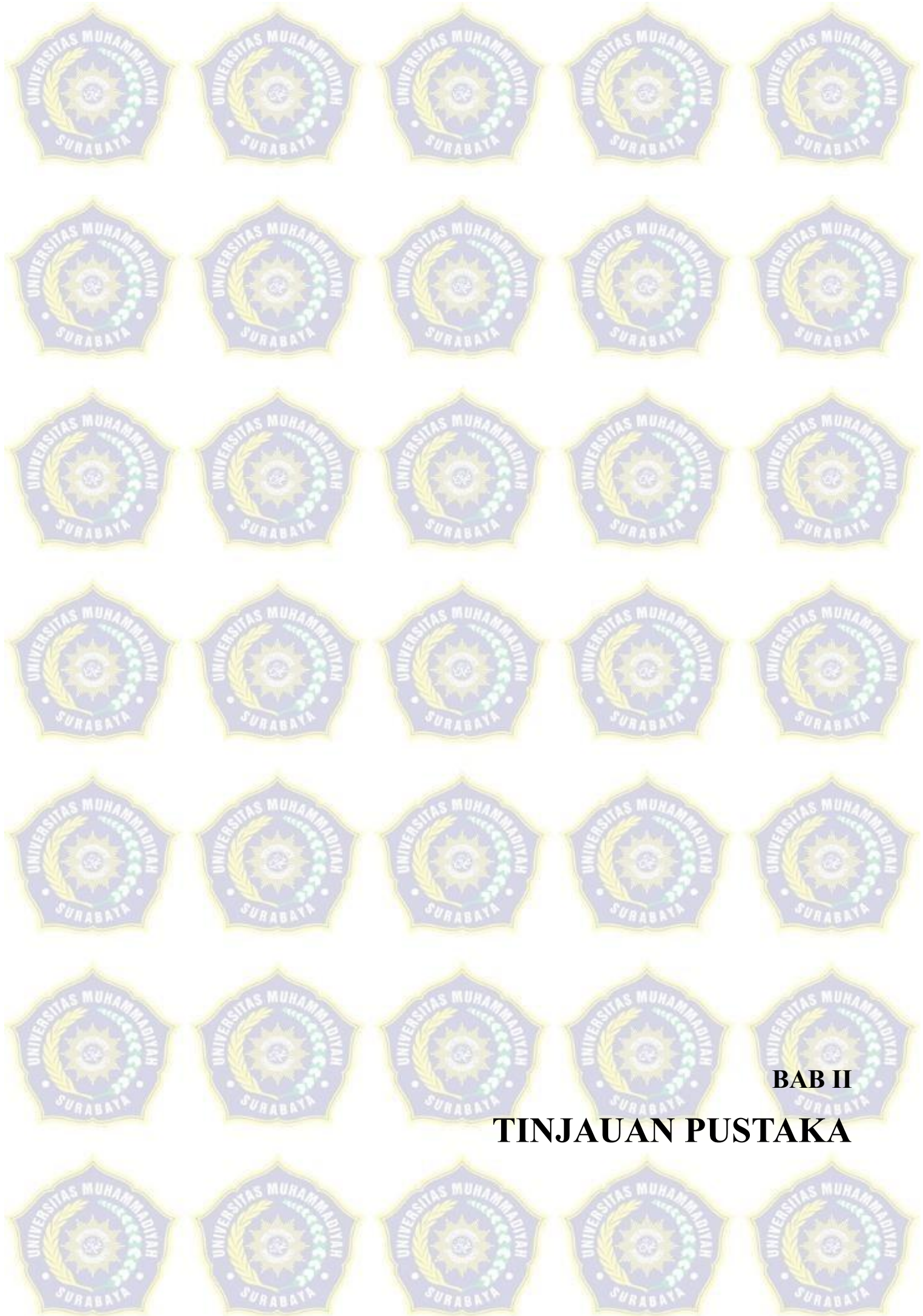




BAB II

TINJAUAN PUSTAKA



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Dalam struktur bangunan bertingkat, *infill wall* sering dipakai sebagai elemen non-struktural untuk memisahkan ruang di dalam bangunan yang mempengaruhi perilaku keseluruhan struktur terhadap beban lateral. *Infill wall* didefinisikan sebagai dinding pengisi yang ditempatkan di antara elemen rangka utama (*frame*) tanpa kontribusi struktural, namun berpotensi memberikan kekakuan tambahan dan memerlukan pertimbangan dalam analisis *seismik* (SNI 1726-2019). Tinjauan pustaka pada bab ini merupakan penjelasan mengenai teori yang digunakan dalam analisa pengaruh *infill wall* terhadap *respons seismik* struktur bangunan bertingkat, mulai dari permodelan struktur rangka *open frame* serta penggabungan *infill wall* dengan menggunakan metode *nonlinear time history analysis* berbasis program bantu ETABS.

2.2 Dinding Pengisi (*infill wall*)

Dinding pengisi merupakan elemen non-struktural yang umum digunakan dalam struktur bangunan bertingkat untuk membagi ruang interior, berfungsi sebagai partisi pemisah ruangan, penutup dinding eksterior dan elemen estetika. Menurut standar desain di Indonesia, *infill wall* didefinisikan sebagai dinding pengisi yang tidak berkontribusi secara signifikan terhadap kekuatan lateral struktur, tetapi harus dipertimbangkan sebagai beban tambahan dan potensi interaksi dengan *frame* (SNI 1726-2019). Penelitian terkini menyoroti bahwa meskipun termasuk dalam elemen non-struktural, *infill wall* dapat mempengaruhi perilaku keseluruhan struktur hingga 20-30% melalui kekakuan *in-plane* terutama pada bangunan beton bertulang di zona dengan status gempa tinggi (Ferreira, Rodrigues and Vicente, 2020).

2.2.1 Material Dinding Pengisi

Ditinjau dari materialnya, dinding pengisi dapat diklasifikasikan menjadi:

1. *Masonry* Konvensional; terdiri dari bata merah (*clay bricks*) yang disusun dengan mortar semen sebagai pengikat, membentuk dinding pengisi yang padat dan relatif berat. Di Indonesia, material ini sering digunakan pada bangunan bertingkat karena ketersediaan lokal dan biaya yang terjangkau dengan densitas menurut standar persyaratan bata sekitar 18-20 kN/m³ dan ketebalan dinding tipikal 10-15 cm (SNI 03-2096-2000). Suatu penelitian menyimpulkan bahwa pada gempa dengan intensitas sedang, material ini mengalami *crushing* disudut dan penurunan kekakuan hingga 70% setelah retak (Federica *et al.*, 2022). Selain itu, studi pengamatan mengkonfirmasi bahwa *masonry* konvensional lebih efektif di zona gempa rendah, namun memerlukan penambahan seperti *grouting* untuk meningkatkan *ductility* (Sassun *et al.*, 2016).
2. *Masonry* Ringan; material yang termasuk kategori ini adalah hebel (*autoclaved aerated concrete* / AAC) dan batako (*concrete masonry units*) yang dirancang untuk mengurangi beban mati struktur namun tetap mempertahankan fungsi partisi. Material hebel terbuat

dari campuran semen, kapur, pasir kuarsa dan pengembang (*aluminium powder*). Sedangkan batako adalah balok beton ringan dari semen, pasir dan kerikil halus, sering dihubungkan dengan mortar tipis ataupun tanpa mortar. Sesuai standar peraturan, ketebalan tipikal untuk keduanya adalah 10-20 cm (SNI 15-2094-2015). Pada analisis yang dilakukan, material ini menunjukkan ketergantungan energi yang lebih baik, akselerasi lantai yang berkurang hingga 15-25% pada gempa berulang, meskipun begitu material ini rentan terhadap *shear sliding* jika ikatan mortar lemah (Koutas, 2022). Selain itu, eksperimental di zona gempa tinggi menyoroti bahwa material ini mengurangi massa *infill* hingga 50% sehingga inersia lateral dapat diminimalkan, akan tetapi diperlukan validasi *out-of-plane stability* dengan batas defleksi 1/180 tinggi dinding (SNI 1726-2019). Material ini ideal untuk bangunan di daerah rawan gempa dengan probabilitas kolaps 20% lebih rendah dibandingkan *masonry* konvensional (Federica *et al.*, 2022).

