



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



GEODESI GEMPABUMI

**Memahami Sumber Gempa
Mengurangi Risiko Bencana**

Profesor Irwan Meilano

**Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
16 Maret 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**GEODESI GEMPABUMI: MEMAHAMI
SUMBER GEMPA MENGURANGI RISIKO
BENCANA**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

GEODESI GEMPABUMI: MEMAHAMI SUMBER GEMPA MENGURANGI RISIKO BENCANA

Prof. Irwan Meilano

16 Maret 2024
Aula Barat ITB



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

ITB  **PRESS**

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**GEODESI GEMPABUMI: MEMAHAMI SUMBER GEMPA MENGURANGI
RISIKO BENCANA**

Penulis : Prof. Irwan Meilano

Reviewer : Prof. Agus Ramdhan

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-424-1

e-ISBN : 978-623-297-425-8 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

+62 22 20469057

www.itbpress.id

office@itbpress.id

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Dengan penuh rasa syukur kepada sang Maha Pemilik Ilmu, saya persembahkan buku ini sebagai wujud penghargaan kepada mereka yang telah berjasa pada perjalanan kehidupan saya baik akademik, non-akademik yang diberikan secara formal ataupun informal. Kepada guru-guru saya sejak di SDN BBK Taragong, SMPN 3 Bandung, SMAN 3 Bandung terima kasih atas dasar pendidikan, keteladanan dalam mendorong saya untuk berpikir kritis dan berani mengeksplorasi hal baru. Merekalah yang paham betul bahwa pendidikan dasar hakikatnya adalah api yang dinyalakan, bukan wadah yang diisi.

Kepada para Dosen di ITB, terima kasih atas ilmu yang luas dan mendalam, suasana akademik yang pentuh dengan dialektika dan kompetitif serta bimbingan yang telah membentuk saya menjadi seorang akademisi yang lebih matang. Kepada para dosen dan mentor di Universitas Nagoya, Jepang, terima kasih atas kesempatan untuk belajar dan melakukan penelitian di lingkungan dengan fasilitas terbaik, dosen yang terbuka untuk diskusi kritis dan menantang secara akademik serta membuka peluang kepada siapa pun untuk berkembang dan menjadi yang terbaik di bidangnya.

Saya ingin mengucapkan terima kasih kepada almarhum kedua orang tua dan mertua, serta kepada istri tercinta dan kedua anak tersayang yang dengan sabar dan penuh kasih sayang telah mendukung melewati masa-masa sulit selama menempuh studi dan proses mendapatkan gelar guru besar.

Semoga karya sederhana ini bisa menjadi bagian dari mimpi besar untuk memahami rahasia alam gempabumi, sebagai bagian dari upaya mengurangi risiko bencana.

Bandung, 16 Maret 2024

Irwan Meilano

Profesor Geodesi Gempabumi

SINOPSIS

Merupakan suatu ironi bahwa umat manusia di balik semua kemajuan yang telah dicapai masih belum bisa memprediksi waktu, lokasi, dan magnitudo kejadian gempabumi. Sementara gempabumi adalah salah satu kejadian alam yang bisa merubah sejarah peradaban manusia. Pelepasan secara tiba-tiba dari energi seismik yang sangat besar tidak memberi kesempatan kepada manusia untuk berlindung dari bahaya. Ribuan orang tewas atau terluka dan triliunan uang hilang hanya oleh beberapa bencana gempabumi dalam satu dekade terakhir.

Memprediksi waktu, lokasi, dan kekuatan (magnitudo) gempa adalah harapan seluruh masyarakat, dan tentu saja menjadi harapan (juga) para peneliti kebumihan. Pada awal tahun 2004, sebagai mahasiswa doktoral di Nagoya University, kami memublikasikan paper untuk mencari adanya anomali deformasi sebelum gempa M8.1 Tokachi-Oki di Jepang 2003. Anomali ini penting karena bisa menjadi landasan akan kemungkinan prediksi gempabumi, dan Jepang saati itu telah memiliki jaringan pengamatan GPS yang sangat memadai untuk keperluan tersebut. Tapi sayangnya publikasi tersebut membuktikan tidak adanya anomali deformasi yang teramati sebelum terjadinya gempabumi. Yang artinya prediksi gempa dengan melihat anomali deformasi belum bisa dilakukan.

Selama dua puluh tahun sesudah publikasi tersebut, saya dengan konsistem melakukan penelitian terkait dan beruntung untuk bergabung dengan peneliti multidisiplin kegempaan, Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), untuk kemudian melakukan penelitian geodesi gempabumi di berbagai wilayah Indonesia. Fokus penelitian tidak lagi mencari anomali deformasi tetapi memiliki dua tujuan, yaitu yang pertama menguantifikasi potensi dan laju kejadian gempa jangka panjang (*long-term expected rate*) dan yang kedua adalah memprediksi guncangan gempa di masa depan. Mengetahui potensi dan laju kejadian gempa akan membantu kita untuk menguantifikasi tingkat aktivitas dari suatu sumber gempa. Sehingga kita tidak hanya bisa mengatakan suatu sumber gempa aktif atau tidak, tetapi juga menjelaskan mekanisme dari sumber gempa, potensi magnitudo maksimum dan kecepatan laju akumulasi energi (*slip-rate*). Kesemua informasi tersebut

akan membantu kita untuk memprediksi tingkat guncangan di masa depan dan menjadi masukan dalam pembaharuan peta gempa Indonesia.

Penelitian geodesi gempabumi saat ini juga telah mampu untuk mengestimasi secara cepat lokasi, magnitudo dan mekanisme gempa. Sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk melakukan peringatan dini gempa (*earthquake early warning*). Sehingga walaupun pengetahuan saat ini belum bisa memprediksi kejadian gempabumi, tetapi kita sudah bisa mengurangi risiko gempabumi.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xvii
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Geodesi Gempabumi	3
1.2 Gempabumi dan Dampak Kerugiannya	5
2 PENGAMATAN GEODETIK UNTUK STUDI GEMPABUMI	9
2.1 Sumber Gempabumi dan Pengamatan Geodetik.....	10
2.2 Sumber Gempabumi Indonesia Berdasarkan Data GNSS	14
3 METODE GEODETIK UNTUK ESTIMASI SUMBER GEMPA.....	21
3.1 Pengamatan Regangan Geodetik untuk Estimasi Sumber Gempa di Wilayah Busur Banda.....	21
3.2 Karakteristik Sumber Gempa Ambon 2019.....	33
3.3 Estimasi Sumber Gempa Mamuju dari Data Geodetik	36
4 PENGAMATAN GEODETIK UNTUK PERINGATAN DINI GEMPABUMI	41
4.1 Estimasi Cepat Magnitudo Gempa Berdasarkan Data Geodetik	41
4.2 Estimasi Tensor Momen Gempa Berdasarkan Data Geodetik (Studi Kasus Gempa Palu 2018)	47
5 PENUTUP	55
6 Ucapan terima kasih	57
DAFTAR PUSTAKA.....	61
CURRICULUM VITAE.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Jaringan pengamatan triangulasi di Sumatra	4
Gambar 1.2	Diagram sistematis menggambarkan model <i>rebound</i> elastik sederhana. Di sebelah kiri, perpindahan <i>seismic</i> dan bidang akumulasi regangan dengan slip pada satu kecepatan tetap di bawah kedalaman pengunci D. Pada sebelah kanan, slip ko-seismik dan pelepasan regangan dimodelkan dengan slip pada sesar turun hingga kedalaman D.	5
Gambar 1.3	Data historis kerugian langsung akibat bencana di Indonesia	7
Gambar 2.1	Ilustrasi teori <i>elastic rebound</i> pada sesar yang memotong jalan	11
Gambar 2.2	Penampang dari bidang gempa sesar dan asperiti yang menjadi lokasi di mana terdapat akumulasi energi pada tahapan interseismik dan akan dilepaskan pada tahapan koseismik	13
Gambar 2.3	Jenis sumber gempa berdasarkan arah dari pegerannya	13
Gambar 2.4	Siklus gempa bumi dari interseismik, koseismik, dan post-seismik	14
Gambar 2.5	Vektor kecepatan pergeseran di Indonesia berdasarkan pengamatan GPS selama 22 tahun terakhir (Susilo dkk., 2016b)	15
Gambar 2.6	Vektor kecepatan pergeseran di Pulau Sumatra berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b)	16
Gambar 2.7	Vektor kecepatan pergeseran di Pulau Jawa berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b)	17
Gambar 2.8	Vektor kecepatan pergeseran di wilayah Banda berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b)	19

Gambar 2.9	Vektor kecepatan pergeseran di Papua berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b).....	20
Gambar 3.1	Distribusi titik GPS, warna oranye adalah stasiun GPS kontinu (InaCORS) dan warna hijau adalah stasiun GPS berkala/episodik. Garis warna merah merupakan sesar aktif, garis warna merah dengan segitiga adalah jalur subduksi.	22
Gambar 3.2	Vektor kecepatan GPS di wilayah Busur Banda dalam ITRF 2008.....	27
Gambar 3.3	Analisis regangan geodetik wilayah Busur Banda. (a) Principal strain rate, warna merah menandakan ekstensi dan biru menggambarkan kompresi. (b) Maximum shear strain rate, cross hitam merupakan besaran dan arah maximum shear strain rate. (c) <i>Dilatation rate</i> , warna merah menandakan ekstensi (nilai positif) dan biru menggambarkan kompresi (nilai negatif). (d) <i>Second invariant rate</i> . Mekanisme fokal menunjukkan gempa bumi signifikan yang terjadi pada kurun waktu 2018-2021, dari data katalog <i>Global Centroid Moment Tensor</i> (GCMT). Garis warna hitam merupakan sesar aktif, garis warna hitam dengan segitiga adalah jalur subduksi. Lingkaran hijau merupakan titik GPS yang digunakan dalam penelitian ini.	28
Gambar 3.4	Rasio laju momen geodetik dan seismik. Mekanisme fokal menunjukkan gempa bumi signifikan yang terjadi pada kurun waktu 2018-2021. Garis warna hitam merupakan sesar aktif, garis warna hitam dengan segitiga adalah jalur subduksi	31
Gambar 3.5	Perpindahan koseismik dari Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) dan dari data Global Positioning System (GPS). Nilai positif mewakili pergeseran garis pandang (LoS) menuju satelit. Vektor hitam adalah pergeseran berdasarkan data GPS 15 hari sebelum peristiwa dan satu hari setelah peristiwa. Vektor ungu adalah total pergeseran selama rentang waktu data InSAR (termasuk	

	pergeseran permukaan empat hari setelah gempa). Ellips ketidakpastian mewakili tingkat kepercayaan 95%. Persegi berwarna melambangkan vektor GPS ungu yang diproyeksikan ke arah pandang satelit. Garis merah melambangkan model sesar hasil inversi. 34	34
Gambar 3.6	Hasil model pergeseran koseismik menunjukkan bahwa pergeseran saat gempa sebagian besar terjadi dalam komponen strike-slip dengan komponen normal dan reverse pada bagian utara sesar 35	35
Gambar 3.7	(a) Kecepatan GPS sejajar sesar (titik-titik hitam) dan model sintetis (garis cyan) berdasarkan laju pergeseran yang diestimasi dan locking depth sesar. (b) Fungsi distribusi probabilitas posterior (PDF, probability distribution function) dari laju pergeseran berdasarkan locking depth yang ditetapkan pada 11 km. Solusi untuk laju pergeseran didasarkan pada nilai maksimum a posteriori (MAP) dari PDF yang digambarkan sebagai garis vertikal solid dengan interval kepercayaan 95% digambarkan sebagai garis putus-putus..... 35	35
Gambar 3.8	Warna grid menunjukkan nilai invarian kedua dari tensor laju regangan horizontal yang diturunkan dari kecepatan GPS regional (vektor merah) dengan mengacu pada kerangka referensi Sunda. Lingkaran kuning melambangkan gempabumi dengan kedalaman <30 km selama periode 1973–2009 (katalog USGS) dan 2009–2018 (Supendi dkk., 2020). Mekanisme fokal berasal dari katalog Global CMT (Dziewonski dkk., 1981; Ekström dkk., 2012). Garis hitam adalah sesar yang teridentifikasi (Irsyam dkk. 2020). Garis cyan mewakili profil GPS dari timur ke barat yang digunakan untuk menghitung laju pergeseran dan <i>locking depth</i> sesar. 36	36
Gambar 3.9	Hasil inversi geseran teleseismik memberikan hasil pergeseran koseismik dengan nilai maksimum sekitar 90 cm pada kedalaman 14 km. Bintang merah menunjukkan lokasi hiposenter, dan panah biru melambangkan arah rake di setiap grid. 38	38

Gambar 3.10 Profil skematis Patahan Selat Makassar di Sulawesi Barat di bawah wilayah Mamuju dan Majene berdasarkan pada hasil pemodelan, hasil relokasi, solusi tensor momen untuk peristiwa Mamuju, mekanisme fokus peristiwa 1969 dan 1984, dikombinasikan dengan wawasan dari potongan lintang regional melalui MST (Calvert & Hall 2007; Morley dkk. 2011). Hasil perhitungan Coulomb stress pada sistem sesar MST ditunjukkan di sepanjang garis C-D. Berbeda dengan sudut miring bidang sesar gempa utama (19°, garis merah), sebagian besar gempa susulan yang direlokasi membentuk bidang yang miring pada sudut sekitar 40° (garis hitam pekat), menandakan adanya struktur sesar sekunder. 38

Gambar 3.11 Invarian kedua (segitiga berwarna) dari tensor laju regangan utama yang diturunkan dari kecepatan GPS interseismik (vektor cyan) relatif terhadap kerangka referensi Sunda (Yong dkk. 2017). Panah merah ke dalam menggambarkan kompresi, sementara panah biru ke luar menggambarkan ekstensi. Mekanisme fokal terkait dengan gempabumi Mamuju 2021 dan semua gempabumi Mw > 6 yang direkam secara instrumental (Fitch 1972; katalog GCMT)..... 39

Gambar 4. 1 Posisi sumber gempabumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012 dan stasiun HR GNSS yang mendeteksi 43

Gambar 4.2 Grafik pergeseran akibat gempabumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012 dalam 3 komponen (east, north, up) dan peak ground displacement (PGD). Sumbu x merupakan waktu dalam detik dari origin time (OT), yaitu waktu awal terjadinya gempabumi, sedangkan sumbu Y merupakan nilai pergeseran dalam sentimeter (cm) 44

Gambar 4. 3 Grafik nilai PGD sebagai fungsi dari jarak antara stasiun GNSS dan hiposenter..... 46

Gambar 4.4 Peta episenter Gempabumi Palu 2018 dan sebaran stasiun GNSS jaringan InaCORS BIG 48

Gambar 4.5 Sinyal pergeseran pada stasiun GNSS CORS kejadian gempabumi Palu 28 September 2018 Mw7,2. Gambar

	dari atas ke bawah menunjukkan komponen <i>easting</i> , <i>northing</i> , dan <i>up</i> . (Sudrajat, 2023)	49
Gambar 4.6	Spectrogram sinyal pergeseran pada stasiun GNSS CORS kejadian Gempabumi Palu 28 September 2018 Mw7,4. Gambar atas stasiun PALP dan bawah stasiun CPRE, pada komponen naik-turun (Sudrajat, 2023).....	51
Gambar 4.7	Sinyal sintetis dan inversi tensor momen dengan parameter sumber gempabumi Palu 2 September 2018 (Sudrajat, 2023)	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Kompilasi data katalog gempabumi.....	25
Tabel 3.2	Rasio laju momen geodetik dan seismik berdasarkan metode Ward (1994) dan Molnar (1979), beserta dengan parameter lainnya.....	31
Tabel 4. 1	Nilai PGD tiap stasiun GNSS akibat gempabumi Mentawai Mw 8,4, 11 April 2012 dan jarak antara stasiun GNSS dengan hiposenter	45
Tabel 4. 2	Parameter Gempabumi Palu 2018 hasil inversi tensor momen	53

1 PENDAHULUAN

Gempabumi, sebagai salah satu bencana alam dahsyat yang telah dipelajari selama ratusan tahun, tetapi sains modern masih belum sepenuhnya memahami secara detail mekanisme gempa. Waktu dan lokasi pemicu gempabumi di masa depan belum dapat diprediksi untuk saat ini. Pelepasan secara tiba-tiba dari energi seismik yang sangat besar sering kali tidak memberi kesempatan kepada orang untuk menyelamatkan diri dari bahaya. Ribuan orang tewas atau terluka dan triliunan dolar hilang hanya oleh beberapa bencana gempabumi dalam satu dekade terakhir.

Gempabumi M9.1 Sumatra-Andaman 2004 menewaskan lebih dari 120.600 orang dan 114.900 orang lainnya hilang di Indonesia. Di Ibu Kota Banda Aceh, sekitar sepertiga populasi penduduk diperkirakan meninggal. Diperkirakan sebanyak 700.000 korban yang selamat mengungsi. Konsekuensi psikologis dari bencana tsunami bagi para korban selamat kemungkinan besar akan sangat mendalam dan bertahan lama. Selain apa yang dialami para korban selamat selama masih dengan lingkungan tergenang tsunami, banyak korban yang menyaksikan kematian keluarga dan teman-temannya. Mereka menghabiskan berminggu-minggu setelah kejadian untuk mencari informasi tentang korban hilang. Kerugian lain dari bencana tersebut meliputi kerusakan infrastruktur, aset produktif, dan lingkungan alam. Hingga Mei 2005, Bank Dunia memperkirakan biaya bencana sekitar 4,5 miliar dollar AS, 78% di antaranya merupakan kerusakan dan kerugian di sektor pribadi/swasta. Biaya tersebut mewakili 2,2% dari PDB nasional dan 97% dari PDB Aceh. Pemulihan penuh diharapkan memakan waktu setidaknya lima tahun. Hal ini menunjukkan penelitian gempabumi perlu dilakukan sebagai bagian dari upaya mengurangi dampak bencana dimasa depan.

Dengan pengembangan teknologi geodesi modern, pengamatan geodesi telah terbukti lebih mampu untuk mengungkap fenomena gempabumi dengan kedetailan dan akurasi yang tidak pernah ada sebelumnya. Hal ini melahirkan cabang ilmu baru, yaitu Geodesi Gempabumi. Perkembangan dan pencapaian terkini dalam geodesi gempabumi tidak bisa dilepaskan dari perkembangan pengamatan GNSS tingkat tinggi, InSAR, dan Satelit Gravimetri.

Sejak tahun 1950-an, metode dan teknologi pengamatan bumi telah berkembang pesat dengan adanya *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), *Very-Long-Baseline Interferometry* (VLBI), *Satellite Laser Ranging* (SLR), *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR), Altimetri Satelit dan Gravimetri Satelit.

Pengamatan dengan cakupan global dan berkelanjutan dari data geodetik memberikan informasi berkualitas tinggi dengan perspektif berbeda yang mencakup resolusi sangat luas dalam domain spasial dan temporal. Geodesi modern memberi kita wawasan lebih lengkap mengenai ilmu bumi daripada pengamatan tradisional. Deformasi permukaan, perubahan geoid dan gravitasi, dapat ditentukan dengan presisi yang belum pernah dicapai manusia sebelumnya. Pengukuran ini dipadukan dengan pengukuran seismologi dan/atau pengukuran geologi dapat dianalisis lebih lanjut untuk mempelajari parameter gempabumi, struktur interior bumi, dll.. Kombinasi geodesi modern dan seismologi serta geologi memberi kita kesempatan untuk mempelajari bagian dalam (interior) bumi dan deformasi global secara dinamis dengan berbagai jenis skala.

Pengukuran geodetik melengkapi data seismologi karena pengukuran geodetik mendokumentasikan siklus gempabumi secara lengkap, termasuk proses inter-seismik dan transien pasca-seismik, serta deformasi ko-seismik. Deteksi akumulasi regangan antar (inter) seismik yang lambat mungkin merupakan teknik terbaik yang kita miliki untuk mengidentifikasi lokasi gempabumi di masa mendatang. Hal disebabkan karena pelepasan (pantulan) elastis akibat gempa membutuhkan akumulasi regangan elastis sebelum gempabumi. Kemudian relaksasi regangan pascagempa (post-seismik) penting dalam membatasi transfer tegangan transien dan dapat memberikan wawasan tentang proses fisik yang aktif pada sumber gempa.

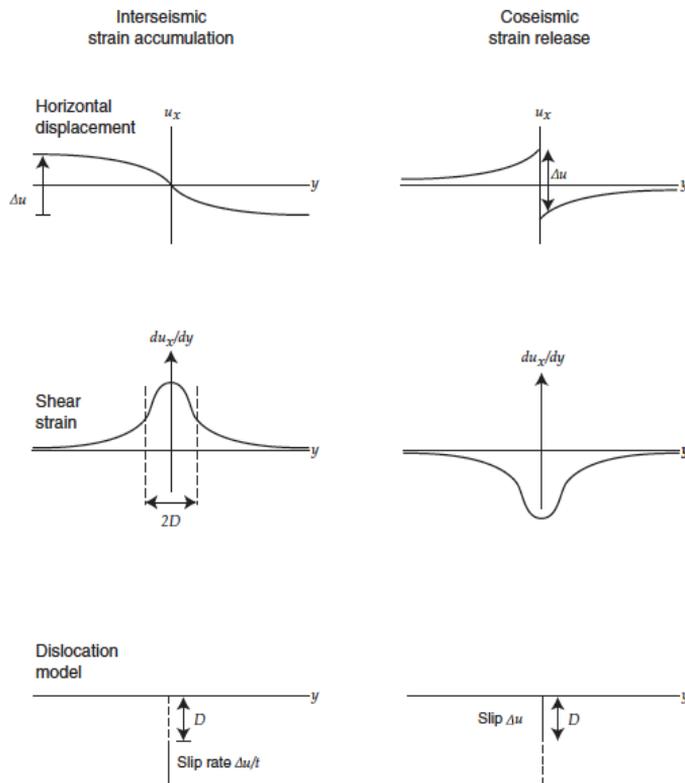
Perkembangan terkini dari bidang geodesi gempabumi, yaitu berkontribusi juga dalam sistem peringatan dini gempabumi melalui estimasi cepat magnitudo gempa serta parameter sumber gempa. Untuk itu, maka selain memiliki cakupan temporal yang baik, pengamatan geodetik juga harus mampu mengestimasi nilai koordinat dengan cepat dan akurat, yang digunakan sebagai *input* untuk menghitung parameter gempa.

1.1 Geodesi Gempabumi

Gilbert (1909), menuliskan bahwa terdapat suatu pola (ritme) dalam pengulangan kejadian gempabumi. Maksud dari pernyataan ini bahwa kejadian gempabumi terjadi secara bergantian di sepanjang zona seismik aktif, dengan pengulangan kejadian seolah-oleh saling bersahutan dengan membuat suatu ritme tertentu. Konsep klasik dan terlihat sangat sederhana ini sangat terkait dengan pemahaman siklus gempa (*earthquake cycle*) dan konsep celah seismik (*seismic gap*) yang dikenal dalam ilmu gempa modern. Pemahaman akan ritme gempa ini kemudian dijadikan sebagai sebuah konsep yang bernama *elastic rebound* yang menjelaskan adanya akumulasi regangan dan pelepasannya oleh H. F. Reid. Untuk menjelaskan mekanisme gempabumi California tahun 1906, Reid (1910) mempresentasikan teori pantul elastisnya (*elastic rebound*) di mana gempabumi merupakan hasil dari relaksasi regangan elastis secara tiba-tiba melalui retakan di sepanjang Patahan San Andreas. Reid juga memanfaatkan data jaringan triangulasi di Indonesia untuk memperkuat hipotesisnya (Gambar 1.1). Strain kausatif, menurut teorinya, terakumulasi dalam jangka waktu yang lama oleh gerakan stabil daerah di kedua sisi sesar, yang dalam kondisi normal tetap terkunci oleh pergeseran.

Konsepsi Reid menggunakan asumsi kondisi elastis yang bersifat linier. Dia mengusulkan bahwa pola akumulasi regangan berlawanan dengan pelepasan regangan, sehingga hasil dari satu siklus gempabumi adalah *offset* blok dari sesar tanpa regangan (Gambar 1.2). Akibatnya dia mengalami kesulitan dalam menjelaskan mengapa akumulasi regangan terkonsentrasi begitu erat pada patahan. Seperti yang kita ketahui sekarang, perilaku pembebanan sebelum gempa yang sebenarnya jauh lebih kompleks dan tidak dapat dijelaskan oleh sistem elastis dengan akumulasi regangan yang stabil.

Sebagai konsekuensi dari teorinya, Reid mengusulkan metode prediksi gempa. Reid berpendapat bahwa jika kita melakukan pengukuran geodetik di seluruh patahan sesudah terjadinya gempabumi, maka kita dapat mengetahui kapan gempa berikutnya akan terjadi. Asumsi yang digunakan adalah apabila kita mengetahui besarnya pergeseran akibat gempabumi, serta nilai akumulasi regangan diamati sesudah gempa, maka kita bisa menghitung kapan waktu akumulasi akan mencapai nilai yang diperlukan untuk menghasikan gempa kembali. Menanggapi gagasan ini, pengukuran



Gambar 1.2 Diagram sistematis menggambarkan model *rebound* elastik sederhana. Di sebelah kiri, perpindahan *seismic* dan bidang akumulasi regangan dengan slip pada satu kecepatan tetap di bawah kedalaman pengunci D . Pada sebelah kanan, slip ko-seismik dan pelepasan regangan dimodelkan dengan slip pada sesar turun hingga kedalaman D .

