

# PENENTUAN SUMBER GEMPA LOKAL BERDASARKAN WAKTU TIBA GELOMBANG P DAN S: STUDI KASUS LENGAN UTARA PULAU SULAWESI

A.M.Miftahul Huda<sup>1\*</sup>, Ain Sahara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sekolah Tinggi Teknologi Migas

Jl. Transad KM 9 No 76 RT 08 Karangjoang, Balikpapan Utara, Balikpapan, Kalimantan Timur,  
Indonesia

E-mail\*: mustafid13@gmail.com

## ABSTRACT

*Determination of the source of the earthquake has been carried out in the north arm of Sulawesi. The earthquakes analyzed were a local earthquake with a magnitude of more than 5 M. The source of the earthquake is the main variable in earthquake disaster mitigation. Determining the source of the earthquake using the arrival time of the P/S wave. The arrival times of the P/S waves were validated with a Wadati's chart to test the convergence of the data. Determination of the source of the earthquake was analyzed using HYPOINVERSE. The source of the earthquake obtained has variations in depth and position. Comparison with the catalog shows a significant difference.*

*Keywords: HYPOINVERSE, north-arm Sulawesi, travel time, Wadati.*

## ABSTRAK

Penentuan sumber gempa telah dilakukan di lengan utara sulawesi. Gempa yang dianalisa adalah gempa lokal dengan magnitudo lebih dari 5 M. Sumber gempa merupakan variable utama dalam mitigasi bencana kegempaan. Penentuan sumber gempa memanfaatkan waktu tiba gelombang P/S. Waktu tiba gelombang P/S divalidasi dengan diagram wadati untuk menguji konvergensi data. Penentuan sumber gempa dianalisa menggunakan HYPOINVERSE. Sumber gempa yang didapatkan memiliki variasi kedalaman dan posisi. Perbandingan dengan katalog menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan.

Kata kunci: HYPOINVERSE, lengan utara sulawesi, waktu tiba gelombang, wadati

## PENDAHULUAN

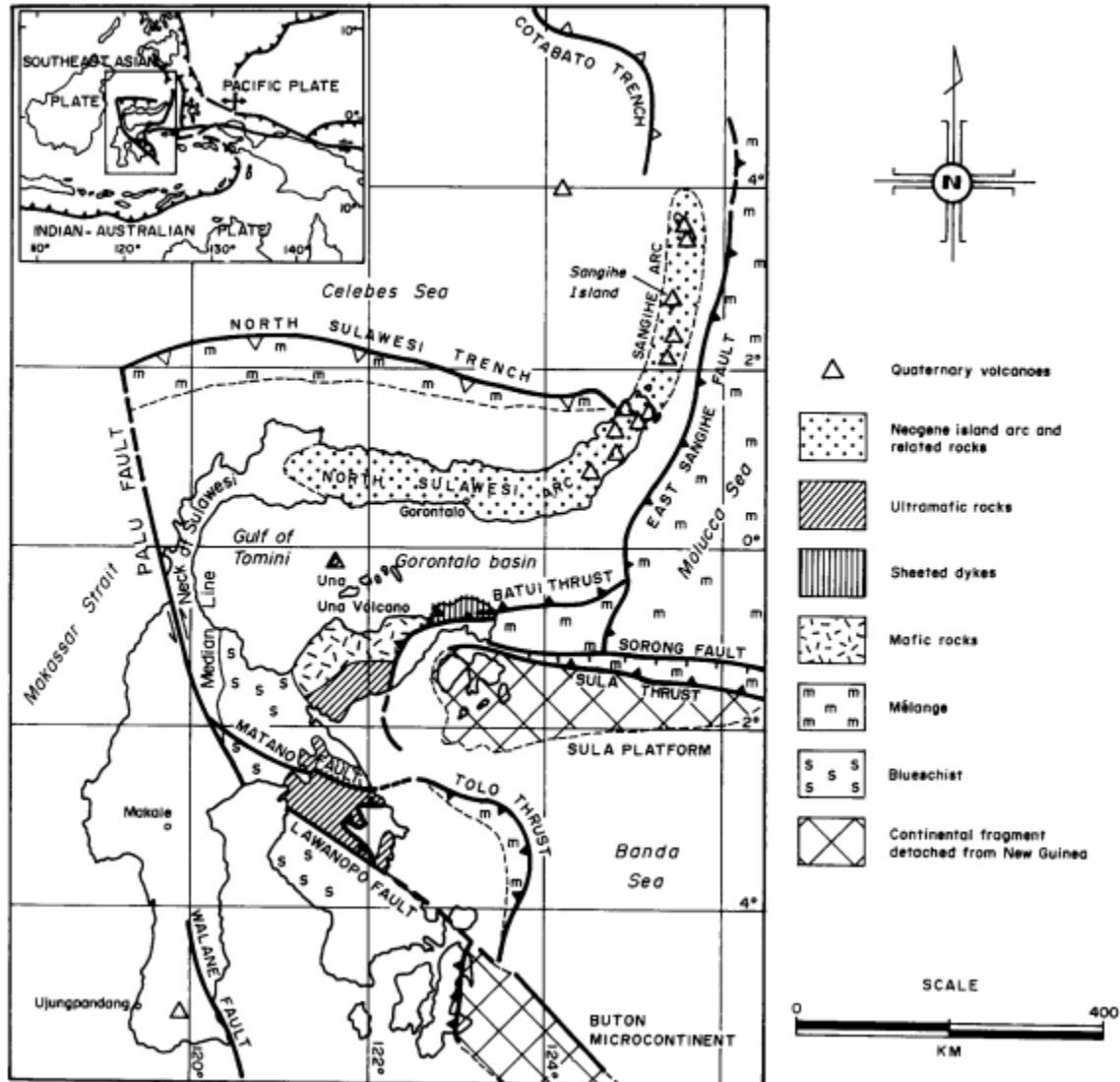
Pulau Sulawesi merupakan pulau yang sangat unik dan memiliki lengan. Pulau Sulawesi lebih mirip huruf K jika diproyeksikan dari satelit. Secara historis, pulau sulawesi terbentuk dalam empat tahapan (Rachman et.al., 2020) dan tersusun melalui gabungan lempeng dunia. Diantara

