

Resiliensi Sistem Distribusi Air Minum terhadap Gempa dan Likuefaksi: Tinjauan Kritis dengan Konteks Sumatera Barat

Syawal Andika Putra, Puti Sri Komala*

Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

*Koresponden email: putisrikomala@eng.unand.ac.id

Diterima: 26 Mei 2026

Disetujui: 6 Juni 2026

Abstract

Drinking water distribution systems are vital infrastructures that are highly vulnerable to earthquakes and liquefaction, particularly in seismically active regions such as West Sumatra. Damage to pipeline networks caused by seismic disturbances can lead to pressure loss, deterioration of water quality, and disruption of service recovery processes. This study aims to evaluate the development of resilience approaches for water distribution systems under earthquake and liquefaction hazards, identify existing research gaps, and formulate contextual resilience enhancement strategies for developing regions. The study employed a critical thematic literature review of scientific articles published between 2010 and 2026, sourced from Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar. The results indicate that resilience evaluation approaches have evolved from reliability-based methods toward integrating Pressure-Driven Analysis (PDA), fragility analysis, and socio-technical resilience. PDA is considered more representative in modeling post-earthquake hydraulic conditions, while fragility analysis is effective in evaluating component failure probabilities based on seismic intensity parameters. In addition, this study proposes an integrated framework that connects seismic hazards, damage probability, hydraulic response, infrastructure interdependency, and recovery strategies within a unified conceptual approach. The proposed framework highlights that hydraulic performance, infrastructure interdependency, and institutional capacity are equally critical in improving post-disaster drinking water service resilience.

Keywords: *earthquake, liquefaction, resilience, water distribution system, west sumatra*

Abstrak

Sistem distribusi air minum merupakan infrastruktur vital yang rentan terhadap gempa bumi dan likuefaksi, khususnya di wilayah rawan seismik seperti Sumatera Barat. Kerusakan jaringan perpipaan akibat gangguan seismik dapat menyebabkan penurunan tekanan distribusi, gangguan kualitas air, serta terhambatnya pemulihan layanan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perkembangan pendekatan resiliensi pada sistem distribusi air terhadap risiko gempa dan likuefaksi, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, serta merumuskan strategi penguatan resiliensi yang kontekstual untuk wilayah berkembang. Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan *critical thematic literature review* terhadap artikel ilmiah pada periode 2010–2026 yang diperoleh dari Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar. Hasil kajian menunjukkan bahwa pendekatan evaluasi resiliensi berkembang dari metode berbasis *reliability* menuju integrasi *Pressure-Driven Analysis* (PDA), *fragility analysis*, dan *socio-technical resilience*. PDA lebih representatif dalam memodelkan kondisi hidraulik pascagempa, sedangkan *fragility analysis* efektif untuk mengevaluasi probabilitas kerusakan berdasarkan parameter intensitas seismik. Selain itu, penelitian ini juga mengusulkan kerangka integratif yang menghubungkan bahaya seismik, probabilitas kerusakan, respons hidraulik, interdependensi infrastruktur, dan strategi pemulihan dalam satu pendekatan konseptual. Kerangka yang diusulkan menunjukkan bahwa performa hidraulik, interdependensi infrastruktur, dan kapasitas kelembagaan memiliki peran yang sama penting dalam meningkatkan resiliensi layanan air minum pascabencana.

Kata Kunci: *gempa bumi, likuefaksi, resiliensi, sistem distribusi air, sumatera barat*

1. Pendahuluan

Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) merupakan infrastruktur vital yang memainkan peran krusial dalam menjaga kesejahteraan sosial, kesehatan publik, dan aktivitas ekonomi masyarakat [1],[2]. Kegagalan sistem distribusi air dalam SPAM pascabencana alam tidak hanya menghentikan pasokan air bersih, tetapi juga dapat memicu krisis kesehatan masyarakat dan menghambat upaya pemulihan kota secara sistemik [1], [3], [4]. Provinsi Sumatera Barat, khususnya Kota Padang, secara geografis berada pada posisi tektonik yang sangat rentan karena terletak di pertemuan lempeng Indo-Australia dan Eurasia yang

bergerak aktif. Aktivitas seismik di wilayah ini sangat dipengaruhi oleh zona subduksi *megathrust* di lepas pantai dan jalur patahan aktif dari segmen Patahan Sumatra di daratan [5], [6].

Pengalaman empiris menunjukkan bahwa gempa bumi berkekuatan M_w 7,6 pada 30 September 2009 menyebabkan kerusakan masif pada infrastruktur kunci di Sumatera Barat, termasuk terputusnya pipa induk utama yang mengakibatkan kehilangan total pasokan air sebesar 500 L/detik bagi penduduk kota [3], [5]. Selain guncangan tanah primer, ancaman likuefaksi menjadi faktor risiko yang signifikan bagi jaringan pipa bawah tanah, terutama di wilayah pesisir Padang yang didominasi oleh tanah aluvial jenuh air dan memiliki kandungan air tanah yang tinggi. Fenomena likuefaksi dapat memicu kegagalan daya dukung tanah berupa penurunan (*settlement*), semburan pasir (*sand boil*), dan pergeseran lateral (*lateral spreading*). Kondisi tersebut dapat merusak integritas jaringan pipa distribusi secara mekanis [7].

Dalam konteks teknik infrastruktur, resiliensi didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk bertahan terhadap gangguan, mempertahankan kontinuitas layanan, dan pulih dengan cepat setelah bencana [8], [9], [10]. Pendekatan evaluasi resiliensi sistem distribusi air telah berkembang dari analisis keandalan hidrolik konvensional menuju evaluasi kuantitatif berbasis analisis kerapuhan (*fragility analysis*), simulasi hidraulik, dan analisis interdependensi antar infrastruktur kritis [3], [9], [11]. Namun demikian, implementasi pendekatan tersebut di wilayah berkembang masih menghadapi keterbatasan data, kapasitas institusi, serta kesiapan infrastruktur pendukung.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas resiliensi sistem distribusi air terhadap gempa bumi, integrasi risiko multibahaya, khususnya kombinasi gempa dan likuefaksi, masih terbatas. Selain itu, sebagian besar model resiliensi dikembangkan berdasarkan karakteristik infrastruktur dan tata kelola di negara maju sehingga belum sepenuhnya sesuai dengan konteks wilayah berkembang dan rawan seismik seperti Sumatera Barat [3], [10]. Kesenjangan penelitian juga terlihat pada keterbatasan integrasi aspek interdependensi infrastruktur, kapasitas kelembagaan, serta mekanisme pembiayaan pemulihan bencana dalam evaluasi resiliensi sistem distribusi air. Padahal, keterlambatan akses pendanaan dan lemahnya koordinasi antarinstansi sering kali menjadi hambatan utama dalam proses restorasi layanan pascabencana [10], [12].

Berbeda dengan kajian sebelumnya, artikel ini tidak hanya mengevaluasi perkembangan metodologi resiliensi sistem distribusi air, tetapi juga mengusulkan kerangka integratif resiliensi berbasis multibahaya yang menghubungkan aspek teknis, probabilistik, dan *socio-technical* untuk mendukung evaluasi sistem distribusi air pada wilayah berkembang rawan seismik. Oleh karena itu, artikel *review* ini bertujuan untuk mengevaluasi dan menyintesis berbagai pendekatan evaluasi resiliensi sistem distribusi air terhadap risiko gempa bumi dan likuefaksi, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, serta merumuskan strategi penguatan resiliensi yang kontekstual bagi wilayah yang rawan gempa bumi di Sumatera Barat.

2. Metode Penelitian

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *critical thematic literature review* untuk mengevaluasi perkembangan metodologi dan pendekatan evaluasi resiliensi sistem distribusi air minum terhadap risiko gempa bumi dan likuefaksi. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan sintesis kritis terhadap berbagai penelitian dengan karakteristik metodologi dan konteks yang beragam, termasuk pendekatan teknis, probabilistik, dan *socio-technical resilience*. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis metodologi, indikator resiliensi, dan kesenjangan penelitian, serta mengidentifikasi peluang integrasi berbagai pendekatan evaluasi resiliensi di wilayah yang rawan gempa bumi. Selain itu, sintesis yang dilakukan diarahkan untuk mendukung pengembangan kerangka integratif sebagai dasar penguatan resiliensi sistem distribusi air minum.