Kontribusi bidang geodesi sangat signifikan dalam memahami keseluruhan siklus dari gempa bumi. International Association of Geodesy (IAG, 2020) mendefinisikan Geodesi Gempabumi sebagai studi mengenai aplikasi metode pengamatan geodetik dalam memahami potensi gempa bumi dan sistem peringatan dini gempa bumi dan tsunami untuk mitigasi bencana

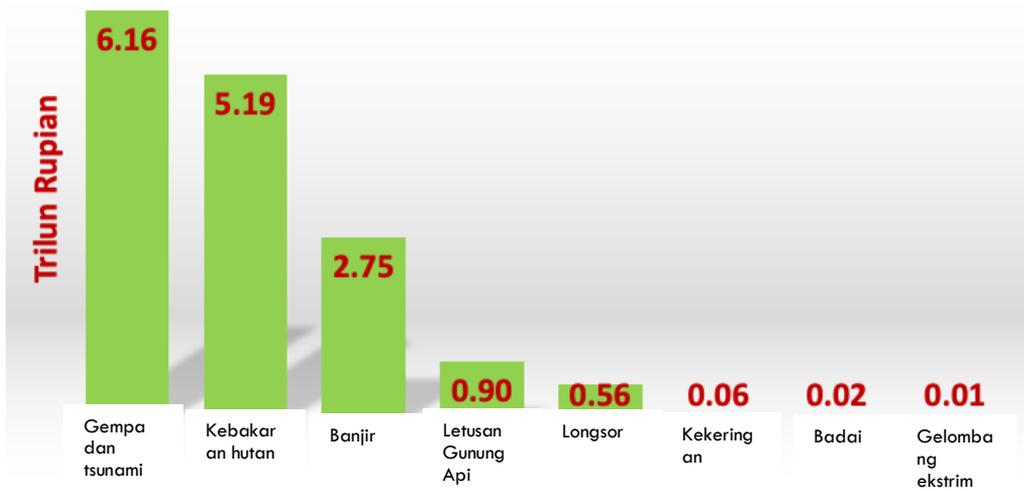
1.2 Gempabumi dan Dampak Kerugiannya

Sebagai negara yang memiliki kondisi tektonik yang sangat aktif, Indonesia memiliki risiko yang tinggi mengalami dampak (korban jiwa dan kerugian ekonomi) akibat gempa bumi dan bencana kebumihannya lainnya. Dalam catatan sejarah Indonesia mengalami kerugian ekonomi, maupun korban jiwa yang signifikan akibat bencana terutama letusan gunung api, gempa bumi dan tsunami. Beberapa kejadian bencana besar di Indonesia yang mengakibatkan

tidak hanya kerugian ekonomi, korban jiwa bahkan hancurnya peradaban. Di antaranya, letusan Gunung Toba 73.500 (+2000) tahun lalu, yang mengakibatkan terciptanya musim dingin akibat abu vulkanik (*volcanic winter*), yang diyakini menjadi penghambat (*bottleneck*) pertumbuhan populasi manusia, dan menyisakan tinggal ribuan manusia saja di bumi (Gathorne-Hardy dan Harcourt-Smith, 2003). Letusan gunungapi katastropik lainnya di Indonesia, yaitu Gunung Krakatau tahun 1883. Dampak langsung dari letusan Krakatau, yaitu kematian dalam skala besar di Asia Tenggara (Gathorne-Hardy dan Harcourt-Smith, 2003). Kajian terkini dari sebaran mamalia mengindikasikan bahwa sebaran produk vulkanik berat (debu dan batuan) mencapai sampai jarak 350 km, sehingga menghasilkan sembilan endemik spesies yang diyakini terkait dengan produk letusan Krakatau (Gathorne-Hardy dan Harcourt-Smith, 2003).

Untuk memahami potensi dan dampak bencana di masa depan, maka diperlukan data historis kebencanaan di masa lalu, selain menghitung risiko ke depan berdasarkan model. Analisis histori kejadian bencana yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan dua sumber basis data. Adapun basis data kejadian bencana alam yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu Emergency Events Database (EM-DAT) dan Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI). EM-DAT merupakan basis data global bencana alam dan teknologi, yang berisi data utama terkait kejadian dan dampak lebih dari 21.000 bencana di dunia, dari tahun 1900 hingga sekarang. EM-DAT dikelola oleh Pusat Penelitian Epidemiologi Bencana – the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) di sekolah kesehatan masyarakat Université catholique de Louvain yang berlokasi di Brussels, Belgia (Fisher dkk., 2018; Guha-Sapir, 2002; Guha-Sapir dan Below, 2002).

Sementara DIBI merupakan basis data relasional dan struktural terkait kejadian bencana di Indonesia dalam format yang tidak pasti (data interval dan temporal, tipe kejadian, dll.) dan akibat langsung (kematian manusia, hilangnya rumah, infrastruktur, aktivitas ekonomi). Dengan berlakunya Undang-Undang Nomor 24/2007, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) memiliki mandat untuk mengumpulkan dan menganalisis informasi mengenai terjadinya dan dampak bencana alam di Indonesia melalui DIBI (Kepala BNPB, 2012; Presiden Republik Indonesia, 2007).



Gambar 1.3 Data historis kerugian langsung akibat bencana di Indonesia

Berdasarkan hasil tabulasi data historis bencana di Indonesia periode tahun 1980 hingga tahun 2022, bencana gempabumi memberikan nilai kerugian secara langsung yang paling besar dibandingkan 7 jenis bencana lainnya (tsunami, banjir, tanah longsor, cuaca ekstrem, karhutla, gelombang ekstrem dan abrasi, gunung api) yaitu sebesar Rp6,16 triliun per tahun. Gempa Nias 2005, Gempa Aceh 2004, dan Gempa Yogya 2006, secara berurutan memberikan kontribusi nilai kerugian yang paling besar dalam periode 42 tahun terakhir.

2 PENGAMATAN GEODETIK UNTUK STUDI GEMPABUMI

Apakah kita bisa membayangkan suatu hari di masa depan, pengetahuan manusia mampu untuk memprediksi terjadinya gempabumi, seperti layaknya prakiraan cuaca? Seperti cuaca, mungkin suatu saat nanti kita bisa mengetahui kota mana saja yang akan mengalami gempabumi dengan magnitudo tertentu dan terdampak guncangan dalam intensitas tertentu. Memprediksi waktu, lokasi dan kekuatan (magnitudo) gempa adalah harapan seluruh masyarakat, dan tentu saja menjadi harapan (juga) para peneliti kebumian. Namun sayangnya (paling tidak sampai saat ini) komunitas keilmuan kebumian masih belum bisa memprediksi gempabumi seperti layaknya prakiraan cuaca bahkan sebagian di antaranya menyangsikan bahwa gempabumi dapat diprediksi. Walaupun Steven Hawking mengatakan dalam bukunya *A Brief History of Time*, bahwa “kita telah mendefinisikan kembali tugas sains, yaitu menemukan hukum yang memungkinkan kita memprediksi peristiwa”. Hanya saja sampai saat ini, harapan Hawking belum bisa menjadi kenyataan. Belum ada teori atau hukum alam yang terbukti dapat mengetahui dengan pasti kapan, di mana, dan berapa magnitudo kejadian gempabumi akan terjadi. Bahkan pada saat gempabumi terjadi, para peneliti sering kali lebih banyak mendapatkan pertanyaan daripada jawaban dari misteri alam ini.

Lantas kita bisa mengajukan pertanyaan, apa capaian yang telah diraih para peneliti gempabumi? Apabila mereka tidak (belum) mampu memprediksi kejadian gempabumi. Upaya yang dilakukan para peneliti gempabumi saat ini berpusat pada menjawab 2 pertanyaan penting. Yang pertama adalah mengkuantifikasi potensi dan laju kejadian gempa jangka panjang (*long-term expected rate*) dan yang kedua adalah memprediksi guncangan gempa di masa depan. Kemudian kita bisa mengajukan pertanyaan lanjutan, apabila ke-2 hal tersebut dilakukan apakah kita bisa mengurangi/menghindari kerugian dan korban akibat gempabumi? Jawabannya adalah “Ya, kita bisa melakukannya”.

Mengetahui potensi dan laju kejadian gempa akan membantu kita untuk mengkuantifikasi tingkat aktifitas dari suatu sumber gempa. Sehingga kita tidak hanya bisa mengatakan suatu sumber gempa aktif atau tidak, tetapi juga

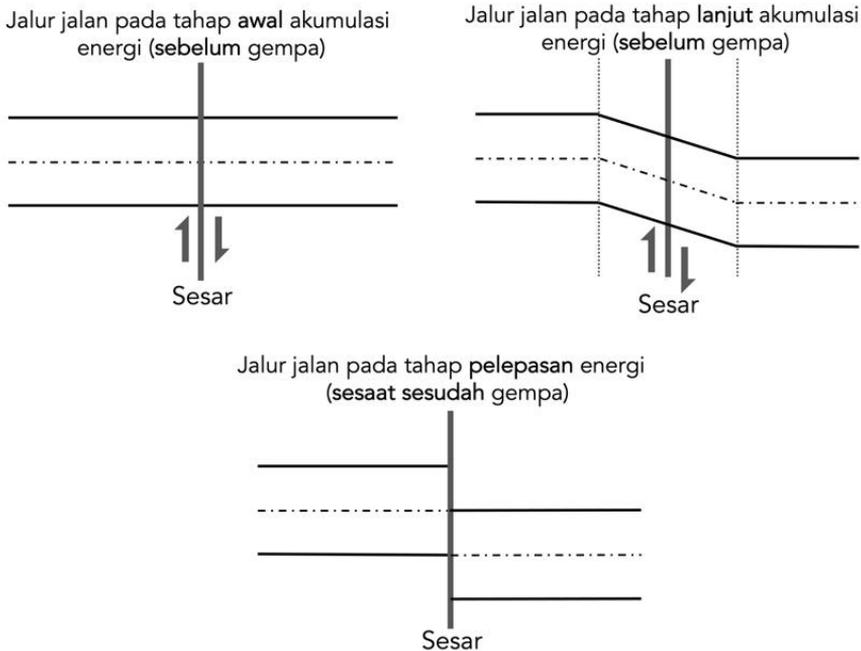
menjelaskan mekanisme dari sumber gempa, potensi magnitudo maksimum dan kecepatan laju akumulasi energi (*slip-rate*). Kesemua informasi tersebut akan membantu kita untuk memprediksi tingkat guncangan di masa depan. Pengetahuan akan potensi tingkat guncangan akan menjadi masukan untuk perhitungan risiko kerugian ekonomi dan korban jiwa di masa depan. Kemampuan untuk mengestimasi risiko membantu kita untuk melakukan tindakan prioritas dalam mengurangi risiko gempabumi.

Ilmu dan pengetahuan kebumihan saat ini juga telah mampu untuk mendeteksi secara cepat lokasi, magnitudo dan mekanisme gempa. Sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk melakukan peringatan dini gempa (*earthquake early warning*). Selain itu teknologi rekayasa struktur bangunan telah mampu untuk menyesuaikan desain dan pembangunan sehingga tahan akan guncangan gempa. Sehingga walaupun pengetahuan saat ini belum bisa memprediksi kejadian gempabumi, tetapi kita sudah bisa mengurangi risiko gempabumi.

2.1 Sumber Gempabumi dan Pengamatan Geodetik

Pemahaman secara konseptual dari kejadian gempabumi dijelaskan oleh suatu konsep yang dinamakan *elastic rebound*. Konsep ini sedikit lebih muda dari teori penemuan elektron oleh J.J Thomson pada 1897, dan memiliki umur yang mirip dengan konsep Relativitas Einstein pada 1905. Sementara itu teori yang lebih mendasar yang menjelaskan dinamika lempeng tektonik (*Plate tectonics*) baru diterima sebagai konsep solid (disepakati) oleh komunitas keilmuan sesudah ditemukan banyak bukti dari survei batimetri, magnetik dan kegempaan pada tahun 1960-an. Sehingga pengetahuan manusia akan sumber dan proses gempabumi masih sangat baru.

Gambar 2.1 merupakan ilustrasi penjelasan konsep dari teori *elastic rebound* yang pertama kali diperkenalkan oleh H. F. Reid sesudah kejadian gempa San Francisco tahun 1906. Dalam proses membangun konsep ini Reid juga menggunakan data gempa 1892 di Tarutung, Indonesia. Ide sederhana dari konsep Reid, bahwa gempa merupakan proses terlepasnya energi secara tiba-tiba. Dan untuk dapat terlepas maka energi harus terakumulasi dalam waktu yang lama. Sehingga terdapat proses akumulasi secara elastik (*elastic*) dan terlepas tiba-tiba atau *rebound*. Oleh karena itu dinamakan dengan konsep *elastic rebound*.



Gambar 2.1 Ilustrasi teori *elastic rebound* pada sesar yang memotong jalan

Dalam hal deformasi kerak bumi, siklus pembebanan sering dibagi menjadi empat tahap: pra-seismik, ko-seismik, pasca-seismik, dan inter-seismik. Struktur empat kali lipat ini telah dikumpulkan dari banyak pengamatan geodetik di berbagai tempat: satu siklus lengkap telah diamati hanya di satu tempat: Parkfield, California (Murray dan Langbein, 2006).

Pengukuran geodetik telah mengungkapkan akumulasi regangan dari proses tektonik yang sedang berlangsung di banyak daerah. Pada saat sebelum gempa, bagian dari material kerak bumi yang berada dekat dengan sesar akan mengalami pembengkokan yang perlahan, atau regangan (Gambar 2.1). Gaya gesek (*friction*) akan meningkatkan tegangan (*stress*) di daerah dekat dengan sesar. Pada saat tegangan semakin besar, dan melebihi kemampuan gaya gesek untuk menahannya maka akan terjadi pergeseran tiba-tiba (*rebound*) sebagai gempabumi untuk menyeimbangkan pergerakan dari bagian yang lebih jauh dari sesar. Pada saat terjadi gempa daerah dekat sesar akan bergerak tiba-tiba, disebut pergerakan koseismik. Untuk sesar geser mendatar arah pergerakan akan membuat daerah dekat sesar menjadi sejajar dengan daerah yang lebih jauh.

Tetapi apakah yang dimaksud dengan sesar (*fault*)? Konsep dari sesar (Gambar 2.2) pada awalnya diperkenalkan untuk menjelaskan ketidakberlanjutan dari kontinuitas batuan yang umumnya ditemukan di daerah pertambangan. Dalam bidang kebumihan, sesar merupakan konsep yang digunakan untuk menjelaskan suatu bidang terjadinya pemegatan (*discontinuity*) dalam volume batuan, bersama dengan pergeseran yang pernah terjadi di masa lalu.

Pada tahun 1980-an, paradigma baru diperkenalkan untuk menjelaskan bagian sesar yang terkunci, yaitu model asperiti (Gambar 2.2). Asperiti dijelaskan sebagai bagian dari bidang sesar yang relatif kuat. Pertemuan dari dua sisi sesar yang saling mengunci (*locked*). Kunci yang terjadi pada bidang sesar ini mengakumulasi energi yang akan dilepaskan sebagai gempa bumi yang merupakan manifestasi dari pergeseran (*slip*) yang tiba-tiba pada bidang asperiti.

Ukuran dari asperiti (bidang kunci) akan memengaruhi besarnya magnitudi gempa yang mungkin terjadi. Sedangkan arah *slip* saat gempa bumi, akan memengaruhi mekanisme dari gempa bumi yang terjadi (Gambar 2.3). Secara umum arah dari pergeseran (*slip*) dapat dibagi menjadi 3 arah.

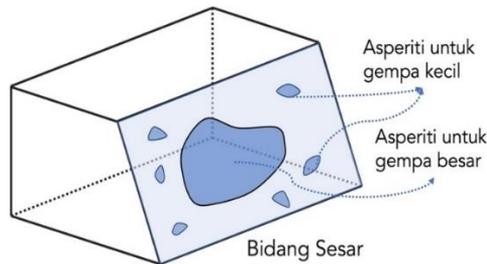
1. Arah mendatar akan menghasilkan sesar mendatar yang dibagi kembali menjadi 2 bagian, yaitu mendatar mengiri (*sinistral*) dan mendatar manganan (*dekstral*).
2. Kemudian sesar naik (*dip-slip*). Jenis sesar ini sering terjadi pada zona subduksi.
3. Kemudian sesar turun (*normal-slip*). Jenis sesar ini terjadi pada wilayah yang mengalami regangan yang berjenis ekstensi.

Konsep dari asperiti bisa menjelaskan tahapan akumulasi energi dan pelepasannya dalam teori *elastic rebound*-nya Reid. Penjelasan dari Reid ini dapat juga dijabarkan dalam suatu siklus kejadian gempa bumi yang terdiri atas 3 tahapan/fase (Gambar 2.4).

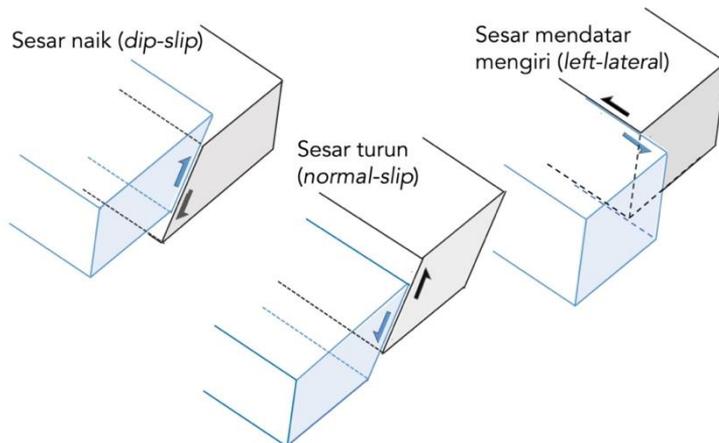
1. Tahapan awal dari siklus adalah interseismik. Pada tahapan ini gaya tektonik (dalam arah berlawanan) akan terakumulasi pada bidang sesar. Tahapan ini dicirikan dengan adanya akumulasi regangan tektonik di wilayah sekitar sesar yang bisa teramati dengan pengamatan geodetik (mis. GNSS).

2. Tahapan selanjutnya adalah tahapan koseismik. Pada tahapan ini energi yang terakumulasi akan dilepaskan secara tiba-tiba sebagai gempa bumi. Akan terjadi pergeseran tiba-tiba (*slip*) pada bidang sesar, yang disebut dengan koseismik *slip*. Pergeseran tiba-tiba ini akan menghasilkan gelombang gempa. Besaran koseismik *slip* dan luasan dari bidang gempa akan memengaruhi nilai magnitudo dari gempa bumi. Tahapan koseismik dapat teramati dengan pengamatan geodesi dan pengamatan seismik (seismologi).
3. Tahapan sesudah koseismik adalah tahapan post-seismik. Pada tahapan ini akan terjadi deformasi paska gempa bumi. Deformasi paska gempa bisa teramati dengan pengamatan geodetik (GNSS, InSAR dll).

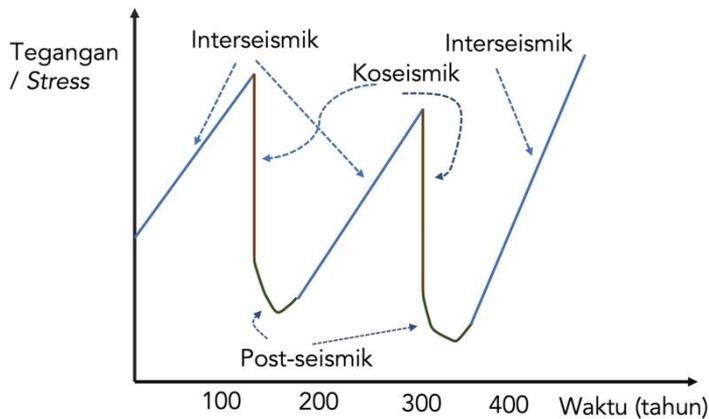
Beberapa peneliti mengklaim berhasil menemukan anomali pada pengamatan deformasi (GNSS) sesaat sebelum terjadinya gempa. Sehingga berusaha memperkenalkan tahapan tambahan sebelum koseismik, yaitu tahapan pre-seismik.



Gambar 2.2 Penampang dari bidang gempa sesar dan asperiti yang menjadi lokasi di mana terdapat akumulasi energi pada tahapan interseismik dan akan dilepaskan pada tahapan koseismik



Gambar 2.3 Jenis sumber gempa berdasarkan arah dari pergeserannya



Gambar 2.4 Siklus gempabumi dari interseismik, koseismik, dan post-seismik

Sumber gempa yang pernah mengalami gempa di masa lalu, akan kembali menjadi sumber gempa di masa depan. Kita bisa mengetahui secara gempa di masa lalu, tetapi tidak memiliki kemampuan mengontrol kejadian di masa depan. Kita tidak bisa memprediksi (dalam jangka pendek) terjadinya gempabumi. Dan mungkin kita tidak pernah bisa memprediksi secara pasti (jangka pendek, prediksi jangka menengah mungkin bisa dilakukan) waktu dan tempat kejadian gempabumi.

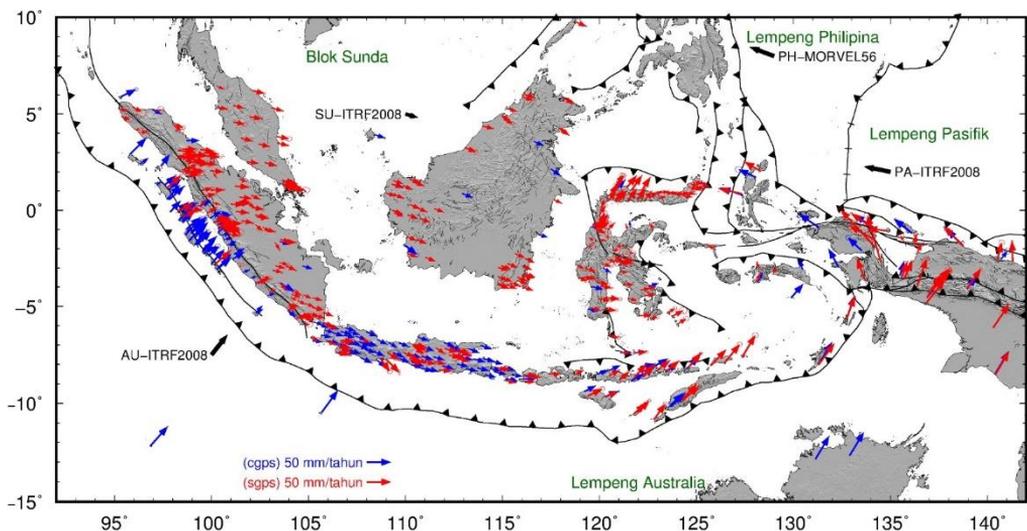
2.2 Sumber Gempabumi Indonesia Berdasarkan Data GNSS

Gempabumi terjadi pada suatu bidang sumber (sesar) yang bergerak relatif satu sama lain secara tiba-tiba. Pada umumnya gempa terjadi pada sumber yang telah teridentifikasi sebelumnya berdasarkan catatan kejadian gempabumi di masa lalu. Gempabumi yang cukup dangkal akan menyisakan robekan (*rupture*) yang terlihat dalam morfologi di permukaan, sebagai contoh beberapa gempabumi yang terjadi di sepanjang Zona Sesar Sumatera.

Selama 100 tahun terakhir Indonesia mengalami lebih dari 200 gempa dengan magnitudo diatas Mw 7.5. Lebih dari setengah gempa ini adalah gempa merusak yang memberikan dampak serius pada wilayah dengan jumlah yang padat. Di antaranya adalah gempa Aceh Mw 9.2 yang tidak hanya mengakibatkan korban jiwa dan kerugian ekonomi yang sangat besar tetapi juga menyadarkan kita bersama akan potensi gempa di sekitar Pulau Mentawai yang pernah menghasilkan gempa dengan Mw 9.0 pada tahun 1833.

Sumber gempa di Indonesia di bagian barat berasal dari sistem Palung Busur Sunda (*Sunda arc-trench system*). Sistem ini merupakan zona pertemuan antarlempeng Samudra Indo-Australia dengan bagian selatan dari lempeng Eurasia atau Blok Sunda. Sistem pertemuan antarlempeng ini memanjang dari pantai barat Sumatra, melalui bagian selatan dari pulau terdapat di dunia, yaitu Pulau Jawa sampai ke wilayah timur melalui Bali. Data vektor pergeseran di Indonesia berdasarkan data pengamatan GNSS selama 22 tahun relatif terhadap ITRF memperlihatkan proses tektonik yang kompleks (Gambar 2.5).

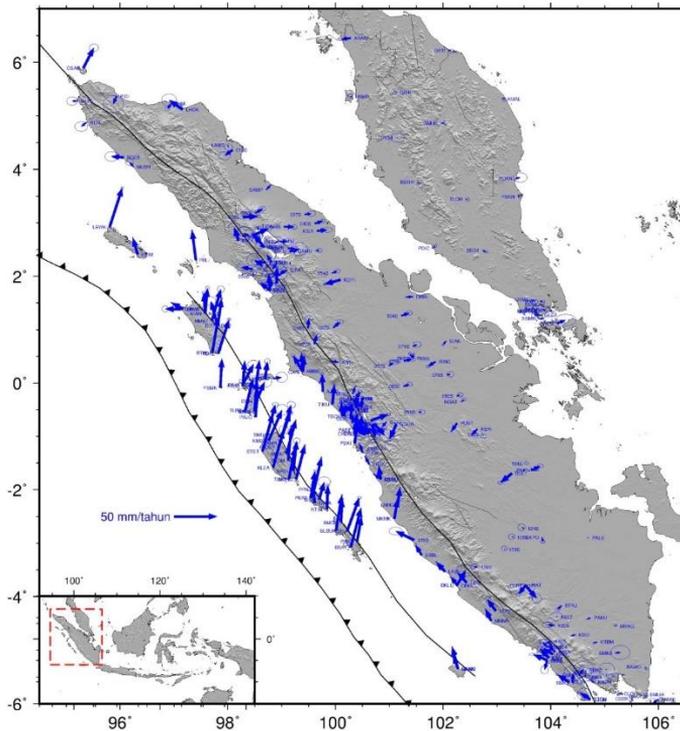
Blok Sunda bergerak ke arah Timur-Tenggara, busur depan Sumatra bergerak ke arah Utara-Timur Laut, busur Banda bagian selatan dan Papua bagian selatan bergerak ke arah Timur Laut dan Utara Timur Laut, wilayah blok Kepala Burung (Papua) bergerak ke arah Barat Laut, Sulawesi Tenggara bergerak ke arah Timur - Timur Laut, Sulawesi Utara bagian barat bergerak ke arah Utara - Timur Laut, Sulawesi Utara bagian timur bergerak ke arah Timur - Tenggara, sedangkan lempeng Australia bergerak ke arah Utara-Timur Laut.



Gambar 2.5 Vektor kecepatan pergeseran di Indonesia berdasarkan pengamatan GPS selama 22 tahun terakhir (Susilo dkk., 2016b)

Nilai vektor kecepatan stasiun GPS yang terletak di pulau-pulau sebelah barat Sumatra mempunyai nilai yang bervariasi, yaitu antara 17 mm/thn – 47 mm/thn dengan arah 295° – 33°. Pola vektor kecepatan stasiun GPS di busur depan Sumatra mengindikasikan adanya perbedaan pola deformasi di bagian selatan (< 4°S) dan bagian utara (> 4°S). Pola vektor kecepatan yang terletak di

bagian selatan ($4^{\circ}\text{S} - 6^{\circ}\text{S}$), Pulau Enggano, memberikan indikasi terkuncinya subduksi lempeng Australia (*fully locking*), sedangkan vektor kecepatan di sebelah utara berotasi berlawanan arah jarum jam terhadap vektor kecepatan di bagian selatan (Gambar 2.6).



