Journal of Informatics and Computer Science Vol. 12, No. 2 Oktober 2026
Universitas Ubudiyah Indonesia
e-ISSN : 2615-5346

HARMONISASI MAGNITUDO LINTAS-KATALOG DAN PEMETAAN NILAI-B SEISMISITAS INDONESIA MENGGUNAKAN PEMBELAJARAN MESIN

CROSS-CATALOG MAGNITUDE HARMONIZATION AND B-VALUE MAPPING OF INDONESIAN SEISMICITY USING MACHINE LEARNING

Mahendar Dwi Payana[1], Desita Ria Yusian Tb[1], M. Bayu Wibawa[2], Zuhar Musliayana[2], Rizka Albar[2], Juanda Nurgaza[2]

[1]Program Studi Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ubudiyah Indonesia, Banda Aceh, Indonesia
[2]Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ubudiyah Indonesia, Banda Aceh, Indonesia
E-mail: mahendar@uui.ac.id (korespondensi), desita @uui.ac.id, mbayuw@uui.ac.id, zuhar@uui.ac.id, albar@uui.ac.id, juanda.nurgaza@uui.ac.id

Abstrak

Katalog gempa nasional BMKG merupakan aset utama untuk kajian bahaya seismik, namun mencampur sebelas skala magnitudo (M, MLv, mb, Mw, Mw(mB), dan lain-lain) yang dominasinya berubah antar-tahun sehingga berpotensi menimbulkan bias besar pada parameter Gutenberg-Richter, khususnya nilai-b. Penelitian ini mengusulkan kerangka komputasional dua tahap: harmonisasi magnitudo lintas-katalog dan karakterisasi nilai-b berbantuan pembelajaran mesin. Katalog BMKG yang memuat 176.384 event (2008-2026) dicocokkan dengan katalog USGS menggunakan toleransi waktu 30 detik dan jarak episentral 100 km, menghasilkan 9.705 pasangan event. Relasi konversi empiris tiap tipe magnitudo diturunkan dengan regresi orthogonal (total least squares) terhadap moment magnitude USGS, lalu diterapkan untuk menghomogenkan seluruh katalog. Magnitudo kelengkapan (Mc) diestimasi dengan tiga metode, dan nilai-b diestimasi dengan maximum likelihood Aki-Utsu disertai ketidakpastian Shi-Bolt dan interval kepercayaan bootstrap. Hasil menunjukkan homogenisasi mengoreksi nilai-b katalog penuh dari 0,51 menjadi 1,07 dan 1,39 setelah declustering, konsisten dengan katalog USGS. Nilai-b menurun terhadap kedalaman (1,11 ke 0,84) dan paling rendah pada sesar thrust. Model gradient boosting dengan SHAP mengungkapkan variasi nilai-b spasial didominasi kelengkapan katalog (R-kuadrat turun dari 0,29 menjadi 0,02 tanpa fitur Mc). Kerangka ini menawarkan prosedur replikabel untuk menstandardisasi katalog seismik multi-skala.

Kata Kunci: *nilai-b, magnitudo kelengkapan, harmonisasi katalog, pembelajaran mesin, BMKG*

Abstract

The BMKG national earthquake catalog is a primary asset for seismic hazard assessment, yet it mixes eleven magnitude scales (M, MLv, mb, Mw, Mw(mB), etc.) whose dominance shifts across years, potentially inducing large biases in Gutenberg-Richter parameters, especially the b-value. This study proposes a two-stage computational framework: cross-catalog magnitude harmonization and machine-learning-assisted b-value characterization. The BMKG catalog containing 176,384 events (2008-2026) is matched against the USGS catalog using a 30-second time tolerance and a 100-km epicentral-distance tolerance, yielding 9,705 matched events. Empirical conversion relations for each magnitude type are derived via orthogonal regression (total least squares) against USGS moment magnitude, then applied to homogenize the entire catalog. The magnitude of completeness (Mc) is estimated with three methods, and the b-value is estimated using Aki-Utsu maximum likelihood with Shi-Bolt uncertainty and bootstrap confidence intervals. Results show homogenization corrects the full-catalog b-value from 0.51 to 1.07 and to 1.39 after declustering, consistent with the USGS catalog. The b-value decreases with depth (1.11 to 0.84) and is lowest for thrust faults. A gradient-boosting model with SHAP reveals that spatial b-value variability is dominated by catalog completeness (R-squared drops from 0.29 to 0.02 without the Mc feature). The framework offers a reproducible procedure for standardizing multi-scale catalogs.