lempeng pembentuk Pulau Sulawesi adalah Lempeng Pasifik, Eurasia, dan Australia-Hindia (Panggabea dan Surono, 2011).

Intensitas kegempaan pulau Sulawesi berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia sangat tinggi. Setiap hari dapat kita temukan kejadian kegempaan dengan skala magnitudo yang beragam. Gempa dengan magnitudo yang besar, periode antara 2008-2018 tercatat 13 kejadian (Huda dan Ridlo, 2019), menyebabkan berbagai kerusakan bangunan dan korban jiwa.

Kondisi tektonik dan geologi yang ditampilkan Gambar 1 menunjukkan potensi bencana tektonik yang cukup tinggi untuk wilayah Pulau Sulawesi (Kavalieris dkk, 1992). Salah satu wilayah di Sulawesi yang sangat sering terjadi kegempaan adalah lengan utara pulau Sulawesi, hal ini akibat uniknya geologi penyusun wilayah tersebut (Massinai<sup>a</sup> dkk, 2019). Lengan utara Pulau Sulawesi (Gambar 2) memiliki beberapa wilayah yang penduduknya cukup padat, tersusun atas Provinsi Gorontalo, Provinsi Sulawesi Utara dan sebagian Provinsi Sulawesi Tengah. Pada zona ini, kekayaan sumber daya alam cukup melimpah dengan kondisi populasi yang besar. Detail geologi dan tektonik wilayah lengan atas (lengan utara) Sulawesi diterangkan pada Carlile dkk (1990), Bachri (2011), Hennig dkk (2014), Nugraha dan Hall (2017) dan Gorsel (2018).

Setiap kejadian gempa yang dilaporkan oleh BMKG senantiasa menunjukkan waktu, lokasi, magnitudo dan kedalaman gempa. Lokasi permukaan gempa sering dinamakan sebagai episenter dan posisi sumber gempa terjadi dinamakan sumber gempa. Sumber gempa memiliki atribut waktu, kedalaman dan lintang-bujur. Penentuan sumber gempa merupakan kasus yang tidak linier (non-linear). Sehingga penentuannya seringkali dilakukan melalui pendekatan-pendekatan secara matematis.



