

Analisis bibliometrik perkembangan dan pemetaan lanskap tematik penelitian respons seismik struktur bangunan

Reytaza Aulia Putri^{1,*}, Astriana Hardawati¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Bibliometric analysis
Seismic response
Building structure
VOSviewer
Scopus

Abstract

Seismic response analysis of building structures has emerged as one of the most actively investigated domains in earthquake engineering, driven by escalating seismic vulnerability of the built environment globally. Despite the growing volume of scholarly output, a comprehensive mapping of the intellectual landscape governing this field, encompassing dominant themes, leading contributors, and evolving trajectories, remains insufficiently documented. This study presents a systematic bibliometric analysis of 1,358 peer-reviewed articles indexed in Scopus (2015–2025), filtered to the Engineering subject area. VOSviewer was employed to construct a keyword co-occurrence network from 201 qualified author keywords. Results reveal that time history analysis, seismic performance, and soil–structure interaction constitute the three most prominent research nodes. Five thematic clusters were identified, spanning nonlinear dynamic simulation, performance-based seismic design, structural vulnerability assessment, and emerging data-driven approaches. Overlay visualization indicates that deep learning and seismic resilience represent the most recent research frontiers. China (295 articles), Iran (183), and India (163) dominate scholarly output, with Engineering Structures (144 articles) as the leading publication source. These findings provide a structured evidence base for identifying critical knowledge gaps in seismic structural engineering research.

Corresponding Author:

Reytaza Aulia Putri
23511037@students.uii.ac.id

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Latar Belakang

Rekayasa kegempaan lahir dari kebutuhan mendesak untuk melindungi kehidupan manusia dan infrastruktur dari dampak destruktif fenomena seismik, mendorong para ilmuwan dan insinyur struktural untuk secara sistematis mengembangkan kerangka analisis yang terus diperbarui sejak pertengahan abad ke-20. Perkembangan metodologi analisis respons seismik mencakup spektrum yang luas, mulai dari metode statik ekuivalen yang menyederhanakan beban gempa sebagai gaya lateral statis, analisis response spectrum yang mengintegrasikan karakteristik dinamis struktur melalui periode getarnya, hingga analisis *time history* yang memanfaatkan rekaman

akselerogram aktual maupun sintetik sebagai pendekatan paling realistis dalam memodelkan perilaku struktural (Chopra, 2020). Aksesibilitas metode-metode tersebut semakin meluas seiring perkembangan perangkat lunak analisis struktural seperti SAP2000, ETABS, dan OpenSees yang mendorong adopsi analisis dinamis nonlinear di kalangan akademisi dan praktisi.

Indonesia, sebagai negara kepulauan yang terletak di zona konvergensi empat lempeng tektonik utama yakni Lempeng Indo-Australia, Eurasia, Pasifik, dan Filipina, menanggung beban seismik yang tergolong paling berat di dunia (Hutchings & Mooney, 2021). Rentetan kejadian gempa destruktif, termasuk gempa Yogyakarta 2006 yang

merenggut lebih dari 5.700 jiwa, gempa Palu 2018, serta gempa Cianjur 2022, secara konsisten mengkonfirmasi kerentanan stok bangunan nasional terhadap ancaman seismik (BNPB, 2022), sekaligus menempatkan kajian analisis respons seismik struktur bangunan sebagai agenda penelitian dengan urgensi sosial dan kemanusiaan yang sangat nyata.

Dalam satu dekade terakhir, volume publikasi ilmiah di bidang ini bertumbuh secara eksponensial dari 54 artikel pada 2015 menjadi 212 artikel pada 2025, mencerminkan pertumbuhan kumulatif sebesar 293% (Scopus, 2025). Kelimpahan publikasi ini paradoksnya justru mempersulit upaya peneliti dalam memahami struktur dan arah perkembangan bidang secara holistik, mengingat tanpa peta intelektual yang komprehensif menjadi sangat sulit untuk mengidentifikasi tema yang telah jenuh, mengenali frontier yang sedang berkembang, maupun menemukan research gap yang signifikan dan belum tereksplorasi. Analisis bibliometrik menawarkan solusi metodologis yang tepat atas tantangan tersebut, yakni melalui kuantifikasi pola publikasi ilmiah yang memungkinkan pemetaan struktur intelektual suatu bidang secara objektif, sistematis, dan replikatif berbasis metadata bibliografis dalam skala besar (Donthu et al., 2021). Kombinasi pendekatan bibliometrik dengan alat visualisasi VOSviewer telah terbukti menghasilkan wawasan bernilai mengenai jaringan kolaborasi peneliti, kluster tematik dominan, dan evolusi temporal fokus penelitian di berbagai bidang rekayasa, meskipun penerapannya secara spesifik pada domain analisis respons seismik struktur bangunan masih sangat terbatas.

Berdasarkan kesenjangan pengetahuan tersebut, penelitian ini dirancang untuk memetakan lanskap intelektual penelitian analisis respons seismik struktur bangunan secara komprehensif melalui analisis bibliometrik terhadap 1.358 artikel terindeks Scopus periode 2015–2025, dengan tujuan mengidentifikasi kluster tematik dominan,

menelusuri evolusi temporal fokus penelitian, menganalisis distribusi geografis produktivitas ilmiah, serta menentukan frontier penelitian yang berkembang paling pesat sebagai landasan strategis penguatan kapasitas riset seismik nasional Indonesia.

