

## ANALISIS STRUKTUR DINDING TERKEKANG MENGGUNAKAN ELEMEN *LAYERED SHELL* DAN ELEMEN *SOLID*

Ida Ayu Made Budiwati<sup>1</sup>, I G. A. Dibyacitta Wirasukma<sup>2\*</sup>, Gede Pringgana<sup>2</sup>, Made Sukrawa<sup>1</sup>,  
I Putu Dwi Adi Setyana<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

<sup>2</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

\*Corresponding authors: [dibyacittawirasukma@gmail.com](mailto:dibyacittawirasukma@gmail.com)

**Abstract:** Confined Masonry (CM) has been recommended for use in low-rise buildings. Implementing CM in multi-story buildings in Indonesia has yet to be found, and this may be due to no design guidelines. This paper describes a numerical study to develop and calibrate a numerical method suitable for nonlinear monotonic static analysis (pushover analysis) of CM. The research was began with validating 2D CM models using layered shell element (MSH) and solid element (MSD) in SAP2000. MSH was able to model the behavior of CM with  $E_m = 144 \cdot f'_m$  for masonry and a modification factor of 0.1 E for concrete. In contrast, MSD could simulate CM behavior by gradually reducing the cracked moment of inertia ( $I_{cr}$ ) and the concrete and masonry's elastic modulus (E). However, the solid elements analysis proved impractical for application in multi-story structures, making the layered shell element more suitable for the analysis of the 3D CM models. Significant stress concentrations were observed at the corners of the CM openings, indicating the necessity for reinforcement around these openings. The analysis results demonstrated that the reinforcement effectively mitigated the risk of failure due to openings.

**Keywords:** confined masonry, layered shell element, solid element, pushover analysis

**Abstrak:** Struktur dinding terkekang (SDK) dikenal sebagai salah satu sistem yang direkomendasikan untuk bangunan bertingkat rendah di daerah rawan gempa. Namun SDK jarang diimplementasikan pada bangunan bertingkat di Indonesia dikarenakan belum ada pedoman perencanaan yang secara eksplisit mengatur mengenai SDK. Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan dan mengkalibrasi metode numerik yang sesuai untuk analisis statik monotonik nonlinier (analisis pushover) SDK. Penelitian dimulai dengan memvalidasi model SDK 2D menggunakan elemen *layered shell* (MSH) dan elemen *solid* (MSD) pada *software* SAP2000. Hasil analisis numerik model MSH dan MSD dibandingkan dengan hasil eksperimental oleh peneliti lain. MSH dapat memodelkan perilaku SDK dengan menggunakan nilai modulus elastisitas pasangan bata  $E_m = 144 \cdot f'_m$  dan faktor modifikasi 0,1 E pada beton. Sedangkan MSD dapat memodelkan perilaku SDK dengan mereduksi  $I_{cr}$  dan E material beton dan pasangan bata secara bertahap. Namun analisis dengan metode elemen *solid* tidak cukup praktis jika diterapkan pada struktur bangunan bertingkat, sehingga pemodelan validasi SDK 3D selanjutnya dianalisis dengan elemen *layered shell*. Untuk mengurangi besarnya konsentrasi tegangan pada sudut bukaan dinding, digunakan kolom balok beton bertulang praktis sebagai perkuatan. Analisis menggunakan model perkuatan ini mampu meminimalkan kegagalan akibat bukaan.

**Kata kunci:** : struktur dinding terkekang, elemen *layered shell*, elemen *solid*, analisis *pushover*

## 1. PENDAHULUAN

Struktur dinding terkekang (SDK) adalah teknologi bangunan yang memanfaatkan dinding pasangan bata sebagai struktur utama untuk menahan beban vertikal dan lateral, sedangkan balok pengikat (*tie beams*) dan kolom pengikat (*tie columns*) beton bertulang berfungsi sebagai pengekang. Dalam praktiknya, dinding pasangan bata dibangun terlebih dahulu diikuti oleh kolom dan balok pengikat beton bertulang sehingga membentuk hubungan monolit dengan dinding bata. (Brzev, 2007a)

Di Indonesia, konsep SDK sudah banyak digunakan pada bangunan satu lantai, sedangkan di beberapa negara rawan gempa seperti Argentina, Chile, Mexico, Peru, India, dan Slovenia sudah banyak menerapkan SDK pada bangunan bertingkat. Perbedaan ini disebabkan oleh kurangnya literatur dan pedoman perencanaan yang secara eksplisit mengatur mengenai SDK sehingga praktisi teknik sipil Indonesia tidak menerapkan SDK pada bangunan bertingkat. Oleh karena itu, penelitian ini dibuat dengan tujuan untuk berkontribusi pada pemahaman konsep SDK serta untuk mempromosikan penggunaan SDK di Indonesia sebagai alternatif metode konstruksi bangunan bertingkat yang lebih murah.

Adanya bukaan pada dinding memberikan efek negatif terhadap kapasitas dinding ketika mengalami beban seismik. Konsentrasi tegangan diamati di sudut bukaan menyebabkan retak geser, yang membuat dinding tidak stabil dan menyebabkan kegagalan. Untuk dinding dengan ukuran bukaan hingga 10% dari luas dinding memiliki perilaku dalam bidang yang sama di bawah beban lateral sebagai dinding yang utuh. Di luar ukuran ini, kekuatan dan kekakuan berkurang drastis. Kekurangan akibat bukaan dapat diatasi dengan elemen pengekang di sekitar bukaan. Elemen pengekang mencegah retakan geser di sudut bukaan dan menjaga stabilitas dinding (Borah et al., 2021).

