

BAB II

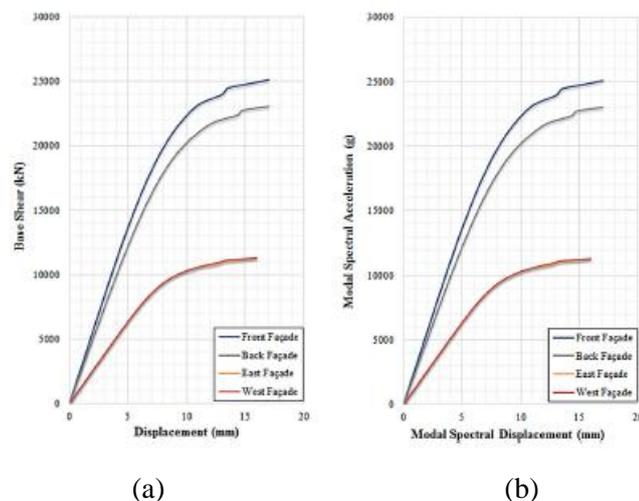
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Menurut referensi yang didapatkan penulis, penelitian tentang studi kerentanan *non-engineered building* menggunakan dinding pasangan bata merah ½ batu belum pernah dilakukan sebelumnya. Dalam penulisan laporan tugas akhir ini, penulis mendapatkan informasi dari beberapa jurnal yang akan dijelaskan pada paragraf berikut ini.

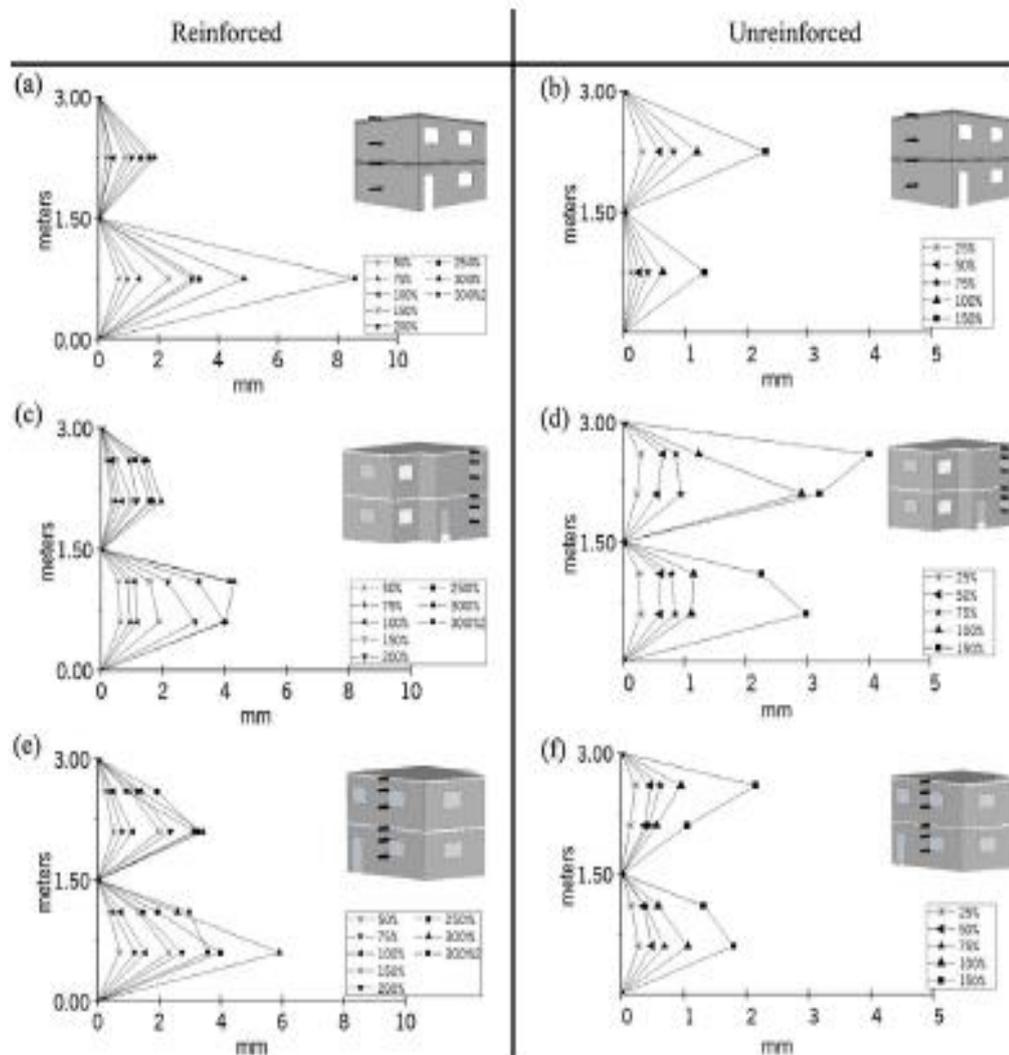
2.1.1 Penelitian Numerik tentang *Modelling Non-Engineered Building*

Korkmaz dkk. (2018) melakukan penelitian tentang penilaian kinerja bangunan dengan dinding tak bertulang: studi kasus bangunan bersejarah sekolah Khatib di Enzurum, Turki dengan tujuan untuk mengidentifikasi kerentanan seismik bangunan dengan dinding tak bertulang dan untuk mengevaluasi kinerja struktural bangunan berdasarkan prinsip-prinsip penilaian kinerja bangunan. Metode penelitiannya yaitu pengumpulan data berupa sejarah bangunan, informasi struktural bangunan, data gempa yang meliputi data gempa wilayah dan gempa yang terakhir terjadi, dan data material kemudian dianalisis menggunakan bantuan *software* ANSYS Workbench. Hasil dari penelitian ini berupa kurva pushover yang menggambarkan hubungan geser dasar dengan perpindahan yang dihasilkan dari setiap sisi kemudian diubah menjadi kurva kapasitas modal yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.

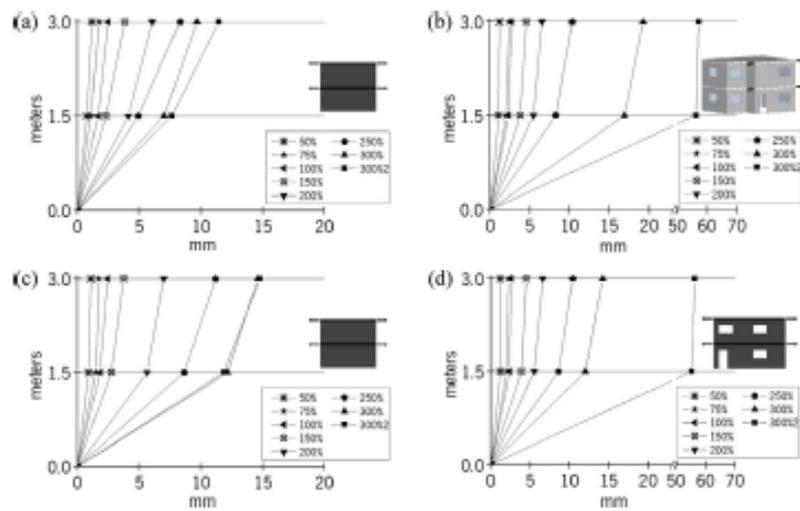


Gambar 2.1 (a) Kurva pushover; (b) kurva kapasitas modal (Korkmaz dkk., 2018)

