

Vol. II, No. 1 April 2019

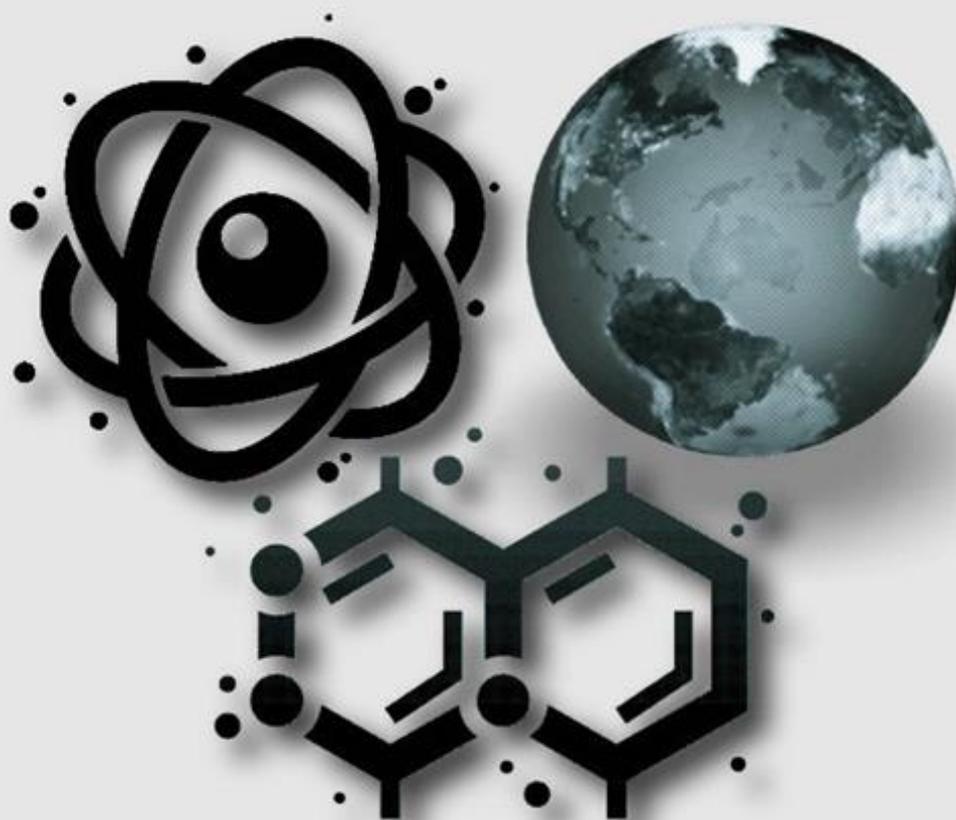
P-ISSN : 2621-0215

E-ISSN : 2621-489X

Al-Fiziya



Journal of Materials Science, Geophysics,
Instrumentation and Theoretical Physics



Published by
Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta

AL-FIZIYA:
Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation,
and Theoretical Physics

Vol. II, No. 1, April 2019

EDITORIAL IN CHIEF

Dr. Sitti Ahmiatri Saptari

MANAGING EDITOR

Muhammad Nafian, M.Si

REVIEWER

Prof. Dr. Anto Sulaksono

Dr. rer. nat. Abdul Haris

Mada Sanjaya W.S, Ph.D.

Dr. Budhy Kurniawan

Dr. Supriyanto

Muhammad Aziz Majidi, Ph.D.

Dr. Agus Salam

Dr. Ambran Hartono

Dr. Sutrisno

Tati Zera, M.Si.

Ai Nurlaela, M.Si.

Erina Hertanti, M.Si.

Dewi Lestari, M.Si.

EDITOR

Arif Tjahjono, M.Si.

Edi Sanjaya, M.Si.

SECTION EDITOR

Elvan Yuniarti, M.Si.

Anugrah Azhar, M.Si.

Saipudin, M.Si.

Biaunik Niski Kumila, M.Sc.

LAYOUT EDITOR

Ryan Rizaldy, M.Si.

Alamat Redaksi

Gedung Fakultas Sains dan Teknologi Lt. 3
Jl. Ir. H Juanda No.95 Ciputat 15412 Tangerang
Telp. (6221)743731, (6221)7493315
Email: al-fiziya@uinjkt.ac.id

Published by

Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta

PENGANTAR REDAKSI

Assalamu'alaikum, Wr. Wb.

Puji Syukur kita panjatkan kehadiran Allah SWT, dengan terbitnya Al-Fiziya: *Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation, and Theoretical Physics* Vol II, No. 1, edisi April 2019 dengan nomor ISSN: 2621-0215 dan E-ISSN: 2621-489X sebagai jurnal penelitian dan pengembangan ilmu fisika yang diterbitkan oleh Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta. Jurnal ini menyajikan artikel-artikel penelitian dan pengembangan terkini baik dalam Bahasa Indonesia maupun Bahasa Inggris di bidang fisika murni dan terapan, antara lain bidang fisika material, geofisika, fisika instrumentasi, dan fisika teori. Jurnal ini merupakan sarana publikasi bagi dosen dan para peneliti yang bergerak di bidang penelitian dan pengembangan ilmu fisika. Dengan demikian, melalui penerbitan jurnal ini kami memberikan kesempatan seluas-luasnya bagi siapapun yang ingin berpartisipasi dalam menyampaikan buah pikirannya melalui tulisan atau artikel yang akan kami muat pada edisi berikutnya.

Artikel yang masuk akan melalui proses seleksi oleh dewan editor dan review yang melibatkan mitra bestari baik dari para dosen ahli dibidangnya berdasarkan kesesuaian isi dan bobot karya ilmiah. Untuk informasi lengkap submit dan tata cara penulisan dalam Al-Fiziya: *Journal of Material Science, Geophysics, Instrumentation, and Theoretical Physics* dapat dilihat pada pedoman penulisan artikel di halaman akhir penerbitan atau dapat mengakses website kami di <http://journal.uinjkt.ac.id/index.php/al-fiziya>. Atas nama dewan redaksi, kami mengucapkan terimakasih atas dukungan dan partisipasi dari semua pihak hingga terbitnya Al-Fiziya: *Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation, and Theoretical Physics*.

Editorial in chief
Sitti Ahmiatri Saptari

Daftar Isi

Vol II, No. 1 April 2019

| | |
|---|-------|
| Pengantar Redaksi | i |
| Daftar Isi | ii |
| Lusti Nur Azizah, Arif Tjahjono, Agung Sabtaji , Relokasi Hiposenter Gempa Bumi dan Model Struktur Kecepatan 1 Dimensi Gelombang P dengan Menggunakan Metode <i>Coupled Velocity</i> – <i>Hypocenter</i> Di Daerah Sulawesi Tengah dan Sekitarnya..... | 1-9 |
| Ilman Luthfi Hilmi, Sutrisno, Dede Sunarya , Analisis Seismisitas Berdasarkan Data Gempa Bumi Periode 1958-2018 Menggunakan <i>b-Value</i> pada Daerah Selatan Jawa Barat dan Banten..... | 10-16 |
| Nadhia Fairuz Syafira, Sitti Ahmiatri Saptari, Adhika Junara Karunianto , Studi Pemodelan Distribusi Konduktivitas Bawah Permukaan 3-D Berbasis Data Resistivitas Menggunakan Program Aplikasi DCIP3D Versi 2.1 | 17-28 |
| Syaiful Izzuddin Salam, Edi Sanjaya, Muljadi , Pembuatan dan Karakterisasi Keramik Magnet BaFe ₁₂ O ₁₉ dengan Variasi Waktu Milling dan Temperatur Sintering..... | 29-33 |
| Anugrah Azhar, Muhammad Aziz Majidi , Studi Teoritis Pembentukan Momen Magnetik pada Alloy Half-Heusler Mn ₂ Ge | 34-39 |
| Elvan Yuniarti , Studi Komputasi Sifat Elektronik dan Sifat Optik Fotoelektroda Titanium Dioksida (TiO ₂) pada Fasa Anatase dan Rutile | 40-48 |
| Qalisha Putri Syahna, Elvan Yuniarti, Edi Kurniawan , Analisis Respon Sistem Kendali LQR (Linear Quadratic Regulator) Pada Simulasi Gimbal Kamera Dua Sumbu..... | 49-55 |
| Siva Dwi Harum, Tati Zera, Dwi Haryanto , Pemodelan 2-Dimensi dan 3-Dimensi Penyebaran Bijih Besi Menggunakan Data Resistivitas dan IP di Daerah “A” Provinsi Kalimantan Selatan | 56-63 |