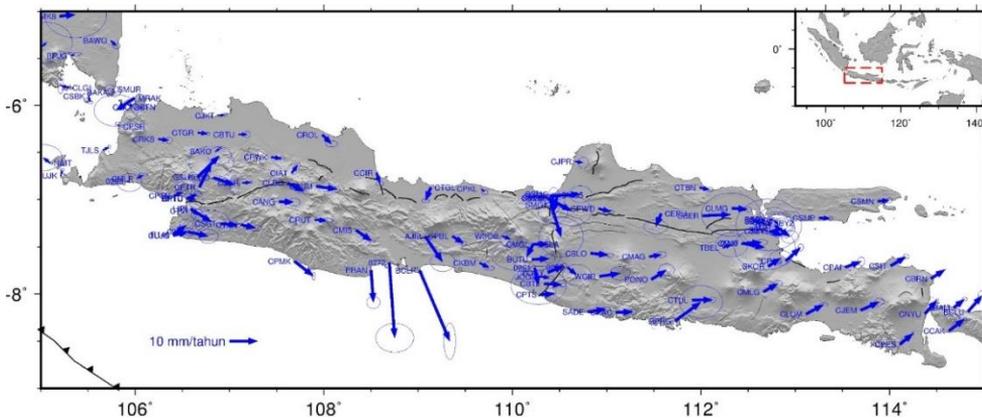
Gambar 2.6 Vektor kecepatan pergeseran di Pulau Sumatra berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b)

Perbedaan pola vektor kecepatan di Enggano berkaitan dengan terjadinya gempa bumi 7,9 Mw pada tahun 2000. Vektor kecepatan stasiun GPS antara lintang $0^{\circ} - 4^{\circ}\text{S}$ berotasi searah jarum jam terhadap blok Sunda dengan arah vektor ke Utara-Timur yang menggambarkan pola vektor kecepatan interseismik. Lebih ke utara antara lintang $0^{\circ} - 2^{\circ}\text{U}$, nilai vektor kecepatan stasiun GPS di Pulau Batu lebih kecil dibandingkan stasiun GPS di sebelah selatan dengan arah vektor mendekati arah utara.

Partisi dari konvergensi miring Lempeng Australia terhadap Pulau Sumatra menghasilkan sumber gempa sesar naik pada zona subduksi, sumber gempa sesar geser mendatar di daratan Sumatra (Zona Sesar Sumatra) dan blok *sliver* yang terletak di antaranya (Gambar 2.6). Perhitungan regangan tektonik berdasarkan pengamatan GPS mengindikasikan bahwa pantai Barat

Sumatra mengalami kontraksi (konvergensi) pada arah SE sampai NW (Prawirodirjo dkk, 1997). Pergerakan dari busur depan Sumatera (*sliver*) tidak terlalu diketahui dengan pasti. Berdasarkan pengamatan GPS laju konvergensi pada palung di Sumatra bagian selatan, yaitu 40-50mm/thn dan nilainya mengecil di utara menjadi kurang dari 20mm/tahun (McCaffrey, 2009).

Pada bagian tengah dari Pulau Sumatra terbentuk Bukit Barisan, di mana termasuk di dalamnya adalah busur gunungapi dan Sesar Sumatera (Hamilton, 1979). Jalur pegunungan sepanjang bukit barisan terletak paralel terhadap zona subduksi dan berada pada ketinggian 100-150 km di atas lempeng yang menunjam (*slab*). Zona Sesar Sumatera terbagi menjadi 19 segmen, dengan panjang segmen kurang dari 100 km, hanya 2 dari segmen tersebut memiliki panjang lebih dari 200 km (Sieh dan Natawidjaja, 2000). Segmen-segmen ini dipisahkan oleh lonjakan (*step-overs*) sepanjang beberapa kilometer. Zona Sesar Sumatera, memiliki sejarah panjang sebagai penyebab banyak sekali kerusakan akibat gempa.



Gambar 2.7 Vektor kecepatan pergeseran di Pulau Jawa berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b)

Berdasarkan data kegempaan merusak, Pulau Jawa telah mengalami 48 gempa besar dari tahun 1612 hingga 2014 (Supartoyo dkk., 2014). Beberapa dari gempa tersebut berasal dari zona subduksi yang terletak di bagian selatan Pulau Jawa (Newcomb dan McCann, 1987). Zona tersebut merupakan batas lempeng aktif yang mengakomodasi penunjaman lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia dengan laju konvergensi tegak lurus terhadap palung 58.3 ± 0.5 sampai 61.8 ± 0.4 mm/tahun. Selain itu, terdapat pula sesar aktif di daratan

Pulau Jawa seperti Sesar Baribis, Sesar Cimandiri, Sesar Lembang, Sesar Opak dan Sesar Zona Kendeng (Meilano dkk., 2012).

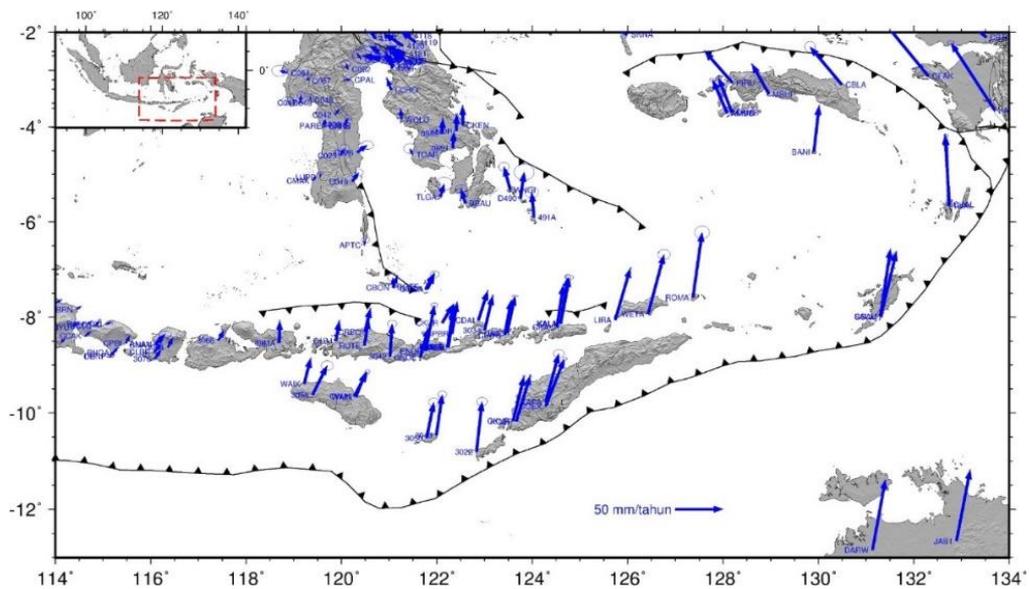
Vektor kecepatan stasiun GPS di sekitar Pulau Jawa terhadap Blok Sunda terlihat pada Gambar 2.7. Nilai vektor kecepatan bervariasi dari 0,3 - 10,0 mm/thn. Pola vektor kecepatan konsisten dengan arah konvergensi dari lempeng Australia dan Blok Sunda (Tregoning dkk., 1994 dan Simons dkk., 2007). Stasiun GPS di bagian utara Jawa mempunyai nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan stasiun GPS di bagian selatan, hal ini sesuai dengan Koulali, dkk. (2016b) yang menyatakan bahwa busur depan Jawa bergerak relatif terhadap Blok Sunda. Efek deformasi pascaseismik akibat gempa bumi Jawa 2006 masih terlihat di beberapa stasiun GPS antara lain CMPK dan PRAN. Dalam 30 tahun terakhir Pulau Jawa telah mengalami dua tsunami yang lebih tinggi dari magnitudo gempanya. Kedua tsunami tersebut yaitu Mw 7.8 tahun 1994 dan Mw 7.8 tahun 2006.

Flores, Nusa Tenggara Timur dan kemudian menjadi bagian dari busur Banda. Pertemuan antarlempeng ini selain menghasilkan sumber gempa dengan mekanisme sesar naik atau turun (*thrusting/normal*) dengan magnitudo di atas 8, yang berpotensi tsunami juga bisa berpotensi menghasilkan sesar geser mendatar (*strike slip*) di daratan yang berpotensi merusak dan dekat dengan pemukiman (Bock dkk., 2003).

Wilayah Indonesia timur, dimulai dari Bali sampai Nusa Tenggara dari bujur 114° - 125°E (Gambar 2.8) merupakan wilayah dengan kondisi tektonik yang sangat kompleks. Lempeng Australia mendesak ke blok Sunda yang terbagi dalam tiga segmen transisi, yaitu konvergensi dari subduksi lempeng laut di selatan Jawa Timur, tumbukan lempeng benua di Nusa Tenggara, dan subduksi busur Banda (Koulali, dkk., 2016a). Dua subduksi busur belakang juga dibuktikan dari survei geofisika laut (Silver, dkk. 1983), yaitu subduksi di utara Sumbawa dan Flores bagian barat sepanjang 450 km dan subduksi di utara Wetar dan Timor sepanjang 350 km. Studi terdahulu menyatakan bahwa Timor trough tidak aktif (Genrich dkk., 1996 dan Kreemer dkk., 2000), akan tetapi hasil studi dari Bock dkk. (2003) dan Nugroho dkk. (2009) menghasilkan pergerakan Timor trough sebesar 15 - 20 mm/thn dan 60 mm/thn di Flores. Koulali dkk. (2016a), dengan menggunakan pemodelan kinematik menggunakan data vektor kecepatan GPS di wilayah ini menyatakan bahwa perubahan partisi dari konvergensi lempeng Australia disebabkan oleh

pergerakan busur Sunda-Banda yang berrotasi berlawanan arah jarum jam terhadap blok Sunda.

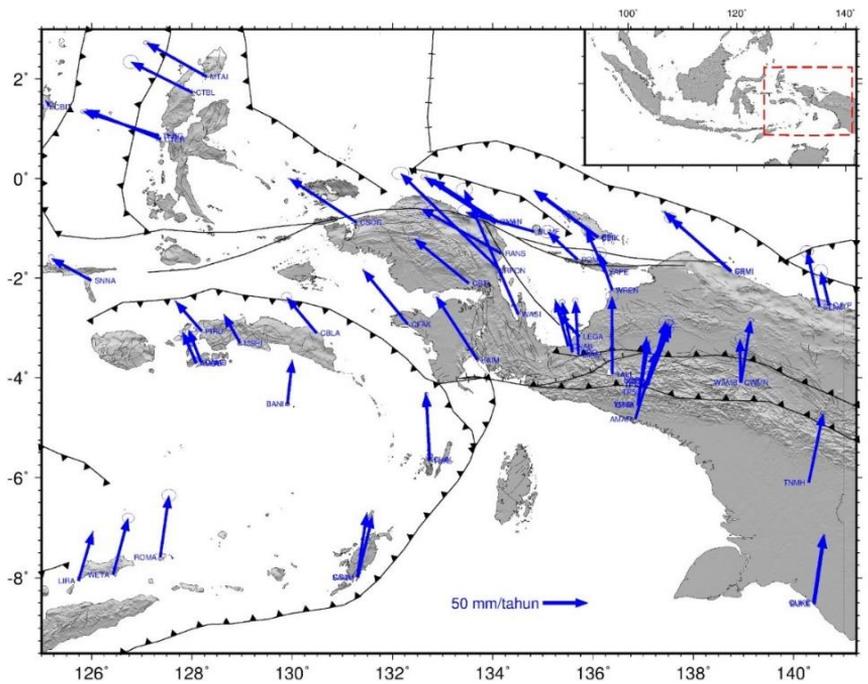
Gambar 2.8 memperlihatkan vektor kecepatan stasiun GPS terhadap Blok Sunda yang diestimasi menggunakan data pengamatan yang lebih panjang dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya. Secara umum, pola vektor kecepatan GPS di wilayah ini memberikan hasil yang sama dengan penelitian terdahulu, yaitu seluruh wilayah berrotasi berlawanan dengan arah jarum jam dengan nilai vektor kecepatan semakin bertambah besar ke arah timur, dari 6,9 mm/thn (CDNP) sampai 68,5 mm/thn (ROMA). Secara umum, bertambahnya nilai vektor kecepatan ke arah utara dari busur depan konsisten dengan konvergensi antara lempeng Australia dan blok Sunda yang secara bertahap mentransfer vektor kecepatan ke arah utara.



Gambar 2.8 Vektor kecepatan pergeseran di wilayah Banda berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b)

Pola vektor kecepatan di daerah Maluku dan Papua menunjukkan dua pola pergerakan yang berbeda (Gambar 2.9), untuk wilayah Maluku (Halmahera) dan kepala burung menunjukkan rotasi berlawanan arah jarum jam, sedangkan pola pergerakan stasiun GPS di timur sesar Tarera Aaduna bergerak searah jarum jam. Hal ini menunjukkan adanya bahwa wilayah kepala burung merupakan suatu blok tersendiri yang terpisah dengan pulau Papua (Bock dkk., 2003). Dua stasiun GPS di barat teluk Cendrawasih (RPON,

WASI) yang merupakan stasiun berkala mempunyai nilai kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan stasiun lainnya, kemungkinan hal ini terjadi karena masih terdapatnya efek deformasi pascaseismik gempa bumi 8 September 2002 dan 10 Oktober 2002 dengan kekuatan 7,6 Mw di daerah Ransiki dan Wasior. Vektor kecepatan stasiun GPS di sebelah selatan pegunungan Jaya Wijaya (high thrust belt (Bock dkk., 2003)) mendeskripsikan pergerakan dari lempeng Australia. Stasiun CUKE (Merauke) bergerak sebesar 75,0 mm/thn terhadap blok Sunda.



Gambar 2.9 Vektor kecepatan pergeseran di Papua berdasarkan pengamatan GPS relatif terhadap Blok Sunda (Susilo dkk., 2016b)

3 METODE GEODETIK UNTUK ESTIMASI SUMBER GEMPA

3.1 Pengamatan Regangan Geodetik untuk Estimasi Sumber Gempa di Wilayah Busur Banda

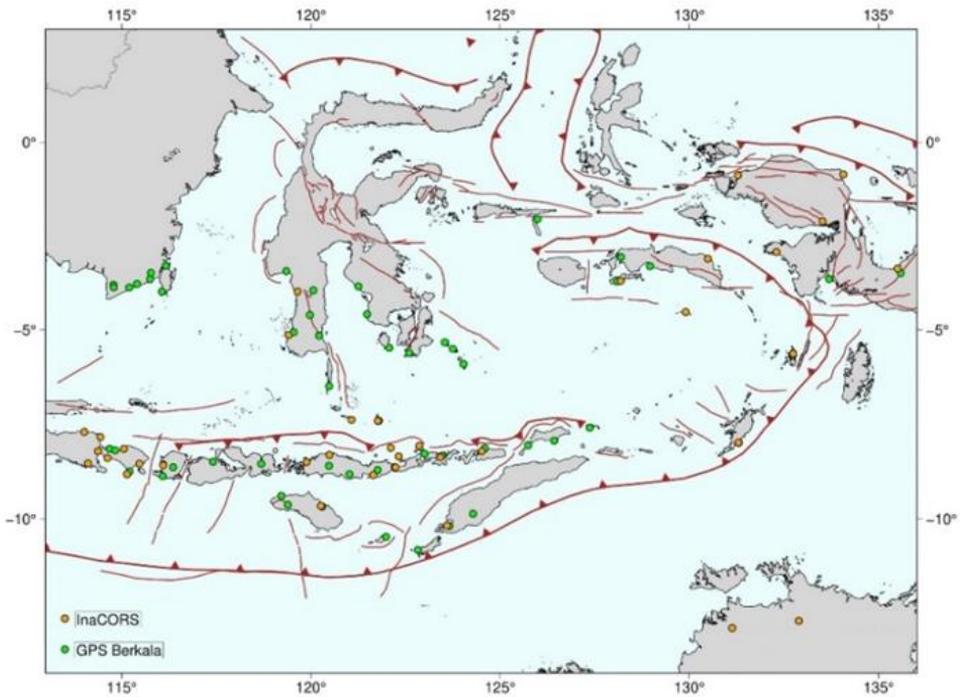
Indonesia bagian Timur terletak di zona tektonik yang kompleks yang diakibatkan oleh pertemuan empat lempeng besar yaitu Blok Sunda (bagian dari Lempeng Benua Eurasia), Lempeng Samudra Australia, Lempeng Samudra Pasifik dan Lempeng Samudra Filipina (Hamilton, 1979; Katili, 1980; Bock dkk., 2003). Pertemuan lempeng-lempeng tersebut menyebabkan wilayah Indonesia Timur memiliki segmen-segmen sesar maupun subduksi yang berpotensi menghasilkan gempabumi (Watkinson dan Hall, 2017; PuSGeN, 2017).

Dalam 10 tahun terakhir, terdapat tiga kejadian gempabumi merusak di wilayah Indonesia Timur yang menelan banyak korban jiwa dan menyebabkan kerugian ekonomi triliunan rupiah. Ketiga gempabumi signifikan tersebut yaitu, Gempabumi Lombok 2018, Gempabumi Palu 2018, dan Gempabumi Ambon 2019. Salah satu contoh kasus pengamatan regangan geodetik untuk estimasi sumber gempa yang dipaparkan dalam buku ini yaitu analisis data geodetik dan seismik untuk memahami potensi gempa di wilayah Busur Banda. Studi ini dipublikasikan pada tahun 2022 (Rahmadani dkk., 2022).

3.1.1 Pengolahan Data GPS dan Estimasi Vektor Kecepatan GPS

Penelitian dalam contoh kasus ini menggunakan data GPS yang dikumpulkan dari 49 stasiun permanen dan 61 stasiun periodik yang tersebar secara memadai di Indonesia Timur, yang disediakan oleh Badan Informasi Geospasial Indonesia (BIG) (<https://srgi.big.go.id>) (Gambar 3.1). Data GPS diolah menggunakan software GAMIT/GLOBK versi 10.7 (Herring dkk., 2018) untuk mendapatkan timeseries koordinat setiap stasiun GPS. Selanjutnya, timeseries GPS yang diperoleh di setiap stasiun diedit dan diperiksa kualitasnya secara visual dan komputasi. Data outlier dihilangkan dengan menetapkan batas dua sigma (2σ) dari rata-rata seluruh data (μ) pada tingkat kepercayaan 95% untuk memperoleh kecepatan interseismik tren linier

koordinat harian. Siklus tahunan dan semi-tahunan yang disebabkan oleh perubahan alat atau gempa bumi (Nicolaidis 2002; Raharja dkk. 2016) diidentifikasi dan dihilangkan dengan menghitung nilai kecepatan interseismik di setiap stasiun GPS.



Gambar 3.1 Distribusi titik GPS, warna oranye adalah stasiun GPS kontinu (InaCORS) dan warna hijau adalah stasiun GPS berkala/episodik. Garis warna merah merupakan sesar aktif, garis warna merah dengan segitiga adalah jalur subduksi.

3.1.2 Estimasi Regangan Geodetik

Analisis regangan yang digunakan dalam contoh kasus ini dilakukan dengan menerapkan metode interpolasi spline pada dua komponen kecepatan, easting dan northing. Nilai turunan dari vektor kecepatan pada setiap komponen easting dan northing dapat dihitung, yang kemudian dapat menghasilkan empat bidang kontinu yang dapat dikombinasikan secara linear untuk merepresentasikan strain rate tensor pada area penelitian. Komponen tensor regangan ϵ dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\epsilon_{ii} = \frac{\delta v_i}{\delta x_i} ; \epsilon_{jj} = \frac{\delta v_j}{\delta x_j} ; \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v_i}{\delta x_j} + \frac{\delta v_j}{\delta x_i} \right) \quad (3.1)$$

dengan i, j merupakan komponen *easting* dan *northing*, v pada titik x . Dengan cara yang serupa, tensor asimetris *rotation rate* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v_i}{\delta x_j} + \frac{\delta v_j}{\delta x_i} \right) \quad (3.2)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\varepsilon_{ii} + \varepsilon_{jj}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{ii} - \varepsilon_{jj}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{ij}^2}; \text{ di mana } \lambda_{1>0}, \lambda_{1>} \lambda_2 \quad (3.3)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (3.4)$$

Nilai *eigenvalues* (λ_1 dan λ_2) mewakili magnitudo dari regangan, dengan nilai positif untuk ekstensi dan negatif untuk kompresi/*shortening*, sedangkan θ merupakan arah dari tensor regangan.

3.1.3 Rasio Laju Momen Geodetik dan Momen Seismik

Untuk melihat apakah perbandingan antara laju momen geodetik dan seismik bergantung pada metode konversi yang digunakan, setiap perhitungan laju momen, baik geodetik dan seismik, dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan yaitu Ward (1994) serta Savage dan Simpson (1997) untuk perhitungan laju momen geodetik; Molnar (1979) serta Hyndman dan Weichert (1983) untuk perhitungan laju momen seismik.

a. Pendefinisian Zona Seismogenik

Pada penelitian ini, wilayah studi dibagi menjadi lima segmen berdasarkan tatanan geologi dan tektonik, distribusi spasial seismisitas historis dan instrumental, solusi mekanisme fokus dan gaya sesar terkait. Untuk mendukung pendefinisian segmentasi wilayah, sebaran stasiun GPS serta pola vektor kecepatannya juga digunakan untuk mempertimbangkan pembagian zona seismogenik. Selain itu, pembagian zona seismogenik ini juga mempertimbangkan hasil penelitian terdahulu terkait pendefinisian blok tektonik (Argus dkk., 2011; Koulali dkk., 2016; Susilo dkk., 2016a). Zona seismogenik dilambangkan dengan BAND, BRHD, SSUL, SUMB, dan TIMO, yang masing-masing mewakili wilayah Laut Banda, Kepala Burung-Papua, Sulawesi Selatan, Sumba, dan Timor.

b. Estimasi Laju Momen Geodetik

Pada contoh kasus ini, hasil estimasi regangan geodetik dianalisis lebih lanjut dan nantinya akan digabungkan dengan hasil analisis data seismik untuk memahami laju potensi gempa saat ini di wilayah Busur Banda. Untuk membandingkan distribusi spasial laju momen geodetik dan seismik secara konsisten, wilayah studi dibagi menjadi beberapa zona seismogenik. Kemudian, nilai laju regangan yang diperoleh pada tahap sebelumnya dikonversi menjadi laju momen geodetik. Konversi laju regangan menjadi laju momen geodetik dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu dengan persamaan (5) dari Ward (1994) dan persamaan (6) dari Savage dan Simpson (1997). Pada umumnya kedua pendekatan ini menjumlahkan nilai eigen terbesar dari tensor laju regangan di setiap zona yang telah diperoleh dari analisis regangan pada tahap sebelumnya. Kemudian jumlah nilai eigen regangan di setiap zona diintegrasikan dengan variabel rigiditas, kedalaman lapisan seismogenik, serta luas zona seismogenik, sehingga diperoleh laju momen geodetik di setiap zona.

$$\overline{M_{0g}} = 2 \mu H A \sum_{i=1}^n \text{Max} (|\dot{\epsilon}_1|, |\dot{\epsilon}_2|) \quad (3.5)$$

$$\overline{M_{0g}} = 2 \mu H A [\text{Max} (|\dot{\epsilon}_1|, |\dot{\epsilon}_2|, |\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2|)] \quad (3.6)$$

di mana $\overline{M_{0g}}$ adalah laju momen geodetik, μ adalah nilai rigiditas, H adalah kedalaman lapisan seismogenik, A merupakan luas permukaan zona seismogenik, dan $\dot{\epsilon}_1$ dan $\dot{\epsilon}_2$ adalah nilai absolut eigen dari tensor laju regangan yang mewakili semua sel grid dalam setiap zona seismogenik. Nilai $\mu = 3,5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ (Kreemer dan Holt, 2000).

c. Estimasi Laju Momen Seismik

Laju momen seismik $\overline{M_{0s}}$ diestimasi dengan mengakumulasi momen gempa dalam setiap zona seismogenik dari skenario katalog gempabumi yang sudah dianalisis terlebih dahulu. Selanjutnya, besaran momen gempa (M_w) dari katalog diubah menjadi laju momen seismik skalar (M_0) dengan menggunakan rumus konversi Hanks dan Kanamori (1979). Kemudian, laju momen seismik dihitung dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu persamaan dari Molnar (1979), serta persamaan dari Hyndman dan Weichert (1983), sebagai berikut:

$$\overline{M}_{0s} = \frac{A}{1-B} M_{0max}^{1-B}; B = \frac{b}{c}; C = 10^{(a+\frac{bd}{c})} \quad (3.7)$$

$$\overline{M}_{0s} = \varphi \frac{b}{c-b} 10^{[(c-b)M_{max}+a+d]} \quad (3.8)$$

di mana M_{0max} adalah momen gempa maksimum yang dapat terjadi dalam setiap zona seismogenik, yang didefinisikan berdasarkan perhitungan M_{max} oleh PuSGeN (2017) atau historis M_{max} dari Katalog Utsu (Utsu 2002). φ (nilai konstanta 1,27) merupakan sebuah koreksi untuk hubungan magnitudo-momen stokastik. Selanjutnya, a dan b konstanta yang secara berturut-turut menunjukkan tingkat seismisitas pada suatu area kemiringan kurva frekuensi magnitudo pada hubungan empiris Gutenberg-Ritcher: $\log N(M) = a - bM$, di mana $N(M)$ adalah frekuensi kumulatif gempabumi dengan magnitudo lebih besar atau sama dengan M ; $c = 1,5$ dan $d = 9,1$ adalah konstanta yang didapatkan dari persamaan Kanamori (1977).

d. *Kompilasi Katalog Gempabumi*

Data utama yang diperlukan dalam perhitungan laju momen seismik adalah katalog gempabumi. Penelitian ini mengumpulkan beberapa katalog gempabumi yang disediakan oleh beberapa institusi dan juga peneliti terdahulu. Kompilasi katalog gempabumi dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kompilasi data katalog gempabumi.