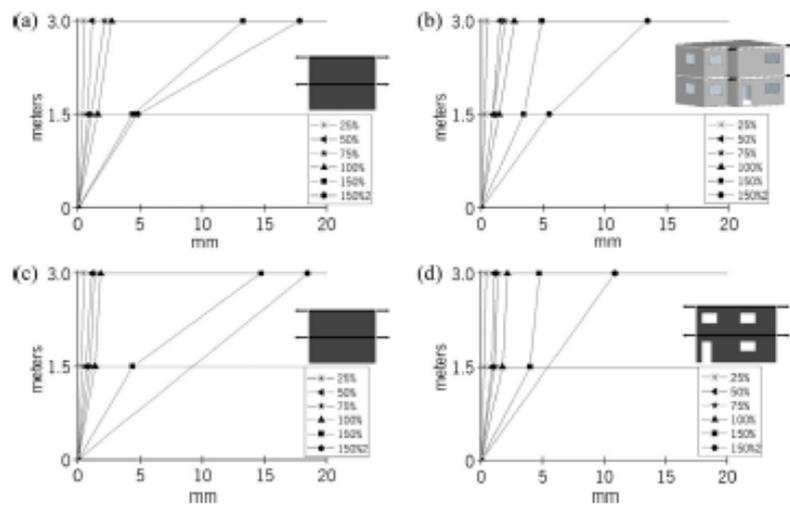
Avila dkk. (2018) melakukan penelitian tentang penilaian kinerja seismik eksperimen bangunan asimetris dengan tujuan menganalisis kinerja seismik struktur dinding untuk bangunan perumahan rendah hingga menengah dengan konfigurasi geometri simetris dan asimetris. Metode penelitiannya yaitu metode eksperimen menggunakan *shaking table test* dan metode numerik menggunakan bantuan *software* LNEC-SPA. Hasil dari penelitian ini yaitu data percepatan tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration*), kurva pergeseran *out-of-plane* pada Gambar 2.2, kurva pergeseran *in-plane* pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4, kurva hysteresis untuk bangunan asimetris pada Gambar 2.5, pola kerusakan bangunan pada Gambar 2.6, kurva rotasi torsional pada Gambar 2.7.



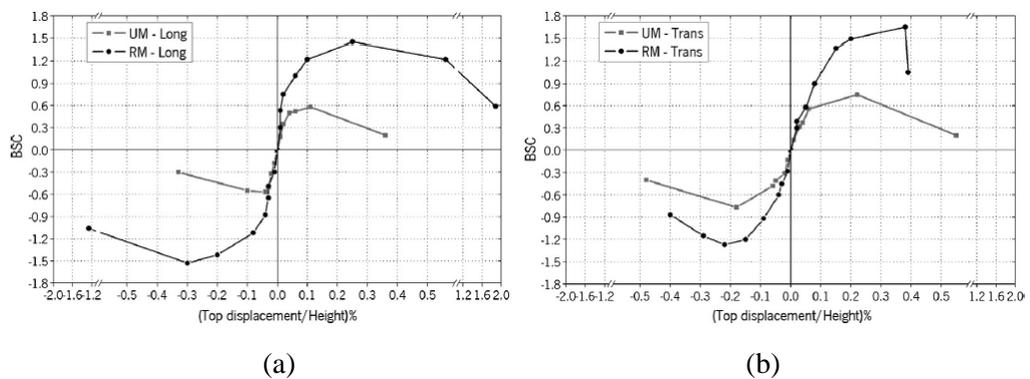
Gambar 2.2 Kurva pergeseran *out-of-plane* untuk dinding bertulang (RM) dan dinding tak bertulang (UM) di sisi (a, b) Selatan; (c, d) Barat; (e, f) Timur (Avila dkk., 2018)



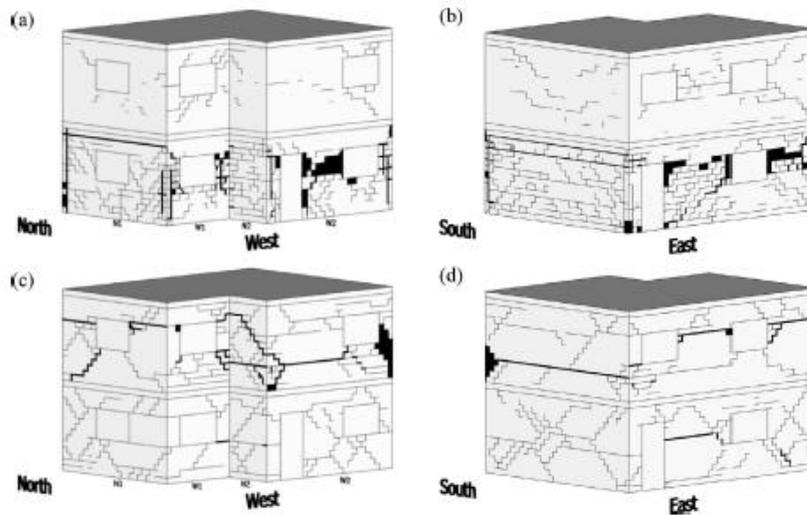
Gambar 2.3 Kurva pergeseran *in-plane* untuk dinding bertulang (RM) (a) dinding Utara; (b) dinding Barat; (c) dinding Selatan; (d) dinding Timur (Avila dkk., 2018)



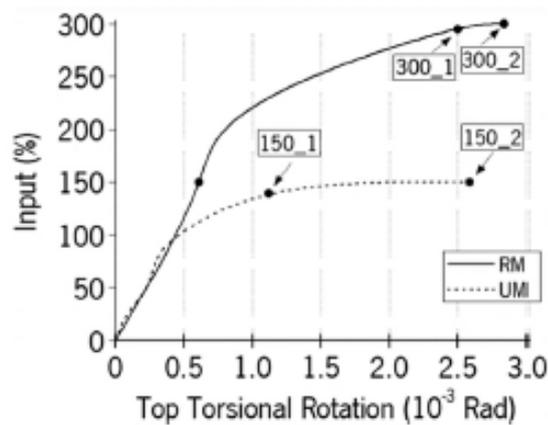
Gambar 2.4 Kurva pergeseran *in-plane* untuk dinding tak bertulang (UM) (a) dinding Utara; (b) dinding Barat; (c) dinding Selatan; (d) dinding Timur (Avila dkk., 2018)



Gambar 2.5 Kurva hysteresis untuk bangunan asimetris dengan dinding bertulang (RM) dan dinding tak bertulang (UM) (a) arah longitudinal; (b) arah transversal (Avila dkk., 2018)