Relokasi Hiposenter Gempa Bumi dan Model Struktur Kecepatan 1 Dimensi Gelombang P dengan Menggunakan Metode *Coupled Velocity – Hypocenter* Di Daerah Sulawesi Tengah dan Sekitarnya

Lusti Nur Azizah^{1,†}, Arif Tjahjono¹, Agung Sabtaji²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah II

[†lustynurazizah@gmail.com](mailto:lustynurazizah@gmail.com)

Abstrak. Pulau Sulawesi tersusun atas tatanan tektonik yang kompleks. Sebagian besar aktivitas gempa bumi di Sulawesi dipengaruhi oleh Sesar Palu – Koro dan Sesar Matano. Sesar Palu - Koro dan Sesar Matano merupakan salah satu sesar yang terdapat di Sulawesi Tengah. Pergerakan aktif dari sesar tersebut mengakibatkan tingginya aktivitas gempa bumi di wilayah Sulawesi Tengah dan sekitarnya. Hal tersebut menjadikan pentingnya parameter gempa bumi di daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya. Salah satu upaya untuk mengetahui informasi parameter gempa bumi dengan akurat adalah dengan melakukan relokasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan relokasi hiposenter gempa bumi dan menentukan struktur kecepatan 1-D gelombang P pada daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya menggunakan metode *Coupled Velocity – Hypocenter* dengan perangkat lunak Velest 3.3. Data yang digunakan adalah data gempa bumi tektonik mulai dari November 2009 sampai dengan Maret 2018, data stasiun pencatat, dan data kecepatan inisial. Hasil dari pengolahan data menggunakan perangkat lunak Velest 3.3 adalah sebagian dari hasil relokasi mendekati sesar, V_p hasil akhir pada kedalaman 9 km lebih lambat dibandingkan dengan V_p inisial, koreksi stasiun yang didapatkan pada perhitungan ini berada pada interval -0.81 sampai dengan +0.54.

Kata kunci: Metode *Coupled Velocity – Hypocenter*, Relokasi Hiposenter, Sulawesi Tengah, VELEST 3.3.

Abstract. Sulawesi Island is composed of complex tectonic arrangements. Most earthquake activities in Sulawesi are affected by the Palu - Koro Fault and Matano Fault. Palu - Koro Fault and Matano Fault are one of the faults in Central Sulawesi. Active movement of the fault results in high earthquake activity in the region of Central Sulawesi and its surroundings. This makes the importance of earthquake parameters in Central Sulawesi and surrounding areas. One of the efforts to find out earthquake parameter information accurately is to relocate. The purpose of this study was to conduct hypocenter earthquake relocation and determine the 1-D velocity structure of P waves in Central and surrounding areas using the *Coupled Velocity - Hypocenter* method with Velest 3.3 software. The data used are tectonic earthquake data from November 2009 to March 2018, data recording stations, and initial speed data. The results of data processing using the Velest 3.3 software are that some of the results of the relocation are close to fault, the final V_p at a depth of 9 km is slower than the initial V_p , the correction of the station obtained in this calculation is in the interval -0.81 to +0.54.

Keywords: Central Sulawesi, *Coupled Velocity – Hypocenter Method*, Hypocenter Relocation, VELEST 3.3.

PENDAHULUAN

Gempa bumi adalah suatu peristiwa alam yang ditandai dengan bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba – tiba akibat dari pecah/*slipnya* massa batuan di lapisan kerak bumi [1]. Energi yang dihasilkan berupa gelombang seismik yang menjalar ke segala arah dari sumber gempa melewati kerak bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan [2]. Semakin besar energi yang dilepaskan, maka semakin kuat guncangan yang terjadi. Indonesia adalah negara yang sangat rawan akan bencana gempa bumi dan letusan gunung berapi karena berada pada jalur *Ring of Fire*. Indonesia berada di atas jalur pertemuan tiga lempeng besar (lempeng mayor), yaitu Hindia – Australia, Eurasia, dan Pasifik. Selain itu

juga terdapat satu lempeng minor, yaitu lempeng Philipina [3]. Hal tersebut membuat Indonesia sering mengalami kejadian gempa bumi setiap tahunnya, baik gempa yang dirasakan maupun tidak dirasakan.

Menurut Hall dkk (2011) [4], Sulawesi adalah bagian dari Kepulauan Indonesia yang tersusun oleh tatanan tektonik yang kompleks. Perkembangan tektonik di Sulawesi sudah berlangsung sejak zaman Tersier hingga sekarang dan termasuk daerah teraktif di Indonesia [5]. Sebagian besar aktivitas gempa bumi di Sulawesi dipengaruhi oleh Sesar Palu – Koro dan Sesar Matano. Pergerakan aktif dari sesar tersebut mengakibatkan tingginya aktivitas gempa bumi di wilayah Sulawesi Tengah. Berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menyebutkan bahwa telah terjadi gempa bumi di Kabupaten Poso, Sulawesi Tengah dengan lokasi gempa $1,33^{\circ}$ LS – $120,41^{\circ}$ BT berpusat di 38 Km Barat Laut Kab. Poso - Sulawesi Tengah berkekuatan 6,6 SR. Gempa bumi tersebut terjadi pada tanggal 29 Mei 2017 pukul 21.35 dengan kedalaman 10 Km di bawah permukaan laut. Akibat gempa bumi tersebut terjadi kerusakan rumah warga sebanyak 164 rumah mengalami rusak berat dan 86 rumah mengalami rusak ringan [6].

Hal ini menjadikan pentingnya parameter gempa bumi di daerah Sulawesi Tengah. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengetahui informasi parameter gempa bumi dengan akurat adalah dengan melakukan relokasi hiposenter gempa bumi. Relokasi hiposenter gempa bumi merupakan suatu metode menghitung ulang atau mengoreksi posisi hiposenter gempa bumi menjadi lebih baik dan akurat. Relokasi hiposenter ini menghasilkan gambaran liniasi atau kemenerusan hiposenter yang merepresentasikan struktur sesar di bawah permukaan bumi. Metode yang dapat digunakan untuk melakukan relokasi gempa bumi salah satunya dengan metode *Coupled Velocity – Hypocenter*. Metode *Coupled Velocity – Hypocenter* ini merupakan metode relokasi gempa dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode *Geiger*, di mana pembaharuan model kecepatan menggunakan persamaan *Kissling* [7]. Metode ini juga digunakan untuk menentukan model kecepatan 1-D gelombang.