Strategi Pencarian dan Seleksi Literatur

Penelusuran artikel dilakukan melalui basis data Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar dengan menggunakan kombinasi kata kunci *water distribution system resilience*, *seismic resilience*, *liquefaction*, *water infrastructure recovery*, dan *critical infrastructure resilience*. Literatur yang digunakan dibatasi pada artikel ilmiah *peer-reviewed* yang diterbitkan pada rentang tahun 2010–2026 dan relevan dengan resiliensi sistem distribusi air, risiko gempa bumi, dan likuefaksi. Seleksi literatur dilakukan secara *purposive* dan bertahap melalui evaluasi judul, abstrak, serta isi artikel berdasarkan kesesuaiannya dengan tema dan kontribusinya terhadap tujuan penelitian. Dari 38 artikel yang teridentifikasi, 27 artikel lolos tahap penyaringan awal dan 21 artikel dipilih untuk analisis tematik serta sintesis kritis. Literatur terpilih kemudian diklasifikasikan berdasarkan tema utama untuk mendukung identifikasi kesenjangan penelitian serta pengembangan kerangka resiliensi.

Teknik Analisis Literatur

Literatur yang terpilih dianalisis secara kualitatif menggunakan pendekatan analisis tematik dan sintesis kritis. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengidentifikasi pola kecenderungan metodologi dan kesenjangan penelitian dari berbagai studi dengan karakteristik yang beragam. Analisis dilakukan dengan mengelompokkan penelitian ke dalam beberapa tema utama, meliputi konsep resiliensi sistem distribusi air, dampak gempa bumi dan likuefaksi terhadap jaringan perpipaan, pendekatan evaluasi resiliensi berbasis *hydraulic modeling* dan *fragility analysis*, serta strategi *recovery* dan penguatan resiliensi pascabencana. Selain itu, dilakukan analisis komparatif terhadap fokus penelitian, metode yang digunakan, parameter evaluasi, temuan utama, dan keterbatasan masing-masing studi untuk mengidentifikasi perkembangan metodologi serta *research gap*. Evaluasi kritis juga dilakukan terhadap potensi implementasi masing-masing pendekatan dalam konteks wilayah berkembang yang memiliki keterbatasan infrastruktur dan sumber daya. Sintesis literatur selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi peluang integrasi antara pendekatan teknis, probabilistik, dan *socio-technical resilience* sebagai dasar pengembangan kerangka konseptual resiliensi sistem distribusi air di wilayah rawan seismik seperti Sumatera Barat.

3. Hasil dan Pembahasan

Konsep Resiliensi Sistem Distribusi Air

Resiliensi dalam konteks Sistem Distribusi Air (*Water Distribution System/WDS*) didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk bertahan, beradaptasi, dan pulih dengan cepat dari gangguan yang merusak [9], [13]. Konsep ini melampaui keandalan (*reliability*) tradisional yang hanya mengukur probabilitas kepuasan layanan dalam kondisi operasional tertentu [13]. Resiliensi mencakup empat dimensi utama (4R): *Robustness* (kekuatan fisik infrastruktur), *Redundancy* (ketersediaan jalur alternatif), *Rapidity* (kecepatan restorasi), dan *Resourcefulness* (kapasitas mobilisasi sumber daya) [8],[9],[14]. Meskipun konsep 4R telah banyak digunakan dalam evaluasi resiliensi sistem distribusi air, implementasinya di wilayah berkembang seperti Sumatera Barat masih menghadapi berbagai keterbatasan. Oleh karena itu, konsep resiliensi di wilayah berkembang memerlukan pendekatan yang lebih kontekstual dan adaptif. Perkembangan penelitian terkait resiliensi sistem distribusi air terhadap risiko gempa dan likuefaksi menunjukkan adanya pergeseran pendekatan dari analisis keandalan konvensional menuju pendekatan yang lebih integratif. Pendekatan awal umumnya berfokus pada evaluasi kerusakan fisik jaringan dan kemampuan sistem dalam mempertahankan layanan, sedangkan penelitian terkini mulai mengintegrasikan aspek hidraulik, kerentanan infrastruktur, proses pemulihan, serta faktor sosial dan kelembagaan. Berbagai metodologi evaluasi tersebut dibahas lebih lanjut pada bagian **Pendekatan Evaluasi Resiliensi**, sedangkan ringkasan penelitian terdahulu disajikan pada **Tabel 1**.

Studi awal menekankan pentingnya identifikasi komponen kritis sistem perpipaan serta penggunaan *Pressure-Driven Analysis* (PDA), yang dinilai lebih representatif dibandingkan *Demand-Driven Analysis* (DDA) dalam kondisi jaringan terganggu [13], [15]. Penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa redundansi jaringan, *node* kritis, dan karakteristik kerusakan pipa berpengaruh terhadap tingkat *serviceability* serta kecepatan pemulihan layanan pascagempa [8], [9], [11]. Selain menurunkan kinerja hidraulik, gempa juga berpotensi meningkatkan risiko kontaminasi pada jaringan distribusi [16], meskipun berbagai indeks resiliensi yang ada masih dinilai belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasional yang sebenarnya [4].

Dalam konteks Indonesia, penelitian mulai menyoroti pentingnya interdependensi antara infrastruktur dan tata kelola terhadap resiliensi sistem air minum [3], [10]. Gangguan pada infrastruktur pendukung, seperti listrik dan jaringan transportasi, dapat memengaruhi efektivitas proses pemulihan layanan pascabencana. Sementara itu, penelitian di Sumatera Barat masih didominasi oleh kajian bahaya seismik dan karakteristik geologi, seperti analisis bahaya gempa, kerentanan tanah, dan potensi likuefaksi [6], [7], [17], [18]. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada identifikasi bahaya dan aspek teknis jaringan perpipaan secara terpisah. Integrasi multibahaya gempa-likuefaksi, interdependensi infrastruktur kritis, serta karakteristik wilayah berkembang seperti Sumatera Barat masih relatif terbatas. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan untuk mengembangkan kerangka resiliensi SPAM yang lebih komprehensif agar mampu merepresentasikan kondisi operasional sistem secara lebih realistis serta mendukung strategi mitigasi dan pemulihan yang lebih efektif.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terdahulu Terkait Resiliensi Sistem Distribusi Air terhadap Gempa dan Likuefaksi