**Gambar 1.** Kondisi geologi dan tektonik wilayah Pulau Sulawesi (terdapat Patahan Palu, Sangihe Timur, Lawanopo, Sorong dan Walane; Sesar Batui, Tolo, dan Sula). Index menunjukan Sulawesi tersusun atas lempeng Asia Tenggara, Lempeng pasifik, dan Lempeng Hindia-Australia (Kavalieris,1992)

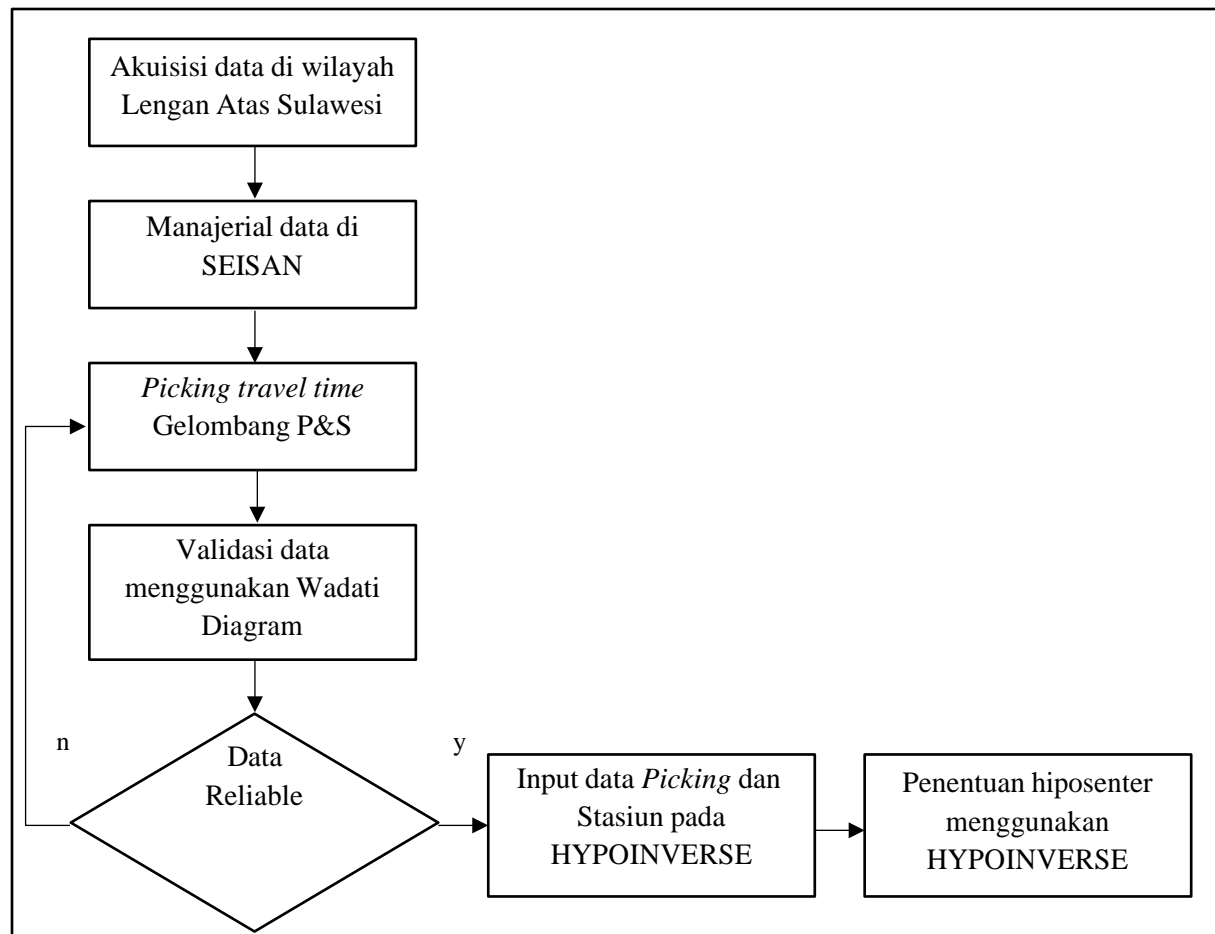
Perkembangan pendekatan untuk menentukan posisi sumber gempa ditandai dengan berbagai perangkat lunak yang telah dibuat oleh peneliti di dunia dalam berbagai macam bahasa pemrograman. Program paling populer adalah HYPO71PC (Lee dan Valdes, 1985) yang juga telah mengalami berbagai perkembangan. Metode Geiger disematkan di dalam program tersebut untuk menentukan lokasi sumber gempa. Perkembangan selanjutnya adalah penggunaan HYPOINVERSE yang memanfaatkan untuk iterasi penentuan sumber gempa (Klein, 2002; Hurukawa, 2012). Penelitian ini ditujukan untuk menganalisa laporan kejadian gempa-gempa dengan magnitudo  $\geq 5$  menggunakan aturan gempa lokal. Oleh karenanya HYPOINVERSE

