

IDENTIFIKASI MISORIENTATION SENSOR SEISMOGRAF BMKG MENGUNAKAN METODE *P-WAVE PARTICLE MOTION*: STUDI DI PULAU SUMATERA BAGIAN UTARA

Chichi Nurhafizah^{1,2}, Purwadi Agus Darwito¹, Wijayanto², dan Hendro Nugroho²

¹Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

e-mail : chichinurhafizah83@gmail.com

Abstrak. Analisis polaritas gelombang P dapat digunakan untuk mengevaluasi keakuratan orientasi sensor seismograf. Ketidaktepatan orientasi (*misorientation*) berpotensi menurunkan akurasi penentuan mekanisme sumber gempa bumi. Penelitian ini menganalisis orientasi sensor seismograf BMKG di wilayah Sumatera bagian utara dengan menggunakan metode *P-Wave Particle Motion*. Sebanyak 58 sensor berhasil dianalisis secara kuantitatif dan menghasilkan estimasi sudut orientasi aktual. Hasil menunjukkan bahwa sensor memiliki variasi *misorientation* berkisar antara 1° hingga 46°, dengan 15 sensor di antaranya menunjukkan nilai *misorientation* signifikan, yaitu RSSM (46°), MASM (28°), PAASI (27°), SLSM (24°), TPTI (23°), GESM dan SKSI (22°), TKSM dan BESM (20°), SMSM (19°), LTSM dan TASI (18°), PDSI (17°), serta PLSI dan KASAI (16°). Temuan ini menunjukkan ketidaksesuaian arah pemasangan sensor terhadap arah utara sejati, yang dapat menurunkan kualitas interpretasi data seismik, sehingga evaluasi *misorientation* sensor berbasis data perlu dilakukan secara berkala guna menjaga reliabilitas data seismik nasional. Penelitian ini merupakan evaluasi sistematis berskala besar pertama terhadap orientasi sensor BMKG di Indonesia dengan memanfaatkan analisis gerak partikel gelombang teleseismik, sehingga memberikan dasar ilmiah penting bagi pengembangan standar kualitas jaringan seismograf di masa mendatang.

Kata Kunci: *Misorientation* Sensor Seismograf BMKG; *P-Wave Particle Motion*; Sumatera

Abstract. *P-wave polarity analysis can be used to evaluate the accuracy of seismograph sensor orientation. Incorrect orientation (misorientation) has the potential to reduce the accuracy of earthquake source mechanism determination. This study analyzes the orientation of BMKG seismograph sensors in northern Sumatra using the P-Wave Particle Motion method. A total of 58 sensors were quantitatively evaluated, producing estimates of their actual orientation angles. The results show that the sensors exhibit misorientation values ranging from 1° to 46°, with 15 sensors displaying significant deviations, ions RSSM (46°), MASM (28°), PAASI (27°), SLSM (24°), TPTI (23°), GESM and SKSI (22°), TKSM and BESM (20°), SMSM (19°), LTSM and TASI (18°), PDSI (17°), and PLSI and KASAI (16°). These findings indicate a misalignment between the sensor installation direction and true north, which may degrade the quality of seismik data interpretation. Therefore, sensor misorientation evaluations based on data analysis need to be conducted regularly to maintain the reliability of national seismic data. This research represents the first large scale systematic evaluation of BMKG sensor orientation in Indonesia using teleseismic P-wave particle motion analysis, providing an important scientific basis for future improvements in seismograph network quality standards.*

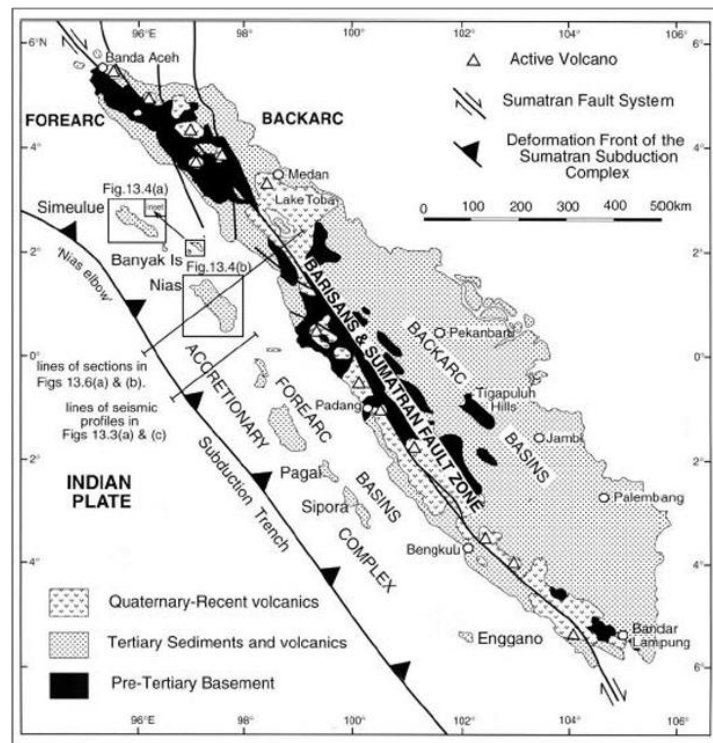
Keywords: *BMKG Seismograph Sensor Misorientation; P-Wave Particle Motion; Sumatra*

PENDAHULUAN

Pulau Sumatra berada di area subduksi antara Lempeng India-Australia dan Lempeng Eurasia, dengan kecepatan konvergensi mencapai 50 hingga 70 mm/tahun (Natawidjaja, 2007). Zona subduksi ini membentang dari Selat Sunda hingga Laut Andaman. Secara tektonik, Pulau Sumatra merupakan zona aktif yang didominasi oleh proses subduksi Lempeng India yang bergerak ke arah timur laut di bawah pulau tersebut. Proses ini membentuk zona penunjaman di Palung Sunda serta menghasilkan Zona Patahan Sumatra (Sumatran Fault Zone, SFZ), yang merupakan sesar mendatar dekstral (*strike-slip*) yang membentang sejajar sepanjang pulau dari barat laut ke tenggara. SFZ memiliki panjang sekitar 1.900 km dan terdiri dari 19 segmen dengan panjang bervariasi antara 35 hingga 200 km (Sieh & Natawidjaja, 2000). Zona ini (Gambar 1) dikenal sebagai salah satu sumber gempa bumi paling aktif di dunia (Barber, Crow & Milsom, 2005)

Salah satu institusi yang berperan krusial dalam pemantauan dan analisis aktivitas seismik di Indonesia adalah Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). BMKG mengoperasikan jaringan sensor

seismograf yang tersebar luas di seluruh Indonesia guna mendeteksi dan merekam getaran tanah akibat aktivitas seismik (Nugraha *et al.*, 2023). Informasi yang diperoleh dari jaringan ini sangat krusial untuk keperluan pemantauan, analisis, peringatan dini, serta penelitian ilmiah dalam upaya mitigasi risiko bencana.



Gambar 1. Peta struktur geologi Pulau Sumatera (Sumber: Barber, Crow dan Milsom (2005))

Interpretasi data seismik yang akurat memerlukan sensor seismograf yang terpasang dengan orientasi yang tepat menuju utara sejati (true north). Apabila terjadi kesalahan dalam penempatan arah ini, maka sensor mengalami apa yang disebut sebagai *misorientation*. *Misorientation* sensor seismograf adalah kondisi ketika sumbu horizontal sensor, yakni komponen utara-selatan dan timur-barat, tidak sejajar dengan arah geografis sebenarnya, sehingga menyebabkan deviasi dalam pencatatan arah datang gelombang seismik. Deviasi ini berimplikasi serius terhadap keakuratan penentuan mekanisme sumber gempa bumi. Park *et al.*, 2023 menyatakan bahwa orientasi sensor yang tidak akurat dapat menurunkan kualitas data seismik dan berpotensi menghasilkan keputusan mitigasi yang keliru.

Kesalahan orientasi pada sensor seismograf dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, salah satunya adalah kondisi lingkungan berperan penting, seperti variasi geologi lokal yang mengganggu orientasi seperti gunung berapi atau daerah kutub bumi, serta material bermagnet pada bangunan terdekat yang dapat mempengaruhi sensor (Cesca dan Grigoli, 2015; Zaldívar *et al.*, 2016) atau pergeseran sensor akibat gempa bumi besar juga dapat menyebabkan perubahan orientasi dari posisi awal. Karena alasan tersebut, Global Seismographic Network (GSN) telah menghentikan penggunaan metode orientasi magnetik sejak 2009 (Ringler *et al.*, 2013). Karena faktor teknis tersebut, pemeliharaan dan kalibrasi rutin sebagaimana diwajibkan dalam UU Nomor 31 Tahun 2009 Pasal 48 (Republik Indonesia, 2009) berperan penting dalam menjaga kelayakan operasi peralatan pemantauan.