Peneliti	Lokasi Studi	Fokus Penelitian	Metode/Pendekatan	Parameter Utama	Temuan Utama	Keterbatasan Penelitian
Wang et al. (2010)	China	Risiko seismik sistem distribusi air	<i>Seismic risk assessment</i> dan <i>Upgrade Benefit Index</i> (UBI)	Kerusakan pipa, <i>serviceability</i>	Pipa kritis berpengaruh besar terhadap efektivitas pemulihan sistem	Belum mempertimbangkan aspek kualitas air pascagempa
Shuang et al. (2019)	Kajian global	Metode kuantitatif resiliensi WDS	<i>Literature review</i>	<i>Reliability, resilience index</i>	PDA dinilai lebih representatif dibandingkan DDA dalam kondisi jaringan terganggu	Kajian masih didominasi konteks negara maju
Liu et al. (2020)	Mianzhu, China	Strategi pemulihan pascagempa	<i>Recovery-based resilience analysis</i>	<i>Recovery time</i> , restorasi layanan	Redundansi jaringan berpotensi meningkatkan resiliensi sistem	Fokus utama pada jaringan perpipaan
Hou et al. (2021)	China	Evaluasi performa seismik WDS	<i>Fragility analysis</i>	PGA, tekanan jaringan	Node penting memengaruhi tingkat <i>serviceability</i> sistem	Belum mengintegrasikan dampak likuefaksi
Wu et al. (2023)	Shenzhen, China	Evaluasi kuantitatif resiliensi sistem distribusi air	<i>Fragility-based resilience model</i>	<i>Robustness, redundancy</i>	Jaringan pipa menjadi subsistem paling kritis dalam resiliensi SPAM	Aspek sosial dan kelembagaan belum dianalisis secara mendalam
Hou et al. (2023)	China	Resiliensi hidrolik dan kualitas air	<i>Hydraulic-water quality simulation</i>	Tekanan jaringan dan kualitas air	Gempa berpotensi memicu risiko kontaminasi pada jaringan distribusi	Fokus pada simulasi teknis sistem
Leštáková et al. (2024)	Kajian global	Evaluasi metrik resiliensi WDS	<i>Critical review</i>	<i>Resilience metrics</i>	Banyak indeks resiliensi belum merepresentasikan kondisi operasional nyata	Belum fokus pada skenario multi-bahaya
Shubandrio et al. (2022)	Padang, Indonesia	Interdependensi infrastruktur kritis	<i>Critical infrastructure analysis</i>	Ketergantungan listrik dan jalan	Gangguan infrastruktur pendukung memperlambat proses pemulihan layanan air	Pendekatan evaluasi masih bersifat kualitatif
Triyoso et al. (2020)	Padang dan Bengkulu, Indonesia	Fungsi bahaya seismik pesisir Sumatra	PSHA terintegrasi dan <i>seismicity smoothing</i>	Probabilitas <i>exceedance</i> , model GMPE	Model GMPE ZH97 dan AT06 dinilai paling sesuai untuk wilayah pesisir Sumatra	Pemodelan terbatas pada radius sumber gempa sejauh 100 km
Putri et al. (2023)	Air Tawar Barat, Padang	Kerentanan seismik tanah pesisir	Metode HVSr (<i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i>)	Frekuensi alamiah (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0)	Wilayah pesisir menunjukkan indeks kerentanan seismik sangat tinggi	Kajian terbatas pada satu wilayah studi
Sari et al. (2023)	Kabupaten Solok, Sumatera Barat	Bahaya seismik untuk mitigasi daerah	PSHA (<i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>)	PGA batuan dasar	Arosuka memiliki potensi PGA sangat tinggi akibat pengaruh Sesar Siliti	Belum mengevaluasi dampak terhadap infrastruktur air secara spesifik
Razi et al. (2024)	Padang, Indonesia	Pemetaan kerentanan likuefaksi regional	Analisis NDWI berbasis <i>cloud computing</i> dan citra Sentinel-2	Kandungan air tanah	NDWI efektif mengidentifikasi zona rentan likuefaksi di wilayah pesisir Padang	Belum mengintegrasikan karakteristik fisik tanah dan jaringan sistem distribusi air
Yuliandra et al. (2026)	Indonesia	Variabel resiliensi SPAM	<i>Fuzzy Delphi Method</i> (FDM)	Tata kelola dan kelembagaan	Faktor institusi berpengaruh terhadap resiliensi sistem air minum	Belum mengintegrasikan risiko seismik secara spesifik

Meskipun fokus utama penelitian ini adalah sistem distribusi air, keberlanjutan layanan distribusi tetap dipengaruhi oleh subsistem lain dalam SPAM, seperti Instalasi Pengolahan Air (IPA), reservoir, pompa, dan sumber air baku. Oleh karena itu, evaluasi resiliensi sistem distribusi air perlu mempertimbangkan keterkaitan antarsubsistem tersebut karena gangguan pada satu komponen dapat memengaruhi kontinuitas layanan distribusi secara keseluruhan, sebagaimana disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Faktor Kepentingan Subsistem dalam Resiliensi WDS

Subsistem	Importance Factor	Komponen Utama
Jaringan Pipa	0,7	Jalur distribusi dan pipa transmisi terkubur
Infrastruktur Atas Tanah	0,2	Instalasi Pengolahan Air (IPA), reservoir, dan pompa
Sumber Air	0,1	Kualitas air baku dan kuantitas suplai

Sumber: [9]

Nilai *importance factor* diperoleh berdasarkan kontribusi relatif masing-masing subsistem terhadap keberlanjutan *serviceability* pada sistem distribusi air pascagempa menggunakan pendekatan *fragility-based resilience model* [9]. Jaringan pipa memiliki bobot tertinggi (0,7) karena berperan langsung dalam menjaga kontinuitas distribusi air dan merupakan komponen yang paling rentan terhadap kerusakan akibat gempa bumi serta likuefaksi. Infrastruktur atas tanah, seperti Instalasi Pengolahan Air (IPA), reservoir, dan pompa, memiliki kontribusi sedang (0,2) karena berpengaruh terhadap kapasitas suplai dan tekanan distribusi, sedangkan sumber air memiliki kontribusi lebih rendah (0,1) karena umumnya tidak mengalami kerusakan langsung seperti jaringan perpipaan. Dominasi *importance factor* pada jaringan pipa menunjukkan bahwa prioritas mitigasi seismik perlu difokuskan pada peningkatan ketahanan pipa transmisi dan distribusi sebagai komponen utama penyedia layanan air minum. Namun demikian, pembobotan tersebut masih bersifat umum dan dapat berbeda pada setiap wilayah, tergantung pada konfigurasi jaringan, karakteristik sistem distribusi air, tingkat redundansi, serta ketergantungan antarsubsistem.

Dampak Gempa terhadap Sistem Distribusi Air

Guncangan seismik menyebabkan kegagalan fungsional melalui kerusakan mekanis pada pipa dan sambungan, berupa kebocoran (*leakage*) dan putusnya pipa (*breakage*) yang dapat memperburuk kondisi hidraulik jaringan dan meningkatkan risiko gangguan pada komponen distribusi lainnya [9], [11]. Dampak langsung dari kerusakan ini adalah hilangnya tekanan secara drastis dalam jaringan yang menyebabkan penurunan fungsionalitas sistem (*System Serviceability Index*) [11], [15]. Studi kasus gempa besar seperti Kobe 1995 menunjukkan bahwa lebih dari 1,1 juta orang kehilangan akses air, dan pemulihan total memakan waktu 2 bulan [8], [9]. Pengalaman gempa Padang 2009 (Mw 7,6) menunjukkan bahwa terputusnya pipa induk utama dapat mengakibatkan kehilangan kapasitas suplai air sebesar 500 L/detik secara instan [3], [5]. Selain aspek kontinuitas dan kuantitas distribusi, resiliensi sistem distribusi air juga dipengaruhi oleh penurunan kualitas air akibat intrusi sedimen, logam berat dari lapisan tanah, maupun pembusukan materi organik di dalam pipa yang rusak. Penurunan tekanan jaringan akibat kebocoran juga dapat meningkatkan potensi kontaminasi melalui retakan dan sambungan pipa yang rusak, yang jika tidak dimitigasi dapat memicu wabah penyakit pascabencana [9], [16].

Pengaruh Likuefaksi terhadap Infrastruktur Perpipaan

Likuefaksi terjadi ketika tanah yang jenuh air kehilangan kekuatannya akibat guncangan seismik, sebuah fenomena yang berdampak signifikan pada pipa bawah tanah. Mekanisme utamanya meliputi penurunan tanah (*settlement*) dan pergeseran lateral (*lateral spreading*) [7]. Fenomena ini menyebabkan peningkatan tegangan dan deformasi berlebihan pada sambungan pipa yang sering kali melampaui batas elastisitas material, sehingga memicu kegagalan sistemik bahkan pada pipa dengan material ulet sekalipun [11]. Kerentanan likuefaksi ini menjadikannya ancaman utama bagi jaringan perpipaan dibandingkan dengan guncangan tanah primer di wilayah pesisir dengan dominasi sedimen lunak [9], [11]. Penggunaan metode *Normalized Difference Water Index* (NDWI) berbasis citra satelit Sentinel-2 membuktikan bahwa wilayah dengan kandungan air tanah tinggi, seperti Kecamatan Koto Tangah dan Padang Utara, memiliki korelasi langsung dengan kerentanan likuefaksi yang ekstrem [7]. Strategi mitigasi harus mempertimbangkan ketebalan lapisan tanah yang tidak terlikuefaksi sebagai parameter krusial dalam desain pipa [19]. Kompleksitas dampak gempa dan likuefaksi terhadap jaringan perpipaan mendorong berkembangnya berbagai pendekatan evaluasi resiliensi untuk memodelkan tingkat kerusakan serta kemampuan pemulihan sistem.

