

Pemodelan elemen hingga dinding pasangan batu bata terkekang akibat beban statik lateral

Mahmud Kori Effendi^{1,*}, Bing Santosa¹, Prasetya Adi¹, Arusmalem Ginting¹

¹Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Finite element analysis
Confined masonry
Elastic modulus
Contact analysis
eurocode

Abstract

Earthquake-induced collapse of non-engineered masonry walls remains a primary cause of casualties. This study presents a three-dimensional finite element analysis (FEA) using MSC Marc/Mentat to evaluate the seismic behavior of a confined masonry wall subjected to lateral static loading. The masonry wall, reinforced concrete beams, and columns were modeled using solid elements, while the steel reinforcement was represented by truss elements under a macro-modeling approach. The constitutive stress-strain relationships were defined using the Mander model for concrete, a bi-linear model for reinforcing steel, and the Eurocode model for masonry. For plasticity modeling, the Linear Mohr-Coulomb criterion with isotropic hardening was adopted for concrete and masonry, whereas the Von Mises criterion with kinematic hardening was employed for reinforcing steel. Nonlinear contact analysis was incorporated to simulate the interaction between the masonry panel and the surrounding frame. The FEA utilizing Wisnumurti's elastic modulus (244 MPa) produced load-displacement curves and energy absorption capacities that closely matched experimental observations and demonstrated significantly better agreement than the FEMA 306 and MSJC models. The predicted deformed shape confirmed that the nonlinear contact formulation successfully captured physical separation along the wall-frame interface caused by bond deterioration. Equivalent total strain contours indicated that the masonry panel behaved predominantly as a rigid body undergoing a rocking mechanism, with peak strains reaching 0.0095 and concentrated at the wall corners. Consequently, the dominant damage pattern is expected to be characterized by corner crushing and interface degradation rather than diagonal shear cracking.

Corresponding Author:

Mahmud Kori Effendi
kori.effendi@janabadra.ac.id

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Gempa bumi tetap menjadi salah satu bencana alam paling destruktif secara global, di mana tingkat fatalitas yang tinggi umumnya dipicu oleh kegagalan struktural bangunan residensial yang belum memenuhi standar tahan gempa. Fenomena ini sangat relevan bagi wilayah dengan aktivitas tektonik aktif seperti Daerah Istimewa

Yogyakarta yang berada dalam jalur *Ring of Fire*. Kompleksitas seismik di kawasan ini terbukti secara empiris melalui serangkaian aktivitas tektonik masif, termasuk peristiwa gempa tektonik yang terus mengancam infrastruktur eksisting dan menuntut evaluasi kapasitas struktural yang lebih komprehensif.

Analisis kerentanan menunjukkan bahwa kegagalan bangunan di lapangan didominasi oleh runtuhnya struktur non-rekayasa (*non-engineered structures*) yang memanfaatkan dinding pasangan bata merah (Nurhidayatullah & Kurniati, 2021). Bangunan jenis ini sangat rentan akibat lemahnya sistem ikatan struktural antara panel dinding pengisi dan portal beton bertulang pengekangnya, sehingga memicu kegagalan parsial maupun total saat menerima deformasi lateral (Ayu dkk., 2019; Tanjung dkk., 2022).

Secara mekanika, interaksi antara rangka beton (kolom dan balok) dengan elemen dinding pengisi (*infill wall*) memegang peranan krusial dalam mendisipasi energi gempa. Keberadaan dinding bata tidak hanya menyumbang kekakuan lateral tambahan, melainkan juga memicu kompleksitas transfer tegangan terpusat yang rentan terhadap retak dan degradasi material yang cepat (Thakur & Senthil, 2024). Respons *in-plane* dari dinding geser pasangan bata ini telah banyak dievaluasi, salah satunya melalui perumusan matematis kapasitas geser (Seif ElDin dkk., 2019). Selain itu, perilaku dinding saat menerima kombinasi pembebanan *in-plane* dan *out-of-plane* akibat dorongan ortogonal gempa juga menjadi parameter kritis yang menentukan batas runtuh daktilitas struktur (Sarkar, 2021; Shady dkk., 2019). Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai perilaku mikro dan makro pada permukaan kontak (*interface*) antar-komponen menjadi kunci utama dalam memprediksi ketahanan seismik bangunan secara akurat.

Seiring pesatnya perkembangan komputasi, pendekatan numerik berbasis Analisis Elemen Hingga (FEA) semakin diandalkan untuk mensimulasikan kegagalan nonlinier material pasangan bata. Berbagai studi telah menerapkan teknik pemodelan mikro (*micro-modelling*) terperinci guna menangkap retak diskrit dan mekanisme *bond-slip* pada sambungan mortar (Calderón dkk., 2023; Koutras & Shing, 2021). Pemodelan bata juga dikembangkan melalui

kriteria kekuatan makroskopis (Milijaš dkk., 2023) serta model blok kaku dengan kontak elastis tanpa kuat tarik untuk memprediksi pergeseran struktur historis (Gagliardo dkk., 2021). Lebih lanjut, karakterisasi zona transisi interfacial di bawah tegangan biaksial (Zahra dkk., 2020) serta evaluasi sifat deformasi mekanis akibat variasi jenis mortar dan bata telah memperluas pemahaman teoritis mengenai perilaku konstitutif material ini (Darmayadi & Satyarno, 2019; Pantoja-Rosero dkk., 2024; Zahra dkk., 2021).