Tinjauan Pustaka

Perkembangan metode analisis respons seismik

Perjalanan perkembangan metode analisis respons seismik mencerminkan evolusi pemahaman manusia mengenai perilaku dinamis struktur bangunan secara bertahap namun fundamental. Pada era paling awal, pendekatan statik ekuivalen menjadi satu-satunya alat yang tersedia bagi insinyur struktural dalam mempertimbangkan pengaruh gempa dalam desain. Metode ini menggantikan beban dinamis gempa dengan sistem gaya lateral statis yang besarnya ditetapkan sebagai persentase tertentu dari berat bangunan, sehingga analisis dapat dilakukan dengan kalkulasi tangan tanpa memerlukan perangkat komputasi. Meskipun sangat disederhanakan, metode ini tetap relevan hingga saat ini untuk bangunan beraturan dengan ketinggian terbatas sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019.

Kemajuan mendasar terjadi ketika konsep *response spectrum* diperkenalkan oleh Biot pada tahun 1941 dan kemudian dikembangkan secara sistematis oleh Housner pada dekade 1950-an. Analisis *response spectrum* memperkenalkan dimensi dinamis yang sesungguhnya dalam desain seismik dengan mengkarakterisasi respons maksimum osilator satu derajat kebebasan terhadap rekaman gempa tertentu sebagai fungsi periode getar dan rasio redaman. Kurva spektrum kemudian distandarisasi menjadi spektrum desain yang merepresentasikan amplop statistik dari berbagai rekaman gempa di suatu wilayah, memungkinkan desainer menentukan gaya rencana yang realistis berdasarkan karakteristik dinamis bangunan. Pendekatan ini disempurnakan melalui teknik kombinasi

modal seperti *Complete Quadratic Combination* dan *Square Root of Sum of Squares* untuk menangani respons multi-modal struktur tiga dimensi.

Analisis *time history* merepresentasikan puncak kemampuan analitis dalam rekayasa seismik dengan mensimulasikan respons struktur secara langkah-demi-langkah dalam domain waktu menggunakan rekaman akselerogram gempa aktual atau sintetik. Keunggulan mendasar metode ini terletak pada kemampuannya menangkap aspek perilaku struktural yang tidak dapat diwakili analisis *response spectrum*, termasuk efek durasi gempa, urutan leleh komponen struktural, akumulasi kerusakan material, dan pengaruh komponen vertikal akselerasi gempa. Perkembangan analisis *time history* nonlinear selanjutnya membuka pintu bagi paradigma *performance-based earthquake engineering* yang secara eksplisit menghubungkan tindakan seismik, respons struktural, dan konsekuensi kerusakan dalam kerangka probabilistik yang terpadu (Filiatrault & Sullivan, 2014).

Interaksi tanah-struktur dalam analisis seismik

Interaksi tanah-struktur atau *soil-structure interaction* merupakan fenomena yang semakin mendapat perhatian besar dalam penelitian rekayasa seismik kontemporer. Pada pendekatan konvensional, fondasi bangunan diasumsikan sebagai perletakan kaku di atas tanah keras sehingga gerak tanah di permukaan fondasi sama dengan rekaman *free-field*. Asumsi ini terbukti menghasilkan prediksi respons yang tidak akurat terutama untuk bangunan berat yang berdiri di atas tanah lunak. Fenomena *soil-structure interaction* mencakup dua mekanisme utama. *Kinematic interaction* terjadi karena fondasi yang kaku tidak dapat mengikuti deformasi gerak tanah *free-field* secara sempurna. *Inertial interaction* timbul dari gaya inersia pada superstruktur yang diteruskan ke sistem fondasi-tanah, menyebabkan deformasi tambahan pada medium tanah di sekitar fondasi (Hosseini & Farsangi, 2021). Kombinasi kedua

mekanisme ini dapat mengubah secara substansial frekuensi natural sistem, rasio redaman efektif, distribusi gaya internal, dan pola deformasi struktur.

Desain seismik berbasis kinerja

Paradigma *performance-based seismic design* lahir sebagai respons terhadap ketidakmampuan filosofi desain berbasis kekuatan konvensional dalam memberikan jaminan kinerja yang terukur dan transparan. Dalam kerangka ini, tujuan kinerja dinyatakan secara eksplisit dalam bentuk pasangan tingkat bahaya gempa dan tingkat kinerja struktural yang ingin dicapai. Implementasinya memerlukan prosedur analisis yang mampu mengestimasi respons struktural pada berbagai tingkat intensitas gempa, mendorong perkembangan metode seperti *pushover analysis*, *incremental dynamic analysis*, dan analisis *time history* nonlinear dengan berbagai rekaman gempa terskala. Konsep *fragility curve* menjadi elemen integral dalam kerangka ini, memungkinkan kuantifikasi probabilistik risiko kerusakan sebagai fungsi intensitas gempa. Perkembangan standar seperti FEMA P-2090 (2020) telah mendorong adopsi kerangka kinerja ini secara lebih luas dalam praktik rekayasa.

