

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Studi Eksperimental *Shearwall*

Studi yang dilakukan oleh Sharifi dan Shafieian (2018) memberikan wawasan mendalam melalui analisis statistik terhadap 154 eksperimen *shearwall*, yang memperkaya pemahaman tentang faktor-faktor struktural yang mempengaruhi kekakuan. Metodologi penelitian melibatkan analisis mendalam menggunakan scatter plot untuk memvalidasi hubungan antarparameter. Analisis regresi linear mengungkapkan perbedaan signifikan dalam parameter dominan antara *squat wall* dan *slender wall*. Pada *squat wall*, rasio aspek (H_w/L_w) dan rasio beban aksial ($P/(A_g \cdot f_c)$) menunjukkan pengaruh yang kuat, dengan koefisien korelasi masing-masing 0,66 dan 0,75. Sebaliknya, pada *slender wall*, rasio beban aksial menjadi parameter paling kritis, mencapai koefisien korelasi 0,81, sementara rasio aspek memiliki dampak minimal. Penelitian ini memberikan temuan menarik terkait parameter struktural. Meskipun kekuatan beton, konfinemen, dan tulangan diagonal tidak berpengaruh langsung terhadap kekakuan efektif, mereka tetap memainkan peran penting dalam perilaku inelastis struktur.

Melanjutkan kajian tentang *slender shearwall*, Loa dkk. (2022) dalam penelitiannya melakukan studi eksperimental terhadap *slender shearwall* dengan tulangan satu lapis yang umum digunakan di Peru. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *shearwall* dengan tulangan satu lapis memiliki kapasitas lateral yang memadai untuk struktur bertingkat rendah hingga menengah di daerah seismik, namun memiliki keterbatasan dalam daktilitas jika dibandingkan dengan dinding bertulangan dua lapis. Selain itu, penelitian ini juga berhasil mengidentifikasi mode kegagalan yang dominan berupa kegagalan lentur yang diikuti dengan kegagalan geser pada bagian dasar dinding.

Dalam sudut pandang yang berbeda namun masih berkaitan dengan *shearwall*, Robazza (2019) melakukan investigasi eksperimental pada *shearwall* masonry yang diperkuat. Penelitian ini berfokus pada peningkatan daktilitas dinding masonry melalui berbagai teknik perkuatan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penambahan tulangan vertikal dan horizontal yang tepat dapat meningkatkan daktilitas dan kapasitas dinding masonry secara signifikan. Lebih lanjut, Robazza juga mengidentifikasi bahwa detailing pada ujung dinding (*boundary elements*) sangat mempengaruhi performa seismik dinding secara keseluruhan.

Berkaitan dengan *squat shearwall*, Jin dkk. (2023) melakukan penelitian eksperimental terhadap *squat shearwall* yang disubjekkan pada kombinasi beban siklik dan beban aksial tinggi. Studi ini menganalisis perilaku *squat shearwall* dengan rasio tinggi-lebar yang rendah dalam kondisi beban yang mewakili struktur bangunan tinggi atau fasilitas nuklir. Dari hasil eksperimen tersebut terungkap bahwa beban aksial tinggi secara signifikan mempengaruhi kapasitas geser, pola retak, dan mode kegagalan dinding. Peningkatan beban aksial hingga tingkat tertentu dapat meningkatkan kapasitas geser, namun pada tingkat yang lebih tinggi justru mengurangi daktilitas dan mengubah mode kegagalan dari dominasi geser menjadi kegagalan tekan diagonal. Sebagai pengembangan lebih lanjut, penelitian ini juga menghasilkan model elemen hingga yang terkalibrasi dengan hasil eksperimental untuk memprediksi respons *squat shearwall* dalam berbagai kondisi pembebanan.

Untuk melengkapi pemahaman komprehensif tentang *squat shearwall*, Habib dkk. (2025) dalam kajian literatur melakukan tinjauan menyeluruh terhadap perilaku seismik *squat shearwall*. Berbeda dengan *slender shearall*, *squat shearwall* dengan rasio tinggi-lebar kurang dari 2,0 cenderung mengalami kegagalan geser yang dominan. Studi ini berhasil mengidentifikasi berbagai parameter yang mempengaruhi perilaku seismik *squat shearwall*, termasuk rasio tulangan, geometri dinding, dan detail perkuatan pada ujung dinding. Hasil tinjauan tersebut menekankan pentingnya desain yang

mengakomodasi kapasitas geser yang cukup dan mekanisme disipasi energi yang efektif untuk *squat shearwall*.