Dalam menyelesaikan metode *coupled velocity – hypocenter* digunakan perangkat lunak *Velest 3.3*. Pada metode ini dianggap bahwa bumi terdiri dari lapisan datar yang homogen isotropik, hal ini dilakukan agar waktu tiba gelombang yang terjadi karena pemantulan dan pembiasan pada setiap lapisan dapat dihitung. Dalam melakukan pengamatan waktu tiba gelombang dapat dinyatakan dalam suatu formula t_{obs} , yaitu $t_{obs} = f(s, h, m)$, dimana s , h , dan m adalah koordinat stasiun, parameter hiposenter (*origin time* dan lokasi koordinat hiposenter) dan model kecepatan, sedangkan fungsi f adalah fungsi nonlinear dari parameter h dan m yang tidak diketahui sebelumnya. Dengan dapat dihitungnya waktu tiba gelombang t_{cal} untuk setiap stasiun, maka di peroleh pembaharuan model kecepatan menggunakan persamaan *Kissling* dimana k , i dan e adalah jumlah hiposenter, jumlah stasiun, dan koreksi stasiun [3, 8]:

$$t_{res} = t_{obs} - t_{cal} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \quad (1)$$

Berdasarkan pemaparan di atas, maka penelitian ini sangat perlu dilakukan di daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya untuk mendapatkan gambaran struktur sesar di bawah permukaan bumi melalui relokasi hiposenter gempa bumi dengan metode *Coupled Velocity – Hypocenter*. Hal ini perlu dilakukan karena daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya rawan akan bencana gempa bumi yang sebagian besar dipengaruhi oleh keberadaan Sesar Palu – Koro dan Sesar Matano.

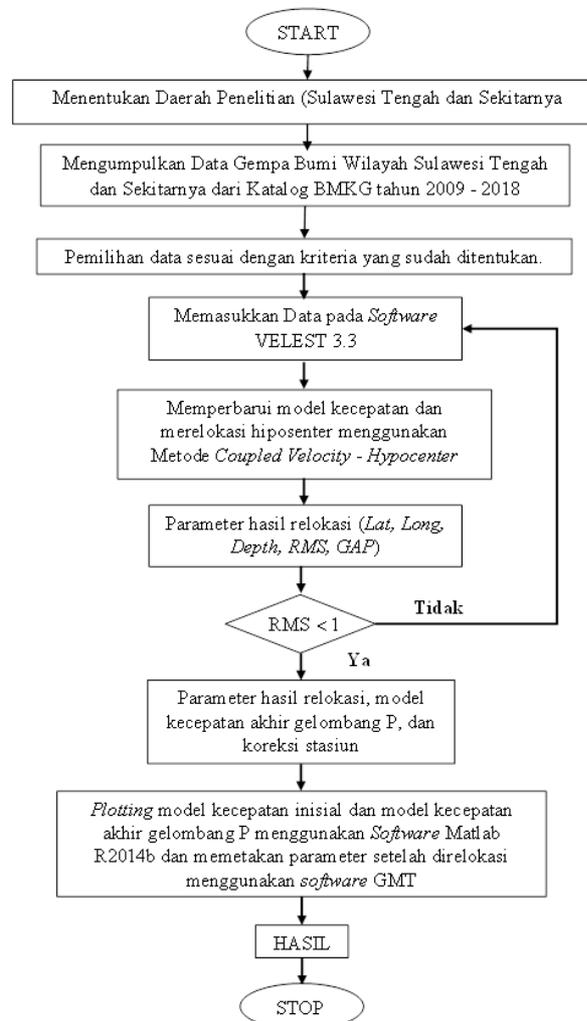
METODE

Pada penelitian ini dilakukan relokasi hiposenter gempa bumi dengan Metode *Coupled Velocity – Hypocenter* menggunakan perangkat lunak *VELEST 3.3*. Beberapa data yang digunakan adalah data gempa bumi tektonik, data stasiun pencatat gempa, dan data model awal kecepatan gelombang P. Terdapat 21 stasiun pencatat gempa yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Model Awal Kecepatan [3]

| Kedalaman (km) | Kecepatan Gelombang P (km/s) |
|-----------------------|-------------------------------------|
| -1.0 | 3.28 |
| 3.0 | 5.50 |
| 6.0 | 5.70 |
| 9.0 | 6.20 |
| 20.0 | 6.45 |
| 23.0 | 6.75 |
| 25.0 | 7.20 |
| 28.0 | 7.45 |

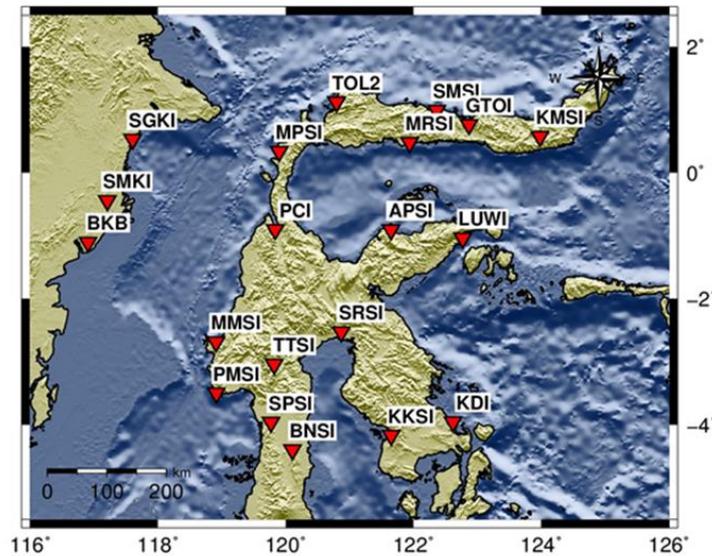
Dalam penelitian ini, data gempa bumi tektonik yang digunakan adalah hasil analisis dari BMKG Pusat mulai dari November 2009 sampai dengan Maret 2018. Data gempa bumi yang didapat kemudian dipilih dengan melakukan 1 kali iterasi berdasarkan beberapa kriteria, yaitu besar nilai azimuth gap $\leq 190^\circ$ dan jumlah fase stasiun tiap kejadian gempa berjumlah ≥ 10 fase gelombang P. Berdasarkan kriteria tersebut, maka data yang sudah terpilih berjumlah 594 kejadian gempa.

**Gambar 1. Diagram Alir Pengolahan Data**

HASIL DAN PEMBAHASAN

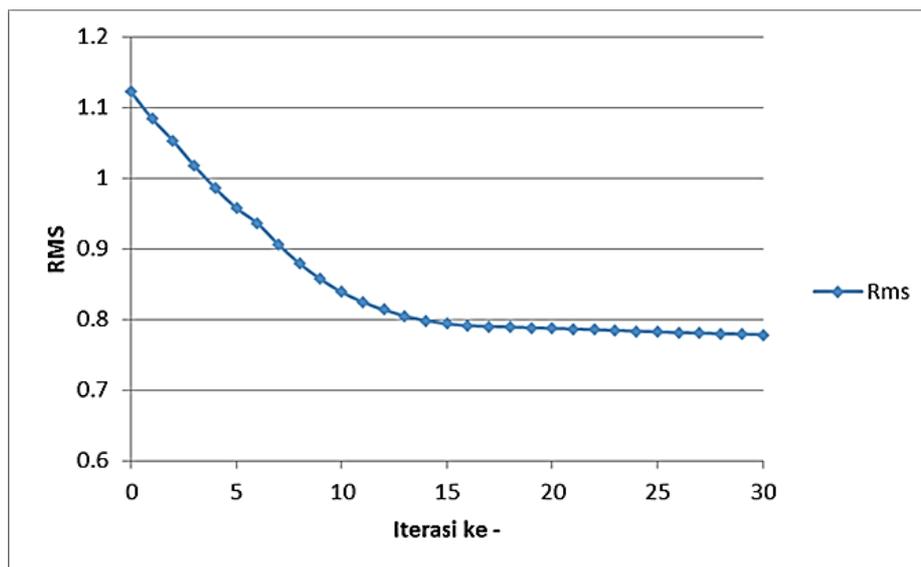
Hasil Relokasi Hiposenter

Pada penelitian ini dilakukan relokasi gempa bumi dan penentuan model kecepatan 1-D gelombang P menggunakan *software* VELEST 3.3. Penelitian ini menggunakan data kejadian gempa bumi di daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya dari tahun 2009 sampai dengan 2018. Data kejadian gempa bumi yang digunakan sebanyak 594 kejadian dengan 21 stasiun. Data – data tersebut didapatkan dari katalog BMKG.



