E-ISSN : 3025-1311
https://ejournal.cahayailmubangsa.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 2 Tahun 2026

STUDI KOMPARASI LOKASI SAMBUNGAN LEWATAN DAN VARIASI JARAK SENGKANG TERHADAP KINERJA SEISMIK KOLOM BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA

Irvan Muliadi[1], Fajri yusmar[2]
[1]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
[2]Dosen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
*Email: imuliadi654@gmail.com

ABSTRAK

Keamanan infrastruktur di daerah rawan gempa sangat bergantung pada kapasitas daktilitas elemen kolom. Namun, kontinuitas penulangan sering kali terganggu oleh penggunaan sambungan lewatan (lap splice), yang rentan mengalami kegagalan lekatan (bond-slip) jika ditempatkan pada zona sendi plastis. Penelitian ini mengevaluasi kinerja seismik kolom beton bertulang berdimensi 150x160 mm dengan variasi lokasi sambungan lewatan (dasar vs tengah kolom) dan jarak sengkang pengekang (150 mm vs 75 mm). Evaluasi dilakukan menggunakan metode Analisis Elemen Hingga (FEA) non-linier melalui perangkat lunak Abaqus dengan material Concrete Damaged Plasticity (CDP). Model diuji menggunakan beban statik monotonik (pushover) dan siklik. Hasil analisis menunjukkan bahwa evakuasi sambungan ke bagian tengah kolom (M15SM) mendongkrak stabilitas deformasi dan kapasitas beban puncak secara signifikan, dengan perilaku yang sangat identik dengan kolom kontrol tanpa sambungan. Sebaliknya, sambungan di dasar kolom (M15SB) memicu keruntuhan getas prematur. Modifikasi perapatan sengkang menjadi 75 mm pada zona kritis tidak secara signifikan meningkatkan beban lateral puncak awal, namun terbukti krusial dalam menahan laju keruntuhan getas pada fase pelemahan pasca-puncak. Selain itu, ditemukan bahwa asumsi perfect bond (menggunakan Embedded Region) pada pemodelan numerik menciptakan kekakuan artifisial, sehingga tidak valid untuk mengevaluasi parameter disipasi energi pada sambungan di zona sendi plastis. Penelitian ini merekomendasikan evakuasi mutlak sambungan lewatan ke zona elastis untuk menjamin daktilitas struktur.

Kata Kunci: Lap Splice, Kinerja Seismik, Daktilitas, Pengekangan, Finite Element Analysis.

Article History
Received: Juli 2026
Reviewed:Juli 2026
Published: Juli 2026

Plagiarism Checker
No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

A. PENDAHULUAN

Keamanan infrastruktur sipil terhadap beban gempa merupakan isu fundamental dalam rekayasa struktur global. Dalam sistem struktur beton bertulang, baik pada bangunan gedung maupun jembatan, elemen kolom merupakan komponen yang paling vital karena berfungsi sebagai jalur utama penyaluran beban gravitasi menuju fondasi. Kegagalan inelastis pada elemen kolom bersifat katastropik dan sering kali memicu keruntuhan progresif (*progressive collapse*) yang mengakibatkan kehancuran total sistem struktur secara tiba-tiba (Wight 2016). Kondisi geologi Indonesia yang rawan gempa menuntut penerapan filosofi Desain Kapasitas (*Capacity Design*) secara ketat, di mana kerusakan struktural diarahkan untuk terjadi pada lokasi tertentu di ujung-ujung elemen kolom yang disebut sendi plastis (*plastic hinge*). Sendi

plastis ini dirancang untuk mendisipasi energi seismik melalui deformasi inelastis yang stabil tanpa kehilangan kapasitas pikul bebannya (Moehle 2015).