Metode Penelitian

Sumber data dan strategi pencarian

Scopus dipilih sebagai sumber data bibliografis utama dalam penelitian ini atas dasar tiga pertimbangan mendasar. Pertama, basis data tersebut tergolong salah satu yang terbesar di dunia dengan cakupan lebih dari 25.000 jurnal dari sekitar 7.000 penerbit yang merentang lintas disiplin ilmu. Kedua, ketatnya seleksi jurnal berdasarkan kriteria kualitas editorial dan bibliometrik memberikan jaminan bahwa setiap artikel terindeks telah memenuhi standar mutu ilmiah minimum. Ketiga, antarmuka pencarian dan fasilitas ekspornya memungkinkan penerapan filter multikriteria sekaligus pengunduhan

metadata bibliografis secara utuh dalam format yang kompatibel dengan perangkat analisis bibliometrik.

Strategi pencarian disusun melalui proses iteratif guna menyeimbangkan *recall* dan *precision*, dengan kueri final “*seismic response AND building structure AND (response spectrum OR time history)*” yang diterapkan pada ruas *Article title*, *Abstract*, dan *Keywords*. Pemanfaatan operator *Boolean* AND dan OR ditujukan untuk menjamin relevansi dokumen sekaligus mengakomodasi keberagaman terminologi dalam literatur. Cakupan temporal dibatasi pada periode 2015 hingga 2025 sebagai representasi era penelitian kontemporer di bidang rekayasa seismik, yang selanjutnya disaring secara bertahap melalui sejumlah filter sebagaimana terangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Alur seleksi dan penyaringan data pencarian Scopus

Tahapan seleksi	Jumlah dokumen
Pencarian awal (2015–2025)	2.511
Filter: <i>Subject area Engineering</i>	2.154
Filter: <i>Document type Article</i>	1.725
Filter: <i>Language English</i>	1.358

Penyaringan area subjek *Engineering* menurunkan jumlah dokumen dari 2.511 menjadi 2.154, sementara filter tipe *Article* membatasi korpus hanya pada artikel jurnal yang telah melalui *peer review* dengan mengeklusi prosiding konferensi maupun bab buku. Filter bahasa Inggris diterapkan pada tahap akhir mengingat optimalnya pemrosesan kata kunci berbahasa Inggris pada *VOSviewer*. Akumulasi keseluruhan kriteria inklusi tersebut menghasilkan 1.358

artikel yang kemudian menjadi korpus data penelitian ini.

Prosedur analisis bibliometrik dan visualisasi

Metadata dari 1.358 artikel terpilih diekspor dari *Scopus* dalam format *comma-separated values* (CSV) secara lengkap, meliputi judul, nama penulis, tahun terbit, sumber jurnal, nomor DOI, jumlah sitasi, afiliasi, *author keywords*, *indexed keywords*, serta abstrak. Analisis kemudian dijalankan dengan perangkat lunak *VOSviewer* versi 1.6.20 (Van Eck & Waltman, 2010), yang unggul dalam menyajikan peta bibliometrik berbasis jarak (*distance-based map*). Pada peta tersebut, jarak antardua *node* berbanding terbalik dengan intensitas keterkaitannya, sehingga entitas yang kerap muncul bersama akan terposisikan berdekatan dan membentuk kluster yang terdefinisi secara visual.

Analisis difokuskan pada *co-occurrence* kata kunci penulis dengan metode penghitungan *full counting*, atas pertimbangan bahwa kata kunci penulis mencerminkan konseptualisasi topik yang paling otoritatif dibandingkan kata kunci yang ditetapkan pengindeks. Metode tersebut memperlakukan setiap kemunculan kata kunci secara setara tanpa pembobotan jumlah penulis, sehingga representasi frekuensinya lebih mudah ditafsirkan. Ambang batas minimum kemunculan ditetapkan pada nilai lima untuk menjaga keseimbangan antara inklusivitas dan keterbacaan peta, dengan pertimbangan bahwa ambang yang terlampaui rendah menghasilkan jaringan yang padat sedangkan ambang yang terlampaui tinggi berisiko mengeliminasi topik-topik yang masih berkembang. Penetapan ambang tersebut memunculkan 201 kata kunci tervalidasi dari total 3.920 kata kunci unik,

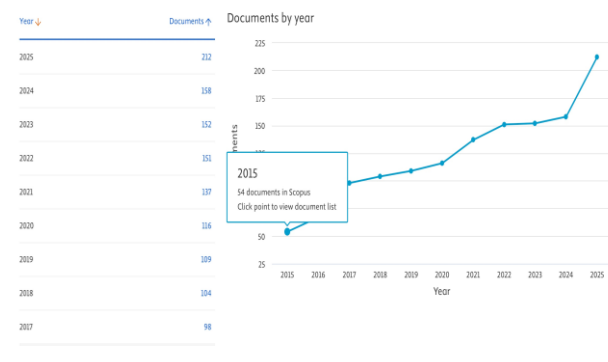
sehingga terbentuk jaringan yang kaya secara tematik namun tetap dapat ditafsirkan secara bermakna.

Hasil dan Pembahasan

Tren pertumbuhan publikasi 2015–2025

Analisis distribusi temporal publikasi menghasilkan gambaran yang sangat

informatif mengenai dinamika pertumbuhan penelitian dalam bidang analisis respons seismik struktur bangunan selama satu dekade terakhir. Distribusi dokumen per tahun dapat dilihat pada Gambar 1 Distribusi publikasi per tahun periode 2015-2025 berikut.