3. Panel *Precast*; terbuat dari beton pracetak (*precast concrete*) yang diproduksi *off-site* dengan ketebalan tertentu dan umumnya menggunakan tulangan baja atau serat untuk meningkatkan ketahanan. Panel ini dapat berupa solid, berongga, atau *sandwich* (dengan isolasi inti) dan dipasang pada *frame* menggunakan konektor seperti *bolt* atau clip (SNI 2847-2019). Penelitian menunjukkan bahwa panel efektif dalam mengurangi perpindahan lateral hingga 30-50% melalui diafragma kaku, namun rentan terhadap *joint failure* dengan penurunan kekakuan 40-60% setelah retak (Scala *et al.*, 2024). Dari hasil studi perbandingan ditemukan bahwa panel *precast* dengan konektor dapat mengurangi efek *short-column* hingga 25%, sehingga ideal untuk struktur bertingkat tinggi yang memprioritaskan kecepatan konstruksi (Crisafulli dan Carr, 2018).

2.2.2 Pola Interaksi Dinding Pengisi

Penelitian terbaru mengklasifikasikan dinding pengisi menjadi beberapa jenis utama berdasarkan pola interaksi dengan struktur rangka sebagai berikut:

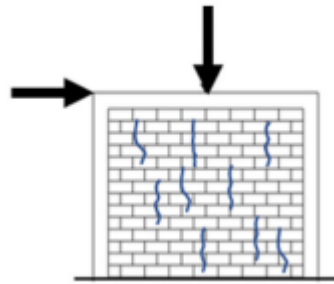
1. *Full Infill* (Dinding Penuh); Merupakan dinding yang sepenuhnya mengisi ruang antara kolom tanpa bukaan menunjukkan perilaku aksi *strut* yang paling optimal. Dalam jurnal *Engineering Structures* menyatakan melalui pengujian eksperimental bahwa dinding penuh dapat meningkatkan kekakuan lateral hingga 400% dibandingkan dengan rangka terbuka (*open frame*) (Furtado, 2020).
2. *Partial Infill* (Dinding Parsial); Merupakan dinding dengan bukaan jendela dan pintu menunjukkan perilaku yang lebih rumit. Dalam *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* mengidentifikasi bahwa bukaan dalam dinding mengurangi lebar *strut* efektif hingga 50% dan menyebabkan konsentrasi tegangan di sudut bukaan (Federica *et al.*, 2022).
3. *Soft Story Infill*; Merupakan ketidakberaturan dinding pada lantai tertentu menciptakan ketidakberaturan vertikal yang berbahaya. Dalam *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* menunjukkan bahwa konfigurasi lantai lunak dapat meningkatkan pergeseran pada lantai lemah hingga 300% dibandingkan dengan struktur dengan dinding seragam (Kadysiewski dan Mosalam, 2008).

2.2.3 Pola Kerusakan Dinding Pengisi

Terdapat empat jenis kerusakan yang umumnya dapat diidentifikasi dalam dinding pengisi pasangan bata (Borah *et al.*, 2023) meliputi:

1. *Compressive failure* (Kegagalan tekan pada dinding pasangan bata).

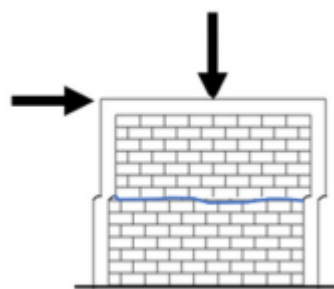
Kegagalan tekan terjadi pada saat dinding pengisi mengalami *crushing* atau pemadatan berlebihan akibat beban tekan dari gaya lateral, umumnya terjadi di sudut atau tengah dinding. Hal ini terjadi ketika tegangan tekan melebihi kekuatan tekan material dinding pengisi yang mengakibatkan *spalling* material dan penurunan kekakuan, sehingga mempercepat transfer beban pada rangka utama. Berikut ilustrasi kegagalan tekan dinding pasangan bata dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Kegagalan tekan pada dinding
Sumber: (Borah *et al.*, 2023)

2. *Sliding shear failure* (Kegagalan geser pada sambungan dasar).

Kegagalan geser yang terjadi melibatkan geser horizontal pada sambungan dasar dinding pengisi seperti mortar atau interface dengan rangka yang disebabkan oleh gaya lateral yang melebihi kekuatan geser dinding pengisi, kegagalan ini terjadi ketika koefisien gesekan lebih kecil dari sudut geser. Kegagalan tipe ini dapat menyebabkan slip dan pemisahan dinding dari rangka, serta memperburuk ketidakberaturan torsional (Sassun *et al.*, 2016). Berikut ilustrasi kegagalan geser dinding pasangan bata dapat dilihat pada Gambar 2.2.

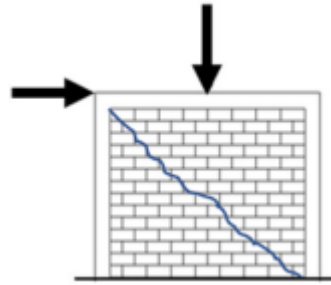


Gambar 2. 2 Kegagalan geser pada dinding
Sumber: (Borah *et al.*, 2023)

3. *Diagonal tension failure* (Kegagalan tarik diagonal).

Kegagalan ini terjadi akibat tegangan diagonal pada dinding pengisi yang menyebabkan retakan dari sudut bawah menuju sudut atas, sehingga dapat mengurangi kekakuan dalam bidang. Hal tersebut disebabkan oleh kekuatan tarik yang rendah sedangkan rasio geser-

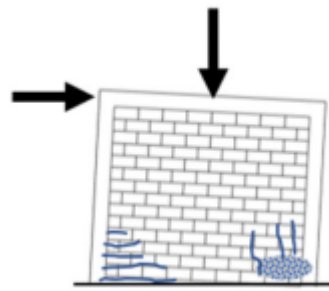
tekan yang tinggi, mengubah dinding pengisi dari elemen yang kaku menjadi fleksibel setelah retak (Crisafulli dan Carr, 2018). Berikut ilustrasi kegagalan tarik dinding pasangan bata dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Kegagalan tarik pada dinding
Sumber: (Borah *et al.*, 2023)

4. *Flexural failure* (Kegagalan lentur).

Kegagalan lentur melibatkan *bending* atau lentur dinding pengisi yang umumnya terjadi di tepi atau bagian atas akibat momen lentur yang melebihi kapasitas, namun hal ini jarang terjadi pada dinding pengisi karena sifat rapuhnya tetapi relevan untuk dinding pengisi ringan atau yang memiliki bukaan. Berikut ilustrasi kegagalan lentur dinding pasangan bata dapat dilihat pada Gambar 2.1.



