

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sudah diketahui bahwa dinding pengisi sering digunakan sebagai penyekat atau pemisah antara satu ruangan dengan ruangan yang lain, biasanya terbuat dari pasangan bata, batako, ataupun beton ringan yang dihubungkan dengan sambungan mortar. Dinding pengisi ini biasanya dipasang setelah pengerjaan struktur atau bersamaan dengan pekerjaan *finishing*, karena hal tersebut seringkali dinding pengisi ini dianggap komponen non struktural dan dianggap tidak memberikan pengaruh kepada struktur itu sendiri. Namun pada kenyataannya dinding pengisi memiliki efek signifikan pada karakteristik redaman struktur serta berkontribusi terhadap kekakuan dan kekuatan lateral.

Pada struktur Rangka dengan Dinding Pengisi (RDP) terdapat interaksi antara dinding pengisi terkekang dengan struktur rangka. Interaksi tersebut dapat meningkatkan kekakuan dan kekuatan sistem struktur secara menyeluruh, terutama terhadap pembebanan lateral termasuk beban gempa, dimana interaksi tersebut juga menimbulkan efek positif maupun negatif. Efek positif yang ditimbulkan adalah meningkatnya kekakuan struktur terutama saat menerima beban lateral, sedangkan efek negatifnya yaitu apabila struktur lantai yang memiliki dinding lebih sedikit dibandingkan dengan lantai di atasnya maka kekakuan lantai bawah akan lebih kecil dibandingkan dengan lantai di atasnya. Hal ini pada umumnya akan menimbulkan bahaya mekanisme *soft story*.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa keberadaan dinding memengaruhi kekakuan dan kekuatan struktur bangunan, seperti pada penelitian (Imran & Aryanto, 2009) mengenai perilaku dan kinerja struktur rangka beton bertulang dengan pasangan bata ringan, (Kakaletsis & Karayannis, 2009) mengenai perilaku struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi berlubang, (Sigmund & Penava, 2012) mengenai struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi berlubang dengan perkuatan disekitar lubang, (Budiwati, I. A. M. and Sukrawa, 2017) mengenai kinerja struktur rangka beton bertulang dengan penambahan dinding pengisi berlubang sebagai perkuatan seismic, dan (Wirawan, et al., 2022) mengenai struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi berlubang dengan strat diagonal. Untuk besar rasio lubang biasa diterapkan pada bangunan dengan batas aman rentang antara 20%-60% (Sukrawa, 2015). Perilaku RDP akan berbeda bila dibandingkan dengan perilaku rangka tanpa dinding, demikian pula pada RDP berlubang. Tegangan kritis terjadi pada pojok-pojok lubang di sekeliling lubang sehingga perlu ditambahkan kolom atau balok praktis di sekeliling lubang.

Banyak metode telah diusulkan pada literatur untuk memodel dinding pengisi pada sebuah struktur, seperti *equivalent diagonal strut method* (Smith B. S., 1967), *finite element method* (Mallick & Severn, 1968), *equivalent frame method* (Liauw, 1972), *plastic method analysis* (Liauw & Kwan, 1986), dan lain-lain. Meskipun banyak literatur tentang model analisis untuk dinding pengisi, namun petunjuk mengenai pemilihan model matematis yang tepat belum tersedia di literatur.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dilakukan studi mengenai pemodelan perilaku dan kinerja yang terjadi pada Struktur beton bertulang di antaranya struktur beton bertulang Rangka Terbuka (RT), struktur beton bertulang RDP, dan struktur beton bertulang Rangka dengan Dinding Pengisi Berlubang (RDPB), dimana pada model RDPB diterapkan rasio lubang sebesar 30%. Pemodelan dinding pengisi akan menggunakan strat diagonal dan elemen *shell*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan aplikasi SAP2000 dan hasil yang didapatkan akan dilakukan perbandingan perilaku dan kinerja antara RT, RDP, dan RDPB. Studi ini nantinya diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam pemodelan struktur yang digunakan untuk memodel struktur RDP.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka rumusan masalahnya yang akan dibahas dalam studi ini adalah:

1. Bagaimana perbedaan perilaku yang terjadi pada struktur beton bertulang dengan dan tanpa pasangan dinding pengisi berlubang terhadap beban gempa?
2. Bagaimana perbedaan kinerja yang terjadi pada struktur beton bertulang dengan dan tanpa pasangan dinding pengisi berlubang terhadap beban gempa?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari studi ini adalah:

1. Untuk mengetahui perbedaan perilaku yang terjadi pada struktur beton bertulang dengan dan tanpa pasangan dinding pengisi berlubang terhadap beban gempa.
2. Untuk mengetahui perbedaan kinerja yang terjadi pada struktur beton bertulang dengan dan tanpa pasangan dinding pengisi berlubang terhadap beban gempa.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian dibagi menjadi dua yaitu:

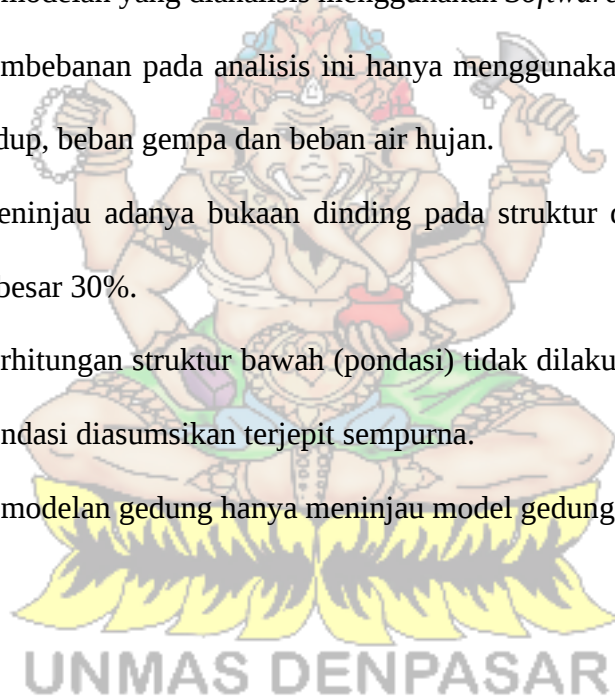
1. Untuk menambah wawasan terkait perilaku yang terjadi pada struktur beton bertulang dengan dan tanpa pasangan dinding pengisi berlubang terhadap beban gempa.
2. Untuk menambah wawasan terkait kinerja yang terjadi pada struktur beton bertulang dengan dan tanpa pasangan dinding pengisi berlubang terhadap beban gempa.

Dan diharapkan diperoleh model yang dapat digunakan sebagai acuan dalam analisis dan perencanaan struktur RDP.

1.5 Batasan Masalah dan Ruang Lingkup Penelitian

Agar mempermudah mencapai tujuan, maka akan dilakukan pembatasan masalah:

1. Struktur yang ditinjau adalah struktur beton bertulang dengan atap adalah plat beton, sehingga pembebanan atap hanya meninjau beban yang terjadi.
2. Pemodelan yang dianalisis menggunakan *Software* SAP2000 versi 22.
3. Pembebanan pada analisis ini hanya menggunakan beban mati, beban hidup, beban gempa dan beban air hujan.
4. Meninjau adanya bukaan dinding pada struktur dengan rasio bukaan sebesar 30%.
5. Perhitungan struktur bawah (pondasi) tidak dilakukan, karena struktur pondasi diasumsikan terjepit sempurna.
6. Pemodelan gedung hanya meninjau model gedung 3 dan 5 lantai.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Sudah banyak yang mengakui bahwa penambahan dinding pengisi pada struktur beton bertulang rangka terbuka memiliki efek yang signifikan, dimana dinding pengisi tersebut meningkatkan kekakuan dan kekuatan struktur rangka disekitarnya, beberapa pengujian laboratorium menunjukkan hasil yang hampir sama (Mehrabi, et al., 1996; Imran dan Aryanto, 2009; Kakaletsis dan Karayannis, 2009; Sigmund dan Penava, 2012). Namun karena kurangnya pengetahuan tentang perilaku komposit antara dinding dan rangka disekitarnya seringkali dinding pengisi ini dianggap komponen non struktural dan dianggap tidak memberikan pengaruh kepada struktur itu sendiri. Masalah pada RDP berlubang yaitu belum ada aturan yang ‘baku’ di Lembaga resmi BSN, ASCE, dan FEMA, sehingga belum ada yang dapat dijadikan pedoman untuk perencanaan, walaupun sudah ada penelitian terkait tentang perencanaan RDP berlubang, (Sukrawa & Budiwati, 2019).

Maka dari pembahasan di atas perlu dilakukan studi analisis linier dan analisis statik non linier untuk mengetahui perilaku dan kinerja yang terjadi pada struktur RDP, disamping itu studi ini juga bertujuan untuk mengetahui dampak dari dinding pengisi terhadap suatu struktur baik itu untuk dinding penuh ataupun dinding yang diberikan bukaan atau lubang.

2.1 Konstruksi Beton Bertulang

2.1.1 Beton

Beton merupakan campuran antara semen Portland atau semen hidraulik yang lain, agregat kasar, agregat halus, dan air, dengan atau bahan tambahan yang membentuk massa padat, (BSN, 2019).

Proses awal terjadinya beton adalah pasta semen yaitu proses hidrasi antara air dengan semen, selanjutnya jika ditambahkan dengan agregat halus mortar dan jika ditambahkan dengan agregat kasar menjadi beton. Penambahan material lain akan membedakan jenis beton, misalnya yang ditambahkan adalah tulangan baja akan terbentuk beton bertulang. Nilai kuat tekan beton dengan kuat tariknya tidak berbanding lurus. Setiap usaha perbaikan mutu kekuatan tekan hanya disertai oleh peningkatan yang kecil dari kuat tariknya. Menurut perkiraan kasar nilai kuat tarik berkisar antara 9% - 15% kuat tekannya. Kecilnya kuat tarik ini merupakan salah satu kelemahan dari beton biasa. Untuk mengatasinya, beton dikombinasikan dengan tulangan beton dimana baja biasa digunakan sebagai tulangannya, (Mulyono, T., 2004).

2.1.2 Karakteristik beton

1. Modulus elastisitas

Menurut BSN, (2019), nilai modulus elastisitas beton (E_c) ditentukan sebagai berikut:

$$E_c = W_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c} \quad (2.1)$$

dimana:

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

W_c = berat volume beton (kgf/m^3)

f'_c = kuat tekan puncak beton (N/mm^2)

2. Hubungan tegangan-regangan

Mander, et al., (1989), mengusulkan hubungan tegangan-regangan parametrik beton terdiri dari dua bagian, yaitu bagian lengkung (curved) dan bagian lurus (linear), seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1.

Persamaan untuk bagian lengkung ($\epsilon_c \leq 2\epsilon'_c$):

$$f_c = \frac{f'_c x^r}{r - 1 + x^r} \quad (2.2)$$

dengan:

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - \left(\frac{f'_c}{\epsilon'_c}\right)} \quad (2.4)$$

Persamaan untuk bagian lurus ($2\epsilon'_c < \epsilon_c \leq \epsilon_u$):

$$f_c = \left(\frac{2f'_c r}{r-1+2r}\right) \left(\frac{\epsilon_u - \epsilon_c}{\epsilon_u - 2\epsilon'_c}\right) \quad (2.5)$$

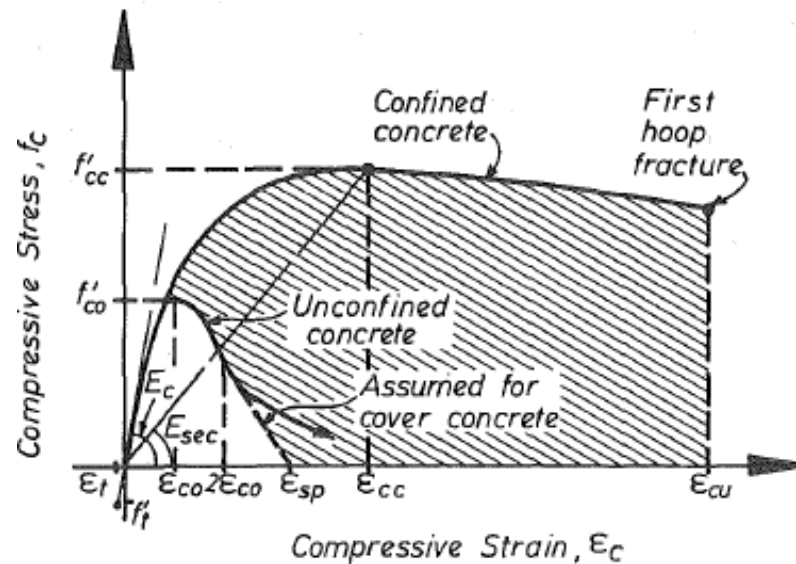
dimana:

f_c = tegangan beton

ϵ_c = regangan beton

ϵ'_c = regangan beton saat kuat tekan puncak (f'_c)

ϵ_u = regangan ultimit beton



Gambar 2. 1 Bentuk kurva tegangan-regangan untuk beton

Sumber: (Mander. et al, 1989)

2.1.3 Beton Bertulang

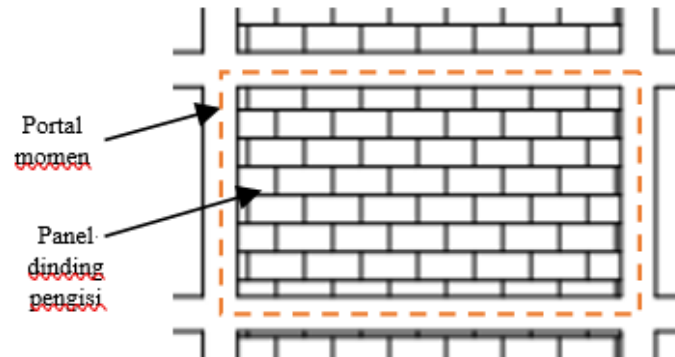
Pada SNI 03-2847-2019 mendefinisikan beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya. Beton bertulang terbuat dari gabungan antara beton dan tulangan baja. Oleh karena itu, beton bertulang memiliki sifat yang sama seperti bahan-bahan penyusunnya yaitu sangat kuat terhadap beban tekan dan beban tarik. Tulangan baja berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki oleh beton. Tulangan baja juga dapat menahan gaya tekan sehingga digunakan pada kolom dan pada berbagai kondisi lain, (BSN, 2019).