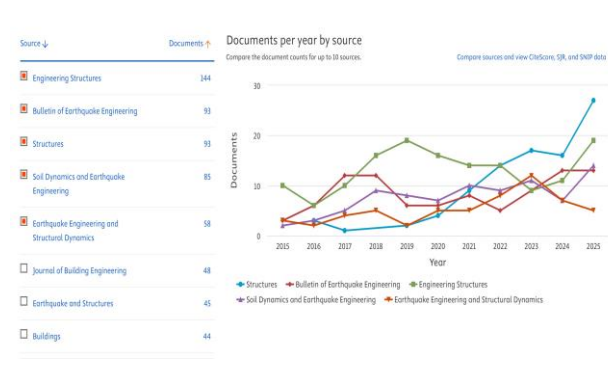


Gambar 1. Distribusi publikasi per tahun periode 2015-2025

Berdasarkan Gambar 1, volume publikasi menunjukkan pertumbuhan yang konsisten dan akseleratif sepanjang periode amatan, dimulai dari 54 artikel pada 2015 hingga mencapai puncaknya dengan 212 artikel pada 2025, mencerminkan peningkatan kumulatif sebesar 293% dalam satu dekade. Fase pertumbuhan moderat berlangsung pada 2015–2020 dengan rentang 54–116 artikel per tahun, kemudian beralih ke fase akselerasi yang lebih tajam sejak 2021 dengan lonjakan signifikan dari 137 artikel menjadi 212 artikel pada 2025. Tren ini

didorong oleh meningkatnya frekuensi kejadian gempa destruktif global, semakin terjangkaunya perangkat lunak analisis struktural berbasis elemen hingga, tekanan publikasi dari lembaga akademik yang mengadopsi sistem evaluasi bibliometrik, serta ekspansi ekosistem jurnal *open access* yang memperluas kanal diseminasi hasil penelitian.

Distribusi dokumen berdasarkan sumber jurnal dapat dilihat pada Gambar 2. Distribusi publikasi per tahun berdasarkan sumber jurnal berikut.



Gambar 2. Distribusi publikasi per tahun berdasarkan sumber jurnal

Gambar 2 menunjukkan bahwa *Engineering Structures* merupakan jurnal dengan kontribusi terbesar sepanjang periode amatan dengan 144 artikel, diikuti oleh *Bulletin of Earthquake Engineering and Structures* dengan masing-masing 93 artikel, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* dengan 85 artikel, serta *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* dengan 58 artikel. Kelima jurnal ini secara kolektif menyumbang sekitar 35% dari total korpus, mencerminkan tingkat konsentrasi publikasi yang cukup signifikan pada sekelompok kecil jurnal bergengsi. *Engineering Structures* yang diterbitkan oleh Elsevier memang dikenal sebagai salah satu jurnal paling prestisius dalam bidang rekayasa struktural dengan *impact factor* yang konsisten tinggi, sehingga menjadi target publikasi utama bagi peneliti terkemuka di bidang ini.

Dominasi jurnal-jurnal yang diterbitkan oleh Elsevier dan Springer dalam daftar ini juga

mencerminkan lanskap industri penerbitan ilmiah global di mana beberapa penerbit besar menguasai distribusi pengetahuan dalam bidang teknik. Dari perspektif perkembangan temporal, grafik *documents per year by source* pada Gambar 2 menunjukkan bahwa *Structures* mengalami pertumbuhan yang paling agresif dalam beberapa tahun terakhir dengan mencapai hampir 30 artikel pada 2025, mengindikasikan semakin kuatnya posisi jurnal yang relatif baru ini sebagai platform publikasi pilihan di bidang rekayasa struktural.

Distribusi berdasarkan penulis dan produktivitas

Profil penulis paling produktif dalam korpus dapat dilihat pada Gambar 3 Distribusi Publikasi berdasarkan penulis terproduksi berikut.



Gambar 3. Distribusi publikasi berdasarkan penulis terproduksi

Berdasarkan Gambar 3, Kim J. menduduki posisi teratas sebagai penulis paling produktif dengan 11 artikel, diikuti oleh Hosseini M., Nouredin M., dan Zhou Y. yang masing-masing menghasilkan 9 artikel. Filiatrault A., Lourenço P.B., Nascimbene R., dan Silvestri S. mengikuti dengan masing-masing 8 artikel, sementara Askouni P.K. dan De Domenico D. menyumbang masing-masing 7 artikel. Profil penulis produktif ini mencerminkan lanskap komunitas peneliti seismik global yang didominasi oleh akademisi dari Asia Timur

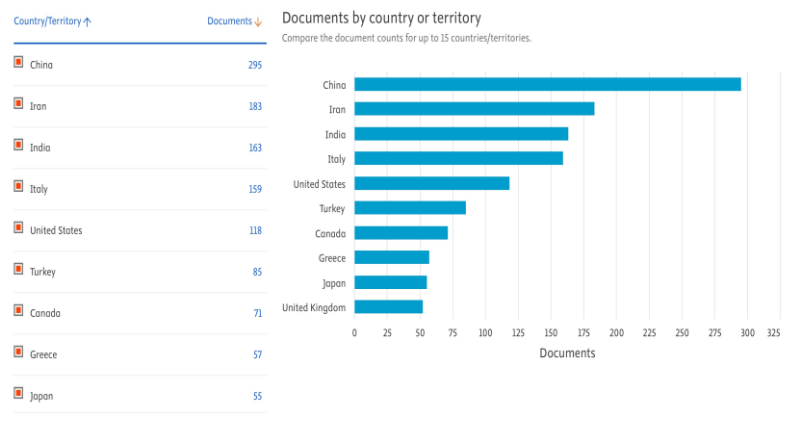
seperti Kim J. yang berafiliasi dengan institusi Korea, peneliti Timur Tengah seperti Hosseini M. dan Nouredin M., serta peneliti Eropa seperti Lourenço P.B. dan Nascimbene R.