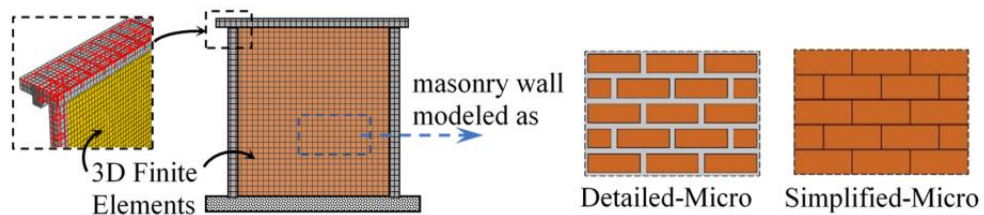
Gambar 2. 4 Kegagalan lentur pada dinding
Sumber: (Borah *et al.*, 2023)

2.3 Permodelan Dinding Pengisi

Menentukan permodelan dinding pengisi dalam suatu analisa merupakan Langkah penting untuk merepresentasikan perilaku *nonlinear* terhadap beban lateral, terutama menggunakan metode NLTHA yang mensimulasikan respons waktu nyata struktur terhadap rekaman gempa.

2.3.1 Pendekatan Permodelan Mikro dan Makro

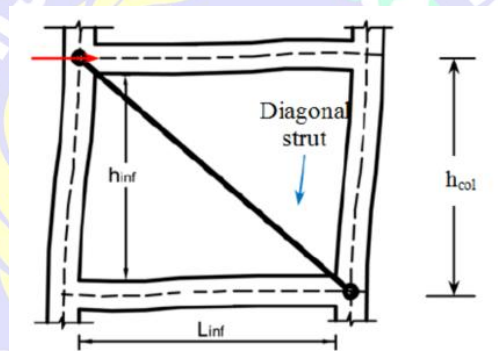
Permodelan mikro melibatkan penggambaran detail dari masing-masing komponen penyusun dinding pengisi, seperti bata, mortar dan koneksi antar elemen, dengan pendekatan *Finite Element Method* (FEM) menggunakan elemen 2D atau 3D yang halus. Setiap bata dimodelkan sebagai elemen solid atau *shell* sementara mortar sebagai interface elemen dengan perilaku *nonlinear* yang mengendalikan *Mohr-Coulomb* untuk geser dan *cracking* (Sassun *et al.*, 2016). Berikut Gambar 2.5 merupakan permodelan *infill wall* dengan pendekatan mikro.



Gambar 2. 5 Permodelan mikro dinding pengisi

Sumber: (Borah *et al.*, 2023)

Sedangkan pada permodelan makro menggambarkan dinding pengisi sebagai elemen ekuivalen sederhana yang mendapat perilaku keseluruhan struktur tanpa detail internal, seperti model *equivalent strut* (*single* atau dua diagonal *strut*) dan *macro-element* (*uncoupled in-plane/out-of-plane*). Dalam model *strut*, dinding pengisi dimodelkan sebagai batang diagonal dengan kekuatan efektif tertentu yang merepresentasikan kinerja *strut* tanpa detail internal (Crisafulli dan Carr, 2018). Pendekatan ini lebih efisien untuk penelitian karena memungkinkan integrasi cepat ke dalam model struktur menggunakan NLTHA, dengan akurasi 85-95% untuk prediksi *drift* dan *base shear* jika dibandingkan dengan model mikro (Siamata, 2022). Berikut ilustrasi permodelan makro dapat dilihat pada Gambar 2.6.

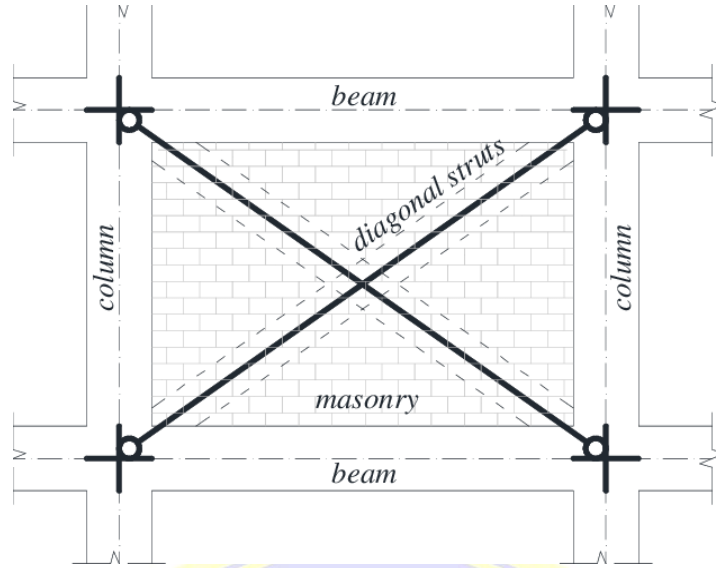


Gambar 2. 6 Permodelan makro dinding pengisi

Sumber: (Dhonju dan Darshan Shrestha, 2022)

2.3.2 Model *Strut Equivalent*

Model *Strut equivalent* merupakan metode permodelan dari pendekatan makro yang paling sering digunakan dan dianjurkan untuk analisis praktis guna mengetahui dampak dinding pengisi terhadap respons seismik dari struktur. Konsep dasar model ini dengan merepresentasikan kontribusi kekakuan dan kekuatan dari dinding pengisi utuh (tanpa bukaan) dengan satu atau lebih elemen batang tekan diagonal (*strut*) yang setara. *Strut* ini dipasang secara miring pada bidang portal dengan mengaitkan dua sudut yang berlawanan, sehingga dapat mensimulasikan mekanisme diagonal *compression strut* yang terjadi saat dinding pengisi menerima beban lateral (Federica *et al.*, 2022). Variasi model meliputi *single strut* yaitu menggunakan satu batang tekan diagonal, dan *double diagonal strut* yang menggunakan dua batang tekan diagonal untuk menangkap siklus positif-negatif. Berikut Gambar 2.7 merupakan ilustrasi detail permodelan menggunakan *strut diagonal equivalent*.



Gambar 2. 7 Permodelan *strut equivalent*
Sumber: (Fikri dkk., 2020)

Berikut persamaan untuk menentukan lebar *strut* yang telah dikembangkan:

1. Menurut *Indian Standards* (IS 1893-2016; Pasal 7.9).

- *Modulus of Elasticity* (E_m)

$$E_m = 550f_m \quad (2.1)$$

$$f_m = 0,433f_b^{0,64} \times f_{mo}^{0,36} \quad (2.2)$$

Dimana:

f_m : *Compressive strength of masonry prism, Mpa*

f_b : *Compressive strength of brick, Mpa*

f_{mo} : *Compressive strength of mortar, Mpa*

- *Width of equivalent diagonal strut* (W_{ds})

$$W_{ds} = 0,175\alpha_h^{-0,4}L_{ds} \quad (2.3)$$

$$\alpha_h = h \left\{ \sqrt[4]{\frac{E_m t \sin 2\theta}{4E_f I_c h}} \right\} \quad (2.4)$$

$$I_{col} = \frac{1}{12}bh^3 \quad (2.5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_{inf}}{L_{inf}} \right) \quad (2.6)$$

$$L_{ds} = \frac{h_{inf}}{\sin \theta} \quad (2.7)$$

Dimana:

- W_{ds} : Tebal *strut*
 α_h : Koefisien tebal
 L_{ds} : Panjang *strut*
 E_m : Modulus elastisitas *masonry*
 E_f : Modulus elastisitas beton
 I_c : Momen inersia kolom
 h_{inf} : Tinggi dinding pengisi
 L_{inf} : Panjang dinding pengisi
 t : Tebal dinding pengisi
 θ : Sudut *strut* terhadap horizontal