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menilai orientasi sensor seismograf dengan memanfaatkan rekaman gelombang seismik, baik melalui analisis polarisasi gelombang permukaan (Laske, 1995; Ekström dan Busby, 2008; Stachnik *et al.*, 2012; Rueda & Mezcuca, 2015; Doran & Laske, 2017; Scholz *et al.*, 2017; Ekström & Nettles, 2018; Mir *et al.*, 2022), gelombang P (Niu & Li, 2011; Wang *et al.*, 2016; Ojo *et al.*, 2019; Braunmiller *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2021; Seo *et al.*, 2022; Pornsopin *et al.*, 2023; Albuquerque *et al.*, 2024), gelombang SKS (Tian *et al.*, 2011), fungsi penerima (Lim *et al.*, 2018), maupun dengan metode berbasis

ambient noise (Zha *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2018; Ensing dan Van Wijk, 2019). Di antara pendekatan tersebut, metode berbasis gelombang P terbukti cukup akurat untuk mengidentifikasi arah orientasi sensor, terutama pada jaringan seismik permanen (Pornsopin *et al.*, 2023). Metode ini bekerja dengan membandingkan arah datang gelombang seismik (*back azimuth*) yang dihitung dari lokasi gempa dan sensor, dengan arah gerak partikel gelombang P yang direkam oleh sensor. Ketidaksesuaian sudut antara keduanya menjadi indikasi adanya kesalahan orientasi sensor.

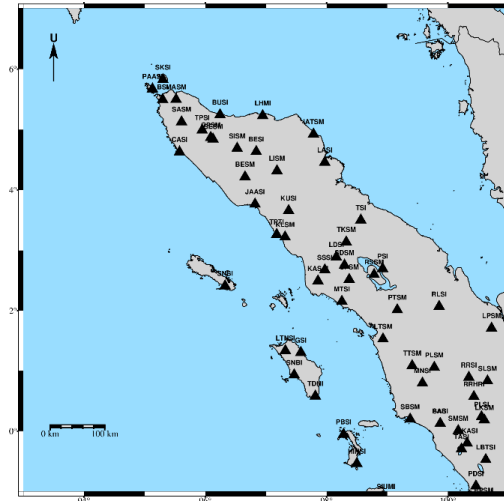
Metode evaluasi orientasi sensor seismograf yang berbasis gelombang P, memungkinkan identifikasi kesalahan orientasi secara kuantitatif dengan tingkat presisi yang tinggi. Untuk menilai akurasi orientasi tersebut, diperlukan acuan klasifikasi yang jelas. Klasifikasi tingkat orientasi sensor mengacu pada studi Braunmiller *et al.* (2020) dan Pornsopin *et al.* (2023), yang menunjukkan bahwa penyimpangan orientasi sensor dengan deviasi sudut $\leq 15^\circ$ dikategorikan memiliki orientasi baik, sedangkan nilai di atas 15° dianggap signifikan dan berpotensi memengaruhi akurasi rekaman seismik, karena terbukti menghasilkan distorsi signifikan pada komponen radial-transversal dan berkaitan dengan misfit amplitudo serta fase yang lebih besar sehingga mempengaruhi interpretasi data seismik. Dengan mengacu pada kriteria ini, evaluasi *misorientation* sensor dapat dilakukan secara lebih sistematis dan dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan teknis dalam pemeliharaan dan perbaikan jaringan seismograf.

Pulau Sumatera merupakan salah satu wilayah dengan aktivitas seismik tinggi di Indonesia, namun studi kuantitatif mengenai *misorientation* sensor seismograf BMKG menggunakan pendekatan gelombang P teleseismik masih sangat terbatas. Dengan jaringan sensor yang relatif padat, wilayah ini menawarkan kondisi ideal untuk menerapkan standar evaluasi orientasi sensor secara komprehensif sesuai klasifikasi yang ada. Penelitian ini menggunakan metode *P-wave particle motion* pada data multi *event* teleseismik untuk memperoleh estimasi *misorientation* yang konsisten dan kuantitatif, serta menyajikan distribusi spasial orientasi sensor sebagai dasar evaluasi kualitas instrumen. Fokus penelitian ini adalah identifikasi orientasi sensor seismograf BMKG di Sumatera bagian utara dengan hasil yang diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah untuk koreksi orientasi sensor, meningkatkan reliabilitas data seismik nasional, dan memperkuat sistem mitigasi bencana di Indonesia. Selain itu, hasil penelitian ini berpotensi memberi kontribusi langsung terhadap peningkatan akurasi sistem peringatan dini BMKG, mengingat orientasi sensor yang tepat merupakan faktor kunci dalam menghasilkan estimasi sumber gempa yang cepat dan andal.

METODOLOGI

Penelitian ini disusun sebagai studi kuantitatif dengan pendekatan eksploratif dan deskriptif yang bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat *misorientation* sensor seismograf melalui analisis gelombang seismik, khususnya gelombang P dari peristiwa gempa bumi teleseismik. Metode ini dipilih karena bersifat tidak destruktif dan memungkinkan evaluasi sistematis terhadap kualitas instalasi sensor secara jarak jauh tanpa intervensi fisik di lapangan yang memerlukan biaya yang besar.

Populasi dalam penelitian ini meliputi seluruh sensor seismograf permanen yang dimiliki oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang tersebar di Sumatera bagian utara. Kawasan ini dipilih mengingat aktivitas seismik yang tinggi dan kompleksitas tektonik akibat zona subduksi aktif serta Sumatran Fault Zone (SFZ). Sebanyak 58 sensor seismograf, baik tipe *short period* maupun *broadband*, dipilih sebagai sampel, dengan distribusi geografis pada koordinat $6,0^\circ \text{ LU} - 1,0^\circ \text{ LS}$ dan $95,0^\circ \text{ BT} - 101,0^\circ \text{ BT}$ (Gambar 2). Pemilihan wilayah ini juga mempertimbangkan kerentanan bencana dan kepadatan penduduk, sehingga temuan penelitian diharapkan relevan secara strategis dan operasional.



Gambar 2. Lokasi sensor seismograf BMKG di Sumatera bagian utara

Gambar 3 merupakan sebuah plot skema komponen horizontal dari sensor yang mengalami *misorientation* terhadap arah utara dan timur geografis. Secara konseptual, terdapat tiga besaran sudut utama yang digunakan, yaitu *theoretical azimuth* (θ_T), *back azimuth* (θ_A), dan sudut *misorientation* sensor (θ_M). *Theoretical azimuth* (θ_T) merepresentasikan arah datang gelombang seismik dari episenter menuju sensor, yang dihitung berdasarkan koordinat geografis sumber gempa teleseismik dan sensor. Sementara itu, *back azimuth* (θ_A) diperoleh dari analisis gerak partikel gelombang P pada seismogram tiga komponen, yang mencerminkan arah dominan penjalaran gelombang yang terekam oleh sensor dari gempa bumi yang sama. Selisih antara kedua sudut tersebut didefinisikan sebagai sudut *misorientation* sensor (θ_M), yang menunjukkan deviasi orientasi instrumen terhadap utara sejati. Hubungan ketiga besaran tersebut dirumuskan sebagai berikut:

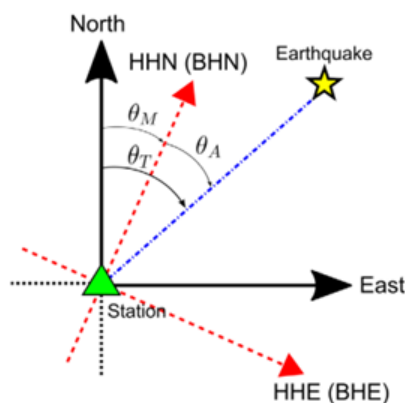
$$|\theta_M| = \theta_T - \theta_A \quad 1$$

dimana

$|\theta_M|$ = sudut absolut *misorientation* sensor

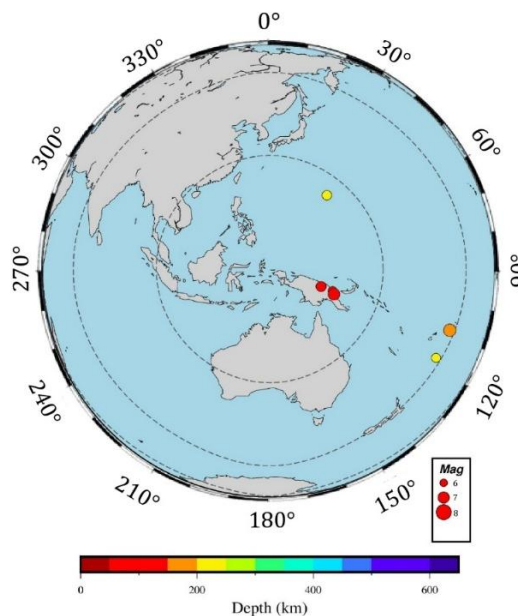
θ_T = sudut hasil perhitungan epicenter gempa bumi teleseismik terhadap utara