Pendekatan Evaluasi Resiliensi

Tinjauan literatur menunjukkan adanya perkembangan metodologi evaluasi resiliensi sistem distribusi air dari pendekatan berbasis indikator sederhana menuju metode yang lebih komprehensif dan representatif dalam menggambarkan kondisi sistem pascabencana. Pergeseran dari analisis berbasis permintaan (DDA) menuju simulasi hidrolik berbasis tekanan (PDA) yang lebih representatif dalam memodelkan kondisi jaringan yang rusak [4], [13], [14]. Meskipun pendekatan PDA dinilai mampu merepresentasikan kondisi jaringan rusak secara lebih realistis dibandingkan dengan DDA, penerapannya masih menghadapi keterbatasan karena kebutuhan data operasional yang detail umumnya belum tersedia secara memadai dalam sistem distribusi air di Indonesia [13], [14]. Evaluasi modern menggunakan *fragility analysis* untuk menentukan probabilitas kegagalan komponen berdasarkan parameter intensitas seperti *Peak Ground Acceleration* (PGA) atau *Peak Ground Velocity* (PGV) [9], [11]. Pendekatan ini sering kali diintegrasikan dengan sistem informasi geografis (GIS) dan model probabilistik seperti *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) dan *Probabilistic Liquefaction Hazard Analysis* (PLHA) untuk memetakan risiko secara spasial [11], [19]. Selain itu, dimensi resiliensi sosioteknis mulai diadopsi dengan mempertimbangkan kapasitas tata kelola dan institusi melalui *Fuzzy Delphi Method* (FDM) [10]. Namun demikian, setiap pendekatan masih memiliki kelebihan, keterbatasan, serta kesenjangan penelitian yang berbeda-beda. Klasifikasi dan evaluasi metodologi resiliensi sistem distribusi air disajikan pada **Tabel 3**.

Setiap metode evaluasi resiliensi memiliki karakteristik, kelebihan, dan keterbatasan yang berbeda dalam merepresentasikan dampak gempa dan likuefaksi terhadap sistem distribusi air. PDA dinilai lebih representatif dalam memodelkan kondisi hidraulik jaringan pascakerusakan karena mampu mempertimbangkan penurunan tekanan aktual pada jaringan distribusi air [13], [14]. Sementara itu, *fragility analysis* efektif untuk mengevaluasi probabilitas kegagalan komponen infrastruktur berdasarkan parameter intensitas seismik seperti PGA dan PGV [9], [11]. Sebagai contoh, peningkatan nilai PGA berkorelasi dengan meningkatnya probabilitas kerusakan pipa dan penurunan *serviceability* pada sistem distribusi air [11]. Di sisi lain, pendekatan *socio-technical resilience* berperan penting dalam mengevaluasi kapasitas tata kelola, kelembagaan, dan pemulihan layanan pascabencana, khususnya dalam konteks wilayah berkembang [10]. Meskipun demikian, sebagian besar metode masih dikembangkan secara parsial dan cenderung berfokus pada aspek tertentu, baik performa hidraulik, probabilitas kerusakan fisik, maupun kapasitas kelembagaan. Selain itu, integrasi interaksi multibahaya, interdependensi infrastruktur kritis, serta aspek kualitas air pascabencana masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan perlunya pengembangan pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif melalui integrasi metode teknis, probabilistik, dan *socio-technical* untuk menghasilkan model resiliensi yang lebih representatif bagi wilayah rawan seismik seperti Sumatera Barat.

Risiko Seismik dan Kerentanan Sistem Distribusi Air di Sumatera Barat

Sumatera Barat menghadapi ancaman seismik ganda dari zona subduksi *megathrust* dan jalur Patahan Sumatra [12], [18]. Kondisi tersebut menyebabkan wilayah ini memiliki tingkat bahaya seismik yang relatif tinggi, terutama di kawasan pesisir dan daerah yang berada dekat dengan segmen sesar aktif. Data menunjukkan bahwa wilayah Padang memiliki nilai PGA sebesar 0,70–0,73 g [5], sedangkan wilayah Arosuka, Kabupaten Solok, memiliki nilai PGA sebesar 1,052 g [18]. Nilai tersebut menunjukkan potensi guncangan tanah yang tinggi dan berpotensi meningkatkan kerusakan infrastruktur, termasuk jaringan distribusi air.

Selain intensitas guncangan, karakteristik tanah juga berperan penting dalam menentukan tingkat kerentanan wilayah terhadap dampak seismik. Berdasarkan analisis *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) di kawasan Air Tawar Barat, Padang, diperoleh rentang indeks kerentanan seismik (K_g) sebesar 0,48–320,88 yang mengindikasikan tingginya potensi amplifikasi gelombang seismik [6]. Dominasi sedimen lunak di wilayah pesisir dapat memperbesar respons guncangan tanah dan meningkatkan risiko deformasi tanah yang berdampak pada kerusakan jaringan pipa bawah tanah. Parameter bahaya seismik dan kerentanan tanah di Sumatera Barat disajikan pada **Tabel 4**.

Wilayah pesisir Padang menunjukkan tingkat kerentanan yang signifikan akibat pengaruh sedimen lunak dan potensi amplifikasi seismik, sedangkan Arosuka memiliki tingkat bahaya tertinggi karena kedekatannya dengan Segmen Sesar Suliti. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa wilayah dengan nilai PGA tinggi dan kerentanan tanah yang besar perlu menjadi prioritas dalam perencanaan mitigasi risiko serta peningkatan resiliensi sistem distribusi air.

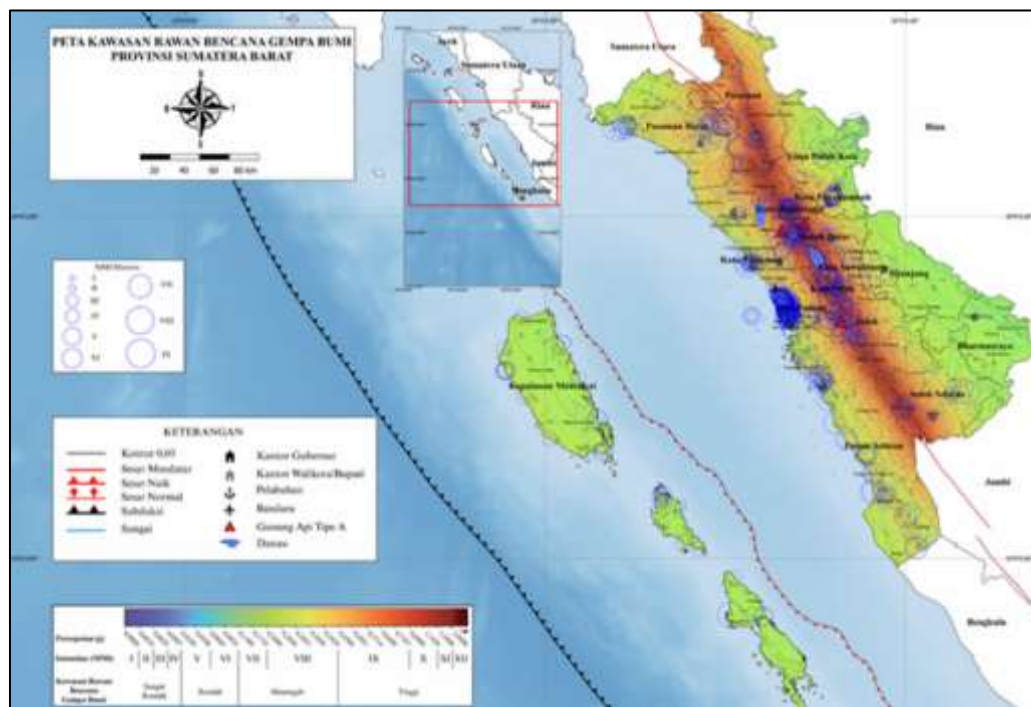
Tabel 3. Klasifikasi dan Evaluasi Metodologi Resiliensi Sistem Distribusi Air