2.2 Dinding Pengisi

2.2.1 Definisi dinding pengisi

Dinding pengisi merupakan dinding yang berada di antara balok dan kolom biasanya terbuat dari pasangan bata/batako (masonry) atau bahan lain seperti kayu, plywood, gypsum, atau bahan lainnya. Dalam kasus dinding yang kaku dan kuat seperti batako dan bata, walaupun lebih getas dari bahan kerangka, keberadaannya di antara struktur kerangka akan menimbulkan interaksi yang mengubah kekakuan struktur terutama saat menerima beban lateral akibat gempa atau angin.

Dinding pengisi sering digunakan sebagai partisi pemisah di bagian dalam atau penutup luar bangunan pada struktur portal beton bertulang maupun struktur portal baja, khususnya untuk bangunan rendah dan bertingkat sedang. Dinding pengisi tersebut dipasang apabila struktur utama selesai dikerjakan, jadi pelaksanaannya bersamaan dengan pelaksanaan finishing bangunan. Oleh sebab itu, dalam perencanaannya dianggap sebagai komponen non-struktur, bahkan keberadaannya tidak menjadi permasalahan dalam pemodelan struktur asalkan intensitas beban yang timbul sudah diantisipasi terlebih dahulu (misal, dianggap sebagai beban merata). Meskipun dikategorikan sebagai komponen non-struktur tetapi mempunyai kecenderungan berinteraksi dengan portal yang ditempatinya terutama bila ada beban horizontal (akibat gempa) yang besar. Interaksi yang timbul kadang menguntungkan kadang merugikan bagi kinerja portal utamanya, dan hal tersebut menjadi perdebatan yang cukup lama, (Dewobroto, 2005).



Gambar 2. 2 Rangka dengan dinding pengisi

2.2.2 Karakteristik Pasangan Dinding Bata

Karakteristik dari pasangan dinding bata yaitu:

1. Modulus elastisitas

FEMA-356 merekomendasikan hubungan antara modulus elastisitas (E_m) dengan kuat tekan pasangan dinding bata (f'_m) sebagai berikut:

$$E_m = 550 f'_m \quad (2.6)$$

2. Kuat geser

Menurut Grimm, (1975), nilai untuk kuat geser dari pasangan dinding bata (τ) berkisar antara 410 kN/m² sampai 4690 kN/m².

3. Kuat tarik diagonal

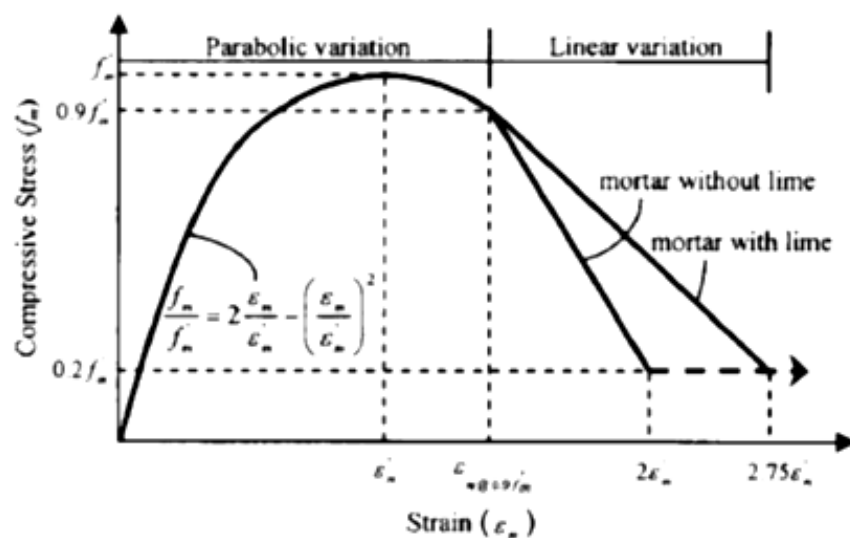
Grimm, (1975), merekomendasikan persamaan berikut untuk memperkirakan kuat tarik diagonal dari pasangan dinding bata (f_{at}) dalam satuan psi:

$$f_{at} = k \sqrt{f'_m} \quad (2.7)$$

dengan k adalah faktor konstanta yang nilainya berkisar antara 2,5 sampai 4,5.

4. Hubungan tegangan-regangan

Kaushik, et al., (2007), mengusulkan hubungan tegangan-regangan parametrik pasangan dinding bata seperti pada Gambar berikut:



Gambar 2. 3 Kurva tegangan-regangan pasangan dinding bata
Sumber: (Kaushik, et al., 2007)



2.3 Rangka dengan Dinding Pengisi (RDP)

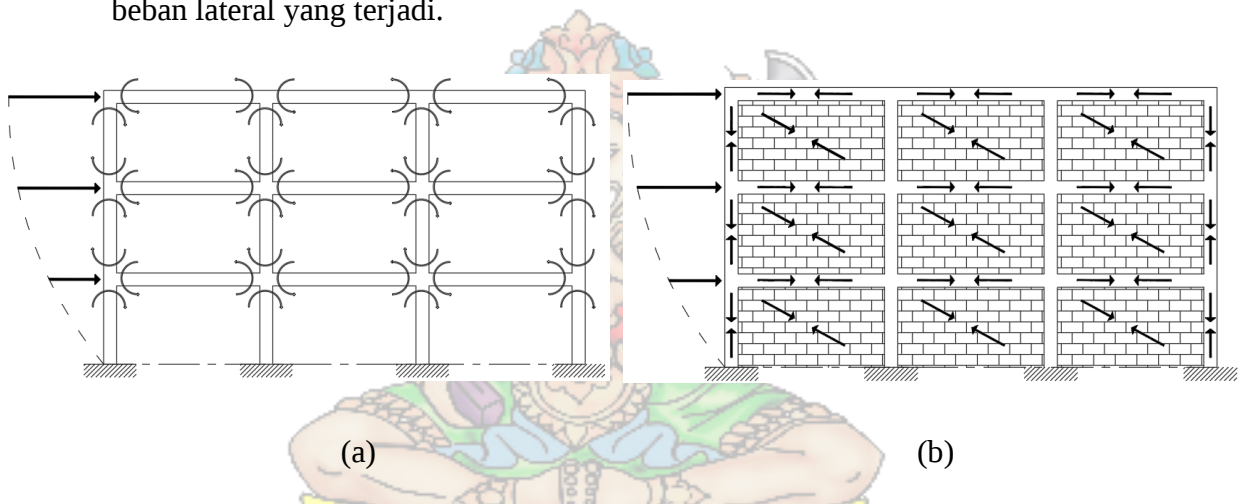
Dinding pengisi pada struktur rangka sering dianggap sebagai komponen non struktur dan hanya berfungsi sebagai penutup rangka. Meskipun dianggap sebagai komponen non struktur, keberadaan dinding pengisi mempunyai kecenderungan berinteraksi dengan rangka yang ditempatinya terutama apabila terjadi gempa. Dinding pengisi memberikan sumbangan besar terhadap

kekakuan dan kekuatan struktur sehingga perilaku keruntuhannya berbeda dibandingkan dengan rangka terbuka, (Dewobroto, 2005).

Dinding pengisi dari bata berperilaku seperti batang diagonal tekan dan menambah kekakuan pada struktur rangka beton bertulang maupun struktur rangka baja pada suatu bangunan. Penambahan kekakuan tergantung dari ketebalan dinding, kuat tekan dinding dan kuat tekan mortar beserta jumlah panel struktur rangka yang mempunyai dinding bata pengisi. Penambahan kekakuan pada bangunan yang diakibatkan oleh adanya dinding pengisi akan mengurangi kemampuan struktur rangka untuk melentur dan berdeformasi. Pada struktur rangka daktail beton bertulang, dinding pengisi dari bata akan menghalangi elemen utama struktur (seperti kolom dan balok) untuk berperilaku daktail, sebaliknya beberapa struktur memperlihatkan perilaku yang getas (tidak daktail). Ini akan mencapai puncaknya dalam suatu keruntuhan yang tiba-tiba dan sangat dramatis. Bagaimanapun, sebagian besar bangunan berstruktur rangka beton bertulang maupun struktur baja dengan dinding pengisi dari bata tidak didesain untuk memperhitungkan pengaruh perilaku dinding bata, (Murty, et al., 2009).

Kegagalan struktur pada dinding pengisi sering terjadi akibat kegagalan geser pada rangka ataupun dinding. Selain itu jenis kegagalan lain yang terjadi pada struktur portal dengan dinding pengisi adalah kegagalan tekan bagian pojok atas dinding dan kegagalan tarik yang terjadi pada kolom struktur bagian bawah, (Smith & Coull, 1991).

Interaksi struktur rangka terbuka dapat dilihat pada gambar 2.4 (a). Struktur rangka terbuka akan mengalami reaksi lentur pada bagian kolom dan baloknya. Sedangkan interaksi dinding pengisi pada struktur rangka dapat dilihat pada gambar 2.4 (b). Struktur dengan dinding pengisi pada bagian kolom dan lentur tidak mengalami kondisi lentur tetapi terjadi gaya aksial yang diterima oleh kolom maupun balok. Dinding sendiri mengalami gaya tekan diagonal akibat beban lateral yang terjadi.



Gambar 2. 4 (a) Struktur rangka terbuka; (b) Stuktur rangka dengan dinding pengisi

2.4 Pemodelan dalam SAP 2000

Analisis pemodelan untuk struktur bangunan yang tinggi bergantung pada beberapa keadaan dan pendekatan yang berhubungan dengan tipe dan ukuran struktur dan banyaknya tingkat dalam desain rancangan. Pemodelan struktur berkembang dengan cepat seiring dengan dukungan teknologi komputer yang makin canggih. Kemudahan yang diberikan dalam pemodelan struktur dengan komputer dapat mempercepat proses perhitungan, sehingga yang menjadi fokus

para perancang bangunan adalah bagaimana cara menginterpretasikan permasalahan yang ada ke dalam model struktur yang dapat diproses komputer.

Komponen struktur biasanya terdiri dari balok, kolom, dan pelat. Untuk memodel komponen struktur tersebut, SAP 2000 telah menyediakan beberapa elemen yang dapat digunakan di antaranya elemen frame, elemen *shell*, elemen gap, dan elemen strat, (CSI, 2016).

2.4.1 Elemen *Frame*

Dewabroto, (2004), menjelaskan bahwa elemen frame pada SAP 2000 telah disiapkan untuk memodel struktur yang dapat diidealisasikan sebagai rangka (elemen garis atau elemen satu dimensi) dalam ruang orientasi ruang/3D. Dalam SAP 2000 dimana nodal, elemen atau *constrain* model struktur mempunyai sistem koordinat tersendiri yang disebut sebagai sistem koordinat lokal yang diberi nama sumbu 1, 2 dan 3. Tetap default, sistem koordinat sumbu lokal 1 – 2 – 3 dari suatu nodal adalah identik dengan sistem koordinat global X – Y – Z, (Dewabroto, 2004).

2.4.2 Elemen *Shell*

Elemen *shell* adalah tipe dari objek area yang digunakan untuk memodel perilaku membran, pelat, dan *shell* dalam bidang dan struktur tiga dimensi. Pada program SAP2000, penggunaan elemen *shell* dapat dibagi menjadi tiga sesuai dengan perilakunya yaitu:

1. Membran

Elemen membran hanya dapat memperhitungkan gaya-gaya yang bekerja sejajar dengan bidang (*in-plane*) dan momen drilling (momen yang bekerja

dengan sumbu putar tegak lurus arah bidang). Elemen ini dapat digunakan jika ingin memodel suatu bidang tanpa memperhitungkan gaya tegak lurus bidang.

2. Plat

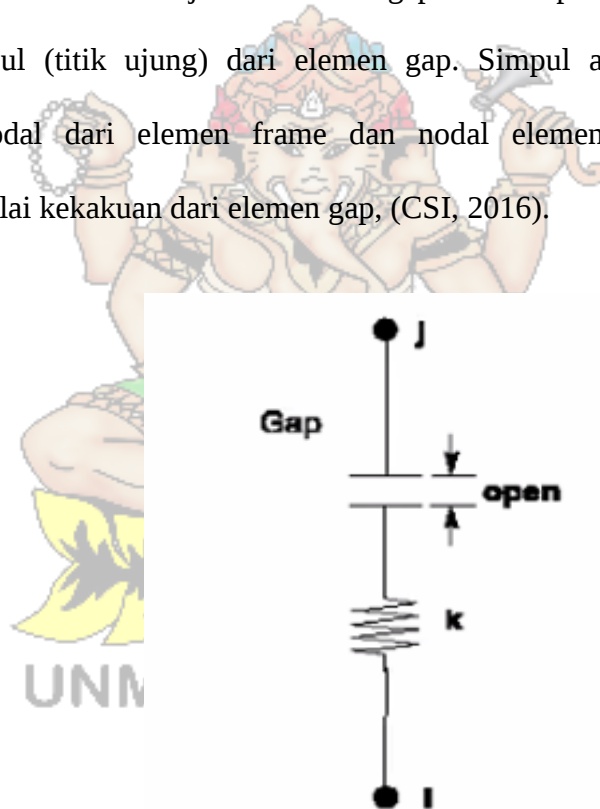
Elemen pelat merupakan kebalikan dari elemen membran, yaitu hanya dapat menerima gaya tegak lurus arah bidang (*out-of-plane*). Model pelat pondasi yang memiliki rasio ketebalan yang kecil dapat menggunakan elemen pelat ini

3. Shell

Jika dibutuhkan suatu elemen dengan perilaku gabungan antara elemen membran dan elemen pelat, maka elemen *shell* merupakan pilihannya. Elemen *shell* memiliki kemampuan untuk menahan gaya searah maupun tegak lurus bidang. Bentuk bidang elemen *shell* dapat dibagi menjadi dua. Jika nodal yang terdapat pada satu bidang elemen berjumlah 4 buah (j_1, j_2, j_3, j_4) maka bentuknya berupa segi empat (*quadrilateral*) dan jika terdapat tiga buah nodal (j_1, j_2, j_3) maka bentuknya berupa segitiga (*triangular*). Formulasi *quadrilateral* lebih akurat dibandingkan *triangular*. Elemen *triangular* hanya direkomendasikan untuk lokasi dimana tegangan tidak berubah dengan cepat. Penggunaan dari *triangular* yang besar tidak direkomendasikan dimana tekuk *in-plane* lebih signifikan. Untuk memodelkan elemen *shell*, dalam metode elemen hingga elemen *shell* harus dibagi menjadi elemen – elemen yang lebih kecil (*mesh*), (CSI, 2016).