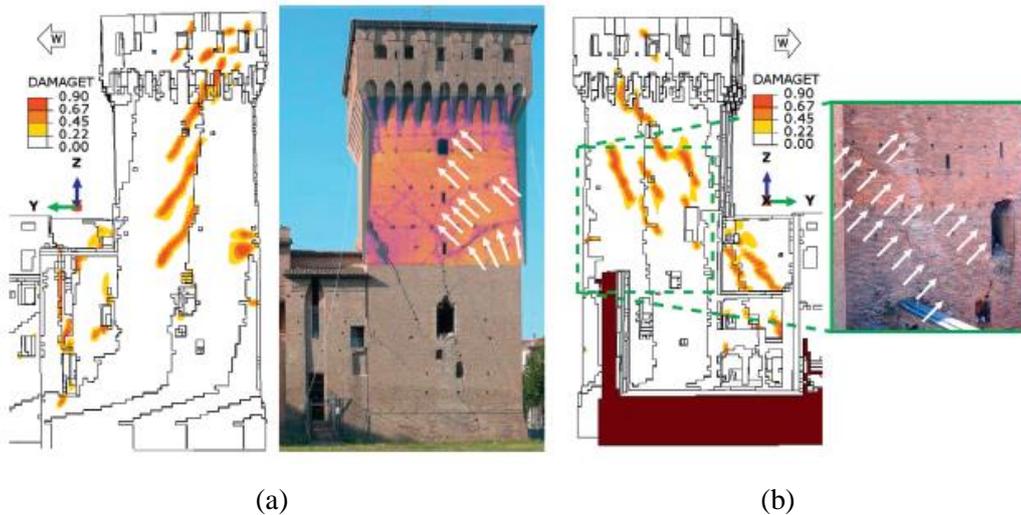


Gambar 2.6 Pola kerusakan pada bangunan asimetris (a, b) bangunan bertulang; (c, d) bangunan tak bertulang (Avila dkk., 2018)



Gambar 2.7 Kurva rotasi torsional untuk dinding bertulang (RM) dan dinding tak bertulang (UM) (Avila dkk., 2018)

Catellazzi dkk. (2017) melakukan penelitian tentang strategi inovatif pemodelan numerik untuk analisis struktural bangunan monumental bersejarah dengan tujuan untuk menganalisis pola retakan dan kerentanan bangunan akibat gempa dan akibat beban arah horizontal juga beban arah vertikal. Metode penelitiannya yaitu analisis pushover linier dan non-linier dengan menggunakan bantuan *software* ABAQUS. Hasil dari penelitian ini yaitu pola kerusakan dan pola retak analisis pushover dengan gaya horizontal dari arah Barat yang dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan pola kerusakan dan pola retak analisis pushover dengan gaya horizontal dari arah Selatan yang dapat dilihat pada pada Gambar 2.9. Retakan pada bangunan ini terdiri dari retakan besar dan retakan kecil, retakan kecil biasanya dipengaruhi oleh tekstur pasangan bata dari retakan besar.



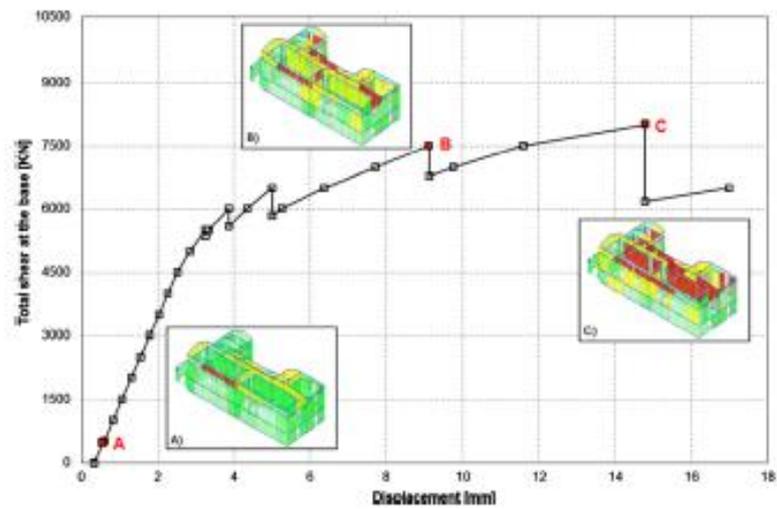
(a) (b)
Gambar 2.8 Perbandingan antara pola kerusakan dan pola retak analisis pushover dan gaya horizontal dari arah Barat (a) sisi Selatan; (b) sisi Utara (Catellazzi dkk., 2017)



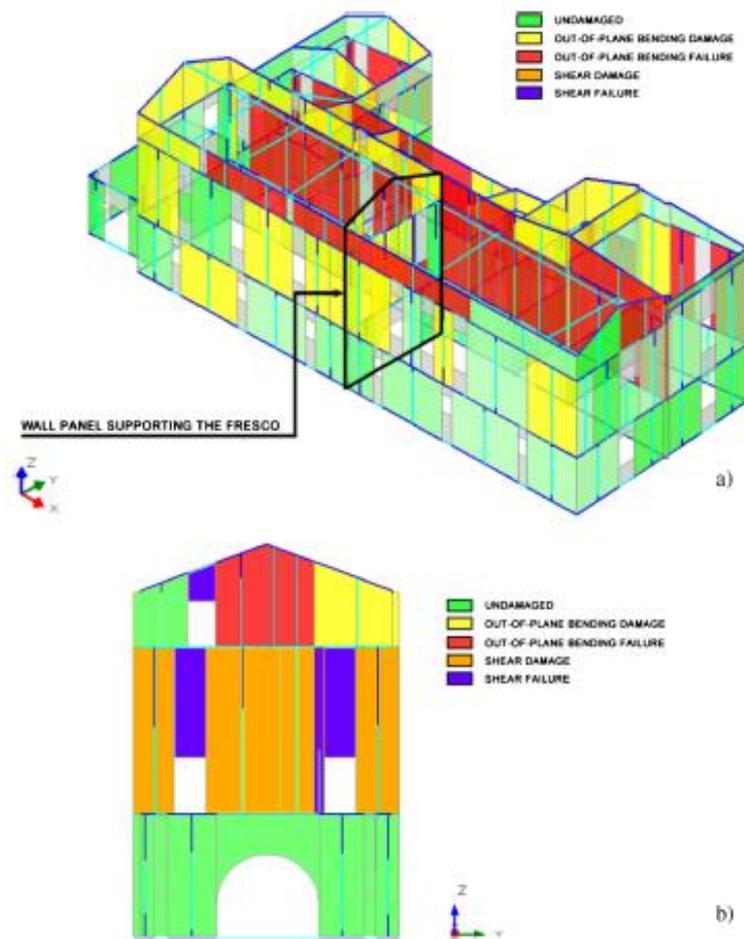
Gambar 2.9 Perbandingan antara pola kerusakan dan pola retak analisis pushover dan gaya horizontal dari arah Selatan (a) sisi Barat; (b) sisi Timur (Catellazzi dkk., 2017)

Castori dkk. (2017) melakukan penelitian tentang penilaian kerentanan seismik dari bangunan monumental dengan tujuan untuk mengetahui perilaku struktural bangunan dan sifatnya, menganalisis kemungkinan keruntuhan bangunan, dan mengetahui pola retak bangunan. Metode penelitiannya yaitu dengan pengumpulan data berupa sejarah bangunan, data kerusakan, dan geometri bangunan kemudian dianalisis dengan bantuan *software* ANSYS. Analisis yang dilakukan pada *software* ANSYS yaitu analisis pushover (analisis statis non-linier), analisis batas, dan analisis berbasis FEM. Hasil dari penelitian ini yaitu kurva kapasitas dan urutan kegagalan bangunan dalam arah-y pada Gambar 2.10, juga

hasil analisis statis non-linier pada Gambar 2.11. Kegagalan geser menjadi salah satu penyebab terjadinya kerusakan pada bangunan.