Metode	Referensi	Fokus Utama	Kelebihan	Keterbatasan	Research Gap	Arah Pengembangan	Potensi Implementasi di Sumatera Barat
<i>Surrogate Measures</i>	Shuang et al. (2019), Leštáková et al. (2024)	Efisiensi sistem	Sederhana dan cepat dikalkulasi	Tidak merepresentasikan kondisi kerusakan nyata	Belum mempertimbangkan dinamika sistem pascabencana	Integrasi dengan parameter hidraulik dan indikator resiliensi dinamis	Cocok untuk evaluasi awal
<i>Pressure-Driven Analysis (PDA)</i>	Shuang et al. (2019), Jung & Kim (2020)	Simulasi tekanan jaringan rusak atau bocor	Lebih representatif terhadap kondisi pascagempa	Membutuhkan data operasional detail	Umumnya hanya mengevaluasi kuantitas layanan	Integrasi dengan evaluasi kualitas air dan pemulihan sistem	Potensial pada SPAM perkotaan
<i>Fragility Analysis</i>	Qian et al. (2023), Wu et al. (2023)	Probabilitas kegagalan komponen	Mampu memodelkan risiko seismik	Bergantung pada data kurva kerapuhan untuk setiap material pipa	Sebagian besar masih berbasis parameter statis	Pengembangan <i>time-variant fragility model</i>	Sangat relevan untuk wilayah rawan gempa
<i>Complex Network Analysis</i>	Shuang et al. (2019), Hou et al. (2021)	Topologi, konektivitas, dan redundansi	Identifikasi node kritis efisien	Kurang mempertimbangkan kondisi hidraulik nyata	Belum terintegrasi dengan simulasi operasional aktual	Integrasi dengan PDA dan evaluasi multibahaya	Cocok untuk optimasi jaringan
<i>Smart Water System</i>	Shuang et al. (2019), Jung & Kim (2020)	Monitoring <i>real-time</i>	Deteksi gangguan lebih cepat	Biaya implementasi tinggi	Implementasi pada negara berkembang masih terbatas	Pengembangan sistem monitoring bertahap berbasis kebutuhan lokal	Potensial untuk pengembangan bertahap
<i>Socio-Technical Approach</i>	Shubandrio et al. (2022), Yuliandra et al. (2026)	Tata kelola, kebijakan, institusi, dan interdependensi	Mempertimbangkan kapasitas pemulihan	Cenderung semi-kualitatif	Sulit mengintegrasikan aspek sosial dan teknis secara kuantitatif	Pengembangan model integratif sosioteknis	Sangat relevan untuk konteks Indonesia karena memperkuat kapasitas fiskal dan manajerial pengelola

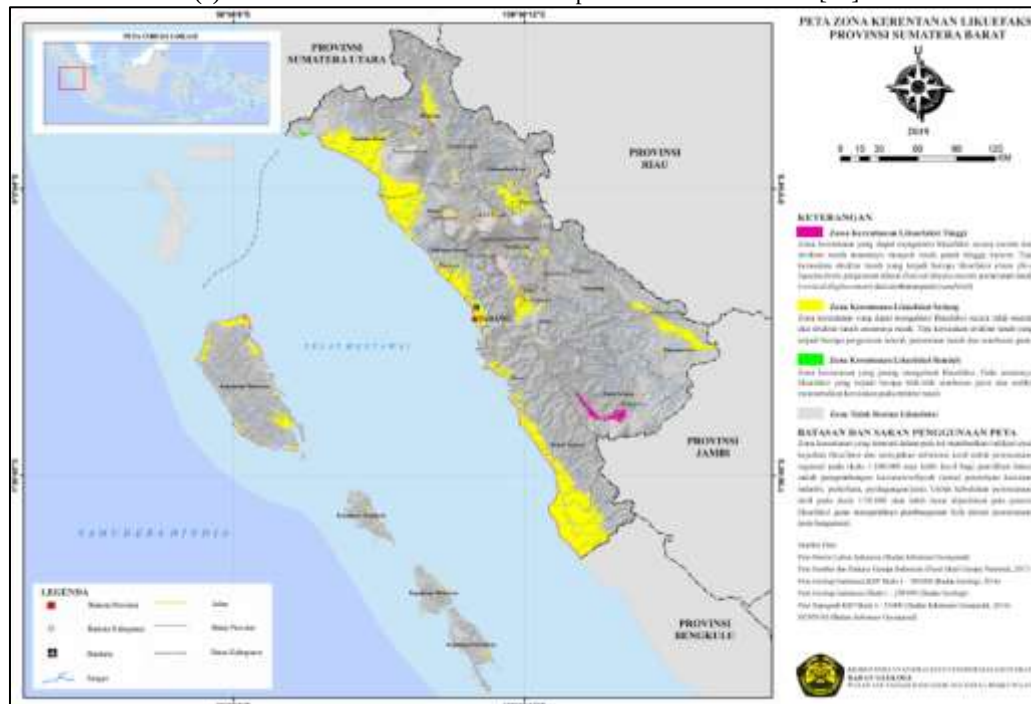
Tabel 4. Parameter Bahaya Seismik dan Kerentanan Tanah di Sumatera Barat

Peneliti	Lokasi	Nilai PGA (<i>Bedrock</i>)	Indeks Kerentanan (Kg)	Kategori Risiko
Sari et al. (2023)	Arosuka (Kabupaten Solok)	1,052 g	-	Sangat Tinggi (Sesar Suliti)
Putra et al. (2012)	Kota Padang	0,70-0,73 g	-	Tinggi (<i>Megathrust</i> Mentawai)
Putri et al. (2023)	Pesisir Air Tawar	-	0,48-320,88	Sangat Tinggi (Amplifikasi Sedimen)

Distribusi spasial kawasan rawan gempa bumi dan zona kerentanan likuefaksi di Sumatera Barat ditunjukkan pada **Gambar 1**.



(a) Peta Kawasan Rawan Bencana Gempa Bumi Sumatera Barat [20]



(b) Peta Zona Kerentanan Likuefaksi Sumatera Barat [21]

Gambar 1. Distribusi Spasial Kawasan Rawan Gempa Bumi (a) dan Zona Kerentanan Likuefaksi di Sumatera Barat (b)

Visualisasi pada kedua peta menunjukkan bahwa wilayah pesisir barat Sumatera Barat memiliki tingkat bahaya seismik dan potensi likuefaksi yang tinggi. Pada peta bahaya gempa, gradasi warna biru-hijau-kuning-merah menunjukkan peningkatan tingkat percepatan tanah dan intensitas gempa, dengan warna merah mengindikasikan tingkat bahaya tertinggi, sedangkan garis hitam bergerigi merepresentasikan zona subduksi dan garis merah menunjukkan keberadaan sesar aktif. Selain itu, lingkaran biru menggambarkan distribusi kejadian gempa historis dengan ukuran lingkaran yang menunjukkan besarnya magnitudo. Sementara itu, pada peta kerentanan likuefaksi, warna merah muda menunjukkan zona kerentanan tinggi, warna kuning menunjukkan kerentanan sedang, sedangkan area berwarna abu-abu menunjukkan tingkat kerentanan rendah hingga tidak rentan. Konsentrasi risiko pada wilayah pesisir yang didominasi oleh sedimen aluvial serta berdekatan dengan sumber gempa *megathrust* berpotensi meningkatkan kerentanan sistem distribusi air minum, khususnya jaringan perpipaan bawah tanah, terhadap deformasi tanah, amplifikasi guncangan, kerusakan sambungan pipa, serta gangguan kontinuitas layanan akibat pengaruh simultan guncangan seismik dan deformasi tanah pascagempa.

Selain risiko fisik, resiliensi sistem distribusi air di Padang juga dipengaruhi oleh interdependensi dengan infrastruktur pendukung seperti listrik dan transportasi. Gangguan pada infrastruktur pendukung tersebut dapat memperlambat proses distribusi air dan pemulihan layanan pascabencana [3]. Penilaian terhadap kritikalitas dan kehilangan fungsi infrastruktur di Padang dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Penilaian Kritikalitas dan Kehilangan Fungsi Infrastruktur di Padang

Infrastruktur	Tingkat Kritikalitas	Kehilangan Fungsi	Dampak terhadap Sistem Distribusi Air Minum
Rumah Sakit	5 (<i>Vital</i>)	Tinggi	Kebutuhan air bersih meningkat secara mendesak
Sistem Air Minum	5 (<i>Vital</i>)	Moderat	Penurunan tekanan dan debit distribusi
Gardu Listrik	5 (<i>Vital</i>)	Tinggi	Pompa dan IPA berhenti beroperasi
Jaringan Jalan	4 (<i>Major</i>)	Beragam	Mobilisasi kru dan distribusi perbaikan terhambat

Sumber: [3]

Infrastruktur vital di Kota Padang memiliki tingkat kritikalitas yang sangat tinggi, khususnya rumah sakit, sistem air minum, dan gardu listrik yang semuanya berada pada kategori vital dengan potensi kehilangan fungsi yang signifikan saat terjadi bencana. Kondisi ini mengindikasikan bahwa gangguan pada sektor-sektor tersebut dapat berdampak langsung terhadap sistem distribusi air minum, terutama dalam hal peningkatan kebutuhan air bersih di fasilitas kesehatan, terhentinya operasi pompa dan IPA akibat gangguan listrik, serta terhambatnya proses mobilisasi dan distribusi perbaikan akibat kerusakan jaringan jalan.