digunakan dalam kegiatan penentuan sumber gempa karena program tersebut telah teruji untuk gempa lokal dengan hasil yang baik (Ottemöller, 2021).

## METODA PENELITIAN

Data seismogram digital yang digunakan berasal dari IRIS-WILBER3 (<https://ds.iris.edu/wilber3/>). Zona kegempaan terhadap stasiun diseleksi untuk memenuhi syarat kejadian gempa lokal. Aturan yang telah dikembangkan dan disepakati oleh seismologis bahwa kejadian gempa termasuk gempa lokal jika jarak terhadap stasiun  $< 10^\circ$  (Kulhanek, 2012). Data dianalisis menggunakan perangkat analisis gelombang gempa berupa perangkat lunak SEISAN, mulai dari proses *picking*, validasi, dan penentuan sumber gempa yang memanfaatkan code program HYPOINVERSE (Ottemöller dkk, 2021). Penggunaan SEISAN dijalankan dengan beberapa prosedur. Prosedur tersebut meliputi, Proses input data ke dalam data base SEISAN, pembacaan data dalam bentuk grafik, proses *picking* data, pengujian sumber gempa. Proses penentuan sumber gempa di wilayah lengan utara Sulawesi mengikuti diagram alir gambar 2.

Proses penentuan sumber gempa menggunakan waktu tiba gelombang P dan S seringkali digunakan oleh peneliti. Proses ini harus hati-hati dan berdampak besar, makanya seringkali hanya digunakan gelombang P dalam penentuan sumber gempa karena kemudahan dalam melakukan *Picking*. Meskipun demikian data gelombang S dapat meningkatkan hasil penentuan sumber gempa. Pada proses ini kesalahan dalam data *picking* akan berdampak pada proses penentuan sumber gempa suatu gempa (Huda dan el-Ridho, 2019; Gomberg dkk, 1990). Oleh karenanya data *picking* dilakukan validasi dengan menggunakan metode Wadati (Hurukawa, 2012; Supardiyono dkk, 2014; Massinai<sup>a</sup> dkk, 2019). Selain data *picking* model bumi juga sangat berperan dalam penelitian ini. Kami mencoba menggunakan model standard dalam HYPOINVERSE untuk model bumi, yaitu IASP91. Model bumi ini juga pernah digunakan oleh Massinai<sup>a</sup> dkk (2019) untuk menganalisa gempa Palu.