Ghaisas et al. (2017) telah melakukan pemodelan SDK menggunakan metode *Strut-and-Tie Model* (STM) pada program SAP2000, tetapi lebar *strut* tidak disampaikan atau masih bersifat non-dimensional. Suarjana et al. (2012) memodel SDK menggunakan kombinasi antara elemen *shell* dan *strut*. Pada kondisi dinding sebelum retak dimodelkan dengan elemen *shell*

dan penggunaan *strut* untuk memodelkan panel dinding yang benar-benar retak atau sudah bersifat nonlinier. El-Diasity et al. (2023) memodel SDK pada *software* ANSYS menggunakan elemen *solid* dan menunjukkan hasil yang sesuai dengan uji laboratorium.

Pada penelitian ini, dilakukan validasi model pada panel dinding 2D menggunakan elemen *layered shell* dan elemen *solid* pada *software* SAP2000. Respon dari kedua model kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian Suarjana et al. (2012).

Budiwati et al. (2022) melakukan analisis SDK berdasarkan data eksperimen Suarjana et al. (2012) menggunakan pemodelan elemen hingga pada SDK menggunakan elemen *layered shell* pada SAP2000. Hasil analisis menunjukkan bahwa model dengan elemen *layered shell* pada SAP2000 sudah cukup sesuai namun sedikit lebih kaku dibanding hasil uji.

Penelitian Hani et al. (2025) mengkaji hubungan antara kuat tekan bata satuan dan dinding pasangan bata melalui studi eksperimental menggunakan material lokal. Hasilnya menunjukkan adanya variasi kualitas bata yang signifikan dengan kuat tekan rata-rata 134,70 kg/cm<sup>2</sup>, serta bahwa perilaku keruntuhan dinding dipengaruhi oleh interaksi antara bata dan spesi, yang ditandai oleh retak vertikal dan sepanjang sambungan spesi.

Bhara & Duran (2023) melakukan studi eksperimen untuk mengetahui perubahan kekakuan dan deformasi lateral pada struktur dinding pasangan bata dengan mortar campuran kapur, bubukan bata dan pasir akibat beban statik lateral. Dari hasil pengujian diperoleh beban maksimal dan deformasi maksimal yang mampu diterima oleh dinding serta perubahan kekakuan yang terjadi akibat pembebanan statik lateral yang berulang-ulang sehingga akhirnya dinding dinyatakan mengalami kegagalan lateral.

Penelitian Yildizlar (2021) mengkaji kinerja seismik bangunan bersejarah berbahan pasangan bata melalui berbagai pendekatan analisis, seperti analisis linier, nonlinier, dan kinematik berbasis metode elemen hingga. Hasilnya menunjukkan bahwa

struktur tidak memenuhi target kinerja seismik dan mengalami mekanisme keruntuhan lentur vertikal maupun lateral, sehingga diperlukan upaya rehabilitasi untuk meningkatkan kekuatan dan kinerjanya.

Penelitian Ahmed et al. (2019) mengevaluasi kinerja seismik struktur pasangan bata menggunakan pendekatan pemodelan makro-elemen dan analisis pushover berbasis kinerja. Hasilnya menunjukkan bahwa model numerik mampu merepresentasikan respons struktur secara akurat, serta bahwa penggunaan dinding terkekang meningkatkan kapasitas daktilitas dan ketahanan terhadap beban lateral dibandingkan pasangan bata tanpa perkuatan. Selain itu, struktur pasangan bata juga memiliki potensi pengurangan biaya konstruksi yang signifikan dibandingkan struktur beton bertulang.

Model yang dapat menyesuaikan hasil pengujian dan metode pemodelannya lebih praktis akan dipilih untuk memudahkan proses analisis bangunan SDK bertingkat dan untuk mempertimbangkan bahwa SDK dapat memenuhi persyaratan kekakuan dan kekuatan struktur di bawah beban seismik. Validasi model juga akan dilakukan pada SDK 3D yang mengacu pada eksperimen yang dilakukan El-Diasity et al. (2023) yang merupakan prototipe bangunan 2 lantai. Setelah model validasi mampu menirukan perilaku spesimen uji penelitian dilanjutkan dengan menambahkan elemen pengekang di sekitar bukaan.

## 2. METODE PENELITIAN

Sebagai kontrol kekuatan dinding dan untuk memperkirakan kecukupan ketebalan dinding, tegangan tekan, tarik, dan geser pada dinding diperiksa. Di Indonesia, tidak ada peraturan mengenai tegangan tarik dan tegangan geser yang diijinkan untuk pasangan bata, sehingga penelitian ini menggunakan standar bangunan negara lain sebagai referensi. Pada MSJC (2002), tegangan tarik pasangan bata untuk unit padat tidak boleh melebihi 0,414 MPa, dan tegangan geser ( $v$ ) pasangan bata tidak boleh melebihi 0,827 MPa dan:

$$v < 1,5\sqrt{f'm} \quad (1)$$

$$v < v + 0,45 Nv/Av \quad (2)$$

dengan  $f'm$  = kuat tekan pasangan bata,  $v=0,414$  MPa (tegangan geser pasangan dinding biasa (zigzag) tergrouting),  $Nv$  = gaya tekan yang

bekerja normal terhadap permukaan geser,  $Av$  = luas penampang geser.

Selain tegangan, *drift ratio* juga diperiksa dengan menggunakan peraturan negara lain sebagai acuan. Berdasarkan peraturan Chile pada *National Information Center of Earthquake Engineering* (Brzev, 2007b), nilai *drift ratio* bangunan dengan konsep SDK harus kurang dari atau sama dengan 0,002 (0,2%).

## Prosedur pemodelan

Elemen *shell* digunakan dalam pemodelan objek berbentuk bidang (*area*). Elemen *shell* yang digunakan pada penelitian ini adalah elemen *layered shell* dimana elemen *shell* dapat berperilaku nonlinier untuk seluruh elemen struktur. Dinding, kolom pengikat, balok, dan pelat dimodel dengan elemen *layered shell* kemudian di-*divide* beberapa kali untuk menentukan jumlah *mesh* yang dapat digunakan untuk memodel dengan tujuan mendapatkan ukuran *mesh* optimal yang diperlukan.