2.2 Analisis Kapasitas Lentur *Shearwall*

Dalam konteks kapasitas lentur shearwall, studi komparatif yang dilakukan oleh Rajbanshi dkk. (2020) dalam menganalisis pengaruh boundary elements yang diperbesar terhadap kapasitas lentur melalui pemodelan elemen hingga. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa interaksi beban aksial-momen (P-M) pada dinding ramping sangat dipengaruhi oleh konfigurasi tulangan vertikal di *boundary elements*. Lebih lanjut, penelitian ini mengungkapkan bahwa kegagalan dominan terjadi melalui lelehnya tulangan vertikal dan hancurnya beton inti yang terkekang (*confined concrete*), dengan deformasi yang lebih terdistribusi secara merata dibandingkan dinding *squat*.

Melanjutkan kajian tentang kapasitas lentur, Cheng dan Zhang (2021) dalam penelitiannya menganalisis kapasitas lentur *slender shearwall* yang dipengaruhi oleh beban aksial tarik dan lentur secara bersamaan. Penelitian ini mengungkapkan temuan penting bahwa adanya gaya tarik aksial secara signifikan mengurangi kapasitas lentur dinding, suatu kondisi yang sering diabaikan dalam prosedur desain standar. Model numerik yang dikembangkan dalam penelitian ini memungkinkan prediksi respons dinding dengan lebih akurat, termasuk distribusi retak, deformasi, dan mode kegagalan. Hasil penelitian tersebut memberikan wawasan penting tentang interaksi kompleks antara tegangan tarik aksial dan lentur pada *slender shearwall*.

Sebagai komparasi terhadap kajian pada *slender shearwall*, tinjauan state of the art oleh Habib dkk. (2025) mengungkapkan bahwa rasio aspek rendah ($< 1,5$) menyebabkan perilaku dominan geser dengan mekanisme kegagalan yang lebih kompleks. Berbeda dengan *slender wall*, kapasitas *squat wall* lebih bergantung pada detil tulangan geser dan penggunaan material berkinerja tinggi seperti UHPFRC (*Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*) untuk mencegah kegagalan getas. Studi ini juga menekankan

pentingnya pemodelan *strut-and-tie* dan validasi eksperimen skala penuh untuk menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik desain seismik.

Untuk melengkapi pemahaman tentang kapasitas lentur, Sharifi dan Shafieian (2018) menganalisis kekakuan efektif *shearwall* yang merupakan parameter kunci dalam analisis kapasitas lentur. Melalui analisis statistik dari banyak data eksperimental, peneliti mengidentifikasi bahwa kekakuan efektif *shearwall* bervariasi secara signifikan tergantung pada tingkat pembebanan, rasio tulangan, dan geometri dinding. Hasil penelitian ini menghasilkan formula empiris untuk memperkirakan kekakuan efektif yang lebih akurat dibandingkan dengan yang disarankan oleh kode desain yang ada. Temuan ini sangat penting untuk analisis struktur *nonlinear* dan evaluasi kinerja seismik yang memerlukan estimasi kekakuan yang tepat.

2.3 Analisis Respons Dinamik *Shearwall*

Dalam konteks analisis respons dinamik *shearwall*, banyak kajian ilmiah terdahulu telah menegaskan bahwa konfigurasi spasial dan geometri *shearwall* memiliki pengaruh yang sangat substantif terhadap kinerja seismik struktur bangunan. Penelitian komprehensif Mallika dkk. pada struktur 20 lantai yang berlokasi di zona gempa berbeda memberikan temuan kritis, yaitu penempatan *shearwall* berbentuk T di sudut bangunan terbukti secara signifikan mengurangi perpindahan dan simpangan struktural dibandingkan dengan alternatif penempatan lainnya (Reshma dkk., 2021).

Lebih lanjut, Reshma dkk. (2021) melakukan penelitian dengan analisis respons spektrum dinamik sesuai standar IS 1893-2016 menggunakan perangkat lunak ETABS. Hasil analisis tersebut mengungkapkan kompleksitas respons nonlinear *shearwall* yang sangat bergantung pada karakteristik rekaman gempa. Selain itu, studi David Ugadica dkk. juga memberikan bukti empiris tentang interaksi kompleks antara bentuk *shearwall* (T, L, C) dan dinamika gerakan tanah (Reshma dkk., 2021). Dalam penelitian tersebut, parameter struktural seperti base shear, displacement, dan storey drift ratio berperan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi kinerja seismik. Temuan

signifikan dari salah satu model dengan shearwall menunjukkan penurunan yang sangat impresif: reduksi base shear mencapai 50%, *displacement* sebesar 19,57%, dan *drift ratio* 15,75% dibandingkan dengan model tanpa *shearwall*. Pentingnya dari penelitian ini menekankan optimasi posisi dan geometri *shearwall* dalam upaya meningkatkan ketahanan struktural terhadap beban gempa.