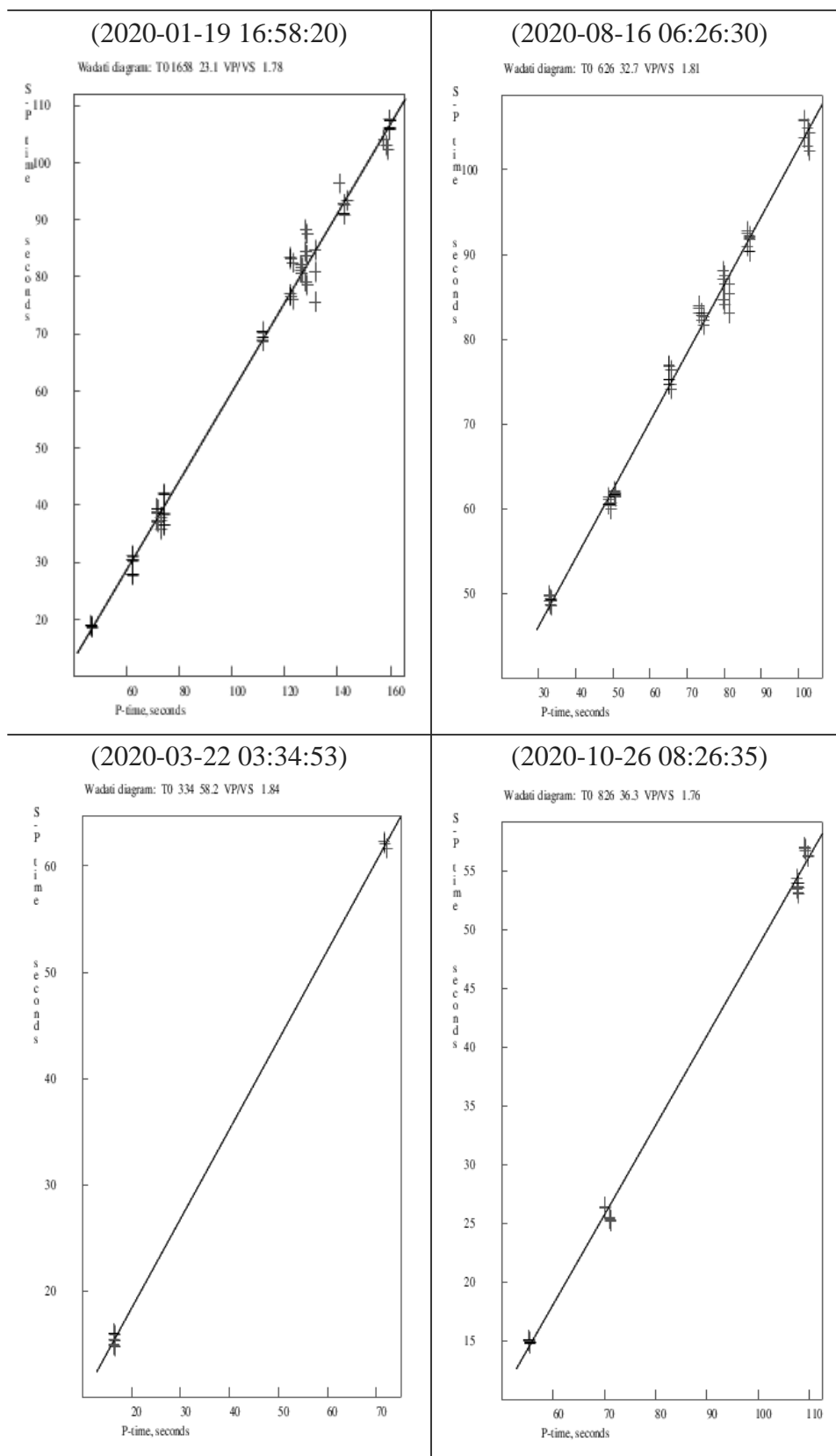


**Gambar 2.** Diagram alir penentuan sumber gempa

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### *Picking* Data dan Validasi

Hasil *picking* waktu tiba gelombang P dan S untuk kejadian kegempaan di zona penelitian sebagaimana terlihat pada gambar 3. Hasil data *picking* yang dilakukan secara manual, memiliki konvergensi yang cukup bagus apabila dibandingkan dengan penggunaan *autophase picking* (Huda dkk, 2021) pada data yang sama. Nilai *root mean square* (RMS) menggunakan metode manual lebih kecil dan kondisi data terlihat lebih sejajar pada garis slope diagram Wadati. Nilai RMS dari *autophase picking* dengan manual *picking* yang menurun dapat disebabkan oleh beberapa faktor, utamanya adalah kondisi data dan keterbacaan data itu sendiri. Data yang terbaca jelas, tentu akan memberikan dampak yang positif pada penggunaan *autophase picking* maupun manual *picking*.



Gambar 3. Diagram Wadati dari hasil *picking*.