Meskipun literatur mengenai kekuatan tekan (f'_m) pasangan bata telah terdokumentasi dengan sangat masif, terdapat kekosongan riset (*research gap*) yang signifikan terkait pengaruh parameter modulus elastisitas (E) dalam pemodelan elemen hingga berbasis model makro (*macro-modeling*). Sebagian besar studi numerik terdahulu cenderung mengadopsi nilai modulus elastisitas secara mutlak dari formula empiris standar internasional, tanpa menguji sensitivitas dan validitasnya terhadap karakteristik lokal material non-engineered. Padahal, akurasi prediksi kekakuan awal, kapasitas daktilitas, mekanika kontak pemisahan elemen, hingga pola keruntuhan sudut sangat bergantung pada ketepatan input nilai E tersebut.

Hingga saat ini, evaluasi komparatif yang menguji keandalan formulasi modulus elastisitas lokal (seperti Model-Wisnumurti (Wisnumurti, 2013)) terhadap standar global seperti Model-FEMA 306 (FEMA 306, 1998) dan Model-MSJC (MSJC, 2005) dalam simulasi kontak nonlinier dinding pasangan bata masih belum diteliti. Untuk mengisi celah riset tersebut, penelitian ini bertujuan melakukan analisis elemen hingga dua dimensi pada sistem *confined masonry* menggunakan perangkat lunak MSC Marc/Mentat dengan fokus mendalam pada sensitivitas modulus elastisitas. Pemodelan makro diterapkan di mana struktur dinding, balok, dan kolom direpresentasikan dengan elemen solid, sedangkan tulangan baja dimodelkan menggunakan elemen *truss*.

Hubungan konstitutif tegangan-regangan material didefinisikan menggunakan model Mander (Mander dkk., 1988) untuk beton, model bi-linear untuk baja tulangan, dan model Eurocode (Eurocode 6, 2013) untuk pasangan bata. Model-model tersebut digunakan untuk merepresentasikan respons tegangan-regangan masing-masing material. Sementara itu, perilaku pasca-luluh (*plastic flow*) dimodelkan menggunakan kriteria plastisitas Linear Mohr-Coulomb dengan aturan pengerasan isotropik (*isotropic hardening*) untuk beton dan pasangan bata. Untuk baja tulangan, perilaku plastis dimodelkan menggunakan kriteria Von Mises dengan aturan pengerasan kinematik (*kinematic hardening*).

Interaksi nonlinear pada *interface* jepitan balok, kolom, dan dinding dihubungkan secara kontak analisis. Validasi keandalan model numerik dilakukan dengan membandingkan respons kurva beban-simpangan, disipasi energi, dan karakteristik deformasi terhadap data eksperimen dinding bata ukuran setengah dengan komposisi mortar tradisional (1 kapur : 4 pasir) bawah beban lateral statik yang telah diuji oleh Prayuda dan Cahyati (Prayuda & Cahyati, 2016).

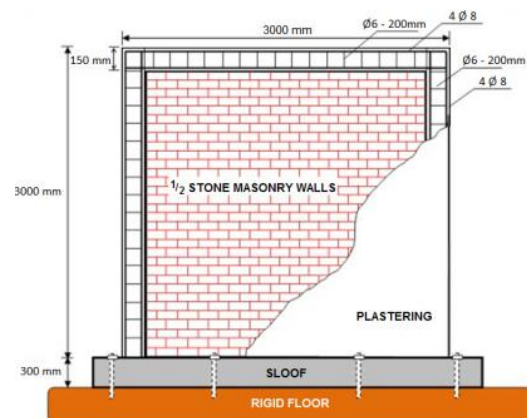
Dalam penelitian ini, perhatian khusus diberikan pada pengaruh modulus elastisitas pasangan bata sebagai parameter material yang paling berpengaruh terhadap kekakuan global struktur. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi terhadap tiga formulasi modulus elastisitas yang berasal dari penelitian Wisnumurti (Wisnumurti, 2013), rekomendasi FEMA 306 (FEMA 306, 1998) dan rekomendasi MSJC (MSJC, 2005), berturut-turut untuk mengidentifikasi formulasi yang paling mampu merepresentasikan perilaku pasangan bata lokal Indonesia. Perbandingan tersebut digunakan sebagai dasar untuk menilai sensitivitas hasil analisis elemen hingga terhadap variasi modulus elastisitas dan tingkat kesesuaiannya dengan hasil eksperimen. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat menghasilkan

model numerik yang tervalidasi secara eksperimental untuk memprediksi fenomena kontak, mekanisme *rocking*, dan degradasi mekanis dinding pengisi akibat beban lateral *in-plane* secara lebih akurat.

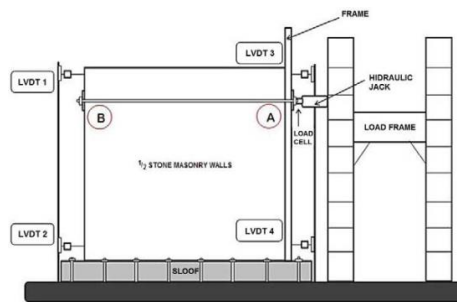
Metode Penelitian

Data pengujian di laboratorium

Data eksperimen yang menjadi dasar verifikasi dalam analisis elemen hingga diambil dari hasil penelitian (Prayuda & Cahyati, 2016). Pengujian dilakukan pada dinding pasangan bata setengah batu berukuran $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ yang dipasang di atas balok sloof atau fondasi. Dinding ini dikekang oleh balok dan kolom berpenampang $0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$, dengan kedua sisinya dilapisi plester setebal 2 cm. Plester tersebut menggunakan campuran mortar dengan perbandingan berat 1 bagian semen Portland : 4 bagian kapur : 10 bagian pasir. Detail konfigurasi benda uji dapat dilihat pada Gambar 1. Balok dan kolom pengaku diperkuat dengan tulangan lentur berdiameter 8 mm sebanyak empat buah dan tulangan geser berdiameter 6 mm dengan jarak antar tulangan 200 mm untuk memastikan kapasitas struktural yang memadai.