Namun dalam praktik pelaksanaannya di lapangan, kontinuitas gaya dalam elemen kolom sering kali terganggu oleh kebutuhan penyambungan tulangan longitudinal akibat keterbatasan panjang fabrikasi baja standar. Metode penyambungan yang paling konvensional dan umum digunakan adalah sambungan lewatan (*lap splice*). Kinerja metode ini sangat bergantung pada integritas tegangan lekat (*bond stress*) antara permukaan baja tulangan dan selimut beton di sekitarnya (Lowes et al. 2012). Menempatkan sambungan lewatan pada daerah sendi plastis (seperti di dasar kolom) merupakan praktik yang sangat berisiko. Beban gempa siklik bolak-balik akan memicu keretakan dan hancurnya selimut beton secara prematur, yang berujung pada hilangnya lekatan tulangan (*bond-slip failure*). Degradasi tegangan lekat secara drastis akan merusak mekanisme transfer gaya, menurunkan kekakuan lateral kolom, dan memicu efek penyempitan (*pinching effect*) pada kurva histeresis yang secara fatal menghilangkan kemampuan kolom dalam meredam energi gempa (Murcia-Delso and Benson Shing 2015).

Penelitian eksperimental mengenai pengaruh letak sambungan lewatan terhadap perilaku kolom beton bertulangan telah dilakukan sebelumnya oleh Adnin et al. (2016). Melalui uji laboratorium pada penampang 150 x 160 mm, penelitian tersebut menyimpulkan bahwa mengevakuasi sambungan lewatan ke pertengahan tinggi kolom mampu sedikit meningkatkan kapasitas beban lateral puncak dan menggeser pola retak utama dari retak lentur di dasar menjadi retak geser di area sambungan. Meskipun penelitian tersebut telah memetakan kapasitas momen secara visual, evaluasi kinerja seismik inelastis yang mendalam belum dilakukan. Parameter performa seismik esensial seperti indeks daktilitas perpindahan, laju degradasi kekakuan sekansial, dan total disipasi energi kumulatif belum terkuantifikasi.

Di sisi lain, penelitian terkait kinerja elemen struktur menunjukkan bahwa pengekangan (*confinement*) transversal yang memadai berdampak sangat krusial terhadap stabilitas struktur saat menerima beban gempa (Yusmar et al. 2025). Meskipun demikian, belum ada kajian numerik komprehensif yang membedah integrasi antara lokasi sambungan lewatan dan intervensi perapatan sengkang pada kolom penampang ringkas.

Untuk mengisi persimpangan celah penelitian (*research gap*) tersebut tanpa harus mengulangi pengujian fisik skala laboratorium yang memakan waktu dan biaya, pendekatan Analisis Elemen Hingga (*Finite Element Analysis* / FEA) menjadi instrumen solusi yang sangat andal. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan membandingkan secara komputasional kinerja seismik elemen kolom dengan sambungan lewatan di dasar (zona sendi plastis) dan di pertengahan kolom (zona elastis) menggunakan perangkat lunak Abaqus dengan material *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Lebih lanjut, penelitian ini akan menguji efektivitas intervensi perapatan sengkang pengekang guna merumuskan rekomendasi desain mitigasi yang optimal untuk infrastruktur di wilayah rawan gempa.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Perilaku Sambungan Lewatan (Lap Splice)

Dalam sistem rangka pemikul momen, sendi plastis (plastic hinge) dirancang untuk terbentuk di ujung-ujung elemen kolom guna mendisipasi energi gempa melalui deformasi inelastis (Moehle, 2015). Penggunaan sambungan lewatan (lap splice) di zona kritis ini dilarang oleh standar SNI 2847 (2019) karena tingginya kerentanan terhadap kegagalan lekat. Mekanisme transfer gaya pada lap splice murni mengandalkan integritas tegangan lekat (bond stress) antara permukaan tulangan dan beton selimut (ACI Committee 408 2003).

Di bawah paparan beban gempa siklik bolak-balik, gaya membelah radial (bursting forces) yang timbul dari proses transfer gaya antar-tulangan akan merusak selimut beton secara progresif. Hancurnya beton pengekang ini memicu fenomena gelinciran tulangan (bond-slip failure) sebelum baja mencapai tegangan lelehnya. Secara makroskopis, kegagalan lekat ini bermanifestasi sebagai efek penyempitan (pinching effect) pada kurva histeresis, yang secara drastis menurunkan kapasitas pilar dalam mendisipasi energi gempa dan mempercepat kejatuhan kekuatan struktur secara getas (Murcia-Delso and Benson Shing 2015).