2. Menurut *Federal Emergency Management Agency* (FEMA 306).

- *Equivalent width* (α)

$$\alpha = 0,175(\lambda_l \times h_{col})^{-0,4} \times r_{inf} \quad (2.8)$$

$$\lambda_l = \left(\frac{E_m t_{inf} \sin 2\theta}{4E_{fc} I_{col} h_{inf}} \right)^{1/4} \quad (2.9)$$

$$E_m = 700f_m$$

Dimana:

- r_{inf} : Panjang diagonal dinding pengisi
 t_{inf} : Ketebalan dinding pengisi
 h_{inf} : Tinggi dinding pengisi
 θ : Sudut diagonal penyangga
 E_{fc} : Modulus elastisitas beton kolom
 I_{col} : Momen inersia kolom

3. Menurut *American Society of Civil Engineers* (ASCE 41-17).

- *Width of the strut*

$$\alpha_{strut} = \left(\frac{K_{un}^{solid} - 2K_{col}}{d_w \cos^2 \theta_{strut} E_m} \right) L_{strut} \quad (2.10)$$

$$K_{un}^{solid} = \frac{1}{\frac{1}{K_{fl}} + \frac{1}{K_{sh}}} \quad (2.11)$$

$$K_{fl} = \frac{3E_c I_c}{h_{inf}^3} \quad (2.12)$$

$$K_{sh} = \frac{A_w G_{mc}}{h_{inf}} \quad (2.13)$$

Dimana:

α_{strut}	: Tebal <i>strut</i>
K_{un}^{solid}	: Kekakuan tidak retak dari <i>infill frame</i>
K_{col}	: Kekakuan lentur setiap kolom rangka
d_w	: Ketebalan dinding pengisi
θ_{strut}	: Sudut <i>strut</i> terhadap horizontal
L_{strut}	: Panjang <i>strut</i>
K_{fl}	: Kekakuan lentur
K_{sh}	: Kekakuan geser
A_w	: Luas penampang geser
G_{mc}	: Modulus geser

2.4 Pembebanan

Dalam menganalisis suatu struktur, penting untuk mempunyai pemahaman yang jelas tentang perilaku dan besarnya beban yang berpengaruh pada struktur tersebut. Tingkah laku sebuah struktur ditentukan oleh beban-beban yang bekerja. Terdapat beberapa jenis beban yang bekerja pada suatu struktur, berdasarkan karakteristiknya yaitu beban statis dan beban dinamis. Berikut akan dijelaskan dengan lebih rinci mengenai beban sesuai dengan ketentuan berdasarkan SNI 1726-2019 dan SNI 1727-2020.

2.4.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati (*dead load*) merupakan total berat dari seluruh material konstruksi yang terpasang pada struktur gedung, mencakup dinding, tangga, atap, *finishing* komponen arsitektur, dan elemen struktural lainnya (SNI 1727-2020). Dalam analisis struktur ini, digunakan perangkat lunak ETABS untuk mendukung proses tersebut. Beban mati dari material yang digunakan akan dihitung secara otomatis berdasarkan data material dan dimensi yang digunakan.

2.4.2 Super Imposed Dead Load (SIDL)

Super Imposed Dead Load (SIDL) umumnya digunakan sebagai beban mati yang tidak dimodelkan pada ETABS seperti: beban tembok, pagar, partisi, keramik, *electrical*, dan saluran. Beban tersebut wajib di input kan secara manual kedalam model.

2.4.3 Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup (*live load*) merupakan beban yang diakibatkan oleh pengguna serta penghuni gedung atau struktur lain yang tidak termasuk dalam beban konstruksi dan beban lingkungan seperti angin, hujan, gempa, banjir serta beban mati (SNI 1727-2020). Khususnya untuk atap, beban hidup juga bisa mencakup beban yang berasal dari air hujan. SNI 1727-2020 menetapkan aturan pembebanan termasuk beban hidup berdasarkan fungsi bangunan.

2.4.4 Beban Gempa (*Earthquake Load*)

Beban gempa merupakan beban lateral yang terjadi terhadap kestabilan struktur, dimana besar getaran yang terjadi di dalam struktur akibat dari pergerakan tanah oleh gempa. Adapun tahapan analisis perhitungan beban gempa rencana pada struktur yang mengacu pada (SNI 1726-2019) adalah sebagai berikut:

1. Klasifikasi situs.

Berdasarkan SNI 1726-2019; Pasal 5.1, dalam perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah atau penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Tipe kelas situs ditetapkan dalam tabel 2.1.

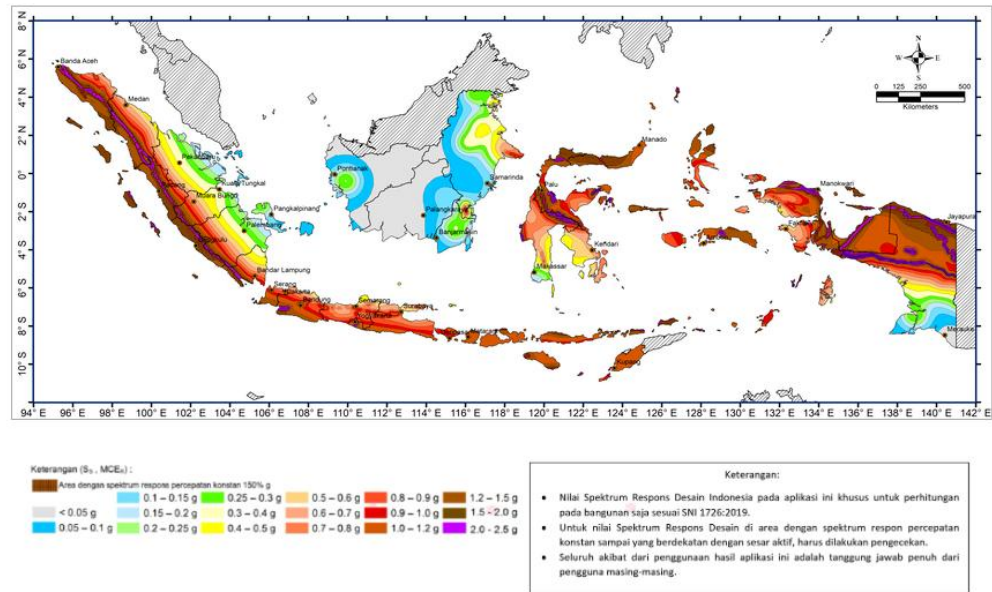
Tabel 2. 1 Klasifikasi situs.