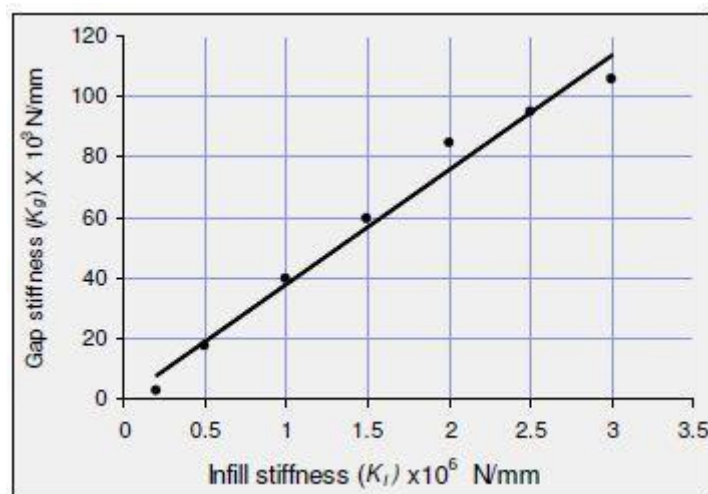
2.4.3 Elemen Gap

Elemen gap merupakan elemen yang menghubungkan dua material yang berbeda dengan tujuan untuk menyalurkan gaya yang berasal dari masing-masing material tersebut. Pada program SAP2000 terdapat fitur link element atau elemen penghubung yang dapat digunakan sebagai elemen gap. Elemen ini bekerja dengan cara mengikat dua buah titik simpul dan dapat dilepas sesuai kondisi tertentu. Gambar 2.5 menunjukkan elemen gap dan komponennya, dengan i dan j sebagai simpul (titik ujung) dari elemen gap. Simpul atau titik ujung yang dimaksud nodal dari elemen frame dan nodal elemen *shell* sedangkan k merupakan nilai kekakuan dari elemen gap, (CSI, 2016).



Gambar 2. 5 Elemen gap
Sumber: (CSI, 2016)

Aplikasi elemen kontak ini pada dinding pengisi salah satunya dibahas dalam penelitian dari Dorji & Thambiratnam, (2009). Pada penelitian tersebut dijelaskan tentang perbandingan kekakuan yang dimiliki oleh elemen gap dengan kekakuan dari dinding pengisi.



Gambar 2. 6 Grafik hubungan antara kekakuan dinding dan kekakuan gap
Sumber: (Dorji & Thambiratnam, 2009)

persamaan dari grafik yang terdapat pada gambar diatas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$K_g = 0.0378K_i + 347 \quad (2.8)$$

Dengan K_i

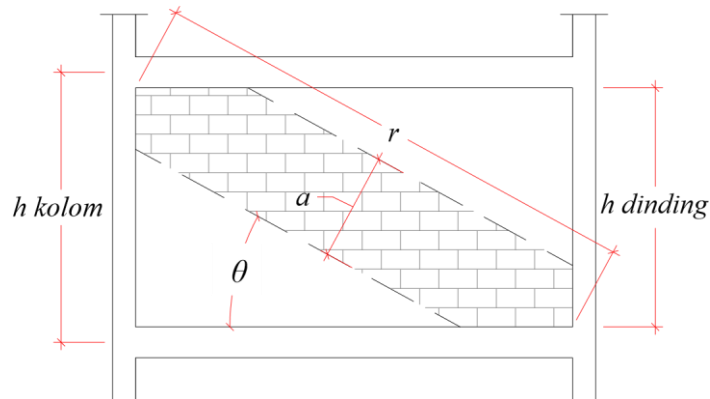
$$K_i = E_i t \quad (2.9)$$

Dimana K_g adalah kekakuan dari gap element dalam satuan N/mm, K_i adalah kekakuan dari dinding pengisi, E_i adalah modulus elastisitas dinding dan t adalah tebal dinding.

2.4.4 Elemen Strat Diagonal

Strat diagonal sudah tidak asing didengar karena sudah lama diterapkan pada pemodelan dinding pengisi, referensi yang terkait pun sudah banyak dapat ditemukan. Dinding pengisi mengalami gaya tekan akibat dari menerima gaya yang berasal dari struktur rangka disekelilingnya yang telah menerima gaya lateral. Gaya yang diberikan oleh struktur rangka tersebut akan ditahan oleh dinding secara diagonal, hal tersebutlah yang menjadi dasar untuk memodel dinding pengisi sebagai strat. Strat dalam desainnya juga hanya mampu menerima gaya aksial tekan dan tidak menerima gaya tarik. Asumsinya bahwa dinding pengisi tersusun atas material yang tidak homogen sehingga kuat tarik yang dimiliki material ini diabaikan.

Perumusan untuk lebar strat pun sudah banyak berkembang. Salah satu rumus yang cukup banyak digunakan termasuk dalam peraturan FEMA-356 terkait analisis dinding pengisi.



Gambar 2. 7 Model dinding pengisi sebagai strat diagonal
Sumber: (FEMA 356, 2000)

$$a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (2.10)$$

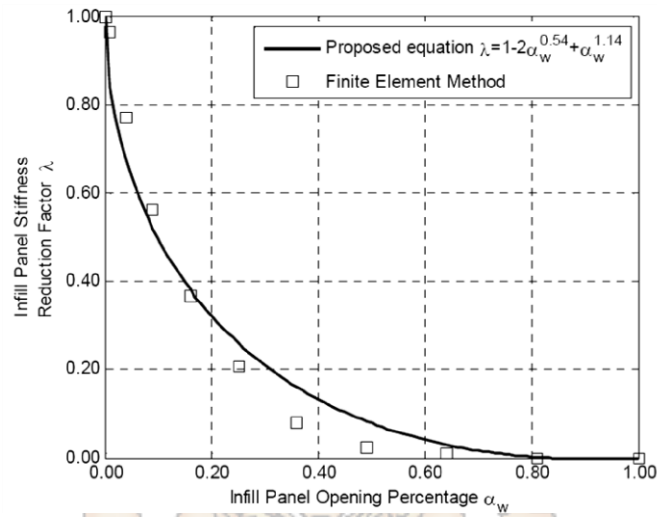
dimana λ_1 adalah:

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{4E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.11)$$

dengan a adalah lebar strat diagonal, r_{inf} adalah panjang strat, E_{me} adalah modulus elastisitas dinding pengisi, $E_{fe} I_{col}$ adalah modulus elastisitas dan momen inersia kolom, t_{inf} adalah tebal dinding dan tebal strat, h_{col} adalah tinggi kolom di antara as balok, h_{inf} adalah tinggi dinding pengisi, dan θ adalah sudut yang dibentuk oleh strat diagonal tinggi kolom di antara as balok, h_{inf} adalah tinggi dinding pengisi, dan θ adalah sudut yang dibentuk oleh strat diagonal.

Berdasarkan cara diatas, pemodelan dinding pengisi sebagai strat diagonal tidak akan mampu meninjau adanya bukaan atau lubang pada dinding. Maka dari itu, Asteris, et al., (2012), mengusulkan adanya faktor reduksi terhadap dimensi strat diagonal akibat adanya lubang, dengan ketentuan seperti pada dinding. Maka dari itu Asteris, et al., (2012), mengusulkan adanya faktor reduksi terhadap

dimensi strat diagonal akibat adanya lubang, dengan ketentuan seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Grafik hubungan antara faktor reduksi dengan persentase lubang pada dinding.

Sumber: (Asteris, et al., 2012)

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara persentase bukaan dinding dan faktor reduksi terhadap kekakuan dinding. Persamaan yang dihasilkan oleh grafik tersebut adalah:

$$\lambda = 1 - 2\alpha_w^{0.54} + \alpha_w^{1.14} \quad (2.12)$$

dengan α_w adalah persentase lubang (luas lubang dibagi luas dinding).

Ada juga persamaan pendekatan yang dipakai untuk menentukan lebar strat (Wds) RDP dinding penuh dari Pauly and Priestly (1992) dengan rumus $Wds = d/4$, yang dimana rumus tersebut didapatkan dari turunan rumus pada FEMA.

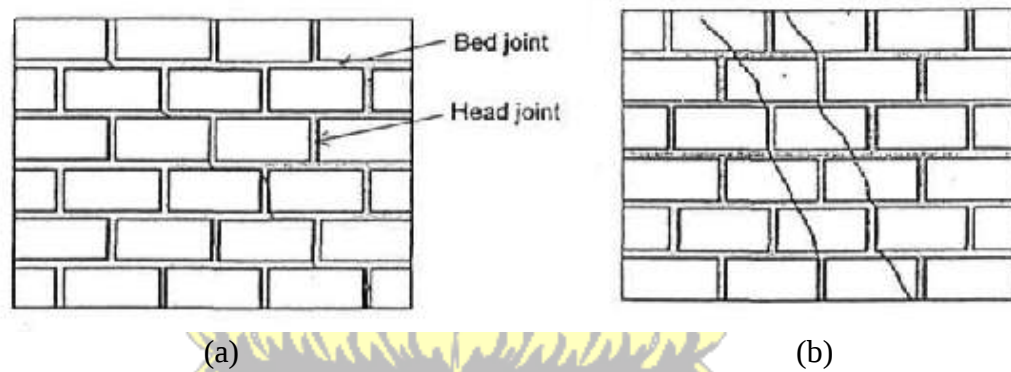
2.5 Perilaku Struktur RDP akibat Beban Lateral

Struktur RDP memiliki perilaku komposit dalam menahan gempa, kekakuan lateral dan kekuatan dari struktur tersebut sangat bergantung dari sifat-sifat struktur rangka, dinding pengisi, dan kekakuan relatif kedua komponen tersebut. Disamping dapat meningkatkan kekakuan, bracing in-plane pada masonry juga dapat mengurangi deformasi lateral dan mengubah perilaku dinamis. Hal tersebut karena sistem tersebut mampu memencarkan energi melalui friksi dan slip pada pertemuan struktural.

Struktur RDP memiliki perilaku komposit dalam menahan gempa, kekakuan lateral dan kekuatan dari struktur tersebut sangat bergantung dari sifat-sifat struktur rangka, dinding pengisi, dan kekakuan relatif kedua komponen tersebut. Disamping dapat meningkatkan kekakuan, bracing in-plane pada masonry juga dapat mengurangi deformasi lateral dan mengubah perilaku dinamis. Hal tersebut karena sistem tersebut mampu memencarkan energi melalui friksi dan slip pada pertemuan struktural.

Priesley dan Calvi dalam Crisafulli, (1997), menyatakan retak akibat tarik diagonal merupakan kegagalan struktur. Dikatakan sebagai kegagalan struktur karena dikhawatirkan dinding tersebut runtuh akibat beban muka. Peninjauan terhadap kekuatan geser dan kekuatan tarik dinding pengisi diperlukan saat dinding dibebani gaya lateral akibat gempa. Perilaku panel pengisi dipengaruhi oleh respon getas unit masonry terhadap beban tarik dan kekuatan mortar. Karena itu mode keruntuhan yang biasanya terjadi adalah:

1. Keruntuhan geser friksi, yaitu kegagalan dinding pengisi akibat ketidaklekatan atau geser pada *bed joint* yang terjadi pada tingkat tegangan normal rendah. Keretakan akan timbul secara bertahap seperti Gambar 2.9.(a).
2. Kegagalan diagonal tarik terjadi pada tegangan normal yang cukup tinggi. Keretakan terjadi pada *head joint* dan melalui bata tampak pada Gambar 2.9.(b).
3. Kegagalan diagonal tekan akibat timbul tegangan normal yang sangat tinggi bila dibandingkan dengan tegangan geser,

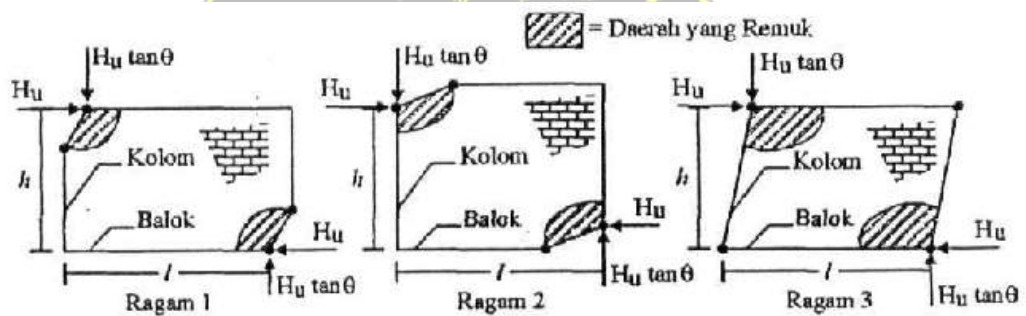


Gambar 2. 9 (a) Keretakan diagonal bertahap; (b) Kegagalan geser
Sumber: (Crisafulli, 1997)

2.6 Ragam Kegagalan Struktur RDP

Kegagalan yang terjadi pada suatu struktur rangka dengan dinding pengisi dipengaruhi oleh perbandingan tinggi dan bentang dinding pengisi serta kekakuan relatif komponen struktur rangka dan dinding pengisi. Sunlianto dan Agustino, (1999), pada studinya mempelajari mekanisme pemencaran energi gempa pada suatu struktur rangka dengan dinding pengisi batu bata berdasarkan klasifikasi ragam-ragam kegagalan dasar Liaw dan Kwan.