Gambar 2.10 Kurva kapasitas dan urutan kegagalan bangunan dalam arah-y (Castori dkk., 2017)



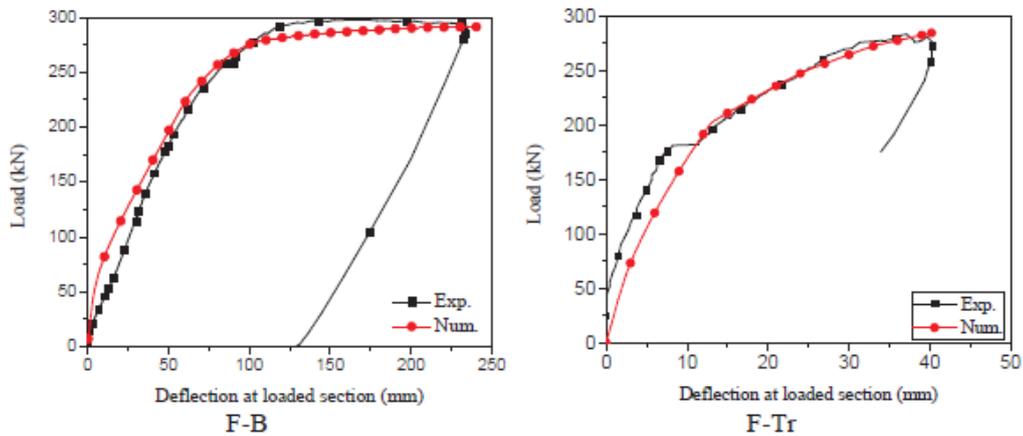
Gambar 2.11 Hasil analisis statis non-linier (a) pola retak di seluruh bangunan; (b) pola retak di panel dinding (Castori dkk., 2017)

Akcahy dkk. (2016) melakukan penelitian tentang retrofit seismik untuk struktur dinding bangunan bersejarah menggunakan pendekatan numerik dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan material dan kekuatan struktural untuk menahan efek dinamis seperti gempa bumi dengan menggunakan teknik konvensional dan modern untuk memulihkan bangunan bersejarah. Metode penelitiannya yaitu dengan tes laboratorium, analisis numerik, dan aplikasi restorasi. Tes laboratorium dan analisis *in-situ* dilakukan pada sampel yang diambil dari gedung. Analisis numerik dilakukan dengan memodelkan bangunan menggunakan bantuan *software* SAP2000. Aplikasi restorasi menggunakan hasil analisis laboratorium, *in-situ*, dan analisis yang sebelumnya telah disajikan. Hasil dari penelitian ini yaitu retakan struktural pada bangunan yang diperoleh dari analisis laboratorium dan analisis numerik juga metode yang digunakan untuk memperbaiki retakan pada bangunan.

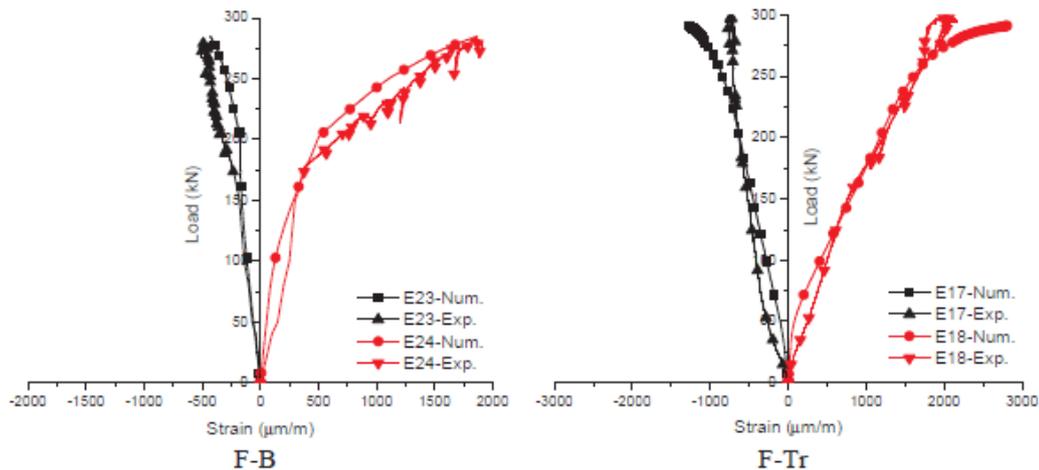
2.1.2 Penelitian Numerik tentang Dinding

Baghi dkk. (2018) melakukan penelitian tentang perilaku rangka beton bertulang dengan dinding pengisi bata akibat beban vertikal dengan tujuan untuk mengevaluasi perilaku eksperimental dari rangka beton bertulang tanpa dan dengan dinding pengisi bata. Metode penelitiannya yaitu program eksperimental yang terdiri dari satu rangka beton bertulang diberi beban vertikal sebagai kegagalan kolom dan diuji dalam tiga fase diantaranya rangka beton bertulang terisolasi, rangka beton bertulang dengan dinding pengisi bata, dan rangka beton bertulang tanpa dinding pengisi bata kemudian disimulasikan dengan bantuan *software* *OpenSees* untuk mempelajari perilaku rangka. Hasil dari penelitian ini yaitu kualitas mortar dan pengerjaan memiliki pengaruh kuat pada kekuatan geser pasangan bata tetapi tidak berpengaruh secara signifikan pada kekuatan tekan, dinding pengisi memiliki peran utama dalam menjaga sistem struktur dan mengurangi kemungkinan keruntuhan progresif, dinding pengisi dapat meningkatkan kekakuan dan daya dukung rangka beton bertulang dengan defleksi sekitar 220 % dibandingkan dengan rangka tanpa dinding pengisi, dinding pasangan bata dapat meningkatkan penyerapan energi dan kekuatan rangka dibandingkan tanpa dinding pengisi, dan rangka dengan dinding pengisi memiliki kekakuan yang lebih besar tetapi daktilitas yang rendah. Perbandingan hubungan

defleksi dengan beban antara eksperimental dan numerik dapat dilihat pada Gambar 2.12 dan perbandingan hubungan tegangan dengan beban antara eksperimental dan numerik dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.12 Perbandingan hubungan antara defleksi dan beban antara eksperimental dan numerik (Baghi dkk., 2018)



Gambar 2.13 Perbandingan hubungan antara tegangan dan beban antara eksperimental dan numerik (Baghi dkk., 2018)

Siano dkk. (2018) melakukan penelitian tentang investigasi numerik model rangka ekuivalen non-linier untuk dinding pengisi dengan tujuan mensimulasikan perilaku *in-plane* dinding tak bertulang biasa dan tidak teratur. Metode penelitiannya yaitu dengan membandingkan analisis EFM (*Equivalent Frame Method*) dan FEM (*Finite Element Model*). EFM terdiri dari dua pendekatan yang berbeda diantaranya menganggap model plastisitas menyebar untuk menggambarkan perilaku lentur dinding dan mensimulasikan perilaku geser, dan juga menganggap plastisitas terpusat. Dua pendekatan EFM tersebut kemudian