Evaluasi bahaya seismik di wilayah pesisir Sumatera Barat diperkuat oleh studi *Seismic Hazard Function* (SHF) yang menunjukkan bahwa meskipun Kota Padang memiliki risiko tinggi, nilai SHF Kota Bengkulu secara komparatif lebih tinggi [17]. Lebih lanjut, penelitian ini memberikan landasan metodologis yang penting dengan mengonfirmasi bahwa penggunaan model *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) ZH97 dan AT06 menghasilkan estimasi yang lebih akurat dan masuk akal untuk karakteristik tektonik di sepanjang pantai barat Sumatra dibandingkan dengan model tradisional lainnya [17]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa evaluasi resiliensi sistem distribusi air di Sumatera Barat memerlukan pendekatan yang lebih komprehensif dan terintegrasi. Namun demikian, berbagai penelitian yang ada masih menyisakan sejumlah keterbatasan metodologis dan konseptual.

Tinjauan Kritis dan Kesenjangan Penelitian

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, sebagian besar penelitian resiliensi sistem distribusi air masih didominasi oleh evaluasi teknis pada jaringan perpipaan, seperti analisis tekanan jaringan, probabilitas kerusakan pipa, dan *serviceability* sistem pascagempa. Sementara itu, ketahanan subsistem lain dalam SPAM, seperti Instalasi Pengolahan Air (IPA), reservoir, dan tangki penyimpanan, masih relatif jarang dievaluasi secara komprehensif [9]. Selain itu, mayoritas model yang dikembangkan masih bersifat statis dan belum mempertimbangkan degradasi infrastruktur akibat korosi maupun penuaan pipa yang dapat menurunkan resiliensi sistem secara progresif [2]. Kesenjangan penelitian juga terlihat pada aspek interdependensi antar-infrastruktur kritis. Sebagian besar penelitian di Indonesia, khususnya di Sumatera Barat, masih terbatas dalam mengintegrasikan ketergantungan pada sistem distribusi air pada jaringan listrik, akses jalan, dan mobilisasi perbaikan pascabencana [3]. Di sisi lain, dimensi kualitas air dalam kerangka resiliensi seismik juga masih kurang diperhatikan, terutama terkait integrasi sistem pemantauan kualitas air secara *real-time* [9], [22].

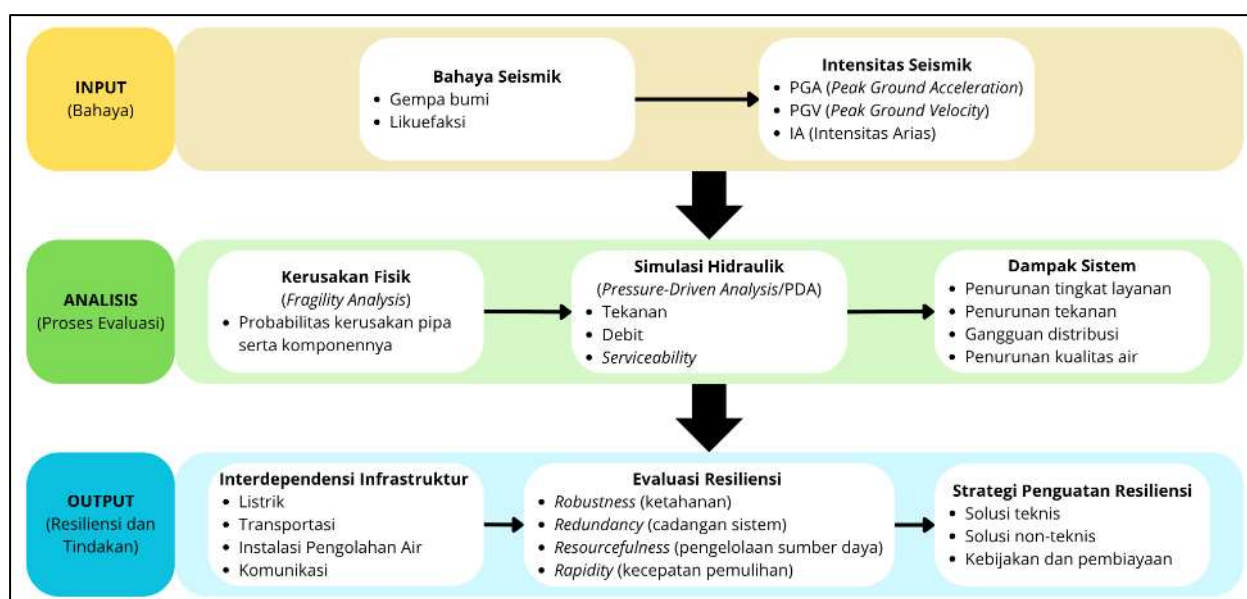
Selain keterbatasan teknis, sebagian besar model resiliensi yang ada dikembangkan berdasarkan kondisi negara maju sehingga belum sepenuhnya sesuai dengan konteks wilayah berkembang seperti

Indonesia. Faktor lokal seperti keterbatasan fiskal daerah, kapasitas tata kelola, kesiapsiagaan institusi, dan kemampuan pemulihan layanan pascabencana masih jarang diintegrasikan ke dalam model resiliensi sistem distribusi air di Sumatera Barat [10]. Dalam konteks evaluasi bahaya likuefaksi, tinjauan kritis menunjukkan adanya pergeseran paradigma dari metode berbasis tegangan (*stress-based*) menuju pendekatan berbasis energi (*energy-based*) menggunakan Intensitas Arias (I_A), yang dinilai lebih representatif dalam menangkap efek kumulatif dari intensitas dan durasi guncangan tanah secara simultan. Integrasi model berbasis energi ini menjadi pendekatan penting dalam penelitian masa depan untuk memprediksi waktu terjadinya kegagalan (*timing of liquefaction*) secara lebih presisi pada lapisan tanah jenuh air yang menopang jaringan pipa transmisi di Sumatera Barat [23]. Selain itu, penelitian mendatang dapat diarahkan pada pengembangan model *time-variant resilience* berbasis integrasi PDA, *fragility analysis*, serta sistem pemantauan kualitas air *real-time* untuk meningkatkan akurasi prediksi performa sistem distribusi air pascabencana.

Kerangka Integratif Resiliensi Sistem Distribusi Air terhadap Gempa dan Likuefaksi

Berdasarkan sintesis literatur yang telah dilakukan, penelitian mengenai resiliensi sistem distribusi air terhadap bahaya seismik masih menunjukkan kecenderungan fragmentasi dalam pendekatan evaluasi [4], [9], [13]. Sebagian penelitian berfokus pada aspek performa fisik infrastruktur [9], sementara penelitian lain lebih menekankan pada kapasitas pemulihan sistem, evaluasi hidraulik, atau aspek sosial dan kelembagaan secara terpisah [8], [9], [22]. Pendekatan tersebut memberikan kontribusi penting dalam memahami perilaku sistem pascabencana, namun belum sepenuhnya menggambarkan hubungan antar komponen yang memengaruhi resiliensi secara menyeluruh [4].