Keywords*: b-value, magnitude of completeness, catalog harmonization, machine learning, BMKG*

I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama sehingga memiliki produktivitas gempa yang sangat tinggi [1]. Katalog gempa nasional yang dikelola Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) melalui RepoGempa menjadi sumber data utama untuk kajian bahaya seismik, perencanaan tata ruang, dan mitigasi bencana. Katalog tersebut memuat 176.384 event pada rentang 2008 hingga 2026 dengan 37 variabel, termasuk informasi mekanisme fokus.

Permasalahan mendasar muncul dari kualitas katalog. Pertama, katalog BMKG mencampur paling sedikit sebelas skala magnitudo (*M*, *MLv*, *mb*, *mB*, *Mw*, *Mw(mB)*, *Mw(Mwp)*, *Mwp*, *ML*, dan *Mjma*) yang mengukur besaran fisik berbeda dan tidak dapat dibandingkan secara langsung [2], [3]. Kedua, dominasi skala berubah antar-tahun sehingga menimbulkan diskontinuitas artifisial pada analisis deret waktu. Ketiga, katalog selalu tidak lengkap di bawah ambang magnitudo kelengkapan (*magnitude of completeness*, Mc), dan menyertakan event di bawah Mc menekan estimasi nilai-b secara sistematis [4].

Studi-studi terdahulu yang memanfaatkan katalog ini umumnya terbatas pada statistik deskriptif, prediksi deret waktu naif yang tidak sahih secara seismologis, atau klasifikasi potensi tsunami dengan algoritme sederhana [2], [3]. Belum ada studi yang secara sistematis menghomogenkan skala magnitudo terhadap katalog acuan global melalui pencocokan event, memetakan Mc secara spasial, sekaligus mengoreksi nilai-b dan menginterpretasikannya dengan pembelajaran mesin.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) membangun prosedur harmonisasi magnitudo lintas-katalog BMKG-USGS dan menurunkan relasi konversi empiris spesifik Indonesia; (2) mengestimasi Mc secara global, spasial, dan temporal; (3) memetakan nilai-b beserta ketidakpastiannya dan mengaitkannya dengan

kedalaman serta rezim sesar; dan (4) menjelaskan kontrol variasi nilai-b menggunakan *gradient boosting* dan SHAP. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi harmonisasi lintas-katalog, koreksi kelengkapan, dan pembelajaran mesin dalam satu kerangka yang dapat direplikasi.

II. STUDI PUSTAKA

A. Hubungan Gutenberg-Richter dan Nilai-b

Hubungan frekuensi-magnitudo Gutenberg-Richter (GR) merupakan model empiris paling fundamental dalam seismologi dan menyatakan bahwa jumlah gempa menurun secara eksponensial terhadap magnitudo [5], [6]. Parameter kemiringan, yaitu nilai-b, umumnya mendekati satu untuk seismisitas tektonik dan diinterpretasikan sebagai proksi kondisi tegangan: nilai-b rendah dikaitkan dengan tegangan diferensial tinggi dan potensi pelepasan energi besar, sedangkan nilai-b tinggi dikaitkan dengan heterogenitas tegangan, fluida, atau aktivitas vulkanik [1]. Estimasi nilai-b rentan bias pada katalog bersampel kecil, sehingga ukuran sampel dan rentang magnitudo perlu dilaporkan secara eksplisit [11], [12].