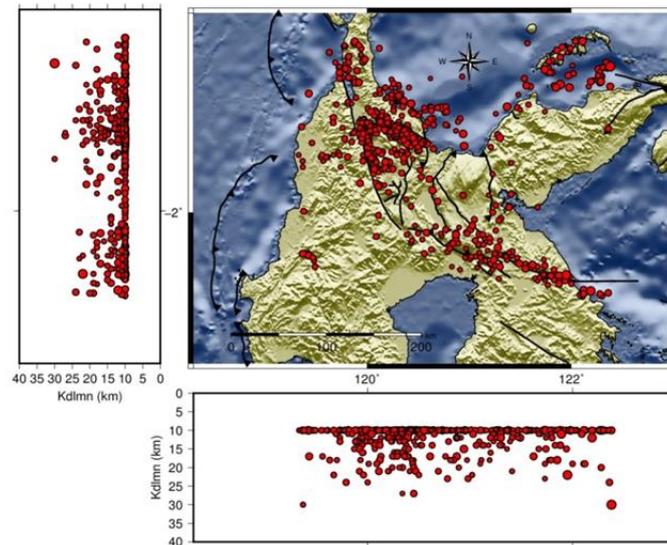
Gambar 2. Sebaran 21 stasiun gempa bumi yang digunakan

Data gempa yang digunakan adalah gempa dangkal dengan kedalaman kurang dari 30 km. Untuk perhitungan relokasi dan penentuan model kecepatan 1-D gelombang P ini dilakukan proses inversi sebanyak 30 iterasi, hingga mendapatkan nilai RMS < 1. Hal tersebut sangat jelas terlihat pada grafik (Gambar 3), bahwa pada awal iterasi nilai RMS yang didapatkan sebesar 1.122406, sedangkan pada iterasi terakhir nilai RMS yang didapatkan sebesar 0.778645. Semakin kecil RMS, maka akan semakin kecil pula nilai kesalahan yang terjadi pada hasil relokasi yang didapat.

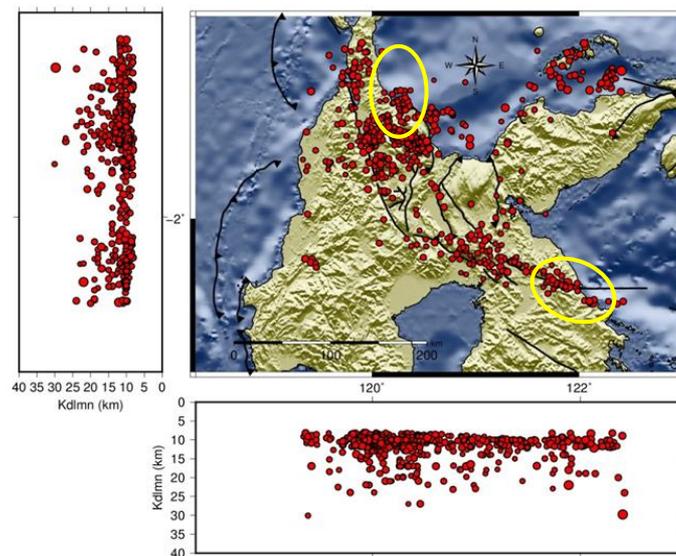


Gambar 3. Kurva Penurunan RMS hingga Iterasi ke 30

Hasil dari relokasi hiposenter gempa bumi setelah diolah menggunakan *software* VELEST dengan metode *coupled velocity – hypocenter*, didapat pergeseran posisi baik *latitude*, *longitude*, maupun *depth* dari setiap kejadian gempa bumi. Sebelum di relokasi jika dilihat dari peta sebaran hiposenter dengan irisan penampang vertikal, persebaran hiposenter banyak berada di kedalaman 10 km, tetapi ketika sudah di relokasi persebaran hiposenter di kedalaman 10 km berkurang dari sebelumnya atau boleh dikatakan hiposenter gempa terlihat lebih bervariasi. Hal ini disebabkan oleh otomatisasi penentuan kedalaman gempa bumi oleh perangkat lunak Seiscomp3 yang digunakan BMKG. Apabila hasil analisis kedalaman tidak terpusat dengan baik, maka *software* Seiscomp3 secara otomatis akan membuat kedalaman kejadian gempa bumi tersebut pada kedalaman 10 km atau dikenal dengan *fix depth*. Selain itu, setelah di relokasi juga akan terlihat pergeseran posisi hiposenter yang lebih mendekati sesar seperti yang ada pada lingkaran kuning.

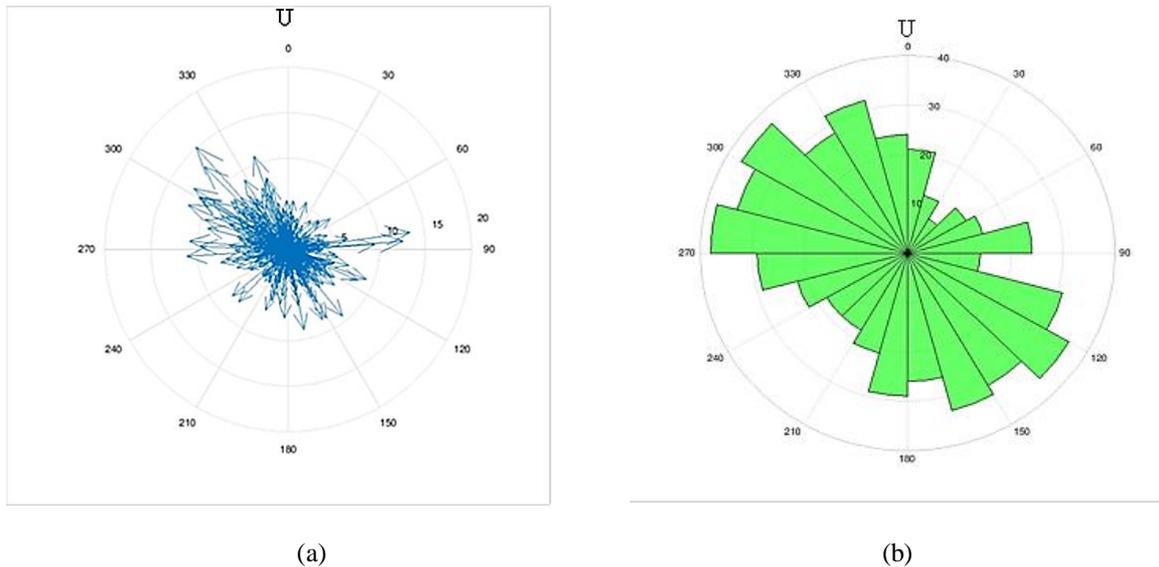


Gambar 4. Peta sebaran hiposenter sebelum relokasi dengan irisan penampang vertikal berdasarkan bujur dan lintang



