

IMPLEMENTASI ALGORITMA KNN UNTUK PENENTUAN JALUR EVAKUASI AMAN BERDASARKAN DATA SHAKEMAP DAN DATA TITIK EVAKUASI DI KABUPATEN MADIUN

¹⁾Chaidar Aria Bayu Pratama, ²⁾Madlazim, ³⁾Muhammad Nurul Fahmi

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: chaidar.21052@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: Madlazim@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

Abstrak

Bencana gempa bumi merupakan ancaman nyata di Indonesia, terutama pada daerah yang berada pada zona seismik aktif seperti Kabupaten Madiun. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengembangkan sistem rekomendasi titik evakuasi aman berbasis algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN) berdasarkan data intensitas gempa dari *ShakeMap* USGS dan distribusi titik evakuasi dari BPBD. Kriteria yang ditetapkan adalah wilayah dengan nilai *Modified Mercalli Intensity* (MMI) < 4 dan jarak maksimum 1.000 meter sesuai dengan pedoman BNPB. Pengujian dilakukan terhadap 1.000 titik pengguna simulasi yang tersebar di seluruh wilayah Kabupaten Madiun. KNN berhasil menunjukkan titik evakuasi rekomendasi yang valid sebanyak 370 titik (37.0%), 502 titik (50.2%) ditolak karena melebihi jarak, serta 128 titik (12.8%) gagal karena tidak memiliki titik aman. Temuan ini menunjukkan bahwa KNN efektif untuk mendeteksi awal titik evakuasi, namun keberhasilan KNN bergantung pada distribusi spasial titik evakuasi dan kontur guncangan. Dengan demikian, sistem ini dapat menjadi dasar dalam pengembangan sistem evakuasi berbasis spasial yang responsif dan akurat.

Kata Kunci: Gempa Bumi, Jalur Evakuasi, K-Nearest Neighbor, MMI, Kabupaten Madiun

Abstract

Earthquakes are a real threat in Indonesia, especially in areas located in active seismic zones such as Madiun Regency. This study aims to develop a safe evacuation point recommendation system based on the *K-Nearest Neighbour* (KNN) algorithm using earthquake intensity data from the USGS *ShakeMap* and evacuation point distribution data from the Regional Disaster Management Agency (BPBD). The criteria set are areas with a *Modified Mercalli Intensity* (MMI) value < 4 and a maximum distance of 1,000 metres, in accordance with BNPB guidelines. The testing was conducted on 1,000 simulation user points spread across the entire Madiun Regency area. KNN successfully identified 370 valid recommended evacuation points (37.0%), 502 points (50.2%) were rejected due to exceeding the distance limit, and 128 points (12.8%) failed because they did not have safe points. These findings indicate that KNN is effective for detecting initial evacuation points; however, the success of KNN depends on the spatial distribution of evacuation points and earthquake contours. Thus, this system can serve as a foundation for developing a responsive and accurate spatial-based evacuation system.

Keywords: Earthquake, Evacuation Route, K-Nearest Neighbour, MMI, Madiun Regency

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terletak di sepanjang Cincin Api Pasifik dan dikenal sebagai salah satu Kawasan dengan aktivitas seismik tertinggi di dunia. Interaksi antara tiga lempeng utama yakni Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik menyebabkan tingginya potensi akan bencana gempa bumi yang berdampak langsung pada keselamatan infrastruktur serta kebutuhan akan sistem evakuasi darurat yang efisien (Airlangga, 2024; Ayuningtyas et al., 2021).

Kabupaten Madiun merupakan salah satu daerah di Provinsi Jawa Timur di mana daerah ini dikelilingi oleh sejumlah pegunungan dan berada di zona sedimen aluvial yang tidak terkonsolidasi. Hal ini menjadikan Kabupaten Madiun daerah yang cukup rentan terhadap dampak gempa bumi. Gempa Madiun 2015 misalnya, mengakibatkan kerusakan pada puluhan rumah, termasuk beberapa rusak berat, sebagai dampak dari aktivitas pada zona sesar Kendeng (Julius et al., 2021; Nugraha et al., 2016). Zona sesar ini memiliki laju pergeseran sekitar 5 mm/tahun dan diperkirakan mampu menghasilkan percepatan tanah maksimum (PGA) hingga 122 gal (Putri et al., 2022).

