laporan Akhir Kegiatan Penelitian 2004
- Badan Standar Nasional, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa

untuk Bangunan Gedung, SNI 03-1726-2002.

T.Paulay, M.J.N. Priestley, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building