B. Magnitudo Kelengkapan

Mc adalah magnitudo terendah yang seluruhnya terdeteksi jaringan. Estimasi Mc yang keliru menghasilkan bias nilai-b yang besar [4], [7]. Beberapa metode yang lazim dipakai adalah *maximum curvature* (MAXC), *goodness-of-fit test* (GFT), dan stabilitas nilai-b (MBS). Karena katalog ini memiliki transisi kelengkapan yang landai akibat percampuran skala, metode tunggal rentan gagal sehingga pendekatan multi-metode diperlukan [7].

C. Homogenisasi Skala Magnitudo

Konversi antar-skala biasanya memakai relasi empiris global, sedangkan pendekatan yang lebih andal adalah mencocokkan event yang sama pada dua katalog dan menurunkan relasi spesifik wilayah [2], [3], [9]. Regresi orthogonal (*total least squares*) lebih tepat daripada regresi kuadrat terkecil biasa karena kedua variabel mengandung galat pengukuran [8].

D. Pembelajaran Mesin dalam Seismologi

Pembelajaran mesin telah dipakai untuk klasifikasi sinyal, deteksi event, dan analisis pola spasial, termasuk penyusunan katalog beresolusi tinggi di Indonesia [10]. Namun, penerapannya untuk menjelaskan kontrol nilai-b masih jarang. Interpretasi model dengan SHAP memungkinkan kuantifikasi kontribusi tiap fitur secara transparan, sesuatu yang penting dalam konteks kebumian.

III. METODE

A. Data

Data utama adalah katalog BMKG (176.384 event, 1 November 2008 hingga 14 Juli 2026) dan katalog USGS (32.037 event pada domain kajian). Setelah pemfilteran domain Indonesia (6 derajat Lintang Utara hingga 11 derajat Lintang Selatan, 94 hingga 142 derajat Bujur Timur), pembuangan kedalaman tidak fisis (nilai ekstrem 90.000 km), dan pembuangan event tanpa magnitudo, diperoleh 142.227 event. Data pendukung meliputi geometri sesar aktif dan daftar stasiun seismik BMKG.

B. Pencocokan Lintas-Katalog

Event BMKG dan USGS dianggap identik apabila selisih waktu origin tidak lebih dari 30 detik dan jarak episentral tidak lebih dari 100 km. Pencarian diefisienkan dengan pengurutan waktu dan jendela *searchsorted*. Setiap event USGS hanya dipakai satu kali berdasarkan jarak terkecil. Proses ini menghasilkan 9.705 pasangan dengan median selisih waktu 1,3 detik dan median jarak 14,4 km. Kriteria pencocokan mengikuti praktik lazim integrasi katalog regional [2], [9].

C. Regresi Orthogonal dan Homogenisasi

Untuk setiap tipe magnitudo BMKG diturunkan relasi linier terhadap Mw USGS menggunakan regresi orthogonal via dekomposisi nilai singular [8]:

$$M_tipe = alpha * M_w + beta \quad (1)$$

dengan alpha adalah kemiringan dan beta adalah intersep. Konversi ke Mw dilakukan dengan membalik relasi tersebut. Tipe dengan minimal 30 pasangan difit secara empiris; tipe lain memakai relasi literatur sebagai cadangan.

D. Declustering

Untuk memisahkan gempa utama dari rangkaian susulan, diterapkan jendela ruang-waktu Gardner-Knopoff (1974) [13]:

$$log10\ R = 0{,}1238\ M + 0{,}983 \quad (2)$$

$$log10\ T = 0{,}032\ M + 2{,}7389 \quad (3)$$

dengan R jari-jari (km) dan T selang waktu (hari). Setiap event dengan M minimal 4,0 yang belum ditandai menjadi *mainshock*.

E. Estimasi Mc dan Nilai-b

Mc diestimasi dengan MAXC, GFT, dan MBS pada tingkat global, per sel grid 1 derajat, dan per tahun [4], [7]. Nilai-b diestimasi dengan *maximum likelihood* Aki-Utsu [5]:

$$b = log10(e) / (M_rata - (Mc - dM/2)) \quad (4)$$

Ketidakpastian dihitung dengan formulasi Shi-Bolt [6] dan interval kepercayaan bootstrap 95 persen (500 resampel). Parameter produktivitas a dihitung sebagai a = log10 N(M >= Mc) + b Mc. Ukuran sampel dan rentang magnitudo tiap unit analisis dilaporkan untuk menghindari bias estimasi nilai-b [11], [12].