Penting untuk dicatat bahwa konsentrasi produktivitas pada sekelompok kecil penulis ini merupakan pola yang umum ditemukan dalam analisis bibliometrik berbagai bidang ilmu, dan sering kali mencerminkan keberadaan kelompok riset yang aktif dengan fokus penelitian yang terdefinisi dengan baik. Namun demikian, distribusi

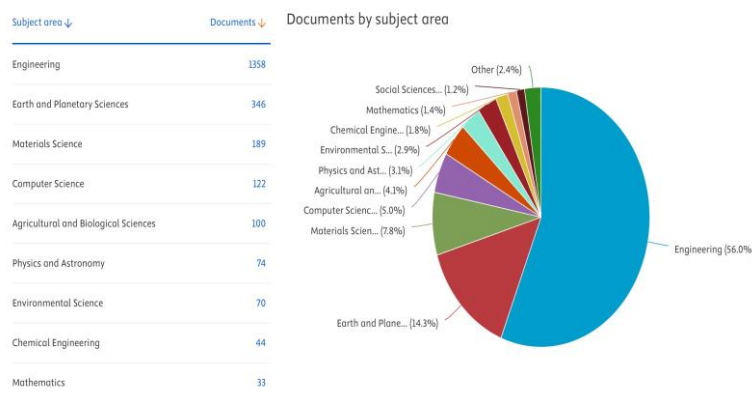
yang relatif merata di antara peneliti peringkat 2 hingga 10 juga mengindikasikan bahwa bidang ini tidak didominasi secara berlebihan oleh satu atau dua figur, melainkan memiliki ekosistem penelitian yang cukup beragam dan inklusif.

Distribusi geografis dan area subjek

Distribusi berdasarkan negara dan area subjek penelitian ditampilkan pada Gambar 4 Distribusi publikasi berdasarkan negara/wilayah dan Gambar 5 Distribusi publikasi berdasarkan area subjek berikut.



Gambar 4. Distribusi publikasi berdasarkan negara/wilayah



Gambar 5. Distribusi publikasi berdasarkan area subjek

Gambar 4 menunjukkan dominasi China yang sangat mencolok dengan 295 artikel, hampir dua kali lipat kontribusi Iran yang berada di posisi kedua dengan 183 artikel. India mengikuti di posisi ketiga dengan 163 artikel, diikuti Italia (159) dan Amerika Serikat (118). Turki (85), Kanada (71), Yunani (57), Jepang (55), dan Inggris Raya (53) melengkapi sepuluh besar. Pola distribusi geografis ini memiliki implikasi

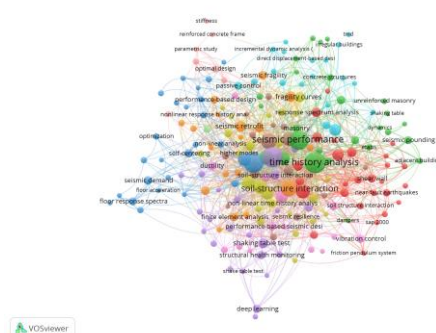
yang sangat signifikan dalam memahami lanskap penelitian global.

Dominasi China yang begitu mencolok mencerminkan dampak gabungan dari beberapa faktor struktural. Pertama, China merupakan salah satu negara dengan aktivitas seismik tertinggi di dunia, sehingga urgensi penelitian struktural seismik sangat tinggi dari perspektif nasional. Kedua, investasi pemerintah China dalam penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan telah

meningkat secara dramatis dalam dua dekade terakhir, menghasilkan ekspansi kapasitas riset universitas dan lembaga penelitian yang sangat cepat. Ketiga, ekosistem publikasi akademis China yang semakin matang telah mendorong peneliti untuk lebih aktif mempublikasikan hasil penelitian mereka di jurnal internasional terindeks. Dominasi Iran di posisi kedua juga patut dicermati, mengingat Iran merupakan negara dengan tingkat seismisitas sangat tinggi yang mengalami beberapa gempa katastrofis dalam beberapa dekade terakhir, sehingga menjadikan penelitian seismik sebagai prioritas nasional. Yang paling patut mendapat perhatian dari perspektif Indonesia adalah ketiadaan negara ini dalam daftar sepuluh besar kontributor penelitian global, padahal Indonesia merupakan salah satu negara paling seismis aktif di dunia. Kesenjangan antara tingginya ancaman seismik yang dihadapi Indonesia dan rendahnya kontribusinya dalam menghasilkan pengetahuan ilmiah mengenai rekayasa seismik merupakan *research gap* yang sangat mendesak untuk ditangani. Gambar 5 mengkonfirmasi bahwa *Engineering* mendominasi distribusi area subjek dengan 56%, diikuti *Earth and Planetary Sciences* (14,3%), *Materials Science* (7,8%), *Computer Science* (5,0%), dan *Agricultural and Biological Sciences* (4,1%), yang terakhir ini kemungkinan besar mencerminkan klasifikasi jurnal yang tumpang tindih dengan bidang rekayasa lingkungan.