θ_A = sudut yang dihasilkan gerak partikel gelombang P dari gempa bumi teleseismik



Gambar 3. Ilustrasi yang menjelaskan hubungan antara *azimuth* hasil perhitungan dengan *bearing formula* (θ_T) dari gempa bumi teleseismik (bintang) dengan *back azimuth* hasil gerak partikel gelombang P (θ_A) dari gempa bumi teleseismik yang sama. θ_M merupakan sudut searah jarum jam dari utara geografis ke komponen utara dari sensor horizontal (Son, Seo & Kim, 2022)

Jika seismometer terpasang dengan benar, maka arah *back azimuth* yang dihasilkan dari metode *P-Wave particle motion* akan sama nilainya dengan arah *theoretical azimuth* dari perhitungan dengan *bearing formula*. sehingga analisis ini akan memberikan wawasan tentang kondisi orientasi sensor.



Gambar 4. Peta lokasi kejadian gempa bumi teleseismik

Proses pengumpulan data dimulai dengan mengunduh rekaman gelombang gempa bumi teleseismik dari laman resmi BMKG (<https://geof.bmkg.go.id/webdc3/index.html>) dalam format fullSEED. Untuk menjamin kualitas dan relevansi data, hanya gempa bumi yang memenuhi empat kriteria yang dipilih, yakni: kejadian setelah tahun 2022, magnitudo lebih besar dari 7, kedalaman lebih dari 100 km, dan jarak episentral terhadap sensor antara 30° hingga 90° (Gambar 4).

Penambahan masif sensor seismograf oleh BMKG dimulai pada tahun 2020, sehingga kejadian gempa bumi yang dianalisis diambil mulai dari tahun 2022, ketika sensor-sensor tersebut telah efektif mencatat berbagai peristiwa seismik. Gempa bumi dengan magnitudo di atas 7.0 dipilih karena umumnya memiliki rasio sinyal terhadap *noise* (SNR) yang tinggi serta dapat dilokalisasi secara akurat oleh jaringan seismik global. Seleksi ini dirancang menghindari distorsi yang disebabkan oleh gelombang permukaan, serta mengeliminasi pengaruh triplikasi pada mantel atas (Lefevre & Helmberger, 1989) dan zona bayangan gelombang P (Shearer, 2009).

Amplitudo puncak awal gelombang P dalam seismogram tiga komponen (Gambar 5a), menunjukkan perpindahan atau kecepatan maksimum partikel pada komponen vertikal (Z) dan horizontal (Utara-Selatan dan Timur-Barat). Polaritas kedatangan gelombang P (naik atau turun) terkait dengan mekanisme sumber dan lokasi sensor terkait dengan sumber tersebut. Ketika gelombang P merambat dalam medium berlapis yang homogen dan isotropik, gerak partikel bersifat lurus (linier) dan terpolarisasi sepanjang lintasan sinar (*ray path*). Oleh karena itu, vektor kedatangan gelombang P yang direkam oleh sensor tiga komponen dapat diuraikan ke dalam komponen vertikal dan radial (Bormann & Wielandt, 2012). Sehingga, dengan menggunakan amplitudo dan polaritas gelombang P di ketiga komponen seismogram, sangat mungkin untuk memperkirakan *back azimuth* (θ_A) (Havskov *et al.*, 2012).

Nilai θ_A dapat didefinisikan sebagai sudut proyeksi permukaan dari sinar seismik yang menghubungkan sumber dan penerima (sensor) sepanjang jalur lingkaran besar (Wang *et al.*, 2016). Sehingga θ_A dapat dihitung sebagai perbandingan amplitudo pada komponen horizontal A_E dan A_N sesuai dengan persamaan 2 dan 3 serta dijelaskan pada Gambar 5b.

$$\theta_A = \left\{ \arctan \frac{A_E}{A_N}, \text{ if } AZI < 0 \text{ (down)} \right. \quad (2)$$

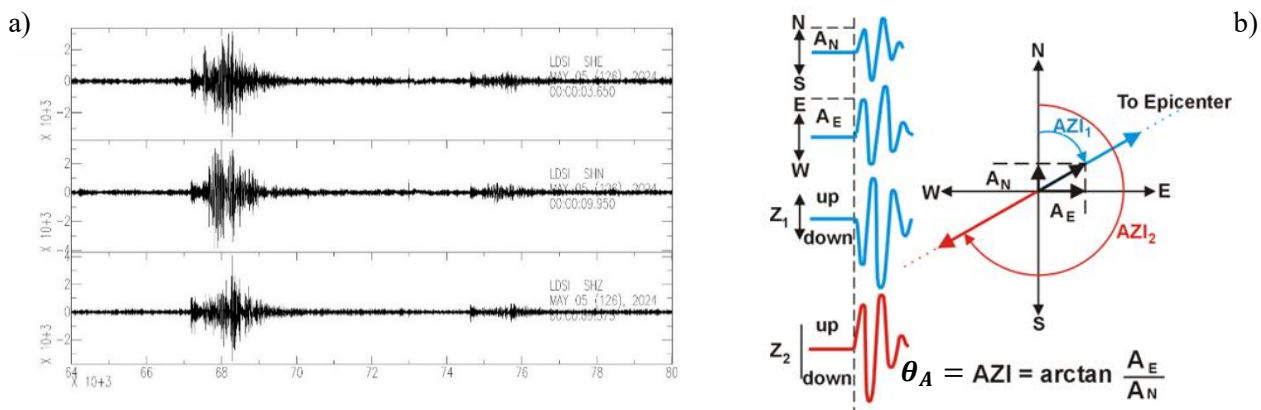
$$\theta_A = \left\{ \arctan \frac{A_E}{A_N} + 180^\circ, \text{ if } AZI < 0 \text{ (down)} \right. \quad (3)$$

dengan:

θ_A : Back azimuth

A_E : Komponen horizontal East-West

A_N : Komponen horizontal North-South

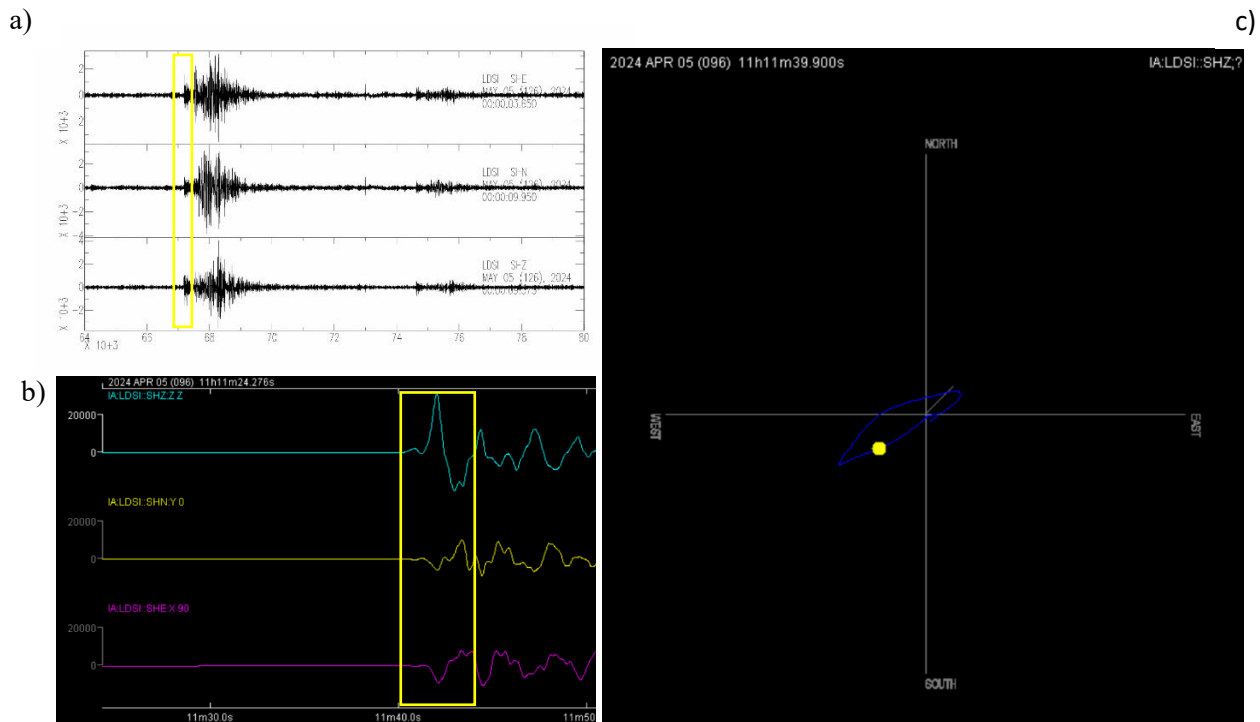


Gambar 5. Estimasi *back azimuth* menggunakan amplitudo dari polaritas gelombang P yang direkam oleh sensor tiga komponen. a) seismogram tiga komponen dari suatu peristiwa teleseismik yang menunjukkan kedatangan gelombang P. b) Penentuan *back azimuth* ($AZI = \theta_A$) dilakukan dengan menggunakan gerakan pertama gelombang P