F. Mekanisme Fokus

Untuk event dengan data mekanisme fokus, matriks momen dibentuk dari strike, dip, dan rake, lalu diekstraksi sumbu tekanan (P), tarikan (T), dan netral (N) melalui dekomposisi eigen. Rezim sesar diklasifikasikan dari *plunge* sumbu P dan T menjadi *thrust*, *normal*, *strike-slip*, dan *oblique*.

G. Pembelajaran Mesin

Tiga tugas dijalankan. Pertama, regresi nilai-b per sel grid dengan *gradient boosting* dan validasi silang spasial untuk mencegah kebocoran antar sel bertetangga, diinterpretasi dengan SHAP [10]. Kedua, klasifikasi rezim sesar dengan *Random Forest* menggunakan fitur spasio-

tektonik tanpa strike/dip/rake. Ketiga, klasterisasi K-Means untuk menurunkan tipologi wilayah seismik dengan jumlah klaster dipilih berdasarkan skor siluet. Seluruh pipeline diimplementasikan dalam Python dan dapat direplikasi melalui skrip tunggal.

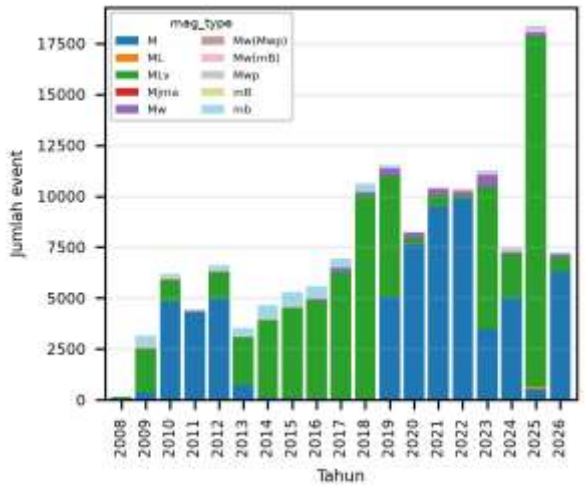
Tabel 1. Relasi konversi M_tipe = a x Mw + b untuk tiap tipe magnitudo BMKG (lit. = literatur)

Tipe	a	b	R	n
M	1,058	-0,253	0,894	184
Mw	1,001	-0,011	0,974	486
Mw(mB)	1,085	-0,459	0,924	801
mb	0,915	0,505	0,715	221
ML, MLv, Mwp, mB (lit.)	-	-	-	-

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Heterogenitas Skala Magnitudo

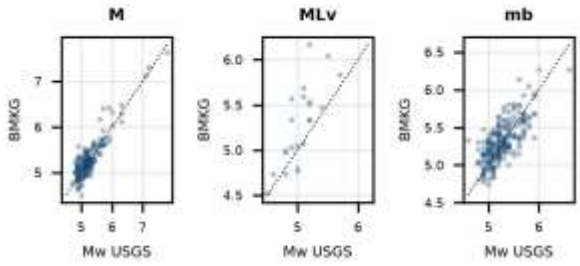
Gambar 1 memperlihatkan komposisi tipe magnitudo per tahun. Terlihat bahwa dominasi skala bergeser secara drastis: tipe *M* mendominasi pada 2010-2012 dan 2020-2022, sedangkan *MLv* mendominasi pada 2013-2019 dan 2025. Pola ini menegaskan bahwa analisis yang mengabaikan tipe skala akan menghasilkan diskontinuitas artifisial, terutama pada deret waktu dan estimasi nilai-b.



Gambar 1. Komposisi tipe magnitudo BMKG per tahun sebagai bukti heterogenitas katalog.