Untuk memvalidasi teknik pemodelan, pemodelan juga dilakukan dengan elemen *solid*. Elemen kolom, balok dan dinding dimodel dengan menggunakan elemen *solid*. Setelah *solid section* terbentuk dilakukan proses *dividing solid* dengan memperhatikan besarnya *divide* yang harus bertemu antar *node*. Untuk elemen tulangan dimodel dengan *frame section* dan di-*divide* sesuai dengan ukuran elemen *solid* pada kolom dan balok.

## Kuat tekan dinding

Kuat tekan dinding pasangan bata  $f'm$  merupakan gabungan kuat tekan unit bata dan kuat tekan mortar. Persamaan untuk menghitung kuat tekan dinding pasangan bata menurut Eurocode 6 (2005).

$$f'm = K \cdot f_m^{0.65} \cdot f_{cm}^{0.25} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

dengan  $f'm$  = kuat tekan pasangan bata;  $K$  = konstanta (tergantung unit bata dan mortar, (Tabel 3.3 Eurocode 6 *part 1*), dimana untuk dinding pasangan setengah bata diambil 0,6 MPa, kuat tekan mortar tidak boleh diambil lebih dari 20 MPa dan tidak lebih besar dari dua kali kuat tekan unit bata;  $f_m$  = kuat tekan rata-rata bata yang dinormalisasi;  $f_{cm}$  = kuat tekan mortar.

**Modulus elastisitas beton**

Pada ACI committee 318 (2011), modulus elastisitas beton normal diberikan dalam persamaan berikut:

$$E_c = w_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c} \tag{4}$$

dengan  $E_c$  = modulus elastisitas beton (MPa),  $f'_c$  = kuat tekan beton (MPa),  $w_c$  = berat volume beton ( $kg/m^3$ ).

Pada penelitian ini nilai  $E_c$  akan di reduksi sebesar 0,1E seperti yang dilakukan dalam penelitian Ricci et al. (2013) dan Palermo et al. (2014) yang menganalisis bangunan 3 lantai menggunakan elemen *layered shell* pada SAP2000.

**Modulus elastisitas dinding**

Modulus elastisitas pasangan bata dapat diketahui dengan pendekatan dari kekuatan tekannya dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_m = k \cdot f'_m \tag{5}$$

dengan  $f'_m$  = kuat tekan pasangan bata,  $k$  = konstanta yang ditentukan dari pengujian laboratorium. Beberapa persamaan modulus elastisitas dari beberapa pustaka ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Persamaan Modulus Elastisitas dari beberapa pustaka

Pustaka/Code	Modulus Elastisitas
Eurocode (2001)	$E_m = 1000 \cdot f'_m$
Paulay & Priestly (1992)	$E_m = 750 \cdot f'_m$
ACI 530 (2005)	$E_m = 700 \cdot f'_m$
FEMA 356 (2000)	$E_m = 550 \cdot f'_m$
Kaushik et al. (2006)	$E_m = (250 \text{ s. d } 1100) \cdot f'_m$
Rita Rahayu et al. (2016)	$E_m = (144 \text{ s. d } 240) \cdot f'_m$
Wisnumurtini (2013)	$E_m = 144 \cdot f'_m$
Constigan et al. (2015)	$E_m = (85 \text{ s. d } 230) \cdot f'_m$

**Momen inersia penampang eetak (Icr)**

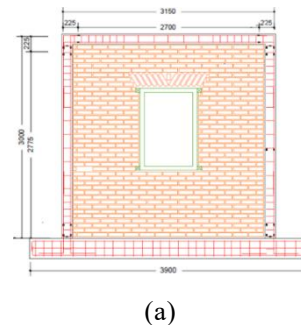
Pada saat terjadi gempa elemen-elemen pada struktur bisa mengalami retak, sehingga besar inersia penampang elemen tersebut akan tereduksi dibanding penampang utuh. SNI 2847-2019 (2019) mensyaratkan  $I_{cr}$  maksimum untuk balok adalah 0,35 dari momen inersia gross ( $I_g$ ) balok, sedangkan untuk kolom  $I_{cr}$ nya adalah 0,7 dari momen  $I_g$  kolom.

**Pembebanan**

Pengujian yang dilakukan oleh Suarjana et al. (2012) hanya difokuskan pada kinerja beban lateral SDK, sehingga pada validasi model 2D beban lateral diaplikasikan pada struktur dengan simpangan terbesar yang diterapkan adalah 3,5% atau setara dengan 105 mm sesuai dengan data uji tanpa mempertimbangkan beban vertikal. Sedangkan pengujian yang dilakukan El-Diasity et al. (2023) skema pembebanannya meliputi berat sendiri struktur dan beban siklik lateral.

**Model validasi 2D**

Validasi teknik pemodelan awal dilakukan pada panel dinding 2D menggunakan dua metode berbeda yakni dengan elemen *layered shell* (MSH) dan elemen *solid* (MSD) pada SAP2000 yang mengacu pada hasil uji laboratorium (Suarjana et al. (2012). Pada MSH dilakukan analisis *pushover* statik nonlinier. Sedangkan pada MSD besarnya momen inersia, penampang retak, beban, modulus elastisitas beton dan dinding akan divariasikan agar hasil analisis menyerupai hasil uji laboratorium. Dimensi dan pola retak model validasi 2D dapat dilihat pada Gambar 1 (a) dan (b).