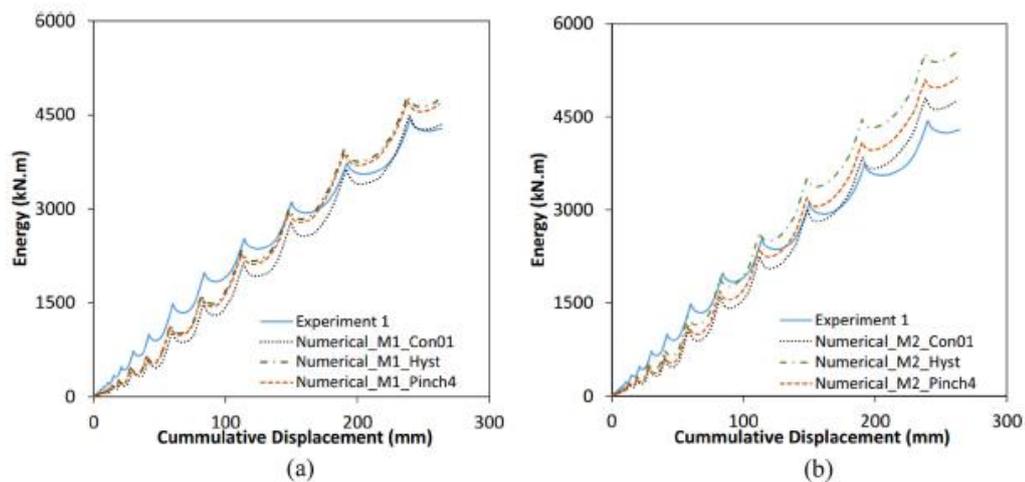
diimplementasikan dalam perangkat lunak Midas GEN. FEM memodelkan bata bata dan sendi mortir dimodelkan dengan finit 2D (*plane-stress*) yang berkesinambungan antar-elemen. Hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan yang luar biasa dari analisis EFM dan FEM dalam hal kapasitas geser dan mekanisme kerusakan.

Penava dkk. (2018) melakukan penelitian tentang kontribusi kolom beton bertulang dan dinding pasangan bata terhadap tahanan geser dari dinding pengisi rangka beton bertulang dengan bukaan jendela dan pintu dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh dari tipe, ukuran, dan posisi bukaan pada tahanan geser dan kapasitas deformasi komponen (rangka dan dinding pengisi) pada struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi. Metode penelitiannya yaitu analisis eksperimental yang dilakukan di laboratorium dengan benda uji rangka beton dengan dinding pengisi bata dan analisis numerik dengan bantuan *software* ATENA 2D Eng. Analisis numerik mendeskripsikan perilaku non-linier dari rangka beton dengan dinding pengisi bata yang diuji di laboratorium. Hasil dari penelitian ini yaitu ketahanan geser dari masing-masing komponen (dinding pasangan bata tanpa bukaan dan rangka beton bertulang) hampir sama dengan resistensi geser dari rangka beton bertulang kosong, ketahanan geser komponen dinding pengisi bata dipengaruhi oleh ukuran, lokasi, dan jenis pembukaan, dinding pasangan bata rangka beton bertulang dengan bukaan jendela yang ditempatkan secara sentris dan bukaan jendela yang ditempatkan secara eksentrik membawa lebih banyak tahanan geser, dan dinding pasangan bata rangka beton bertulang dengan bukaan jendela yang ditempatkan sentris memiliki kapasitas deformasi lebih tinggi.

Furtado dkk. (2018) melakukan penelitian tentang prediksi respon gempa pada struktur beton bertulang tiga lantai dengan tujuan untuk menganalisis kontribusi dinding pengisi bata dalam hal kekakuan dan kekuatan, bukaan dinding, dan *viscous damping*. Metode penelitiannya menggunakan bantuan *software* *OpenSees* dengan dua tipe pemodelan yaitu pemodelan struktur beton bertulang dan pemodelan dinding pengisi bata. Hasil dari penelitian ini yaitu kerusakan dan keruntuhan dinding terletak di lantai dasar atau mirip dengan struktur rangka kosong, kesalahan indeks menurun ketika nilai *viscous damping* lebih tinggi, dan

kekakuan awal dinding pengisi menurun yang menyebabkan kumulatif kesalahan indeks meningkat 1,3 kali.

Noh dkk. (2017) melakukan penelitian tentang pemodelan dinding pengisi beton bertulang akibat beban siklik: tinjauan seni dan pemodelan dengan *OpenSees* dengan tujuan untuk mengevaluasi parameter untuk menentukan monotonik dan respon hysteresis dinding pengisi bata khusus untuk respon siklik lateral *in-plane*. Metode penelitiannya yaitu analisis eksperimen dan analisis numerik menggunakan *software OpenSees*. Hasil dari penelitian ini yaitu model yang dipilih dapat mereproduksi respon rangka beton bertulang dengan dinding pengisi. Penerapan model yang paling sederhana yaitu bahan Concrete01 dapat digunakan untuk analisis amplop, sementara model yang lebih kompleks yaitu bahan Pinching04 digunakan untuk meningkatkan respon hysteresis. Hubungan perpindahan terhadap energi disipasi dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Hubungan antara perpindahan dan disipasi energi (a) model 1; (b) model 2 (Noh dkk., 2017)

Yuen dan Kuang (2015) melakukan penelitian tentang respon gempa nonlinier dan mekanisme transfer gaya lateral terhadap rangka beton bertulang dengan konfigurasi dinding yang berbeda dengan tujuan untuk menyelidiki respon gempa, kerentanan struktur rangka beton bertulang dengan konfigurasi dinding yang berbeda, dan perilaku gempa khususnya kegagalan mode, perilaku hysteresis, dan mekanisme transfer gaya yang bekerja dari struktur dua lantai. Metode penelitiannya yaitu menggunakan bantuan *software ABAQUS* dengan beberapa pemodelan diantaranya rangka kosong, rangka dengan dinding penuh, rangka

dengan dinding (ketinggian dinding 2/3-lantai), rangka kosong pada lantai pertama dan rangka dengan dinding penuh pada lantai kedua, rangka dengan dinding bukaan jendela, dan rangka dengan dinding bukaan pintu. Hasil dari penelitian ini menunjukkan selama keruntuhan *out-of-plane* pada dinding penuh, dinding dengan bukaan jendela, dan dinding dengan bukaan pintu dapat meningkatkan stabilitas dan disipasi energi struktur rangka. Kolom pendek yang terletak di tengah pada pemodelan rangka dengan dinding (ketinggian dinding 2/3-lantai) mengalami kerusakan lebih parah dibandingkan kolom pendek yang terletak di tepi, dikarenakan kolom pendek yang terletak di tengah tertahan dinding dikedua sisinya sehingga gaya gempa lateral yang diterima 1,7-2,6 kali lipat lebih tinggi.

2.2 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Peneliti Sekarang

Perbedaan penelitian yang dilakukan dengan penelitian terdahulu dapat dilihat perbedaan yang lebih jelas pada Tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian sekarang

No	Judul	Tahun	Jenis penelitian	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
1	Penilaian kerja bangunan dengan dinding tak bertulang: studi kasus bangunan bersejarah sekolah Khatib di Enzurum, Turki.	2018	Penelitian numerik	Identifikasi kerentanan seismik bangunan menggunakan data gempa wilayah bangunan tersebut.	Identifikasi kerentanan bangunan menggunakan data gempa dengan metode <i>time history</i> .
2	Penilaian kinerja seismik eksperimen bangunan asimetris.	2018	Penelitian numerik	Penilaian kinerja seismik bangunan perumahan dengan geometri yang berbeda	Perbandingan kekakuan bangunan perumahan dengan geometri yang berbeda.