B. Validasi dan Homogenisasi Magnitudo

Dari 9.705 pasangan, 71.634 event (50,4 persen) dikonversi dengan relasi empiris dan 70.586 event (49,6 persen) dengan relasi literatur. Gambar 2 menunjukkan kesesuaian magnitudo BMKG terhadap Mw referensi USGS. Tipe *Mw* hampir identik dengan acuan (R sama dengan 0,974), sedangkan tipe *M* dan *Mw(mB)* memiliki korelasi tinggi. Relasi *mb* lebih lemah (R sama dengan 0,715) karena rentang magnitudonya sempit. Tabel 1 merangkum relasi tersebut.



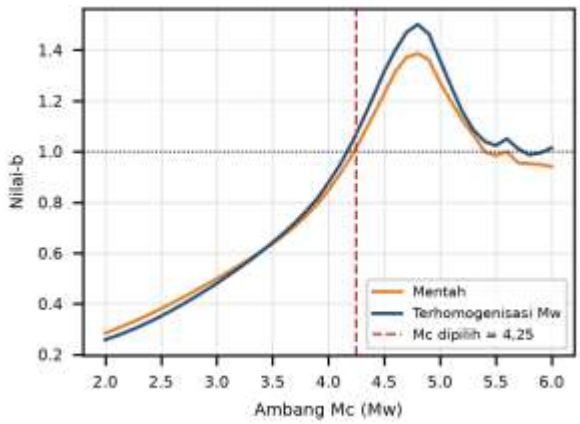
Gambar 2. Validasi silang magnitudo BMKG terhadap Mw referensi USGS.

C. Dampak Homogenisasi terhadap Nilai-b

Tabel 2. Parameter Gutenberg-Richter pada berbagai konfigurasi katalog

Katalog	N	Mc	Nilai-b	CI 95%
Mentah (campur skala)	142.227	3,05	0,512	-
Mw (penuh)	142.227	4,25	1,066	1,056-1,076
Mw + declustered	38.335	3,45	1,390	1,374-1,406

Temuan paling menonjol adalah besarnya bias akibat pencampuran skala. Nilai-b katalog dengan magnitudo mentah hanya 0,512, jauh di bawah nilai tipikal 1,0. Setelah homogenisasi dan pemilihan Mc yang tepat, nilai-b naik menjadi 1,066 dengan interval kepercayaan sempit. Declustering lebih lanjut menghasilkan nilai-b latar sebesar 1,390, konsisten dengan katalog USGS independen. Gambar 3 menegaskan sensitivitas nilai-b terhadap ambang Mc: kurva magnitudo mentah bersifat tidak monoton, sedangkan kurva terhomogenisasi jauh lebih stabil. Pola ini sejalan dengan peringatan bahwa estimasi nilai-b sangat sensitif terhadap ukuran sampel dan ketaklengkapan katalog [11], [12].

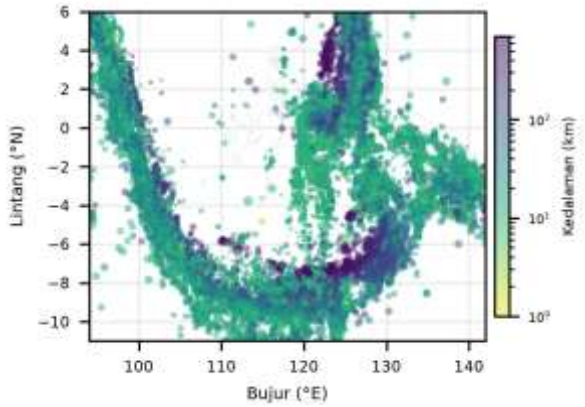


Gambar 3. Sensitivitas nilai-b terhadap ambang Mc: efek heterogenitas magnitudo.