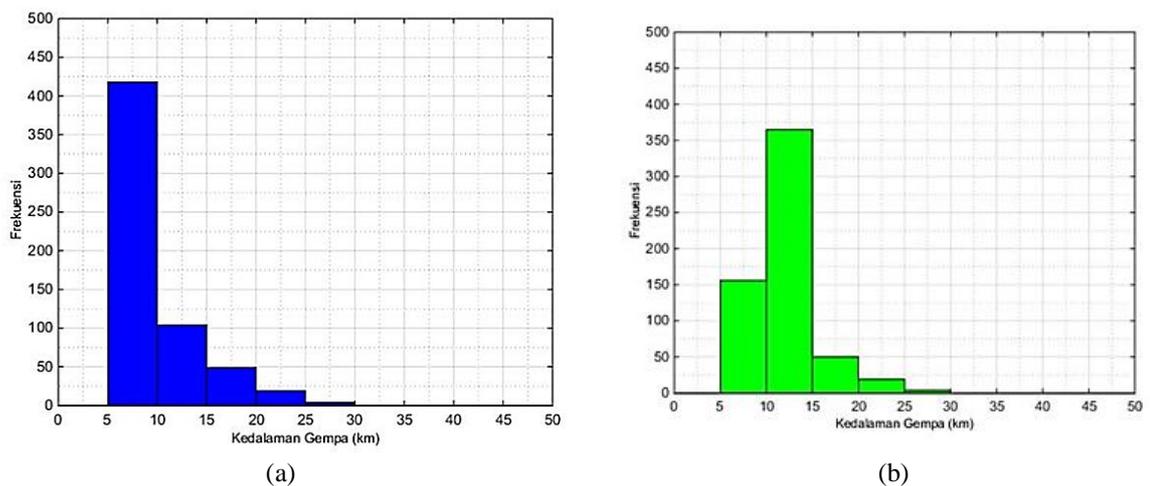
Gambar 5. Peta sebaran hiposenter sesudah relokasi dengan irisan penampang vertikal berdasarkan bujur dan lintang

Untuk melihat perubahan posisi hiposenter ini juga dapat terlihat dengan menggunakan diagram kompas dan diagram *rose*. Diagram kompas digunakan untuk menunjukkan arah dan jarak pergeseran hiposenter gempa, sedangkan diagram *rose* digunakan untuk menunjukkan arah pergeseran terbanyak. Dilihat dari diagram kompas, terdapat 10 kejadian gempa bumi yang berpindah sejauh 10 km, sedangkan dilihat dari diagram *rose* arah pergeseran kejadian gempa bumi lebih banyak menuju tenggara dan barat laut.



Gambar 6. Diagram kompas untuk menunjukkan arah dan jarak pergeseran hiposenter (a) dan diagram *rose* untuk menunjukkan arah pergeseran terbanyak (b)

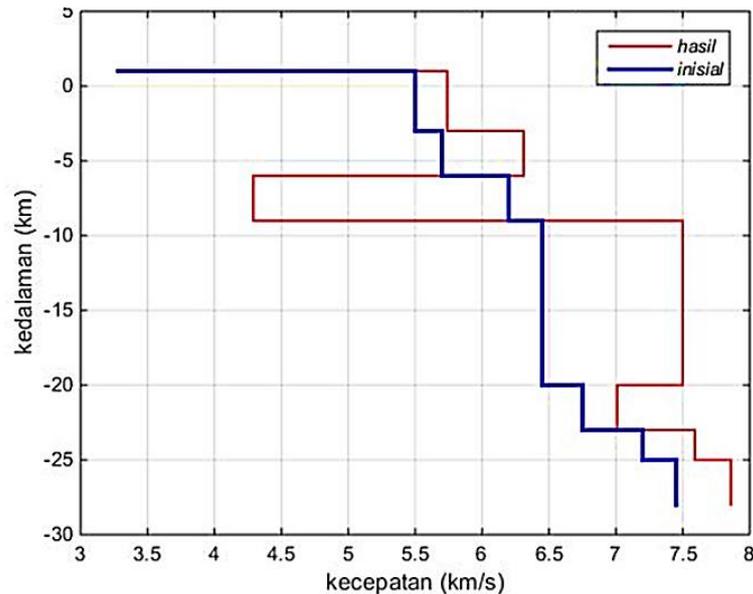
Perbandingan kedalaman gempa bumi pun dilakukan untuk melihat hasil relokasi gempa bumi di daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya. Pada gambar 4.8, terlihat frekuensi kejadian gempa bumi sebelum di relokasi dengan kedalaman 10 km sangat banyak.



Gambar 7. Grafik perbandingan jumlah kejadian gempa relokasi dengan Interval 5 km sebelum (a) dan sesudah (b)

Hasil Model Kecepatan 1-D Gelombang P

Selain mendapatkan hasil relokasi hiposenter, didapat juga hasil penentuan model kecepatan 1-D gelombang P. Berikut adalah hasil model kecepatan yang didapatkan setelah direlokasi, terlihat pada kedalaman 9 km didapatkan hasil akhir Vp lebih lambat dibandingkan Vp inisial. Sedangkan pada kedalaman lainnya, didapatkan hasil Vp yang lebih cepat dibandingkan Vp inisial. Seperti yang diungkapkan oleh Sabtaji (2017) akibat dari model Vp yang lebih cepat, maka penentuan hiposenter gempa bumi akan menjadi lebih dalam dibandingkan hiposenter menggunakan Vp inisial. Selain itu kecepatan yang melambat juga dapat terjadi dikarenakan luas cakupan daerah penelitian yang digunakan pada saat penelitian berbeda.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Vp Inisial dan Vp Perhitungan Akhir

TABEL 2. Hasil Akhir Perhitungan 1-D Vp

| Kedalaman (km) | Kecepatan Gelombang P Inisial (km/s) | Kecepatan Gelombang P Hasil (km/s) | Jumlah Gempa |
|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| -1.00... 3.00 | 3.28 | 4.23 | 0 |
| 3.00... 6.00 | 5.50 | 5.74 | 0 |
| 6.00... 9.00 | 5.70 | 6.31 | 42 |
| 9.00... 20.00 | 6.20 | 4.29 | 529 |
| 20.00...23.00 | 6.45 | 7.50 | 15 |
| 23.00...25.00 | 6.75 | 7.01 | 4 |
| 25.00...28.00 | 7.20 | 7.59 | 2 |
| 28.00... | 7.45 | 7.86 | 2 |

Software VELEST 3.3 tidak hanya memperoleh hasil berupa model kecepatan 1-D gelombang P dan relokasi hiposenter baru, tetapi *software* ini juga menghasilkan hasil berupa koreksi stasiun. Nilai koreksi stasiun yang didapat dari hasil pengolahan data adalah interval -0.81 sampai dengan +0.54 detik (Tabel 3). Apabila kecepatan gelombang P hasil observasi lebih cepat dibandingkan hasil kalkulasi, maka koreksi stasiun akan bernilai negatif. Hal ini disebabkan lapisan bawah permukaan pada stasiun pengamat yang dilalui oleh gelombang sumber gempa berupa tanah atau batuan yang padat (*hardrock*). Akibatnya, *arrival time* gelombang P hasil observasi lebih awal sampai ke stasiun pengamat dibandingkan waktu kalkulasi. Dengan adanya nilai koreksi stasiun ini, maka pembacaan waktu tiba gelombang P harus ditambahkan dengan nilai koreksi stasiun jika nilai koreksinya positif atau dikurangkan dengan nilai koreksi stasiun jika nilai koreksinya negatif.

Tabel 3. Nilai koreksi stasiun

| Nama Stasiun | Latitude (derajat) | Longitude (derajat) | Koreksi Stasiun |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|
| TOLI | 1.1213N | 120.7944E | 0.54 |
| PCI | 0.9054S | 119.8366E | 0.35 |
| PMSI | 3.5008S | 118.9149E | 0.31 |
| TOL2 | 1.1213N | 120.7944E | 0.14 |
| BNSI | 4.4005S | 120.1065E | 0.07 |
| SMSI | 0.9885N | 122.3654E | 0.06 |
| LUWI | 1.0418S | 122.7716E | 0 |
| KMSI | 0.5745N | 123.9806E | -0.01 |
| MMSI | 2.6892S | 118.9090E | -0.07 |
| BKB | 1.1073S | 116.9048E | -0.08 |
| KKSI | 4.1717S | 121.6512E | -0.12 |
| KDI | 3.9574S | 122.6192E | -0.14 |
| SMKI | 0.4461S | 117.2085E | -0.17 |
| SPSI | 3.9646S | 119.7691E | -0.2 |
| APSI | 0.9107S | 121.6486E | -0.35 |
| GTOI | 0.7628N | 122.8700E | -0.45 |
| TTSI | 3.0451S | 119.8190E | -0.58 |
| MRSI | 0.4770N | 121.9405E | -0.63 |
| MPSI | 0.3374N | 119.8980E | -0.63 |
| SGKI | 0.5302N | 117.6043E | -0.77 |
| SRSI | 2.5315S | 120.8700E | -0.81 |

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil melakukan relokasi dan menentukan model kecepatan 1-D gelombang P dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil relokasi menghasilkan perubahan kedalaman dari kedalaman *fix depth* (10 km) menjadi bervariasi dan lebih dalam serta sebagian dari hasil relokasi mendekati sesar.
2. V_p hasil akhir pada kedalaman 9 km lebih lambat dibandingkan V_p inisial yang terdapat pada referensi Gracynthia (2015), sedangkan pada kedalaman sisanya lebih cepat.