Metode *P-wave particle motion* merupakan pendekatan analitis yang digunakan untuk mengkaji vektor gerakan partikel yang ditimbulkan oleh penjalaran gelombang P, yang menggambarkan perpindahan tiga dimensi medium akibat gangguan seismik. Dalam medium berlapis yang bersifat homogen dan isotropis, gerakan partikel gelombang P umumnya menunjukkan pola bujur sangkar dan terpolarisasi sepanjang jalur propagasi gelombang, sehingga vektor kedatangan gelombang dapat didekomposisi secara matematis menjadi komponen vertikal dan radial pada sistem rekaman triaksial (Havskov & Alguacil, 2016). Visualisasi gerak partikel dilakukan menggunakan fitur *particle motion* pada perangkat lunak SeisGram2K (Anthony Lomax, 2016), yang memungkinkan untuk mengestimasi arah *azimuth* secara empiris berdasarkan orientasi elips atau garis dominan dari gerakan partikel gelombang P yang terekam pada sensor seismik.

Sebelum analisis dilakukan, data seismik yang telah dikonversi ke format SAC melalui program mseed2sac-2.3 terlebih dahulu diproses sebelum menggunakan perangkat lunak SeisGram2K. Praproses sinyal meliputi penerapan *bandpass filter* Butterworth (10–50 Hz) (Hendrick & Hearn, 1998), pemotongan *window* gelombang P untuk fokus pada segmen awal gelombang, serta penghapusan nilai rata-rata sinyal (*remove mean*) guna menghindari bias akibat offset statis. Tahapan ini bertujuan memastikan bahwa data yang dianalisis memiliki kualitas representatif untuk estimasi arah kedatangan gelombang.

Gambar 6. mengilustrasikan prosedur estimasi *back azimuth* menggunakan data seismogram tiga komponen melalui perangkat lunak SeisGram2K, yang merupakan metode fundamental dalam analisis orientasi sensor seismik. Gambar 6a menampilkan seismogram tiga komponen (vertikal, utara-selatan, dan timur-barat) yang merekam *waveform* gempa bumi teleseismik, Gambar 6b memperlihatkan proses seleksi segmen gelombang P awal yang paling bersih untuk dianalisis lebih lanjut. Gambar 6c menunjukkan hasil dari analisis gerakan partikel (*particle motion diagram*) gelombang P, yang menggambarkan lintasan elips dominan serta arah *back azimuth*, yakni arah datang gelombang dari sumber menuju sensor. Teknik ini memungkinkan penentuan arah propagasi gelombang secara empiris, yang sangat penting dalam evaluasi *misorientation* sensor.



Gambar 6. Prosedur untuk memperkirakan *azimuth* balik menggunakan seismogram tiga komponen di SeisGram2K. a) seismogram tiga komponen. b) pengambilan 1 gelombang awal dari gelombang P untuk penentuan *back azimuth*. c) Diagram gerakan partikel gelombang P menunjukkan nilai *back azimuth*

Arah *azimuth* hasil visualisasi selanjutnya dibandingkan dengan nilai *azimuth* yang dihitung secara otomatis menggunakan skrip Python berbasis koordinat geografis yakni *bearing formula* (Cirulis & Brigmanis, 2013). Prinsip rumus *bearing* digunakan secara efisien untuk menentukan arah atau sudut antara dua titik di permukaan Bumi berdasarkan koordinat geografis berupa lintang dan bujur. Rumus *bearing* dinyatakan sebagai:

$$\theta_T = \text{atan2}(\sin(\Delta\lambda) * \cos(\varphi_2), \cos(\varphi_1) * \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \cos(\Delta\lambda)) \quad 4$$

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad 5$$

dengan

θ_T = *azimuth* (dalam radian)

φ_1 = lintang sensor seismograf (nilai positif untuk lintang utara dan nilai negatif untuk lintang selatan)

φ_2 = lintang sumber gempa bumi teleseismik (nilai positif untuk lintang utara dan nilai negatif untuk lintang selatan)

λ_1 = bujur sensor seismograf (nilai positif untuk bujur timur dan nilai negatif untuk bujur barat)

λ_2 = bujur sumber gempa bumi teleseismik (nilai positif untuk bujur timur dan nilai negatif untuk bujur barat)

Nilai *misorientation* dievaluasi konsistensi orientasi sensor antar kejadian gempa bumi teleseismik melalui perhitungan standar deviasi. Standar deviasi merepresentasikan ketidakpastian pengukuran dengan menggambarkan penyebaran data terhadap rata-ratanya (Febriani, 2022), dimana nilai kecil menunjukkan konsistensi antar sensor dan nilai besar mengindikasikan variabilitas data *misorientation*. Ketidakpastian pengukuran *misorientation* absolut ($|\theta_M|$) dikuantifikasi menggunakan standar deviasi sampel dihitung menggunakan persamaan:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (|\theta_{M,i}| - |\theta_M|)^2} \quad 6$$

dengan

s = standar deviasi

n = jumlah data

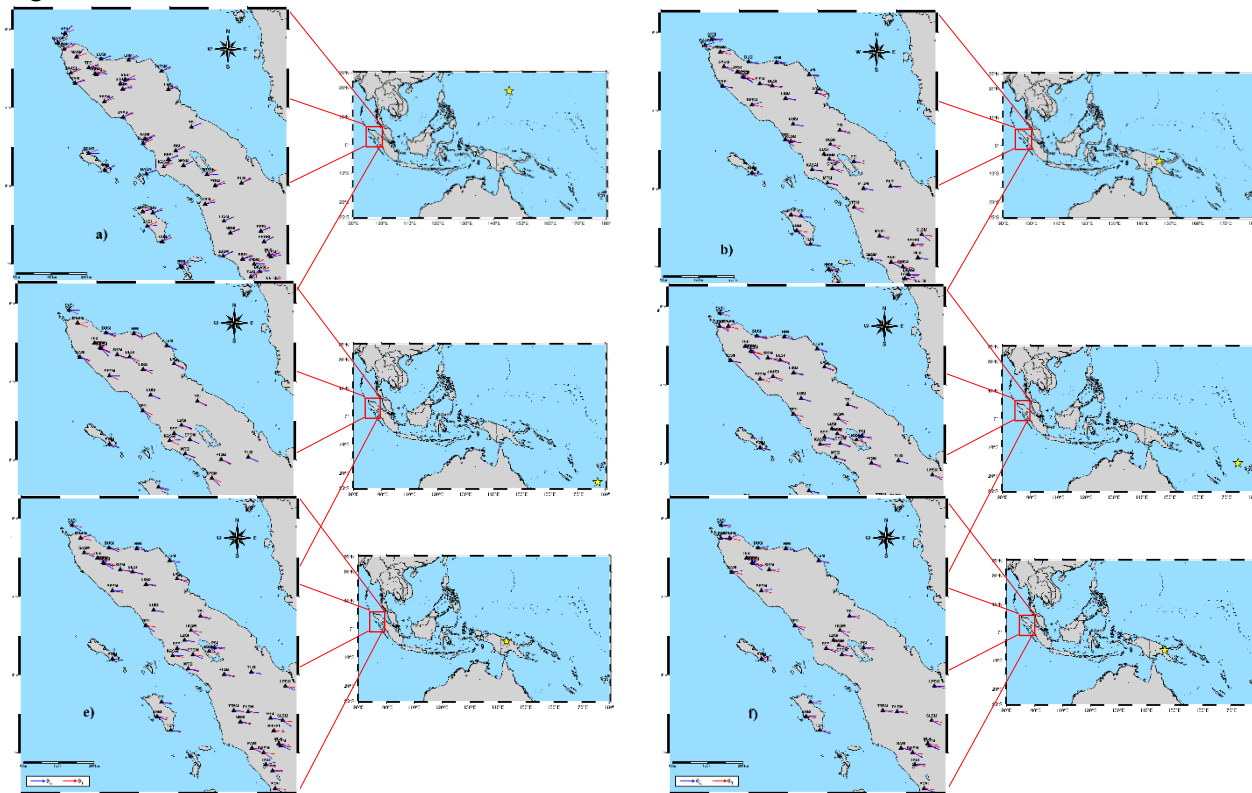
$|\theta_{M,i}|$ = nilai absolut *misorientation* sensor ke- i