Kesenjangan penelitian juga ditemukan pada keterbatasan integrasi antara interaksi multibahaya [19], interdependensi infrastruktur, serta faktor nonteknis dalam model evaluasi resiliensi [8], [13]. Padahal, resiliensi sistem distribusi air tidak hanya ditentukan oleh tingkat kerusakan fisik jaringan, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi hidraulik, kualitas air, kapasitas kelembagaan, serta kemampuan sistem dalam memulihkan layanan pascabencana [9], [10], [11], [12]. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan kerangka integratif resiliensi sistem distribusi air terhadap gempa dan likuefaksi yang dikembangkan melalui sintesis berbagai pendekatan evaluasi resiliensi. Kerangka ini bertujuan untuk menghubungkan berbagai komponen yang selama ini dikaji secara terpisah ke dalam suatu model konseptual yang lebih komprehensif, sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengembangan evaluasi resiliensi sistem distribusi air di wilayah berkembang dengan karakteristik multibahaya, seperti di Sumatera Barat. **Gambar 2** menunjukkan kerangka integratif resiliensi sistem distribusi air terhadap gempa dan likuefaksi yang diusulkan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Kerangka Integratif Resiliensi Sistem Distribusi Air Minum terhadap Gempa dan Likuefaksi

Sumber: Disusun berdasarkan sintesis literatur

Kerangka yang diusulkan dimulai dari komponen bahaya seismik berupa gempa bumi dan likuefaksi yang direpresentasikan melalui parameter intensitas seismik seperti PGA, PGV, dan I_A sebagai sumber

gangguan utama terhadap sistem [9], [11], [18], [23]. Tingkat bahaya tersebut digunakan untuk mengevaluasi probabilitas kerusakan infrastruktur melalui *fragility analysis* [1], [9], [22], yang selanjutnya menjadi masukan dalam evaluasi performa sistem berbasis PDA [11], [13], [14]. Hasil evaluasi tersebut digunakan untuk menilai dampak terhadap kinerja sistem distribusi air, seperti penurunan tingkat layanan, penurunan tekanan, gangguan distribusi, serta potensi penurunan kualitas air. Selain itu, kerangka ini juga mempertimbangkan interdependensi infrastruktur pendukung, seperti sistem kelistrikan, transportasi, dan instalasi pengolahan air, yang dapat memengaruhi kemampuan sistem dalam mempertahankan fungsi operasional serta mempercepat proses pemulihan [3]. Pada tahap akhir, hasil evaluasi sistem digunakan sebagai dasar penyusunan strategi peningkatan resiliensi dan pemulihan layanan melalui pendekatan teknis, nonteknis, kebijakan, serta pembiayaan.

Strategi Penguatan Resiliensi

Secara teknis, penguatan resiliensi sistem distribusi air dapat dilakukan melalui penggunaan material pipa dengan dukilitas tinggi, seperti *Ductile Iron Pipe* (DIP) dan pipa baja (*steel pipe*), yang diketahui memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi akibat gempa dibandingkan pipa cast iron konvensional [9], [15]. Selain itu, penambahan jalur redundansi (*looping*) dilaporkan mampu meningkatkan kontinuitas layanan dan mempercepat proses pemulihan sistem pascagempa [8]. Implementasi *Smart Water System* berbasis IoT (*Internet of Things*) menggunakan sensor tekanan dan *flow meter* memungkinkan deteksi dini serta isolasi kebocoran secara *real-time* untuk meminimalkan kehilangan debit air yang signifikan pascabencana. Strategi ini meningkatkan kecepatan dan efektivitas pemulihan layanan dengan memangkas waktu deteksi kerusakan pipa pada jaringan distribusi [13], [14]. Karakteristik material pipa dan strategi mitigasi seismik disajikan pada **Tabel 6**, yang menunjukkan bahwa jenis material pipa berpengaruh signifikan terhadap tingkat kerusakan pada sistem distribusi air saat terjadi gempa. Material pipa dengan tingkat daktilitas rendah cenderung mengalami kerusakan yang lebih besar akibat ketidakmampuannya mengakomodasi deformasi tanah selama kejadian seismik, terutama di wilayah dengan potensi pergeseran tanah dan likuefaksi. Sebaliknya, material dengan sifat yang lebih fleksibel mampu menyesuaikan diri dengan perubahan deformasi tanah sehingga dapat mempertahankan integritas jaringan dan mengurangi gangguan layanan.

Tabel 6. Karakteristik Material Pipa dan Strategi Mitigasi Seismik

Jenis Material Pipa	Referensi	Laju Kerusakan, λ (repairs/km)	Daktilitas	Rekomendasi Mitigasi
<i>Cast Iron Pipe</i> (CIP)	Wang et al. (2010)	0,1254	Rendah	Perlu penggantian karena bersifat kaku dan rentan retak
<i>Ductile Iron Pipe</i> (DIP)	Liu et al. (2020), Hou et al. (2021)	Relatif rendah dibandingkan CIP	Tinggi	Disarankan untuk wilayah rawan gempa
<i>Steel Pipe</i> (<i>Flexible Joint</i>)	Wang et al. (2010)	0,0178	Sangat Tinggi	Sangat disarankan karena memiliki kapasitas deformasi tinggi

Pipa berbahan *Cast Iron Pipe* (CIP) menunjukkan tingkat kerusakan tertinggi dengan laju kerusakan sebesar 0,1254 *repairs/km* karena sifatnya yang kaku dan rapuh, sehingga lebih rentan mengalami retak atau patah saat menerima beban dinamis akibat gempa [15]. Oleh karena itu, material ini umumnya direkomendasikan untuk diganti di wilayah dengan tingkat bahaya seismik yang tinggi. Sebaliknya, *Ductile Iron Pipe* (DIP) memiliki performa yang lebih baik karena tingkat daktilitasnya lebih tinggi, sehingga lebih mampu menyerap energi dan deformasi akibat pergerakan tanah [8], [11]. Sementara itu, *steel pipe* dengan sambungan fleksibel menunjukkan performa terbaik dengan laju kerusakan paling rendah sebesar 0,0178 *repairs/km*, karena kapasitas deformasinya yang tinggi memungkinkan sistem tetap berfungsi meskipun terjadi deformasi tanah yang signifikan [15]. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa strategi mitigasi seismik pada sistem distribusi air tidak hanya bergantung pada penguatan struktur, tetapi juga pada pemilihan material pipa yang sesuai dengan kondisi geologi dan tingkat bahaya seismik di wilayah tersebut. Penggunaan material dengan daktilitas tinggi dapat menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk meningkatkan resiliensi sistem distribusi air terhadap gangguan seismik.

Dari sisi non-teknis, strategi pemulihan perlu didukung oleh pendekatan berbasis prioritas, seperti *Upgrade Benefit Index* (UBI) [15] dan pemulihan berbasis “pipa kritis”, guna memaksimalkan efektivitas restorasi layanan pada fasilitas vital seperti rumah sakit dan pusat evakuasi [12]. Selain itu, integrasi kebijakan *Disaster Risk Financing and Insurance* (DRFI) menjadi penting untuk menjamin ketersediaan pendanaan darurat yang cepat dan berkelanjutan, khususnya bagi wilayah yang rawan bencana seperti Sumatera Barat [10], [12]. Dukungan kelembagaan dan pembiayaan tersebut diperlukan karena proses

pemulihan sistem distribusi air tidak hanya bergantung pada ketahanan fisik infrastruktur, tetapi juga pada kapasitas institusi untuk melakukan koordinasi, memobilisasi sumber daya, serta menetapkan prioritas perbaikan pascabencana. Penguatan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan rutin, simulasi tanggap darurat, serta penyusunan prosedur operasi standar (*Standard Operating Procedure/SOP*) pemulihan pascabencana juga berperan penting dalam meningkatkan kesiapsiagaan operasional dan mempercepat proses pemulihan layanan. Dengan demikian, penguatan resiliensi sistem distribusi air di wilayah rawan seismik memerlukan integrasi strategi teknis, kelembagaan, dan pembiayaan secara simultan agar sistem distribusi air mampu mempertahankan layanan dan pulih secara efektif pascabencana.

Keterbatasan Review

Kajian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, proses seleksi literatur dilakukan secara *purposive* sehingga hasil sintesis bergantung pada relevansi dan kualitas artikel yang dipilih. Kedua, penelitian ini menggunakan pendekatan *critical thematic literature review* tanpa melakukan analisis kuantitatif seperti *meta-analysis*, sehingga hubungan antarvariabel resiliensi belum dapat dievaluasi secara statistik. Ketiga, kerangka integratif yang diusulkan masih bersifat konseptual dan belum divalidasi melalui simulasi maupun penerapan pada sistem distribusi air yang nyata. Selain itu, sebagian besar literatur yang ditinjau berasal dari negara maju sehingga masih terdapat keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi teknis, kelembagaan, dan pembiayaan di wilayah berkembang yang rawan seismik seperti Sumatera Barat. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu memvalidasi kerangka yang diusulkan melalui pemodelan hidraulik, analisis kerentanan, dan studi kasus pada sistem distribusi air di wilayah yang rawan gempa dan likuefaksi.