Tabel 2.1 Perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian sekarang (Lanjutan)

No	Judul	Tahun	Jenis penelitian	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
3	Strategi inovatif pemodelan numerik untuk analisis struktural bangunan monumental bersejarah.	2017	Penelitian numerik	Analisis pola retakan dan kerentanan bangunan akibat gempa.	Analisis defleksi dan pola retakan dinding.
4	Penilaian kerentanan seismik bangunan monumental.	2017	Penelitian numerik	Analisis keruntuhan bangunan dan pola retak bangunan.	Analisis keruntuhan dinding dan pola retak dinding.
5	Retrofit seismik untuk struktur dinding bangunan bersejarah menggunakan pendekatan numerik.	2016	Penelitian numerik	Analisis ketahanan material dan kekuatan struktur untuk menahan efek dinamis seperti gempa bumi.	Analisis kekuatan struktur untuk menahan efek statis dan dinamis.
6	Perilaku rangka beton bertulang dengan dinding pengisi bata akibat beban vertikal.	2018	Penelitian numerik	Simulasi perilaku rangka.	Analisis perilaku bangunan dan dinding.
7	Investigasi numerik model rangka ekuivalen non-linier untuk dinding pengisi.	2018	Penelitian numerik	Analisis kapasitas geser dinding dan mekanisme kerusakan.	Analisis kerusakan dinding.

Tabel 2.1 Perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian sekarang (Lanjutan)

No	Judul	Tahun	Jenis penelitian	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
8	Kontribusi kolom beton bertulang dan dinding pasangan bata terhadap tahanan geser dari dinding pengisi rangka beton bertulang dengan bukaan jendela dan pintu.	2018	Penelitian numerik	Analisis pengaruh dari tipe, ukuran, dan posisi bukaan terhadap tahanan geser dan deformasi dinding.	Analisis pengaruh ukuran bukaan terhadap defleksi dinding.
9	Pemodelan dinding pengisi beton bertulang akibat beban siklik: tinjauan seni dan pemodelan dengan <i>OpenSees</i> .	2017	Penelitian numerik	Evaluasi respon hysteresis dinding pengisi bata.	Analisis defleksi dinding pengisi bata.
10	Respon gempa nonlinier dan mekanisme transfer gaya lateral terhadap rangka beton bertulang dengan konfigurasi dinding yang berbeda.	2015	Penelitian numerik	Analisis respon gempa, kerentanan struktur rangka beton bertulang dengan konfigurasi dinding yang berbeda.	Analisis kerentanan bangunan dan defleksi dari beberapa konfigurasi dinding.

Tabel 2.1 Perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian sekarang (Lanjutan)

No	Judul	Tahun	Jenis penelitian	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
11	Prediksi respon gempa pada struktur beton bertulang tiga lantai.	2018	Penelitian numerik	Analisis kontribusi dinding pengisi bata dalam hal kekakuan, dan <i>vixcous damping</i>	Analisis kekakuan bangunan dan kekuatan dinding dalam menahan beban.

Berdasarkan Tabel diatas dapat disimpulkan bahwa penelitian dengan judul “Studi Tingkat Kerentanan *Non-Engineered Building* Menggunakan Dinding Pasangan Bata Merah Setengah Batu” merupakan penelitian yang murni dan belum pernah ada yang meneliti sebelumnya.

2.3 Landasan Teori

2.3.1 Struktur Bangunan Sederhana

Bangunan rumah sederhana (*non-engineered building*) adalah bangunan rumah tinggal yang dibangun oleh pemilik dengan bantuan tukang menggunakan bahan bangunan yang diperoleh dari wilayah setempat, dan tanpa bantuan arsitek maupun ahli struktur. Pengerjaan bangunan yang hanya melibatkan tukang atau pekerja setempat yang kurang kompeten membuat kualitas pekerjaan yang dihasilkan rendah. Pengerjaan biasanya hanya didasarkan pada perkiraan atau pengalaman membangun sebelumnya.

Bangunan rumah sederhana (*non-engineered building*) yang terbuat dari pasangan bata merupakan bangunan dengan sistem pemikul gaya horizontal maupun gravitasi, hal ini ditinjau dari runtuhnya dinding-dinding saat gempa bumi sebagai pemikul beban.

Prayuda dan Cahyati (2016) menyatakan bahwa perencanaan bangunan rumah sederhana sebagai bangunan *non-engineered building* pada umumnya berdasarkan pada:

1. mempelajari kerusakan bangunan dari gempa masa lalu,
2. menggunakan *engineering judgment* yang terlatih, dan
3. menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak untuk *non-engineered building*.

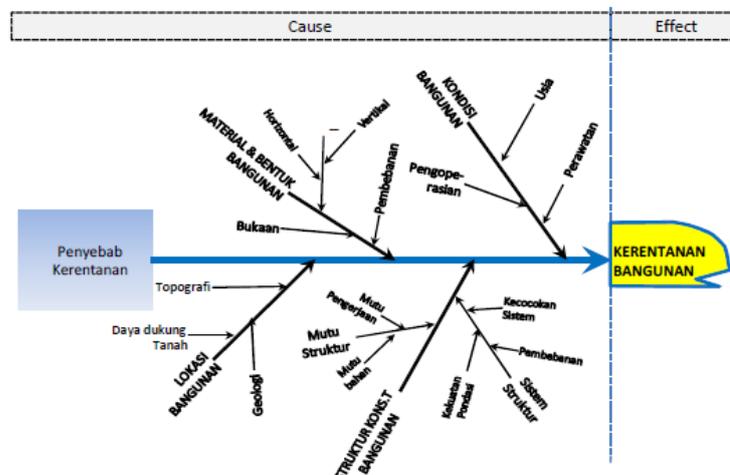
Pendetailan elemen struktur bangunan rumah sederhana seringkali jauh dari persyaratan atau pedoman yang ditentukan pada perencanaan. Beberapa kesalahan yang umum terjadi yaitu sebagai berikut ini.

1. Ukuran balok dan kolom yang digunakan tidak memadai.
2. Penggunaan tulangan polos untuk tulangan utama dan sengkang balok ataupun kolom.
3. Detail hubungan balok dan kolom praktis yang tidak memenuhi persyaratan daktilitas struktur dalam memikul beban arah lateral.
4. Tidak adanya pengangkuran antara dinding bata terhadap kolom.

Ketidaksesuaian tersebut merupakan faktor utama dari kegagalan struktur bangunan rumah sederhana (*non-engineered building*) saat terjadi beban lateral seperti gempa bumi.

2.3.2 Kerentanan Struktur

Zulfiar dkk. (2014) menyatakan bahwa kerentanan bangunan merupakan fungsi kinerja struktur bangunan dalam merespon gempa, yaitu semakin tinggi level kegempaan, maka semakin berat kinerja struktur untuk mengurangi dampak kerusakannya. Beberapa sebab kerentanan bangunan terhadap gempa dapat dilihat pada Gambar 2.15 yang dipetakan dengan *fishbone diagram* (diagram tulang ikan).



Gambar 2.15 Penyebab kerentanan bangunan (Zulfiar dkk., 2014)

Kategori penyebab utama kerentanan bangunan dapat dikelompokkan menjadi sebagai berikut ini.