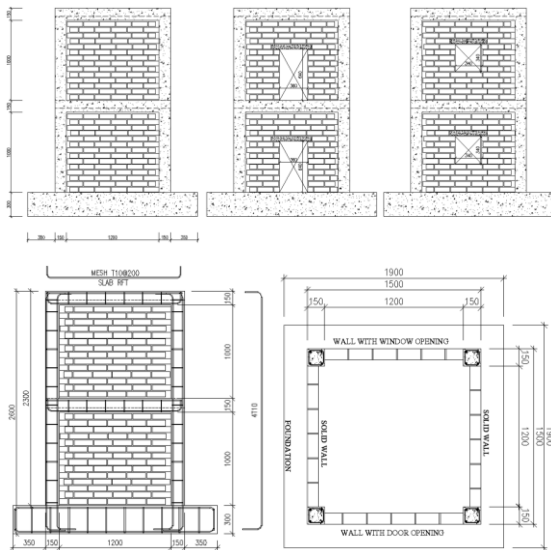


(b)

**Gambar 1.** (a) Dimensi (satuan mm) dan (b) Pola Retak Model Validasi 2D (Suarjana et al. (2012))

**Model validasi 3D**

Pemodelan dilanjutkan dengan validasi model 3D (M-3D) yang mengacu pada hasil uji laboratorium El-Diasity et al. (2023) yakni prototipe SDK 2 lantai, Gambar 2.



(a)



(b)

**Gambar 2.** (a) Dimensi (satuan mm) dan (b) Pola Retak Model Validasi 3D (El-Diasity et al., 2023)

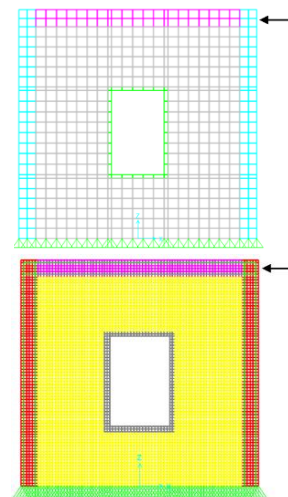
**Model dengan perkuatan**

Untuk menyelidiki efek perkuatan di sekitar lubang, model tambahan dengan perkuatan disekitar lubang dibuat berdasarkan model uji SDK berlubang (M2D-CWO dan M3D-CWO). Balok dan kolom perkuatan beton bertulang ( $f'_c = 15,32$  MPa) berukuran 100x100 mm dipasang menerus mengelilingi sisi-sisi bukaan.

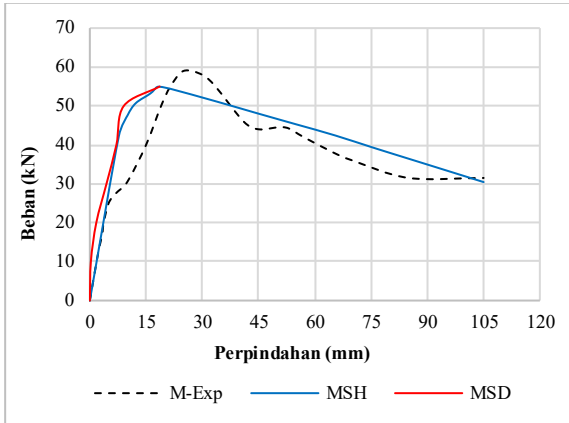
**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Model validasi SDK 2D**

Hasil validasi model 2D ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Gambar 2 menunjukkan dimensi dan sifat material MSH dan MSD sama dengan data uji Suarjana et al. (2012). Untuk menghasilkan perilaku yang bersesuaian antara model dan uji laboratorium, MSH dimodel menggunakan nilai  $E_m = 144 \cdot f'_m$  (335,376 MPa) dan faktor modifikasi 0,1E pada beton (1839,6 MPa). Sedangkan pada MSD, nilai  $E_c$ ,  $E_m$ , dan  $I_{cr}$  pada dinding, kolom dan balok divariasikan sesuai dengan besarnya beban.  $E_c$  divariasikan dari 18396 MPa sampai 6900 MPa, dan  $E_m$  divariasikan dari 1281 MPa sampai 550 MPa. Nilai  $I_{cr}$  yang berkisar antara 0,8-0,1 dari momen inersia penampang setelah retak, seperti yang tercatat selama pengujian.

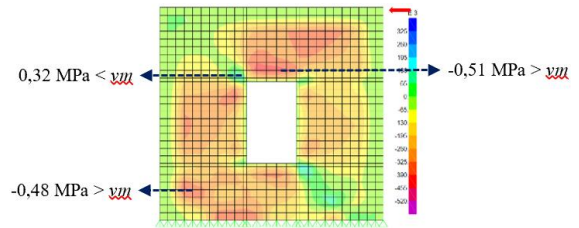
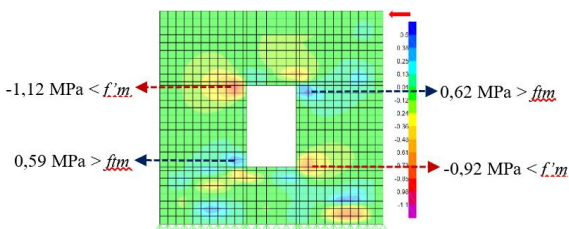


**Gambar 3.** Model Validasi 2D: MSH (kiri), MSD (kanan)



**Gambar 4.** Kurva beban-perpindahan model Validasi 2D dan hasil eksperimen

Hasil analisis berupa kurva beban-perpindahan MSH dan MSD yang diplot bersama dengan hasil uji eksperimental ditunjukkan pada Gambar 4. Model MSH dan MSD menunjukkan tren yang sama, menunjukkan hubungan linier antara beban vs perpindahan sampai beban maksimum 55 kN, namun MSH dilanjutkan dengan tren menurunnya beban diikuti dengan meningkatnya perpindahan. Beban maksimum hasil uji laboratorium sebesar 60 kN lebih besar dibandingkan MSH dan MSD namun dengan perpindahan yang lebih besar yaitu 25 mm. Terlihat bahwa kurva bagian linier beban dan perpindahan MSH dan MSD lebih tegak (kaku) dibandingkan hasil uji laboratorium. Kurva beban perpindahan bagian linier (beban maksimum 25 kN) Model MSH mirip dengan kurva uji laboratorium, lebih baik daripada MSD. Analisis dengan metode elemen *solid* tidak cukup praktis dan terlalu rumit jika diterapkan pada bangunan kompleks, karena perlu modifikasi  $E_c$ ,  $E_m$ , dan  $I_{cr}$  setiap tahapan beban, sehingga model dengan elemen *layered shell* merupakan pendekatan yang lebih baik untuk memodelkan bangunan SDK bertingkat. MSH selanjutnya akan disebut M-2D.