Liaw dan Kwan, (1983), mengklarifikasikan ragam-ragam kegagalan dasar (Gambar 2.10) menjadi 3 kelompok dan kemudian mengusulkan suatu konsep perencanaan berdasarkan perencanaan lantai per lantai dengan asumsi bahwa struktur tidak akan mengalami keruntuhan selama gaya geser pada lantai yang bersesuaian tidak melebihi gaya geser ultimit, H_u . Klasifikasi ragam-ragam kegagalan dan gaya geser lantai ultimit, H_u , yang diusulkan oleh Liaw dan Kwan tersebut adalah:



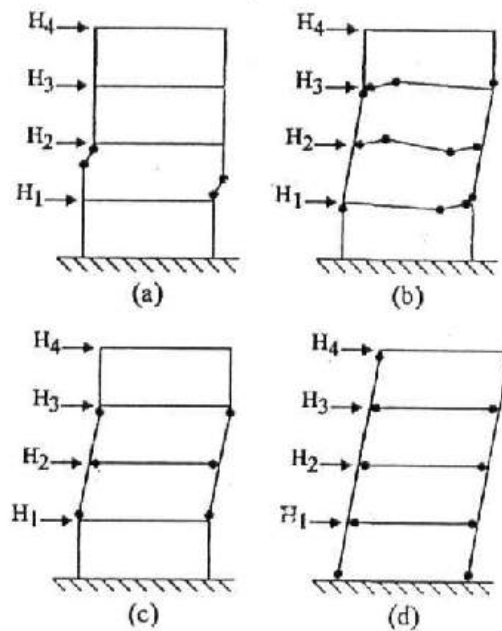
Gambar 2. 10 Klasifikasi ragam kegagalan

Sumber: (Liaw dan Kwan, 1983)

1. Ragam 1: Keremukan ujung dengan kegagalan pada kolom. Pada ragam ini ujung tekan dinding pengisi mengalami keremukan dan terbentuk sendi plastis pada ujung yang terbebani dan kolom.
2. Ragam 2: Keremukan ujung dengan kegagalan pada balok. Pada ragam ini ujung tekan dinding pengisi mengalami keremukan dan sendi plastis terbentuk pada ujung yang terbebani dan pada balok.
3. Ragam 3: Keremukan diagonal. Pada ragam kegagalan ini ujung tekan dinding pengisi mengalami keremukan lebih dahulu, kemudian menjalar ke bagian tengah dinding pengisi diikuti terjadinya sendi plastis pada kolom, balok, atau daerah sekitar pertemuan antara balok dan kolom.

Selain ketiga ragam di atas, Liaw dan Kwan, (1983), menyebutkan terdapat ragam kegagalan yang tipikal dengan ragam 3 yang menimbulkan kegagalan pada balok secara bersamaan di beberapa lantai disebut ragam 3+. Ragam-ragam kegagalan dasar di atas dikombinasikan satu dengan yang lain. Kombinasi ragam kegagalan yang tipikal antara lain dapat dilihat pada Gambar 2.11.

UNMAS DENPASAR



Gambar 2. 11 Ragam kegagalan tipikal struktur rangka dengan dinding pengisi tingkat banyak: (a) Ragam 1; (b) Ragam 2; (c) Ragam 3; (d) Ragam 3⁺

Sumber: (Liaw dan Kwan, 1983)

Selain Liaw dan Kwan, (1983), Priestley, (1992) dalam Aryanto, (2008), juga mengelompokkan pola keruntuhan dari rangka dengan dinding pengisi ke dalam 5 kategori:

- Kehancuran daerah sudut, CC (*Corner Crushing*)

Keruntuhan atau kerusakan terjadi pada daerah pojok portal atau paling sedikit salah satu pojoknya seperti terlihat pada Gambar 2.12 (a). Pola keruntuhan seperti ini umumnya disebabkan lemahnya kekuatan dinding pengisi yang ditahan oleh rangka yang memiliki *joint* yang lemah namun elemen balok – kolom yang kuat

- Keruntuhan geser, SS (*Sliding Shear*)

Keruntuhan berupa geser horizontal pada sambungan antara bata pengisi (*bed joint*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 (b). Pola

keruntuhan seperti ini disebabkan oleh lemahnya sambungan mortar sedangkan rangka sangat kuat.

- Keruntuhan tekan diagonal, DC (*Diagonal Compression*)

Pola keruntuhan ini ditunjukkan dengan kerusakan pada daerah tengah seperti Gambar 2.12 (c). Pola seperti ini disebabkan oleh kelangsingan dari dinding pengisi dimana keruntuhan terjadi akibat tekuk pada luar bidang (*out of plane*).

- Keruntuhan retak diagonal, DK (*Diagonal Cracking*)

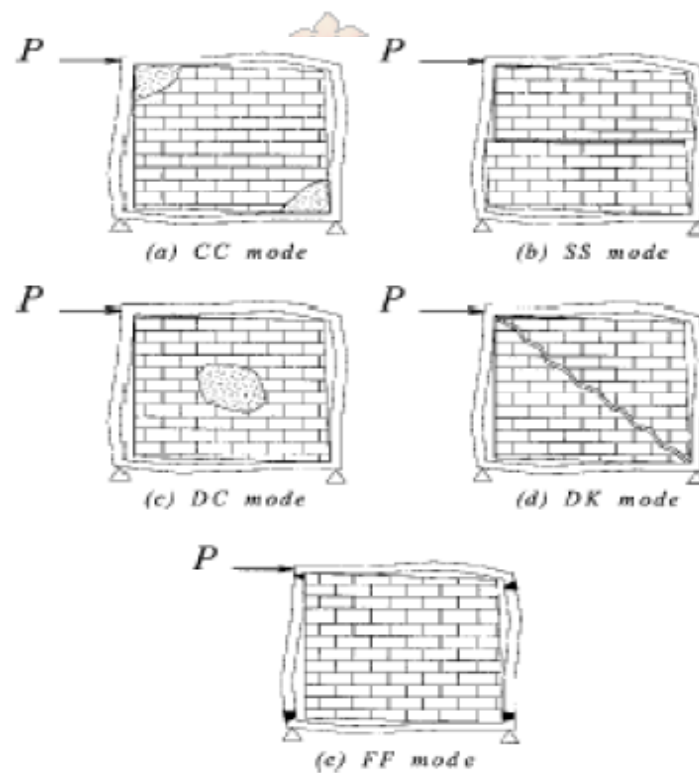
Keruntuhan retak diagonal terlihat dari munculnya retak yang menghubungkan dua sisi yang dibebani seperti terlihat pada Gambar 2.12 (d). Pola seperti ini disebabkan oleh lemahnya rangka atau rangka dengan *joint* yang lemah sedangkan dinding pengisi lebih kuat.

- Keruntuhan Rangka, FF (*Frame Failure*)

Terbentuknya sendi plastis pada kolom atau sambungan balok kolom seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12 (e) merupakan ciri utama pola keruntuhan rangka. Pola ini timbul akibat lemahnya rangka atau *joint* rangka sedangkan dinding pengisi lebih kuat.

Berdasarkan beberapa hasil penelitian pola keruntuhan yang umum terjadi adalah akibat keruntuhan daerah pojok (CC) dan keruntuhan geser (SS). Pola keruntuhan ketiga yaitu keruntuhan tekan diagonal (DC) umumnya jarang terjadi karena membutuhkan rasio kelangsingan yang cukup besar agar dapat terjadi tekuk pada bidang *out of plane* pada pembebanan bidang *in plane*. Sedangkan kelangsingan dari dinding pengisi ditentukan oleh ketebalan dinding yang

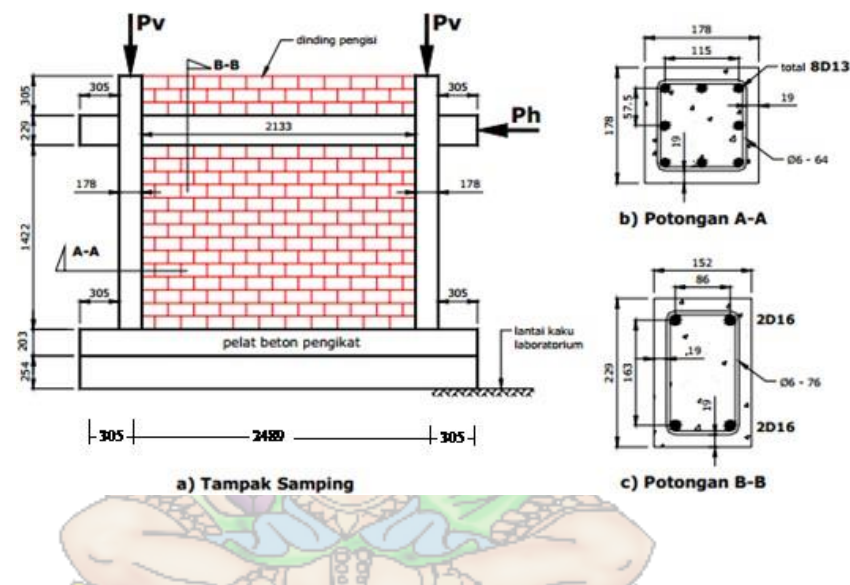
umumnya dibatasi oleh persyaratan ketebalan untuk hambatan akustik/suara dan kebakaran. Sedangkan pola keruntuhan retak diagonal (DK) pada dasarnya tidak dapat dikategorikan sebagai pola keruntuhan karena dinding pengisi masih mampu menahan beban setelah terjadi retak. Pada kenyataannya pola keruntuhan yang terjadi dilapangan sering terjadi pola keruntuhan rangka dinding pengisi merupakan gabungan dari beberapa pola tersebut.



Gambar 2. 12 Pola keruntuhan rangka dengan dinding pengisi
: (a) Keruntuhan daerah pojok, (b) Keruntuhan geser, (c) Keruntuhan diagonal tekan, (d) Keruntuhan retak diagonal dan (e) Keruntuhan rangka.

Sumber: (Priestley, 1992)

Mehrabi, et al., (1996), membuktikan bahwa portal dengan dinding pengisi mengalami kegagalan geser pada struktur portal dan mengalami keruntuhan geser diagonal pada dinding pengisi. Pada penelitian tersebut juga dilakukan pengujian terhadap portal terbuka (tanpa dinding pengisi) sebagai pembanding dengan konfigurasi struktur yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Portal dengan dinding dalam penelitian Mehrabi

Sumber: (Mehrabi. *et al.*, 1996)

Dinding pengisi menggunakan masonry dari blok beton padat berukuran 194x92x92 mm dengan kuat tekan 15,57 MPa dan dilekatkan dengan mortar yang memiliki kuat tekan 15,98 MPa. Untuk mensimulasi adanya beban gravitasi dari lantai di atasnya maka pada kedua kolom sampel uji diberikan beban vertikal konstan P_v sebesar 294 kN sedangkan beban lateral P_h diberikan secara bertahap sampai terjadi runtuh.

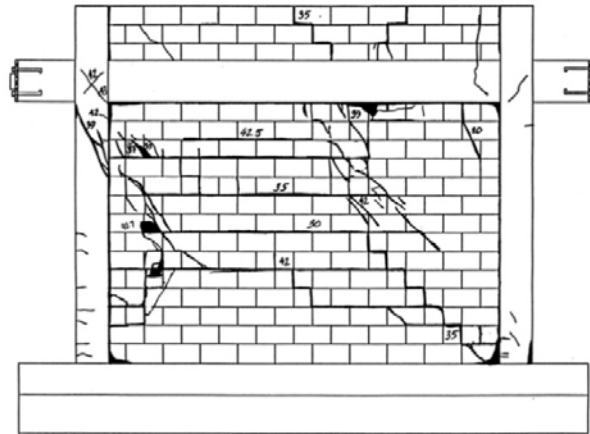
Hasil penelitian Mehrabi membuktikan bahwa struktur portal dengan dinding pengisi mampu menerima beban 2,6 kali lebih besar dengan lendutan 20 kali lebih kecil dibandingkan dengan portal tanpa dinding pengisi. Hal ini membuktikan bahwa dinding pengisi memberikan pengaruh terhadap kekakuan dan kekuatan struktur. Adapun hasil lendutan yang terjadi pada penelitian tersebut disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Hasil Penelitian Mehrabi

Sampel	Retak ke-1 Dinding		Uji Lateral Maks		Kondisi Keruntuhan
	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Beban (kN)	Lendutan (mm)	
Portal terbuka	-	-	106,31	65,28	Lentur
Portal isi	277,68	3,30	277,68	3,30	Retak diagonal

Sumber: Mehrabi, et al., (1996)

Perilaku keruntuhan yang terjadi pada struktur dengan dinding pengisi adalah timbulnya retak diagonal pada dinding pengisi dan terjadi retak akibat geser dan tarik pada kolom struktur yang terbentuk pada beban lateral maksimum. Hasil penelitian Mehrabi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.14 yang merupakan ilustrasi keruntuhan portal pada penelitian



Gambar 2. 14 Kondisi keruntuhan portal penelitian Mehrabi
Sumber: (Mehrabi, *et al.*, 1996)

Keruntuhan pada struktur portal terjadi akibat gaya tekan dan tarik yang disebabkan oleh beban horizontal yang diberikan sedangkan pada dinding pengisi terjadi retak geser pada bagian tengah serta keruntuhan akibat tekan yang terjadi pada pojok kiri atas dinding pengisi. Retak akibat tarik juga terjadi pada bagian pojok kanan bawah dinding pengisi. Namun demikian, adanya dinding pengisi tersebut mampu menambah kekuatan dan kekakuan struktur portal yang ditempatinya sehingga dapat mengurangi deformasi yang terjadi pada struktur