Tabel 1. Nilai RMS manual *picking*

| Kejadian              | Vp/Vs | RMS  | Corr  |
|-----------------------|-------|------|-------|
| (2020-03-22 03:34:53) | 1.84  | 0.41 | 1.000 |
| (2020-08-16 06:26:30) | 1.81  | 1.32 | 0.997 |
| (2020-01-19 16:58:20) | 1.78  | 2.28 | 0.997 |
| (2020-10-26 08:26:35) | 1.76  | 0.86 | 0.999 |

Hasil validasi dengan metode wadati pada tabel 1 memberikan kepercayaan terhadap hasil *picking* data sehingga layak untuk dilanjutkan ke tahapan penentuan sumber gempa. Nilai RMS data manual *picking* dapat dilihat memiliki nilai terbaik pada 0.41 dan terbesar pada 2.28. Vp/Vs yang didapatkan memberikan informasi lokasi tersebut cukup memiliki keseragaman penyusun batuan dengan rentang terkecil sampai terbesar sejumlah 0.6. Terlihat pula korelasi data terbaik pada data dengan nilai RMS 0.41 yaitu sebesar 1.00 dan ini menunjukkan data valid untuk diproses lebih lanjut.

### Perbandingan Data Estimasi dengan Katalog Kegempaan

Hasil penentuan sumber gempa terlihat cukup signifikan berbeda dengan katalog gempa. Hal ini dapat dilihat dari tabel 2. Data kejadian (2020-03-22 03:34:53) dan (2020-10-26 08:26:35) tidak memberikan output sesuai dengan yang diharapkan. Hal ini dikarenakan pada prosesnya untuk penentuan sumber gempa lokal dengan HYPOINVERSE setidaknya harus ada empat stasiun berbeda yang harusnya digunakan. Namun pada data kegempaan tersebut data stasiun perekam memang cukup, namun kondisi rekaman data terekam kurang dari jumlah minimum yang terbaca dengan jelas. HYPOINVERSE memiliki ketentuan jumlah minimal stasiun perekam untuk dapat digunakan dalam penentuan sumber gempa meskipun penggunaan 1 stasiun perekam juga dapat digunakan untuk menentukan sumber gempa (Klein, 2002). Hal ini sejalan dengan kebanyakan peneliti yang akan menyarankan penggunaan lebih banyak stasiun berbeda.

Pada tabel 1 dan 2 memuat nilai data RMS dan estimasi penentuan sumber gempa menggunakan HYPOINVERSE. RMS yang lebih rendah tidak memberikan output lokasi sumber gempa, namun RMS yang lebih besar memberikan output. Anomali tersebut bukan karena terjadi ketidakselarasan hasil validasi *picking* dengan proses penentuan sumber gempa. Akan tetapi lebih kepada persyaratan yang tidak terpenuhi untuk dapat melaksanakan proses penentuan sumber gempa menggunakan HYPOINVERSE. Hal ini menunjukkan meskipun hasil *picking* bagus,

namun syarat minimum stasiun perekam untuk menjalankan HYPOINVERSE tetap harus terpenuhi.

Tabel 2. Lokasi Sumber gempa terlapor dan hasil estimasi menggunakan HYPOINVERSE

| Kejadian              | IRIS-WILBER3<br>( <a href="https://ds.iris.edu/wilber3/">https://ds.iris.edu/wilber3/</a> ) |                  | Estimasi<br>HYPOINVERSE |                  |
|-----------------------|---|------------------|-------------------------|------------------|
|                       | <i>Latitude</i>   | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i>         | <i>Longitude</i> |
| (2020-03-22 03:34:53) | 1.34°   | 121.97°          | -*                      | -*               |
| (2020-08-16 06:26:30) | 1.69°   | 122.98°          | -5.009°                 | 119.747°         |
| (2020-01-19 16:58:20) | -0.10°  | 123.80°          | 0.629°                  | 123.068°         |
| (2020-10-26 08:26:35) | 0.58°   | 121.54°          | -*                      | -*               |

Catatan= \* data stasiun tidak mencukupi untuk dilakukan estimasi menggunakan HYPOINVERSE, stasiun perekam minimal 4.