Gambar 1. Benda uji dinding batu bata (Prayuda dkk., 2017)



Gambar 2. Set up eksperimen dinding (Prayuda dkk., 2017)

Tabel 1 menyajikan sifat mekanis dari material yang membentuk dinding pasangan bata. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban lateral pada sampel dinding bata, di mana beban titik diterapkan pada bagian atas rangka dinding. Beban ini kemudian disalurkan melalui rangka agar distribusinya merata dari sisi samping. Pada frame pembebanan, kondisi tumpuan dimodelkan sebagai sendi yang memungkinkan rotasi. Seluruh proses pengujian laboratorium berlangsung di Laboratorium Struktur, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, dengan skema pengujian yang dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 1. Hasil Pengujian (Prayuda & Cahyati, 2016)

No	Item Pengujian	Hasil
1	Uji Tarik Baja $\phi 8$	
	f_y (MPa)	454,33
	f_u (MPa)	559,49
2	Uji Tarik Baja $\phi 6$	
	f_y (MPa)	393,8
	f_u (MPa)	560,61
3	Uji Batu Bata Merah	
	Dimensi	
	Panjang (mm)	202,93
	Lebar (mm)	103,43
	Tinggi (mm)	43,2
	Kuat Tekan, f_b (MPa)	2,63
	Kuat Geser (MPa)	0,189
	Berat Jenis (kg/m^3)	1474,98
4	Uji Mortar	
	Kuat Tekan, f_c (MPa)	1,57
	Kuat Tarik (MPa)	0,22
	Berat Jenis (kg/m^3)	1709,2
5	Uji Beton	
	Kuat Tekan (MPa)	15,6
	Berat Jenis (kg/m^3)	2181

Analisis elemen hingga

Dalam penelitian ini, pemodelan elemen hingga dilakukan dengan menggunakan software MSC Marc/Mentat 2012 (Öchsner & Öchsner, 2016). Tujuan pemodelan ini adalah untuk memverifikasi hasil eksperimen yang sebelumnya dilakukan oleh Prayuda (Prayuda dkk., 2017).

Beton yang digunakan sebagai bahan struktur pada balok dan kolom dalam penelitian ini dimodelkan menggunakan pendekatan plastisitas Mohr–Coulomb. Pendekatan ini umum dipakai untuk menggambarkan material yang bersifat getas namun masih dapat menahan tegangan sampai batas tertentu. Model tersebut memungkinkan simulasi perilaku nonlinier beton akibat kombinasi tegangan normal dan geser, sehingga memberikan representasi yang lebih akurat terhadap kondisi sebenarnya di lapangan. Untuk merepresentasikan pengerasan regangan (*strain hardening*), digunakan aturan *kinematic hardening* sesuai dengan penjelasan Öchsner & Öchsner (Öchsner & Öchsner, 2016), di mana kekuatan material meningkat secara seragam ke semua arah setelah melewati batas elastik.

Hubungan tegangan-regangan beton dimodelkan dengan model konstitutif Mander (Mander dkk., 1988), yang dikenal luas karena kemampuannya memodelkan perilaku beton yang terkonfinemen maupun tidak dengan tepat. Parameter material yang dipakai dalam pemodelan ini meliputi kuat tekan beton sebesar 15,6 MPa, berat jenis 2181 kg/m^3 , rasio Poisson (ν) 0,20, dan modulus elastisitas (E) 18569 MPa. Pemilihan parameter tersebut didasarkan pada hasil uji laboratorium dan kajian literatur untuk memberikan gambaran realistis terhadap respons struktur beton bertulang.

Tulangan longitudinal dan tulangan sengkang dimodelkan berdasarkan kriteria leleh Von Mises. Dalam pemodelan ini, tulangan diasumsikan memiliki modulus elastisitas sebesar 197725 MPa, serta rasio

Poisson sebesar 0,3, yang mencerminkan sifat elastis lateral terhadap deformasi aksial.

Formula empiris untuk menghitung tekan karakteristik pasangan bata, f'_m , berdasarkan kuat tekan bata (f_b) dan mortar (f_m) menggunakan persamaan:

$$f'_m = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (1)$$

Dimana untuk pasangan bata merah standar:

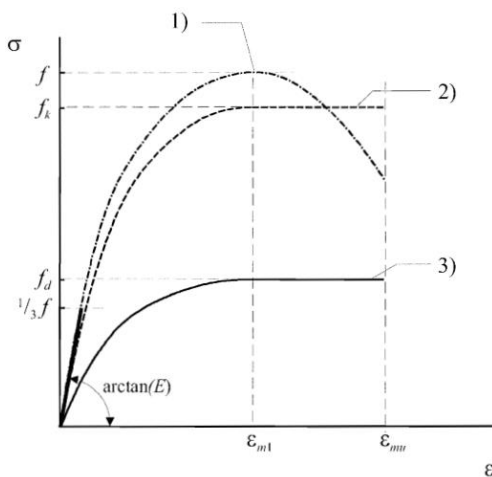
$$f'_m = 0,55(2,63^{0,7})(1,57^{0,3}) = 1,24 \text{ MPa} \quad (2)$$