$|\overline{\theta_M}|$ = nilai rata-rata *misorientation* absolut

Seluruh nilai *misorientation* dipetakan secara spasial menggunakan perangkat lunak GMT untuk mengidentifikasi pola distribusi dan zona-zona yang menunjukkan anomali orientasi sensor secara regional. Tahap selanjutnya melibatkan analisis komprehensif terhadap hasil pemetaan tersebut yang kemudian disajikan dalam bentuk peta tematik untuk menggambarkan distribusi spasial *misorientation* sensor seismograf di wilayah Sumatera bagian utara. Temuan ini tidak hanya diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam pemantauan kualitas instalasi jaringan seismik nasional, tetapi juga menjadi dasar rekomendasi teknis bagi BMKG dalam hal kalibrasi ulang, inspeksi periodik, serta peningkatan sistem peringatan dini yang lebih adaptif terhadap dinamika geologi dan kebutuhan mitigasi bencana di Indonesia.

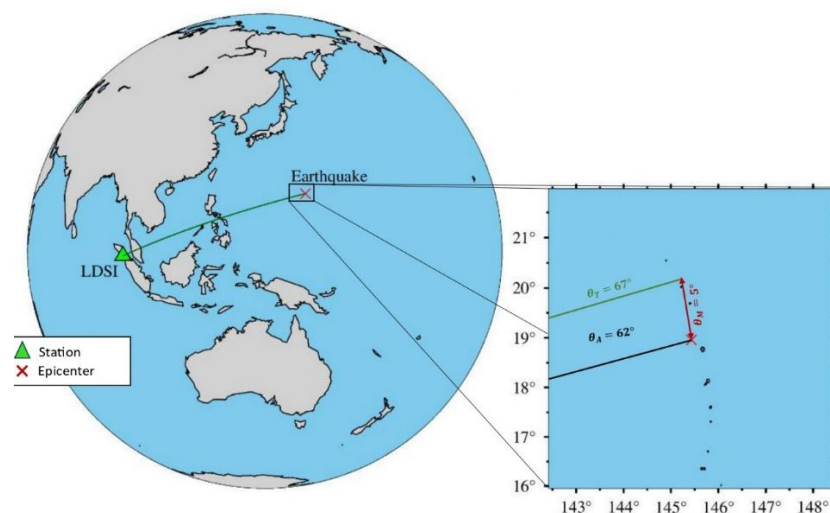
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis *misorientation* sensor seismograf dilakukan pada 58 sensor seismograf milik BMKG dengan menentukan nilai orientasi aktualnya berupa *back azimuth* menggunakan pendekatan gerak partikel gelombang P (θ_A). Nilai *theoretical azimuth* (θ_T) dihitung berdasarkan koordinat sumber dan sensor, dan selisih antara kedua parameter tersebut didefinisikan sebagai *misorientation* sensor. Secara ideal, θ_A dan θ_T seharusnya berhimpit atau memiliki deviasi yang sangat kecil jika sensor terpasang dengan orientasi yang benar terhadap utara sejati. Selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi pola, konsistensi dan tingkat ketidakpastian hasil pengukuran.



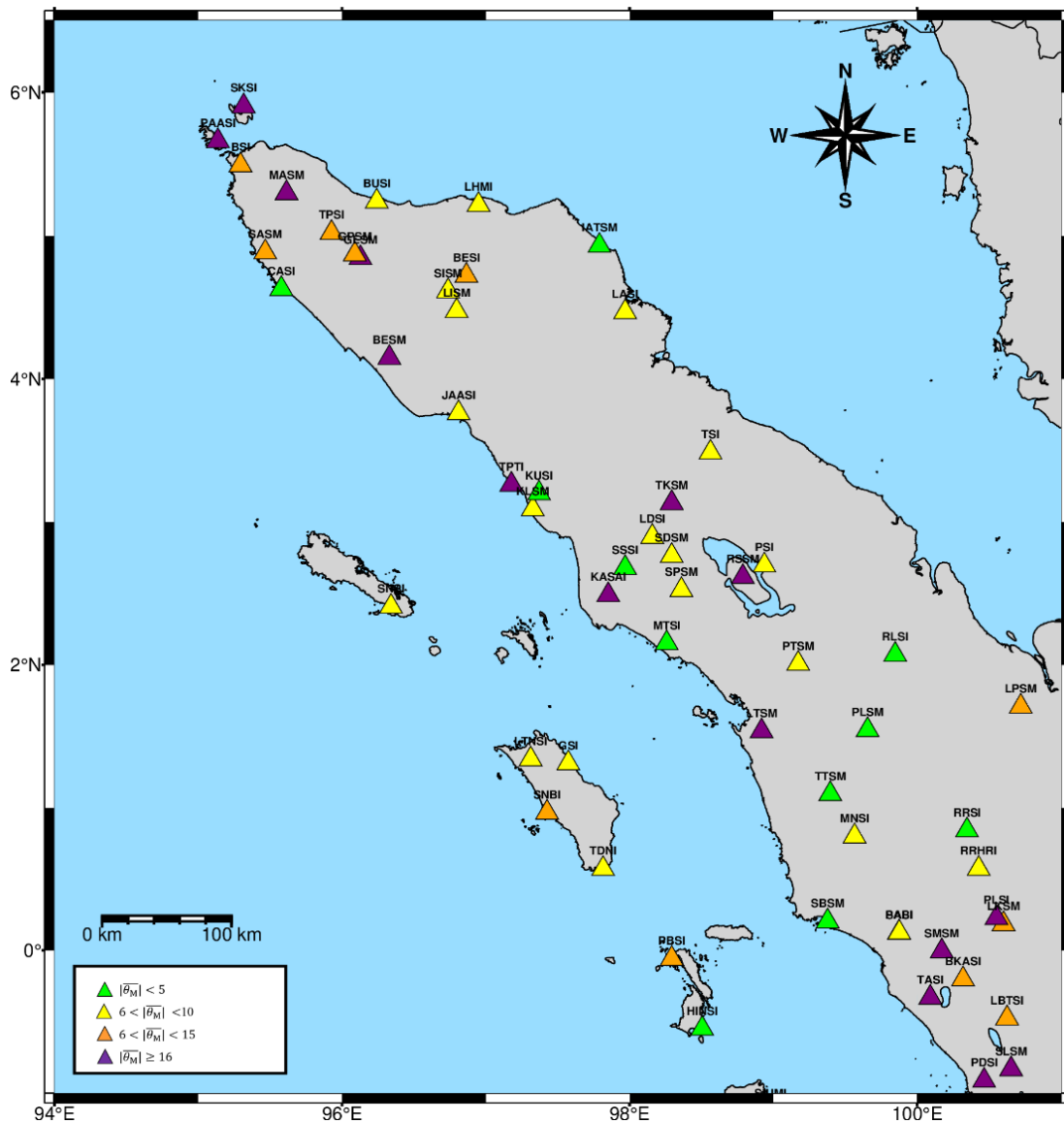
Gambar 7 a-f. Distribusi sudut yang dihasilkan gerak partikel gelombang P (biru) dan sudut hasil perhitungan episenter gempa bumi terhadap utara (merah) di setiap sensor seismograf di wilayah Sumatera bagian utara terhadap enam kejadian gempa bumi teleseismik.