Di sisi lain, aplikasi infoBMKG yang saat ini digunakan oleh masyarakat hanya menyediakan informasi gempa secara *realtime*, tanpa mendukung adanya penentuan jalur evakuasi secara otomatis. Oleh karena itu, diperlukan sistem berbasis spasial dan algoritma cerdas yang mampu merekomendasikan titik evakuasi aman berdasarkan data intensitas guncangan (Fajriadi, 2024; Fajriyah et al., 2019).

Berbagai studi sebelumnya telah mengeksplorasi algoritma seperti Dijkstra dan metode berbasis graf, termasuk integrasi GCN-DRL, untuk menentukan rute evakuasi. Namun, pendekatan tersebut umumnya kompleks dan bergantung pada pemodelan infrastruktur yang detail (Fan et al., 2023; Wagh et al., 2020). Pada sisi lain, algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN) menawarkan pendekatan yang sederhana tetapi efektif dalam menentukan titik evakuasi terdekat berdasarkan parameter seperti jarak dan intensitas guncangan (Lubis et al., 2020; Nurlaili & Irawan, 2021).

Dalam penelitian ini, dikembangkan sistem rekomendasi titik evakuasi gempa berbasis algoritma KNN yang memanfaatkan data *Modified Mercalli Intensity* (MMI) dari *ShakeMap* USGS dan data titik evakuasi dari BPBD Kabupaten Madiun. Sistem akan memilih lokasi evakuasi terdekat yang berada di zona dengan intensitas guncangan $< IV$ ($MMI < 4$), yang dianggap aman dari potensi kerusakan berat. Batas ini merujuk pada pedoman evakuasi bencana dari Direktorat Kesiapsiagaan Kedeputan Bidang Pencegahan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), yang menyatakan bahwa wilayah dengan $MMI > IV$ dikategorikan sebagai wilayah terdampak dan tidak disarankan sebagai tujuan evakuasi (Directorate of Preparedness Deputy for Prevention National Agency for Disaster Management (BNPB) of Indonesia, 2021). Pendekatan ini diharapkan dapat membantu masyarakat dan lembaga terkait dalam pengambilan keputusan evakuasi secara cepat dan efisien.

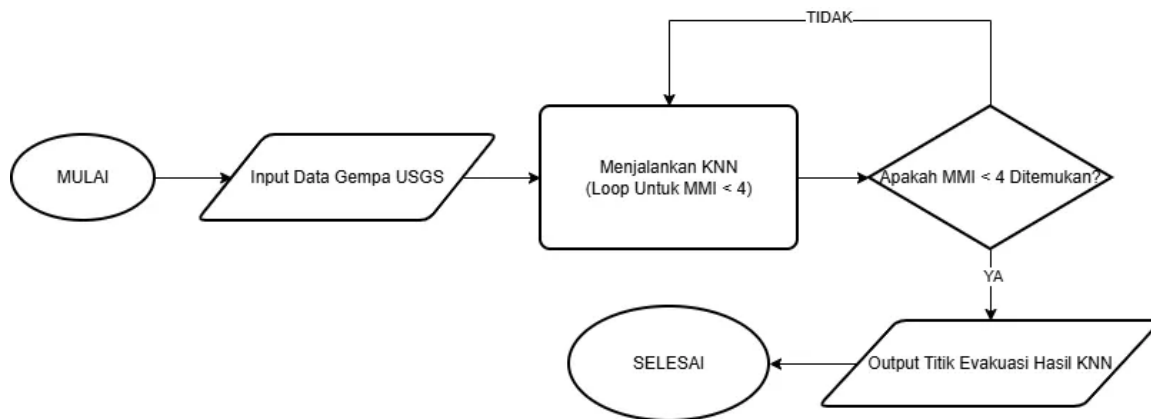
II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan rekayasa sistem berbasis pengembangan perangkat lunak, dengan model kerja berorientasi pada kebutuhan pengguna dalam konteks mitigasi bencana gempa bumi. Sistem ini dikembangkan sebagai prototipe aplikasi rekomendasi jalur evakuasi aman berdasarkan data intensitas gempa dari *ShakeMap* USGS dan data titik evakuasi dari BPBD Kabupaten Madiun. Langkah awal dari pengembangan sistem adalah pengumpulan dan validasi data titik evakuasi dari BPBD Kabupaten Madiun. Selanjutnya, data parameter gempa bumi seperti *Peak Ground Acceleration* (PGA), *Peak Ground Velocity* (PGV), *Modified Mercalli Intensity* (MMI), dan *Macroseismic Intensity* (MI) yang dikumpulkan dari *ShakeMap* USGS sebagai dasar pemetaan zona terdampak.