Untuk menentukan nilai modulus elastisitas pasangan bata merah terdapat banyak rumus empiris yaitu:

$$E_m = 700 f'_m \text{ (MSJC, 2005)} \quad (3)$$

$$E_m = 500 f'_m \text{ (FEMA 306, 1998)} \quad (4)$$

$$E_m = 196,8 f'_m \text{ (Wisnumurti, 2013)} \quad (5)$$



Gambar 2. Diagram idealisasi dalam Eurocode 6 (EN 1996-1-1 Figure 3.2) (Eurocode 6, 2013)

Formulasi hubungan tegangan-regangan pada konstruksi pasangan dinding bata mengacu pada diagram idealisasi dalam Eurocode 6 (EN 1996-1-1 Figure 3.2) (Eurocode 6, 2013). Untuk kepentingan simulasi numerik, kurva pemodelan yang direkomendasikan adalah kurva parabola-persegi panjang (*parabolic-rectangular diagram*). Pemilihan model konstitutif ini didasarkan pada kemampuannya dalam merepresentasikan kapasitas karakteristik

material secara penuh tanpa melibatkan reduksi dari faktor keamanan bahan (*partial safety factors*). Prosedur matematis serta tahapan komputasi untuk merekonstruksi dan memplot kurva parabola-persegi panjang tersebut dijabarkan melalui langkah-langkah berikut:

Kurva parabola-persegi panjang ini dibagi menjadi dua wilayah berdasarkan nilai regangannya (ϵ):

Zona A: Bagian Parabola $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{m1}$

Pada rentang regangan dari nol hingga mencapai ϵ_{m1} , hubungan tegangan-regangan mengikuti persamaan parabola orde dua:

$$f = f_k \left[2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{m1}} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{m1}} \right)^2 \right] \text{ (Eurocode 6, 2013)} \quad (6)$$

Zona B: Bagian Datar $\epsilon_{m1} \leq \epsilon \leq \epsilon_{mu}$

Setelah melewati regangan puncak ϵ_{m1} , material dianggap mengalami fase plastik sempurna (*perfectly plastic*). Tegangan tidak naik lagi melainkan konstan pada nilai maksimumnya hingga mencapai keruntuhan di titik ϵ_{mu} :

$$f = f_k \text{ (Eurocode 6, 2013)} \quad (7)$$

dimana:

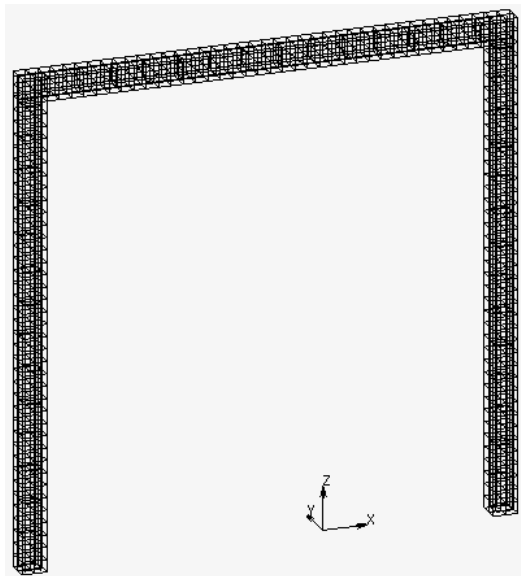
$$f_k = f'_m \quad (8)$$

Visualisasi kerangka beton beserta diskritisasi tulangan utama dan sengkang disajikan pada Gambar 3. Mengikuti metodologi yang dikembangkan oleh Effendi (Effendi, 2020), komponen besi tulangan tersebut dimodelkan sebagai elemen tertanam (*embedded*) di dalam struktur kolom dan balok. Adapun aspek pemodelannya menerapkan elemen 3D *truss* untuk merepresentasikan besi tulangan, sementara komponen pelat dan beton didefinisikan menggunakan elemen 3D *solid*.

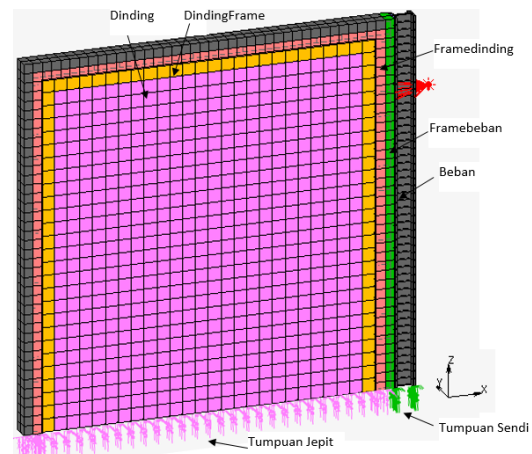
Tahapan pembuatan mesh (*meshing*) memegang peranan krusial dalam simulasi

numerik untuk menjamin ketepatan geometri sekaligus keandalan hasil analisis komputasional. Dalam studi ini, pembagian elemen (*meshing*) diaplikasikan pada beberapa bagian utama, meliputi kerangka beton, balok baja pembagi beban, serta panel dinding bata dengan ketebalan setengah batu (seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3 dan Gambar 4). Seluruh komponen tersebut didiskritisasi menggunakan tipe elemen 3D *solid*.

Dalam penentuan ukuran mesh, fokus penelitian ini diarahkan pada analisis pengaruh modulus elastisitas pasangan bata terhadap respons struktural secara global. Penentuan ukuran mesh didasarkan pada kompromi antara akurasi hasil simulasi dan efisiensi waktu komputasi, hingga dicapai konvergensi respons numerik yang stabil dan valid dalam mereproduksi data eksperimen. Studi konvergensi mesh berada di luar cakupan penelitian ini dan direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya.