2.7 Penelitian Terkait

2.7.1 Struktur Rangka Beton Bertulang dengan pasangan Bata Ringan

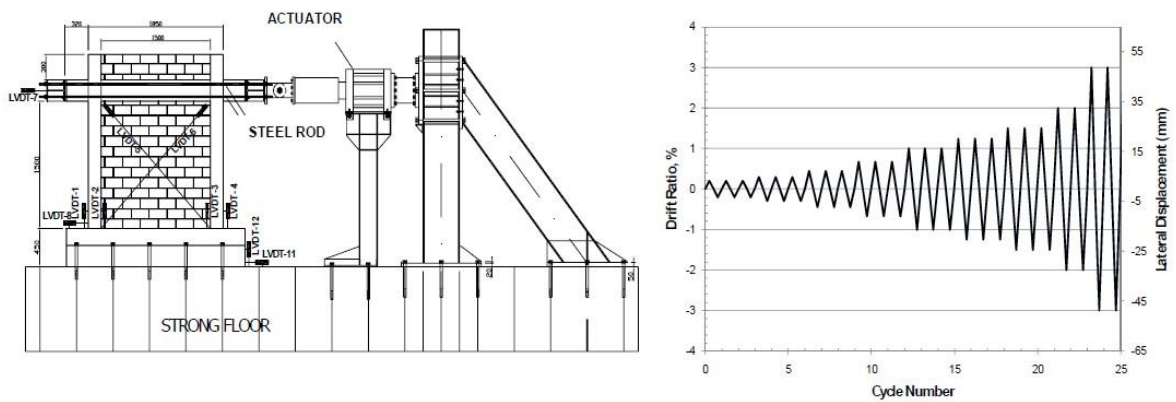
Imran & Aryanto, (2009), melakukan penelitian eksperimen dengan struktur rangka dinding pengisi yang bertujuan untuk mengetahui kinerja dan perilaku struktur rangka dinding pengisi yang dikenai beban lateral yang dilakukan pada dinding pengisi bata ringan AAC yang selanjutnya disebut model

1 dan bata 41 konvensional yang disebut model 2. Struktur tersebut merupakan struktur rangka satu tingkat dengan tinggi 1750 mm dan satu bentang lebar 1675 mm.

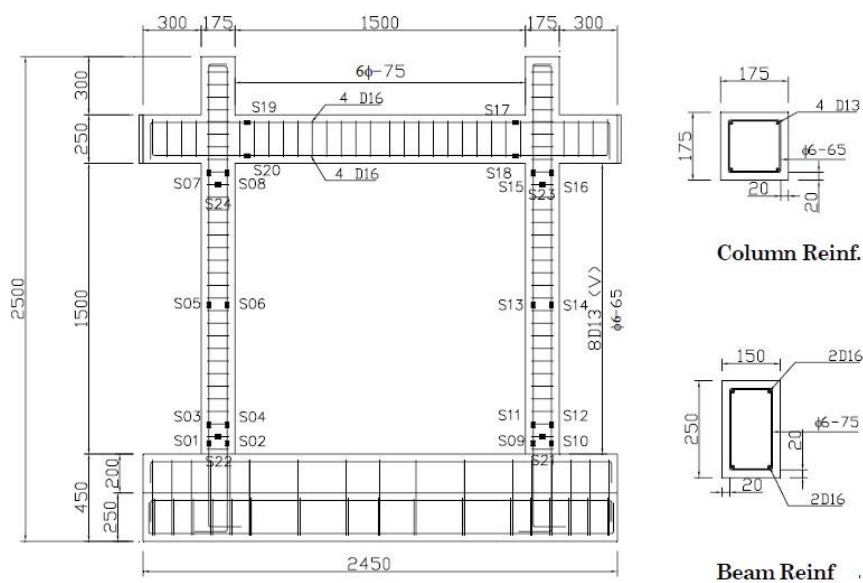


Gambar 2. 15 Model eksperimen dinding pengisi bata ringan dan bata konvensional
Sumber: (Imran & Aryanto, 2009)

Penampang rangka yang digunakan yaitu pasangan dinding bata dengan dimensi panjang, tinggi, dan tebal adalah 1500 mm, 1500 mm, dan 100 mm. Dimensi balok 150/250 mm dengan tebal penutup beton 20 mm, tulangan longitudinal 2D16 serta tulangan transversal D6-75. Dimensi kolom 175/175 mm dengan tebal penutup beton 20 mm, tulangan longitudinal 4D13 serta tulangan transversal D6-65. Pada penelitian tersebut, beban balok di atas dinding dianggap sebagai beban lateral menggunakan displacement control yang ditunjukkan pada Gambar 2.16 di bawah ini. Beban dinding pada balok setinggi 300 mm dengan tebal 100 mm adalah 44,31 kg/m'. Detail penulangan digunakan pada penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.17.



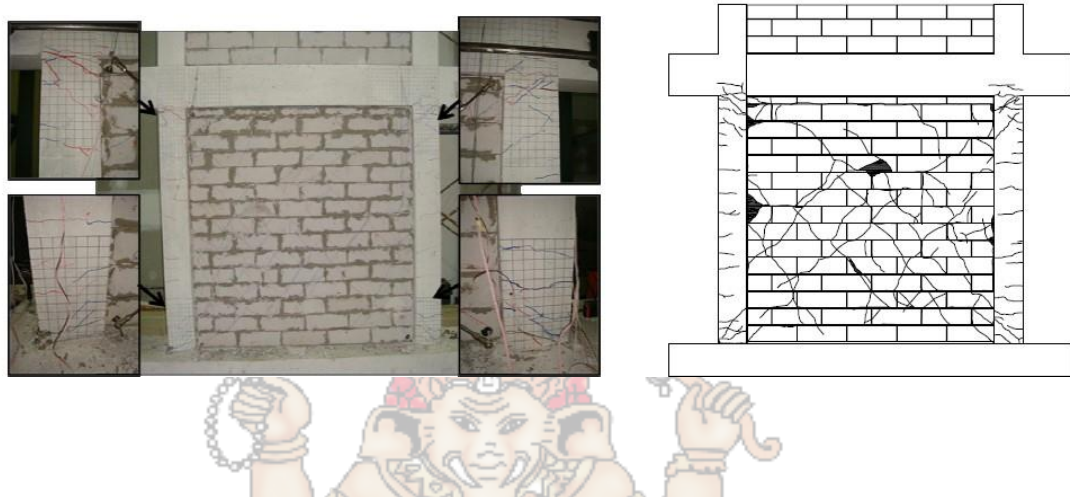
Gambar 2. 16 Susunan dan program pembebanan eksperimen
Sumber: (Imran & Aryanto, 2009)



Gambar 2. 17 Detail penulangan
Sumber: (Imran & Aryanto, 2009)

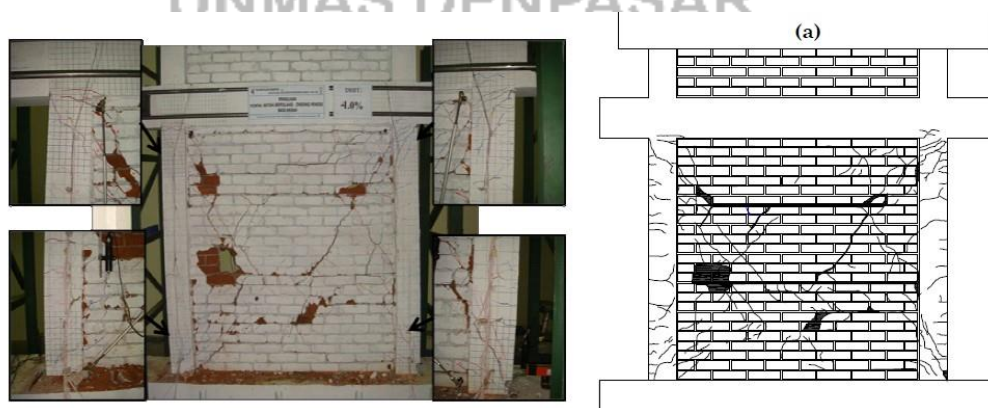
Hasil dari eksperimen menunjukkan bahwa pada model 1, retak mulai terbentuk pada sepanjang diagonal dinding. Retak terjadi pada beban lateral 15,63 kN dengan perpindahan lateral 1,34 mm. Pada beban yang lebih besar, pemisahan antara dinding dan rangka sepanjang muka kolom terus membesar

sesuai dengan penambahan beban sampai dinding mengalami kehancuran utama pada pojok kanan atas dan setengah dari tinggi dinding seperti tampak pada



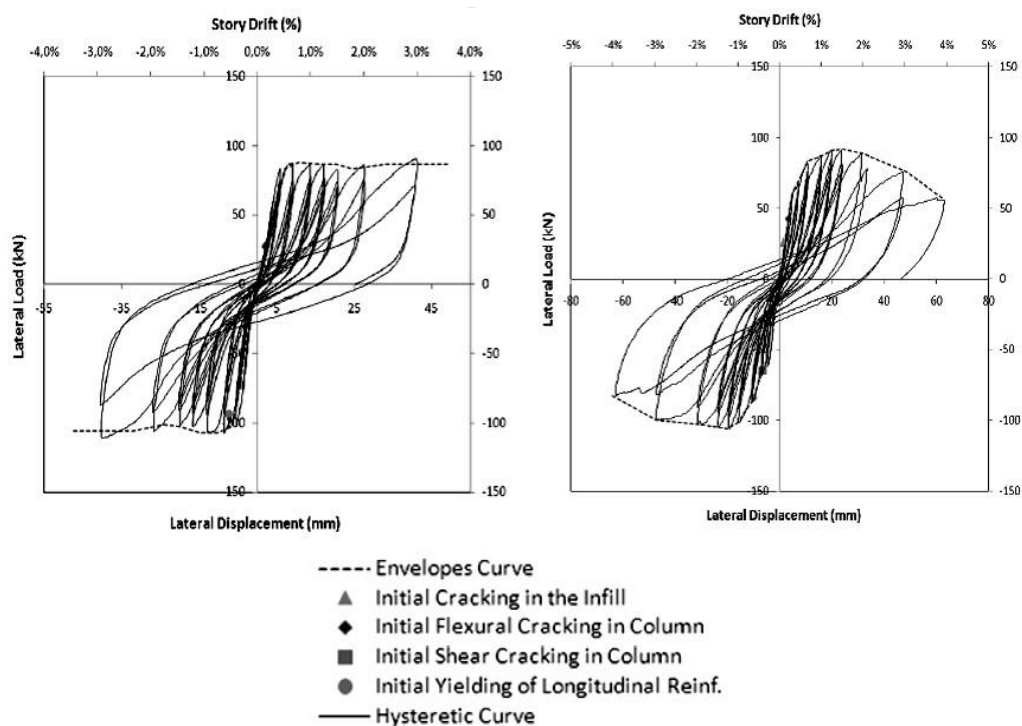
Gambar 2. 18 Pola retak pada model 1
Sumber: (Imran & Aryanto, 2009)

Sedangkan retak pertama pada model 2 terjadi saat beban lateral 26 kN dengan perpindahan lateral 1,26 mm. Retak horizontal utama terjadi sekitar 1/3 – 2/3 tinggi dinding sedangkan retak diagonal terjadi pada bagian pojok atas dinding seperti tampak pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 19 Pola retak pada model 2
Sumber: (Imran & Aryanto, 2009)

Kurva histeretis pada model 1 memiliki perilaku histeretis yang lebih baik dibanding model 2 meskipun kedua model memperlihatkan beban puncak yang mirip (Gambar 2.20). Penurunan kekuatan pada model 2 terjadi saat perpindahan lebih besar dari 20 mm sedangkan model 1 hanya sedikit penurunan kekuatan. Selain itu, model 1 menunjukkan rasio daktilitas yang lebih besar daripada model 2.



Gambar 2. 20 Kurva histeretis model 1 dan model 2
 Sumber: (Imran & Aryanto, 2009)

Analisis nonlinear dengan perubahan kekakuan/ EI untuk setiap kenaikan beban. Perubahan momen inersia penampang (I) mengacu pada SNI 03-2847-2002 (SNI Beton) sedangkan perubahan modulus elastisitas (E) mengacu pada kurva tegangan-regangan material sehingga menghasilkan kurva gaya-perpindahan dan kontur tegangan dinding.

Model eksperimen 2 memperlihatkan sebuah mode keruntuhan yang dapat digambarkan sebagai sliding shear (SS). Kekuatan geser yang rendah dari bed joint dinding pada model eksperimen ini mencegah pembentukan retak diagonal. Sedangkan spesimen AAC (model eksperimen 1) memperlihatkan bentuk strut, dimana retak menyebar secara diagonal dari bagian atas kolom menuju bagian dasar. Tipe dari keruntuhan ini mengindikasikan bahwa mortar tipis pada spesimen AAC mempunyai karakteristik ikatan yang bagus.