REFERENSI

- [1] W. Pawirodikromo, *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*, Yogyakarta: Pustaka Pelajar, 2012.
- [2] T. Zera, *Geologi Langkah Awal Mengenal Bumi*, Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, 2007.
- [3] M. F. Gracynthia, "Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Menggunakan Metode Coupled Velocity - Hypocenter dan Local Earthquake Tomography Untuk Sesar Palu Koro," ITS - Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [4] P. G. N. PuSGen, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*, Bandung: Puskim, 2017.
- [5] Kaharuddin, R. Hutagalung and Nurhamdan, "Perkembangan Tektonik dan Implikasinya Terhadap Potensi Gempa dan Tsunami di Kawasan Pulau Sulawesi," in *PROCEEDINGS JCM MAKASSAR*, Makasar, 2011.
- [6] B. N. P. B. BNPB, 27 Desember 2017. [Online]. Available: <https://bnpb.go.id/infografis/detail/gempa-poso>. [Accessed 14 Mei 2018].

- [7] S. A. Garini, Madlazim and E. Rahmawati, "RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI DI SULAWESI TENGAH," *Jurnal Fisika*, vol. 03, pp. 107 - 112, 2014.
- [8] A. Sabtaji, "Metode Coupled Velocity-Hypocenter Untuk Menentukan Model 1 Dimensi Kecepatan Gelombang P dan Relokasi Hiposenter Di Wilayah Sumatera Bagian Selatan," *Buletin BMKG*, vol. 7, 2017.

Analisis Seismisitas Berdasarkan Data Gempa Bumi Periode 1958-2018 Menggunakan *b-Value* Pada Daerah Selatan Jawa Barat dan Banten

Ilman Luthfi Hilmi^{1,†}, Sutrisno², Dede Sunarya³

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Wilayah II Tangerang Selatan, Jalan. H. Abdul Ghani No. 5, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

†ilmanluthfi14@uinjkt.a.c.id

Abstrak. Daerah Jawa Barat dan Banten, khususnya wilayah selatan merupakan salah satu kawasan yang rawan terjadi gempa bumi disebabkan daerah tersebut merupakan jalur cincin api dan adanya sesar masih aktif, seperti Sesar Cimandiri, Sesar Baribis dan Sesar Lembang. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui tingkat keaktifan seismik, kerapuhan batuan dan tingkat periode ulang untuk membuat bangunan tahan gempa. Parameter seismoteknik suatu wilayah dapat dihitung dengan menggunakan hubungan Frekuensi-Magnitudo dengan perumusan Guttenberg-Rithcher, yaitu $\log N(M) = a' - bM$ dan menggunakan metode *Maximum Likelihood*. Berdasarkan hasil penelitian yang didapat dari data gabungan USGS dan BMKG pada magnitude ≥ 4 SR dan kedalaman ≥ 10 km. Berdasarkan hasil analisis dan persebaran seismisitas didapatkan semakin tinggi frekuensi semakin kecil magnitude gempa. Hasil Parameter seismoteknik memberikan variasi nilai *b* di Selatan Jawa Barat dan Banten sekitar 0.95-1.45, dengan nilai tertinggi di Selatan Kabupaten Pandeglang (1.35-1.45) dan terendah di Kabupaten Tasikmalaya (0.95-1.05). Variasi nilai *a* sekitar 6.5-9, dimana nilai tertinggi di Selatan Kabupaten Pandeglang (8.5-9) dan terendah di Kabupaten Tasikmalaya (6.5-7). Perhitungan Indeks Seismisitas yaitu 0.632 dan Indeks Seismisitas Gempa terbesar 0.004. Probabilitas pada jeda waktu 20 tahun dengan nilai $P(7,20)=8\%$; $P(7,40)=15\%$; $P(7,60);21\%$ dan variasi periode ulang dengan variasi 5 SR= 1-4 tahun, 6 SR= 15-55 tahun dan 7 SR=150-550 tahun.

Kata Kunci: *Guttenberg-Richter, Kondisi wilayah Selatan Jawa Barat dan Banten, Maximum Likelihood, Parameter Seismoteknik.*

Abstract. *The area of West Java and Banten, especially is Southern is one of the areas prone to earthquakes, caused by the fact that the area is part of the ring of fire path and the presence of faults that are still active faults, such as the Cimandiri Fault, the Baribis Fault and the Lembang Fault. The purpose of this study is to determine the level of seismic activity, the fragility of the rocks and the level of the return period to make earthquake resistant buildings. The seismotechnical parameters of a region can be calculated using the Frequency-Magnitude relationship with the Guttenberg-Rithcher formulation, namely $\log N(M) = a' - bM$ by using the Maximum Likelihood method. Based on the results of the research obtained from the combined data of USGS and BMKG, the magnitude of the 4 SR and the depths of 0-300 km. Based on the analysis and distribution of seismicity, it was found that the higher of the frequency the smaller earthquake magnitude is obtained. The results of the seismotechnical parameters provide variations of the *b*-value in South West Java and Banten around 0.95-1.45, with the highest value in the South of Pandeglang Regency (1.35-1.45) and the lowest in Tasikmalaya District (0.95-1.05). Variations of the *a*-values of an area around 6.5-9, while the highest value is in the South of Pandeglang Regency (8.5-9) and the lowest in Tasikmalaya Regency (6.5-7). The Seismicity Index is 0.632 and the Seismicity of the largest earthquakes is 0.004. Probability is at a time interval of 20 years with value as follows $P(7.20) = 8\%$; $P(7.40) = 15\%$; $P(7.60); 21\%$. While variation of the return period are with variations of 5 SR = 1-4 years, 6 SR = 15-55 years and 7 SR = 150-550 years.*

Keywords: *Condition of the South West and Banten regions, Guttenberg-Richter, Maximum Likelihood, Seismotechnical Parameters.*

PENDAHULUAN

Daerah Selatan Jawa Barat dan Banten merupakan kawasan yang rawan terjadi gempa bumi. Ini dikarenakan daerah tersebut dekat dengan jalur cincin api dan adanya beberapa patahan aktif yang melewati daerah tersebut, seperti Patah Cimandiri, Patahan Baribis dan Patahan Lembang. Daerah ini merupakan wilayah Kepulauan Indonesia yang letaknya berada pada zona pertemuan antara lempeng Eurasia dan Indo-Australia yang bergerak ke utara bertumbukan dengan lempeng Eurasia yang relatif diam. Hingga tahun 2018 yang tercatat dalam sejarah ada lebih dari 29 kali kejadian gempa bumi yang merusak dan mengakibatkan jatuhnya korban jiwa maupun kerusakan infrastruktur, antara lain Kuningan 1875, Tasikmalaya 1979 dan 2009, Majalengka 1990, Sukabumi 2000, Gunung Halu 2005, gempa bumi dan tsunami Pangandaran 2006 (Daryno, 2010; Sunardi dkk 2017). Selain itu berdasarkan dari situs yang didapat dari situs USGS ada beberapa gempa bumi yang termasuk ke dalam gempa bumi yang tercatat, salah satunya adalah daerah Tasikmalaya pada tahun 2017 dengan Mw 6.5.