2. Teori Pengekangan (Confinement) Mander

Untuk memitigasi keruntuhan getas akibat bond-slip dan deformasi ekstrem, elemen kolom membutuhkan pengekangan (confinement) yang memadai dari tulangan transversal (sengkang). Sengkang yang dipasang rapat berfungsi memberikan tekanan kekangan pasif ke arah dalam inti beton saat beton mengalami pemuaian lateral akibat gaya tekan aksial maupun lentur (Park and Paulay 1975).

Berdasarkan model konstitutif yang diusulkan oleh Mander (1988), pengekangan sengkang secara signifikan mendongkrak kuat tekan puncak beton dari kondisi tak terkekang (f'c) menjadi kuat tekan terkekang (f'cc). Lebih lanjut, pengekangan ini juga memperbesar kapasitas regangan ultimit beton. Peningkatan regangan ultimit ini memperpanjang fase pelemahan pasca-puncak (softening branch), sehingga struktur dapat berdeformasi secara daktail dan mempertahankan sisa kekuatan (residual strength) tanpa mengalami keruntuhan tiba-tiba.

3. Evaluasi Kinerja Seismik

Kinerja seismik kolom dievaluasi melalui tiga parameter utama:

a. Daktilitas Perpindahan: Rasio antara perpindahan ultimit dan perpindahan leleh. Penentuan titik leleh dan ultimit dapat diekstraksi dari kurva pushover menggunakan idealisasi bilinear elasto-plastis berdasarkan Metode Park (1988).
b. Disipasi Energi Kumulatif: Kapasitas penyerapan energi kinetik yang dihitung dari total luasan di dalam kurva histeresis (gaya vs perpindahan) selama pembebanan siklik.
c. Degradasi Kekakuan Sekansia: Penurunan kekakuan struktur siklus demi siklus yang dievaluasi dengan menarik kemiringan garis lurus antar titik puncak gaya positif dan negatif pada kurva histeresis.

C. METODE PENELITIAN

1. Skenario Pemodelan dan Geometri

Penelitian ini merupakan studi eksperimental numerik yang dilakukan menggunakan perangkat lunak Finite Element Analysis (FEA) Abaqus. Objek simulasi adalah elemen kolom berdimensi penampang 150 x 160 mm dengan tinggi total 800 mm. Tulangan longitudinal menggunakan 4Ø-10, sedangkan sengkang menggunakan Ø6. Beban lateral diaplikasikan pada tinggi efektif 640 mm dari dasar jepit.

Desain matriks simulasi terdiri dari 6 (enam) variasi pemodelan yang mengevaluasi letak sambungan lewatan dengan panjang 250 mm dan spasi sengkang pengekang:

a. M15SB S150: Sambungan di dasar (sendi plastis) dengan spasi sengkang 150 mm.
b. M15SB S75: Sambungan di dasar dengan modifikasi perapatan sengkang 75 mm.
c. M15SM S150: Sambungan di tengah (zona elastis) dengan spasi sengkang 150 mm.
d. M15SM S75: Sambungan di tengah dengan modifikasi perapatan sengkang 75 mm.
e. K S150: Kolom kontrol menerus (tanpa sambungan) dengan sengkang 150 mm.
f. K S75: Kolom kontrol menerus dengan sengkang 75 mm.

Nama Kolom	Dimensi Penampang	Tinggi Kolom	Tulangan Longitudinal	Tulangan Transversal	f'c	Letak Sambungan Lewatan	Ld (mm)
M15SB S150 (Model Adnin)	150 x 160	800	4Ø-10	Ø6-150	25	Di Bawah	250
M15SM S150 (Model Adnin)	150 x 160	800	4Ø-10	Ø6-150	25	Di Tengah	250
M15SB S75 (Modifikasi)	150 x 160	800	4Ø-10	Ø6-75	25	Di Bawah	250
M15SM S75 (Modifikasi)	150 x 160	800	4Ø-10	Ø6-75	25	Di Tengah	250
K S150 (Kontrol)	150 x 160	800	4Ø-10	Ø6-150	25	Tidak ada sambungan	-
K S75 (Kontrol)	150 x 160	800	4Ø-10	Ø6-75	25	Tidak ada sambungan	-