2.7.2 Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi Berlubang

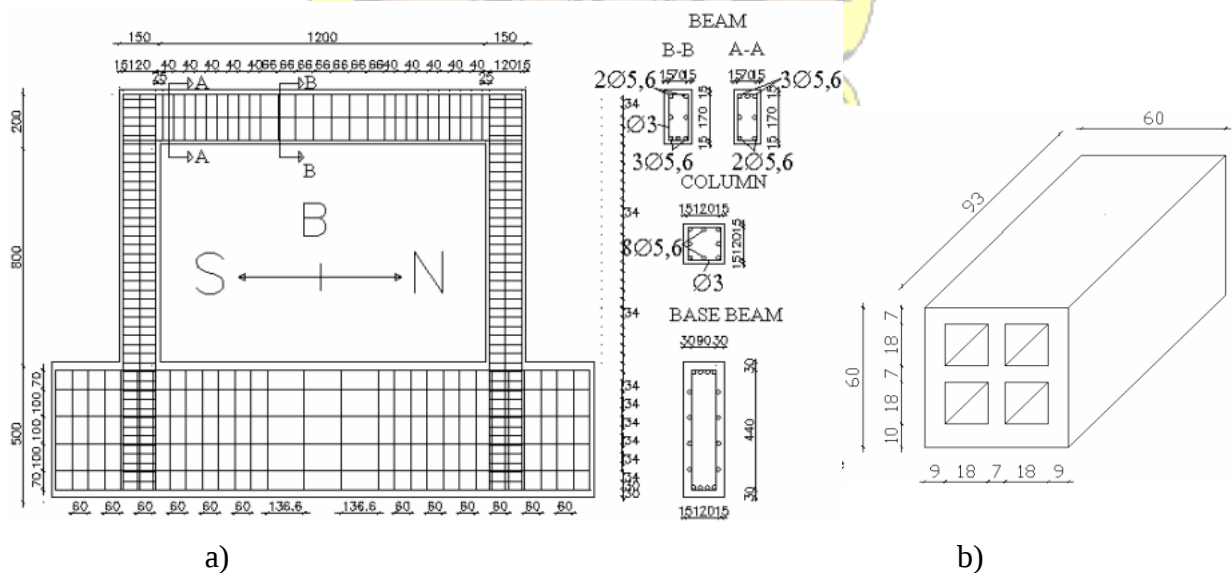
Kakaletsis & Karayannis, (2009), melakukan penelitian laboratorium mengenai perilaku struktur rangka dinding pengisi dengan bukaan. Dalam penelitiannya, terdapat 10 spesimen yang diuji, ditunjukkan pada Tabel 2.2. Spesimen yang diuji berupa struktur RT (Bare Frame), struktur RDP dengan dinding Solid, dan struktur RDP dengan bukaan untuk bukaan, parameter yang digunakan yaitu bentuk bukaan dan ukuran bukaan. Terdapat tiga spesimen bukaan jendela dengan ukuran perbandingan l_a/l sebesar 0.25, 0.38, 0.50 dan tiga spesimen bukaan pintu dengan ukuran perbandingan l_a/l sebesar 0.25, 0.38, dan 0.50 selain itu, ada dua spesimen menggunakan parameter untuk lokasi bukaan

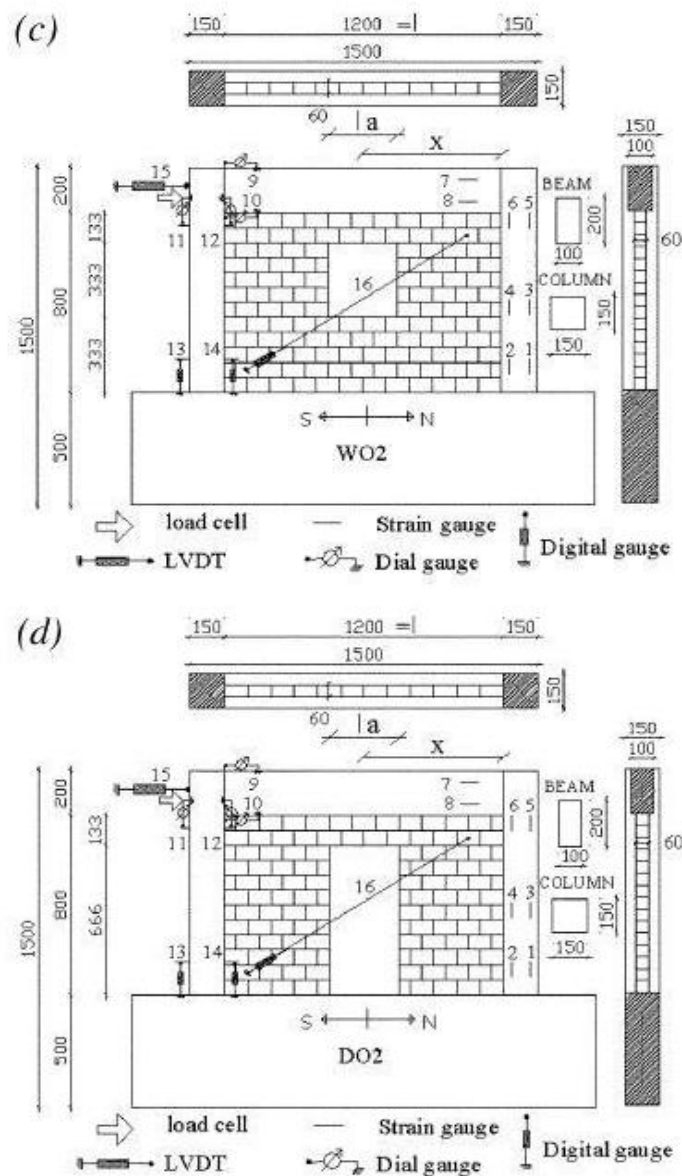
pada struktur rangka dengan perbandingan x/l sebesar 0.167. Dimana, l adalah 13 panjang dinding pasangan bata, la adalah lebar bukaan, dan x adalah jarak antara garis pusat dari bukaan ke tepi dinding pengisi, terlihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Spesimen eksperimen

Notasi Benda Uji	Bentuk bukaan		Ukuran Bukaan la/l					Jarak bukaan x/l
	Jendela	Pintu	0	0.25	0.38	0.5	1	
B	Bare	Bare	-	-	-	-	√	-
S	Solid	Solid	√	-	-	-	-	-
WO2	√	-	-	√	-	-	-	0.5
WO3	√	-	-	-	√	-	-	0.5
WO4	√	-	-	-	-	√	-	0.5
DO2	-	√	-	√	-	-	-	0.5
DO3	-	√	-	-	√	-	-	0.5
DO4	-	√	-	-	-	√	-	0.5
WX1	√	-	-	√	-	-	-	0.167
DX1	-	√	-	√	-	-	-	0.167

Sumber: Kakaletsis & Karyannis, (2009)





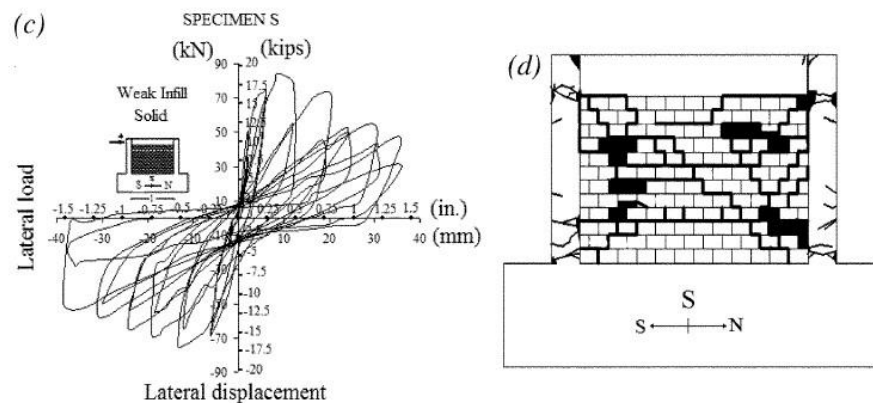
Gambar 2. 21 Spesimen struktur RDP (a) detail tulangan struktur rangka beton bertulang, (b) unit bata, (c) struktur RDP dengan bukaan jendela dan (d) struktur RDP dengan bukaan pintu, dalam mm.

Sumber: (Kakaletsis & Karayannis, 2009)

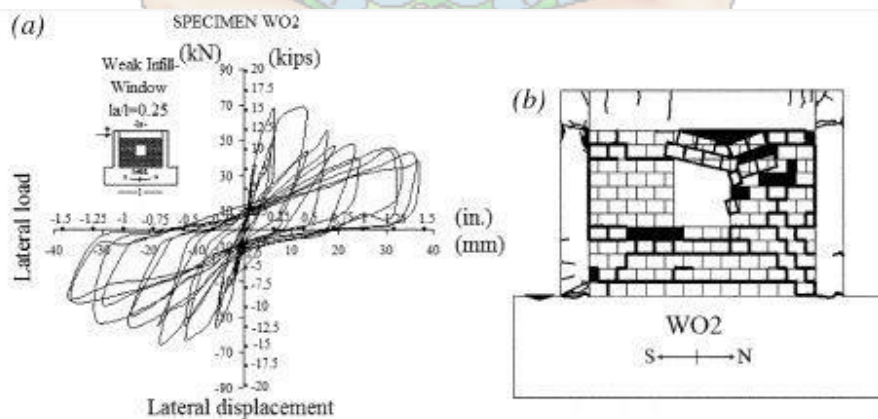
Beban lateral menggunakan alat double action hydraulic actuator sedangkan beban vertikal menggunakan hydraulic jacks dipasang dengan empat strands di bagian atas setiap kolom, yang konstan dan terus-menerus disesuaikan selama pengujian. Tingkat beban tekan aksial per kolom ini ditetapkan sebesar

50 kN dengan rata-rata tegangan tekan sebesar 0.1 untuk kekuatan tekan.

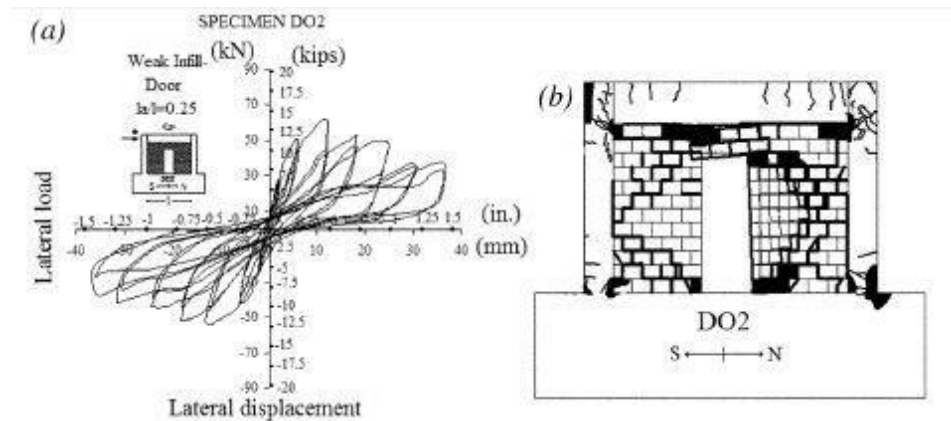
Hasil utama dari eksperimen laboratorium adalah grafik hubungan antara beban lateral dan perpindahan, selain itu ditampilkan pola kegagalan yang terjadi pada struktur, disajikan pada Gambar 2.22, 2.23 dan 2.24



Gambar 2. 22 Kurva perbandingan gaya lateral dengan perpindahan dan pola keruntuhan dari benda uji S
Sumber: (Kakaletsis & Karayannis, 2009)



Gambar 2. 23 Kurva perbandingan gaya lateral dengan perpindahan dan pola keruntuhan dari benda uji WO2
Sumber: (Kakaletsis & Karayannis, 2009)



Gambar 2. 24 Kurva perbandingan gaya lateral dengan perpindahan dan pola keruntuhan dari benda uji DO2

Sumber: (Kakaletsis & Karayannis, 2009)

Spesimen S pada Gambar 2.22 memiliki dinding penuh, dimana retak pada dinding terjadi pada drift 0.3%. Sendi plastis terjadi pada bagian atas dan bawah kolom pada drift 1.1%. Kegagalan dari specimen ini didominasi dengan retak diagonal di dinding pada drift 1.9%. Spesimen WO2 dengan bukaan jendela pada Gambar 2.23 mengalami retak pertama di dinding pada drift 0.3% sampai 0.4%.

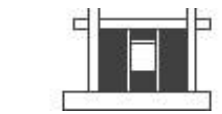
Sendi plastis terjadi pada ujung atas dan bawah kolom pada drift 0.3% sampai 0.9%. Spesimen DO2 pada Gambar 2.24 mengalami retak pertama di dinding pada drift 0.3%. Sendi plastis terjadi pada bagian atas dan bawah kolom pada drift 0.4% sampai 0.6%.

Berdasarkan hasil penelitian laboratorium tersebut disimpulkan bahwa ukuran bukaan dari bentuk yang sama tampaknya tidak jauh mempengaruhi perilaku benda uji. Retak pada dinding dan terpisahnya dinding dari struktur terjadi pada tahap sebelum adanya leleh pada tulangan kolom. Pada perpindahan yang besar pada kasus model dengan bukaan, beban lateral tetap ditahan oleh struktur sementara dinding pengisi mulai berhenti menahan beban.

2.7.3 Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi Berlubang dengan Perkuatan disekitar lubang

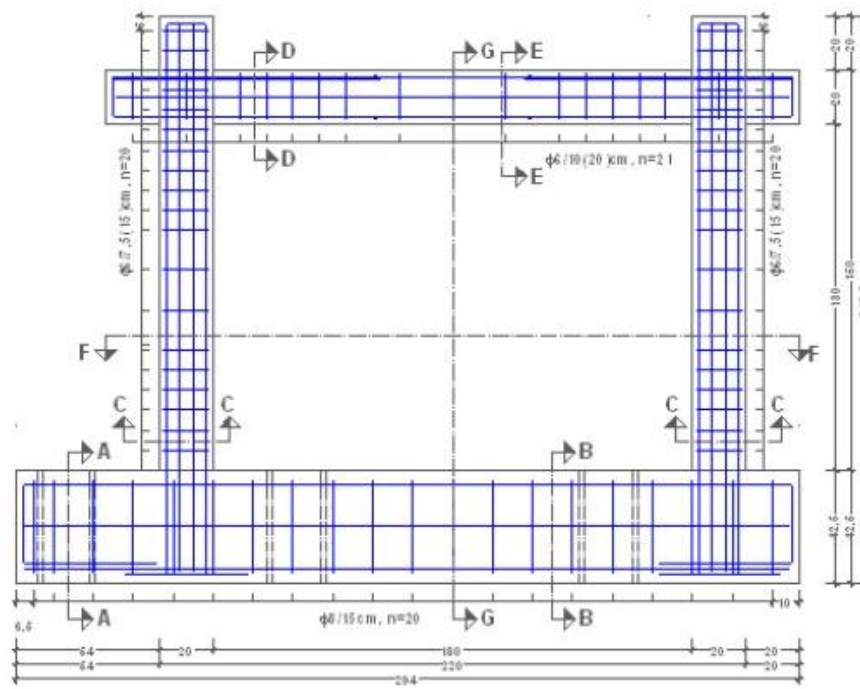
Penelitian terkait hasil uji laboratorium tentang dinding pengisi berlubang terutama dengan tambahan perkuatan balok dan kolom praktis telah dilakukan oleh Sigmund & Penava, (2012). Pada penelitian tersebut dibuat benda uji berupa struktur portal beton bertulang satu tingkat dengan dinding pengisi yang diisi bukaan bervariasi. Benda uji yang terdiri dari tiga kelompok seperti yang tertera pada Tabel 2.3 dibuat untuk mengetahui bagaimana pengaruh ukuran dan posisi bukaan pada dinding dan efek dari penambahan perkuatan balok dan kolom praktis pada tepi lubang.