Pemilihan titik evakuasi dilakukan dengan menggunakan algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN), yang memetakan titik terdekat dari lokasi pengguna menuju zona dengan intensitas guncangan $< IV$ ($MMI < 4$).

Penentuan batas MMI ini merujuk pada pedoman dari BNPB yang menyarankan agar wilayah dengan $MMI > 4$ tidak dijadikan tujuan evakuasi karena dikategorikan sebagai zona terdampak (Directorate of Preparedness Deputy for Prevention National Agency for Disaster Management (BNPB) of Indonesia, 2021).



Gambar 1. Proses Penentuan Titik Evakuasi Menggunakan KNN

Pengembangan sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak Visual Studio Code (VS Code) dengan bahasa pemrograman *JavaScript* dan *Python*. Sistem *Backend* dibangun dalam bentuk layanan web API untuk integrasi dengan aplikasi di kemudian hari. Sedangkan, untuk sistem komputasi dilakukan pada sisi server berbasis *cloud* untuk memastikan skalabilitas dan kinerja yang stabil. Setelah pengembangan selesai, dilakukan pengujian sistem melalui skenario gempa di Kabupaten Madiun untuk mengevaluasi keakuratan pemetaan titik evakuasi dan respons waktu sistem. Jika diperlukan, dilakukan iterasi ulang untuk penyempurnaan performa sistem hingga diperoleh hasil yang optimal

B. Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini melibatkan tiga jenis variabel operasional, yaitu:

- Variabel Kontrol: Wilayah penelitian dibatasi pada Kabupaten Madiun dan penggunaan algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN) sebagai metode utama.
- Variabel Manipulasi: Data parameter gempa bumi yang diperoleh dari *United States Geological Survey* (USGS).
- Variabel Respons: Titik koordinat evakuasi yang direkomendasikan oleh sistem berdasarkan hasil klasifikasi algoritma KNN.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui dua sumber utama. Pertama, data titik evakuasi di wilayah Kabupaten Madiun diperoleh dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD). Titik-titik ini kemudian divalidasi berdasarkan tiga kriteria utama: jalur evakuasi minim persimpangan, waktu tempuh efisien, dan ketersediaan infrastruktur jalan yang memadai untuk menghadapi peningkatan volume selama proses evakuasi. Kedua, data parameter gempa bumi seperti *Peak Ground Acceleration* (PGA), *Peak Ground Velocity* (PGV), *Modified Mercalli Intensity* (MMI), dan *Macroseismic Intensity* (MI) diperoleh dari perangkat lunak *ShakeMap* milik *United States Geological Survey* (USGS). Data ini digunakan untuk memetakan kontur isoseismal yang menunjukkan zona terdampak gempa, dan menjadi dasar dalam penentuan titik evakuasi aman ($MMI < 4$).

D. Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data diawali dengan pemetaan parameter gempa dari *ShakeMap* USGS, seperti PGA, PGV dan MMI. Data ini dikombinasikan dengan titik koordinat pengguna dan titik evakuasi dari BPBD Kabupaten Madiun. Algoritma KNN digunakan untuk menentukan titik evakuasi aman berdasarkan jarak spasial dan nilai intensitas MMI. Sistem akan memproses data lokasi pengguna dan secara iteratif mencari titik evakuasi

terdekat yang memiliki nilai $MMI < 4$. Hal ini sesuai dengan pedoman BNPB untuk memilih titik evakuasi dengan nilai $MMI < 4$ yang dikategorikan sebagai zona aman. Jika ditemukan lebih dari satu titik evakuasi dengan $MMI < 4$, maka sistem akan memilih titik dengan jarak terdekat dari lokasi pengguna. Proses ini dilakukan secara otomatis dan cepat tanpa perlu pelatihan model, sehingga cocok untuk respons awal saat gempa terjadi.

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

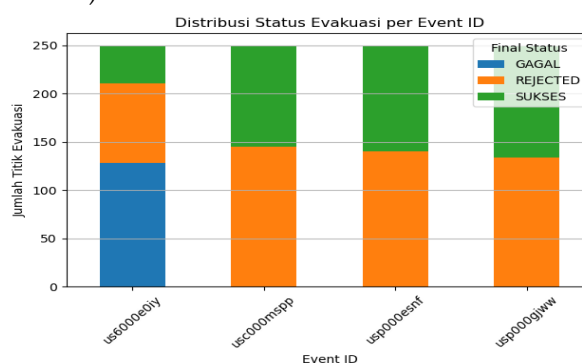
A. Hasil

Penelitian ini menghasilkan rekomendasi titik evakuasi berbasis algoritma KNN yang mampu memberikan rekomendasi titik aman berdasarkan intensitas guncangan dari *ShakeMap* USGS dan distribusi titik evakuasi dari BPBD Kabupaten Madiun. Pengujian dilakukan terhadap 1.000 titik pengguna simulasi yang tersebar di zona terdampak dari empat gempa bumi berbeda, dengan rincian setiap *event* diuji dengan 250 titik pengguna simulasi yang berbeda beda tiap *event*-nya, algoritma KNN yang dijalankan pada seluruh titik. Hasilnya adalah sebanyak 872 titik berhasil diproses oleh KNN dan sisanya 128 titik gagal total karena tidak ada titik evakuasi di sekitar lokasi yang memiliki titik $MMI < 4$.

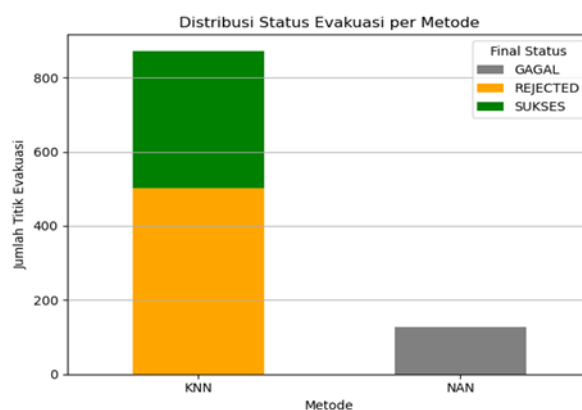
Tabel 1. Ringkasan Hasil Evaluasi Algoritma KNN dalam Penentuan Titik Evakuasi Aman

Final Status	Jumlah Titik	Persentase
Sukses	370	37.0%
<i>Rejected/Ditolak</i>	502	50.2%
Gagal	128	12.8%
Total	1.000	100%

Visualisasi grafik berikut memperlihatkan distribusi hasil status evakuasi setiap *event* gempa (**Gambar 2**). Sedangkan distribusi berdasarkan metode menunjukkan bahwa seluruh keberhasilan dan kegagalan berasal dari metode KNN, sementara 128 titik tidak dapat diproses karena tidak terdapat kandidat evakuasi dalam radius yang aman (**Gambar 3**)