Analisis jaringan ko-kemunculan (co-occurrence) kata kunci

Peta jaringan *co-occurrence* kata kunci yang dihasilkan oleh VOSviewer dari 201 kata kunci terkualifikasi dapat dilihat pada Gambar 6 *network visualization* peta ko-kemunculan kata kunci penelitian respons seismik struktur bangunan (2015–2025) berikut.



Gambar 6. *Network visualization* peta ko-kemunculan kata kunci penelitian respons seismik struktur bangunan (2015–2025)

Gambar 6 menampilkan jaringan *co-occurrence* yang terdiri dari 201 *node* yang saling terhubung, di mana ukuran *node* berbanding lurus dengan frekuensi kemunculan kata kunci, ketebalan garis mencerminkan intensitas asosiasi ko-kemunculan, dan warna *node* mengindikasikan keanggotaan kluster yang ditentukan melalui teknik *modularity-based clustering*. Berdasarkan analisis terhadap peta ini, teridentifikasi lima kluster tematik yang terdefinisi dengan baik.

Kluster pertama berwarna merah merupakan kluster terbesar dan paling sentral, berpusat pada *time history analysis* (89 kemunculan) dan *seismic performance* (78 kemunculan) dengan cakupan kata kunci tambahan meliputi *pushover analysis* (47), *seismic design* (36), *reinforced concrete* (34), *nonlinear time history analysis* (27), *incremental dynamic analysis* (21), dan *shear wall* (14). Kluster ini mencerminkan tradisi penelitian yang sangat mapan dalam evaluasi kinerja seismik sistem struktural beton bertulang melalui prosedur analisis nonlinear. Kluster kedua berwarna hijau kekuningan berpusat pada *soil-structure interaction* (48 kemunculan) yang menjadi *node* terbesar ketiga dalam jaringan, mengelompokkan penelitian yang mempertimbangkan pengaruh medium tanah terhadap respons seismik, mencakup *seismic behavior* (26), *finite element*

analysis (24), *base shear* (17), dan *seismic resilience* (11). Posisi kluster ini yang berdekatan dengan kluster pertama mengindikasikan tumpang tindih tematik yang substansial antara analisis dinamis dan kajian interaksi tanah-struktur. Kluster ketiga berwarna biru mengelompokkan penelitian berorientasi desain dan perkuatan struktural dengan kata kunci sentral *performance-based seismic design* dan *seismic retrofit*, termasuk *optimization*, *self-centering*, *floor response spectra*, dan *seismic demand*, yang secara kolektif mencerminkan pergeseran paradigma dari desain daktail konvensional menuju *resilience-based design*. Kluster keempat berwarna oranye merepresentasikan sub-domain penilaian kerentanan seismik probabilistik dengan kata kunci dominan *fragility curves* (27) dan *seismic fragility* (19), di mana penelitian dalam kluster ini umumnya mengintegrasikan analisis *time history* nonlinear dengan metodologi statistik untuk mengkonstruksi *fragility function* sebagai fungsi intensitas gempa. Kluster kelima berwarna hijau tua berfokus pada tipologi struktur dan material spesifik, mencakup *response spectrum analysis*, *shaking table*, *unreinforced masonry*, dan *concrete structures*.

Analisis overlay visualization dan evolusi temporal

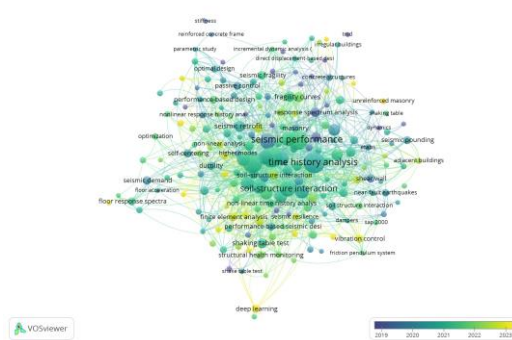
Analisis evolusi temporal fokus penelitian melalui *overlay visualization* ditampilkan pada Gambar 7 *Overlay visualization* peta ko-kemunculan kata kunci dengan representasi temporal rata-rata publikasi (2019–2023).

Gambar 7 menampilkan peta jaringan yang sama dengan Gambar 6, namun dengan pewarnaan *node* yang didasarkan pada tahun rata-rata publikasi dokumen yang mengandung setiap kata kunci, bukan keanggotaan kluster. Gradasi warna dari biru tua mewakili kata kunci yang lebih banyak muncul pada periode awal amatan (sekitar 2019) hingga kuning cerah yang merepresentasikan kata kunci dengan rata-

rata tahun publikasi paling baru (sekitar 2022–2023). Interpretasi peta ini memberikan wawasan yang sangat berharga mengenai arah pergeseran fokus penelitian dalam bidang ini.

Kata kunci *deep learning*, *vibration control*, *seismic resilience*, dan *dampers* tampak dalam warna kuning paling cerah, mengindikasikan bahwa topik-topik ini merupakan *frontier* penelitian yang paling mutakhir dan sedang berkembang paling pesat dalam periode amatan. Kemunculan *deep learning* sebagai *frontier* terkini dalam peta analisis respons seismik merupakan temuan yang sangat signifikan. Ini mengindikasikan bahwa komunitas peneliti mulai mengintegrasikan teknik pembelajaran mesin generasi terbaru untuk mengatasi keterbatasan metode analisis konvensional, misalnya dalam pengembangan *surrogate model* yang mampu memprediksi respons seismik dengan akurasi tinggi namun jauh lebih efisien secara komputasi dibandingkan simulasi elemen hingga penuh.