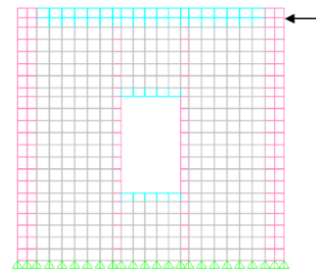


**Gambar 5.** Kontur Tegangan Dinding M-2D (Tekan, Tarik, dan Geser)

Konsentrasi tegangan yang cukup besar terjadi pada sudut-sudut bukaan, Gambar 5. Tegangan tekan belum melewati tegangan ijin 2,329 MPa (kuat tekan), namun tegangan tarik dan tegangan geser yang terjadi lebih besar dari tegangan ijin yaitu 0,414 MPa (kuat tarik), dan 0,417 MPa (kuat geser) sehingga dinding mengalami retak. Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan di sekitar lubang diperlukan untuk meminimalisir kegagalan akibat bukaan. Perkuatan ini juga mendukung pedoman EERI (2011) bahwa SDK berlubang tanpa perkuatan tidak boleh diperhitungkan dalam perhitungan indeks kerapatan dinding, *wall density index*, WDI.

**Model SDK 2D dengan perkuatan**

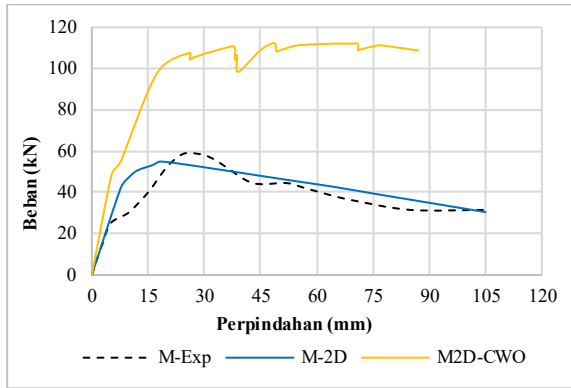
Hasil analisis model SDK 2D dengan perkuatan (M2D-CWO) ditunjukkan pada Gambar 6 sampai Gambar 8.



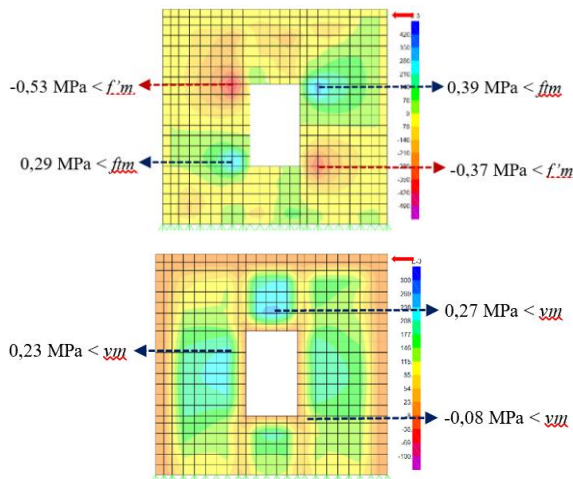
**Gambar 6.** Model SDK 2D dengan Perkuatan (M2D-CWO)

Kurva beban-perpindahan lateral pada Gambar 7 menunjukkan bahwa perkuatan disekitar bukaan pada M2D-CWO meningkatkan kekakuan dan daya dukung beban maksimum hingga 2 kali lebih besar dari M-2D. Kontur tegangan pada Gambar 8 juga menunjukkan bahwa tegangan tekan, tegangan tarik, dan tegangan geser dinding mengalami penurunan dan tidak melewati tegangan ijin dinding. Dinding terhindar dari konsentrasi tegangan yang besar pada sudut-sudut bukaan yang kini ditahan oleh elemen

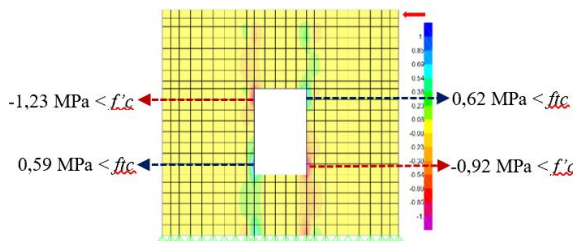
pengekaang beton bertulang seperti yang terlihat pada Gambar 9.



**Gambar 7.** Kurva beban-perpindahan M-2D, M2D-CWO, dan hasil eksperimen



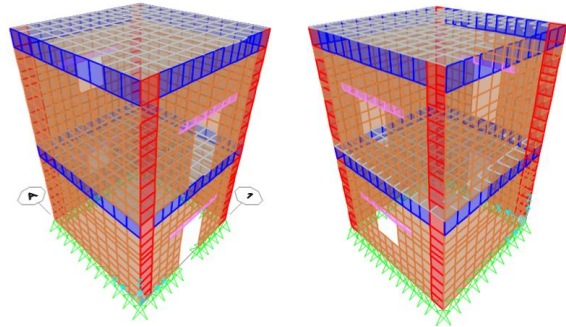
**Gambar 8.** Kontur Tegangan Dinding M2D-CWO



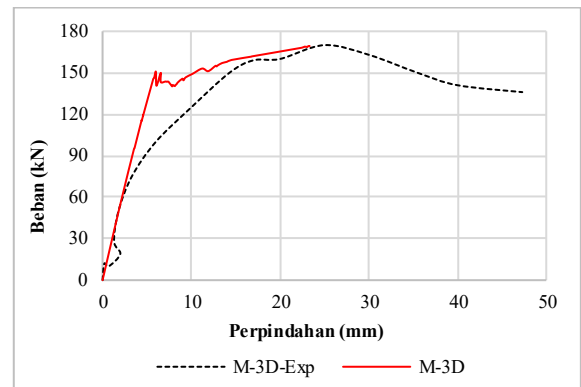
**Gambar 9.** Kontur Tegangan Kolom Perkuatan M2D-CWO

**Model validasi SDK 3D**

Hasil validasi model 3D ditunjukkan pada Gambar 10 sampai dengan Gambar 13. Gambar 10 menunjukkan M-3D dengan dimensi dan sifat material yang sama dengan data uji El-Diasity et al. (2023). Validasi M-3D dilakukan dengan metode yang sama saat memvalidasi M-2D.