Distribusi sudut pada Gambar 7 a-f menyajikan hasil analisis *misorientation* sensor yang berada di Sumatera bagian utara untuk enam kejadian gempa bumi bermagnitudo besar ($M_w 7,1 - 7,7$) yang terjadi pada periode September 2022 hingga April 2024 di wilayah Kepulauan Mariana, Papua Nugini, Fiji dan Tonga. Pada setiap kejadian, sejumlah sensor menunjukkan deviasi orientasi yang signifikan, dengan nilai maksimum berkisar 57° . Sensor-sensor seperti MASM, SLSM, LESM dan RSSM secara konsisten memperlihatkan deviasi besar pada beberapa kejadian gempa bumi teleseismik yang berbeda, mengindikasikan adanya kesalahan orientasi yang bersifat sistematis. Variasi sensor yang terdampak pada tiap peristiwa, meskipun arah datang gelombang relatif sebanding, menunjukkan bahwa *misorientation* lebih dipengaruhi oleh kondisi dan instalasi sensor daripada karakteristik sumber gempa.



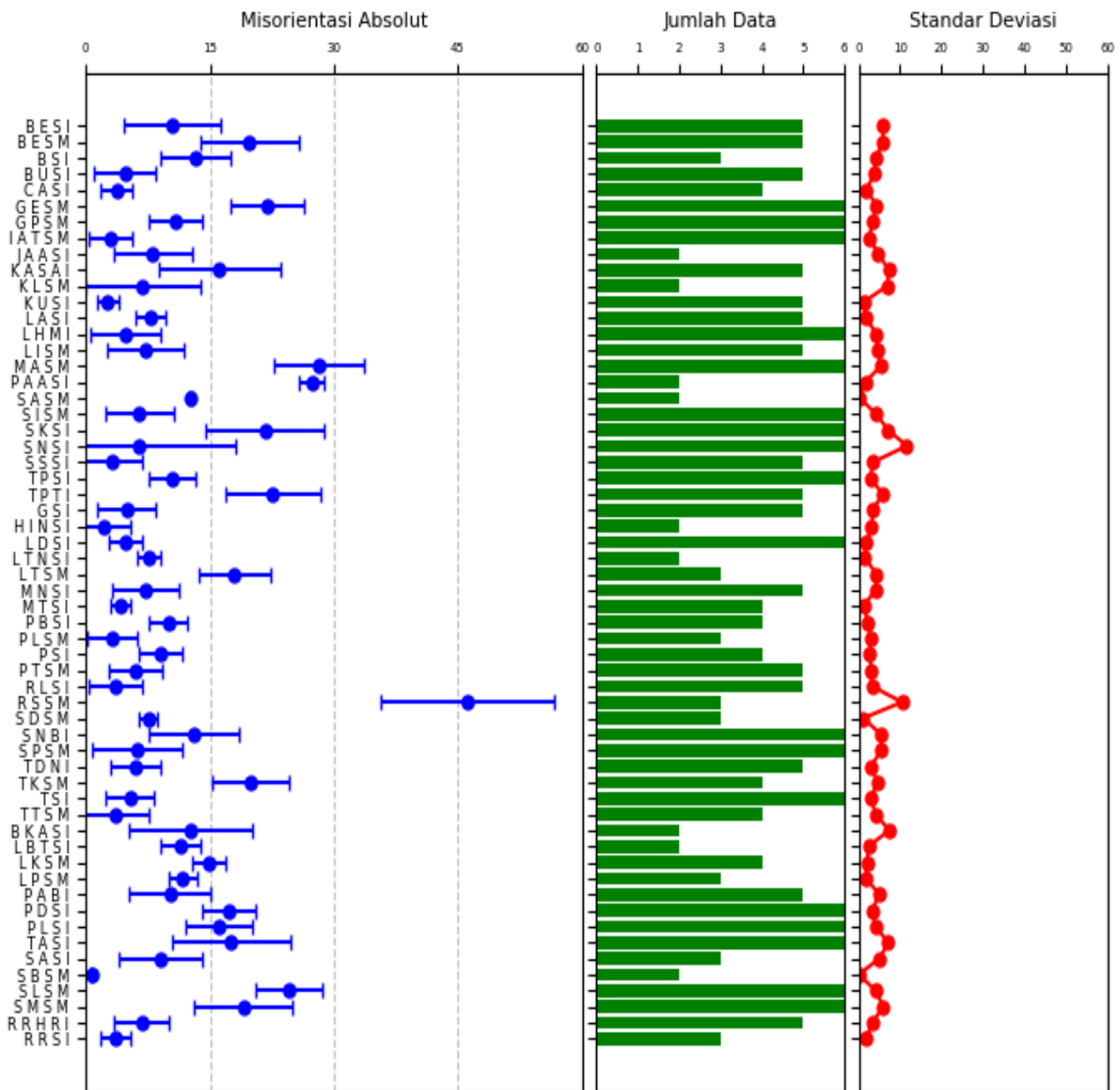
Gambar 8. Peta yang menunjukkan lokasi sensor LDSI dan kejadian gempa bumi teleseismik di Kepulauan Mariana Pasifik.

Gambar 8 merupakan inset yang memberikan ilustrasi rinci dari salah satu kejadian gempa bumi yang digunakan untuk mengidentifikasi deviasi orientasi sensor seismik di *sensor* LDSI. Gambar ini menyajikan representasi spasial salah satu sensor yang ada di Sumatera bagian utara yakni sensor seismograf LDSI dengan episenter gempa bumi teleseismik yang berada di Kepulauan Mariana, Pasifik, dengan fokus pada analisis deviasi arah *azimuth* gelombang P sebagai indikator *misorientation* sensor. Dalam inset diperlihatkan bahwa *theoretical azimuth* ($\theta_T = 67^\circ$), yang dihitung berdasarkan *bearing formula*, menyimpang sebesar 5° dari arah aktual gerakan partikel gelombang P ($\theta_A = 62^\circ$) yang diperoleh melalui analisis data seismogram. Selisih ini, yang diidentifikasi sebagai sudut *misorientation* ($\theta_M = 5^\circ$), menunjukkan adanya ketidaksesuaian orientasi pada instalasi sensor LDSI. Temuan ini memperkuat urgensi penerapan metode *particle motion* untuk evaluasi dan kalibrasi orientasi sensor, mengingat akurasi arah rambat gelombang sangat krusial dalam interpretasi mekanisme sumber.



Gambar 9. Misorientation absolut ($|\theta_M|$) yang diperkirakan untuk setiap sensor seismograf BMKG wilayah Sumatera Bagian Utara.

Nilai *misorientation* sensor yang dianalisis merupakan nilai rata-rata *misorientation* absolut yang dihitung dari enam kejadian gempa bumi teleseismik, sehingga merepresentasikan karakter orientasi sensor yang relatif stabil. Berdasarkan nilai tersebut, distribusi spasial sensor seismik di wilayah Sumatera bagian utara (Gambar 9) ditampilkan melalui simbol segitiga berwarna. Setiap sensor diberi nama berupa kode dari sensor, dan warna simbol segitiga merepresentasikan rentang nilai deviasi orientasi horizontal sensor ($|\theta_M|$) terhadap *azimuth* utara sejati. Simbol berwarna kuning menunjukkan deviasi rendah ($|\theta_M| < 5^\circ$), hijau untuk deviasi sedang ($6^\circ < |\theta_M| < 10^\circ$), oranye untuk deviasi tinggi ($11^\circ < |\theta_M| < 15^\circ$), dan ungu untuk deviasi signifikan ($|\theta_M| \geq 16^\circ$). Terlihat bahwa ada 15 sensor yang memperlihatkan nilai *misorientation* yang signifikan, yakni di bagian utara Pulau Sumatera pada sensor SKSI (22°), PAASI (27°), GESM (22°), BESM (20°) dan MASM (28°), sepanjang garis pantai barat Pulau Sumatera pada sensor TPTI (23°), KASAI (16°), LTSM (18°), TASI (18°) dan PDSI (17°), bagian tengah Pulau Sumatera pada sensor TKSM (20°), RSSM (46°), sedangkan bagian tengah-selatan ada sensor SMSM (19°), SLSM (24°) dan PLSI (16°).