No.	Sumber katalog gempabumi	Range data katalog	Jumlah kejadian gempabumi	Status katalog
1.	Supendi dkk., 2020	17/04/2009-21/11/2018	13.398	Regional - sudah direlokasi
2.	BMKG	19/04/2009-31/12/2018	29.174	Regional - belum direlokasi
3.	EHB-ISC	23/04/1964-13/12/2008	2.414	Global - sudah direlokasi
4.	USGS	29/09/1905-19/04/2009	3.229	Global - belum direlokasi

e. *Analisis Parameter Seismisitas Berdasarkan Hukum Gutenberg-Richter*

Parameter seismisitas terdiri atas keaktifan seismik (*a-value*) dan tingkat kerapuhan batuan (*b-value*), serta kelengkapan magnitudo (*magnitude of completeness/Mc*) (Harlianto & Muhamad, 2018). Metode Gutenberg-Richter (1944) digunakan untuk menentukan nilai dari parameter seismisitas suatu

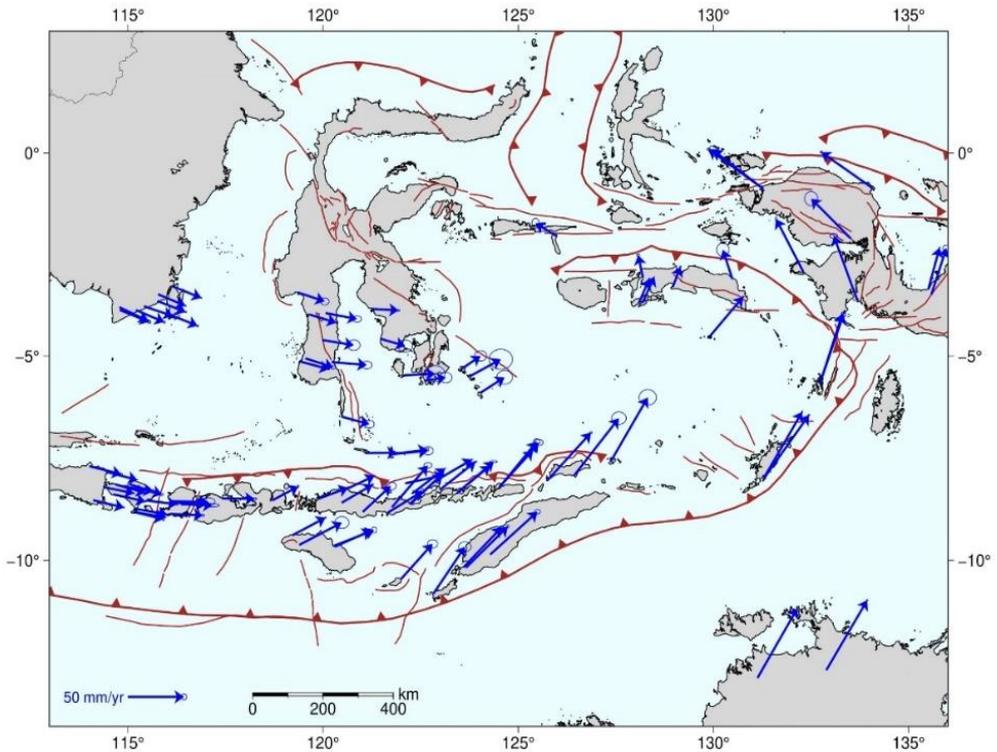
wilayah yang telah disebutkan sebelumnya. Persamaan Gutenberg-Richter menyatakan bahwa frekuensi gempa bumi (N) merupakan karakteristik basis dari aktifitas seismik di suatu daerah selama selang waktu tertentu. Di mana frekuensi terjadinya gempa dengan magnitudo $M \geq m$ persatuan waktu, menurun secara eksponensial berbanding lurus dengan meningkatnya magnitudo gempa (M), atau sering disebut dengan *Frequency Magnitude Distribution* (FMD). Sedangkan untuk menghitung nilai parameter seismisitas (nilai a dan b) di suatu wilayah menggunakan fungsi *likelihood* berdasarkan persamaan Gutenberg-Richter (Pasau dkk., 2017).

$$\log N(M) = a - bM \quad (3.9)$$

Sedangkan M_c ditentukan dengan mengestimasi titik yang mulai menyimpang dari tren Gutenberg-Richter. Hal ini bertujuan untuk membatasi FMD agar sesuai dengan hukum Gutenberg-Richter. FMD yang terletak di bawah M_c harus dihilangkan untuk mendapatkan kemiringan yang lebih baik.

3.1.4 Hasil Vektor Kecepatan GPS

Kecepatan horizontal stasiun pengamatan dihitung pada komponen easting dan northing diestimasi dalam referensi ITRF2008. Nilai kecepatan stasiun pengamatan GPS di Indonesia Timur sangat bervariasi, yaitu dalam rentang $(-87,32) - 18,05$ mm/tahun dan $0,13 - 81,92$ mm/tahun masing-masing untuk komponen easting dan northing berturut-turut (Gambar 3.2). Secara umum, pola vektor kecepatan GPS di wilayah Indonesia Timur berotasi berlawanan dengan arah jarum jam dengan nilai vektor kecepatan semakin bertambah besar ke arah timur. Selain itu, terlihat juga bahwa nilai vektor kecepatan dari busur depan semakin besar ke arah utara, hal ini konsisten dengan konvergensi antara lempeng Indo-Australia dan blok Sunda yang secara bertahap mentransfer vektor kecepatan ke arah utara (Koulali dkk., 2016). Vektor kecepatan di bagian utara Papua Barat cenderung bergerak ke arah barat laut, hal ini disebabkan adanya dorongan dari Lempeng Pasifik ke wilayah Indonesia Timur dalam arah barat.



Gambar 3.2 Vektor kecepatan GPS di wilayah Busur Banda dalam ITRF 2008.

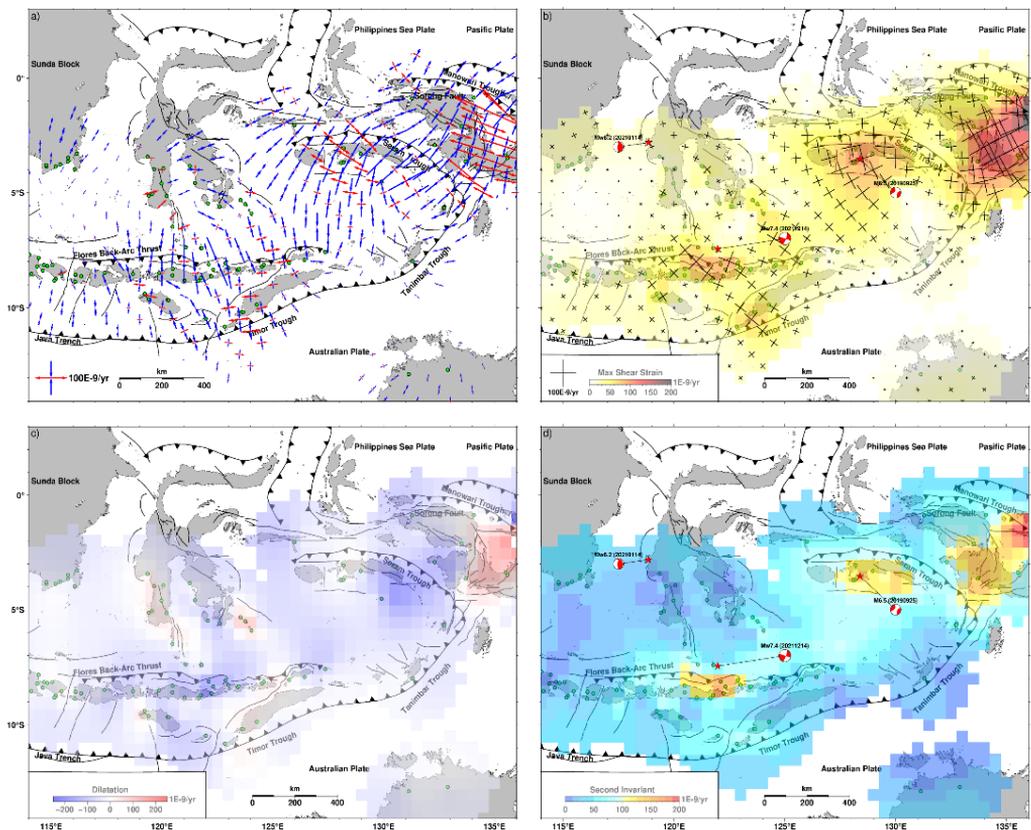
3.1.5 Hasil Regangan Geodetik

Analisis strain pada contoh kasus ini mencakup empat produk turunannya, yaitu: principal strain rate, maximum shear strain rate, dilatation rate, dan second invariant rate (Gambar 3.3). Analisis regangan yang kontinu dapat memberikan informasi mengenai aktivitas deformasi yang terjadi pada suatu wilayah. Maximum shear strain rate dapat mengidentifikasi area yang mempunyai sesar geser (strike slip), dilatation rate dapat mengidentifikasi area yang terdapat sesar naik/turun (thrust/normal), second invariant rate dapat mengidentifikasi besarnya regangan pada suatu area.

a. *Principal Strain Rate*

Estimasi pola dan nilai *principal strain rate* dapat dilihat pada Gambar 3.3a. Pada Gambar 3.3a terlihat bahwa nilai *strain* di daerah Papua Barat (*Bird's head*) lebih besar dibanding area Banda dan Nusa Tenggara. Pola ekstensi mendominasi area di sekitar Nabire hingga ke arah selatannya (>100 *nanostain*/tahun). Sedangkan, pola kompresi terlihat dominan di bagian

tengah dari Kepulauan Banda dan utara Nusa Tenggara dan utara Pulau Seram (<100 *nanostrain*/tahun). Sementara pada zona pertemuan lempeng di selatan Nusa Tenggara nilai regangan yang dihasilkan sangat kecil (<100 *nanostrain*/tahun). Nilai regangan yang sangat kecil juga terlihat di wilayah antara Pulau Kalimantan dan Sulawesi, serta di utara Australia. Hal ini mengindikasikan daerah tersebut merupakan satu area blok tektonik (Koulali dkk., 2016; Yong dkk., 2017). Nilai ekstensi dan kompresi di wilayah Indonesia Timur bervariasi mulai dari 65 – 330 *nanostrain*/tahun dan (-299) – (-3) *nanostrain*/tahun, berturut-turut.



Gambar 3.3 Analisis regangan geodetik wilayah Busur Banda. (a) Principal strain rate, warna merah menandakan ekstensi dan biru menggambarkan kompresi. (b) Maximum shear strain rate, cross hitam merupakan besaran dan arah maximum shear strain rate. (c) *Dilatation rate*, warna merah menandakan ekstensi (nilai positif) dan biru menggambarkan kompresi (nilai negatif). (d) *Second invariant rate*. Mekanisme fokus menunjukkan gempa bumi signifikan yang terjadi pada kurun waktu 2018-2021, dari data katalog *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT). Garis warna hitam merupakan sesar aktif, garis warna hitam dengan segitiga adalah jalur subduksi. Lingkaran hijau merupakan titik GPS yang digunakan dalam penelitian ini.

b. Maximum Shear Strain Rate

Gambar 3.3b memperlihatkan pola *maximum shear strain rate* di wilayah Busur Banda. Rentang nilai *maximum shear strain* yaitu 0-250 nanostrain/tahun. Dari pola *maximum shear strain*, area yang mengalami *shear* paling besar adalah di sekitar Teluk Cendrawasih dan Kota Nabire di Papua (~250 nanostrain/tahun). Fakta ini sejalan dengan pemetaan sumber gempa oleh Pusat Studi Gempa Nasional (2017) yang mengestimasi di daerah tersebut terdapat beberapa sesar geser (*strike-slip*) dengan nilai *slip rate* 17-35 mm/tahun, yaitu Sesar Cendrawasih, Sesar Randawa, dan Sesar Wapoga. Selain itu daerah Timika, Ambon, dan Bima mengalami *shear* dengan nilai ~150 nanostrain/tahun. Nilai *shear* yang cukup signifikan pada daerah Ambon diperkirakan menjadi salah satu penyebab terjadinya gempa sesar geser M6,5 pada bulan September 2019. Pola yang cukup unik terjadi di daerah Utara Pulau Flores. Meskipun pada daerah tersebut terdapat struktur sesar naik *Flores Back arc Thrust*, namun nilai *shear strain*-nya terbilang cukup besar ~100 nanostrain/tahun.

c. Dilatation Rate

Analisis selanjutnya dari tensor kecepatan regangan adalah *dilatation rate*, yaitu dengan menjumlahkan elemen diagonal dari tensornya, sehingga menghasilkan tingkat perubahan relatif dari area yang terdeformasi (volume dalam 3-D). Lebih lanjut analisis ini juga memungkinkan untuk mengidentifikasi daerah kompresi atau ekstensi. Gambar 3.3c memperlihatkan pola *dilatation rate* di wilayah Busur Banda. Rentang *dilatation rate* yaitu -200 s.d. 250 nanostrain/tahun. Warna merah menunjukkan area yang mengalami ekstensi, sedangkan warna biru menunjukkan area yang mengalami *shortening*.

Dari pola *dilatation* yang dihasilkan, wilayah Busur Banda mengalami deformasi yang cukup signifikan dan bervariasi. Wilayah Laut Banda dan Nusa Tenggara dominan mengalami *shortening*, hal ini sejalan membuktikan bahwa mekanisme deformasi yang terjadi di wilayah tersebut adalah dominan akibat patahan naik (*thrust fault*). Pola *shortening* yang besar juga terlihat dengan jelas di utara Pulau Flores. Hal ini juga membuktikan bahwa pada daerah tersebut sedang terjadi akumulasi energi yang cukup signifikan untuk menghasilkan gempabumi di masa yang akan datang. Selain itu pola ekstensi yang besar di daerah Leher Burung (Teluk Cendrawasih) Papua, juga dapat membuktikan bahwa di daerah tersebut terdapat struktur sesar geser. Area

dengan nilai *dilatation rate* bernilai positif yang tinggi ($\sim |300|$ nanostrain/tahun) secara umum terdapat di sekitar kota Sorong dan Nabire di Papua Barat dan Flores di Nusa Tenggara.

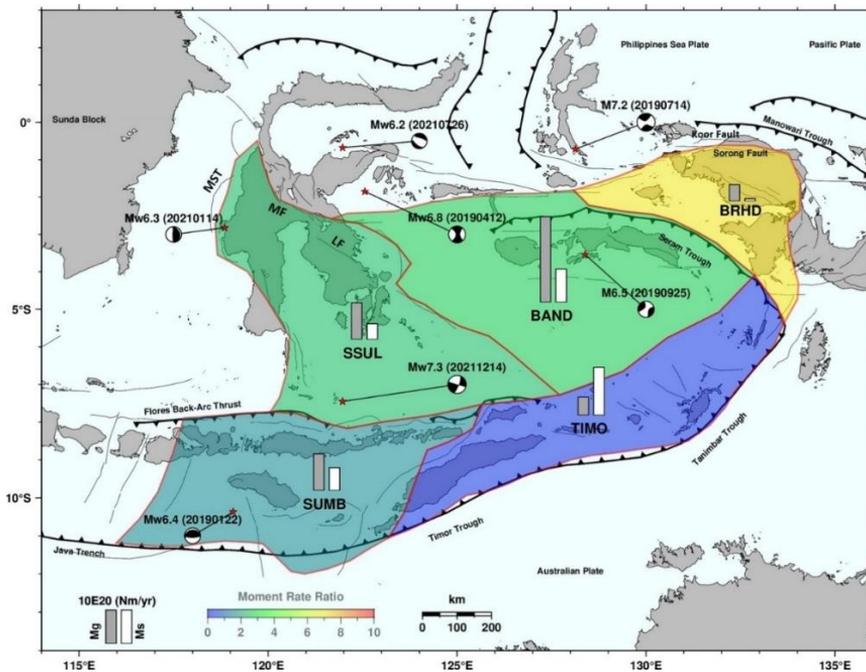
d. Second Invariant Rate

Gambar 3.3d memperlihatkan analisis *second invariant rate* wilayah Busur Banda. *Second invariant* mempresentasikan besarnya regangan (magnitudo) di wilayah tersebut. Terlihat bahwa semakin ke arah Timur, magnitudo regangan semakin besar, dengan rentang 0-200 nanostrain/tahun. Hal serupa seperti pola-pola regangan sebelumnya terlihat pada daerah Utara Flores, Laut Banda, Nabire dan Kaimana (Leher Burung) Papua, dan Teluk Cendrawasih. Pada daerah tersebut terdapat nilai magnitudo regangan paling besar di wilayah Indonesia Timur (> 100 nanostrain/tahun).

3.1.6 Hasil Rasio Laju Momen Geodetik dan Seismik

Analisis perbandingan kuantifikasi data geodetik dan seismik disajikan sebagai rasio laju momen geodetik terhadap laju momen seismik, seperti yang disajikan pada Tabel 3.2 dan Gambar 3.4. Berdasarkan analisis ini, zona BAND memiliki nilai paling tinggi untuk laju momen geodetik dan seismik, yaitu sekitar 2 sampai 10 kali lebih tinggi dari laju momen zona lainnya. Hal ini berarti wilayah tersebut mengalami aktivitas seismik dengan frekuensi yang lebih sering dan diiringi dengan aktivitas deformasi yang tinggi. BAND dan SSUL menunjukkan rasio laju momen yang signifikan, yaitu dengan rasio > 2 . Sedangkan, perbandingan laju momen yang hampir sama besar terlihat di zona SUMB, dengan rasio laju momen sekitar 1. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas seismik hampir sepenuhnya melepaskan akumulasi energi yang terjadi di zona tersebut.

Sebaliknya, BRHD memiliki rasio laju momen yang paling tinggi, dengan laju momen geodetik tujuh kali lebih besar daripada laju momen seismik. Perbandingan ini secara umum menunjukkan beberapa hal, yaitu: daerah tersebut masih mengumpulkan anggaran energi yang dibutuhkan untuk dikeluarkan oleh kegiatan seismik; belum pernah mengalami gempa bumi besar selama beberapa abad terakhir; adanya *under-sampling* gempa bumi jangka panjang (*long term seismic*) pada katalog seismik yang digunakan; adanya aktivitas deformasi aseismik; atau kombinasi dari faktor-faktor di atas.



Gambar 3.4 Rasio laju momen geodetik dan seismik. Mekanisme fokal menunjukkan gempa bumi signifikan yang terjadi pada kurun waktu 2018-2021. Garis warna hitam merupakan sesar aktif, garis warna hitam dengan segitiga adalah jalur subduksi

Tabel 3.2 Rasio laju momen geodetik dan seismik berdasarkan metode Ward (1994) dan Molnar (1979), beserta dengan parameter lainnya.

Zona	H (km)	Luas ($\times 10^8$ km ²)	<i>a</i> -value	<i>b</i> -value	Mc	Mmax Historis	\overline{M}_{0g} ($\times 10^{20}$ Nm/th)	\overline{M}_{0s} ($\times 10^{20}$ Nm/th)
BAND	25	4,1	7,328	1,02±0,06	4,9	8,5 (1/2/1938)	25,97	10,07
BRHD	30	1,5	8,726	1,39±0,16	4,9	7,7 (10/10/2002)	4,84	0,69
SSUL	24	3,6	5,217	0,69±0,02	3,5	7,5 (19/12/1820)	10,60	4,567
SUMB	25	3,1	7,594	1,05±0,06	4,9	7,9 (9/8/1977)	10,57	6,56
TIMO	24	2,7	5,842	0,78±0,05	4,6	8,2 (4/11/1963)	5,53	14,61

Rasio yang signifikan antar laju momen dapat diamati pada zona TIMO yang mempunyai rasio laju momen < 1. Laju momen seismik pada zona ini sekitar dua kali lebih tinggi dari akumulasi momen geodetik. Beberapa penjelasan relatif untuk fenomena ini adalah karena kurang meratanya distribusi data geodetik di wilayah tersebut, dan/atau deformasi kerak terukur yang dilepaskan oleh beberapa peristiwa dangkal sedang hingga besar pada kedalaman < 40 km. Salah satu kejadian gempa bumi di wilayah ini adalah gempa bumi Flores berkekuatan 7,8 pada 12 Desember 1992, yang diikuti oleh tsunami 2,5-3,2 meter di atas permukaan laut, yang menyebabkan 87 korban jiwa dan 1400 kematian (Tsuji dkk., 1995). Alasan lain yang mungkin mengapa

TIMO memiliki rasio laju momen terendah adalah bahwa kecepatan pergerakan kerak bumi relatif di wilayah ini secara bertahap menurun di sepanjang Timor *trough* dan Tanimbar *trough*, yaitu dari nilai $32 \pm 2,0$ mm/tahun di bagian barat menjadi $1,0 \pm 1,7$ mm/tahun di bagian timur (Koulali dkk., 2016). Penurunan kecepatan ini juga terkait dengan subduksi busur benua di bawah Timor *trough* dan Tanimbar *trough*, yang digambarkan oleh akumulasi regangan yang rendah di zona ini (Gambar 3.3a).

3.1.7 Potensi Gempabumi di Wilayah Busur Banda

Tujuan utama dalam contoh kasus ini adalah untuk mengestimasi potensi gempabumi di wilayah Indonesia Timur, khususnya Busur Banda. Oleh karena itu, studi ini juga mengevaluasi defisit momen dengan mengurangi laju momen geodetik dari laju momen seismik di setiap zona seismogenik (Ward 1998; Li dkk., 2018; Sharma dkk., 2020). Dengan mempertimbangkan hipotesis bahwa tingkat defisit momen total adalah potensi gempa yang akan dilepaskan sebagai satu atau lebih gempa di masa depan, kami mengestimasi magnitudo maksimum yang diperlukan untuk aktivitas seismik untuk sepenuhnya memenuhi perbedaan antara tingkat momen geodetik dan seismik (Chousianitis dkk., 2015; Bungum dkk., 2017; Sharma dkk., 2020).

Hasil ini menunjukkan potensi gempabumi signifikan di masa depan dengan magnitudo maksimum masing-masing setara dengan M_w 8,1 dan M_w 7,8 di zona BAND dan SSUL, berturut-turut dan M_w 7,7 di zona BRHD dan SUMB. Kami menemukan bukti potensi gempa pada peristiwa Gempa 6,5 M_w Ambon 2019, yang terjadi di dalam area BAND. Peristiwa ini diikuti oleh ratusan gempa susulan dengan magnitudo $ML < 5$ pada kedalaman < 30 km (Meilano dkk., 2021). Potensi gempabumi SSUL juga baru-baru ini dibuktikan dengan terjadinya dua gempabumi besar yang terjadi di Mamuju-Majene (M_w 6,2) dan Nusa Tenggara Timur (M_w 7,4) pada tahun 2021. Episenter dari kedua gempabumi tersebut terletak tepat di atas area yang mempunyai laju regangan tinggi, seperti yang terlihat pada peta laju *second invariant* (Gambar 3.3d). Selanjutnya, mekanisme fokus Gempa Nusa Tenggara Timur 2021 adalah *left-lateral strike-slip* (USGS); namun, tidak satu pun dari sumbernya telah diidentifikasi dalam penelitian sebelumnya. Laju *maximum shear strain* dan laju *second invariant* di area sekitar episenter gempabumi tersebut menunjukkan nilai yang tinggi, hal ini membuktikan keberadaan sesar

mendatar pada arah NW-SE (lihat Gambar 3.3b dan 3.3d) yang belum dipetakan.

Rasio laju momen yang tinggi di zona BRHD, BAND, dan SSUL, juga telah terbukti dengan keberadaan sesar-sesar aktif yang telah teridentifikasi (Irsyam dkk., 2020), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 yang mengarah pada implikasi bahaya seismik. Setidaknya ada tiga sumber gempa besar di BRHD, yaitu Sesar Sorong (1,5-15 mm/tahun), Sesar Koor (1-3 mm/tahun), dan Manokwari *Thrust* (10 mm/tahun). Seram *Trough* dan Sesar Geser Seram di BAND memiliki *slip rate* masing-masing 5 mm/tahun dan 15 mm/tahun. Di SSUL terdapat empat sesar aktif, antara lain Sesar Matano (7 mm/tahun), Makassar *Strait Thrust* (2 mm/tahun), Sesar Walanae (0,5 mm/tahun), dan Sesar Lawanopo (0,1 mm/tahun).

3.2 Karakteristik Sumber Gempa Ambon 2019

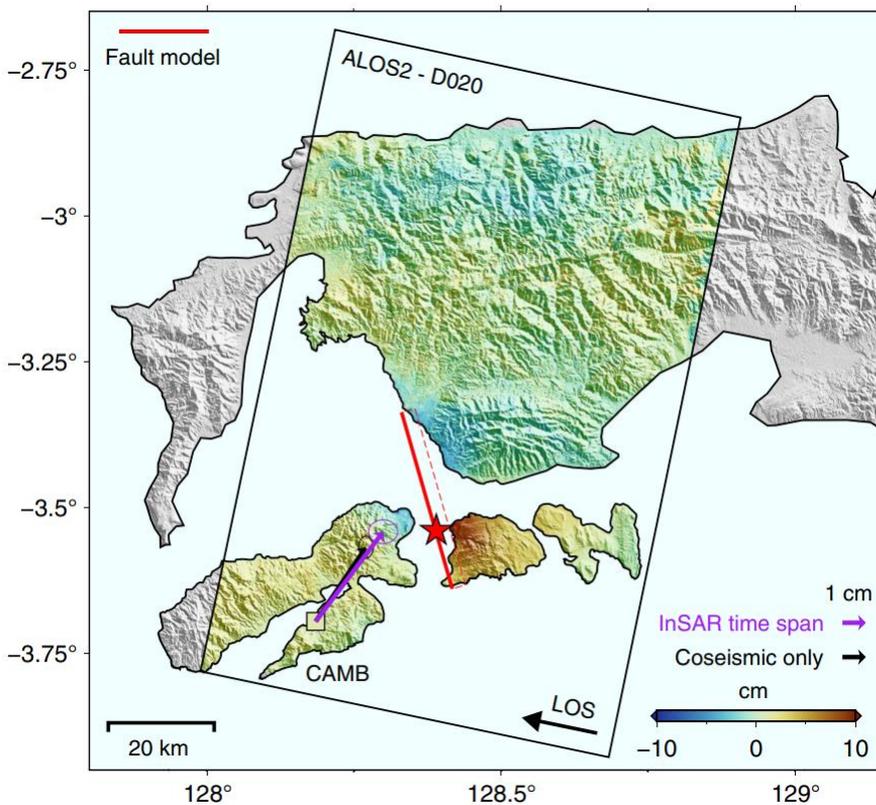
Contoh kasus selanjutnya dalam pengamatan regangan geodetik untuk estimasi sumber gempa yakni berdasarkan hasil yang dipublikasikan tahun 2021 (Meilano dkk. 2021) yang menginvestigasi karakteristik sumber gempa Ambon yang terjadi pada 26 September 2019. Gempa ini merupakan peristiwa gempabumi pertama dengan magnitudo lebih dari 6 yang tercatat secara instrumental di dekat Kota Ambon. Gempa tersebut menewaskan 41 orang dan merusak ribuan rumah serta fasilitas umum. Lokasi sumber gempa diperkirakan terletak antara Pulau Ambon dan Pulau Haruku, mengindikasikan gempa terjadi pada sesar aktif yang belum dipetakan. Selain itu, solusi momen tensor menunjukkan kompleksitas sumber gempa dengan adanya dua atau lebih subkejadian.

Pada contoh kasus ini digunakan data seismik, GPS, dan InSAR untuk mengeksplorasi karakteristik sumber gempa Ambon. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa proses gempa terjadi secara kompleks baik dalam tahap inisiasi maupun arah gesernya. Hasil model distribusi pergeseran koseismik menunjukkan bahwa pergeseran saat gempa sebagian besar terjadi dalam komponen *strike-slip* dengan tambahan komponen *normal* dan *reverse* pada bagian utara sesar (Gambar 3.5 dan 3.6).