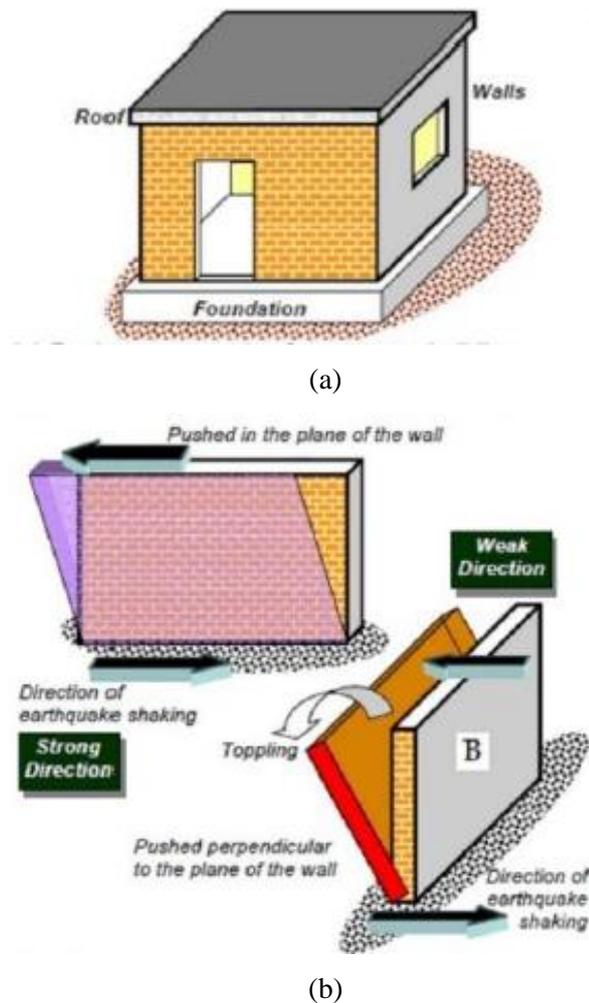
1. Lokasi bangunan.
 - a. Topografi, yaitu bangunan di atas lahan miring/ lereng menyebabkan perbedaan penurunan.
 - b. Geologi, yaitu bangunan berada di daerah patahan/ rawan pergerakan tanah yang menimbulkan keretakan dan penurunan tanah.
 - c. Daya dukung tanah, yaitu bangunan berada di atas jenis lapisan tanah yang daya dukungnya rendah (misalnya tanah mengalami likuifaksi).
2. Massa dan bentuk bangunan.
 - a. Pembebanan, yaitu penggunaan material terlalu berat, memperberat kinerja struktur.
 - b. Keteraturan vertikal dan horizontal, yaitu konfigurasi bangunan yang tidak beraturan dan tidak simetris menyebabkan torsi.
 - c. Bukaan, yaitu ukuran bukaan cenderung memperlemah struktur.
3. Struktur konstruksi bangunan.
 - a. Sistem struktur, yaitu kecocokan sistem struktur disesuaikan dengan tingkat kerawanan daerah setempat terhadap gempa yang meliputi struktur atas dan struktur bawah.
 - b. Prinsip struktur, yaitu taraf keamanan bangunan yang direncanakan terhadap gempa yang meliputi kekuatan dan kesatuan bangunan, distribusi kekakuan arah vertikal dan horizontal harus terdistribusi merata, juga daktilitas.
4. Kondisi bangunan.
 - a. Pemanfaatan , yaitu merubah peruntukan bangunan.
 - b. Perawatan, yaitu minimnya perawatan mempertahankan dan memulihkan kinerja bangunan.
 - c. Usia pakai bangunan, yaitu berkurangnya kinerja struktur bangunan.

2.3.3 Perilaku Dinding Akibat Gempa

Prayuda dan Cahyati (2016) menyatakan bahwa getaran tanah yang terjadi pada saat gempa bumi menyebabkan gaya inersia pada pusat masa struktur yang terdistribusi melalui atap, dinding, dan fondasi bangunan. Dinding merupakan

elemen yang paling mudah mengalami kerusakan saat terjadi gempa bumi. Distribusi pembebanan yang terjadi pada saat gempa bumi berlangsung ke segala arah sumbu kuat maupun sumbu lemah dinding. Pembebanan pada arah sumbu kuat dinding memberikan tahanan lateral yang lebih baik dibandingkan pembebanan pada arah sumbu lemah dinding.

Beban gempa yang terjadi pada arah sumbu kuat dinding dapat menyebabkan dinding mengalami perubahan geometri menjadi bentuk jajaran genjang. Perubahan geometri yang terjadi dapat menimbulkan rusaknya elemen yang ada di dalam bidang dinding seperti jendela juga dapat menyebabkan kerusakan atau keruntuhan dinding apabila defleksi akibat beban yang bekerja melebihi kapasitas dari dinding tersebut. Perilaku beban gempa pada pasangan dinding dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perilaku beban gempa pada pasangan dinding (a) komponen dasar dari pasangan bata; (b) arah gaya pada dinding saat terjadi gempa (Murty, 2003 dalam Prayuda dan Cahyati, 2016)

Kegagalan pada dinding dengan pasangan bata terjadi karena dinding tersebut menerima gaya yang melebihi kapasitas pengisi pengisi dinding pasangan bata. Kegagalan pada dinding pasangan bata yang berkaitan dengan arah gaya yang bekerja yaitu sebagai berikut ini.

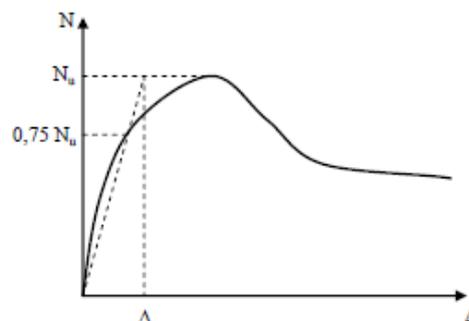
1. *Out-plane failure* diakibatkan oleh gaya yang bekerja tegak lurus bidang dinding, sehingga dinding akan mengalami kerusakan menyeluruh karena memiliki kemampuan sangat kecil untuk menahan gaya *out-plane*.
2. *In-plane failure* diakibatkan oleh gaya yang bekerja sejajar bidang dinding. Keruntuhan ini terjadi karena tingkat kekuatan gaya lateral yang relatif rendah, struktur portal dan dinding pengisi akan bekerja sebagai struktur komposit. Ketika deformasi lateral meningkat, struktur akan mengalami perilaku yang kompleks dimana struktur portal akan mengalami deformasi dalam *flexural mode* dan dinding pengisi akan mengalami deformasi *shear mode*. Akibat perilaku tersebut, akan terjadi perubahan pada *diagonal compression strut* dan pemisahan antara portal dan dinding pengisi pada ujung-ujung tarik.

2.3.4 Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan struktur untuk tidak mengalami keruntuhan secara tiba-tiba (getas) tetapi masih mampu mengalami deformasi yang cukup besar pada saat beban maksimum tercapai sebelum struktur tersebut mengalami keruntuhan. Daktilitas dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara defleksi saat kondisi ultimit dan defleksi saat luluh pertama seperti pada persamaan berikut ini.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \dots\dots\dots(2.1)$$

Nilai defleksi saat luluh pertama (Δ_y) dapat diperoleh dengan aturan $\frac{1}{2}$ seperti pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Penentuan nilai Δ_y (Sudjati, 2007)

2.3.5 Kekakuan

Kekakuan elastik didefinisikan sebagai kemiringan kurva beban-simpangan atau kurva *envelope* pada beban saat $0,4P_{peak}$. Kemiringan garis digunakan untuk menentukan dan mengetahui bagian elastis kurva. Hal ini juga digunakan untuk menemukan parameter seperti daktilitas, P_{yield} , dan Δ_{yield} . Kekakuan elastik didapat menggunakan persamaan berikut ini.

$$K_e = \frac{0,4P_{peak}}{\Delta_{0,4P_{peak}}} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan:

- K_e = kekakuan elastik (kN/mm),
- P_{peak} = beban pada saat $0,4P_{peak}$, dan
- $\Delta_{0,4P_{peak}}$ = simpangan pada saat beban $0,4P_{peak}$.