Gambar 10. Nilai *Misorientation* rata-rata Absolut, jumlah data per sensor dan standar deviasi per sensor

Gambar 10 menyajikan visualisasi komprehensif mengenai karakteristik *misorientation* sensor dari berbagai sensor seismik di wilayah studi, yang ditampilkan dalam tiga panel sejajar untuk memberikan pemahaman yang holistik terhadap distribusi sudut *misorientation* dan parameter statistik terkait. Panel pertama menunjukkan estimasi rata-rata sudut *misorientation* sensor dalam satuan derajat pada masing-masing sensor, yang digambarkan dengan simbol titik berwarna biru disertai garis horizontal (*error bar*) yang merepresentasikan nilai standar deviasi absolut dari estimasi tersebut. Perbedaan panjang *error bar* antar sensor mencerminkan variasi dalam konsistensi arah *misorientation* yakni *error bar* yang pendek menunjukkan data yang terdistribusi sempit di sekitar rata-rata (presisi tinggi), sedangkan *error bar* yang panjang mengindikasikan penyebaran data yang lebih luas atau ketidakpastian estimasi yang lebih besar. Dalam panel ini teridentifikasi beberapa sensor dengan *misorientation* ekstrem seperti RSSM ($\sim 46^\circ$), MAASM ($\sim 28^\circ$), dan PAASI ($\sim 27^\circ$), yang mengindikasikan anomali orientasi sensor dan berpotensi menurunkan akurasi analisis polaritas gelombang. Secara umum, dari 58 sensor yang dianalisis, sebanyak 16 sensor memiliki sudut *misorientation* antara $0-5^\circ$, 19 sensor pada kisaran $6-10^\circ$, 8 sensor antara $11-15^\circ$, dan 15 sensor menunjukkan sudut $\geq 16^\circ$. Selain itu, sensor yang menunjukkan nilai *misorientation* rata-rata tinggi namun dengan standar

deviasi kecil mengindikasikan adanya kesalahan orientasi sistematis yang relatif stabil antar kejadian, sehingga koreksi orientasi dapat diterapkan secara konsisten.

Panel kedua menggambarkan jumlah kejadian gempa bumi teleseismik yang digunakan dalam estimasi orientasi sensor untuk setiap sensor, divisualisasikan dalam bentuk diagram batang horizontal berwarna hijau. Jumlah data pada masing-masing sensor berkisar antara 2 hingga 6 kejadian, 9 sensor dianalisis menggunakan hanya 2 kejadian, 31 sensor menggunakan 3 hingga 5 kejadian, dan 18 sensor dianalisis menggunakan 6 kejadian. Perbedaan ini mencerminkan variasi dalam ketersediaan data antar sensor, yang berdampak langsung pada keandalan estimasi orientasi sensor. Sensor dengan ≥ 3 kejadian umumnya memberikan hasil estimasi yang stabil, sementara sensor dengan hanya 2 kejadian cenderung berpotensi menghasilkan estimasi bias, sehingga hal ini menjadi salah satu limitasi analisis.

Panel ketiga menampilkan standar deviasi absolut dari sudut *misorientation* tiap sensor (grafik garis merah dengan titik). Nilai deviasi berkisar antara $\sim 0,1^\circ$ hingga $\sim 17,2^\circ$, dengan nilai minimum tercatat pada sensor SBSM dan nilai maksimum pada sensor SKSI. Sebanyak 50 sensor memiliki deviasi standar $< 10^\circ$, sementara 8 sensor menunjukkan deviasi $\geq 10^\circ$. Deviasi rendah ($< 4^\circ$) menunjukkan orientasi sensor konsisten dan dapat diandalkan, sedangkan deviasi tinggi ($> 10^\circ$) menandakan penyebaran sudut lebih besar dan estimasi arah gelombang kurang stabil, yang bisa disebabkan oleh faktor teknis, lingkungan atau operasional.

Distribusi spasial *misorientation* sensor di Sumatera bagian utara memperlihatkan pola yang tidak acak, dengan deviasi orientasi tinggi hingga signifikan yang terpusat pada wilayah utara, pesisir barat serta bagian tengah Pulau Sumatera. Pola ini menunjukkan bahwa kesalahan orientasi sensor lebih dipengaruhi oleh faktor instalasi dan ketidakakuratan penentuan arah utara sejati dibandingkan oleh karakteristik sumber gempa atau kondisi propagasi gelombang. Konsistensi deviasi yang muncul pada sensor yang sama di berbagai kejadian teleseismik memperkuat pemahaman bahwa penyimpangan tersebut bersifat sistematis dan memerlukan koreksi orientasi.

Secara statistik, distribusi nilai rata-rata *misorientation* menunjukkan variasi kualitas orientasi antar sensor yang cukup mencolok. Beberapa sensor menunjukkan orientasi yang baik, sementara sebagian lainnya memperlihatkan kesalahan signifikan $> 15^\circ$, yang berpotensi mempengaruhi interpretasi arah rambat gelombang serta mekanisme sumber gempa. Sensor dengan nilai *misorientation* tinggi namun stabil (standar deviasi kecil) mengindikasikan kesalahan orientasi yang konsisten antar kejadian sehingga koreksi numerik dapat diterapkan dengan tingkat keyakinan yang tinggi. Sebaliknya, *misorientation* besar disertai standar deviasi tinggi menandakan estimasi yang kurang stabil akibat keterbatasan jumlah data ataupun pengaruh *noise* pada sinyal horizontal.

Temuan dalam studi ini juga sejalan dengan hasil evaluasi orientasi sensor pada berbagai jaringan seismik regional dan nasional di negara lain, termasuk Thailand (Pornsopin *et al.*, 2023), Iran (Braunmiller *et al.*, 2020), serta kawasan Brazil (Albuquerque *et al.*, 2024) dan Afrika (Ojo, Zhao & Wang, 2019). Studi-studi tersebut melaporkan bahwa sebagian besar sensor memiliki orientasi yang baik dalam kisaran $\pm 10 - 15^\circ$, namun tetap dijumpai sensor dengan deviasi yang lebih besar. Kondisi ini dikaitkan dengan kesalahan instalasi awal, keterbatasan prosedur penentuan arah utara di lapangan, serta ketidakakuratan atau tidak diperbarunya metadata orientasi sensor. Kesamaan pola ini menunjukkan bahwa *misorientation* dengan nilai belasan derajat merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada jaringan seismik multi stasiun dan bukan merupakan anomali lokal, sehingga temuan di Sumatera bagian utara berada dalam konteks global yang konsisten.

Distribusi nilai *misorientation* pada jaringan seismik di Sumatera bagian utara mengindikasikan perlunya evaluasi dan kalibrasi ulang terhadap sejumlah sensor, terutama yang menunjukkan deviasi signifikan. Langkah ini penting untuk menjamin kualitas data seismik yang andal dan konsisten, khususnya dalam konteks penelitian kegempaan regional dan sistem peringatan dini BMKG. Oleh karena itu, direkomendasikan agar BMKG melakukan evaluasi orientasi sensor secara berkala menggunakan pendekatan *particle motion*, sehingga kinerja jaringan seismik nasional dapat terus ditingkatkan dalam mendukung mitigasi bencana gempa bumi dan tsunami di Indonesia.

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah melalui evaluasi kuantitatif orientasi 58 sensor seismograf milik BMKG di Sumatera bagian utara menggunakan metode *P-wave particle motion*. Nilai *misorientation* yang diperoleh menunjukkan variasi antara 1° hingga 46°, dengan 15 sensor tercatat mengalami *misorientation* > 15°. Sensor-sensor tersebut antara lain RSSM (46°), MASM (28°), PAASI (27°), SLISM (24°), TPTI (23°), GESM dan SKSI (22°), TKSM dan BESM (20°), SMSM (19°), LTSM dan TASI (18°), PDSI (17°), serta PLSI dan KASAI (16°). Hasil ini menjadi dasar teknis bagi BMKG untuk pengendalian mutu data melalui identifikasi sensor yang memerlukan koreksi orientasi, dan prioritas kalibrasi ulang terhadap sensor dengan nilai *misorientation* signifikan, guna meningkatkan keandalan analisis kegempaan serta kinerja sistem peringatan dini di Indonesia.