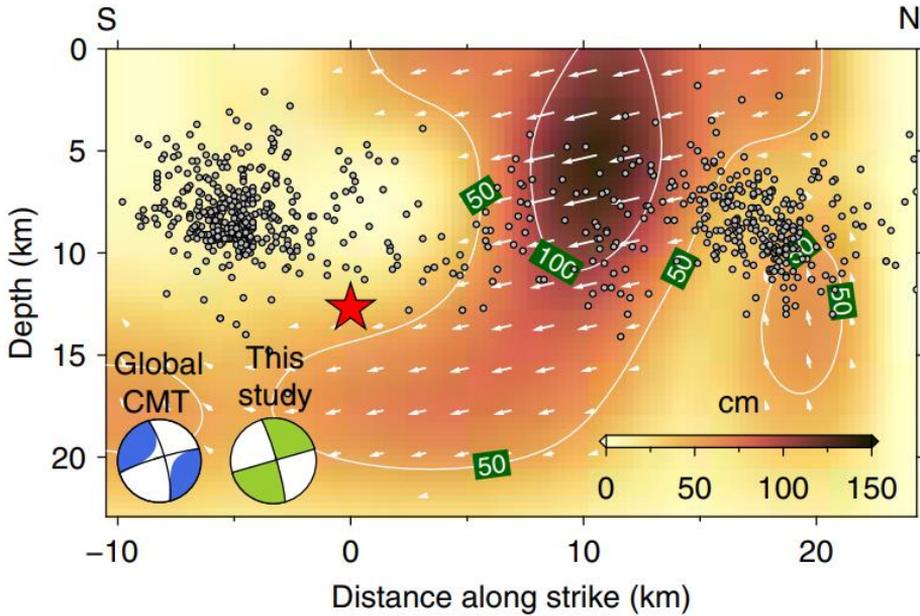
Sementara itu, estimasi laju geser yang dihasilkan untuk sesar penyebab gempa Ambon 2019 yakni sebesar 4,9 [4,0, 5,5] mm/tahun (Gambar 3.7). Maka

berdasarkan panjang sesar yakni sekitar 34 km, kedalaman seismogenik sebesar 11 km, dan laju pergeseran yang diestimasi serta ketidakpastiannya, estimasi periode ulang gempa untuk sesar ini yakni sekitar 115 [102, 141] tahun.

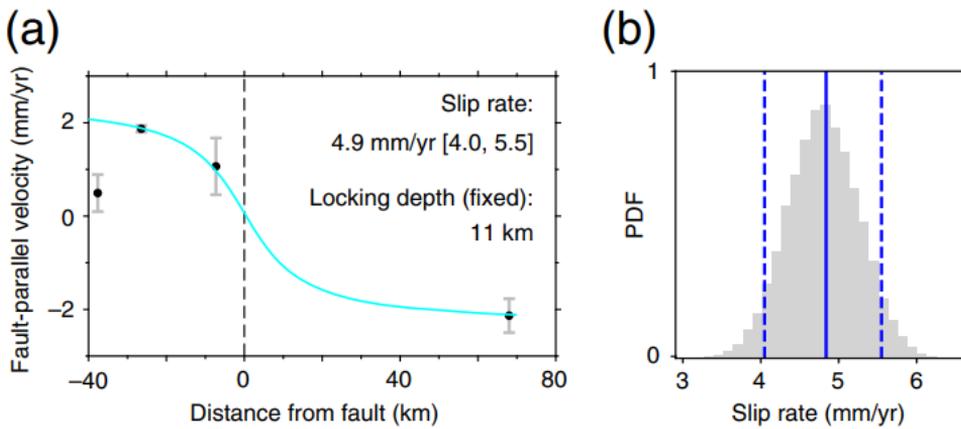
Selain itu, perbandingan laju regangan horizontal menunjukkan bahwa Ambon dan daerah sekitarnya memiliki tingkat akumulasi regangan yang tinggi, sesuai dengan distribusi gempa $M_w \geq 6$ (Gambar 3.8). Hal ini menunjukkan bahwa wilayah tersebut aktif secara seismik dan dapat mengalami lebih banyak gempabumi tipe gempa Ambon 2019 di masa yang akan datang.



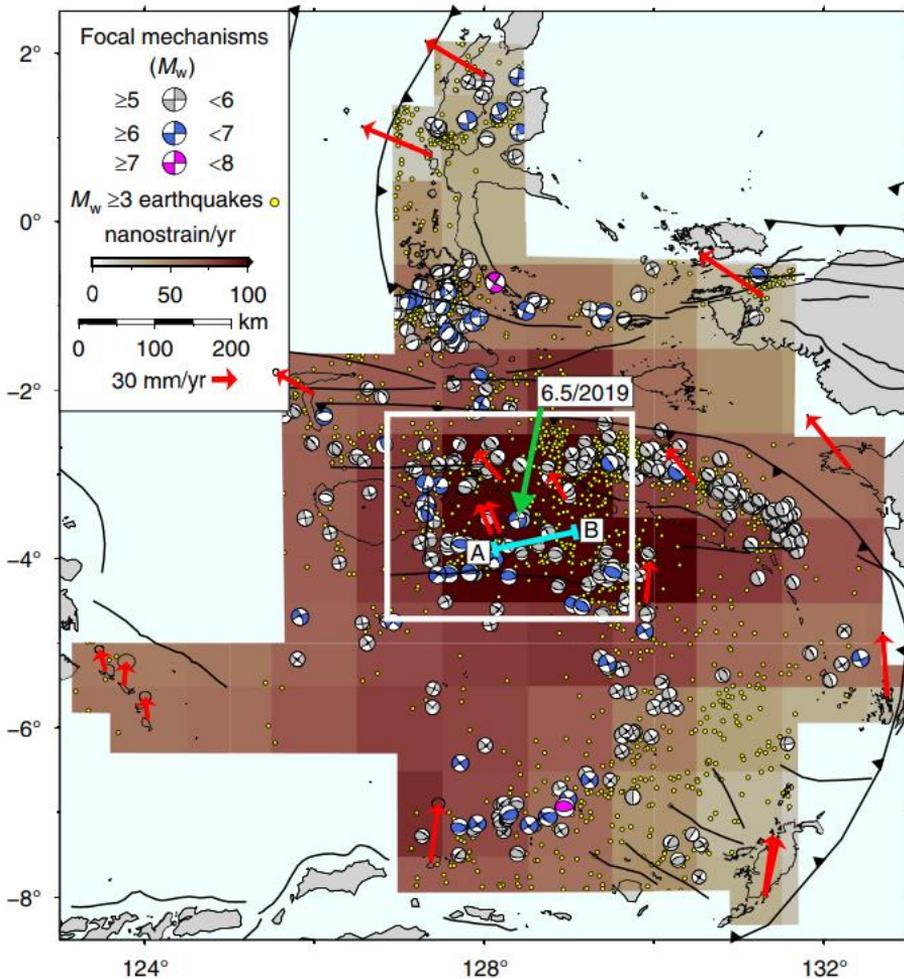
Gambar 3.5 Perpindahan koseismik dari Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) dan dari data Global Positioning System (GPS). Nilai positif mewakili pergeseran garis pandang (LoS) menuju satelit. Vektor hitam adalah pergeseran berdasarkan data GPS 15 hari sebelum peristiwa dan satu hari setelah peristiwa. Vektor ungu adalah total pergeseran selama rentang waktu data InSAR (termasuk pergeseran permukaan empat hari setelah gempa). Ellips ketidakpastian mewakili tingkat kepercayaan 95%. Persegi berwarna melambangkan vektor GPS ungu yang diproyeksikan ke arah pandang satelit. Garis merah melambangkan model sesar hasil inversi.



Gambar 3.6 Hasil model pergeseran koseismik menunjukkan bahwa pergeseran saat gempa sebagian besar terjadi dalam komponen strike-slip dengan komponen normal dan reverse pada bagian utara sesar



Gambar 3.7 (a) Kecepatan GPS sejajar sesar (titik-titik hitam) dan model sintesis (garis cyan) berdasarkan laju pergeseran yang diestimasi dan locking depth sesar. (b) Fungsi distribusi probabilitas posterior (PDF, probability distribution function) dari laju pergeseran berdasarkan locking depth yang ditetapkan pada 11 km. Solusi untuk laju pergeseran didasarkan pada nilai maksimum a posteriori (MAP) dari PDF yang digambarkan sebagai garis vertikal solid dengan interval kepercayaan 95% digambarkan sebagai garis putus-putus.



Gambar 3.8 Warna grid menunjukkan nilai invarian kedua dari tensor laju regangan horizontal yang diturunkan dari kecepatan GPS regional (vektor merah) dengan mengacu pada kerangka referensi Sunda. Lingkaran kuning melambangkan gempa bumi dengan kedalaman <30 km selama periode 1973–2009 (katalog USGS) dan 2009–2018 (Supendi dkk., 2020). Mekanisme focal berasal dari katalog Global CMT (Dziewonski dkk., 1981; Ekström dkk., 2012). Garis hitam adalah sesar yang teridentifikasi (Irsyam dkk. 2020). Garis cyan mewakili profil GPS dari timur ke barat yang digunakan untuk menghitung laju pergeseran dan *locking depth* sesar.

3.3 Estimasi Sumber Gempa Mamuju dari Data Geodetik

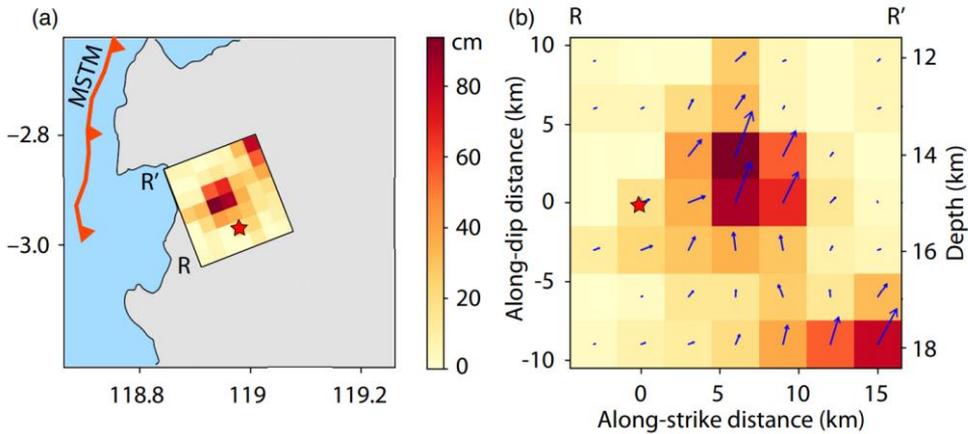
Pada contoh kasus berikutnya dilakukan pengamatan regangan geodetik untuk estimasi sumber gempa berkekuatan 6,2 Mw yang terjadi pada tanggal 15 Januari 2021 di wilayah Mamuju dan Majene di Sulawesi Barat. Tragedi ini menelan korban lebih dari 100 jiwa, mengakibatkan lebih dari 30.000 orang

kehilangan tempat tinggal, dan merusak hampir 8000 bangunan dalam radius sekitar 30 km dari pusat gempa utama. Gempa ini disebabkan oleh aktivitas sesar yang melintasi Patahan Selat Makassar (MST, *Makassar Strait Thrust*) di lepas pantai Sulawesi Barat (Supendi dkk., 2021) yang bahayanya masih kurang dipahami.

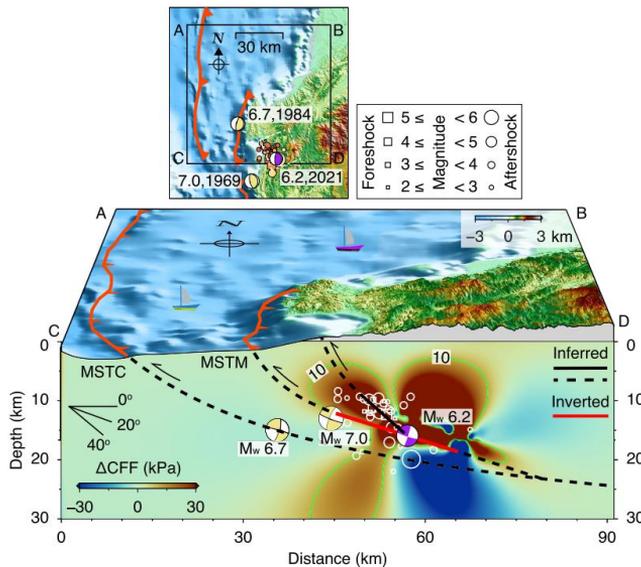
Pada hasil yang dipublikasikan tahun 2023 (Meilano dkk., 2023) dilakukan pengkajian karakteristik sumber gempa utama dari kejadian ini menggunakan data seismik dan GPS. Hasil temuan studi tersebut menunjukkan bahwa gempa utama menggeser satu segmen dari MSTM (*Makassar Strait Thrust-Mamuju*), di mana pergeseran koseismik utamanya terjadi pada kedalaman lebih dari 12 km (Gambar 3.9) dan tidak menggeser bagian dangkal dari MSTM (Gambar 3.10). Hal ini menandakan peristiwa gempa Mamuju hanya menggeser segmen ini secara parsial.

Sementara itu, hasil analisis perhitungan *Coulomb stress* memberikan dua implikasi. Pertama, perubahan *stress* bernilai positif yang diakibatkan oleh gempa utama menyebabkan aktivasi struktur sesar sekunder. Kedua, bagian *updip* dari MSTM yang belum bergerak kemungkinan semakin mendekati kondisi kritis akibat perubahan nilai *stress* ini dan berpotensi menjadi sumber gempabumi di masa depan. Secara bersama-sama, MSTM, MSTC (*Mamuju Strait Thrust-Central*), dan struktur sekunder yang kemungkinan teraktifkan kembali membentuk serangkaian imbrikasi sesar naik di Sulawesi Barat di bawah wilayah Mamuju dan Majene (Gambar 3.10).

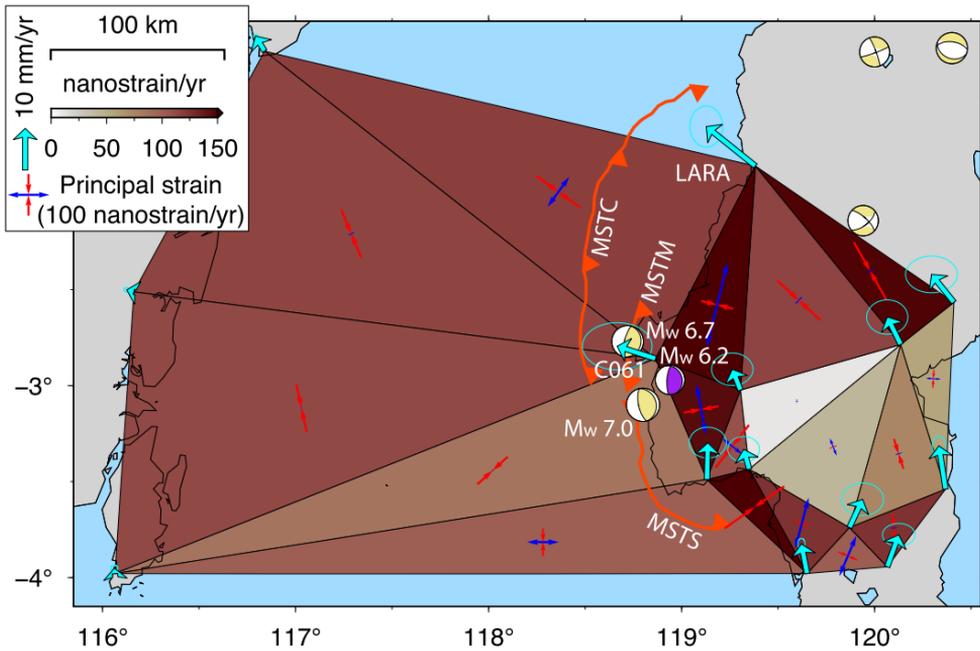
Analisis terhadap perhitungan kecepatan interseismik GPS menunjukkan bahwa wilayah Mamuju dan Majene memiliki tingkat regangan yang lebih tinggi daripada wilayah lain di sekitarnya (Gambar 3.11). Hasil ini ditambah dengan fakta bahwa wilayah ini menghasilkan tiga gempabumi dengan magnitudo lebih dari 6 dalam 100 tahun terakhir mengimplikasikan bahwa MSTC, MSTM, dan MSTS (*Mamuju Strait Thrust-South*) memiliki potensi bahaya seismik yang signifikan di Sulawesi Barat, terutama di Mamuju dan Majene.



Gambar 3.9 Hasil inversi geseran teleseismik memberikan hasil pergeseran koseismik dengan nilai maksimum sekitar 90 cm pada kedalaman 14 km. Bintang merah menunjukkan lokasi hiposenter, dan panah biru melambangkan arah rake di setiap grid.



Gambar 3.10 Profil skematis Patahan Selat Makassar di Sulawesi Barat di bawah wilayah Mamuju dan Majene berdasarkan pada hasil pemodelan, hasil relokasi, solusi tensor momen untuk peristiwa Mamuju, mekanisme fokus peristiwa 1969 dan 1984, dikombinasikan dengan wawasan dari potongan lintang regional melalui MST (Calvert & Hall 2007; Morley dkk. 2011). Hasil perhitungan Coulomb stress pada sistem sesar MST ditunjukkan di sepanjang garis C-D. Berbeda dengan sudut miring bidang sesar gempa utama (19° , garis merah), sebagian besar gempa susulan yang direlokasi membentuk bidang yang miring pada sudut sekitar 40° (garis hitam pekat), menandakan adanya struktur sesar sekunder.



Gambar 3.11 Invarian kedua (segitiga berwarna) dari tensor laju regangan utama yang diturunkan dari kecepatan GPS interseismik (vektor cyan) relatif terhadap kerangka referensi Sunda (Yong dkk. 2017). Panah merah ke dalam menggambarkan kompresi, sementara panah biru ke luar menggambarkan ekstensi. Mekanisme focal terkait dengan gempa bumi Mamuju 2021 dan semua gempa bumi $M_w > 6$ yang direkam secara instrumental (Fitch 1972; katalog GCMT).

4 PENGAMATAN GEODETIK UNTUK PERINGATAN DINI GEMPABUMI

4.1 Estimasi Cepat Magnitudo Gempa Berdasarkan Data Geodetik

Salah satu usaha monitoring gempabumi dan tsunami yang efektif adalah didirikannya *Indonesian Tsunami Early Warning System (InaTEWS)* pada tahun 2008, untuk memberikan peringatan dini tsunami kepada masyarakat jika terjadi gempabumi besar. Penentuan magnitudo gempabumi merupakan salah satu komponen penting dalam sistem peringatan dini tsunami. Magnitudo gempabumi di dalam peringatan dini tsunami ditentukan menggunakan pencatatan sinyal seismik hasil rekaman sensor seismometer dengan menghitung amplitudo maksimum dari sinyal seismik.

Hanya saja, penyimpangan atau saturasi magnitudo gempabumi sering terjadi untuk gempabumi berkekuatan besar ($M > 7$), contohnya saat kejadian tsunami Aceh 26 Desember 2004, *Pacific Tsunami Warning Center (PTWC)* menentukan kekuatan gempabumi pertama kali pada menit ke 11 setelah gempabumi terjadi (*origin time*) sebesar $M_w 8,0$, sangat jauh dari magnitudo akhir yang dihitung setelah data sinyal seismometer yang tersedia banyak, yaitu sebesar $M_w 9,2$ (Stein dan Okal, 2005). Hal yang sama juga terjadi saat tsunami Tohoku di Jepang 11 Maret 2011, *Japan Meteorological Agency (JMA)* mengestimasi pertama kali magnitudo pada menit ke 3 setelah gempabumi terjadi sebesar $M_w 7,9$, kemudian 1 jam 20 menit setelah gempabumi terjadi JMA memperbaharui magnitudo gempabumi menjadi $M_w 8,4$. Beberapa hari berikutnya, berdasarkan data rekaman seismik yang tersedia, magnitudo gempabumi diperbaharui menjadi $M_w 9,0$ (Ohta dkk., 2012). Jika informasi magnitudo gempabumi Aceh dan Tohoku yang menggambarkan kekuatan sebenarnya dari gempabumi tersebut bisa ditentukan di menit-menit awal setelah terjadinya gempabumi/ OT (*origin time*), maka kemungkinan peluang untuk evakuasi keselamatan penduduk di pesisir pantai akan lebih besar.

Penelitian-penelitian terakhir menyatakan bahwa monitoring real time deformasi permukaan (*crustal deformation*) dari data GNSS (*Global Navigation Satellite System*) sangat penting untuk mendapatkan pengetahuan yang cepat tentang kekuatan gempabumi, karena pengukuran *permanent displacement*

memberikan gambaran langsung tentang kekuatan gempabumi (*magnitude moment*, Mw) (Ohta dkk., 2012, Crowell dkk., 2013, Melgar dkk., 2016).

4.1.1 Perhitungan peak ground displacement (PGD)

Beberapa penelitian terakhir menyatakan bahwa *peak ground displacement* (PGD) yang diperoleh dari data *real time* GNSS (*Global Navigation Satellite System*) frekuensi tinggi (1 Hz) bisa digunakan untuk mengestimasi magnitudo gempabumi dengan cepat dan tidak tersaturasi, bahkan bisa didapatkan sebelum proses *rupture* gempabumi selesai. Crowell dkk (Crowell dkk., 2013) mendefinisikan PGD *Scaling Law*, yaitu *Peak Groud Displacement* (PGD) sebagai fungsi jarak stasiun GNSS terhadap pusat gempabumi:

$$\log_{10}(\text{PGD}) = A + B M_w + C M_w \log_{10}(r_{hyp}) \quad (4.1)$$

di mana r_{hyp} adalah jarak stasiun GNSS dari hiposenter gempabumi, M_w adalah Magnitudo Momen gempabumi, PGD maksimum Euclidian dari tiga komponen pergeseran (utara, timur, dan vertikal) dalam sentimeter, dan A, B, dan C adalah konstanta yang didapatkan melalui regresi linier.

Peak Ground Displacement (PGD) bisa didapatkan dari persamaan berikut (Melgar dkk., 2015):

$$\text{PGD} = \max(\sqrt{N(t)^2 + E(t)^2 + U(t)^2}) \quad (4.2)$$

di mana $N(t)$, $E(t)$, $U(t)$ merupakan komponen displacement GNSS arah utara, timur dan vertikal tiap epok.

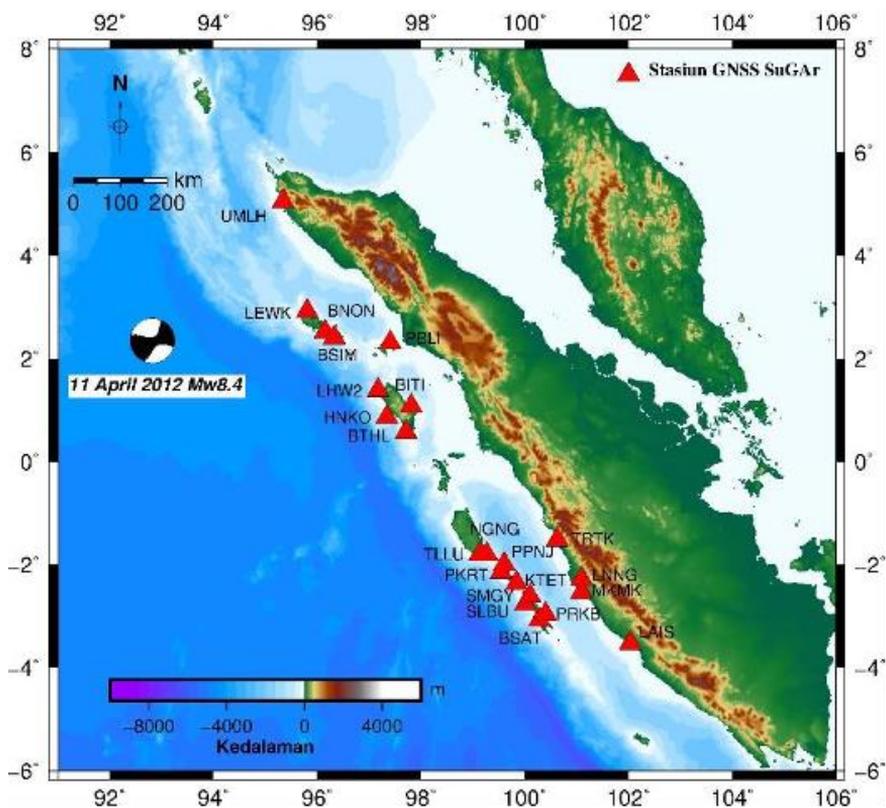
Crowell dkk. (Crowell dkk., 2016), dan Ruhl dkk. (Ruhl dkk., 2017) telah mengimplementasikan data GNSS untuk mengestimasi magnitudo gempabumi dan mengembangkan prototipe sistem estimasi otomatis magnitudo gempa menggunakan data GNSS yang telah diintegrasikan dengan sistem *Earthquake Early Warning* (EEW) yang sudah ada. Hasilnya, magnitudo gempabumi yang dihasilkan lebih stabil dan tidak tersaturasi dibandingkan magnitudo gempabumi yang dihasilkan dari data seismometer.

Penelitian-penelitian terakhir menyatakan bahwa monitoring *real time* deformasi permukaan (*crustal deformation*) dari data GNSS (*Global Navigation Satellite System*) sangat penting untuk mendapatkan pengetahuan yang cepat tentang kekuatan gempabumi karena pengukuran *permanent displacement*

memberikan gambaran langsung tentang kekuatan gempa bumi (*magnitude moment, Mw*) (Ohta dkk., 2012, Crowell dkk., 2013, Melgar dkk., 2016).