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralisir $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastis $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa		

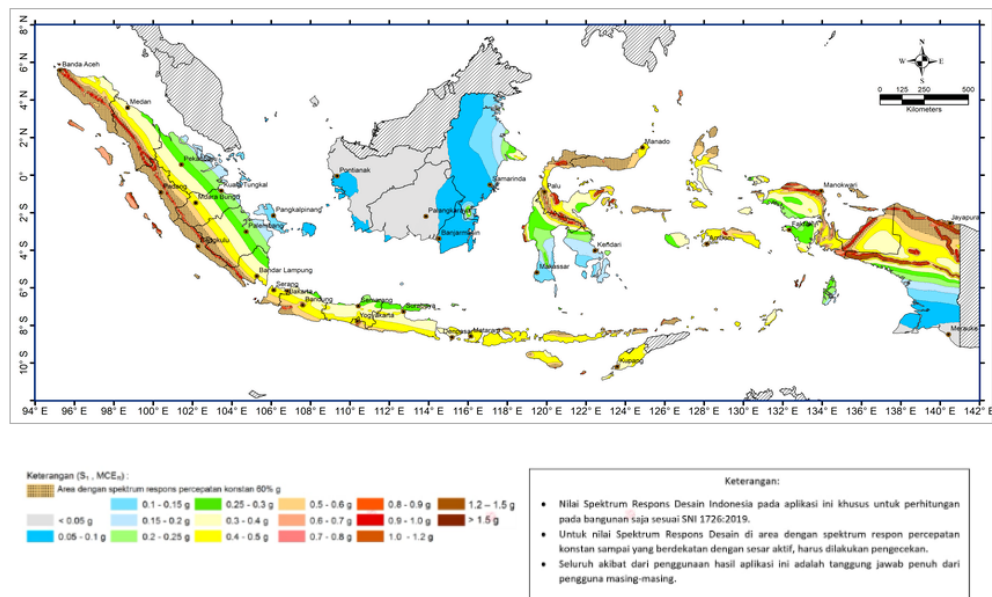
Sumber: (SNI 1726-2019)

2. Menentukan parameter percepatan gempa S_s dan S_1 .

Parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) telah ditetapkan menggunakan Peta Gempa dalam SNI 1726-2019, dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan 2.9.



Gambar 2. 8 Peta MCE-R untuk periode pendek ($T=0,2$ detik)
Sumber: SNI 1726-2019; Gambar 15



Gambar 2. 9 Peta MCE-R untuk periode panjang ($T=1$ detik)
Sumber: SNI 1726-2019; Gambar 16

3. Menentukan parameter koefisien situs periode (F_a dan F_v).

Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Berikut menurut SNI 1726-2019, koefisien situs periode dapat dilihat pada tabel 2.2 dan tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Koefisien situs Fa.

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko-target (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726-2019; Tabel 6

Tabel 2. 3 Koefisien situs Fv.

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko-target (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726-2019; Tabel 7

4. Menentukan parameter (SM_s) dan (SM_1).

Parameter respon spektral percepatan pada periode pendek (SM_s) dan periode 1 detik (SM_1) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut:

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (2.14)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \quad (2.15)$$

Dimana:

SS = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek;

S_1 = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terletak untuk periode 1,0 detik.

5. Menentukan parameter S_{DS} dan S_{D1} .

Parameter percepatan spektra desain untuk periode pendek, SD_s dan pada periode 1 detik, SD_1 , harus ditentukan melalui persamaan berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \quad (2.16)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \quad (2.17)$$

6. Menentukan kategori risiko bangunan berdasarkan fungsi bangunan.
Berdasarkan SNI 1726-2019; Pasal 4.1.2; Tabel-3 dan Tabel-4; untuk kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa I_e .

Tabel 2. 4 Kategori risiko bangunan.

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo	III

Tabel 2. 5 Kategori risiko bangunan (lanjutan).

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	III
Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangka penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangka air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	IV

Sumber: SNI 1726-2019; Tabel 3

Tabel 2. 6 Faktor keutamaan gempa.

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI 1726-2019; Tabel 4

7. Menentukan kategori seismik.

Struktur bangunan yang termasuk dalam kategori risiko I, II, III, atau IV harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategori risikonya dan parameter respon spektral percepatan desain SD_S dan SD_1 , sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Setiap bangunan dan struktur harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih parah, dengan mengacu pada Tabel 2.7 dan Tabel 2.8, terlepas dari nilai periode fundamental getaran struktur (T). Tujuannya adalah agar bangunan dan struktur dapat didesain dan dibangun dengan memperhatikan risiko gempa yang sesuai, sehingga dapat meminimalkan kerusakan dan korban jiwa saat terjadi gempa bumi.

Tabel 2. 7 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek.

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber: SNI 1726-2019; Tabel 8

Tabel 2. 8 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik.

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: SNI 1726-2019; Tabel 9

2.4.5 Kombinasi Pembebanan

Penentuan kombinasi pembebanan mengacu pada SNI 1726-2019; Pasal 4.2.2.1 dan Pasal 4.2.2.3; Hal-26. Struktur harus dirancang sedemikian hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban-beban terfaktor dengan kombinasi beban sebagai berikut:

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

3. $1,2D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) + (L_r \text{ atau } 0,5W)$
4. $1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
5. $1,2D + 1,0E + L$
6. $0,9D + 1,0W$
7. $0,9D + 1,0E$

Berdasarkan SNI 1726-2019; Pasal 7.4.2 pengaruh gempa pada kombinasi dasar untuk desain kekuatan adalah:

- $(1,2 + 0,2S_{DS})D + 1,0E + 1,0L$
- $(0,9 - 0,2S_{DS})D + 1,0E$

Yang dimana nilai E berdasarkan Pasal 7.4.2.1 dan Pasal 7.4.2.2; Hal-36 adalah:

$$E = \rho \times Q_E \quad (2.18)$$

Dimana:

ρ = faktor redudansi (Pasal 7.3.4; Hal-63); Untuk wilayah Surabaya (KDS D) = 1,3.

$S_{DS} = 0,607$ (wilayah Surabaya)

2.5 Nonlinear Time History Analysis

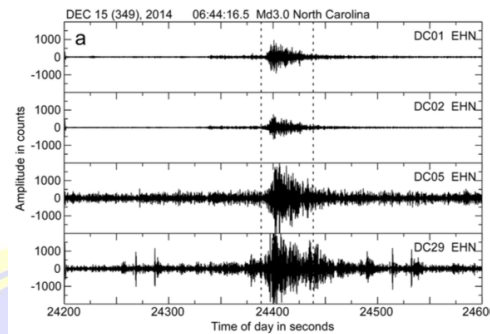
2.5.1 Konsep Dasar dan Keunggulan

Analisis *nonlinear* dibagi menjadi dua yaitu *nonlinear static analysis (pushover)* dan *nonlinear dynamic analysis*. *Nonlinear dynamic analysis* atau lebih dikenal dengan istilah *nonlinear time history analysis (NLTHA)* merupakan metode analisis yang handal untuk digunakan mensimulasikan respons struktur bangunan terhadap rekaman gempa sesungguhnya (*ground motion records*). Berbeda dengan analisis statik ekuivalen atau analisis respons spektrum yang menyederhanakan perilaku struktur, NLTHA menghitung respons struktur secara langkah demi langkah sepanjang durasi suatu rekaman percepatan tanah (akselerogram) yang sebenarnya atau yang disimulasikan (Dynamics of Structures, 2017). Dalam aplikasinya, metode NLTHA membutuhkan perangkat yang memadai guna memproses perhitungan *nonlinear* yang melibatkan minimal 11 *ground motion* dalam analisisnya. Adapun beberapa keunggulan yang dimiliki oleh NLTHA dibandingkan dengan *pushover* adalah sebagai berikut (Lesmana, 2023):

1. Metode NLTHA memiliki kemampuan untuk memperkirakan urutan pembebanan dan perpindahan maksimum yang dituju (*target displacement*) dengan tingkat ketepatan yang sangat baik.
2. Metode NLTHA mampu merepresentasikan respons struktur bangunan gedung dengan melibatkan pengaruh dari mode-mode getar yang signifikan, tidak hanya mode dasar.
3. Metode NLTHA dapat mengakomodasi efek penurunan kapasitas kekuatan pada komponen struktur akibat pembebanan dinamis yang terjadi berulang (*degradasi siklik*).