Besarnya kuat geser yang terjadi pada dinding merupakan besarnya beban ultimit terhadap satuan bentang panjang dinding yang dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$S_u = \frac{P_u}{b} \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan:

- S_u = kuat geser,
- P_u = beban geser ultimit, dan
- b = lebar dinding yang dikenai beban.

Beban pada saat kondisi leleh dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$P_{yield} = \Delta u - \sqrt{\Delta u^2 - \frac{2A}{K_e}} \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan:

- P_{yield} = beban pada kondisi leleh (kN),
- A = luas sesuai beban-simpangan yang diamati (kNmm), dan
- K_e = kekakuan elastik (kN/mm).

Simpangan leleh dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$\Delta_{yield} = \frac{P_{yield}}{K_e} \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan:

- Δ_{yield} = simpangan leleh (mm),
- K_e = kekakuan elastik (kN/mm), dan

P_{yield} = beban pada kondisi leleh (kN).

2.3.6 Percepatan Gempa

Setiap gempa yang terjadi akan menimbulkan satu nilai percepatan tanah pada suatu tempat. Nilai percepatan tanah yang biasa diperhitungkan pada perencanaan bangunan yaitu percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA). Semakin besar nilai percepatan tanah maka semakin besar pula risiko gempa bumi yang akan terjadi. Pengukuran percepatan tanah dilakukan secara empiris dengan pendekatan dari beberapa rumus yang diturunkan dari magnitude gempa atau data intensitas.

Massinai dkk. (2016) menyatakan bahwa percepatan tanah maksimum adalah nilai percepatan terbesar pada permukaan yang pernah terjadi di suatu wilayah dalam periode waktu tertentu akibat getaran gempa. Dampak dari gempa bumi yang dialami suatu lokasi dapat dipahami dengan menggunakan data PGA.

Persamaan empiris yang menghubungkan antara PGA dengan intensitas gempa bumi adalah sebagai berikut:

$$PGA = \exp\left(\frac{I-0,7}{2}\right) \dots\dots\dots(2.6)$$

dengan:

$$I = I_0 \exp^{-b\Delta},$$

$$\Delta = \text{jarak episenter},$$

$$b = 0,00051,$$

$$I_0 = \text{intensitas sumber gempa} \\ = 1,5 (M-0,5), \text{ dan}$$

$$I = \text{intensitas pada jarak episenter (stasiun pengamatan)}.$$

Parameter getaran gelombang gempa yang dicatat oleh seismograf adalah simpangan kecepatan dalam satuan kine (cm/dt), simpangan dalam satuan micrometer, dan percepatan dalam satuan gal atau cm/dt^2 . Parameter yang terpenting dalam seismologi teknik atau *earthquakes engineering* adalah nilai percepatan tanah. Nilai percepatan tanah dapat dihitung langsung oleh seismograf khusus atau disebut juga *strong motion seismograph* atau *accelerograf*, tetapi jaringan *accelerograf* tidak lengkap dalam segi periode waktu maupun tempatnya, maka perhitungan empiris sangat perlu dibuat.

Kapojos dkk. (2015) menyatakan untuk keperluan bangunan tahan gempa, harga percepatan tanah dapat dihitung dengan cara pendekatan dari data historis gempa bumi. Beberapa persamaan pendekatan tersebut yaitu sebagai berikut ini.

1. Rumusan Esteva

$$a = \frac{5600 \exp^{0,5M}}{(r+40)^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

dengan:

a = percepatan tanah pada tempat yang akan dicari,

M = magnitudo, dan

r = jarak hiposenter (km).

2. Rumusan Donovan

$$a = \frac{5600 \exp^{0,5M}}{(R+25)^{1,32}} \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan:

a = percepatan,

M = magnitudo, dan

R = jarak hiposenter (km).

$$R = \sqrt{\Delta^2 + h^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

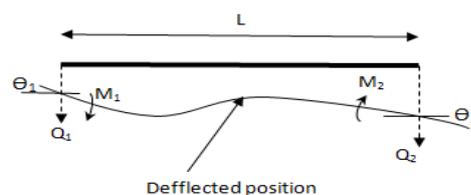
Δ = jarak episenter (km), dan

h = kedalaman sumber gempa (km).

2.3.7 Finite Element Method

2.3.7.1 Kekakuan

Sutresman dan Tjandinegara (2013) menyatakan bahwa balok atau *beam* adalah struktur atau elemen struktur yang menerima beban utama berupa gaya geser dan momen lentur, sehingga perpindahan utamanya adalah defleksi yang tegak lurus sumbu balok dan perpindahan sudut yang sebidang dengan momen lentur seperti pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Elemen balok dengan titik nodal (Sutresman dan Tjandinegara, 2013)

$$\text{Vektor perpindahan} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\text{Vektor gaya} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ M_1 \\ Q_2 \\ M_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.13)$$

Matriks kekakuan yang menghubungkan antara vektor perpindahan dan vektor gaya yaitu sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ M_1 \\ Q_2 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.14)$$

Menentukan besarnya $Q_1, M_1, Q_2,$ dan M_2 masing-masing dinyatakan dalam $v_1, \theta_1, v_2,$ dan $\theta_2,$ jika titik nodal 1 mengalami perpindahan v_1 dan θ_1 dan titik nodal 2 mengalami perpindahan v_2 dan $\theta_2.$

2.2.7.2 Percepatan Gempa

Gempa bumi memiliki 3 komponen percepatan yaitu $\ddot{X}_0, \ddot{Y}_0,$ dan \ddot{Z}_0 pada arah X, Y, dan Z. Gaya inersia pada nodal i didefinisikan pada matriks berikut.

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ -M_i(\ddot{u}_{xi} + \ddot{X}_0) \\ -M_i(\ddot{u}_{yi} + \ddot{Y}_0) \\ -M_i(\ddot{u}_{zi} + \ddot{Z}_0) \\ -I_i\ddot{\theta}_{xi} \\ -I_i\ddot{\theta}_{yi} \\ -I_i\ddot{\theta}_{zi} \\ \vdots \end{pmatrix} = -[M] \begin{pmatrix} \vdots \\ \ddot{u}_{xi} \\ \ddot{u}_{yi} \\ \ddot{\delta}_{zi} \\ \ddot{\theta}_{xi} \\ \ddot{\theta}_{yi} \\ \ddot{\theta}_{zi} \\ \vdots \end{pmatrix} - [M] \begin{pmatrix} \vdots \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{X}_0 \\ \ddot{Y}_0 \\ \ddot{Z}_0 \end{pmatrix}$$

$$= -[M] \begin{pmatrix} \vdots \\ \ddot{u}_{xi} \\ \ddot{u}_{yi} \\ \ddot{\delta}_{zi} \\ \ddot{\theta}_{xi} \\ \ddot{\theta}_{yi} \\ \ddot{\theta}_{zi} \\ \vdots \end{pmatrix} - [M][U] \begin{pmatrix} \ddot{X}_0 \\ \ddot{Y}_0 \\ \ddot{Z}_0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.16)$$

Contoh komponen matriks [U] dari struktur pada Gambar 2.19 sebagai berikut ini.

	\bar{X}_0	\bar{Y}_0	\bar{Z}_0
Node 6	0	0	1
Node 7	0	0	1
Node 8	0	0	1
Node 9	0	0	1
Node 10	1	0	0

Gambar 2.19 Komponen matriks [U] (Saito, 2017)