**Gambar 10.** Model Validasi 3D (M-3D)

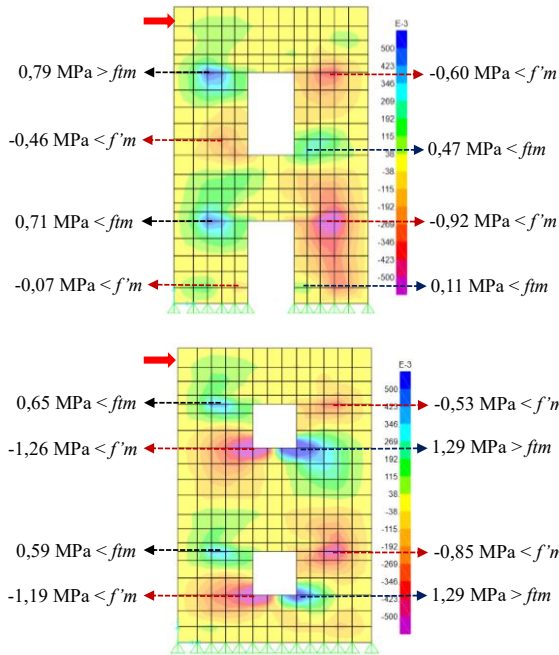


**Gambar 11.** Kurva beban-perpindahan model Validasi 3D dan hasil eksperimen

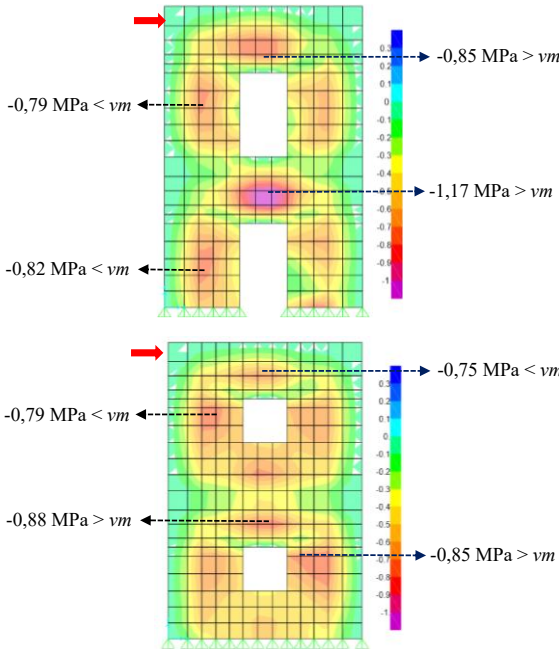
Hasil analisis kurva beban-perpindahan M-3D yang diplot bersama dengan hasil uji diperlihatkan pada Gambar 11. Terlihat M-3D dapat menyesuaikan bagian bawah kurva beban-perpindahan namun bagian atas kurva (*post-crack*) model masih sedikit menyimpang dari hasil pengujian. Hal ini berarti model *layered shell* tidak dapat secara sempurna meniru respon *post crack* dari SDK hasil pengujian. Namun, untuk tujuan analisis dan desain SDK, respons model dianggap memadai karena dalam desain seismik, beban lateral desain umumnya jauh lebih rendah daripada kapasitas struktur.

Kontur tegangan dinding seperti yang terlihat pada Gambar 12. dan Gambar 13. menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan yang besar terjadi pada dinding berlubang yakni pada sudut-sudut bukaan pintu dan jendela. Tegangan tekan belum melewati tegangan ijin dinding 4,8 Mpa, namun tegangan tarik dan tegangan geser yang terjadi lebih besar dari tegangan ijin dinding yaitu 0,78 MPa (kuat tarik), dan 0,827 MPa (kuat geser) yang akhirnya menyebabkan keruntuhan tarik dan geser. Oleh karena itu, perlu dilakukan perkuatan (diperlukan balok dan kolom beton bertulang praktis) disekitar

bukaan pintu dan jendela pada dinding untuk meminimalisir kegagalan akibat bukaan.



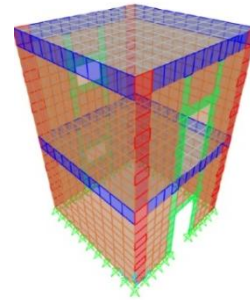
**Gambar 12.** Kontur Tegangan Tekan dan Tegangan Tarik Dinding M-3D



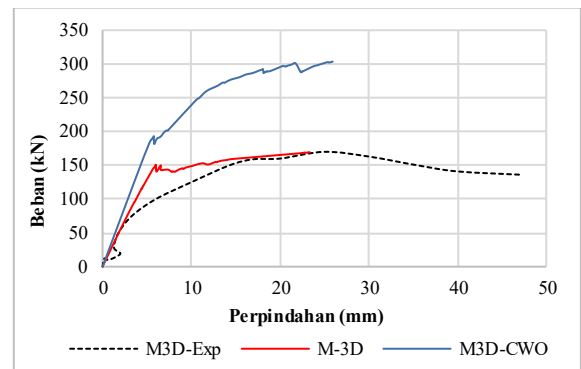
**Gambar 13.** Kontur Tegangan Geser Dinding M-3D Model SDK 3D dengan perkuatan

Hasil analisis model SDK 3D dengan perkuatan (M3D-CWO) ditunjukkan pada Gambar 14 sampai dengan Gambar 18. Kurva beban-perpindahan yang terlihat pada Gambar 14 menunjukkan bahwa perkuatan disekitar bukaan M3D-CWO meningkatkan kekakuan

dan daya dukung beban maksimum hingga 2 kali lebih besar dari M-3D.