4.1.2 Pergeseran akibat gempa bumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012

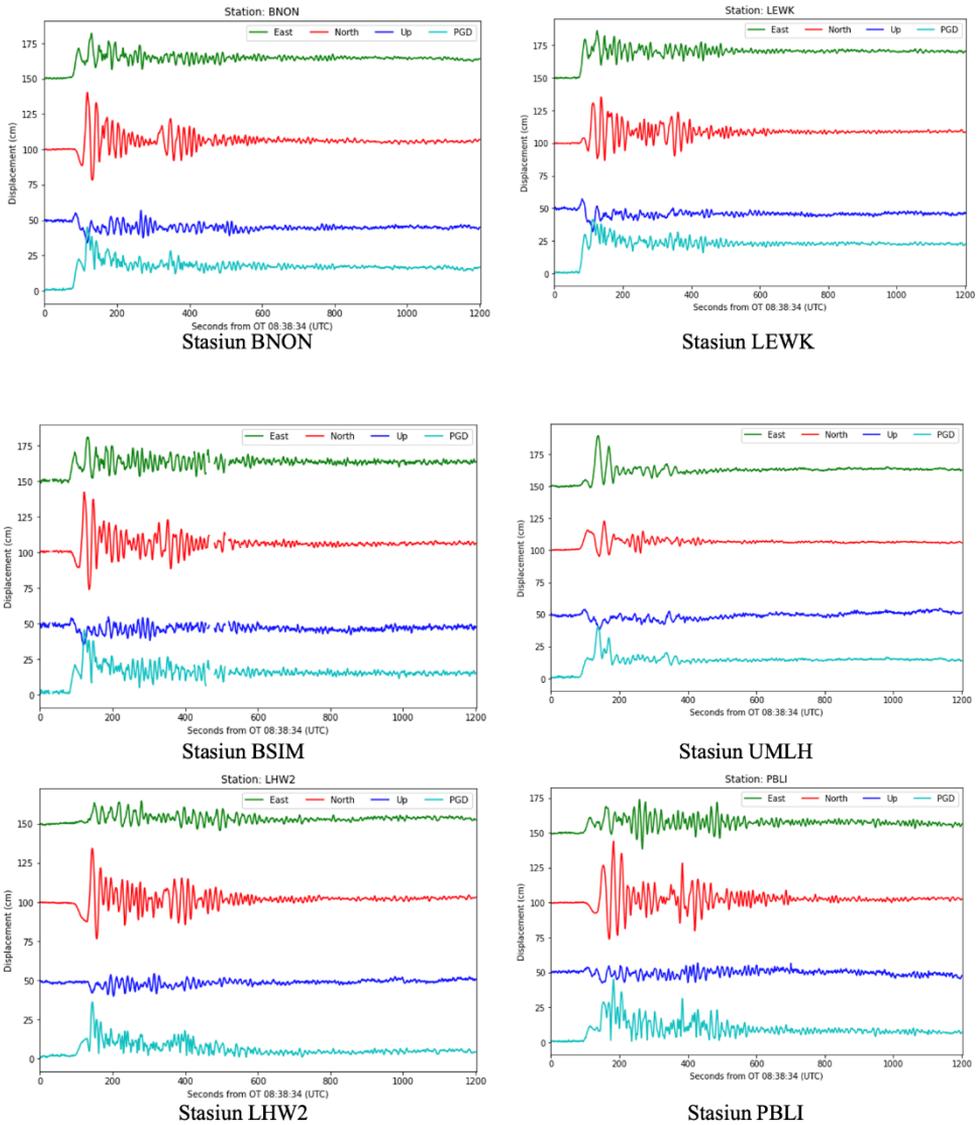
Terdapat 18 stasiun GNSS jaringan SuGAR yang digunakan dalam studi kasus ini untuk mendeteksi pergeseran akibat gempa bumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012, antara lain: BNON, LEWK, BSIM, UMLH, LHW2, PBLI, BTHL, BITI, TLLU, PPNJ, KTET, TRTK, SMGY, SLBU, BSAT, PRKB, LNNG, MKMK. Posisi sumber gempa bumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012 dan stasiun HR GNSS yang bisa mendeteksi pergeseran ditampilkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Posisi sumber gempa bumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012 dan stasiun HR GNSS yang mendeteksi

Grafik pergeseran akibat gempa bumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012 dalam 3 komponen (timur/*east*, utara/*north*, vertikal/*up*) untuk tiap-tiap stasiun GNSS ditampilkan pada Gambar 4.2.

Berdasarkan tabel nilai PGD tiap stasiun, dapat dilihat bahwa nilai PGD terbesar di stasiun BSIM sebesar 45,37 cm dan nilai PGD terkecil di stasiun TRTK sebesar 12,84 cm.



Gambar 4.2 Grafik pergeseran akibat gempa bumi Simelue Mw 8,4, 11 April 2012 dalam 3 komponen (east, north, up) dan peak ground displacement (PGD). Sumbu x merupakan waktu dalam detik dari origin time (OT), yaitu waktu awal terjadinya gempa bumi, sedangkan sumbu Y merupakan nilai pergeseran dalam sentimeter (cm)

Tabel 4. 1 Nilai PGD tiap stasiun GNSS akibat gempa bumi Mentawai Mw 8,4, 11 April 2012 dan jarak antara stasiun GNSS dengan hiposenter

Event	GNSS Site	PGD (cm)	Hypocentral distance (km)
Mw 8,1, 11 April 2012, Simelue, NAD	LEWK	14,51	450
	BNON	12,12	463
	BSIM	16,13	475
	LHW2	14,63	536
	HNKO	16,22	551
	PBLI	13,95	582
	BTHL	13,47	592
	BITI	11,93	604
	TLLU	9,12	801
	PPNJ	7,64	857
	PKRT	7,45	857
	KTET	8,53	896
	SLBU	6,62	931
	SMGY	5,81	934
	TRTK	5,94	949
	LNNG	5,94	1030
	MKMK	5,37	1033
LAIS	5,70	1171	
MLKN	4,34	1287	

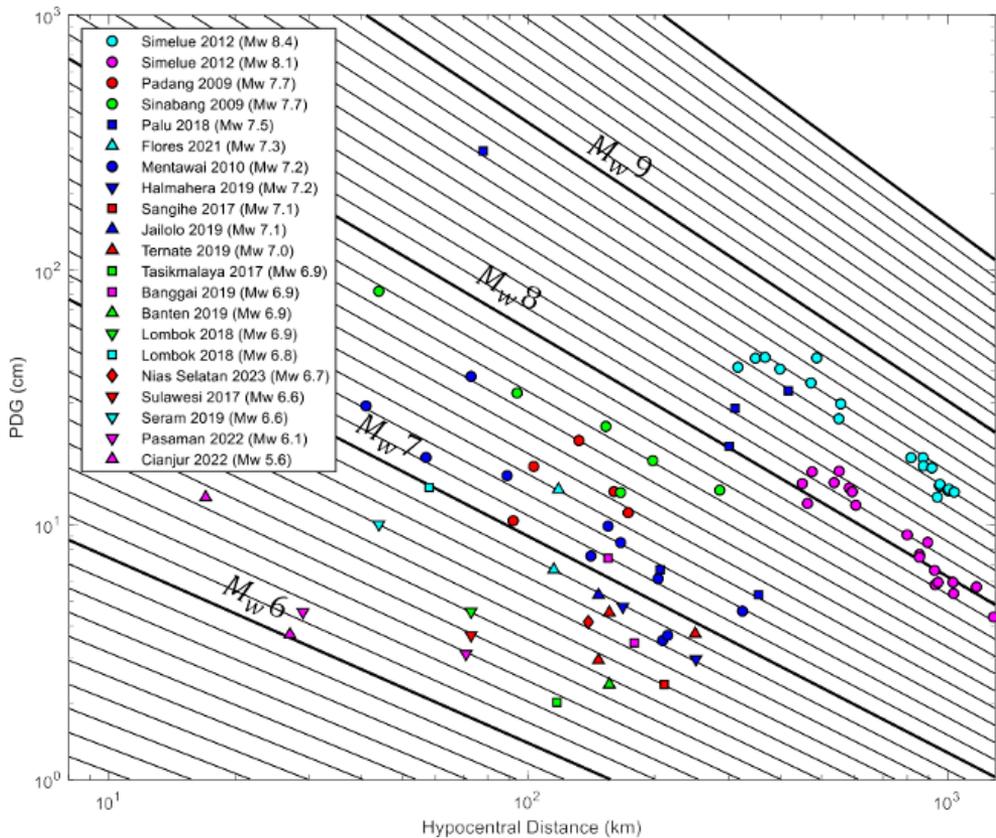
4.1.3 Estimasi Magnitudo Gempa

Setelah didapatkan nilai *Peak Ground Displacement* (PGD) untuk setiap stasiun *high-rate* GNSS yang merekam kejadian gempa bumi, selanjutnya dilakukan regresi linier untuk menemukan formula empiris PGD *Scaling Law* yang sesuai dengan kondisi tektonik kegempaan wilayah Indonesia. Hubungan empiris antara PGD dan Magnitudo gempa bumi (Mw) (*PGD Scaling Law*) didefinisikan oleh (Crowell dkk., 2013), sebagai berikut.

$$\log_{10}(\text{PGD}) = A + B M_w + C M_w \log_{10}(R)$$

di mana R_{hyp} adalah jarak stasiun GNSS dari hiposenter gempa bumi, M_w adalah Magnitudo Momen gempa bumi, PGD adalah maksimum Euclidian dari tiga komponen *displacement* (utara, timur, dan vertikal) dalam sentimeter (cm), dan A, B, dan C adalah konstanta yang didapatkan melalui regresi linier. Hasil dari perhitungan regresi linier ditunjukkan dalam grafik PGD *Scaling Law* dalam Gambar 4.3.

$$\log(PGD) = -4,729 + 1,055M_w - 0,121 \log(R_{hyp})$$



Gambar 4. 3 Grafik nilai PGD sebagai fungsi dari jarak antara stasiun GNSS dan hiposenter.

Berdasarkan Gambar 4.3, maka secara umum nilai PGD akan berkurang seiring bertambahnya jarak antara stasiun dan hiposenter gempa bumi, kecuali untuk beberapa gempa bumi, nilai PGD di stasiun yang jaraknya lebih jauh dari hiposenter tetapi nilai PGD-nya lebih besar. Hal ini diduga karena faktor *local site effect* atau arah pergerakan sesar gempa bumi. Untuk gempa bumi-gempa bumi besar, seperti Gempa bumi Simelue Mw8,4, Gempa bumi Simelue Mw8,1, Gempa Sinabang Mw7,7, Gempa bumi Mentawai Mw7,2, di mana stasiun-stasiun GNSS yang merekam relatif banyak (> 5), maka nilai-nilai PGD terfluktuasi di sekitar garis *oblique*/miring-nya, yang menandakan hubungan teoretis yang kuat antara nilai PGD dan jarak antara stasiun GNSS dan hiposenter untuk gempa-gempa tersebut.

Berdasarkan hasil regresi linier, maka didapatkan persamaan empiris PGD Scaling Law untuk kejadian gempabumi di wilayah Indonesia adalah sebagai berikut.

$$\log(PGD) = -4,729 + 1,055Mw - 0,121 \log(Rhyp)$$

di mana koefisien A = -4,729, B = 1,055, dan C = -0,121

4.2 Estimasi Tensor Momen Gempa Berdasarkan Data Geodetik (Studi Kasus Gempa Palu 2018)

Meningkatkan metode analisis gempabumi sangat penting untuk Indonesia, mengingat keragaman dan kompleksitas sumber gempa yang ada di wilayah Indonesia. Model analisis tensor momen dengan data *high-rate* GNSS CORS diharapkan dapat meningkatkan pemahaman tentang mekanisme gempabumi dan peringatan dini tsunami di Indonesia.

Pada studi kasus ini dilakukan inversi tensor momen gempa dengan menggunakan data GNSS untuk kasus Gempabumi Palu pada 28 September 2018. Data GNSS dari stasiun-stasiun terdekat digunakan untuk mengestimasi parameter momen tensor gempa, termasuk lokasi episenter, kedalaman hiposenter, dan mekanisme sumber.

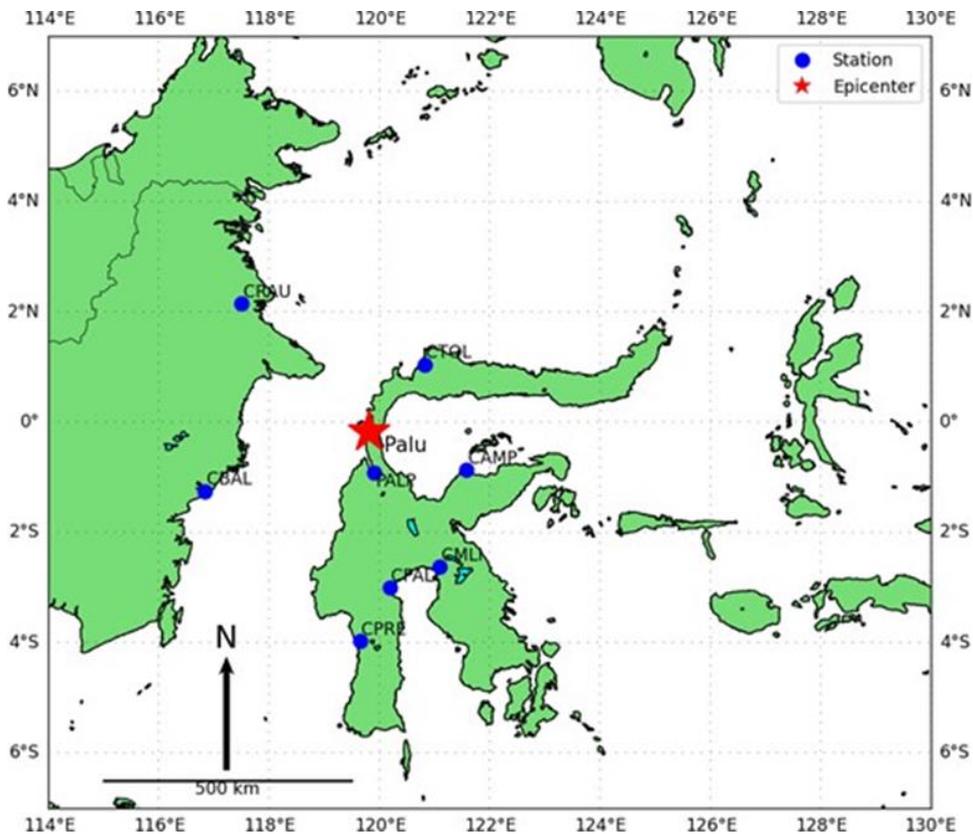
Gempabumi Palu Mw7,4 disebabkan oleh pergerakan sesar Palu-Koro dengan mekanisme pergerakan sesar mendatar. Pergerakan sesar Palu-Koro dengan mekanisme sesar mendatar menyebabkan tsunami. Hal tersebut terjadi karena mekanisme sesar mendatar dapat menyebabkan pergerakan tanah secara vertikal jika *rake* tidak sepenuhnya horizontal (Hooper dkk., 2013). Gempabumi Palu Mw7,4 menyebabkan tsunami dengan ketinggian 1,9-meter yang terekam oleh stasiun pasang surut Pantoloan milik BIG (tides.big.go.id).

4.2.1 Sinyal Pergeseran Event Gempabumi dari data GNSS

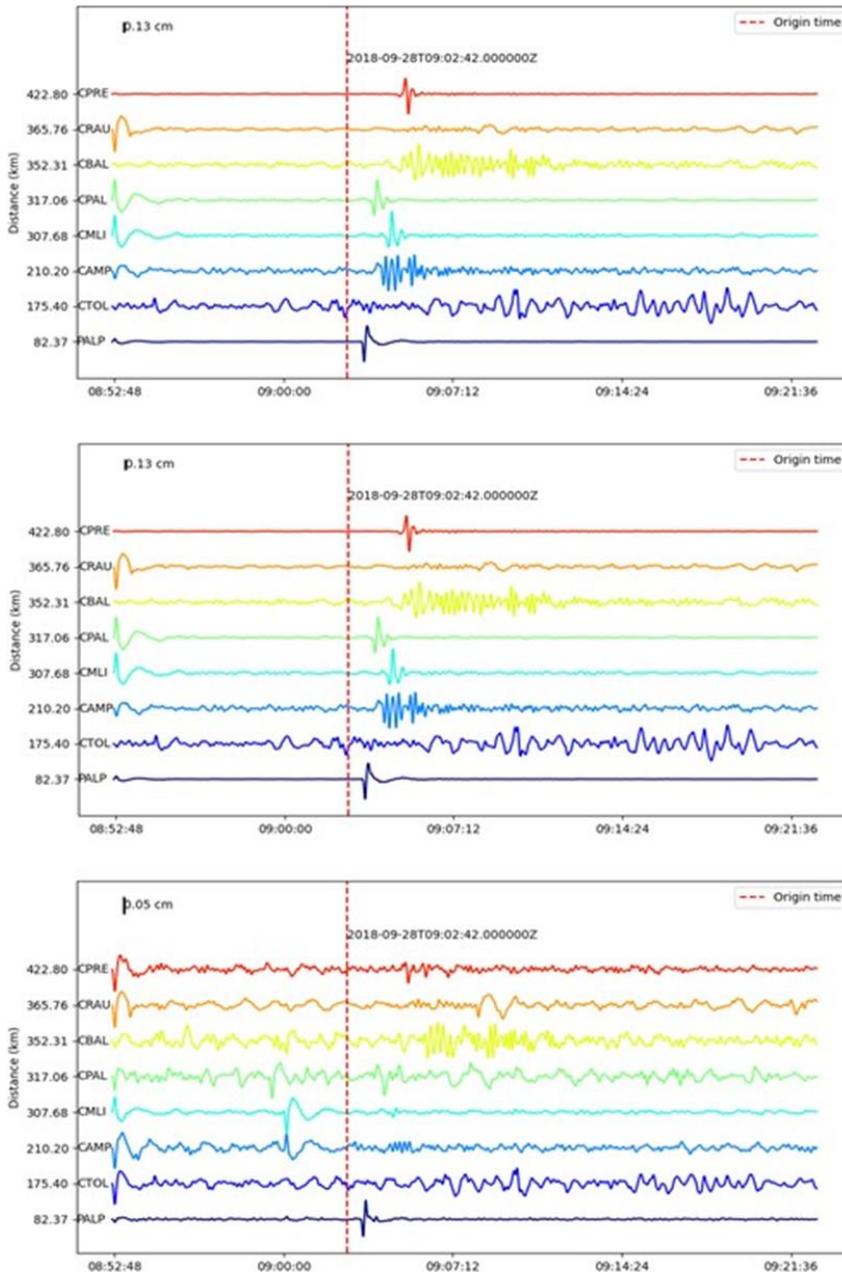
Efek gempabumi dapat terdeteksi dengan menggunakan data sinyal yang terekam di stasiun GNSS dan juga stasiun seismik. Gempabumi dengan amplitudo besar berpotensi besar memicu gelombang tsunami. Pada studi kasus ini digunakan data GNSS dari jaringan Ina-CORS milik Badan Informasi dan Geospasial (BIG). Dari jaringan GNSS tersebut, dipilih stasiun-stasiun

yang merekam beberapa kejadian gempa Palu 28 September 2018. Sebaran stasiun yang digunakan serta episenter gempa ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Dari sinyal pergeseran GNSS CORS (Gambar 4.5) dapat dilihat bahwa pada komponen timur-barat terjadi pergeseran maksimal sebesar 0,562 m di stasiun PALP, berjarak 82,37 km dari episenter. Sedangkan untuk komponen utara-selatan terjadi pergeseran maksimal sebesar 1,21 m di stasiun PALP, yang berjarak 82,37 km dari episenter. Untuk komponen naik-turun terjadi pergeseran maksimal sebesar -2,76 m di stasiun CMLI, yang berjarak 307,68 km dari episenter.



Gambar 4.4 Peta episenter Gempabumi Palu 2018 dan sebaran stasiun GNSS jaringan InaCORS BIG



Gambar 4.5 Sinyal pergeseran pada stasiun GNSS CORS kejadian gempa bumi Palu 28 September 2018 Mw7,2. Gambar dari atas ke bawah menunjukkan komponen *easting*, *northing*, dan *up*. (Sudrajat, 2023)

4.2.2 Spectrogram

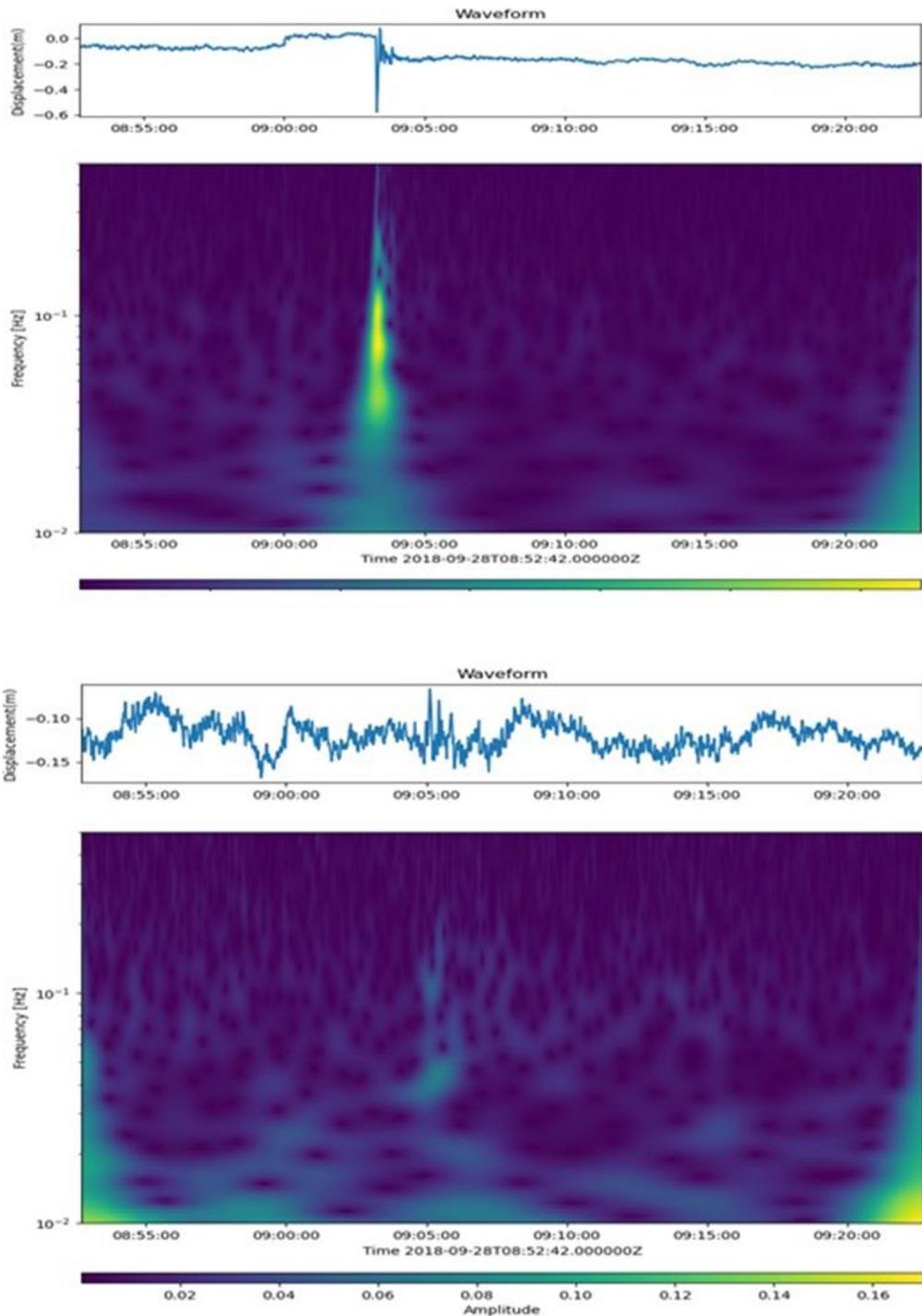
Spectrogram adalah alat visual yang memberikan representasi waktu-frekuensi dari sinyal seismik. Ini menunjukkan bagaimana energi seismik

tersebar dalam frekuensi sepanjang waktu. Dengan kata lain, spectrogram mencakup informasi tentang amplitudo, frekuensi, dan waktu dari sinyal seismik.

Dari spectrogram, fase awal gempabumi biasanya ditandai oleh peningkatan amplitudo yang tiba-tiba pada frekuensi rendah. Ini mengindikasikan awal dari gempabumi tersebut. Ketika melihat spectrogram yang dihasilkan dari data gempabumi di Palu (Gambar 4.5), dapat dilihat pola yang serupa pada stasiun-stasiun GNSS CORS. Terdapat peningkatan amplitudo yang signifikan pada frekuensi rendah segera setelah gempabumi terjadi.

Gambar 4.6 menunjukkan hasil spectrogram dari sinyal pergeseran pada stasiun GNSS CORS selama Gempabumi Palu 28 September 2018 dengan data GNSS CORS pada stasiun yang terdekat dan terjauh dari episenter. Dalam analisis seismik, stasiun yang lebih dekat dengan episenter, dalam hal ini stasiun PALP, mencatat amplitudo yang lebih tinggi dan penyebaran frekuensi yang lebih luas karena energi gempabumi mengurangi intensitas seiring dengan jarak. Dengan demikian, hasil spectrogram dari stasiun terdekat dengan episenter menunjukkan energi seismik yang lebih tinggi dan penyebaran frekuensi yang lebih luas, yang mencerminkan intensitas dan sifat gempabumi tersebut.

Di sisi lain, stasiun GNSS CORS yang berjarak lebih jauh dari episenter dihipotesiskan akan menghasilkan spektrum frekuensi yang lebih sempit dan memiliki amplitudo yang lebih rendah. Hal ini dikarenakan energi gempabumi yang dicatat di stasiun ini lebih rendah dibandingkan dengan stasiun yang lokasinya lebih dekat dengan episenter. Namun, berdasarkan data dengan plot spectrogram stasiun terjauh, yakni CPRE dan membandingkannya dengan hasil di PALP mempunyai kandungan frekuensi yang sama pada rentang 0,01 - 0,1 Hz menunjukkan keberadaan energi seismik yang signifikan dalam rentang frekuensi ini. Pada frekuensi rendah, gelombang seismik cenderung merambat lebih jauh dan melewati berbagai jenis media dengan lebih efisien. Hasil ini menunjukkan pentingnya frekuensi rendah dalam analisis seismik lebih lanjut yang tercatat pada stasiun GNSS CORS.



Gambar 4.6 Spectrogram sinyal pergeseran pada stasiun GNSS CORS kejadian Gempabumi Palu 28 September 2018 Mw7,4. Gambar atas stasiun PALP dan bawah stasiun CPRE, pada komponen naik-turun (Sudrajat, 2023)

4.2.3 Inversi Tensor Momen

Inversi tensor momen penuh (*Full Moment Tensor Inversion*) adalah metode yang digunakan dalam seismologi untuk menentukan karakteristik sumber gempa bumi. Inversi tensor momen penuh berupaya untuk mendapatkan informasi tentang orientasi dan mekanisme dari patahan yang menghasilkan gempa. Proses ini menghasilkan sebuah tensor momen seismik, yang merupakan representasi matematis dari distribusi gaya dalam bumi yang mengakibatkan terjadinya gempa.

Pada studi kasus ini, kami mendapatkan hasil perhitungan momen tensor penuh yang diperoleh dari analisis data GNSS. Tujuan utama adalah untuk mengkarakterisasi sumber dan mekanisme dari peristiwa seismik. Inversi yang dilakukan menggunakan beberapa filter *bandpass* untuk mendapatkan nilai *Variation Reduction* (VR) terbaik. Dalam penelitian ini, *bandpass* filter digunakan berdasarkan magnitudo, yaitu: 0.02–0.10 Hz untuk $M < 4.0$, 0.02–0.05 Hz untuk $4.0 \leq M < 5.0$, 0.01–0.05 Hz untuk $5.0 \leq M \leq 7.5$, dan 0.005–0.02 Hz untuk $M > 7.5$ (Dreger, 2003).