Gambar 2. Distribusi Status Evakuasi Berdasarkan *Event* Gempa



Gambar 3. Distribusi Status Evakuasi Berdasarkan Metode Penentuan

Dalam konteks kebencanaan, BNPB menyatakan bahwa area yang memiliki nilai MMI > 4 tidak diperbolehkan untuk dijadikan tujuan evakuasi (Directorate of Preparedness Deputy for Prevention National Agency for Disaster Management (BNPB) of Indonesia, 2021). Oleh karenanya, sistem secara otomatis akan menolak titik-titik evakuasi yang berada dalam zona bahaya, dan menerima titik dengan nilai MMI < 4 (zona aman).

B. Pembahasan

Pemilihan algoritma KNN dalam penelitian ini didasarkan pada perbedaan mendasar antara masalah alokasi titik evakuasi dan perencanaan rute detail. Algoritma berbasis graf seperti Dijkstra dan A* unggul dalam penentuan lintasan terpendek pada jaringan jalan yang terdefinisi dengan baik, namun membutuhkan pemodelan topologi graf yang lengkap serta beban komputasi yang relatif tinggi (Efentakis et al., 2015; Wang, 2012). Dalam konteks respons awal setelah gempa, kondisi infrastruktur jalan sering kali belum diverifikasi atau mengalami kerusakan. Hal ini membuat pendekatan berbasis graf kurang efektif. Sebaliknya, KNN memberikan mekanisme pemilihan ruang yang cepat tanpa memerlukan informasi tentang konektivitas jaringan. Karena itu, KNN lebih cocok untuk segera menyaring kandidat titik evakuasi aman berdasarkan kedekatan ruang dan parameter intensitas guncangan (Amiran et al., 2024).

Pada penelitian ini data MMI yang digunakan bersumber dari *ShakeMap* USGS yang bersifat estimasi model, bukan pengukuran langsung pada seluruh wilayah. *ShakeMap* dihasilkan dari interpolasi statistik yang menggabungkan data stasiun seismik dengan model prediksi gerakan tanah, sehingga tingkat akurasi dipengaruhi oleh kepadatan jaringan sensor. Pada wilayah dengan distribusi stasiun yang jarang, ketidakpastian estimasi intensitas dapat meningkat secara signifikan, sehingga nilai MMI yang dipetakan berpotensi menyimpang dari kondisi aktual di lapangan (Wald et al., 2024; Worden et al., 2010). Selain itu, resolusi spasial dari *ShakeMap* yang berskala kilometer cenderung meratakan variasi guncangan lokal dan belum sepenuhnya merepresentasikan efek tapak akibat kondisi geologi setempat (Finazzi et al., 2025; Wald et al., 2008).

Hasil pengujian terhadap 1.000 titik simulasi pengguna dari empat *event* gempa menunjukkan bahwa KNN dapat memberikan rekomendasi titik evakuasi yang berada di zona aman. Sebanyak 370 titik (37.0%) telah diberikan oleh KNN, sedangkan 502 titik (50.2%) ditolak oleh KNN karena melebihi batas jalur evakuasi. kemudian sebanyak 128 titik (12.8%) gagal diproses karena tidak ada titik evakuasi yang valid pada lokasi sekitar pengguna.

Kategori *Rejected*/Ditolak didasarkan pada pedoman dari BNPB yang mana menyatakan bahwa jalur evakuasi maksimal ditetapkan sekitar 795 meter untuk kelompok rentan (dihitung dari 15 menit waktu evakuasi dikali kecepatan jalan minimal 53 m/menit). (Directorate of Preparedness Deputy for Prevention National Agency for Disaster Management (BNPB) of Indonesia, 2021). Sistem ini menerapkan 1.000 meter sebagai jarak toleransi aman dan semua titik yang melebihi jarak tersebut walaupun berada pada zona aman tetap ditolak.