## KESIMPULAN

Penentuan sumber gempa menggunakan waktu tiba gelombang P dan S berhasil dilakukan pada gempa lokal di wilayah utara lengan Sulawesi. Diagram Wadati memberikan keyakinan atas hasil *picking* data waktu tiba gelombang P dan S. Penentuan sumber gempa menggunakan HYPOINVERSE dapat dilakukan jika jumlah stasiun perekam mencukupi batas minimum yang diijinkan

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada STT Migas Balikpapan atas pendanaan pada penelitian ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada IRIS-WILBER3 (<https://ds.iris.edu/wilber3/>) untuk ijin penggunaan data seismogramnya, dan Ottemöller dkk (2021) untuk penggunaan SEISAN.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bachri, S. (2011). Structural Pattern and Stress System Evolution During Neogene-Pleistocene Time in The Central Part of The North Arm of Sulawesi. JSDG., Vol. 21, No. 3.
- Carlile1, J.C., Digdowirogo, S., Darius, K. (1990). Geological Setting, Characteristics and Regional Exploration for Gold in The Volcanic Arcs of North Sulawesi, Indonesia. Journal of Geochemical Exploration, 35 (1990) 105-140 105. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam



- Gomberg, J. S., Shedlock, K. M., and Roecker, S. W. (1990). The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 80, no. 6A, pp. 1605–1628.
- Gorsel, J.T.V. (2018). *Bibliography of The Geology of Indonesia and Surrounding Areas*. V. Sulawesi-Buton Edition 7.0. [www.vangorselslist.com](http://www.vangorselslist.com)
- Hennig, J., Advokaat, E., Rudyawan, A., Hall, R. (2014). Large Sediment Accumulations and Major Subsidence Offshore; Rapid Uplift on Land: Consequences of Extension of Gorontalo Bay and Northern Sulawesi. *Proceedings, Indonesian Petroleum Association. Thirty-Eighth Annual Convention & Exhibition.*
- Huda, A. M. M., & Ridlo, N. K. E. L. (2019). Preliminary Study of Great Earthquakes Relocation in The Last Decade (2008-2018) in North and Central Region of Sulawesi Island. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1321, No. 2, p. 022019). IOP Publishing.
- Huda, A.M.M., Sahara, A., Widyaningrum, Y. (2021). Penggunaan Automated Phase *Picking* pada Estimasi Hiposenter Gempa Lokal: Studi Kasus Lengan Atas Sulawesi. *Jurnal Riset Fisika Indonesia (JRFI)*. UBB. (in Press)
- Hurukawa, N. (2012). *Practical Analyses of Local Earthquake*. Tsukuba, Japan: IISSE.
- Kavalieris, I., Van Leeuwen, T. M., & Wilson, M. (1992). Geological Setting and Styles of Mineralization, North Arm of Sulawesi, Indonesia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 7(2-3), 113-129.
- Klein, F. W. (2002). Hypocenter location program HYPOINVERSE. US Geological Survey.
- Kulháněk, O. (2012). *Anatomy of Seismograms: For the IASPEI/Unesco Working Group on Manual of Seismogram Interpretation*. Elsevier.
- Lee, W. H. K. and Valdes, C. M. (1985). HYPO71PC: A Personal Computer Version of The HYPO71 Earthquake Location Program, vol. 85. US Geological Survey.
- Massinai<sup>a</sup>, M.A., Harimei, B., Agustawati, A., Massinai, M.F.I. (2019). Seismicity Analysis Sulawesi North Arm Based on B-Values. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1341 082032
- Massinai<sup>b</sup>, M.F.I., Astuti, A.B., Kiraman, M.R.B., Massinai, M.A., Ramdhan, M. (2019). Hypocenter Determination and Focal Mechanism Solution of May 29 2017 Earthquake Around Poso, Central Sulawesi, Indonesia *J. Phys.: Conf. Ser.* 1341 082017
- Nugraha, A.M.S. dan Hall, R. (2017). Late Cenozoic Palaeogeography of Sulawesi, Indonesia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 490 (2018) 191–209.

Ottemöller, L., Voss, P.H. and Havskov J. (2021). SEISAN Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx, Version 12.0. 607 pp. University of Bergen

Panggabean, H. dan Surono. (2011). Tektono-Stratigrafi Bagian Timur Sulawesi. JSDG Vol. 21 No. 5.

Rachman, A.N., Oktariza, N., Muzani. (2020). Struktur Geologi Pulau Sulawesi. JAGAT (Jurnal Geografi Aplikasi Dan Teknologi) Vol.4 No.2

<https://ds.iris.edu/wilber3/>