Sejalan dengan penelitian sebelumnya, studi yang dilakukan oleh Reddy dkk. (2024) juga membuktikan bahwa posisi, bentuk, dan material shearwall memengaruhi perilakunya melalui analisis dinamik nonlinear. Analisis menggunakan ETABS pada zona gempa V dengan karakteristik tanah sedang menunjukkan bahwa penempatan *shearwall* di pusat bangunan mampu mengurangi perpindahan lantai hingga 89,95% dan meningkatkan kekakuan struktural sebesar 14,54 kali dibandingkan tanpa adanya *shearwall*. Sebagai perbandingan, penelitian dari Chandurkar dan Paigade turut mengonfirmasi efektivitas shearwall di sudut bangunan dalam mengurangi perpindahan. Namun demikian, analisis respons spektrum yang lebih mendalam oleh Reddy dkk. (2024) mempertegas keunggulan penempatan shearwall di pusat bangunan. Parameter kuncinya seperti *storey drift* yang sangat rendah dan *storey shear* tertinggi mengindikasikan bahwa penempatan di pusat memiliki mekanisme distribusi beban yang jauh lebih optimal. Dari serangkaian penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa optimasi posisi *shearwall* merupakan proses multidimensional. Faktor yang memengaruhinya tidak terbatas pada aspek bentuk dan material saja, melainkan sangat bergantung pada interaksi dinamik antara karakteristik gempa dan konfigurasi struktural.

Untuk melengkapi pemahaman tentang respons dinamik, Esmailtabar dkk. (2019) mengembangkan model makro *nonlinear* untuk *slender shearwall*. Penelitian ini mengusulkan pendekatan pemodelan yang mampu menangkap perilaku global dan lokal *slender shearwall* dengan akurasi tinggi namun tetap komputasional efisien. Model yang dikembangkan mempertimbangkan berbagai aspek perilaku non linier seperti degradasi kekakuan, disipasi energi histeretik, dan interaksi antara lentur dan geser. Validasi model dengan data

eksperimental menunjukkan kemampuan yang baik dalam memprediksi respons dinamik *shearwall* terhadap beban siklik.

2.4 Penggunaan OpenSees dalam Pemodelan Struktur

Dalam bidang pemodelan respons nonlinear struktur beton, OpenSees telah terbukti menjadi alat simulasi yang sangat kompeten. Penelitian Esmaeiltabar dkk. (2019) menggarisbawahi kemampuan platform ini melalui perbandingan model *Fiber* dan *Multi-Vertical Line Element Model* (MVLEM). Studi tersebut berhasil mendemonstrasikan bahwa model *Fiber* dengan elemen *dispBeamColumn* mampu menghasilkan kurva histeresis yang sangat akurat, selaras dengan data eksperimental *shearwall* RW2 dari Thomsen dan Wallace (2004). Keberhasilan ini terutama tercapai melalui penggunaan material Steel02 yang mengakomodasi efek Bauschinger dan ConcreteCM yang memperlihatkan proses penutupan retak secara bertahap.

Kelebihan OpenSees tidak hanya terletak pada akurasi, melainkan juga pada optimalisasi sumber daya komputasi. Sebagai contoh, model MVLEM-AS (*axial springs*) berhasil menghasilkan output yang sangat mirip dengan model *Fiber*, namun dengan waktu analisis yang signifikan lebih singkat (97 kali lebih cepat). Untuk memastikan keandalan hasil, validasi numerik yang komprehensif dilakukan dengan membandingkan berbagai parameter kritis seperti storey drift, kurvatur, dan respons dinamik.

Temuan penelitian tersebut juga mengungkapkan beberapa karakteristik penting dalam pemilihan model material. Model berbasis Concrete02 dengan linear *tension stiffening* cenderung menghasilkan estimasi perpindahan yang berlebihan akibat fenomena *pinching*. Sementara itu, model ConcreteCM menghadapi tantangan dalam hal konvergensi numerik. Hal ini menggarisbawahi pentingnya pemilihan model material yang tepat sesuai dengan karakteristik struktur dan tujuan analisis spesifik. Kesimpulan utama dari studi ini menegaskan reliabilitas OpenSees dalam mensimulasikan respons seismik struktur beton. Namun demikian, penelitian juga menekankan bahwa keberhasilan simulasi sangat bergantung pada kemampuan peneliti dalam

memilih pendekatan pemodelan makro yang sesuai dengan kompleksitas struktur yang dikaji.