Tabel 2. 3 Tipe-tipe benda uji dinding pengisi dengan bukaan

<i>Test specimen</i>			<i>Appearance of the Test specimen</i>	<i>Type of Opening and Dimensions lo/ho (m)</i>	<i>Position of Opening and Distance eo (m)</i>	<i>Confinent of Opening</i>
<i>Group</i>	<i>No</i>	<i>Mark</i>				
II	1	Type (I/II)		Door (0,35/0,90 m)	Centric (0,90 m)	With confining elements
	2	Type (2/II)		Window	Centric (0,90 m) Parapet wall height is 0,40 m	

Sumber: Sigmund & Penava, (2012)

Pada benda uji yang memiliki perkuatan, kolom praktis diberi tulangan memanjang dengan diameter 8 mm sebanyak 2 buah. Kolom praktis tersebut diangker dengan balok struktur dengan kedalaman 10 cm dan diberi dowel ke dinding dengan tulangan diameter 4 mm setiap 20 cm. Penulangan pada balok praktis terdiri dari empat tulangan memanjang dengan diameter 6 mm dan tulangan melintang diameter 6 mm dengan jarak 9 cm.



Gambar 2. 25 Desain tulangan portal benda uji
Sumber: (Sigmund & Penava, 2012)

Untuk jenis material yang digunakan dan sifat-sifatnya ditampilkan dalam Tabel 2.4.

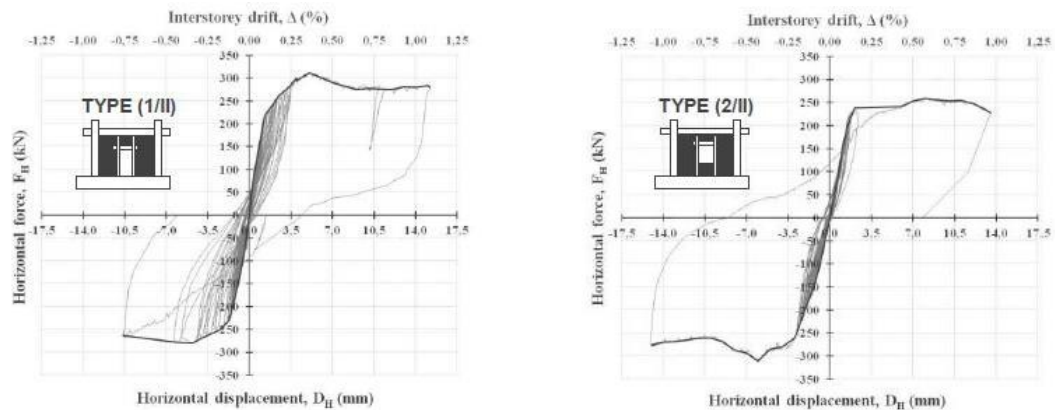
Tabel 2. 4 Material yang digunakan dan sifat-sifatnya

<i>Material</i>	<i>Property</i>		<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Hollow-clay-tile</i>	<i>Normalized compressive strength in vertical direction</i>	f_b	15,9	N/mm ²
	<i>Normalized compressive strength in horizontal direction</i>	f_{bh}	2,6	N/mm ²
<i>General purpose mortar</i>	<i>Compressive strength</i>	f_m	5,15	N/mm ²
	<i>Bending-tensile strength</i>	f_{mt}	1,27	N/mm ²
	<i>Characteristic compressive strength</i>	f_k	2,7	N/mm ²
	<i>Elastic modulus</i>	E	3900	N/mm ²
<i>Masonry</i>	<i>Ultimate strain</i>	ϵ_u	0,57	%
	<i>Characteristic initial shear strength</i>	f_{vok}	0,7	N/mm ²
	<i>Characteristic angle of friction</i>	$\tan \alpha_k$	0,8	N/mm ²
<i>Frame concrete</i>	<i>Characteristic compressive strength</i>	$f_{k,cube}$	45	N/mm ²
<i>Longitudinal and transversal reinforcement</i>	<i>Characteristic yield strength</i>	f_{yk}	600	N/mm ²
	<i>Characteristic ultimate strength</i>	f_{uk}	700	N/mm ²
	<i>Elastic modulus</i>	E_s	210000	N/mm ²
<i>Tie-column concrete</i>	<i>Characteristic compressive strength</i>	$f_{k,cube}$	30	N/mm ²

Sumber: Sigmund & Penava, (2012)

Dalam menguji seluruh spesimen tersebut digunakan beban siklik yang ditingkatkan dan beban vertikal yang konstan. Beban vertikal diberikan pada ujung atas kolom yang pada masing-masing sisi diberi beban sebesar 365 kN. Sementara untuk beban horizontal diberi gaya dengan peningkatan (Δ) sebesar 10 kN.

Dari hasil uji laboratorium tersebut didapat kurva perpindahan dan beban lateral dan pola keruntuhan dari masing masing benda uji.



Gambar 2. 26 Kurva gaya lateral dan perpindahan dari masing-masing benda uji
Sumber: (Sigmund & Penava, 2012)

Dalam penelitiannya disimpulkan bahwa semua struktur dengan dinding pengisi, baik dengan dan tanpa lubang, memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan struktur rangka terbuka. Kekakuan dari struktur dengan dan tanpa bukaan sendiri tidak memiliki perbedaan yang terlalu besar. Sementara untuk penambahan kekuatan kolom praktis memberi perubahan pada pola keruntuhannya. Benda uji tanpa kekuatan kolom praktis menunjukkan pola keruntuhan yang lebih banyak dibandingkan dengan benda uji dengan kekuatan. Kekuatan kolom dan balok praktis pada tepi lubang tidak mempengaruhi kekakuan struktur secara keseluruhan namun mempengaruhi pola keruntuhan, daktilitas, dan perilaku struktur secara keseluruhan.

2.7.4 Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi Berlubang dengan Start Diagonal

Penelitian Wirawan, et al., (2022), dimulai dengan dibuat tiga buah model, yaitu; *Model Infilled Frame Solid* (MIFS), *Model Infilled Frame with Door Opening* (MIFDO), *Model Infilled Frame with Window Opening* (MIFWO). Data material model validasi sesuai dengan penelitian, (Sigmund & Penava, 2012).

Lebar strat pada pemodelan strat diagonal pada RDP berlubang dicari dengan metode trial and eror hingga respon yang dihasilkan mendekati hasil test laboratorium. Sedangkan untuk RDP dinding penuh digunakan rumus pendekatan sesuai dengan penelitian, (Sukrawa & Budiwati, 2019).

Jika respon model validasi sudah mendekati hasil uji laboratorium, dilanjutkan dengan membuat model rangka sederhana. Model tersebut berupa struktur RDP berlubang sentris dengan rasio bukaan 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% serta perkuatan di sekeliling lubang. Model RDP dibuat satu tingkat dengan sudut diagonal 33°, 39°, 45°, dan 51°. Bentang balok tetap (2000 mm) dan tinggi kolom variasikan sesuai sudut diagonal yang ditinjau

Lebar strat diagonal masing-masing sudut diagonal didapatkan dengan cara coba-coba (*trial and eror*). Analisis ini menggunakan analisis linear. Setelah lebar strat diagonal masing-masing model rangka sederhana didapat, dilanjutkan dengan mencari rumus lebar strat diagonal pada struktur RDP dengan bukaan sentris serta perkuatan di sekitar bukaan.

Lebar strat diagonal RDP bukaan dicari dengan metode *trial and eror* hingga rasio simpangan model elemen *shell* dan strat diagonal mendekati satu.

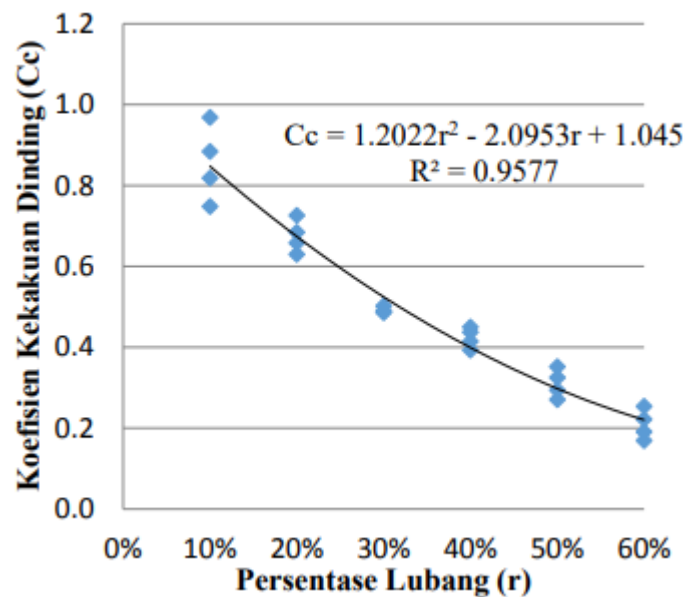
Sedangkan lebar strat RDP dinding penuh menggunakan persamaan, (Paulay & Priestley, 1992) sesuai penelitian, (Sukrawa & Budiwati, 2019).

Tabel 2. 5 Lebar strat diagonal model validasi

r	Lebar Strat (mm)			
	sudut 33°	sudut 39°	sudut 45°	sudut 51°
0%	596.21	642.27	707.11	794.55
10%	687	649	625	623
20%	578	522	484	467
30%	450	386	344	323
40%	413	347	293	253
50%	323	258	208	174
60%	233	176	135	109

Sumber: Wirawan, et al., (2022)

Lebar strat diagonal yang didapat dari analisis model rangka sederhana digunakan untuk menghitung persamaan koefisien kekakuan dinding (C_c). Untuk memasukan pengaruh sudut diagonal pada persamaan koefisien kekakuan dinding (C_c), lebar strat tersebut dikalikan dengan tangen masing-masing sudut diagonal yang ditinjau. Setelah dikalikan tangen masing-masing sudut diagonal, selanjutnya dibagi dengan lebar strat RDP dinding penuh masing-masing sudut diagonal. Seluruh koefisien kekakuan dinding (C_c) yang didapat kemudian di plot pada microsoft excel dengan sumbu y merupakan nilai C_c dan sumbu x merupakan nilai persentase lubang (r). Titik-titik koordinat nilai C_c tersebut, dicari persamaan yang mewakili dengan analisis regresi sederhana. Hal tersebut dilakukan untuk mencari hubungan antara nilai C_c dengan nilai r . Grafik hubungan nilai C_c dan r dapat dilihat pada Gambar 2.27.



Gambar 2. 27 Hubungan antara koefisien kekakuan dinding (C_c) dengan persentase lubang (r)

Sumber: (Wirawan, et al., 2022)

Persamaan lebar strat didapat dengan mengembalikan bentuk C_c ke bentuk semula, yaitu dibagi dengan tangen sudut dan dikalikan dengan lebar strat RDP dinding penuh. Persamaan lebar strat menjadi:

$$W_{CO} = d/4 \tan \emptyset \times C_c \quad (2.13)$$

W_{CO} merupakan lebar strat, d merupakan panjang strat, C_c merupakan koefisien kekuatan dinding ($C_c = 1.2022r^2 - 2.0953r + 1.045$), r merupakan persentase lubang, $\emptyset$ merupakan sudut strat diagonal ($\tan \emptyset = H/L$), H merupakan tinggi kolom, L merupakan panjang bentang balok. Rumus ini hanya berlaku untuk struktur RDP dengan bukaan sentris serta perkuatan di sekitar bukaan. Persamaan ini juga dibatasi hanya pada persentase lubang 10% sampai dengan 60% dan sudut diagonal 33° sampai dengan 51° , (Wirawan, et al., 2022).

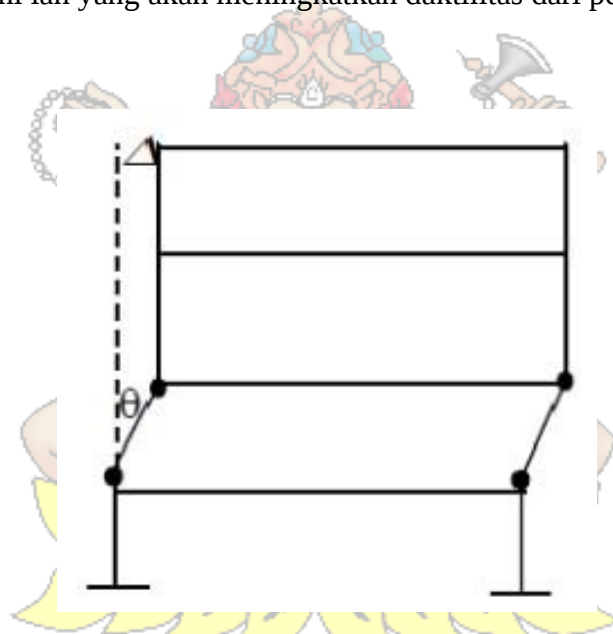
2.8 Tingkat Lantai Lunak (*Soft story*)

Soft story atau tingkat lantai lunak sering disebut dengan lantai yang lemah atau *weak story*, didefinisikan sebagai tingkat pada gedung yang memiliki sebagian kekakuan atau pada lantai tersebut kapasitas untuk menyerap energi sangat kecil pada saat menahan induksi tekanan akibat gempa yang terjadi pada suatu gedung. Gedung dengan tingkat lunak memiliki karakteristik dengan bukaan yang cukup banyak, yang dimana bisa terjadi karena banyak jarak antar ruang atau adanya banyak jendela pada suatu gedung.