2. Pemodelan Material dan Elemen Hingga

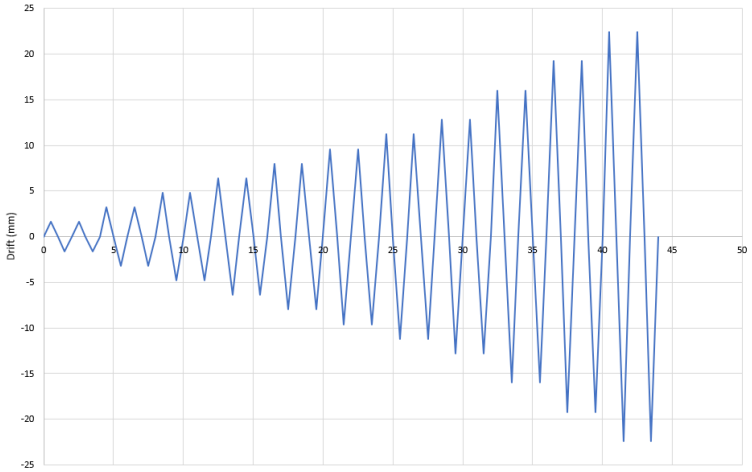
Beton dengan kuat tekan (f'c) 25 MPa dimodelkan menggunakan pendekatan Concrete Damaged Plasticity (CDP) untuk menangkap perilaku retak tarik dan hancur tekan di bawah beban siklik. Baja longitudinal dengan tegangan leleh (fy) 544 MPa dan baja sengkang 376 MPa dimodelkan menggunakan Kinematic Hardening untuk mereplikasi penurunan kapasitas leleh akibat efek Bauschinger saat beban berbalik arah.

Objek beton didiskritisasi sebagai elemen solid C3D8R (8-node linear brick, reduced integration) dengan ukuran pias 20 mm berdasarkan uji konvergensi jaring (mesh sensitivity). Baja tulangan dimodelkan sebagai elemen garis T3D2 (2-node linear 3D truss). Karena menggunakan pendekatan makro-pemodelan, interaksi antara tulangan dan beton diasumsikan memiliki lekatan sempurna (perfect bond) menggunakan constraint Embedded Region, di mana translasi baja dipaksa mengikuti regangan beton di sekelilingnya. Dasar kolom diberi kondisi batas jepit absolut (Encastre).

3. Protokol Pembebanan

Beban aksial statis dijaga konstan sebesar 60 kN (0,1 Ag f'c) di puncak pilar. Pembebanan lateral dikontrol melalui titik acuan (Reference Point) dengan dua metode:

a. Statik Monotonik (Pushover): Kolom didorong searah hingga simpangan 30 mm untuk mengekstraksi kurva kapasitas murni dan titik leleh ekuivalen.
b. Siklik Semu-Statis (Quasi-Static Cyclic): Pembebanan bolak-balik diberikan mengacu pada protokol pembebanan adnin.

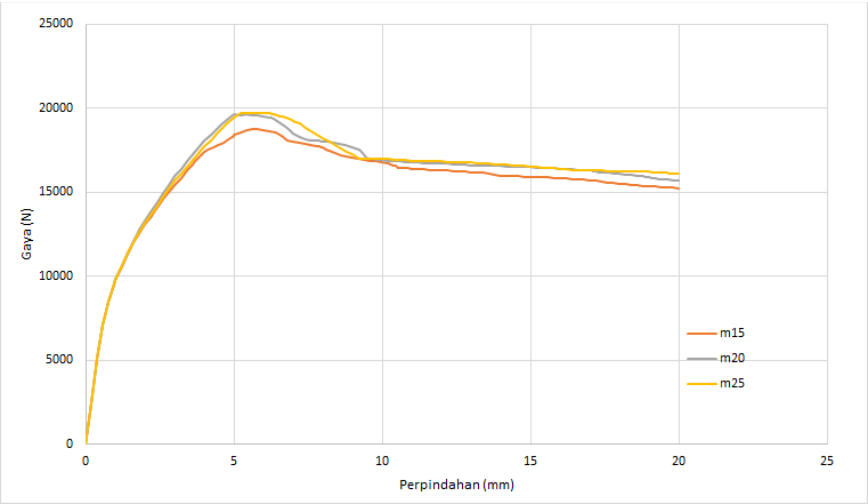


D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Sensitivitas Jaring (Mesh Sensitivity)