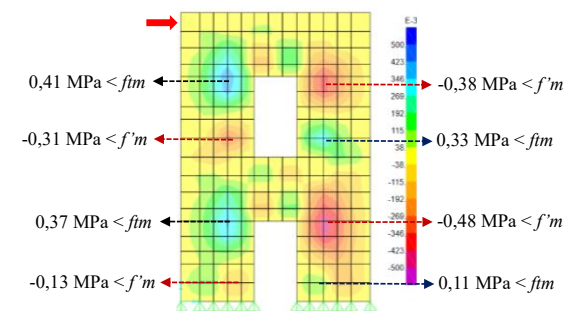


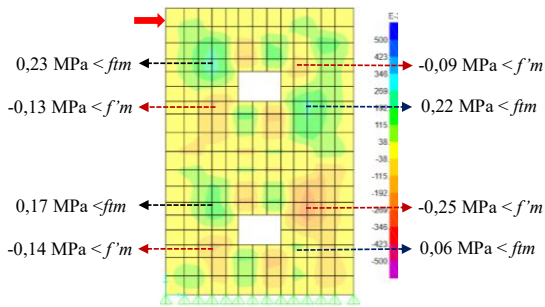
**Gambar 14.** Model SDK 3D dengan Perkuatan (M3D-CWO)



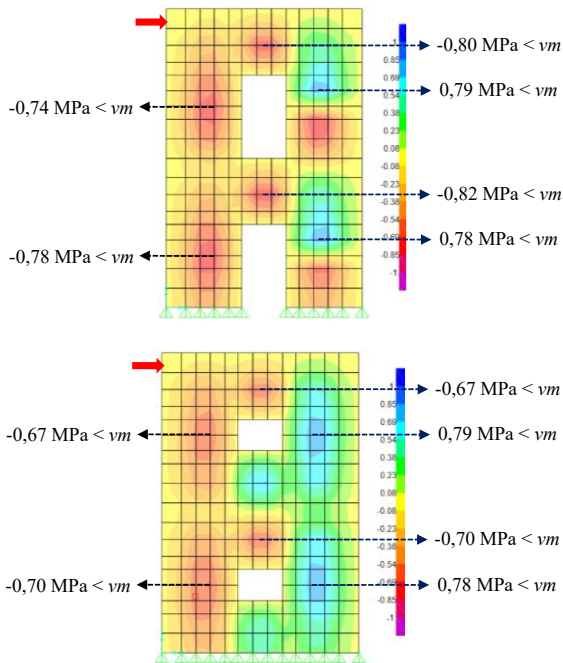
**Gambar 15.** Kurva beban-perpindahan M-3D, M3D-CWO, dan hasil eksperimen

Kontur tegangan pada Gambar 16 dan Gambar 17 menunjukkan bahwa tegangan tekan, tegangan tarik, dan tegangan geser dinding mengalami penurunan dan tidak melewati tegangan ijin dinding. Dinding terhindar dari konsentrasi tegangan yang besar pada sudut-sudut bukaan yang kini ditahan oleh elemen pengekuat beton bertulang seperti yang terlihat pada Gambar 18.

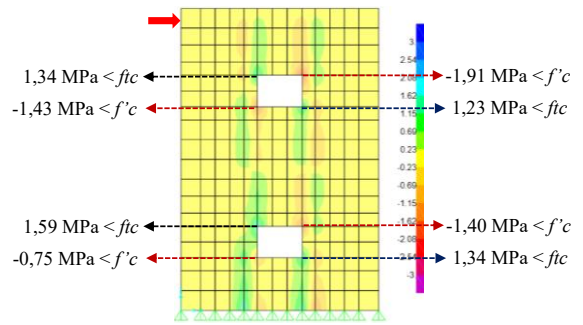
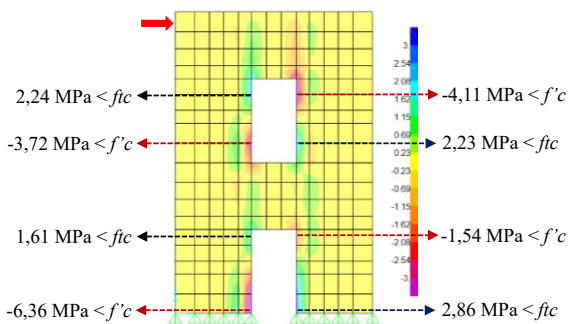




**Gambar 16.** Kontur Tegangan Tekan dan Tegangan Tarik Dinding M3D-CWO



**Gambar 17.** Kontur Tegangan Geser Dinding M3D-CWO



**Gambar 18.** Kontur Tegangan Kolom Perkuatan M3D-CWO

**Evaluasi kinerja**

Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimit struktur, pada peraturan Chile, Brzev, S. (2007a). disebutkan bahwa drift ratio bangunan dengan konsep SDK harus kurang dari atau sama dengan 0,002 (0,2%) dikali tinggi struktur. Pada validasi M-2D, 0,002 drift (6 mm) dicapai pada saat model dibebani sebesar 33,5 kN sedangkan pada M2D-CWO, 0,002 drift dicapai pada saat model dibebani sebesar 46,3 kN. Sehingga M2D-CWO mampu menahan gaya geser dasar 17,7% lebih besar dari M-2D. Pada validasi M-3D, 0,002 drift (5,2 mm) dicapai pada saat model dibebani sebesar 128,3 kN sedangkan pada M3D-CWO, 0,002 drift dicapai pada saat model dibebani sebesar 175,8 kN. Sehingga M3D-CWO mampu menahan gaya geser dasar 65,1% lebih besar dari M-3D.