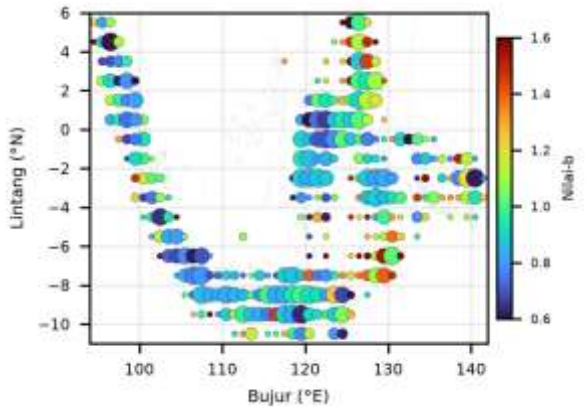
D. Pola Spasial Mc dan Nilai-b

Grid 1 derajat menghasilkan 291 sel dengan jumlah event memadai. Median Mc spasial BMKG adalah 3,95, lebih rendah daripada USGS (4,65), menandakan sensitivitas jaringan lokal yang lebih baik namun tidak seragam. Sebaran episentrum ditampilkan pada Gambar 4, peta nilai-b pada Gambar 5. Rata-rata nilai-b spasial adalah 1,016 dengan simpangan baku 0,405; zona nilai-b rendah terkonsentrasi pada segmen tertentu busur Sunda dan

Sulawesi, sejalan dengan pendekatan pemetaan nilai-b berdefinisi tinggi [14].



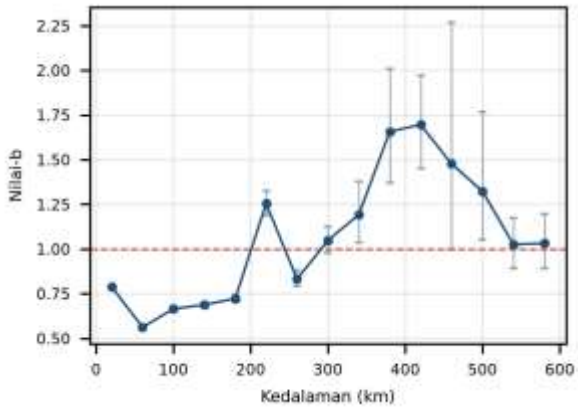
Gambar 4. Sebaran episentrum gempa Indonesia dari katalog BMKG yang telah dibersihkan.



Gambar 5. Peta spasial nilai-b hasil katalog terhomogenisasi Mw.

E. Ketergantungan Nilai-b pada Kedalaman dan Rezim Sesar

Nilai-b menurun secara sistematis terhadap kedalaman, dari 1,113 pada 0-50 km hingga 0,839 pada 300-700 km (Gambar 6). Pola ini konsisten dengan peningkatan tekanan litostatik dan perubahan mekanisme deformasi menuju mantel. Dari sisi rezim sesar, nilai-b terendah terdapat pada sesar *thrust* (0,804) dan *normal* (0,840), serta tertinggi pada *oblique* (0,994). Komposisi rezim dari 4.247 mekanisme fokus adalah *thrust* 35,8 persen, *strike-slip* 32,9 persen, *oblique* 19,2 persen, dan *normal* 12,1 persen. Nilai-b rendah pada sesar *thrust* mengindikasikan distribusi tegangan yang lebih seragam dengan potensi pelepasan energi besar, sejalan dengan dominasi gempa megathrust di Indonesia.



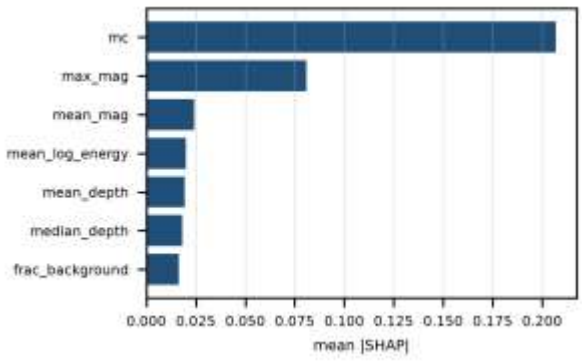
Gambar 6. Profil nilai-b terhadap kedalaman beserta interval kepercayaan bootstrap.