Dalam penggunaan metode NLTHA, terdapat dua poin penting yang harus dipenuhi agar proses analisis bisa dilakukan dengan hasil yang baik. Adapun poin tersebut adalah (Lesmana, 2023):

1. *Ground motion*. Dalam konteks analisis NLTHA, data *ground motion* merupakan *input* utama yang harus digunakan berupa rekaman gempa sesungguhnya dari daerah yang sedang diteliti. Data ini berfungsi sebagai beban gempa dalam simulasi NLTHA. Mengacu pada SNI 1726-2019 atau ASCE 7-16, jumlah minimum *ground motion* yang diperlukan adalah 11 rekaman, 22esimp setiap rekaman terdiri dari dua komponen arah yang saling tegak lurus. Oleh karena itu, total minimum *ground motion* yang harus diterapkan dalam analisis NLTHA adalah 22 rekaman. Berikut bentuk rekaman *ground motion* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Rekaman *ground motion*
Sumber: Earthquake Hazard Program, 2022

2. *Hysteretic behavior*. Dalam analisis NLTHA harus mendefinisikan model *hysteretic* untuk penampang elemen struktur yang sedang diteliti, agar perilaku *nonlinear* dari penampang tersebut dapat diperhitungkan selama simulasi, termasuk dampak degradasi siklik. Tahap ini secara praktis menghasilkan pembentukan sendi plastis (*plastic hinges*) pada elemen struktur ketika gaya dalam yang terjadi melebihi batas elastis penampang. Umumnya, sendi plastis muncul di ujung-ujung elemen karena pada titik tersebut gaya dalam (momen) mencapai nilai maksimal.

2.5.2 Ruang Lingkup Analisis NLTHA

1. Menentukan *type of performance assessment*.
Terdapat tiga tipe dari *performance assessment* (penilaian kinerja) yaitu:
 - *Intensity-based assessment*
 - *Scenario-based assessment*
 - *Time-based assessment*
2. Melakukan *modelling* struktur.
Proses permodelan dapat dimulai dengan menggambar komponen-komponen struktur gedung seperti balok, kolom, pelat lantai, *shear wall* dan kondisi tumpuannya, untuk membentuk satu kesatuan model struktur yang merepresentasikan desain yang direncanakan atau kondisi eksisting di lapangan. Setelah seluruh komponen struktur selesai dimodelkan, selanjutnya adalah mendefinisikan *hinge properties* pada elemen struktur utama yang ditentukan berdasarkan kapasitas kekuatan dari penampang masing-masing elemen tersebut.

3. Menentukan *target response spectrum*.
Penentuan respons spektrum berfungsi sebagai acuan dalam proses skala atau penyesuaian rekaman gempa. Hal inilah yang menjadi pembeda diantara ketiga tipe penilaian kinerja (*performance assessment*) tersebut. Setiap tipe penilaian kinerja memiliki metode dan kriteria khusus dalam menetapkan respons spektrum acuan yang akan digunakan.
4. Menyeleksi data *ground motion*.
Tahap seleksi *ground motion* merupakan langkah penting dengan melibatkan pertimbangan yang kompleks terhadap berbagai parameter seperti jumlah rekaman yang dibutuhkan, tingkat intensitas gempa, Lokasi asal pengambilan rekaman, jarak dari sumber gempa (*rupture*), durasi getaran serta karakteristik bentuk spektra dari rekaman gempa.
5. Melakukan *modification of ground motion*.
Tujuan dari modifikasi adalah untuk menyesuaikan tingkat intensitas rekaman gempa agar merepresentasikan kondisi di lokasi penelitian dengan berpedoman pada respons spektrum acuan yang telah ditetapkan. Secara umum, terdapat dua metode untuk memodifikasi rekaman *ground motion* yaitu, *amplitude scaled* dan *spectra matching*.
6. *Input* pembebanan.
Beban gravitasi di *input* ke dalam elemen struktur berdasarkan konsep pembebanan yang digunakan tanpa faktor atau koefisien. Sedangkan beban gempa dari rekaman *ground motion* akan dikategorikan sebagai beban dinamis nonlinier.
7. Proses *running*.
Faktor yang memengaruhi lamanya proses *running* NLTHA yaitu, tingkat kerumitan struktur gedung, banyaknya rekaman *ground motion*, dan kapasitas spesifikasi komputer.
8. *Performance assessment* dan *acceptance criteria*.
Tahap ini merupakan tahap akhir dari keseluruhan proses analisis, pada tahap ini akan disimpulkan dan dievaluasi kinerja serta perilaku struktur berdasarkan hasil analisis yang diperoleh.

2.5.3 Ground Motion Modification

Modifikasi rekaman gerakan tanah (*ground motion modification*) merupakan suatu proses penyesuaian karakteristik rekaman gempa bumi yang tersedia agar sesuai dengan kondisi seismik dan geoteknik lokasi studi. Proses modifikasi rekaman ini dilakukan dengan tujuan utama yaitu, untuk memastikan data gempa yang digunakan benar-benar mencerminkan tingkat risiko seismik di lokasi penelitian; untuk menghasilkan kesesuaian antara respons spektrum dari rekaman gempa dengan respons spektrum desain yang dijadikan acuan; untuk meningkatkan efisiensi proses analisis dengan menggunakan rekaman gempa yang telah ada tanpa perlu mencari rekaman yang sama persis.

Mengacu pada SNI 1726-2019, metode modifikasi *ground motion* dibagi menjadi dua macam sebagai berikut:

1. *Amplitude scaled* (SNI 1726-2019; Pasal 11.2.3.2; Hal-168).
Merupakan metode dengan hanya mengubah *amplitude* respons spektrum dari *ground motion*. Pada metode ini terjadi peningkatan *amplitude* pada respons spektrum yang sudah diskala dibandingkan kondisi yang belum diskala.

Metode *amplitude scaling* memiliki poin-poin penting yang harus diperhatikan sebagai berikut:

- a. Rekaman horizontal yang digunakan harus terdiri dari dua komponen arah yang saling tegak lurus, yaitu arah X dan arah Y.
- b. Setiap rekaman akan menghasilkan respons spektrum masing-masing untuk kedua arah tersebut.
- c. Pada proses skala, respons spektrum yang menjadi acuan adalah nilai rata-rata geometrik (*geomean*) yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S_{gm}(T) = \sqrt{S_x(T) \times S_y(T)} \quad (2.19)$$

Dimana:

S_{gm} : Nilai *geomean* dari respons spektrum suatu *ground motion*

$S_x(T)$: Nilai percepatan respons spektrum arah-x

$S_y(T)$: Nilai percepatan respons spektrum arah-y

- d. Nilai rata-rata geometrik respons spektrum hasil rekaman tidak boleh kurang dari 90% nilai respons spektrum target pada rentang periode yang telah ditetapkan.
 - e. Khusus rekaman arah vertical, komponen dari setiap rekaman harus diskalakan sedemikian rupa sehingga rata-rata respons spektrum vertikalnya melampaui respons spektrum target vertical dalam rentang periode yang berlaku.
2. *Spectral matching* (SNI 1726-2019; Pasal 11.2.3.3; Hal-168).
Merupakan metode yang dalam prosesnya terjadi perubahan frekuensi dan energi dari rekaman *ground motion* dengan tujuan respons spektrum yang dihasilkan bisa sesuai dengan respons spektrum target pada rentang periode yang ditetapkan.
Metode *spectral matching* memiliki poin-poin penting yang harus diperhatikan sebagai berikut:
- a. Rekaman horizontal yang digunakan harus terdiri dari dua komponen arah yang saling tegak lurus, yaitu arah X dan arah Y.
 - b. Setiap rekaman akan menghasilkan respons spektrum masing-masing untuk kedua arah tersebut.
 - c. Pada proses skala, respons spektrum yang menjadi acuan adalah nilai rata-rata geometrik (*geomean*) yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$T_{min} \leq T \leq T_{max} \quad (2.20)$$

$$0,2T_1 \leq T \leq 2T_1 \quad (2.21)$$

- d. Setiap pasangan rekaman harus dimodifikasi hingga nilai rata-rata geometrik yang dihasilkan pada rentang periode tertentu sama dengan atau lebih besar dari 110% respons spektrum target.
- e. Apabila menggunakan rekaman vertikal, hasil penyesuaian spektra tidak boleh kurang dari respons spektrum target yang telah ditetapkan.