Gambar 3. *Meshing* tulangan lentur, tulangan geser pada frame (balok dan kolom)



Gambar 4. Kondisi batas dan analisis kontak pada benda uji

Simulasi numerik yang diilustrasikan pada Gambar 6 menerapkan skema *load control* untuk mengaplikasikan beban total sebesar 90 kN, yang didistribusikan secara bertahap ke dalam 100 load steps. Untuk mengondisikan model, seluruh komponen struktural—termasuk portal beton bertulang dan panel dinding bata—dibatasi agar tidak mengalami translasi pada arah sumbu-*Y*. Terkait pemodelan tumpuan, komponen portal baja pendistribusi beban dikondisikan sebagai tumpuan sendi, sehingga kekakuan rotasi pada sumbu-*Y* dilepaskan. Sementara itu, kekakuan penuh diterapkan pada elemen balok, kolom, dan dinding pasangan bata melalui tumpuan jepit (*fixed*), yang mengunci seluruh derajat kebebasan translasi maupun rotasi pada sumbu *X*, *Y*, dan *Z*. Penentuan parameter kondisi batas ini krusial untuk menghasilkan respons kinematik yang representatif dan mendekati kondisi riil di lapangan.

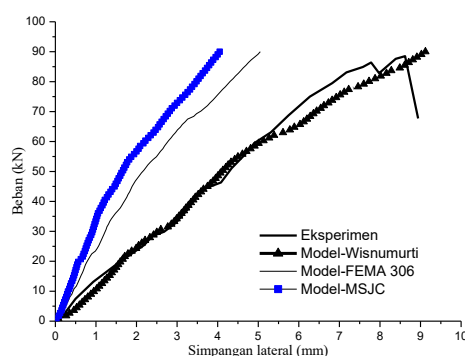
Selanjutnya, simulasi respons nonlinier akibat persinggungan antar-komponen diakomodasi melalui analisis kontak menggunakan software MSC Marc/Mentat. Pada pemodelan ini, panel dinding direpresentasikan melalui pendekatan makro (*macro-element approach*), di mana karakteristik material bata dan mortar diidealisasi sebagai satu kesatuan material homogen. Interaksi di dalam internal dinding (*Dinding*) itu sendiri

disimulasikan menggunakan fitur *self-contact*. Selain itu, hubungan mekanis antara panel dinding (DindingFrame) dan komponen portal beton (FrameDinding) dimodelkan sedemikian rupa agar transfer gaya dapat berjalan secara kinematik tanpa memicu timbulnya kekakuan artifisial pada sistem. Alur penyaluran gaya kemudian diteruskan dari elemen kolom baja (Beban) penekan menuju portal baja pendistribusi, yang terhubung langsung dengan balok beton melalui zona kontak (FrameBeban). Melalui algoritma kontak nonlinier pada MSC Marc/Mentat, fenomena delaminasi atau pemisahan (*separation*) antar-permukaan elemen dapat dihitung secara presisi saat struktur mengalami deformasi (Marc, 2012).

Hasil dan Pembahasan

Hubungan beban-simpangan

Tiga variasi modulus elastisitas digunakan dalam analisis elemen hingga ini, yang masing-masing diadopsi dari teori Wisnumurti (Wisnumurti, 2013), pedoman FEMA 306 (FEMA 306, 1998), dan standar MSJC (MSJC, 2005). Ketiga parameter tersebut selanjutnya didefinisikan secara berturut-turut sebagai Model-Wisnumurti, Model-FEMA 306, dan Model-MSJC.



Gambar 5. Kurva beban-simpangan pasangan dinding batu bata

Gambar 5 menunjukkan bahwa respons numerik sangat dipengaruhi oleh pemilihan nilai modulus elastisitas. Tren kurva FEA secara umum mampu mendekati hasil

pengujian fisik secara akurat apabila mengadopsi pendekatan Model-Wisnumurti dengan modulus elastisitas sebesar 244 MPa. Sebaliknya, pengujian menggunakan nilai input dari Model-FEMA 306 (620 MPa) dan Model-MSJC (868 MPa) menghasilkan estimasi beban-lendutan yang terlalu kaku. Fenomena ini mengindikasikan bahwa konstanta empiris dalam regulasi FEMA 306 dan MSJC kemungkinan besar mengasumsikan mutu bahan yang lebih tinggi atau kurang mengakomodasi reduksi kekakuan akibat keberadaan celah mikro awal pada mortar dan unit bata di lapangan.

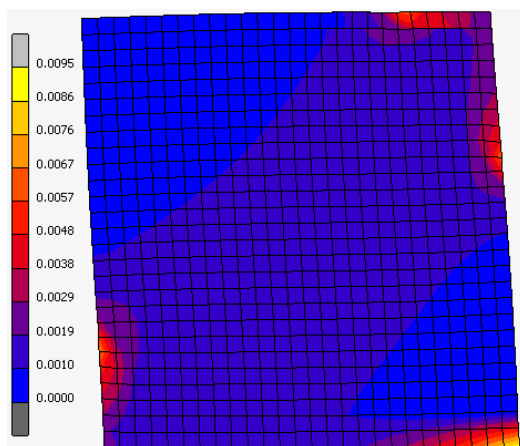
Meskipun Model-Wisnumurti menunjukkan tren yang selaras, terdapat perbedaan karakteristik yang kontras pada bentuk kurva dan perilaku pasca-puncak (*post-peak behavior*). Kurva eksperimen cenderung berfluktuasi akibat adanya perambatan retak lokal yang dinamis serta redistribusi tegangan pada siar mortar, sedangkan hasil FEA memperlihatkan kenaikan beban yang jauh lebih mulus. Untuk kapasitas beban maksimum, kedua metode sebenarnya menunjukkan konvergensi yang sangat baik, di mana Model-Wisnumurti dan eksperimen sama-sama mencapai kekuatan puncak mendekati 90 kN pada tingkat simpangan 9,21 mm. Namun, setelah melewati titik puncak tersebut, spesimen aktual mengalami penurunan kapasitas yang jauh lebih drastis dan rapuh dibandingkan model numerik. Disparitas ini dapat dikaitkan dengan adanya idealisasi konstitutif material serta pemodelan kontak antar-elemen pada simulasi komputer yang bersifat homogen dan terkontrol, yang mengabaikan faktor heterogenitas material, cacat bawaan, serta runtuhnya lekatan (*bond failure*) secara acak seperti yang terjadi pada kondisi fisik asli.