4. Kesimpulan

Resiliensi sistem distribusi air dalam Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) merupakan aspek penting dalam menjaga keberlanjutan layanan air bersih di wilayah rawan gempa dan likuefaksi seperti Sumatera Barat. Tinjauan literatur menunjukkan bahwa gempa bumi dan likuefaksi dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada jaringan perpipaan, penurunan tekanan distribusi, gangguan kualitas air, serta terhambatnya proses pemulihan layanan akibat ketergantungan pada infrastruktur pendukung seperti listrik dan transportasi. Kondisi tersebut diperparah oleh karakteristik geologi pesisir Sumatera Barat yang didominasi oleh tanah aluvial jenuh air dengan tingkat kerentanan seismik yang tinggi. Perkembangan pendekatan evaluasi resiliensi menunjukkan adanya pergeseran dari metode berbasis *reliability* menuju pendekatan yang lebih komprehensif melalui *Pressure-Driven Analysis (PDA)*, *fragility analysis*, integrasi model probabilistik seismik, serta pendekatan *socio-technical resilience*.

Kombinasi pendekatan tersebut dinilai lebih efektif dalam merepresentasikan kondisi hidraulik pascagempa, probabilitas kerusakan infrastruktur, serta kapasitas pemulihan layanan secara lebih realistis dalam skenario multibahaya gempa dan likuefaksi. Bagi wilayah berkembang yang rawan seismik seperti Sumatera Barat, penguatan resiliensi sistem distribusi air perlu dilakukan melalui integrasi strategi teknis, kelembagaan, dan pembiayaan, seperti penggunaan material pipa berdaktilitas tinggi, peningkatan redundansi jaringan, implementasi *Smart Water System*, serta penguatan tata kelola dan pendanaan pemulihan bencana. Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada validasi dan pengembangan kerangka resiliensi integratif yang diusulkan melalui studi kasus dan pemodelan pada sistem distribusi air di wilayah yang rawan gempa dan likuefaksi.

5. Daftar Pustaka

- [1] H. Emamjomeh, R. Ahmady Jazany, H. Kayhani, I. Hajirasouliha, dan M. R. Bazargan-Lari, "Reliability of water distribution networks subjected to seismic hazard: Application of an improved entropy function," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 197, Mei 2020, doi: 10.1016/j.res.2020.106828.
- [2] W. Li, R. K. Mazumder, dan Y. Li, "Time-variant Seismic Resilience Analysis Model for Water Distribution Systems," *arXiv preprint arXiv:2302.03254*, 2023.
- [3] F. D. Shubandrio, A. M. El-Maissi, M. M. Kassem, M. Masrilayanti, S. R. Rahmat, dan F. Mohamed Nazri, "Evaluating the Interdependencies of Infrastructure Critical Systems during Earthquake Event: A Case Study for Padang City," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 23, Des 2022, doi: 10.3390/su142315926.
- [4] M. Leštáková, K. T. Logan, I.-S. Rehm, P. F. Pelz, dan J. Friesen, "Do resilience metrics of water distribution systems really assess resilience? A critical review," *Water Res.*, vol. 248, hlm. 120820, 2024, doi: 10.48328/tudatali.

- [5] R. R. Putra, J. Kiyono, Y. Ono, dan H. R. Parajuli, "Seismic Hazard Analysis for Indonesia," *Journal of Natural Disaster Science*, vol. 33, no. 2, hlm. 59–70, 2012, doi: 10.2328/jnds.33.59.
- [6] W. T. Putri, Syafriani, A. Fauzi, dan L. Dwiridal, "Amplification Analysis and Seismic Vulnerability Index of Air Tawar Barat Village of Padang City Using HVSr Method," dalam *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2582/1/012038.
- [7] P. Razi, A. Putri, dan J. T. S. Sumantyo, "Vulnerability Liquefaction Mapping in Padang City Based on Cloud Computing Using Optical Satellite Imagery Data," *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, vol. 8, no. 3–2, hlm. 1932–1937, 2024.
- [8] W. Liu, Z. Song, M. Ouyang, dan J. Li, "Recovery-based seismic resilience enhancement strategies of water distribution networks," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 203, Nov 2020, doi: 10.1016/j.res.2020.107088.
- [9] H. Wu, E. Guo, P. Yan, dan J. Liu, "A Quantitative Evaluation Model for the Seismic Resilience of Water Supply Systems Based on Fragility Analysis," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 16, Agu 2023, doi: 10.3390/su151612137.
- [10] R. H. Yuliandra, N. Nurhamidah, P. S. Komala, dan V. S. Bachtiar, "Improving Water Supply Systems' Resilience Variables Using The Fuzzy Delphi Method (FDM)," *Dampak*, vol. 23, no. 1, hlm. 88–102, Jan 2026, doi: 10.25077/dampak.23.1.88-102.2026.
- [11] B. Hou, X. Ma, K. Diao, Z. Zhong, dan S. Wu, "Seismic performance assessment of water distribution systems based on multi-indexed nodal importance," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, Sep 2021, doi: 10.3390/w13172362.
- [12] F. W. Atmaja, I. Meilano, R. Virtriana, D. R. Tampubolon, R. Raharja, dan G. L. Goro, "Event-Based Seismic Risk Assessment for Indonesia's Post-Disaster Fund to Stimulate House Damage Recovery," *Journal of Disaster Research*, vol. 20, no. 5, hlm. 765–775, Okt 2025, doi: 10.20965/JDR.2025.P0765.
- [13] Q. Shuang, H. J. Liu, dan E. Porse, "Review of the quantitative resilience methods in water distribution networks," *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, Jun 2019, doi: 10.3390/w11061189.
- [14] D. Jung dan J. H. Kim, "Emerging issues and methodologies for resilient and robust water distribution systems," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, Mar 2020, doi: 10.3390/w12030769.
- [15] Y. Wang, S. K. Au, dan Q. Fu, "Seismic risk assessment and mitigation of water supply systems," *Earthquake Spectra*, vol. 26, no. 1, hlm. 257–274, 2010, doi: 10.1193/1.3276900.
- [16] B. Hou, J. Huang, H. Miao, X. Zhao, dan S. Wu, "Seismic resilience evaluation of water distribution systems considering hydraulic and water quality performance," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 93, hlm. 103756, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103756>.
- [17] W. Triyoso, A. Suwondo, T. Yudistira, dan D. P. Sahara, "Seismic Hazard Function (SHF) study of coastal sources of Sumatra Island: SHF evaluation of Padang and Bengkulu cities," *Geosci. Lett.*, vol. 7, no. 1, Des 2020, doi: 10.1186/s40562-020-00151-x.
- [18] A. M. Sari, A. Fakhurrozi, A. Arisal, B. Setiadi, H. G. Putra, Nafri, R.A Bakar, dan Z. Ramli, "Seismic hazard analysis on Solok Regency, West Sumatra to support local government development program," dalam *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Des 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202346407002.
- [19] A. Cruz, S. Karimzadeh, N. Chieffo, E. Sandoval, dan P. B. Lourenço, "A Review of Probabilistic Approaches for Assessing the Liquefaction Hazard in Urban Areas," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 31, no. 8, hlm. 4673–4708, Des 2024, doi: 10.1007/s11831-024-10124-4.
- [20] Badan Geologi; Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi dan Badan Nasional Penanggulangan Bencana, *Atlas Kawasan Rawan Bencana Gempa Bumi (KRBG) Indonesia*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2026.
- [21] Badan Geologi; Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, *Atlas Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia*, Cetakan Kedua. Bandung: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2020. [Daring]. Tersedia pada: www.bgl.esdm.go.id
- [22] L. Qian, S. Wei, Y. Tianlai, W. Tiancheng, dan H. Mohamed, "Mathematical Methodology in the Seismic Resilience Evaluation of the Water Supply System," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 8, no. 1, hlm. 45–54, Jan 2023, doi: 10.2478/amns.2021.2.00212.
- [23] R. E. Kayen dan K. W. Ko, "Energy-Based Methods for Seismic Soil Liquefaction: Past, Present, and Future," *Indian Geotechnical Journal*, 2026, doi: 10.1007/s40098-026-01480-y.