2.5.4 Hasil Akhir NLTHA

2.5.4.1 Performance Assessment

Performance assessment atau penilaian kinerja struktur merupakan tujuan utama dari analisis NLTHA, dimana hasil respons struktur dievaluasi berdasarkan tingkat performa yang diharapkan. Penilaian kinerja tidak hanya melihat pada kekuatan struktur saja, tetapi juga pada tingkat kerusakan yang terjadi, keselamatan penghuni, dan kelayakan perbaikan pasca gempa. Mengacu pada “*Handbook Basic Theory Nonlinear Time History Analysis*” berikut parameter yang tergolong dalam *performance assessment* (Lesmana, 2023):

1. Ductility.

Daktilitas (*ductility*) didefinisikan sebagai kemampuan suatu struktur untuk mengalami deformasi inelastis (melewati batas elastisnya) tanpa kehilangan kapasitas menahan beban secara signifikan atau mengalami keruntuhan. Struktur dengan nilai daktilitas tinggi dikategorikan sebagai daktail atau kondisi dimana struktur memungkinkan menyerap energi gempa melalui deformasi inelastis yang besar dan memberikan peringatan visual (berupa kerusakan/retak) sebelum runtuh. Sebaliknya, struktur dengan nilai daktilitas rendah bersifat getas atau struktur cenderung mengalami keruntuhan secara tiba-tiba dan tanpa peringatan setelah melampaui batas elastisnya.

a. Curvature ductility (ϕ).

Kurvatur digunakan untuk mengukur deformasi inelastis pada komponen struktur, khususnya berupa rotasi di daerah yang berpotensi memebentuk sendi plastis. Adapun persamaan untuk mengukur *curvature ductility* sebagai berikut:

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_m}{\phi_y} \quad (2.22)$$

Dimana:

μ_{ϕ} : Curvature ductility
 ϕ_m : Maximum curvature
 ϕ_y : Yield curvature

b. Strain ductility (ϵ).

Menggambarkan ketahanan material dalam mengalami regangan plastis tanpa penurunan tegangan berarti yang dapat memicu keruntuhan. Apabila deformasi inelastis yang terjadi kecil, regangan berlebih pada penampang dapat menyebabkan

komponen mengalami leleh meskipun pada tingkat gempa menengah. Adapun persamaan untuk menyatakan *strain ductility* sebagai berikut:

$$\mu_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_y} \quad (2.23)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \mu_{\varepsilon} & : \text{Strain ductility} \\ \varepsilon_m & : \text{Maximum strain} \\ \varepsilon_y & : \text{Yield strain} \end{aligned}$$

c. *Displacement ductility* (Δ).

Merupakan parameter yang umum digunakan untuk menyatakan daktilitas struktur dengan menggunakan nilai yang biasanya diambil adalah perpindahan (*displacement*) di lantai paling atas gedung. Adapun persamaan untuk menyatakan *displacement ductility* sebagai berikut:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (2.24)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \mu_{\Delta} & : \text{Displacement ductility} \\ \Delta_m & : \text{Maximum displacement } (\Delta_m = \Delta_y + \Delta_p) \\ \Delta_y & : \text{Yield displacement} \end{aligned}$$

2. *System parameters*.

System parameters merujuk pada komponen-komponen yang telah ditetapkan dalam proses desain awal, kemudian dievaluasi kembali selama analisis NLTHA. Tujuan evaluasi ulang ini adalah untuk memverifikasi bahwa nilai-nilai parameter berdasarkan standar desain konsisten dengan perilaku aktual struktur yang teramati dalam analisis nonlinier. Dengan demikian, proses ini berfungsi sebagai kalibrasi ketentuan standar desain dengan membandingkannya terhadap hasil NLTHA. Berikut penjelasan lebih mendalam mengenai parameter tersebut.

a. *Overstrength* (Ω_0).

Faktor *overstrength* digunakan untuk memperhitungkan pengaruh beban seismik dalam analisis nonlinier. Parameter ini didefinisikan sebagai rasio antara kekuatan aktual (*apparent strength*) struktur dengan kekuatan desainnya.

$$\Omega_0 = \frac{\text{apparent strength}}{\text{design strength}} \quad (2.25)$$

b. *Reduction factor (R).*

Faktor reduksi diterapkan sesuai dengan sistem pemikul gaya gempa yang dirancang. Nilai ini menentukan besarnya pengurangan atau reduksi beban gempa rencana, di mana semakin tinggi tingkat daktilitas yang direncanakan, semakin besar pula nilai R yang digunakan.

$$R = \frac{V_{elastis}}{V_y} \quad (2.26)$$

c. *Deflection amplification factor (C_d).*

Faktor amplifikasi defleksi (C_d) merupakan parameter untuk memperbesar perpindahan lateral dalam desain. Parameter ini digunakan saat mengevaluasi simpangan antar lantai dan analisis pengaruh $P - \Delta$. Dalam proses NLTHA, nilai C_d yang dihasilkan akan dihitung dan dibandingkan dengan ketentuan pada SNI 1726-2019; Tabel 12. Parameter C_d dapat diartikan sebagai rasio antara *actual inelastic displacement demand* terhadap *design displacement demand*.

$$C_d = \frac{\Delta_I}{\Delta_D} \quad (2.27)$$

Dimana:

- C_d : *Deflection amplification factor*
 Δ_I : *Actual inelastic displacement demand*
 Δ_D : *Design displacement demand* atau *reduced elastic design*

3. *Floor acceleration.*

Parameter ini digunakan untuk menilai kinerja komponen bangunan sensitif seperti partisi, plafon, peralatan mekanikal-elektrikal. Dengan kata lain, parameter ini bertujuan memastikan keamanan komponen non-struktural dan isi gedung dari kerusakan selama gempa, yang berkaitan langsung dengan potensi kerugian ekonomi (Lesmana, 2023). Selain aspek ekonomi, parameter ini juga menjamin kenyamanan penghuni gedung dengan membatasi percepatan lantai maksimum pada kisaran 0,01g hingga 0,025g di setiap lantai.

2.5.4.2 Acceptance Criteria

Banyaknya *standart* dan *engineering guidelines* yang mengatur *acceptance criteria*, dapat disimpulkan bahwa terdapat dua golongan yang termasuk *acceptance criteria* yaitu:

1. *Global acceptance criteria.*

Komponen utama *global acceptance criteria* adalah rasio simpangan antar tingkat (*story drift ratio*). Disyaratkan bahwa nilai rata-rata rasio simpangan hasil analisis NLTHA tidak boleh melebihi dua kali batas maksimum yang terdapat pada SNI 1726-2019; Tabel 20; Hal-88.