Keterbatasan penelitian meliputi jumlah kejadian gempa bumi yang hanya terbatas pada kejadian dan belum ada validasi dengan metode lainnya. Penelitian selanjutnya disarankan mengintegrasikan metode tambahan serta memperluas studi ke wilayah lain, seperti Sumatera bagian selatan dan wilayah lainnya di Indonesia. Pengukuran *misorientation* sebaiknya juga dilakukan dengan memanfaatkan sumber gempa bumi lokal dan regional, agar dapat diuji apakah respons setiap sensor seismograf bersifat konsisten terhadap berbagai jenis gempa, sehingga validasi hasil menjadi lebih komprehensif dan representatif terhadap kondisi lapangan sebenarnya. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada peningkatan akurasi sistem pemantauan seismik nasional melalui evaluasi berbasis data yang sistematis dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) melalui penyediaan dana dan data seismik. Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dan bantuan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Albuquerque, D.F. *et al.* (2024) "Estimating seismometer component orientation of the Brazilian seismographic network using teleseismic P-wave particle motion analysis and directional statistics," *Journal of South American Earth Sciences*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104754>.
- Anthony Lomax (2016) *SeisGram2K*. Diambil 12 Maret 2025, dari <http://alomax.free.fr/seisgram/SeisGram2K.html>
- Barber, A.J., Crow, M.J. & Milsom, J. (2005) *Sumatra: geology, resources and tectonic evolution*. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=NlvUlh1UqwkC&oi=fnd&pg=PP11&dq=%22barber+a+j%22+sumatra+geology+resources+and+tectonic+evolution&ots=0FyrBE_LK&sig=9AiZhHuq54YIDcYKTgjiEV8qAGE.
- Bormann, P. & Wielandt, E. (2012) "Chapter 4 Seismic Signals and Noise," in *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, hal. 1–66. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch4.
- Braunmiller, J., Nabelek, J. & Ghods, A. (2020) "Sensor orientation of Iranian broadband seismic stations from P-wave particle motion," *Seismological Research Letters*, 91(3), hal. 1660–1671. <https://doi.org/10.1785/0220200019>.
- Cesca, S. dan Grigoli, F. (2015) "Full waveform seismological advances for microseismic monitoring," *Advances in Geophysics*, 56(February), hal. 169–228. <https://doi.org/10.1016/bs.agph.2014.12.002>.
- Cirulis, A. & Brigmanis, K.B. (2013) "3D outdoor augmented reality for architecture and urban planning," in *Procedia Computer Science*. Elsevier B.V., hal. 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.009>.
- Doran, A.K. dan Laske, G. (2017) "Ocean-bottom seismometer instrument orientations via automated rayleigh-wave arrival-angle measurements," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), hal. 691–708. <https://doi.org/10.1785/0120160165>.
- Ekström, G. dan Busby, R. (2008) "Measurements of Seismometer Orientation at USArray Transportable Array and Backbone Stations," *Seismological Research Letters*, 79, hal. 554–561. <https://doi.org/10.1785/GSSRL.79.4.554>.

- Ekström, G. dan Nettles, M. (2018) "Observations of seismometer calibration and orientation at USArray stations, 2006–2015," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(4), hal. 2008–2021. <https://doi.org/10.1785/0120170380>.
- Ensing, J.X. dan Van Wijk, K. (2019) "Estimating the orientation of borehole seismometers from ambient seismic noise," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), hal. 424–432. <https://doi.org/10.1785/0120180118>.
- Febriani, S., 2022. *Analisis deskriptif standar deviasi*. Jurnal Pendidikan Tambusai, 6(1), pp.910–913
- Havskov, J. dan Alguacil, G. (2016) *Instrumentation in Earthquake Seismology*.
- Havskov, J., Bormann, P. dan Schweitzer, J. (2012) "Topic Seismik source location." <https://doi.org/10.2312/GFZ>.
- Hendrick, N. dan Hearn, S. (1998) *Polarisation Analysis: What is it? Why do you need it? How do you do it?*
- Laske, G. (1995) "Global observation of off-great-circle propagation of long-period surface waves," *Geophysical Journal International*, 123, hal. 245–259. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.1995.TB06673.X>.
- Lefevre, L. V. dan Helmberger, D. V. (1989) "Upper mantle P velocity structure of the Canadian shield," *Journal of Geophysical Research*, 94(B12). <https://doi.org/10.1029/jb094ib12p17749>.
- Lim, H. *et al.* (2018) "Measurement of seismometer orientation using the tangential P-wave receiver function based on harmonic decomposition," *Geophysical Journal International*, 212(3), hal. 1747–1765. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx515>.
- Mir, R.R. *et al.* (2022) "Sensor orientation and noise analysis of the Kashmir-Zaskar seismic network: an appraisal from 2014 to 2020," *Journal of Seismology*, 26(3), hal. 455–472. <https://doi.org/10.1007/s10950-022-10090-z>.
- Natawidjaja, D.H. (2007) *The Sumatran Fault Zone-from Source to Hazard*, *Journal of Earthquake and Tsunami*.
- Niu, F. dan Li, J. (2011) "Component azimuths of the CEArray stations estimated from P-wave particle motion," *Earthquake Science*, 24(1), hal. 3–13. <https://doi.org/10.1007/s11589-011-0764-8>.
- Nugraha, M.F. *et al.* (2023) "SEISMIC STATIONS CATEGORIZATION AND ITS EFFECT ON THE BMKG EARTHQUAKE MAGNITUDE PARAMETERS DETERMINATION," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 24(1), hal. 19–31. <https://doi.org/10.31172/jmg.v24i1.886>.
- Ojo, A.O., Zhao, L. dan Wang, X. (2019) "Estimations of sensor misorientation for broadband seismic stations in and around Africa," *Seismological Research Letters*, 90(6), hal. 2188–2204. <https://doi.org/10.1785/0220190103>.
- Park, J. *et al.* (2023) "Data quality control tools used to monitor seismoacoustic research arrays in South Korea," *Journal of Seismology*, 27(4), hal. 659–679. <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10164-6>.
- Pornsopin, P. *et al.* (2023), "Sensor orientation of the TMD seismic network (Thailand) from P-wave particle motions," *Geoscience Letters*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-023-00278-7>.
- Republik Indonesia (2009), *UU Nomor 31 Tahun 2009 tentang Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*. Indonesia. Diambil 12 Juni 2025, dari: [https://peraturan.bpk.go.id/Download/28098/UU Nomor 31 Tahun 2009.pdf](https://peraturan.bpk.go.id/Download/28098/UU%20Nomor%2031%20Tahun%202009.pdf)
- Ringler, A.T. *et al.* (2013), "Seismic station installation orientation errors at ANSS and IRIS/USGS stations," *Seismological Research Letters*, 84(6), hal. 926–931. <https://doi.org/10.1785/0220130072>.
- Rueda, J. dan Mezcuá, J. (2015), "Orientation analysis of the Spanish broadband national network using rayleigh-wave polarization," *Seismological Research Letters*, 86(3), hal. 929–940. <https://doi.org/10.1785/0220140149>.
- Scholz, J.R. *et al.* (2017), "Orienting ocean-bottom seismometers from P-wave and Rayleigh wave polarizations," *Geophysical Journal International*, 208(3), hal. 1277–1289. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw426>.
- Seo, M.S. *et al.* (2022), "Measurement of seismometer misorientation based on P-wave polarization: application to dense temporary broadband seismic array in the epicentral region of 2016 Gyeongju earthquake, South Korea," *Geosciences Journal*, 26(3), hal. 385–397. <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0041-3>.
- Shearer, P.M. (2009), *Introduction to Seismology*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841552>.
- Sieh, K. dan Natawidjaja, D. (2000), "Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), hal. 28295–28326. <https://doi.org/10.1029/2000jb900120>.
- Son, Y.O., Seo, M.S. dan Kim, Y.H. (2022), "Measurement of seismometer misorientation based on P-wave polarization: application to permanent seismic network in South Korea," *Geosciences Journal*, 26(2), hal. 235–247. <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0031-5>.
- Stachnik, J.C. *et al.* (2012), "Determination of New Zealand Ocean bottom seismometer orientation via rayleigh-wave

- polarization,” *Seismological Research Letters*, 83(4), hal. 704–713. <https://doi.org/10.1785/0220110128>.
- Tian, X. *et al.* (2011), “SKS splitting measurements with horizontal component misalignment,” *Geophysical Journal International*, 185(1), hal. 329–340. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04936.x>.
- Wang, X. *et al.* (2016), “Seismik sensor *misorientation* measurement using P-wave particle motion: An application to the NECsais Array,” *Seismological Research Letters*, 87(4), hal. 901–911. <https://doi.org/10.1785/0220160005>.
- Xu, H. *et al.* (2018), “Sistemic comparison of seismometer horizontal orientations based on teleseismik earthquakes and ambient-noise data,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(6), hal. 3576–3589. <https://doi.org/10.1785/0120180087>
- Zaldívar, E.R.D. *et al.* (2016) “Misalignment angle correction of borehole seismic sensors: The case study of the Collalto seismic Network,” *Seismological Research Letters*, 87(3), hal. 668–677. <https://doi.org/10.1785/0220150183>.
- Zeng, S. *et al.* (2021), “Measurements of seismometer orientation of the first phase chinarray and their implications on vektor-recording-based seismik studies,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(1), hal. 36–49. <https://doi.org/10.1785/0120200129>.
- Zha, Y., Webb, S.C. dan Menke, W. (2013), “Determining the orientations of ocean bottom seismometers using ambient noise correlation,” *Geophysical Research Letters*, 40(14), hal. 3585–3590. <https://doi.org/10.1002/grl.50698>.