Tabel 3. Nilai-b menurut pita kedalaman dan rezim sesar

Kelompok	N	Mc	Nilai-b	CI 95%
0-50 km	106.276	4,25	1,113	1,101-1,126
50-100 km	14.721	4,45	1,056	1,031-1,088
100-300 km	19.146	5,75	1,010	0,843-1,295
300-700 km	2.081	5,35	0,839	0,678-1,076
Thrust	1.520	4,75	0,804	0,759-0,849
Normal	516	5,15	0,840	0,723-0,969
Strike-slip	1.396	5,65	0,883	0,704-1,154
Oblique	815	5,35	0,994	0,864-1,165

F. Analisis Pembelajaran Mesin

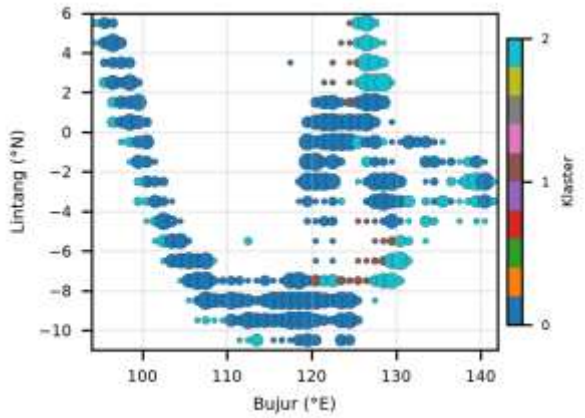
Model *gradient boosting* dengan validasi silang spasial mencapai R-kuadrat 0,294 dan RMSE 0,340. Analisis SHAP pada Gambar 7 menempatkan Mc sebagai prediktor dominan (mean nilai absolut SHAP 0,207), diikuti magnitudo maksimum, magnitudo rata-rata, energi, dan kedalaman. Uji robustnes mengungkap temuan penting: ketika fitur Mc dihilangkan, R-kuadrat anjlok menjadi 0,020. Artinya, sebagian besar variabilitas nilai-b antar-sel yang tampak bukanlah sinyal tektonik, melainkan efek kelengkapan katalog. Implikasi metodologisnya, peta nilai-b tanpa koreksi Mc berpotensi menyesatkan.



Gambar 7. Kepentingan fitur SHAP model nilai-b per sel grid.

Klasifikasi rezim sesar dari fitur spasio-tektonik tanpa strike/dip/rake mencapai akurasi 0,390 dan macro-F1 0,351, di atas tebakan acak (0,25). Fitur paling penting adalah lintang, bujur, Mw, dan kedalaman. Akurasi moderat ini menegaskan bahwa gaya tektonik hanya sebagian dapat diinferensikan dari posisi dan kedalaman sehingga data mekanisme fokus tetap diperlukan.

Klasterisasi K-Means menghasilkan tiga klaster optimal: klaster dangkal bernilai-b rendah (b 0,90; kedalaman 37 km), klaster dalam bernilai-b tinggi (b 1,54; kedalaman 296 km), dan klaster transisi (b 1,13; kedalaman 46 km), sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Tipologi wilayah seismik hasil klasterisasi K-Means (k sama dengan 3).

G. Diskusi dan Keterbatasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa harmonisasi magnitudo bukan sekadar formalitas: tanpa harmonisasi, kesimpulan tentang tingkat tegangan wilayah dapat keliru hingga hampir dua kali lipat. Temuan bahwa kelengkapan katalog mendominasi variasi nilai-b juga memberikan peringatan metodologis bagi penelitian serupa. Beberapa keterbatasan perlu dicatat. Pertama, relasi konversi tipe *MLv* dan *ML* masih memakai literatur karena keterbatasan pasangan dengan Mw USGS. Kedua, declustering Gardner-Knopoff yang agresif berpotensi membuang sebagian event latar. Ketiga, data mekanisme fokus hanya tersedia pada sekitar empat persen event. Keempat, aktivitas vulkanik dan non-tektonik belum dipisahkan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini membangun kerangka harmonisasi katalog gempa heterogen untuk analisis bahaya seismik Indonesia. Homogenisasi magnitudo lintas-katalog melalui 9.705 pasangan event menghasilkan relasi konversi empiris spesifik Indonesia dan mengoreksi nilai-b katalog penuh dari 0,512 menjadi 1,066, serta 1,390 setelah declustering, konsisten dengan katalog USGS. Kelengkapan katalog BMKG lebih baik daripada USGS namun sangat bervariasi secara spasial. Nilai-b menurun terhadap kedalaman dan paling rendah pada sesar *thrust*. Pembelajaran mesin mengungkapkan bahwa variasi nilai-b spasial didominasi kelengkapan katalog, sebuah peringatan metodologis penting. Kerangka ini bersifat umum dan dapat diterapkan pada katalog seismik multi-skala lainnya. Penelitian lanjutan disarankan memvalidasi relasi konversi dengan *moment magnitude* regional dan memisahkan event vulkanik untuk memperhalus interpretasi tektonik.