Evaluasi terhadap kapasitas disipasi energi, yang direpresentasikan oleh luas daerah di bawah kurva beban-simpangan pada Tabel 2, semakin memperkuat validitas dari model numerik yang diusulkan. Eksperimen menghasilkan nilai serapan energi sebesar 453,58 kNmm, yang berhasil ditiru dengan sangat baik oleh Model-Wisnumurti dengan

capaian sebesar 455 kNmm, atau hanya memiliki selisih sekitar 4%. Akurasi yang tinggi ini membuktikan bahwa pendekatan Wisnumurti tidak hanya andal dalam memprediksi beban puncak, tetapi juga sangat representatif dalam menggambarkan perilaku daktilitas struktur secara keseluruhan. Di pihak lain, Model-FEMA 306 dan Model-MSJC menghasilkan deviasi energi serapan yang sangat signifikan hingga mencapai kisaran 50% lebih kecil. Selisih yang masif ini menegaskan bahwa penggunaan parameter modulus elastisitas dari kedua standar internasional tersebut kurang relevan untuk diterapkan pada karakteristik dinding pasangan bata dalam studi ini, karena memicu penilaian yang tidak konservatif berupa estimasi kekakuan awal yang berlebihan namun mereduksi kapasitas simpanan lateral struktur.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Energi Serapan

Item Pengujian	Energi Serapan (kNmm)
Eksperimen	453,58
Model-Wisnumurti	455,79
Model-FEMA 306	259,96
Model-MSJC	212,47



Gambar 6. Distribusi regangan pada model elemen hingga

Distribusi regangan

Visualisasi kontur pada Gambar 6 menyajikan distribusi regangan total ekuivalen pada elemen dinding pasangan bata yang diperoleh dari hasil analisis

elemen hingga. Berdasarkan gradasi warna pada legenda, wilayah tengah dinding didominasi oleh spektrum biru tua yang mengindikasikan tingkat regangan yang relatif rendah, yaitu berada di bawah 0,0010. Sebaliknya, akumulasi regangan kritis yang ditandai dengan kontur berwarna merah, jingga, hingga kuning terkonsentrasi secara masif di area sudut-sudut dinding, dengan nilai puncak yang mendekati 0,0095 ($9,5 \times 10^{-3}$). Manifestasi regangan maksimum pada sudut-sudut struktur ini telah melampaui kapasitas regangan batas elastis material penyusunnya, di mana pasangan bata pada umumnya mulai mengalami retak awal saat menerima regangan tarik atau tekan sebesar 0,0003 hingga 0,001 (0,03%–0,1%). Kemunculan nilai regangan ekstrem ini membuktikan adanya deformasi inelastis yang sangat signifikan akibat beban lateral yang disalurkan melalui sistem rangka pembatas. Lokasi konsentrasi regangan yang berpusat di area pojok struktur memberikan indikasi mekanika keruntuhan yang spesifik. Pola ini merepresentasikan kecenderungan fenomena kegagalan tekan pada sudut atau corner crushing, yang dipicu oleh interaksi kontak yang sangat kuat antara dinding pasangan bata dengan struktur kolom atau balok di sekitarnya saat menerima gaya lateral. Meskipun komponen mortar dan unit bata secara individual memiliki kapasitas tarik yang terbatas, interaksi struktural global pada model ini memaksa terjadinya akumulasi tegangan geser dan tekan di area batas jepitan. Dengan demikian, hasil simulasi numerik ini memprediksi bahwa inisiasi kerusakan, degradasi material, hingga retak struktural yang masif tidak bermula dari pusat penampang, melainkan akan terkonsentrasi di sudut bawah dan atas dinding, kemudian secara progresif merambat sepanjang area perbatasan interface elemen tersebut.

Bentuk terdeformasi

Berdasarkan visualisasi karakteristik deformasi yang dikorelasikan dengan kurva beban-simpangan, bentuk terdeformasi (*deformed shape*) dari dinding pasangan

bata setelah menerima pembebanan lateral penuh menunjukkan respons inelastis yang spesifik. Fenomena deformasi ini secara detail diilustrasikan melalui Gambar 7 dan Gambar 8, yang merepresentasikan kondisi komponen dengan perbesaran skala (*scale factor*) sebesar 40 kali lipat agar pola interaksi mikro antar-elemen dapat teramati secara jelas. Melalui visualisasi model solid maupun tampilan kerangka (*wireframe*) tersebut, terlihat bahwa model elemen hingga berhasil mensimulasikan mekanisme kontak pada permukaan batas (*interface*) dengan sangat baik. Bukti keberhasilan ini ditunjukkan oleh adanya pemisahan fisik atau pembukaan celah (*gapping*) yang kontras antara panel dinding pasangan bata dengan rangka portal pembatas, terutama pada sepanjang sisi kiri dan sudut kiri atas struktur.