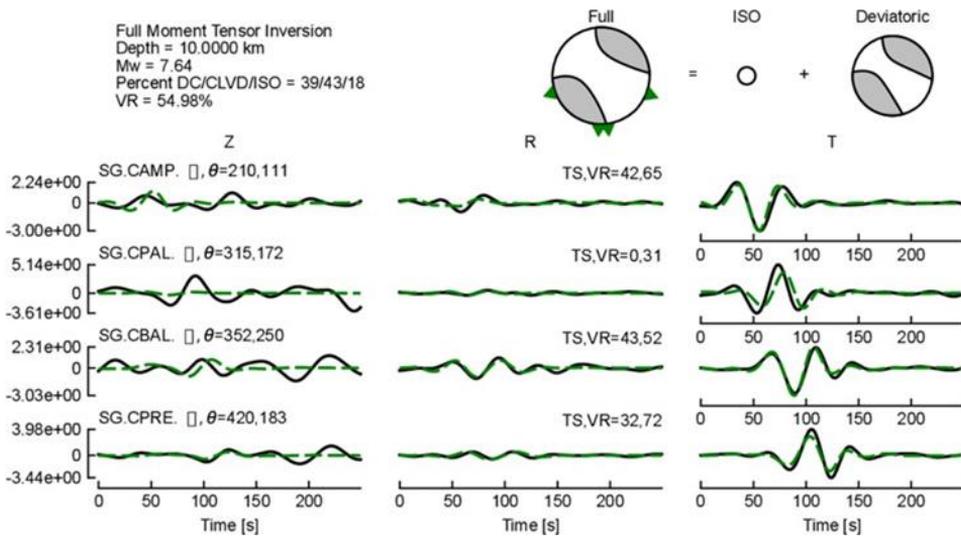
Hasil dari analisis inversi momen tensor untuk kasus Gempa Palu 2018 (Gambar 4.7, Tabel 4.1) mengungkapkan kedalaman hiposentral gempa sebesar 10 kilometer, menandakan bahwa gempa ini terjadi relatif dangkal di kerak bumi. Magnitudo seismik yang dihitung adalah M 7.64, yang menggambarkan pelepasan energi yang signifikan dan berpotensi menimbulkan kerusakan besar.

Pemodelan menunjukkan distribusi komponen mekanisme sumber gempa dengan persentase *Double Couple* (DC) sebesar 39% *Compensated Linear Vector Dipole* (CLVD) sebesar 43% dan isotropik sebesar 18%. Hal ini menunjukkan bahwa sumber gempa ini melibatkan kompleksitas yang tinggi dengan komponen gerakan geser patahan dan perubahan volume yang signifikan.

Penguraian mekanisme sumber menunjukkan dominasi gerakan patahan dengan komponen CLVD yang tinggi, yang tidak biasa untuk gempa besar dan kemungkinan adanya proses geodinamik kompleks, seperti *slip* pada patahan yang *oblique* atau interaksi patahan yang kompleks. Kedalaman gempa yang dangkal dan magnitudo yang besar menunjukkan bahwa peristiwa ini berpotensi menimbulkan tsunami dan longsoran bawah laut, yang harus

diperhatikan lebih lanjut dalam perencanaan mitigasi bencana di wilayah Palu dan sekitarnya.

Hasil studi menunjukkan bahwa penggunaan data GNSS secara signifikan dapat mengestimasi momen tensor, terutama dalam menentukan kedalaman hiposenter dan orientasi patahan. Analisis mendalam terhadap beberapa gempa bumi di wilayah studi menunjukkan bahwa inversi momen tensor dengan data GNSS memberikan informasi yang lebih detail tentang mekanisme patahan dibandingkan dengan metode konvensional yang hanya menggunakan data seismik. Selain itu, studi ini juga berhasil meningkatkan kecepatan pengolahan data dalam estimasi momen tensor menggunakan data GNSS *high-rate*.



Gambar 4.7 Sinyal sintesis dan inversi tensor momen dengan parameter sumber gempa bumi Palu 2 September 2018 (Sudrajat, 2023)

Tabel 4. 2 Parameter Gempabumi Palu 2018 hasil inversi tensor momen

Nama Event	Tanggal	Waktu Gempabumi (UTC)	Lintang	Bujur	Magnitudo (Mw)	Mo (N·m)	Kedalaman (Km)	NODAL PLANE 1			NODAL PLANE 2			Sumber
								Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake	
Palu	28 September 2018	10:02:45	-0.256	119.846	7.53	2.50E+20	13.5	87	74	-156	350	67	-17	USGS
					7.6	2.82E+27	12	348	57	-15	87	77	-146	GCMT
					7.64	3.26E+27	10	164	61	-38	275	57	-145	GNSS (Penelitian sekarang)

5 PENUTUP

1. Bidang Geodesi Gempabumi sebagai keilmuan baru mengenai aplikasi metode pengamatan geodetik dalam memahami potensi gempabumi dan sistem peringatan dini gempabumi yang menjadi bagian penting dari proses untuk pengurangan risiko bencana.
2. Analisis regangan geodetik dapat digunakan untuk menjelaskan potensi sumber gempa di suatu wilayah. Pada studi kasus di Busur Banda, didapatkan hasil bahwa zona Laut Banda, Kepala Burung-Papua, Sulawesi Selatan, dan Sumba berpotensi menghasilkan gempabumi di masa depan sebesar M8,1, M7,7, M7,9, dan M7,7, berturut-turut.
3. Data GNSS dan InSAR telah berhasil digunakan untuk mengeksplorasi karakteristik sumber Gempa Ambon 2019. Mekanisme gempa Ambon Mw 6.5 tahun 2019 didominasi oleh komponen *strike-slip* dengan tambahan komponen *normal* dan *reverse* di bagian utara sesar. Sesar penyebab gempa ini memiliki laju geser sekitar 5 mm/tahun dengan periode ulang gempa sekitar 115 tahun. Wilayah Ambon dan sekitarnya memiliki tingkat akumulasi regangan yang tinggi, yang berkorelasi dengan distribusi gempa Mw ≥ 6 . Hal ini menunjukkan bahwa wilayah tersebut aktif secara seismik dan dapat mengalami lebih banyak gempabumi tipe gempa Ambon 2019 di masa yang akan datang.
4. Analisis data GNSS telah berhasil menjelaskan karakteristik kompleks dari sumber gempa utama di Mamuju pada 15 Januari 2021. Kejadian gempa Mamuju Mw 6.2 tahun 2021 merobek secara parsial satu segmen dari sistem Patahan Selat Makassar, mengaktifkan struktur retakan sekunder, dan kemungkinan memengaruhi bagian *updip* yang belum robek dari segmen Patahan Selat Makassar menuju kondisi kritis. Wilayah Mamuju dan Majene memiliki laju regangan kerak yang lebih tinggi daripada wilayah-wilayah terdekat lainnya. Kesemua hasil menuju pada kesimpulan bahwa wilayah Sulawesi Barat memiliki potensi bahaya seismik yang tinggi, terutama di Mamuju dan Majene.
5. Teknologi *high-rate* GNSS dapat digunakan untuk mengestimasi magnitudo gempa. Berdasarkan kejadian gempa-gempa bermagnitudo besar di Indonesia, telah didapatkan persamaan empiris hubungan antara nilai *Peak Ground Displacement* yang didapatkan dari data GNSS dengan nilai magnitudo gempa (*Scaling Law*) yang sesuai dengan kondisi tektonik kegempaan wilayah Indonesia.

6. Data *high-rate* GNSS dari studi kasus Gempa Palu 2018 memberikan pemahaman yang mendalam tentang mekanisme dan karakteristik sumber gempabumi berdasarkan hasil inversi momen tensor yang penting untuk memahami proses geofisika terjadinya gempabumi sebagai bahan untuk menginformasikan potensi tsunami yang akurat dan cepat dalam upaya mitigasi risiko dan perencanaan tanggap darurat.

6 UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam proses pembelajaran telah banyak anggota keluarga, guru, rekan-rekan, dan kolega-kolega berkontribusi pada proses pencapaian *professorship* saya ini. Baik mereka yang bertemu secara intens dalam waktu yang lama atau hanya bersimpangan jalan, tetapi memberikan inspirasi mendalam. Dengan segala kerendahan hati, saya mengucapkan terima kasih kepada semuanya, jasa-jasanya tidak pernah saya lupakan dan sekaligus permohonan maaf karena keterbatasan yang ada, saya tidak dapat menyebutkan semuanya satu per satu. Saya mendapatkan pengalaman sangat berharga bersama para sahabat sewaktu sekolah di SDN Babakan Taragon V Bandung, SMPN 3 Bandung, SMAN 3 Bandung *barudak Street* di antaranya Uky, Gobam, Ahim, dll..

Selama menjadi mahasiswa saya mendapatkan pembelajaran kehidupan melalui dialektika bersama sahabat di Kokesma, PAS Salman, dan IMG. Dikarenakan takdir Allah saat menjadi mahasiswa tingkat 3 saya bertemu dengan Prof. Hasannudin Z.A dan Pak Piping, dilanjutkan menjadi asisten perkuliahan dan menjadi mahasiswa bimbingan; dan sejak itu, mereka membuat saya menjadi *passionate* dalam bidang deformasi geodesi yang kemudian mendalami Geodesi Gempabumi.

Saya beruntung dipertemukan dengan Tim Jepang (Profesor Kimata) saat mereka survei di Jawa Barat selatan tahun 1996-1998, yang kemudian menjadi dosen pembimbing saya S-2 sampai S-3 di Jepang. Semoga Allah membalas kebaikan, ketulusan, teladan dan kepercayaan Profesor Kimata dan Profesor Fujii serta pemberi rekomendasi GB saya Profesor Sagiya dan Profesor Heki. Sahabat di Jepang yang menjadi teman survei angkat rambu dan ngongseng bersama: Ohta san (Tohoku Univ), Ito san (Nagoya Univ), Murase san (Nihon Univ), Agustan (BRIN), Dudy Darmawan dan Endra (ITB). Terima kasih juga pada para alumni Nagoya University, PPI, dan KMI Nagoya yang telah menjadi keluarga di perantauan, Pak Supri, S.Ps., Pak Gunawan, Mas Anto BRIN, Pak Bambang Setyadji - Teh Rina, Kang Aswan FITB, Pak Tommy SF.

Sepulang dari studi saya dipertemukan dengan guru-guru hebat yang kemudian menjadi keluarga, yaitu Pak Masyhur, Pak Ilik, Pak Danny Hilman kami bersama menjadi tim Nasional Pembaharuan Peta Gempa Indonesia Pak Rifak, Pak Lutfi, (alm) Pak Arief, Pak Wahyu, dikenal sebagai Tim 9 yang

kemudian menjadi PuSGeN. Kemudian bersama dengan Pak Phil Cummins (ANU) dan rekan ITB, Pak Andri, Pak Nanang, Pak Mino membangun Graduate Research for Earthquake and Active Tectonics (GREAT). Bersama keluarga GREAT, Pak Zulfakriza, Ibu Riantini, Mas David, Rahma (BRIN), Ajeng dan Pera, kami membangun rumah pembelajar gempa bumi dan risiko bencana. Para mahasiswa bimbingan alumni GREAT menjadi periset tangguh gempa bumi yang tersebar di berbagai instansi dan menjadi kolaborator penelitian saat ini, di antaranya Rino Salman (NTU), Cecep (UGM), Putra (ITS), Hendri (ITENAS), Susilo, Estu (BRIN), Suchi, Fiza, Rio, Intan, Wulan, Ajeng, Pera. Di tengah kesibukan akademik saya bertemu dengan para sahabat sehat, yaitu Awug Runners dan Sabuga Runners, GBFit yang mengisi hari-hari dengan low HR.

Terima kasih pada tim PPMB Ibu Inin, Ibu Aria, Bandung Mitigasi Hub Kang Bayu, Tim LPPM 2015-2019 Pak Rijal, Pak Budi, (alm) pak Dudi, Pak Joko, Pak Nyoman, Pak Delik, terima kasih juga saya haturkan kepada Forum Guru Besar (FGB) ITB atas bantuan dan persetujuannya dalam pengusulan *professorship* saya. Terima kasih untuk para Guru Besar pemberi rekomendasi (yang belum disebutkan di awal) Pak Ketut, Ibu Mega (Unpad), Pak Wahyu Srigutomo.

Terima kasih para Dekanat FITB, Mang Agus, Ibu Mutiara, pimpinan Senat FITB Pak Deny, Pak Eddy S., para kaprodi sarjana dan pascasarjana FITB, Tim FITB Kabag, kasubag dan seluruh tendik FITB. Seluruh Guru Besar di lingkungan FITB. Dosen-dosen kelompok keahlian Survening dan Sistem Spasial (Ibu Ning, Pak Sudarman, Kang Andri, Pak Asep, Pak Deny, Pak Rizqi, Bu Alfita, Bu Sella, Bu Ratri dan Bu Nabila. Dosen-dosen KK Geodesi (yang belum disebutkan sebelumnya): Pak Wedi, Ibu Dina, Pak Mipi, Pak Zamzam, Pak Irwan Gumilar, Ibu Vera, Pak Heri Andreas, Pak Teguh, Pak Dhota, dan Pak Brian. Kaprodi Pak Wiwin serta seluruh dosen prodi Teknik Geodesi Geomatika serta dosen FITB lainnya.

Terima kasih yang tidak mungkin disampaikan hanya dengan kata-kata untuk keluarga besar (Kang Aa, Ii, Uu, Teh Nuy, Teh Irma, A cecep, Ipan, Ira, beserta pasangannya) telah menjadi pelindung dan pendorong bagi kemajuan saya. Terima kasih juga untuk Keluarga Bandung, Keluarga Majalaya, dan Keluarga Ciamis. Untuk almarhum Bapak/Ibu mertua serta almarhum Ibu yang mengajarkan keberanian dan keteguhan melangkah, dan almarhum

Bapak yang sampai akhir hayatnya karena alzheimer selalu mengajarkan kesabaran dan keramahan. Serta anak-anak yang waktu berharga di masa kecilnya tersita karena Bapaknya sibuk melakukan penelitian atau survei ke lapangan. Demikian juga Istri tercinta yang selalu setia mendampingi di saat sulit dan sangat sulit dengan penuh kesabaran.

Akhir kata, tanpa mengurangi rasa hormat, saya ucapkan beribu terima kasih kepada semua rekan-rekan saya yang tidak dapat saya sebutkan melalui buku ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Argus, D. F., Gordon, R. G., & DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(11).
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2019). *Katalog Gempabumi Signifikan dan Merusak 1821-2018*. Pusat Gempabumi dan Tsunami Kedepujian Bidang Geofisika, Jakarta.
- Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., ... & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).
- Bungum, H., Lindholm, C. D., & Mahajan, A. K. (2017). Earthquake recurrence in NW and central Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 25-37.
- Calvert, S. J., & Hall, R. (2007). Cenozoic evolution of the Lariang and Karama regions, North Makassar Basin, western Sulawesi, Indonesia. *Petroleum Geoscience*, 13(4), 353-368.
- Chousianitis, K., Ganas, A., & Evangelidis, C. P. (2015). Strain and rotation rate patterns of mainland Greece from continuous GPS data and comparison between seismic and geodetic moment release. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5), 3909-3931.
- Crowell, B. W., Melgar, D., Bock, Y., Haase, J. S., & Geng, J. (2013). Earthquake magnitude scaling using seismogeodetic data. *Geophysical Research Letters*, 40(23), 6089-6094.
- Dreger, D. S. (2003). TDMT_INV: Time domain seismic moment tensor INVersion. *International Geophysics*, 81, Part B, 1627-1627.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4), 2825-2852.
- Einstein, A. (1905). Zur elektrodynamik bewegter körper. *Annalen der physik*, 4.
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200, 1-9.
- Fisher, D., Hagon, K., Lattimer, C., O'Callaghan, S., Swithern, S., & Walmsley, L. (2018). *World disasters report 2018: leaving no one behind (1 ed.)* (D.

- Fisher, K. Hagon, S. Swithern, dan L. Walmsley, Ed.). International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Geneva, Switzerland.
- Fitch, T. J. (1972). Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to southeast Asia and the western Pacific. *Journal of Geophysical research*, 77(23), 4432-4460.
- Gathorne-Hardy, F. J., & Harcourt-Smith, W. E. H. (2003). The super-eruption of Toba, did it cause a human bottleneck?. *Journal of Human Evolution*, 45(3), 227-230.
- Gilbert, G. K. (1909). Earthquake forecasts introduction. *Science*, 29(734), 121-138.
- Genrich, J. F., Bock, Y., McCaffrey, R., Calais, E., Stevens, C. W., & Subarya, C. (1996). Accretion of the southern Banda arc to the Australian plate margin determined by Global Positioning System measurements. *Tectonics*, 15(2), 288-295.
- Guha-Sapir, D. (2002). Disaster data: key trends and statistics (1 ed.), 171–183 dalam *World Disasters Report: Focus on Reducing Risk*. International Federation of Red Cross & Red Crescent Societies, Geneva, Switzerland.
- Guha-Sapir, D., & Below, R. (2002). *Quality and accuracy of disaster data: A comparative analyse of 3 global data sets*. Provention Consortium, Brussels, Belgia.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological society of America*, 34(4), 185-188.
- Hallegatte, S. (2016). *Shock waves: managing the impacts of climate change on poverty*. World Bank Publications.
- Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Bangalore, M., & Rozenberg, J. (2016). *Unbreakable: building the resilience of the poor in the face of natural disasters*. World Bank Publications.
- Hamilton, W. B. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (Vol. 1078). US Government Printing Office.
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348-2350.
- Harlianto, B., & Muhamad, F. 2018. *Pemetaan B Value untuk Identifikasi Kerentanan Wilayah Terhadap Gempabumi dengan Mempertimbangkan Kepadatan Penduduk Di Kabupaten Bengkulu Utara*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu: Bengkulu.

- Hawking, S. (2009). *A brief history of time: from big bang to black holes*. Random House.
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., & McClusky, S.C. (2018) *GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT, Release 10.7*. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Hooper, A., Pietrzak, J., Simons, W., Cui, H., Riva, R., Naeije, M., ... & Socquet, A. (2013). Importance of horizontal seafloor motion on tsunami height for the 2011 Mw= 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 469-479.
- Hyndman, R. D., & Weichert, D. H. (1983). Seismicity and rates of relative motion on the plate boundaries of western North America. *Geophysical Journal International*, 72(1), 59-82.
- International Seismological Centre. (2009). EHB Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>. Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom.
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., ... & Syahbana, A. J. (2020). Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl), 112-136.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of geophysical research*, 82(20), 2981-2987.
- Katili, J. A. (1980). Geotectonics of Indonesia. *A Modern View*, Direktorat Jenderal.
- Kepala BNPB. (2012). Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana Nomor 07 Tahun 2012 tentang Pedoman Pengelolaan Data dan Informasi Bencana Indonesia. Pub. L. No. 7/2012, BN. 2012/NO.1425, PERATURAN. GO.ID, Indonesia.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., ... & Syafi'i, M. A. (2016a). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- Koulali, A., McClusky, S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning, P., ... & Wijanarto, A. B. (2016b). The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: Implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, 458, 69-79.
- Kreemer, C., Holt, W. E., Goes, S., & Govers, R. (2000). Active deformation in eastern Indonesia and the Philippines from GPS and seismicity data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B1), 663-680.

- Li, S., Wang, Q., Yang, S., Qiao, X., Nie, Z., Zou, R., Ding, K., He, P., & Chen, G. (2018). Geodetic imaging mega-thrust coupling beneath the Himalaya. *Tectonophysics*, 747–748:225–238
- McCaffrey, R. (2009). The tectonic framework of the Sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 345-366.
- Meilano, I., Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sarsito, D., Hanifa, R., ... & Fukuda, Y. (2012). Slip rate estimation of the Lembang Fault West Java from geodetic observation. *Journal of Disaster Research*, 7(1), 12-18.
- Meilano, I., Salman, R., Rahmadani, S., Shi, Q., Susilo, S., Lindsey, E., Supendi, P., & Daryono, D. (2021). Source Characteristics of the 2019 Mw 6.5 Ambon, Eastern Indonesia, Earthquake Inferred from Seismic and Geodetic Data, *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–10.
- Meilano, I., Salman, R., Susilo, S., Shiddiqi, H. A., Supendi, P., Lythgoe, K., Tay, C., Bradley, K., Rahmadani, S., Kristyawan, S., & Yun, S. H. (2023). The 2021 MW 6.2 Mamuju, West Sulawesi, Indonesia earthquake: partial rupture of the Makassar Strait thrust. *Geophysical Journal International*, 233(3), 1694-1707.
- Melgar, D., Crowell, B. W., Geng, J., Allen, R. M., Bock, Y., Riquelme, S., ... & Ganas, A. (2015). Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement. *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5197-5205.
- Melgar, D., Fan, W., Riquelme, S., Geng, J., Liang, C., Fuentes, M., ... & Fielding, E. J. (2016). Slip segmentation and slow rupture to the trench during the 2015, Mw8. 3 Illapel, Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 961-966.
- Molnar, P. (1979). Earthquake recurrence intervals and plate tectonics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(1), 115-133.
- Morley, C. K., King, R., Hillis, R., Tingay, M., & Backe, G. (2011). Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity: A review. *Earth-Science Reviews*, 104(1-3), 41-91.
- Murray, J., & Langbein, J. (2006). Slip on the San Andreas Fault at Parkfield, California, over two earthquake cycles, and the implications for seismic hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4B), S283-S303.
- Newcomb, K. R., & McCann, W. R. (1987). Seismic history and seismotectonics of the Sunda Arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B1), 421-439.

- Nikolaidis, R. (2002). *Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System*. University of California, San Diego.
- Nugroho, H., Harris, R., Lestariya, A. W., & Maruf, B. (2009). Plate boundary reorganization in the active Banda Arc-continent collision: Insights from new GPS measurements. *Tectonophysics*, 479(1-2), 52-65.
- Ohta, Y., Hino, R., Inazu, D., Ohzono, M., Ito, Y., Mishina, M., ... & Miura, S. (2012). Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan. *Geophysical Research Letters*, 39(16).
- Pasau, G., -, F., & Tamuntuan, G. H. (2017). Pengamatan Seismisitas Gempabumi di Wilayah Pulau Sulawesi Menggunakan Perubahan Nilai a-b. *Jurnal MIPA*, 6(1), 31.
- Prawirodirdjo, L., Bock, Y., McCaffrey, R., Genrich, J., Calais, E., Stevens, C., ... & Fauzi, R. M. (1997). Geodetic observations of interseismic strain segmentation at the Sumatra subduction zone. *Geophysical research letters*, 24(21), 2601-2604.
- Presiden Republik Indonesia (2007). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2007 Tentang Penanggulangan Bencana. Pub. L. No. 24/2007, LN.2007/NO.66, TLN NO.4723, LL SETNEG: 34 HLM, Indonesia.
- PuSGeN. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Raharja, R., Gunawan, E., Meilano, I., Abidin, H. Z., & Efendi, J. (2016). Long aseismic slip duration of the 2006 Java tsunami earthquake based on GPS data. *Earthquake Science*, 29, 291-298.
- Rahmadani, S., Meilano, I., Susilo, S., Sarsito, D. A., Abidin, H. Z., & Supendi, P. (2022). Geodetic observation of strain accumulation in the Banda Arc region. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 2579-2596.
- Reid, H. F. (1910). ... *Some Lessons of the California Earthquake: And the Prediction of Earthquakes*. V. Hornyánszky.
- Ruhl, C. J., Melgar, D., Grapenthin, R., & Allen, R. M. (2017). The value of real-time GNSS to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 44(16), 8311-8319.
- Savage, J. C., & Burford, R. O. (1973). Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 78(5), 832-845.

- Savage, J. C., & Simpson, R. W. (1997). Surface strain accumulation and the seismic moment tensor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(5), 1345-1353.
- Sharma, Y., Pasari, S., Ching, K. E., Dikshit, O., Kato, T., Malik, J. N., ... & Yen, J. Y. (2020). Spatial distribution of earthquake potential along the Himalayan arc. *Tectonophysics*, 791, 228556.
- Sieh, K., & Natawidjaja, D. (2000). Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28295-28326.
- Silver, P. G., & Jordan, T. H. (1983). Total-moment spectra of fourteen large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B4), 3273-3293.
- Stein, S., & Okal, E. A. (2005). Speed and size of the Sumatra earthquake. *Nature*, 434(7033), 581-582.
- Sudrajat, A. (2023). *Pengembangan Model Analisis Cepat Tensor Momen Gempabumi Berpotensi Tsunami dari Data High-rate GNSS CORS* (Disertasi Doktoral). Institut Teknologi Bandung.
- Supartoyo, S., Tofani, E. (2014). *Katalog gempabumi merusak Indonesia Tahun 1629-2014*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung: 133.
- Supendi, P., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Pesicek, J. D., Thurber, C. H., Abdullah, C. I., ... & Rosalia, S. (2020). Relocated aftershocks and background seismicity in eastern Indonesia shed light on the 2018 Lombok and Palu earthquake sequences. *Geophysical Journal International*, 221(3), 1845-1855.
- Supendi, P., Ramdhan, M., Priyobudi, Sianipar, D., Wibowo, A., Gunawan, M. T., ... & Elsera, E. M. (2021). Foreshock-mainshock-aftershock sequence analysis of the 14 January 2021 (Mw 6.2) Mamuju-Majene (West Sulawesi, Indonesia) earthquake. *Earth, Planets and Space*, 73, 1-10.
- Susilo, S., Meilano, I., Abidin, H. Z., Sapiie, B., Efendi, J., & Wijanarto, A. B. (2016a). Preliminary result of Indonesian strain map based on geodetic measurements. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1730, No. 1). AIP Publishing.
- Susilo, S., Meilano, I., Abidin, H. Z., Sapiie, B., Efendi, J., & Wijanarto, A. B. (2016b). Velocity field from twenty-two years of combined GPS daily coordinate time series analysis. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1730, No. 1). AIP Publishing.
- Thomson, J.J. (1897) Cathode Rays. *Philosophical Magazine*, 44, 293-316.

- Tsuji, Y., Matsutomi, H., Imamura, F., Takeo, M., Kawata, Y., Matsuyama, M., Takahashi, T., Sunarjo, & Harjadi, P. (1995). Damage to coastal villages due to the 1992 Flores Island earthquake tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 144, 481-524.
- U.S. Geological Survey, 2020, Earthquake Lists, Maps, and Statistics, accessed at URL <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/lists-maps-and-statistics>
- Utsu, T. (2002). A list of deadly earthquakes in the World: 1500-2000. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology Part A*, edited by Lee, W.K., Kanamori, H., Jennings, P.C., and Kisslinger, C., pp. 691-717. Academic Press, San Diego.
- Ward, S. N. (1994). A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), 1293-1309.
- Ward, S. N. (1998). On the consistency of earthquake moment rates, geological fault data, and space geodetic strain: the United States. *Geophysical Journal International*, 134(1), 172-186.
- Watkinson, I. M., & Hall, R. (2017). Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards. *Geological Society, London, Special Publications*, 441(1), 71-120.
- Whitten, C. A. (1948). Horizontal earth movement, vicinity of San Francisco, California. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 29(3), 318-323.
- Yong, C. Z., Denys, P. H., & Pearson, C. F. (2017). Present-day kinematics of the Sundaland plate. *Journal of Applied Geodesy*, 11(3), 169-177.