Menurut BSN, (2019) pada (SNI 1726:2019), mengenai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, suatu bangunan dapat dikatakan bangunan tingkat lunak *soft story* jika bangunan itu memiliki tingkat lantai yang kekakuan nya 70 % lebih kecil dari kekakuan tingkat lantai di atasnya, atau kurang dari 80 % dari rata-rata kekakuan 3 tingkat di atasnya. *Soft story* ini menghasilkan banyak titik lemah ketika gempa terjadi pada lokasi gedung berada. Pada umumnya sebuah gedung memiliki lebih banyak bukaan pada tingkat yang paling bawah, contohnya saja dalam penerapan tempat parkir dan garasi dalam sebuah bangunan, hal ini mengakibatkan akan sangat cepat terjadi keruntuhan collapse. Keruntuhan collapse ini dapat membuat seluruh bangunan jatuh dan bisa berakibat fatal yaitu bangunan tidak dapat digunakan kembali.

Bangunan *soft story* pada tingkat bawah akan bersifat seperti isolator dimana pada saat gempa terjadi bagian gedung paling atas akan berperilaku sebagai *rigid body* dan yang mengalami deformasi hanya kolom bawah yang

berfungsi sebagai base isolator. Dalam perencanaan pengaruh *soft story* sebaiknya diperiksa dengan melakukan analisis dinamik seperti analisis static atau *pushover*, sehingga dapat diperiksa urutan terjadinya sendi plastis sebelum terbentuknya *soft story mechanism* yang nantinya menyebabkan keruntuhan bangunan. Merancang urutan sendi plastis juga dapat memperoleh suatu bangunan yang daktil. Meningkatkan kapasitas rotasi dari kolom dibutuhkan *confinement* yang memadai, *confinement* ini lah yang akan meningkatkan daktilitas dari penampang kolom.



Gambar 2. 28 Kegagalan *soft story*
Sumber: (Agarwal & Shrikhande, 2006)

2.9 Rasio Simpangan (*Drift Ratio*)

Menurut BSN, (2019) pada SNI 1726:2019, mengenai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung pasal 7.12, drift rasio harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Simpangan antar tingkat atau drift berdasarkan

pasal 7.12.1 (SNI 1726:2019), tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin (Δa). Adapun untuk struktur batu bata dengan kategori resiko II maka nilai simpangan antar lantai memiliki rumus sebagai berikut.

$$(\Delta a) = 0.020h \quad (2.14)$$

Dimana:

Δa : simpangan antar lantai tingkat ijin

h: ketinggian struktur portal (m)

2.10 Kinerja Struktur (*Pushover*)

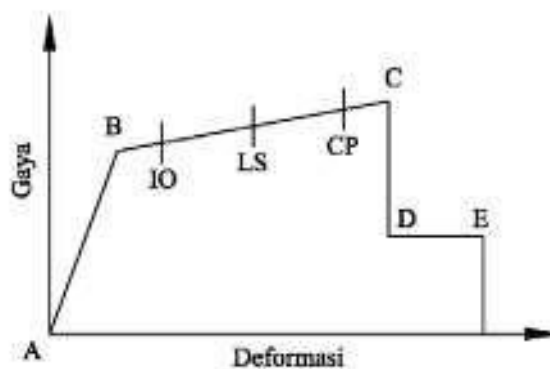
Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan bangunan yang sudah ada. Analisis ini juga lebih dikenal dengan nama analisis *pushover* atau analisis beban dorong statik. *Pushover* adalah metode analisis statis-nonlinier dimana struktur diberi beban gravitasi dan pola beban lateral monotonik yang terus meningkat sampai perilaku elastis dan inelastis hingga kondisi akhir tercapai (CSI, 2016).

Urutan terjadinya leleh ini merupakan urutan terbentuknya sendi plastis pada struktur. Setelah leleh pertama (sendi plastis pertama) tercapai, beban ditingkatkan lagi hingga target perpindahan dari suatu titik acuan tercapai. Banyak studi yang menunjukkan bahwa analisis statik *pushover* dapat memberikan hasil mencukupi jika dibandingkan dengan hasil analisis dinamik non linear untuk bangunan regular dan tidak tinggi. Analisis *pushover* dilakukan dengan beberapa tujuan, antara lain:

1. Untuk mengetahui gaya geser dasar maksimum yang mampu ditahan oleh struktur, perpindahan pada kondisi leleh pertama dan ultimit, serta mekanisme keruntuhan terhadap gempa.
2. Untuk mengevaluasi apakah struktur berhasil mencapai mekanisme keruntuhan tanpa adanya kelelahan pada komponen struktur yang mengalami rotasi plastis.
3. Untuk mengetahui perpindahan dalam satu arah dan daktilitas struktur.
4. Untuk mengestimasi bagian struktur yang lebih banyak mengalami kerusakan selama respon gempa nonlinear.

2.10.1 Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linear sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku nonlinear. Kurva berbentuk nonlinear menunjukkan peningkatan beban pasca elastik sampai kondisi plastik. Kurva *pushover* tidak selalu mencapai kondisi plastik, bergantung pada target yang ingin dicapai.



Gambar 2. 29 Kurva kapasitas analisis *pushover*

Sumber: (FEMA 547, 2006)

Gambar 2.29 merupakan kurva kapasitas dari analisis *pushover* yang menjelaskan kinerja struktur. Lima titik yang diberi nama A, B, C, D, dan E digunakan untuk mendefinisikan perilaku deformasi selama pembebanan. Antara titik A dan B struktur berdeformasi elastis selama pembebanan. Dimana struktur masih dalam level kinerja *Operational Level*. Pada titik B leleh pertama (sendi plastis) mulai terjadi dan akan terus terjadi hingga titik D. Antara titik B dan C struktur mulai berdeformasi inelastis. Selama deformasi inelastis ini terjadi 2 perilaku struktur yaitu: *Immediate Occupancy* dan *Life Safety*. Pada titik C struktur sudah mencapai titik batas dan kurva mengalami penurunan sampai titik D, dimana level kinerja struktur adalah *Collapse Prevention*. Penurunan drastis kinerja struktur terjadi pada titik D sampai E, dimana level kinerja struktur sudah mencapai *Collapse* (keruntuhan).

2.10.2 Sasaran Kinerja Analisis *Pushover*

Menurut FEMA 273, (1997), sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan dan taraf kerusakan yang diizinkan atau level kinerja dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut. Kategori level kinerja bangunan yaitu:

1. *Operation level*

Pada level ini tidak terjadi kerusakan struktural maupun non struktural bangunan. Bangunan memiliki risiko yang sangat rendah terhadap keselamatan jiwa

2. *Immediate occupancy (IO)*

Pada level ini diharapkan untuk meminimalisir atau tidak ada kerusakan yang terjadi pada elemen struktur dan hanya terjadi kerusakan ringan pada elemen non struktur. Setelah terjadi gempa bangunan dapat langsung difungsikan kembali tetapi memerlukan beberapa perbaikan, pembersihan dan menunggu pemulihan layanan utilitas. Bangunan ini memiliki risiko korban jiwa yang rendah.

3. *Life safety (LS)*

Pada level ini bangunan mengalami kerusakan pada komponen struktural maupun non struktural. Diperlukannya perbaikan sebelum dapat digunakan kembali. Meskipun terjadi kerusakan pada elemen struktur tetapi keselamatan penghuni gedung tetap terjamin.

4. *Collapse prevention (CP)*

Pada level ini, kekuatan dan kekakuan struktur berkurang. Bangunan yang berada pada level kinerja ini dapat menimbulkan bahaya yang signifikan terhadap keselamatan jiwa penghuni. Kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan yang rusak sangat mungkin terjadi. Perbaikan gedung mungkin tidak bisa secara cepat.

2.10.3 Target Perpindahan

Gaya dan deformasi setiap elemen dihitung terhadap perpindahan tertentu di titik kontrol yang disebut sebagai target perpindahan (δ_t) dan dianggap sebagai perpindahan maksimum yang terjadi saat bangunan mengalami gempa rencana. Untuk mendapatkan perilaku struktur pasca keruntuhan maka perlu dibuat analisis *pushover* untuk membuat kurva hubungan gaya geser dasar dan perpindahan lateral titik kontrol sampai minimal 150% dari target perpindahan (δ_t), agar dapat dilihat perilaku bangunan yang melebihi kondisi rencananya. Perencana harus memahami bahwa target perpindahan hanya merupakan rata-rata nilai dari beban gempa rencana.

Analisa *pushover* dilakukan dengan memberikan beban lateral pada pola tertentu sebagai simulasi beban gempa dan harus diberikan bersama-sama dengan pengaruh kombinasi beban mati dan tidak kurang 25% dari beban hidup yang disyaratkan. FEMA 273 mensyaratkan minimal harus diberikan dua pola beban yang berbeda sebagai simulasi beban gempa yang bersifat random, sehingga dapat memberikan gambaran pola mana yang pengaruhnya paling besar. Selanjutnya beban tersebut harus diberikan secara bertahap dalam satu arah. Parameter target perpindahan sangat penting peranannya bagi perencanaan berbasis kinerja, karena kriteria evaluasi level kinerja kondisi bangunan didasarkan pada gaya dan deformasi yang terjadi ketika perpindahan titik kontrol sama dengan target perpindahan δ_t . Adapun cara umum menentukan target perpindahan yaitu *Displacement Coefficient Method* atau Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 273/356) secara otomatis sudah *built-in* pada SAP2000, (FEMA 273, 1997).

2.11 Pembebanan

Perencanaan suatu struktur Gedung tidak dapat luput dari peraturan-peraturan yang mengatur tentang perencanaan struktur Gedung, peraturan-peraturan yang sedang berlaku baik untuk beban vertikal dan beban horizontal. Secara jelas akan diuraikan sebagai berikut:

2.11.1 Bebam Mati

Menurut PPIUG, (1983), beban mati adalah berat dari suatu Gedung yang bersifat tetap yang merupakan bagian tak terpisahkan dari Gedung itu yang termasuk didalamnya yaitu segala unsur-unsur tambahan, mesin-mesin, serta peralatan yang tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung. Beban-beban mati yang terdiri dari berat sendiri struktur ditambah dengan beban mati tambahan dan beban dinding.

2.11.2 Beban Hidup

Beban hidup adalah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung, dan semua peralatan yang ada didalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, sehingga mengakibatkan perubahan-perubahan dalam pembebanan lantai dan atap. Khusus pada atap, air hujan merupakan komponen hidup, baik akibat genangan maupun akibat tekanan jatuh butiran air (PPIUG, 1983).

2.11.3 Beban Gempa

Nilai beban gempa dihitung dengan metode statik ekuivalen menurut BSN, (2019) pada SNI 1726:2019 yang dalam program SAP2000 v22 dapat dilakukan secara otomatis dengan menggunakan *Auto Lateral Load IBC 2009*. Besarnya

gaya gempa yang terjadi pada program SAP2000 dihitung dengan metode statik ekuivalen yaitu sebagai berikut:

a. Gaya Dasar Seismik

Beban geser dasar nominal statik ekuivalen (V) yang terjadi di tingkat dasar dapat dihitung dengan persamaan :

$$V = C_s \cdot W \quad (2.15)$$

Dimana:

V = gaya geser dasar

C_s = koefisien respon seismik

W = berat seismik efektif struktur

b. Koefisien Respon Seismik

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.16)$$

Dimana:

S_{DS} = parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode pendek.

R = faktor modifikasi respons

I_e = faktor keutamaan gempa

Nilai C_s yang dihitung sesuai dengan persamaan diatas tidak boleh melebihi persamaan berikut:

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.17)$$

Untuk $T > T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.18)$$

C_s harus tidak kurang dari:

$$C_s = 0,044 \cdot S_{DS} \cdot I_e \geq 0,01 \quad (2.19)$$

Sebagai tambahan, untuk struktur yang berlokasi di daerah di mana S_1 sama dengan atau lebih besar dari 0,6g, maka C_s harus tidak kurang dari persamaan berikut:

$$C_s = \frac{0,5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.20)$$

Dimana:

S_{D1} = adalah parameter percepatan spektrum respons desain pada periode sebesar 1,0 detik.

T = periode fundamental struktur (detik)

S_1 = parameter percepatan respon maksimum yang dipetakan.

UNMAS DENPASAR

2.11.4 Kombinasi Pembebanan

Untuk pemodelan rangka dengan pembebanan gempa berdasarkan BSN, (2019), adalah sebagai berikut:

- 1,4 D
- 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (Lr atau R)
- 1,2 D + 1,6 L (Lr atau R) + (L atau 0,5W)

- $1,2 D + 1,0 W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
- $1,2 D + 1,0 E + L$
- $0,9 D + 1,0 E$

Keterangan:

- D = Beban mati yang diakibatkan oleh berat konstruksi permanen, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, partisi tetap, tangga, dan peralatan tetap.
- L = Beban hidup yang ditimbulkan oleh penggunaan gedung, termasuk kejut, tetapi tidak termasuk beban lingkungan seperti angin, hujan, dan lain-lain.
- La = Beban hidup di atap yang ditimbulkan selama perawatan oleh pekerja, peralatan, dan material, atau selama penggunaan biasa oleh orang dan benda bergerak.
- R = Beban hujan, tidak termasuk yang diakibatkan genangan air.
- W = Beban angin
- E = Beban gempa, yang ditentukan menurut (BSN, 2019).