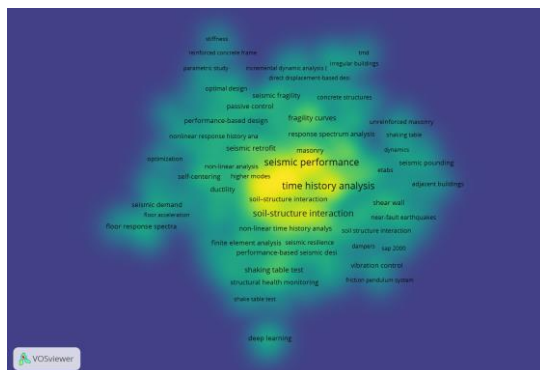
Kontras dengan *frontier* berwarna kuning tersebut, kata kunci *nonlinear time history analysis*, *seismic analysis*, dan *earthquake* tampak dalam warna biru-hijau yang lebih tua, menandakan bahwa topik-topik ini telah mapan sejak awal periode amatan dan terus diteliti secara konsisten sepanjang dekade. Demikian pula, *soil-structure interaction* dan *seismic performance* yang berada di tengah spektrum warna mencerminkan topik yang sudah berkembang secara substansial sejak 2019 namun tetap relevan hingga saat ini. Pola temporal ini secara keseluruhan menggambarkan dinamika evolusi bidang yang sehat, di mana fondasi tematik yang mapan terus diperkaya oleh gelombang pendekatan dan metodologi baru.



Gambar 7. Overlay visualization peta ko-kemunculan kata kunci dengan representasi temporal rata-rata publikasi (2019–2023)

Analisis density visualization

Visualisasi distribusi intensitas penelitian melalui *density visualization* ditampilkan pada Gambar 8. *Density visualization* intensitas konsentrasi penelitian per wilayah peta berikut.



Gambar 8. *Density visualization* intensitas konsentrasi penelitian per wilayah peta

Gambar 8 menyajikan representasi visual kerapatan penelitian dalam ruang peta bibliometrik, di mana zona berwarna kuning terang menandai wilayah dengan konsentrasi penelitian tertinggi, diikuti hijau untuk intensitas sedang, dan biru untuk intensitas rendah. *Density visualization* ini mengkonfirmasi secara visual bahwa pusat gravitasi penelitian global dalam bidang analisis respons seismik terletak pada gugus kata kunci *time history analysis* dan *seismic performance* di bagian tengah peta, yang membentuk zona kuning paling intens. Hal ini menegaskan bahwa di antara seluruh pendekatan dan topik yang ada dalam bidang

ini, dua tema tersebut secara konsisten mendominasi agenda penelitian global selama satu dekade terakhir.

Zona hijau yang mengelilingi pusat kuning mencakup wilayah *soil-structure interaction*, *nonlinear analysis*, *pushover analysis*, *seismic design*, dan *finite element analysis*. Zona ini merepresentasikan lapisan kedua dari penelitian yang aktif dan produktif, yang secara reguler menghasilkan kontribusi ilmiah substansial meskipun tidak sepusat tema inti. Zona biru yang tersebar di pinggiran peta merepresentasikan topik-topik yang masih relatif baru atau sangat spesifik, seperti *friction pendulum system*, *structural health monitoring*, *deep learning*, dan *shake table test*. Posisi perifer ini tidak berarti bahwa topik-topik tersebut kurang penting, melainkan justru mengindikasikan bahwa topik-topik ini mewakili peluang penelitian yang masih terbuka luas untuk eksplorasi lebih mendalam.

Sintesis temuan dan implikasi untuk penelitian Indonesia

Sintesis keseluruhan temuan dari penelitian bibliometrik ini menghasilkan beberapa wawasan strategis yang memiliki implikasi langsung bagi perkembangan penelitian rekayasa seismik, khususnya di Indonesia. Pertama, struktur intelektual bidang ini sangat terpolarisasi di sekitar dua tema inti yaitu *time history analysis* dan *seismic performance*, yang bersama-sama membentuk kerangka konseptual dominan tempat sebagian besar penelitian berlabuh. Polarisasi ini memiliki konsekuensi praktis: peneliti yang hendak memberikan kontribusi yang diakui secara global hampir pasti perlu menempatkan penelitiannya dalam kaitannya dengan salah satu atau kedua tema sentral ini, meskipun perspektif atau metodologi spesifik yang ditawarkan bersifat inovatif.

Kedua, kemunculan *deep learning* sebagai *frontier* terkini dalam peta analisis seismik mengisyaratkan bahwa batas antara rekayasa struktural konvensional dan ilmu komputer semakin cair. Peneliti yang mampu

mengintegrasikan keahlian dalam analisis struktural dengan pemahaman mendalam mengenai arsitektur jaringan saraf tiruan dan teknik *machine learning* akan berada pada posisi yang sangat kompetitif untuk menghasilkan kontribusi penelitian yang tinggi dampaknya dalam waktu dekat. Institusi-institusi pendidikan teknik sipil perlu mempertimbangkan untuk mengintegrasikan kompetensi *data science* dalam kurikulum mereka sebagai respons terhadap tren ini.