CURRICULUM VITAE



Nama : Irwan Meilano
Tempat/tgl lahir : Bandung, 18 Mei 1974
Kel. Keahlian : Sistem Spasial dan Kadaster
Alamat Kantor : Jl. Ganesha No. 10 Bandung
Nama Istri : Hani Rohani
Nama Anak : Irham Alifa Muhammad
Hasna Rasya Zafira

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- S1 Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung, 1997
- S2 Earth Science, Nagoya University, 2003
- S3 Earth Science, Nagoya University, 2006

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- 2010 – Sekarang : Ketua Pokja Geodesi, Tim Nasional Pemutakhiran Peta Bahaya Gempa Indonesia
- 2011 – 2018 : Koordinator Penelitian, : Graduate Research on Earthquake and Active Tectonics (GREAT) ITB – ANU
- 2011 – 2015 : Sekretaris Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB
- 2015 – 2020 : Sekretaris Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITB
- 2018 – 2020 : Ketua, Pusat Unggulan Iptek (PUI) , Sains dan Teknologi Gempabumi (PUI GEMPA ITB)
- 2020 – Sekarang : Dekan Fakultas Ilmu dan Teknologi Bandung ITB

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS : 1998
- Penata Muda, Gol. IIIa : 1998
- Penata, Gol. IIIc : 2011
- Penata Tk. I, Gol. IIIId : 2014
- Pembina, Gol. IVa : 2018

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya : 1998
- Asisten Ahli : 2001
- Lektor Kepala : 2011
- Guru Besar : 2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Recent Block Motion Models: New Insights into Seismic Hazard and Crustal Deformation of the Eastern Region, WCU, 2024
- Pengembangan Big-Data Kegempaan untuk Analisis Risiko dan Mitigasi Bahaya Gempa di Indonesia, PRIME STeP ADB, 2024
- Model Risiko Keuangan Negara yang Berasal dari Pembiayaan Risiko Bencana, LPDP, 2023 - 2024
- Disaster Risk Financing and Insurance Program An Executive Education Program on Disaster Risk Finance in Indonesia, World Bank, 2023 - 2024
- Pengembangan Big-Data Kegempaan untuk Analisis Risiko dan Mitigasi Bahaya Gempa di Indonesia, PRIME STeP ADB, 2023
- Estimasi Parameter Sumber Gempa Cianjur 5,6M 2022 dan Dampak Kerusakannya, Riset Unggulan ITB, 2023
- Pengurangan Risiko Bencana Berbasis Komunitas Melalui Penguatan Sistem Kesiapsiagaan dalam Kelembagaan RT dan RW di Masyarakat Kp. Longkewang, RT 04 RW 05 Desa Gasol, Kecamatan Cugenang, Kabupaten Cianjur Jawa Barat, Pengabdian Masyarakat ITB, 2023
- Model Risiko Keuangan Negara yang Berasal dari Pembiayaan Risiko Bencana, LPDP, 2022 - 2023
- Teknologi Kecerdasan Artifisial Penginderaan Jauh dalam Analisis Kerusakan Bangunan Akibat Tsunami, Kemendikbudristek, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi, 2022
- Risiko Kerugian Ekonomi Langsung Akibat Bencana Gempabumi di Pulau Jawa, Riset Unggulan ITB, 2022
- Pengembangan Model Bisnis Kawasan Desa Wisata Tangguh Bencana di Desa Cikahuripan - Lembang berkolaborasi dengan

komunitas Bandung Mitigasi Hub (BMH), Pengabdian Masyarakat ITB, 2022

- Model Risiko Keuangan Negara yang Berasal dari Pembiayaan Risiko Bencana, LPDP, 2021 - 2022
- Swakelola Kajian Risiko Bencana Kota Bandung pada Sub Kegiatan Penelitian dan Pengembangan Penataan Ruang dan Pertanahan (Kegiatan dan Pengembangan Bidang Ekonomi dan Pembangunan), Bappelitbangda Kota Bandung, 2021
- Jasa Konsultasi Studi Identifikasi Sesar Aktif dan Gas pada Lokasi PLTMG Nias-2, APLN, 2021
- Model Estimasi Kerugian Langsung Akibat Bencana, Kemenristek BRIN, 2021
- Analisis Model Rotasi Blok Tektonik di Wilayah Indonesia Timur Berdasarkan Data Pengamatan GPS, PMDSU Dikti, 2021
- Pengembangan Estimasi Cepat Risiko Bencana Multi Bahaya dengan Pendekatan Multi Metode Logic Tree, Riset Unggulan ITB, 2021
- Pendampingan Pengurangan Risiko Bencana (Prb) Melalui Pariwisata Di Desa Cikahuripan-Lembang Berkolaborasi Dengan Komunitas Bandung Mitigasi Hub (BMH), Pengabdian Masyarakat ITB, 2021
- Pengembangan Model Risiko Kuantatif Multi Bahaya di Indonesia, Riset Kolaborasi Indonesia, 2021
- Jasa Konsultansi Studi Potensi Bencana Kebumihan (Kegempaan, Tsunami dan Likuifaksi) pada Infrastruktur Ketenagalistrikan Milik PT PLN (Persero), APLN, 2020
- Swakelola Pekerjaan Geohazard dan Tsunami Assesment di Lapangan Senoro dan Tiaka, JOB Pertamina Medco E & P TOMORI Sulawesi, 2020
- Model Estimasi Kerugian Langsung Akibat Bencana, Kemenristek BRIN, 2020
- Identifikasi Potensi Gempabumi di Kawasan Banda Pengamatan Geodetik serta Implikaisnya untuk Pengurangan Risiko Bencana, Riset Unggulan ITB, 2020
- Asesmen Kerentanan Fisik Multi-Bahaya dengan Data Spasial Temporal untuk Estimasi Cepat Risiko Bencana, Riset ITB Multidisiplin, 2020

- Analisis Model Rotasi Blok Tektonik di Wilayah Indonesia Timur Berdasarkan Data Pengamatan GPS, PMDSU Dikti, 2020
- Analisis Risiko Bencana Tsunami dan Gelombang Ekstrem Terhadap Kerugian Sosial Ekonomi di Wilayah Pesisir Pelabuhan Ratu, Sukabumi, Riset Unggulan ITB 2020
- Analisis Model Rotasi Blok Tektonik di Wilayah Indonesia Timur Berdasarkan Data Pengamatan GPS, PMDSU Dikti, 2020
- Pemodelan Interseismik Zona Subduksi di Wilayah Banda Arc Berdasarkan Data Geodetik untuk Pengurangan Risiko Bencana, Kemenristek BRIN, 2020
- Kegiatan Survei Tektonik Regional, BATAN, 2020
- Jasa Konsultansi Studi Potensi Bencana Kebumihan (Kegempaan, Tsunami dan Likuifaksi) pada Infrastruktur Ketenagalistrikan Milik PT PLN (Persero), APLN, 2019
- Analisis Model Rotasi Blok Tektonik di Wilayah Indonesia Timur Berdasarkan Data Pengamatan GPS, PMDSU Dikti, 2019
- Identifikasi Potensi Gempabumi di Kawasan Banda Pengamatan Geodetik serta Implikaisnya untuk Pengurangan Risiko Bencana, Riset Unggulan ITB, 2019
- Pendampingan Komunitas Bandung Mitigasi Hub (BMH) dalam Pembangunan Desa Tangguh Bencana, di Desa Suntenjaya Kec. Lembang, Pengabdian Masyarakat ITB, 2019
- Implementasi Model Deformasi untuk Pengurangan Risiko Ekonomi akibat Bencana Gempabumi, Riset LPDP, 2019
- CR 1901 – Monitoring land subsidence in Semarang, Central Java, Indonesia using GPS surveys and InSAR techniques, AUN/SED NET, 2019
- Interseismic Coupling and Seismic Potential Along the Java Subduction Zone from GPS Observation, WCU, 2019
- Implementasi Model Deformasi untuk Pengurangan Risiko Ekonomi akibat Bencana Gempabumi, Riset LPDP, 2018
- Long Term Monitoring Land Subsidence di Jakarta, PPMI, 2018
- Perubahan Coulomb Failure Function di Sesar Sumatra sebagai Akibat Deformasi Gempa pada Zona Subduksi, Riset Unggulan ITB, 2018

- Pendampingan Forum Kesiapsiagaan Dini Masyarakat Penanggulangan Bencana (FKDM-PB) Kabupaten Bandung Barat dalam Pengembangan Peta Risiko Gempabumi Akibat Patahan, Pengabdian Masyarakat ITB, 2018

VI. PUBLIKASI

- Publikasi Internasional Terindeks Scopus (157 Paper H-index: 23)
 - Jurnal Internasional (Sejak 2018)
 1. Evaluation of earthquake potential using a kinematic crustal block motion model in Java, Indonesia, based on GNSS observation, Raharja, R., Ito, T. Irwan Meilano, *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 11, 100171, Q2, 25900560, 2024
 2. GNSS land subsidence observations along the northern coastline of Java, Indonesia Susilo, S., Salman, R., Hermawan, W., Irwan Meilano, Yun, S.H., *Scientific Data*, 10(1), 421, Q1, 20524463 ,2023
 3. Diverse Ionospheric Disturbances by the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption Observed by a Dense GNSS Array in New Zealand, Muafiry, I.N., Wijaya, D.D., Irwan Meilano, I., Heki, K. *Journal of Geophysical Research (JGR) : Space Physics*, 128(11), e2023JA031486, Q1, 0956540X ,2023
 4. Early postseismic deformation of the 2018 Lombok, Indonesia, earthquake sequence constrained by GPS data, Fauziyyah, R., Gunawan, E., Widiyantoro, S., Meilano, I., Syamsuddin, *Journal of Geodynamics*, 156, 101971, Q1, 02643707, 2023
 5. The 2021 MW 6.2 Mamuju, West Sulawesi, Indonesia Earthquake: Partial rupture of the Makassar Strait Thrust, Irwan Meilano, Rino Salman, S. Susilo, H.i Ash Shiddiqi, Pepen Supendi, K. Lythgoe, Cheryl Tay, K. Bradley, S. Rahmadani, S. Kristyawan, Sang-Ho Yun, *Geophysical Journal International*, Q1, 0956540X, 2023
 6. Machine learning remote sensing using the random forest classifier to detect the building damage caused by the Anak Krakatau Volcano tsunami, Virtriana, R., Harto, A.B., Atmaja, F.W., Irwan Meilano, Mustika, F.C., Suminar, W., *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), pp. 28–51, Q1 19475713,, 2023

7. Coastal tides measurement in Indonesia using GNSS-Reflectometry, Agung Syetiawan, Dudy Darmawan Wijaya, Irwan Meilano, *Regional Studies in Marine Science*, 56, Q2, 23524855, 2022
8. Rapid Magnitude Estimation Of The August 5, 2018, Lombok Earthquake Using High-Rate Gnss Data, Irwan Meilano, Susilo Susilo, Dina Sarsito, *International Journal of GEOMATE*, 23 (98), Q3, 21862982, 2022
9. Ionospheric Disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption above Indonesia from GNSS-TEC Observations, Ihsan Naufal Muafiry, Irwan Meilano, Kosuke Heki, Dudy D. Wijaya, Kris Adi Nugraha, *Atmosphere*, 13 (10), Q2, 20734433, 2022
10. Geodetic observation of strain accumulation in the Banda Arc region, Suchi Rahmadani, Irwan Meilano, Susilo Susilo, Dina A. Sarsito, Hasanuddin Z. Abidin, Pepen Supendi, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13 (1), Q1, 19475705, 2022
11. Detection of seismic wave signal using singlemode-multimode-singlemode fiber probe, M. Yasin , Retna Apsari, Kristia Ningsih, Y. G. Y. Yhuwana, M. Zulkarnaen, Mitra Djamal, Irwan Meilano, Maria Evita, Nina Siti Aminah, Wahyu Srigutomo, Ari Setiawan, Herlan Darmawan, Imam Suyanto, Wahyudi, Wiwit Suryanto, Heriansyah Putra, Irzaman, Perdinan, S. W. Harun, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 24 (5-6), Q4, 14544164, 2022
12. Developing Community Disaster Resilience in the Lembang Fault Area, Indonesia: Lessons Learned from Japanese Experience, Abdulharis, Rizqi, Handayani, Alfita Puspa, Isouchi, Chikako, Meilano, Irwan, *Applied Sciences*, 12 (3), Q2, 20763417, 2022
13. Tsunami Potential Prediction using Seismic Features and Artificial Neural Network for Tsunami Early Warning System, Astri Novianty, Carmadi Machbub, Sri Widiyantoro, Irwan Meilano, Daryono, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12 (1), Q3, 20885334, 2022

14. Rapid Estimation of Earthquake Magnitude and Source Parameters using Genetic Algorithms, Astri Novianty, Irwan Meilano, Carmadi Machbub, Sri Widiyantoro, and Susilo Susilo, *Applied Sciences*, 11 (24), Q2, 20763417, 2021
15. Quality control in GNSS reflectometry method for tide observations, Syetiawan, A., Wijaya, D.D., Meilano, I, *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19 (6), Q3, 16936930, 2021
16. Development of volcano warning system for kelud volcano, Maria Evita, Azka Zakiyyatuddin, Sensius Seno, Nina Siti Aminah, Wahyu Srigutomo, Irwan Meilano, Ari Setiawan, Herlan Darmawan, Imam Suyanto, Irzaman Irzaman, Mohammad Yasin, Perdinan Perdinan, Retna Apsari, Wahyudi Wahyudi, Wiwit Suryanto, Mitra Djamal, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53 (2), Q1, 23375779, 2021
17. The Application of Copula Continuous Extension Technique for Bivariate Discrete Data: A Case Study on Dependence Modeling of Seismicity Data, Jose Rizal, Agus Y. Gunawan, Supto W. Indratno, Irwan Meilano, *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 8 (5), Q2, 2369-0739 , 2021
18. Source Characteristics of the 2019 Mw 6.5 Ambon, Eastern Indonesia, Earthquake Inferred from Seismic and Geodetic Data, Irwan Meilano, Rino Salman, Suchi Rahmadani, Qibin Shi, Susilo Susilo, Eric Lindsey, Pepen Supendi, Daryono Daryono, *Seismological Research Letters*, 96 (6), 2021, Q1, 08950695, 2021
19. Foreshock mainshock–aftershock sequence analysis of the 14 January 2021 (Mw 6.2) Mamuju–Majene (West Sulawesi, Indonesia) earthquake, Supendi P, Ramdhan M., Priyobudia, Sianipar D., Wibowo A., Gunawan M.T., Rohadi S., Riama N.F., Daryonoa, Prayitno B.S., Murjaya J., Karnawati D., Meilano I., Rawlinson N., Widiyantoro S., Nugraha A.D., Marliyani G.I., Palgunadi K.H., Elsera E.M, *Earth, Planets and Space*, 73 (1), Q1, 13438832, 2021
20. The 2018 Mw7.5 Palu 'supershear' earthquake ruptures geological fault's multisegment separated by large bends:

Results from integrating field measurements, LiDAR, swath bathymetry and seismic-reflection data, Danny Hilman Natawidjaja, Mudrik R Daryono, Gegar Prasetya, Udrek, Philip L-F Liu, Nugroho Dwi Hananto, Widjo Kongko, Wahyu Triyoso, Anggraini Rizkita Puji, Irwan Meilano, Endra Gunawan, Pepen Supendi, Astyka Pamumpuni, Mashyur Irsyam, Lutfi Faizal, Sri Hidayati, Benyamin Sapiie, Mipi A Kusuma, Sukardan Tawil, *Geophysical Journal International*, 224 (1, 985-1002), Q1, 0956540x

21. Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia, Masyhur Irsyam, Phil R Cummins, M Asrurifak, Lutfi Faizal, Danny Hilman Natawidjaja, D.H, Sri Widiyantoro, Irwan Meilano, Wahyu Triyoso, Ariska Rudiyanto, Sri Hidayati, M Ridwan, Nuraini Rahma Hanifa, Arifan Jaya Syahbana, *Earthquake Spectra*, 36 (1, 112-136), Q1, 87552930, 2020
22. Modeling of Earthquake Hazard for Three Seismogenic Areas on Sumatra Island: A Comparison of Some Discrete Counts Time-series Modelling, Jose Rizal; Gunawan Agus; WahyuIndratno Supto; Irwan Meilano, *Disaster Advances*, 13 (8, 44-54), Q4, 0974262X, 2020
23. Earthquakes and tsunamis caused by low-angle normal faulting in the Banda Sea, Indonesia, Phil R Cummins, Ignatius R Pranantyo, Jonathan M Pownmall, Jonathan D Griffin, Irwan Meilano, Siyuan Zhao, *Nature Geoscience*, 13 (4, 312-318), Q1, 17520894, 2020
24. An evaluation of the possibility of tectonic triggering of the Sinabung eruption, Estu Kriswati, Irwan Meilano, Masato Iguchi, Hasanuddin Z Abidin, Surono, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 382 (224-234), Q1, 03770273, 2019
25. Postseismic deformation following the 2 July 2013 M w 6.1 Aceh, Indonesia, earthquake estimated using GPS data, Endra Gunawan, Sri Widiyantoro, Zulfakriza, Irwan Meilano, Cecep Pratama, *Journal of Asian Earth Sciences*, 177 (146-151), Q1, 13679120, 2019
26. Coseismic slip distribution of the 2 July 2013 Mw 6.1 aceh, Indonesia, earthquake and its tectonic implications, Endra

Gunawan; Sri Widiyantoro; Shindy Rosalia; Mudrik Rahmawan Daryono; Irwan Meilano; Pepen Supendi; Takeo Ito; Takao Tabei; Fumiaki Kimata; Yusaku Ohta; Nazli Ismail, Bulletin of the Seismological Society of America, 108 (4), Q1, 0037-1106, 2018

➤ Prosiding Internasional (Sejak 2018)

1. Detection of Surface Displacement of Mentawai Earthquake Mw7.8, October 25, 2010, using High Rate (HR) 1Hz GNSS Data, Thomas Hardy, Susilo, Irwan Meilano, Hasanuddin Z Abidin, Supriyanto Rohadi, Ajat Sudrajat, K Retno Agung, Alpon Sepriando Manurung, Pupung Susilanto, Dwikorita Karnawati, 7th Geomatics International Conference, GEOICON 2022, 1127 (1), 17551307, 2023
2. Peak Ground Velocity (PGV) estimation of Mw 5.6 Cianjur earthquake November 11, 2022 using Global Positioning System (GPS), Meilano, Irwan, Susilo, Susilo, Wibowo, Sidik Tri, 2023 2nd International Seminar on Earth Sciences and Technology, ISEST 2023, Bandung, 1245 (1), 17551307, 2023
3. Identifying the potential development of HAZUS model as an earthquake disaster loss model for school buildings in Indonesia, Milyardi R., Pribadi K.S., Meilano I., Lim E., 5th International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation, ICEEDM 2022, Yogyakarta, , 1244 (1), 17551307, 2023
4. Spatial Analysis of Causative Factors for Landslide Susceptibility on Java Island, Kusuma R.J., Meilano I., Sadisun I.A., Fitri I.H., 8th Geomatics International Conference, GeoICON 2023, Surabaya, 1276 (1), 17551307, 2023
5. Spatial analysis of volcanic ash distribution due to volcanic eruption in java island, Putranto M.H.R., Meilano I., Virtriana R., Abdurrachman M. Adiwijaya R.F. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48 (M-3), 16821750, 2023
6. Earthquake Risk Study on Residential Buildings in West Jakarta using the Event-Based Risk Analysis Method, G Lambang-Goro, M Irsyam, M Asrurifak I Meilano 4th

- International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment, SIBE 2022, 1065 (1), 17551307, 2022
7. Geodetic Strain of the Baribis Fault Zone in West Java, Indonesia, S Susilo, I Meilano, S T Wibowo, A Syetiawan, Y A L Gaol, D Ramdani, A Julzarika” 2022 UN4DRR International Symposium on Disaster Risk Reduction, Mitigation and Environmental Sciences, UN4DRR 2022, Bogor, 1109 (1), 17551307, 2022
 8. Crustal deformation of Eastern Indonesia regions derived from 2010- 2018 GNSS Data, Suchi Rahmadani, Irwan Meilano, Dina A. Sarsito and Susilo, The 3rd Southeast Asian Conference on Geophysics 3-5 November 2020, Bandung, 873 (11), 17551307, 2021
 9. Analysis of Tectonic Plate Velocity Variations in the Sunda Strait Based on GPS Time-series Data, Y Dhira, I Meilano, D W Dudy, The 3rd Southeast Asian Conference on Geophysics 3-5 November 2020, Bandung, 873 (11), 17551307, 2021
 10. Analysis of Damage to Buildings affected by the Tsunami in the Palu Coastal Area Using Deep Learning, Irwan Meilano, Achmad Ikbal Rahadian, Deni Suwardhi, Wulan Suminar, Fiza Wira Atmaja, Cecep Pratama, Euis Sunarti, Setya Haksama, Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS), Jakarta, pp. 95-97, 978-1-6654-4756-0, 2020
 11. Estimating the casualties of the earthquake caused by the Lembang Fault in Coblong, Bandung, Indonesia, Irwan Meilano, Puti Nabila Riyadi, Akhmad Riqqi, Febriana Kuscahyadi, The Fifth International Conferences of Indonesia Society for Remote Sensing, Bandung, 500 (10), 17551307, 2020
 12. Sunda and sumatra block motion in itrif 2008, Henri Kuncoro, Irwan Meilano, Susilo Susilo, International Symposium on Global Navigation Satellite System 2018 (ISGNSS 2018) Bali, 94 (04006), 22671242, 2019
 13. Investigating the tectonic influence to the anthropogenic subsidence along northern coast of Java Island Indonesia using GNSS data sets, Heri Andreas, Hasanuddin Zainal

Abidin, Dina Anggreni Sarsito, Irwan Meilano, Susilo Susilo, International Symposium on Global Navigation Satellite System 2018 (ISGNSS 2018) Bali, 94 (04005), 22671242, 2019

- Publikasi Nasional (Sejak 2018)
 - Jurnal Nasional :
 - Geodetic Slip Rate Estimates For The Kumering and Semangko Segments of The Sumatera Fault, Irwan Meilano, Susilo Susilo, Endra Gunawan, Budi Parjanto, SINTA (S2), 2021
 - Coseismic and postseismic deformation from the 2007 Bengkulu earthquake based on GPS Data, Irwan Meilano, Susilo Susilo, Endra Gunawan, Suchi Rahmadani, SINTA (S2), 2021
 - Analisis Potensi Gempa di Selatan Pulau Jawa Berdasarkan Pengamatan GPS, Irwan Meilano, Agidia L. Tiaratama, Dudy D. Wijaya, Putra Maulida, S. Susilo, Intan H. Fitri, SINTA (S2), 2020
 - Perencanaan Lokasi Pengungsian untuk Korban Banjir di Kabupaten Bandung, I Gst Ngr Yoga Jayantara, Irwan Meilano, Irwan Gumilar, SINTA (S4), 2020
 - Analisa Pola Pergerakan Pulau Sumatera Berdasarkan Pengamatan Data GPS 2016 - 2017 guna Mengetahui Aktivitas Seismik, Dwi Arini, Irwan Meilano, Zamzam Akhmad Jamaluddin Tanuwijaya, SINTA (S4), SINTA (S4), 2019
 - Buku Referensi
 - Gempabumi di Indonesia Aspek Spasial dan Kerugian Ekonomi, 2022
 - Historis Kebencanaan dan Estimasi Potensi Kerusakan serta Kerusakan serta Kerugian Ekonomi Langsung di Indonesia 2020
 - Book Chapter
 - Kajian Gempa Cianjur Jawa Provinsi Barat 21 November 2022 (M5,6) : Pemodelan Awal Sumber Gempa Cianjur Berdasarkan data Geodetik, Irwan Meilano dkk, 2023

- Pembelajaran Penanganan darurat Bencana Gempabumi Lombok: Pemanfaatan Teknologi Informasi Dalam Penanganan Darurat Bencana, Irwan Meilano, 2018
 - Dalam Buku Kajian Gempa Pidie Jaya Provinsi Aceh, Indonesia : Observasi Geodetik dan Pemodelan Deformasi Gempa Pidie Jaya 2016, 2017; Irwan Meilano, N. Rahma Hanifa, Susilo, Agustan, Endra Gunawan, Hasanuddin Z. Abidin, Nasrudin, Ayu Nur Safi'i, Yustisi Ardhitasari Lumban Gaol, A. Sulaiman, Bagoes Dwi Ramdhani, Refi Rizqi Ramadian, Suchi Rahmadhani, Alwidya Angga Savitri, Putra Maulida, Rio Raharja, 2017
 - Buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia : Tektonik Geodesi Indonesia, Irwan Meilano, Endra Gunawan, nuaini Rahma Hanifa, Susilo, Joni Effendi, Daryono, Cecep Sulaiman, Akhmad Solihin, Pandu Adi Minarno, Alwidya Angga Safitri, Suchi Rahmadani Putra Maulida, Yola Asis Herawati, Refi Rizqi Ramadian, Dina Anggreni Sarsito, Teguh Purnama Siddiq, Hasanuddin Zainal Abidin, 2017
- Haki
- Program Komputer: GPS Viewer Ver1.0, Carmadi Machbub, Irwan Meilano, Astri Novianty, 2020
 - Peta: Peta Tingkat Bahaya Segmen-segmen Sumber Gempa Besar di Zona Megathrust Sumatra, Terhadap Kejadian Gempabumi Utama Bermagnitudo Mw Lebih Besar atau Sama Dengan 4.6 dengan Kedalaman Kurang Atau Sama Dengan 70 Km, Jose Rizal, Agus Yodi Gunawan, Supto Wahyu Indratno, Irwan Meilano, 2022
 - Multi Hazard Event Based Risk Assessment Platform For Disaster Risk Financing In Indonesia (AI-Risiko), Fiza Wira Atmaja, Irwan Meilano dkk, 2023
 - Big-Data Kegempaan Untuk Analisis Risiko Dan Mitigasi Skenario Bencana Gempa Di Indonesia (EQ-SCEN-ID), Fiza Wira Atmaja, Irwan Meilano dkk, 2023

VII. PENGHARGAAN

- Best Student Presentation, Geodetic Society of Japan (GSJ), Fall Meeting 2003
- Award for Contribution to Geophysical Knowledge, Indonesian Association of Geophysicists (HAGI), 2012
- Award for Development of Geodesy and Geomatics. Indonesian Surveyor Association (ISI), 2014
- Research Award, Institut Teknologi Bandung (ITB), 2016
- Indroyono Susilo Award, The Fifth International Conferences of Indonesia Society for Remote Sensing (ICOIRS), 2019
- Satyalanca Karya Satya 20 Tahun (Presiden RI), 2020
- Penghargaan Indonesia Geospatial Award kategori Young Inspirational, HxGN LIVE Indonesia 2023

VIII. SERTIFIKASI

Sertifikasi Program Profesi Insinyur: Pada tanggal 18 Juli 2020 diberikan gelar profesi Insinyur (Ir.) oleh Direktorat Pendidikan Non Reguler Institut Teknologi Bandung.



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎️ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉️ office@itbpress.id
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id FgbITb FGB_ITB
 @fgbitb_1920 Forum Guru Besar ITB

ISBN 978-623-297-424-1