Sebelum model kolom dianalisis lebih lanjut, studi sensitivitas jaring (mesh sensitivity analysis) wajib dilakukan. Langkah ini bertujuan untuk menemukan ukuran elemen (mesh size) yang paling optimal, yaitu ukuran yang mampu menghasilkan akurasi konvergensi gaya tinggi namun tetap efisien dalam penggunaan memori dan waktu komputasi.

Analisis ini menggunakan model M15SM S150 dengan pembebanan statik montik pushover, tiga variasi ukuran jaring elemen diuji secara bertahap, yaitu jaring kasar (25 mm), jaring sedang (20 mm), dan jaring halus (15 mm). Indikator konvergensi numerik dinilai dari stabilitas grafik gaya lateral puncak yang dihasilkan.



Hasil simulasi menunjukkan bahwa model dengan jaring kasar menghasilkan gaya lateral sebesar 19740 N, jaring sedang sebesar 19662 N, dan jaring halus menghasilkan gaya 18785 N. Antara ukuran jaring sedang dan jaring halus, selisih
yang terjadi adalah 4.6 % (berada di bawah ambang batas toleransi numerik kritis 5%). Hal ini membuktikan bahwa ukuran jaring (mesh) telah mencapai kondisi konvergen dan stabil.

Jaring yang lebih halus membutuhkan waktu komputasi (running time) yang lebih lama, sehingga ukuran elemen sebesar 20 mm ditetapkan sebagai ukuran standar untuk memodelkan seluruh kolom dalam penelitian ini.

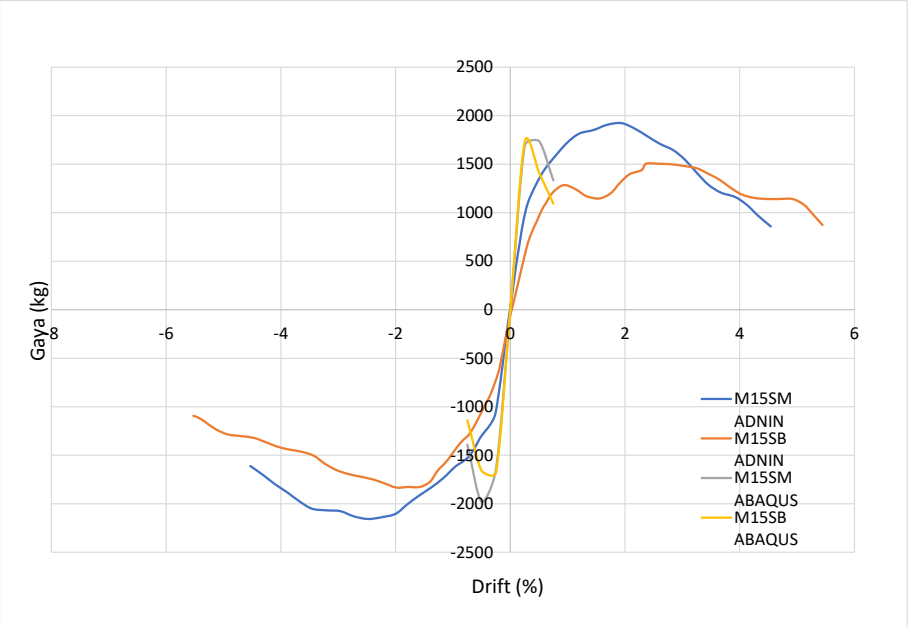
2. Validasi Model Numerik Terhadap Eksperimen

Model elemen hingga yang telah dibangun harus diverifikasi terlebih dahulu terhadap hasil pengujian fisik di laboratorium. Proses validasi ini menggunakan data eksperimental kolom dari penelitian Adnin et al. (2016) sebagai benchmark.

Validasi difokuskan pada perbandingan kapasitas beban lateral puncak. Dari 4 titik pembacaan beban puncak, tiga diantaranya memiliki error di bawah 10%. Hanya satu titik yang mencapai 14.5% pada arah positif dari model M15SB.