Ketiga, ketidakhadiran Indonesia dalam peta afiliasi global yang teridentifikasi dalam analisis ini merupakan sinyal yang serius dan memerlukan respons sistematis dari komunitas akademis teknik sipil nasional. Mengingat bahwa Indonesia menanggung risiko seismik yang sangat tinggi dan memiliki stok bangunan yang sangat besar dalam kondisi kerentanan yang beragam, sangat dibutuhkan peneliti Indonesia yang mampu menghasilkan pengetahuan yang relevan secara lokal namun berkualitas dan berdampak secara global. Langkah-langkah konkret yang dapat diambil mencakup peningkatan kolaborasi penelitian dengan institusi-institusi riset terkemuka di China, Iran, Italia, dan Amerika Serikat yang mendominasi output publikasi global, pemutakhiran standar desain seismik nasional SNI 1726 yang berbasis pada temuan-temuan terkini dalam literatur internasional, serta pengembangan basis data rekaman gempa lokal Indonesia yang dapat digunakan sebagai masukan analisis *time history* dalam penelitian-penelitian berikutnya.

Kesimpulan

Penelitian bibliometrik ini berhasil memetakan lanskap intelektual bidang analisis respons seismik struktur bangunan secara komprehensif melalui analisis terhadap 1.358 artikel terindeks Scopus pada periode 2015 hingga 2025. Volume publikasi tumbuh dari 54 artikel pada 2015 menjadi 212 artikel pada 2025, mencerminkan pertumbuhan kumulatif sebesar 293% yang mengkonfirmasi vitalitas

dan relevansi bidang ini dalam agenda penelitian global.

Analisis jaringan *co-occurrence* kata kunci mengidentifikasi lima kluster tematik yang terdefinisi dengan baik. *Time history analysis* (89 kemunculan) dan *seismic performance* (78 kemunculan) membentuk inti jaringan penelitian, sementara *soil-structure interaction* (48 kemunculan) menjadi kluster tematik terbesar kedua. *Overlay visualization* mengungkapkan bahwa *deep learning* dan *seismic resilience* merupakan *frontier* penelitian yang paling mutakhir, mengisyaratkan pergeseran paradigma menuju integrasi kecerdasan buatan dan pendekatan berbasis ketangguhan infrastruktur dalam rekayasa seismik.

China mendominasi output publikasi global dengan 295 artikel, diikuti Iran (183) dan India (163). *Engineering Structures* menjadi sumber jurnal terdepan dengan 144 artikel, sementara Kim J. merupakan penulis paling produktif dengan 11 artikel. Meskipun Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia, kontribusinya terhadap publikasi internasional mengenai respons seismik struktur bangunan masih relatif rendah, yaitu hanya sekitar 1,4% dari total publikasi yang dianalisis. Angka ini jauh di bawah negara-negara seperti China, Iran, India, Italia, dan Amerika Serikat yang mendominasi lanskap penelitian global pada bidang tersebut.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan basis data tunggal yaitu Scopus yang mungkin tidak menangkap seluruh literatur relevan, terutama publikasi dalam bahasa selain Inggris. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan data dari *Web of Science* dan Google Scholar, memperluas analisis ke dimensi *co-authorship* dan *bibliographic coupling*, serta mengeksplorasi secara mendalam kluster *deep learning* dan *seismic resilience* yang telah teridentifikasi sebagai area dengan potensi kontribusi penelitian paling tinggi pada periode mendatang.

Daftar Pustaka

- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2022). *Indeks risiko bencana Indonesia 2022*. Jakarta: BNPB.
- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Hoboken, NJ: Pearson.
- De Domenico, D., & Ricciardi, G. (2019). An enhanced base isolation system equipped with optimal tuned mass damper inerter. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(5), 1169–1192. <https://doi.org/10.1002/eqe.3011>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Federal Emergency Management Agency. (2020). *FEMA P-2090: Recommended options for improving the built environment for post-earthquake reoccupancy*. Washington, DC: FEMA.
- Filiatrault, A., & Sullivan, T. (2014). Performance-based seismic design of nonstructural building components. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 17–46. <https://doi.org/10.1007/s11803-014-0238-9>
- Hosseini, M., & Farsangi, E. N. (2021). Seismic performance assessment of reinforced concrete frames under near-fault ground motions. *Engineering Structures*, 247, 113081. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113081>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9). <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Kim, J., & Lee, T. H. (2022). Machine learning-based prediction of seismic response of building structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 83(4), 543–557. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.83.4.543>
- Lourenço, P. B., & Pinto Cruz, J. M. (2020). Seismic assessment of unreinforced masonry buildings. *Engineering Structures*, 214, 110621. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110621>
- Nascimbene, R., & Pavese, A. (2021). Seismic fragility of existing reinforced concrete frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(3), 1397–1425. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01021-x>
- Noureldin, M., & Kim, J. (2021). Seismic performance-based design optimization using deep reinforcement learning. *Engineering Structures*, 246, 112943. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112943>
- Putra, F. S., & Saputra, E. (2026). Perbandingan respons struktur gedung dengan variasi bentuk denah menggunakan metode respons spektrum dan *time history*. *Proceeding Civil Engineering Research Forum*, 5(2), 14–22.
- Silvestri, S., Trombetti, T., Gasparini, G., & Ricci, I. (2020). Direct five-step procedure for the preliminary seismic design of buildings with added viscous dampers. *Engineering Structures*, 173, 933–950. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.050>
- SNI 1726:2019. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>