REFERENSI

[1] S. J. Hutchings and W. Mooney, “The seismicity of Indonesia and tectonic implications,” Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 22, 2021, doi: 10.1029/2021GC009812.

[2] G. Weatherill, M. Pagani, and J. García, “Exploring earthquake databases for the creation of magnitude-homogeneous catalogues: tools for application on a regional and global scale,” Geophysical Journal International, vol. 206, no. 3, pp. 1652-1676, 2016, doi: 10.1093/gji/ggw232.

[3] A. F. Masykuri, W. Suryanto, T. M. Irnaka, and B. Pranata, “Integrated and standardised earthquake catalogue of Indonesia (88 AD-2024),” Frontiers in Earth Science, vol. 14, 2026, doi: 10.3389/feart.2026.1779764.

[4] S. Wiemer and M. Wyss, “Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan,” Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 90, no. 4, pp. 859-869, 2000, doi: 10.1785/0119990114.

[5] K. Aki, “Maximum likelihood estimate of b in the formula log N = a - bM and its confidence limits,” Bulletin of the Earthquake Research Institute, vol. 43, pp. 237-239, 1965.

[6] Y. Shi and B. A. Bolt, “The standard error of the magnitude-frequency b value,” Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 72, no. 5, pp. 1677-1687, 1982, doi: 10.1785/BSSA0720051677.

[7] J. Woessner and S. Wiemer, “Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty,” Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 95, no. 2, pp. 684-698, 2005, doi: 10.1785/0120040007.

[8] R. Das, H. R. Wason, and M. L. Sharma, “Magnitude conversion to unified moment magnitude using orthogonal regression relation,” Journal of Asian Earth Sciences, vol. 50, pp. 44-51, 2012, doi: 10.1016/j.jseaes.2012.01.014.

[9] I. Grigoratos, V. Poggi, L. Danciu, and R. Monteiro, “Homogenizing instrumental earthquake catalogs - a case study around the Dead Sea Transform Fault Zone,” Seismica, vol. 2, no. 2, 2023, doi: 10.26443/seismica.v2i2.402.

[10] C. Jiang, P. Zhang, M. C. A. White, R. Pickle, and M. Miller, “A detailed earthquake catalog for Banda Arc-Australian Plate collision zone using machine-learning phase picker and an automated workflow,” The Seismic Record, vol. 2, no. 1, pp. 1-10, 2022, doi: 10.1785/0320210041.

[11] F. Nava, V. Márquez-Ramírez, F. Zúñiga, L. Ávila-Barrientos, and C. Quinteros, “Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size,” Journal of Seismology, vol. 21, pp. 127-135, 2016, doi: 10.1007/s10950-016-9589-1.

[12] W. Marzocchi, I. Spassiani, A. Stallone, and M. Taroni, “How to be fooled searching for significant variations of the b-value,” Geophysical Journal International, vol. 220, no. 3, pp. 1845-1856, 2020, doi: 10.1093/gji/ggz541.

[13] J. K. Gardner and L. Knopoff, “Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?,” Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 64, no. 5, pp. 1363-1367, 1974.

[14] M. Taroni, J. Zhuang, and W. Marzocchi, “High-definition mapping of the Gutenberg-Richter b-value and its relevance: a case study in Italy,” Seismological Research Letters, vol. 92, no. 6, pp. 3778-3791, 2021, doi: 10.1785/0220210017.