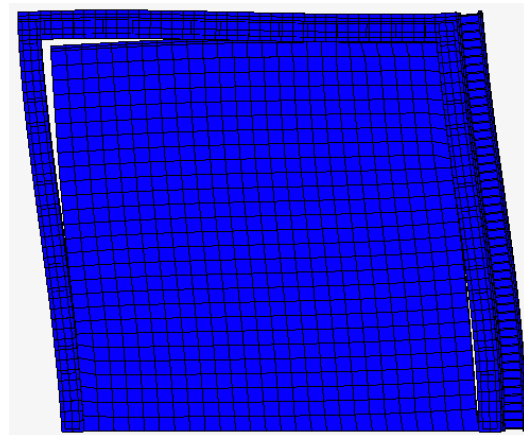
Pola pemisahan elemen ini mengindikasikan bahwa kerusakan utama tidak didominasi oleh bidang retak geser diagonal di tengah bentang panel, melainkan akibat kegagalan lekat (*bond failure*) pada siar kontak terluar. Ketika sistem portal mengalami simpangan lateral ke arah kanan, panel dinding pasangan bata cenderung berperilaku sebagai blok kaku yang mengalami mekanisme goyangan. Akibatnya, terjadi pelepasan ikatan di area atas dan kiri, yang secara simultan mentransfer konsentrasi tegangan tekan yang sangat tinggi menuju sudut kanan atas dan sudut kiri bawah struktur. Sinkronisasi respons antara tampilan solid dan wireframe pada Gambar 7 dan Gambar 8 mengonfirmasi bahwa pergeseran inelastis dan interaksi kontak nonlinier antar-elemen pembentuk benda uji telah terakomodasi secara realistis dalam pemodelan numerik ini, sehingga mampu memberikan gambaran representatif mengenai inisiasi degradasi kekuatan dan pola kegagalan batas pada kondisi eksperimental aktual.

Hasil eksperimen pada Gambar 9 menunjukkan terbentuknya retak diagonal pada badan dinding pasangan bata akibat interaksi kompleks antara unit bata dan mortar. Sementara itu, hasil simulasi

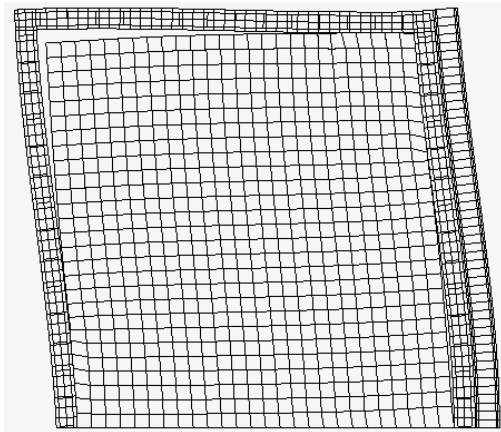
numerik menunjukkan konsentrasi regangan pada area sudut panel dan antarmuka antara dinding dan rangka beton bertulang yang mengindikasikan mekanisme *rocking* serta *separation* antarmuka.

Perbedaan pola kerusakan tersebut disebabkan oleh pendekatan *macro-modeling* yang digunakan dalam penelitian ini, di mana pasangan bata dan mortar direpresentasikan sebagai satu material homogen dengan sifat ekuivalen. Akibatnya, retak-retak lokal pada mortar dan propagasi retak antar unit bata yang diamati pada eksperimen tidak dapat dimodelkan secara eksplisit dalam simulasi numerik.

Meskipun demikian, model elemen hingga mampu mereproduksi respons global struktur dengan baik, yang ditunjukkan oleh kesesuaian kurva beban-simpangan, kapasitas penyerapan energi, serta kecenderungan mekanisme deformasi yang diamati pada pengujian eksperimental. Oleh karena itu, model numerik ini digunakan terutama untuk mengevaluasi perilaku global struktur, bukan untuk mereplikasi secara identik pola retak lokal yang terjadi pada spesimen uji.



Gambar 7. Bentuk 3D solid terdeformasi model benda uji (zoom 40X)



Gambar 8. Bentuk 3D wireframe terdeformasi model benda uji (zoom 40X)



Gambar 9. Bentuk kerusakan dinding batu bata eksperimen

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan analisis elemen hingga tiga dimensi (3D-FEA) menggunakan software MSC Marc/Mentat untuk mengevaluasi perilaku struktural dinding pasangan batu bata terkekang yang terdiri atas panel pasangan bata, kolom beton bertulang, dan balok pengikat. Strategi pemodelan numerik dilakukan menggunakan elemen solid tiga dimensi untuk beton dan pasangan bata, serta elemen truss tiga dimensi untuk merepresentasikan sistem tulangan.

Hubungan konstitutif tegangan-regangan material didefinisikan menggunakan model Mander untuk beton, model bi-linear untuk baja tulangan, dan model Eurocode untuk pasangan bata. Sementara itu, perilaku plastis dimodelkan menggunakan kriteria Linear Mohr-Coulomb dengan aturan pengerasan isotropik untuk beton dan

pasangan bata, serta kriteria luluh Von Mises dengan aturan pengerasan kinematik untuk baja tulangan.

Kalibrasi model numerik melalui penentuan parameter kuat tekan dan modulus elastisitas efektif pasangan bata menunjukkan bahwa penggunaan modulus elastisitas Wisnumurti sebesar 244 MPa menghasilkan kurva beban-simpangan dan kapasitas penyerapan energi yang paling mendekati hasil eksperimen dibandingkan model FEMA 306 dan MSJC. Hasil analisis kontak nonlinier juga berhasil merepresentasikan terjadinya pemisahan (*separation*) pada antarmuka antara panel pasangan bata dan rangka beton bertulang akibat degradasi ikatan.