Story drift didefinisikan sebagai simpangan lateral tiap lantai akibat beban gempa, sedangkan story drift ratio adalah perbandingan antara selisih deformasi dua lantai berdekatan dengan tinggi antar lantainya. Perhitungannya didasarkan pada selisih defleksi maksimum antara dua titik vertikal sejajar di atas dan bawah lantai yang ditinjau. Adapun persamaan untuk menghitung nilai *story drift ratio* adalah sebagai berikut:

$$Drift\ ratio = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{h} \quad (2.28)$$

Dimana:

- Δ_i : Simpangan pada lantai i
- Δ_{i-1} : Simpangan dibawah lantai I atau $(I - 1)$
- h : Tinggi antar lantai yang ditinjau

Berdasarkan FEMA P-58-1, rasio simpangan antar tingkat diklasifikasikan menjadi dua kategori yaitu, *Transient Story Drift Ratio* mengacu pada simpangan sementara, yang berarti struktur akan kembali ke posisi semula tanpa menyisakan deformasi permanen di setiap lantai setelah gempa berakhir. *Residual Story Drift Ratio* merujuk pada simpangan permanen, yang mengindikasikan struktur mengalami perubahan bentuk tetap akibat deformasi tambahan yang menetap setelah gempa.

2. *Element acceptance criteria.*

Kriteria elemen ini berfokus pada evaluasi komponen individual struktur yang diklasifikasikan menjadi dua jenis aksi yaitu, *Deformation-controlled action* merupakan aksi pada elemen struktur yang bersifat daktail dan secara khusus direncanakan untuk memikul beban gempa. Dan *Force-controlled action* adalah aksi pada elemen non-daktail yang tidak direncanakan untuk menahan beban gempa, atau dikenal sebagai komponen non-struktural.

2.6 Studi Terdahulu

Harne dan Mahajan (2025) dalam *Procedia Structural Integrity* yang berjudul “*Significance of Masonry Infill Walls to Improve the Seismic Response of RC Framed Structures Through Fibre-Based Modelling*” melakukan studi numerik untuk mengevaluasi pengaruh dinding pengisi (*masonry*) menggunakan metode pemodelan makro dengan pendekatan diagonal strut ekuivalen sesuai ketentuan IS 1893:2016, serta analisis *non-linear static pushover*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan dinding pengisi secara signifikan meningkatkan kapasitas geser dasar (*base shear*) dan kekakuan struktur, serta mengurangi periode fundamental dan perpindahan maksimum. Penelitian ini juga mengonfirmasi bahwa konfigurasi lantai dasar tanpa dinding pengisi (*soft storey*) rentan terhadap konsentrasi deformasi, terlepas dari kekuatan kolom sehingga menekankan pentingnya distribusi dinding pengisi yang merata dalam perencanaan struktur tahan gempa.

Wirawan, et al (2023) dalam *Journal of Applied Engineering Science* yang berjudul “*Analytical Study on Behaviour and Performance of Infilled Frame Structure with Reinforced*

Eccentric Opening” melakukan studi numerik untuk menganalisis perilaku struktur rangka berinfill dinding dengan bukaan eksentrik dengan menggunakan metode pemodelan elemen *shell* yang detail dan pemodelan makro dengan elemen diagonal *strut*. Analisis dilakukan secara *linear* dan *non-linear static (pushover)* untuk membandingkan kinerja struktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model *strut* memiliki perilaku yang sebanding dengan model elemen *shell*, dengan perbedaan perpindahan hanya 0,4% – 8%. Selain itu, disimpulkan bahwa semakin kecil sudut *strut* dan rasio bukaan, maka kekakuan struktur semakin besar. Analisis pushover juga mengungkap bahwa dinding *infill* mampu meningkatkan kapasitas geser dasar hingga 350% dibandingkan rangka terbuka (*open frame*).

Dhonju dan Shrestha (2022) dalam *Proceedings of Institute of Engineering* yang berjudul “*Effect of Masonry Infill on Seismic Performance, Ductility Factor and Overstrength Factor for Regular Steel Framed Structures*” melakukan studi numerik untuk mengevaluasi pengaruh dinding pengisi bata terhadap perilaku seismik menggunakan metode pemodelan makro dengan pendekatan diagonal *strut* ekuivalen berdasarkan FEMA 273. Analisis dilakukan pada struktur baja menggunakan analisis statik ekuivalen dan analisis *non-linear static pushover*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan dinding pengisi meningkatkan kekakuan dan kekuatan struktur, ditandai dengan peningkatan *base shear* rata-rata, penurunan periode rata-rata, serta pengurangan *displacement* teratas rata-rata, namun dinding pengisi juga menyebabkan penurunan faktor daktilitas rata-rata. Di sisi lain, faktor *overstrength* meningkat, menunjukkan adanya cadangan kekuatan di luar desain. Sehingga studi ini menyimpulkan bahwa pengabaian dinding pengisi dalam analisis dapat menyebabkan estimasi perilaku seismik yang tidak akurat, serta disarankan untuk mempertimbangkan kontribusi dinding pengisi untuk memanfaatkan peningkatan kekuatan sekaligus mengantisipasi penurunan daktilitas.

Pascanawaty dan Ernavati (2020) dalam *Jurnal Ulul Albab* yang berjudul “*Analisis Perkuatan Struktur Kerangka Bangunan Bertingkat Terhadap Beban Gempa dengan Infilled Frame*” melakukan studi numerik menggunakan pemodelan 4 konfigurasi struktur yaitu: Model I (*open frame*), Model II (*infilled frame* dengan dinding dimodel sebagai *shell element*), Model III (*infilled frame* dengan dinding dimodel sebagai *equivalent diagonal strut*), dan Model IV (*infilled frame* sebagai *shell element* dengan penambahan kolom). Analisis dilakukan secara linier dengan metode statik ekuivalen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan dinding pengisi secara signifikan meningkatkan kekakuan struktur. Dibandingkan Model I (*open frame*), Model III (*diagonal strut*) memberikan peningkatan kekakuan tertinggi, yaitu 100% lebih kaku pada arah gempa X, sementara Model II (*shell element*) 95% lebih kaku pada arah Y. Selain itu, semua model struktur dengan dinding pengisi menunjukkan nilai momen dan gaya lintang yang lebih rendah pada balok dan kolom dibandingkan model rangka terbuka. Sehingga disimpulkan bahwa *infilled frame* lebih kaku dan aman, sehingga sangat direkomendasikan untuk daerah rawan gempa.

Patricia, et al (2025) dalam *Journal of Civil Engineering, Building and Transportation* yang berjudul “*Analisis Perilaku Struktur Beton Bertulang dengan Sistem Rangka Terbuka dan Infilled pada Beban Gempa*” melakukan studi komparatif menggunakan metode pemodelan numerik dengan dua skenario pemodelan, yaitu struktur rangka terbuka (*Open Frame*) dan struktur dengan dinding pengisi sebagai elemen *shell* (*Infilled Frame*). Analisis

dilakukan dengan beban respons spektrum sesuai SNI 1726:2019. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur *infilled frame* secara signifikan lebih kaku dibandingkan struktur *open frame*, semua gaya dalam struktur (momen balok dan kolom, gaya lintang, serta gaya aksial) pada model *infilled frame* nilainya lebih rendah dibandingkan model *open frame*, dengan rasio perbandingan mencapai 1 : 3,19 untuk momen kolom. Oleh sebab itu, studi ini menyimpulkan bahwa penambahan dinding pengisi efektif meningkatkan kekakuan dan kinerja struktur dalam menahan beban gempa, sehingga sistem *infilled frame* direkomendasikan untuk bangunan di daerah rawan gempa.