Algoritma KNN gagal dalam merekomendasikan titik evakuasi utamanya pada *event* us6000e0iy dikarenakan tidak ada titik evakuasi yang memenuhi syarat MMI < 4 pada radius pencariannya. Hal ini menunjukkan bahwa KNN bergantung pada pola distribusi spasial titik evakuasi serta kontur MMI. Jika titik aman tidak tersedia, maka meskipun berada pada zona aman, tetapi sistem akan mencapai kegagalan.

Visualisasi distribusi status menunjukkan bahwa terhadap indikasi keberhasilan. Di mana hal tersebut diraih oleh gempa dengan *event* usp000gjww yang memiliki 116 dari 250 titik (46.6%). Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi seismik dan persebaran titik evakuasi memengaruhi performa KNN.

Secara keseluruhan, KNN dianggap berhasil dan layak digunakan dalam sistem evakuasi karena cepat tidak memerlukan pelatihan, akurat pada wilayah dengan distribusi evakuasi yang merata serta mampu menyaring titik aman berdasarkan parameter intensitas. Namun, keberhasilan ini sangat tergantung pada kualitas dan kepadatan titik evakuasi serta ketepatan kontur MMI.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Sistem rekomendasi titik evakuasi berbasis KNN berhasil dijalankan untuk memberikan rekomendasi titik evakuasi aman berdasarkan intensitas guncangan (MMI) dari data *ShakeMap* USGS. Di mana sistem ini mampu bekerja secara cepat tanpa pelatihan awal dan mampu memilih titik evakuasi dengan $MMI < 4$ sebagai titik aman. Pengujian yang dilakukan terhadap 1.000 titik simulasi pengguna menghasilkan 370 titik (37.0%) sebagai titik aman, 502 titik (50.2%) sebagai titik yang ditolak karena lebih dari 1 KM jaraknya dari titik pengguna, serta 128 (12.8%) gagal karena tidak adanya titik evakuasi aman atau nilai $MMI > 4$ pada titik tersebut. Faktor yang menentukan keberhasilan sistem KNN adalah persebaran titik evakuasi dan distribusi spasial MMI. KNN menunjukkan performa tinggi ketika terdapat titik evakuasi aman dalam radius terjangkau, akan tetapi gagal sepenuhnya jika tidak ada titik yang memenuhi kriteria spasial dan seismik.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan saran yang dapat diberikan adalah pemerataan distribusi titik evakuasi yang perlu ditingkatkan terutama pada daerah yang rawan namun minim infrastruktur. Kemudian sistem perlu dikembangkan dengan algoritma adaptif untuk mengurangi kinerja komputasi yang berat oleh KNN. Kemudian, diperlukan integrasi dengan data *realtime* dengan BPBD, BMKG/USGS agar sistem mampu memberikan rekomendasi titik evakuasi yang relevan pada saat bencana aktual, bukan hanya dalam simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Airlangga, G. (2024). Analysis of machine learning algorithms for seismic anomaly detection in Indonesia: Unveiling patterns in the pacific ring of fire. *Jurnal Lebesgue : Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika, Matematika Dan Statistika*, 5(1), 37–48. <https://doi.org/10.46306/lb.v5i1.489>
- Amiran, A., Behnam, B., & Seyedin, S. (2024). AI-based model for site-selecting earthquake emergency shelters. *Scientific Reports*, 14(1), 29033. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80586-w>
- Ayuningtyas, D., Windiarti, S., Hadi, M. S., Fasrini, U. U., & Barinda, S. (2021). Disaster Preparedness and Mitigation in Indonesia: A Narrative Review. *Iranian Journal of Public Health*, 50(8), 1536–1546. <https://doi.org/10.18502/ijph.v50i8.6799>
- Directorate of Preparedness Deputy for Prevention National Agency for Disaster Management (BNPB) of Indonesia. (2021). *Preparation of {Evacuation} {Plan} [in Indonesian]*. BNPB Indonesia.
- Efentakis, A., Pfooser, D., & Vassiliou, Y. (2015). SALT. A Unified Framework for All Shortest-Path Query Variants on Road Networks. In E. Bampis (Ed.), *Experimental Algorithms* (pp. 298–311). Springer International Publishing.
- Fajriadi, A. I. (2024). Mengenal Aplikasi Info BMKG untuk Ponsel, Bisa Unduh di Play Store dan App Store. <https://tekno.tempo.co/read/1817091/mengenal-aplikasi-info-bmkg-untuk-ponsel-bisa-unduh-di-play-store-dan-app-store>
- Fajriyah, P. A., Indiyati, D., & Hadi, A. (2019). The Effect of InfoBMKG Application Using Toward Disaster Responsiveness Attitude of Mataram University Students Post Lombok Earthquake. *JCommsci - Journal of Media and Communication Science*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:198095072>
- Fan, X., Zhang, X., Wang, X., & Yu, X. (2023). A deep reinforcement learning model for resilient road network recovery under earthquake or flooding hazards. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s43065-023-00072-x>
- Finazzi, F., Cotton, F., & Bossu, R. (2025). Citizens' smartphones unravel earthquake shaking in urban areas. *Nature Communications*, 16(1), 9527. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64543-3>
- Julius, A. M., Daryono, & Widana, I. D. K. K. (2021). Preface of destructive m<5 earthquakes in Java island, 2015-2019. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 708(1), 012106. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/708/1/012106>
- Lubis, A., Lubis, M., & Al-Khowarizmi, A. (2020). Optimization of Distance Formula in k-Nearest Neighbor Method. 9. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i1.1464>