Berdasarkan pola deformasi dan distribusi regangan total ekuivalen, panel pasangan bata menunjukkan perilaku yang didominasi oleh mekanisme rocking sebagai suatu blok kaku (*rigid body*). Konsentrasi regangan maksimum terjadi pada area sudut-sudut panel, terutama pada zona kontak antara panel pasangan bata dan rangka beton bertulang. Temuan ini mengindikasikan bahwa kerusakan dominan berupa penghancuran lokal pada sudut (*corner crushing*) yang disertai degradasi ikatan pada antarmuka dinding-rangka. Dengan demikian, mekanisme keruntuhan yang diprediksi lebih didominasi oleh rocking dan *separation* antarmuka dibandingkan oleh retak geser diagonal pada badan panel dinding.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa Teknik Sipil dan Fakultas Teknik, Universitas Janabadra, sebagai pemberi dana penelitian tahun 2025.

Daftar Pustaka

- Ayu, I., Budiwati, M., Bagus, I., Giri, D., Teknik, F., Udayana, U., & Bali, B. (2019). Analisis Numerik Perilaku Rangka Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(1), 9–18.
- Calderón, S., Sandoval, C., Araya-Letelier, G., & Aguilar, V. (2023). A detailed experimental mechanical characterization of multi-perforated clay brick masonry. *Journal of Building Engineering*, 63, 105505.

- Darmayadi, D., & Satyarno, I. (2019). Finite element modeling of masonry wall with mortar 1pc: 4 lime: 10 sand under lateral force. *MATEC Web of Conferences*, 258, 5019.
- Effendi, M. K. (2020). Non-Linear Finite Element Analysis of Flexural Reinforced Concrete Beam using Embedded Reinforcement Modeling. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 6(3), 271–284.
- Eurocode 6. (2013). *Eurocode 6: Design of Masonry Structures: Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures*. British Standards Institution.
- FEMA 306. (1998). *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings: Technical Resources*.
- Gagliardo, R., Portioli, F. P. A., Cascini, L., Landolfo, R., & Lourenço, P. B. (2021). A rigid block model with no-tension elastic contacts for displacement-based assessment of historic masonry structures subjected to settlements. *Engineering Structures*, 229, 111609. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111609>
- Koutras, A. A., & Shing, P. B. (2021). Finite-element modeling of the seismic response of reinforced masonry wall structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(4), 1125–1146.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804–1826.
- Marc, M. S. C. (2012). Volume A: Theory and user information. *MSC. Software Corporation*.
- Milijaš, A., Marinković, M., Butenweg, C., & Klinkel, S. (2023). Experimental results of reinforced concrete frames with masonry infills with and without openings under combined quasi-static in-plane and out-of-plane seismic loading. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(7), 3537–3579.
- MSJC. (2005). *Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05); Specification for Masonry Structures (ACI 530.1-05/ASCE 6-05/TMS 602-05); Commentary on Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05)*.
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniati, D. (2021). Potensi Kerusakan Bangunan Bertingkat Sedang Dengan Skenario Gempa 5 Sr Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Di Yogyakarta. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 125–139.
- Öchsner, A., & Öchsner, M. (2016). *The finite element analysis program MSC Marc/Mentat*. Springer.
- Pantoja-Rosero, B. G., Achanta, R., & Beyer, K. (2024). Automated image-based generation of finite element models for masonry buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(7), 3441–3469.
- Prayuda, H., & Cahyati, M. D. (2016). Gaya lateral in plane struktur dinding pasangan bata ½ batu melalui beban statik. *Conference: Seminar Nasional Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*.
- Prayuda, H., Zega, B. C., & Priyosulistyo, H. (2017). Prediction of allowable lateral ground acceleration (in-plane direction) of confined masonry walls using ambient vibration (microtremor) analysis. *Procedia Engineering*, 171, 1194–1203.
- Sarkar, N.-E.-K. (2021). An Explicit Finite-Element Modeling Method for Masonry Walls Using Continuum Shell Element. *Journal of Architectural Engineering*, 27(4), 4021040. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000518](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000518)
- Seif ElDin, H. M., Aly, N., & Galal, K. (2019). In-plane shear strength equation for fully grouted reinforced masonry shear walls. *Engineering Structures*, 190, 319–332. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.079>
- Shady, S., Mohamed, E., Wael, E.-D., & Michael, T. (2019). Out-of-Plane Behavior of Load-Bearing Reinforced Masonry Shear Walls. *Journal of Structural Engineering*, 145(11), 4019127. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002403](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002403)
- Tanjung, J., Mohamed Nazri, F., & Hayati, Y. (2022). A Simple Strengthening Method for Preventing Collapsed of Vulnerable Masonry Infills. *Buildings*, 12(10), 1496.
- Thakur, A., & Senthil, K. (2024). Seismic performance of confined masonry walls with different infill materials: A comparative study. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(2), 1587–1599.
- Wisnumurti. (2013). *Struktur Dinding Pasangan Bata Merah Lokal Dengan Perkuatan Bilah Bambu Di Daerah Rawan Gempa*. Doktor thesis, Universitas Brawijaya.
- Zahra, T., Jelvehpour, A., Thamboo, J. A., & Dhanasekar, M. (2020). Interfacial transition zone modelling for characterisation of masonry under biaxial stresses. *Construction and Building Materials*, 249, 118735. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118735>
- Zahra, T., Thamboo, J., & Asad, M. (2021). Compressive strength and deformation

characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types. *Journal of Building Engineering*, 38, 102213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102213>