Nama Kolom	Arah	Pu (Kg)
M15SM adnin	(+)	1930
	(-)	2157
M15SM abaqus	(+)	1740
	(-)	1978

M15SB adnin	(+)	1509
	(-)	1844
M15SB abaqus	(+)	1728
	(-)	1678



Kekakuan pada model abaqus lebih tinggi karena asumsi tumpuan jepit absolut dan lekat sempurna (embedded region). Pada model Abaqus, dasar kolom diasumsikan terjepit sempurna (Encastre). Sebaliknya, pada pengujian fisik (Adnin, 2016), kolom tertanam pada balok fondasi yang diklem ke lantai uji. Fleksibilitas rotasional mikro pada balok fondasi, serta fenomena elongasi tulangan yang tertanam di dalam fondasi (strain penetration), menyumbang ekstra perpindahan lateral pada spesimen fisik yang tidak terakomodasi dalam model Abaqus.

E. KESIMPULAN

Berdasarkan tahapan analisis komputasi elemen hingga dan validasi model numerik yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Konvergensi Numerik: Analisis sensitivitas jaring membuktikan bahwa penggunaan elemen diskritisasi berukuran 20 mm merupakan konfigurasi pemodelan yang paling optimal. Ukuran elemen ini mampu memberikan stabilitas dan konvergensi hasil respons komputasi dengan margin selisih gaya di bawah ambang batas kritis (5%), sekaligus menjaga efisiensi penggunaan memori dan waktu analisis (running time).
2. Keandalan Pemodelan Elemen Hingga: Pendekatan pemodelan menggunakan parameter Concrete Damaged Plasticity (CDP) untuk beton dan Kinematic Hardening untuk baja tulangan terbukti valid dan andal dalam mereplikasi perilaku struktur riil. Meskipun penggunaan kondisi batas jepit mutlak (Encastre) dan asumsi lekatan sempurna (perfect bond) menghasilkan respons kekakuan awal yang sedikit lebih kaku akibat tidak terakomodasinya fleksibilitas tumpuan dan strain penetration, model Abaqus secara keseluruhan berhasil memprediksi kapasitas beban lateral puncak dengan sangat baik (margin kesalahan mayoritas di bawah 10%). Hal ini menegaskan bahwa model virtual tersebut secara akademis sah dan dapat digunakan sebagai instrumen untuk evaluasi kinerja seismik inelastis tingkat lanjut.

F. DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 408. 2003. “Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension.”

Badan Standarisasi Nasional. 2019. “Persyaratan-Beton-Struktural-Untuk-Bangunan-Gedung.”

Lowes, Laura N., Dawn E. Lehman, Anna C. Birely, Daniel A. Kuchma, Kenneth P. Marley, and Christopher R. Hart. 2012. “Earthquake Response of Slender Planar Concrete Walls with Modern Detailing.” *Engineering Structures* 43: 31–47. doi:10.1016/j.engstruct.2012.04.040.

Mander, J. B., M. J. N. Priestley, and R. Park. 1988. “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete.” *Journal of Structural Engineering* 114(8): 1804–26. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).

Moehle, Jack P. 2015. *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. New York: McGraw-Hill Education.

Murcia-Delso, Juan, and P. Benson Shing. 2015. “Bond-Slip Model for Detailed Finite-Element Analysis of Reinforced Concrete Structures.” *Journal of Structural Engineering* 141(4): 04014125. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001070.

Park, R., and T. Paulay. 1975. *Reinforced Concrete Structures*. 1st ed. Wiley. doi:10.1002/9780470172834.

Wight, James K. 2016. *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. Seventh edition. Hoboken, New Jersey: Pearson.

Yusmar, Fajri, Nevy Sandra, Eka Juliafad, Prima Zola, Nidal Zuwida, and Laras Oktavia Andreas. 2025. “IMPACT OF INADEQUATE CONFINEMENT IN RC COLUMNS OF BUILDINGS UNDER THE UPDATED INDONESIAN SEISMIC CODE ON STRUCTURAL PERFORMANCE.” 20(20).