**4. KESIMPULAN**

Model yang dianalisis dengan elemen *layered shell* (MSH) dan elemen *solid* (MSD) memberikan kesesuaian hasil pada bagian linier (*initial stages*) dengan hasil uji laboratorium. MSH dianalisis menggunakan nilai  $E_m = 144 \cdot f'_m$  pada material pasangan bata dan faktor modifikasi 0,1E pada material beton, sedangkan MSD dengan cara mereduksi  $I_{cr}$ ,  $E_c$ , dan  $E_m$  secara bertahap sesuai beban. Namun, analisis dengan MSD tidak cukup praktis jika diterapkan pada SDK bangunan kompleks, sehingga pemodelan dengan elemen *layered shell* pada SAP2000 merupakan pendekatan yang lebih baik dari elemen *solid* untuk memodelkan bangunan bertingkat.

Perkuatan berupa beton praktis pada sekeliling lubang perlu dilakukan untuk

meminimalisir kegagalan akibat bukaan dan mengurangi nilai konsentrasi tegangan. SDK dengan perkuatan di sekitar lubang juga mampu menahan gaya geser dasar hingga 65,1% lebih besar dari SDK tanpa perkuatan.

## 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai dari PNPB Universitas Udayana TA-2024 Nomor: B/255.406/UN14.4.A/PT.01.03/2024, tanggal 17 April 2024

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- ACI committee 318. (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11). In *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*.
- Ahmed, A., Shahzada, K., Ali, S. M., Khan, A. N., & Shah, S. A. A. (2019). Confined and unreinforced masonry structures in seismic areas: Validation of macro models and cost analysis. *Engineering Structures*, 199.
- Bhara, F., & Duran, Y. G. G. L. (2023). Studi Eksperimen Kekakuan Dinding Pasangan Bata dengan Mortar Campuran Kapur, Bubukan Bata dan Pasir Akibat Beban Siklik. *Journal Of Civil Engineering And Infrastructure Technology*, 2(1).
- Borah, B., Singhal, V., & Kaushik, H. B. (2021). Assessment of important parameters for seismic analysis and design of confined masonry buildings: A review. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5235-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5235-9_20)
- Brzev, S. (2007a). Earthquake-resistant confined masonry construction. In *National Information Center of Earthquake Engineering Indian Institute of Technology Kanpur*.
- Brzev, S. (2007b). *Earthquake-Resistant Confined Masonry Construction*. NATIONAL INFORMATION CENTER OF EARTHQUAKE ENGINEERING.
- Budiwati, I. A. M., Sukrawa, M., & Wirasukma, I. G. A. D. (2022). Analysis of confined masonry with strengthening around the opening. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1117(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1117/1/012031>
- El-Diasity, M., Salah, S., El-Hariri, M. O. R., Gamal, A. A., & Elsalakawy, T. S. (2023). Numerical and Experimental Behavior of Two-Story Confined Masonry Structure Subjected to Cyclic Loads. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 1–30. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00632-1>
- Eurocode, 6. (2001). EN1996 Eurocode 6: Design of masonry structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 144(6). <https://doi.org/10.1680/cien.2001.144.6.44>
- Eurocode 6. (2005). *EN 1996-1-1 Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*.
- FEMA 356. (2000). FEMA 356 - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. *Report FEMA-356, Washington, DC*.
- Ghaisas, K. V., Basu, D., Brzev, S., & Pérez Gavilán, J. J. (2017). Strut-and-Tie Model for seismic design of confined masonry buildings. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.200>
- Hani, S., Rini, R., & Nursyamsi, N. (2025). Studi Eksperimental Hubungan Kuat Tekan Bata Satuan dan Dinding Pasangan Bata. 13(2). <https://doi.org/10.35447/jitekh.v13i2.1290>
- Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2006). Code approaches to seismic design of masonry-infilled reinforced concrete frames: A state-of-the-art review. In *Earthquake Spectra*. <https://doi.org/10.1193/1.2360907>
- MSJC. (2002). Building code requirements for masonry structures (ACI530-02/ASCE5-02/TMS402-02). *Masonry Standards Joint Committee (MSJC)*, 58.
- Palermo, M., Ricci, I., Silvestri, S., Gasparini, G., Trombetti, T., Foti, D., & Ivorra, S. (2014). Preliminary interpretation of shaking-table response of a full-scale 3-storey building composed of thin reinforced concrete sandwich walls. *Engineering Structures*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.024>
- Paulay, T., & Priestly, M. J. N. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. In *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. <https://doi.org/10.1002/9780470172841>

- Ricci, I., Palermo, M., Gasparini, G., Silvestri, S., & Trombetti, T. (2013). Results of pseudo-static tests with cyclic horizontal load on cast in situ sandwich squat concrete walls. *Engineering Structures*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.046>
- Rita Rahayu, N. N., Budiwati, I. A. M., & Sukrawa, M. (2016). Studi Karakteristik Bata Merah Lokal Bali Sebagai Dinding. *Jurnal Spektran*, 4(1), 10–18. <https://doi.org/10.24843/spektran.2016.v04.i01.p02>
- SNI 2847-2019. (2019). Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung Dan Penjelasan Sebagai Revisi Dari Standar Nasional Indonesia. SNI 03-2847:2019. *Sni 2847:2019*, (8), 1–695.
- Suarjana, M., Kusumastuti, D., Pribadi, K. S., Rildova, & Lie, T. H. (2012). Experimental Study on Typical Confined Masonry Structure under Cyclic Lateral Load. *15th World Conference on Earthquake Engineering (15 WCEE)*.
- Wisnumurtini. (2013). *Struktur Dinding Pasangan Batu Merah Lokal Dengan Perkuatan Bilah Bambu Di Daerah Rawan Gempa*. Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Brawijaya. Malang.
- Yildizlar, B. (2021). Seismic performance analysis and rehabilitation applications for a historical masonry building through field works and experimental investigations. *Structures*, 34, 1811–1833.