- Nugraha, A. D., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., & Widiyantoro, S. (2016). Unexpected earthquake of June 25th, 2015 in Madiun, East Java. *AIP Conference Proceedings*, 1730(1), 20001. <https://doi.org/10.1063/1.4947369>
- Nurlaili, F., & Irawan, R. H. (2021). Penerapan Metode KNN Dalam Menentukan Titik Lokasi Wisata Di Kecamatan Ngancar. *Prosiding SEMNAS INOTEK (Seminar Nasional Inovasi Teknologi)*, 5(2), 272–276. <https://doi.org/10.29407/inotek.v5i2.1143>
- Putri, D. M. S., Wibiseno, P. S., Maharani, E. T., Aribowo, B. W., Fauzan, M. A., & Alfaiz, K. (2022). *Peak Ground Acceleration (PGA) Analysis of Kendeng Fault Using Earthquake Information of The Last 50 Years*.
- Wagh, V. K., Pathak, P., Styne, P., & Nardin, L. G. (2020). An evacuation route model for disaster affected areas. *CEUR Workshop Proceedings*, 2771, 61–72.
- Wald, D., Góed, T., Hortascu, A., & Loos, S. (2024). *Developing and implementing an International Macroseismic Scale (IMS) for earthquake engineering, earthquake science, and rapid damage assessment* (Report Nos. 2023–1098; Open-File Report). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/ofr20231098>
- Wald, D., Lin, K.-W., & Quitoriano, V. (2008). *Quantifying and Qualifying USGS ShakeMap Uncertainty* (Report Nos. 2008–1238; Version 1.0, Open-File Report). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/ofr20081238>
- Wang, X. (2012). A Fast Exact k-Nearest Neighbors Algorithm for High Dimensional Search Using k-Means Clustering and Triangle Inequality. *Proceedings of ... International Joint Conference on Neural Networks. International Joint Conference on Neural Networks*, 43(6), 2351–2358. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.01.003>
- Worden, C. B., Wald, D. J., Allen, T. I., Lin, K., Garcia, D., & Cua, G. (2010). A Revised Ground-Motion and Intensity Interpolation Scheme for *ShakeMap*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 3083–3096. <https://doi.org/10.1785/0120100101>