Sebagai pengembangan lebih lanjut dalam penggunaan OpenSees, Lo dkk. (2022) memanfaatkan platform ini dalam pemodelan numerik *slender shearwall* dengan tulangan satu lapis. Dalam studi tersebut, OpenSees dimanfaatkan untuk mengembangkan model elemen hingga yang dapat merepresentasikan perilaku *shearwall* dengan akurat. Peneliti menggunakan elemen *fiber section* untuk memodelkan respons *nonlinear* material beton dan baja, serta untuk menangkap distribusi regangan pada penampang dinding. Model numerik ini terbukti mampu mereproduksi hasil eksperimental dengan baik, termasuk *envelope* kurva beban-perpindahan, degradasi kekakuan, dan mode kegagalan.

Untuk memperkaya pemahaman tentang kemampuan OpenSees, Cheng dan Zhang (2021) juga menggunakan platform ini dalam pemodelan numerik *slender shearwall* yang disubjekkan pada beban aksial tarik dan lentur secara bersamaan. Dalam penelitian tersebut, OpenSees dimanfaatkan untuk mengembangkan model yang dapat menangkap interaksi kompleks antara tegangan tarik aksial dan lentur. Model numerik menggunakan formulasi elemen hingga berbasis perpindahan dengan material konstitutif *nonlinear* untuk beton dan baja. Kemampuan OpenSees dalam menangani respons material yang kompleks dan kondisi pembebanan yang tidak biasa didemonstrasikan dalam studi ini, membuktikan fleksibilitas dan kehandalan platform ini untuk penelitian lanjutan dalam bidang teknik struktur.

2.5 Komparasi *Slender* dan *Squat Shearwall*

Berdasarkan sintesis penelitian terdahulu pada sub bab sebelumnya, belum ada penelitian yang spesifik membandingkan *slender shearwall* dan *squat shearwall* melalui analisis dinamik dengan *output* respons dinamik (*displacement-time*) dan kurva histeretik (*force-displacement* dan *moment-rotation*). Penelitian sebelumnya seperti Farzinpour dkk. dan Esmaeiltabar memiliki keterbatasan dalam mengeksplorasi respons dinamik *shearwall*. Studi

Farzinpour dkk. (2023) hanya berfokus pada prediksi kekuatan geser *squat wall* menggunakan *machine learning* tanpa mengeksplorasi respons dinamik, sementara Esmaeiltabar dkk. (2019) memvalidasi model OpenSees khusus untuk *slender wall*.

Studi numerik yang dilakukan oleh peneliti lain juga belum menyediakan komparasi komprehensif antara kedua tipe dinding. Loa dkk. (2022) mengembangkan model elemen hingga di OpenSees untuk *slender shearwall* dengan tulangan satu lapis dan berhasil memvalidasi hasil eksperimental, namun fokus penelitian tersebut tidak membandingkannya dengan perilaku *squat shearwall*. Jin dkk. (2023) secara terpisah melakukan pemodelan numerik khusus untuk *squat shearwall* dengan beban siklik dan aksial tinggi, menghasilkan model terkalibrasi yang akurat untuk memprediksi respons dalam berbagai kondisi pembebanan, tetapi tanpa komparasi langsung dengan *slender shearwall*. Demikian pula, Cheng dan Zhang (2021) berhasil memodelkan interaksi kompleks antara tegangan tarik aksial dan lentur pada *slender shearwall*, sementara Robazza (2019) memvalidasi model dinding *masonry* di OpenSees, namun keduanya tidak melakukan analisis komparatif yang terintegrasi.

Lebih lanjut, studi Reshma dkk. (2021) dan Reddy dkk. (2024) hanya menganalisis pengaruh posisi *shearwall* pada respons seismik tanpa membedakan karakteristik spesifik dari tipe dinding yang berbeda. Selain itu, studi yang dilakukan oleh Rajbanshi dkk. (2020) hanya menganalisis *axial force* dan *bending moment slender shearwall* melalui analisis *pushover*. Untuk *squat shearwall*, studi yang dilakukan oleh Habib dkk. (2025) hanya sebatas tinjauan *state of the art seismic behaviour* berbasis eksperimental.