Adanya pergerakan lempeng Indo-Australia yang bertabrakan dengan lempeng relatif diam. Adanya aktifitas tersebut menyebabkan elemen tektonik terutama di daerah Jawa Barat menyebabkan elemen tektonik di daerah Jawa Barat menyebabkan pembentukan palung, busur luar non-vulkanik, cekungan depan busur, dan Paparan Sunda.

Kewaspadaan dari gempa bumi perlu dilakukan dengan kajian mengenai seismoteknik yang berdasarkan sejarah kejadian gempa bumi daerah tersebut. Parameter seismoteknik dapat berupa keaktifan seismik (*a-value*), kerapuhan batuan (*b-value*), probabilitas dan periode ulang kejadian gempa bumi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai *b*, tingkat seismisitas dan periode ulang kejadian gempa bumi berdasarkan nilai parameter seismoteknik dan menggunakan hubungan Frekuensi magnitudo dengan perhitungan menggunakan Maximum Likelihood. Dengan mengetahui nilai parameter seismoteknik diharapkan dapat dijadikan sebagai referensi kepada pemerintah setempat untuk membuat bangunan yang tahan terhadap gempa sehingga mengurangi kerusakan infrastruktur akibat kejadian gempa.

Gempa bumi

Gempa bumi merupakan sentakan asli dari bumi, yang sumbernya di dalam bumi. Gempa bumi merupakan proses bergetarnya permukaan tanah karena adanya pelepasan energy secara tiba-tiba karena adanya patahan massa batuan di lapisan kerak bumi. Sedangkan menurut teori yang dikemukakan oleh seismolog Reid [1] menyatakan bahwa gempa bumi merupakan gejala alam yang disebabkan oleh pelepasan energy regangan elastis batuan yang disebabkan adanya deformasi batuan yang terjadi di litosfer.

Hubungan Frekuensi-Magnitudo

Dari data gempa bumi dapat dibuat hubungan antara frekuensi dan kekuatan gempa untuk suatu daerah. Hubungan itu dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{Log } n(M) = a - bM \quad (1)$$

$$\text{Log } n(M) = a' - bM \quad (2)$$

Dimana $n(M)$ adalah jumlah gempa bumi dengan magnitudo M dan $N(M)$ adalah jumlah kumulatif dan $a' = a - \log(b \ln 10)$. Diketahui bahwa $\text{Log } N$ adalah jumlah frekuensi kumulatif gempa dengan M adalah magnitudo gempa yang terjadi. Rumusan ini merupakan rumusan yang dikenal dengan hukum Gutenberg-Richter pada 1956 [2].

Nilai a merupakan parameter seismik yang dipengaruhi oleh banyak data dan luas daerah penelitian, dan nilai b merupakan parameter tektonik yang meliputi kondisi lingkungan geologi. Nilai b yang tinggi kondisi medium heterogenitas tinggi, tetapi nilai b yang rendah berhubungan dengan kondisi batuan yang lunak dan medium heterogenitas rendah [3]. Nilai b dihitung dengan menggunakan *maksimum likelihood* yang diberikan Utsu (1965), dan nilai a ditentukan dengan persamaan dari Werkner (1965) [4]. Nilai a dan b dirumuskan sebagai berikut:

$$b = \frac{0.4343}{\bar{M} - M_0} \quad (3)$$

$$a = \log N + \log b \ln 10 + M_0 \cdot b \quad (4)$$

Dimana batas bawah dan batas atas apabila diberikan probabilitas 95 % dan $W_z = 1.96$ dirumuskan sebagai berikut:

$$\left[b \left(1 - \frac{1.96}{\sqrt{N}} \right) \leq P_r \leq b \left(1 + \frac{1.96}{\sqrt{N}} \right) \right] \quad (5)$$

Selain itu nilai a dan b juga dapat dihitung dengan menggunakan metode *least square*, dirumuskan sebagai berikut:

$$b = \frac{n \sum (X_i \cdot Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (6)$$

$$a = \frac{n \sum Y_i - b \sum X_i}{n} \quad (7)$$

Untuk mencari koefisien relasi dapat ditentukan dengan persamaan:

$$r = \frac{n \sum (X_i \cdot Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}} \quad (8)$$

Keterangan:

b: Parameter tektonik

a: Parameter seismik

\bar{M} : Magnitudo rata-rata

M_o : Magnitudo terkecil

N: Frekuensi gempa bumi

X_i : Median magnitudo tiap interval kelas

Y_i : Log frekuensi tiap interval

Indeks Seismisitas

Indeks seismisitas adalah sebuah parameter fisis yang menggambarkan jumlah total kejadian gempa bumi yang berlangsung dalam periode satu tahun dengan magnitudo lebih besar dari magnitudo terkecil. Menurut Peter (1965) indeks seismisitas dengan *N* ($M \geq 4$) menggambarkan total kejadian gempa tahunan [5]. Harga indeks seismisitas dapat dijabarkan dalam rumus sebagai berikut:

$$N_1(M \geq 4) = 10^{(a_1' - 4b)} \quad (9)$$

Dengan jumlah kejadian gempa bumi pertahunnya dihitung dengan membagi nilai a dengan periode penelitian (*T*)

$$a_1 = a / \log T$$

$$a_1' = a' / \log T$$

Keterangan:

T: Waktu tahun pengamatan

a_1, a_1', a, b : Parameter indeks seismisitas

$N_1(M \geq 4)$: Jumlah gempa rata-rata tahunan dengan $M \geq 4$

Probabilitas Kejadian Gempa Bumi

Probabilitas kejadian gempa bumi didefinisikan sebagai kemungkinan adanya kejadian gempa bumi yang merusak di suatu daerah dalam kurun waktu tertentu, yang dapat digunakan untuk pembuatan bangunan tahan gempa. Probabilitas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P(M, T) = 1 - e^{-N(M)T} \quad (10)$$

Dimana frekuensi kumulatif rata-rata tahunan dengan magnitudo terbesar dan periode ulang gempa bumi adalah:

$$N_1(M) = N_1(M \geq 4) \times 10^{2b} \quad (11)$$

$$\theta = \frac{1}{N_1(M)} \quad (12)$$

Keterangan:

$P(M, T)$: Probabilitas gempa bumi dengan magnitudo *M* dan periode *T*

$N_1(M)$: Jumlah gempa kumulatif dengan magnitudo terbesar

θ : Rata-rata periode ulang gempa

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Badan Meteorologi, Klimatologi dan geofisika Wilayah II Tangerang Selatan, dengan mengambil data gabungan dari *repository* BMKG dan USGS dengan ketentuan magnitudo minimum 4 SR dan kedalaman 0-300 km. Periode gempa bumi pada penelitian ini selama 60 tahun di mulai dari 1 Januari 1958 sampai 1 Juni 2018 di peroleh sebanyak 719 data. Pengolahan dengan menggunakan *software* Microsoft Excel untuk penyortiran data sesuai dengan parameter yang ada di dalam batasan masalah. Setelah itu dilakukan pengolahan data secara manual. Pengolahan data secara manual ini, yaitu dengan melakukan penyeragaman data magnitudo dan mengolah data menggunakan metode yang ada. Langkah-langkah dalam mengolah data gempa antara lain:

- 1) Adanya studi literature tentang penelitian ini;
- 2) Pengambilan data sekunder daerah Selatan Jawa Barat dan Banten dengan batas -6.948° s/d -8.135° LS dan 104.996° s/d 108.721° , meliputi waktu kejadian, kedalaman dan magnitudo gempa bumi dari situs USGS dan *repository* BMKG dengan periode waktu dari 1 Januari 1958 sampai dengan 1 Juni 2018;
- 3) Pengolahan data gempa berupa konversi skala magnitudo menjadi M_w . Adapun konversi magnitudenya sebagai berikut [6]:

$$M_w = 0.143 (M_S)^2 - 1.051 (M_S) + 7.285$$

$$M_w = 0.114 (M_B)^2 - 0.556 (M_B) + 5.560$$

$$M_w = 0.787 (M_E)^2 - 1.537$$

$$M_B = 0.125 (M_L)^2 - 0.389 (M_L) + 3.513$$

Keterangan:

M_w : Magnitude Momen

M_S : Magnitude Surface

M_B : Magnitude Body

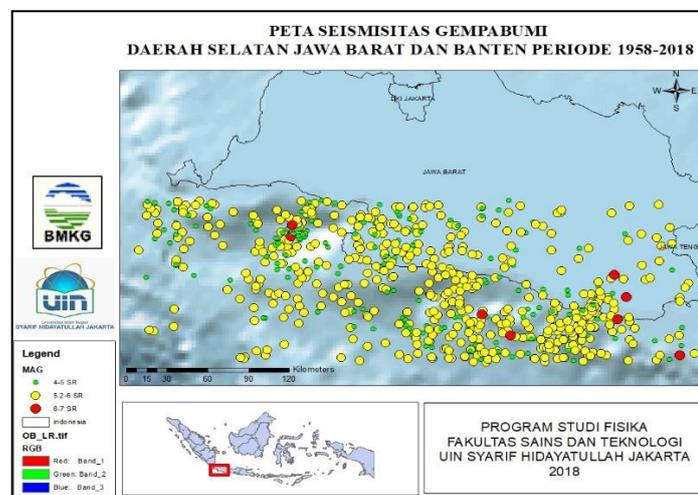
M_E : Magnitude Energy

M_L : Magnitude Local

- a) Menghitung indeks seismisitas, probabilitas dan periode ulang dan membuat pemetaan nilai a dan b menggunakan *software* Z-Map menggunakan metode *maximum likelihood*.
- b) Membuat pemetaan seismisitas ke dalam *software* ArcGIS 10.2 untuk mengetahui tingkat seismisitas daerah penelitian;

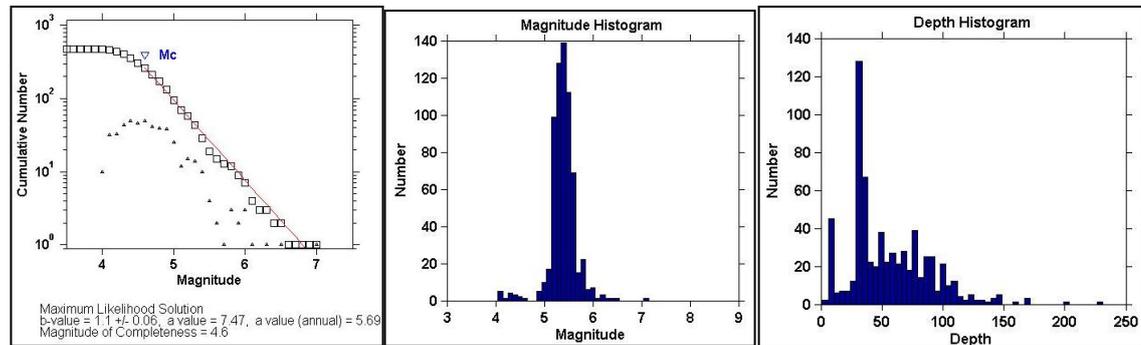
HASIL DAN PEMBAHASAN

Banyaknya data gabungan yang didapatkan dari penelitian ini sebanyak 719 data dengan kisaran magnitudo 4-7 SR, sehingga dapat dilihat dari peta persebaran seismisitas sebagai berikut:



Gambar 1. Peta Seismisitas Daerah Selatan Jawa Barat dan Banten

Pada katalog gempa bumi ini, intensitas gempa bumi yang terlihat cukup tinggi apabila di lihat dari titik persebaran dalam peta. Nilai persebaran gempa bumi cukup beragam dengan nilai mag 5.2-6 SR yang mendominasi, sedangkan distribusi gempa bumi terhadap kedalaman didominasi oleh gempa dengan kedalaman kurang dari 100 km. Sedangkan distribusi frekuensi dan magnitude dengan menggunakan *software Z-Map* didapatkan grafik hubungan magnitude dan frekuensi. Dengan menggunakan metode *maximum likelihood*, didapatkan hasil *b-value* sebesar 1.1, untuk hasil perhitungan *a-value* sebesar 7.47, *Magnitude of Completeness* sebesar 4.6 yang ditunjukkan pada gambar 2.



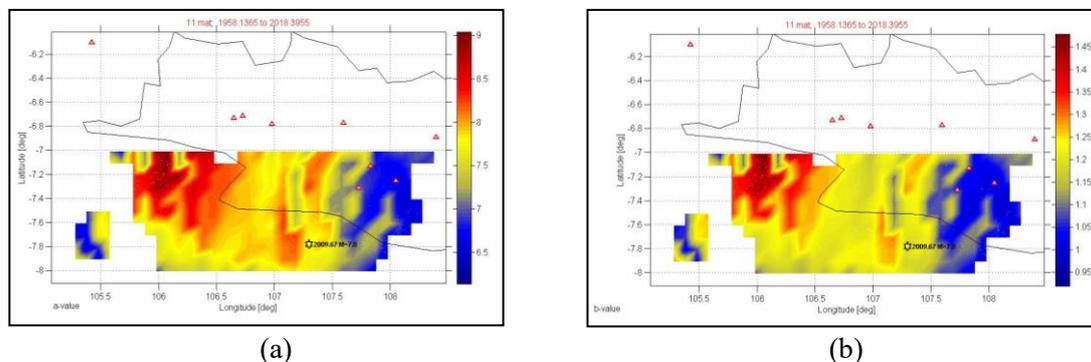
(a)

(b)

(c)

Gambar 2. (a) Hubungan Frekuensi-Magnitudo Wilayah Selatan Jawa Barat dan Banten; (b) Histogram Magnitude Wilayah Selatan Jawa Barat dan Banten; (c) Histogram Kedalaman Wilayah Selatan Jawa Barat dan Banten.

Variasi Spasial *a-value* dan *b-value*



(a)

(b)

Gambar 3. (a) Variasi Spasial *a-value*; (b) Variasi Spasial *b-value*.

Variasi spasial *b-value* dalam penelitian ini berkisar 0.95-1.45. Nilai parameter seismoteknik yaitu *b-value* apabila nilainya rendah menandakan bahwa daerah tersebut memiliki tingkat kerapuhan batuan yang rendah dan daya tahan terhadap batuan yang besar. Sedangkan *b-value* yang tinggi menunjukkan bahwa daerah tersebut mempunyai tingkat kerapuhan batuan yang tinggi dan daya tahan terhadap batuan yang kecil [7], dan juga *b-value* yang rendah berhubungan dengan tingkat *stress* yang tinggi sementara *b-value* yang tinggi berhubungan tingkat *stress* yang rendah. Tetapi beberapa ahli mengatakan nilai parameter konstan dan memiliki nilai sekitar 1, meskipun ada perbedaan nilai data maupun metode yang dipakai dalam penelitian tersebut. Dari hasil variasi *b-value* terendah pada daerah Tasikmalaya berkisar antara 0.95-1.05 dan tertinggi pada daerah Laut Selatan Kabupaten Pandeglang berkisar 1.35-1.45. Sedangkan pada hasil perhitungan *a-value* dengan variasi 6.5-9 wilayah persebaran adanya kemiripan dimana variasi *a-value* terendah pada daerah Tasikmalaya berkisar 6.5-7 dan tertinggi pada daerah Selatan Kabupaten Pandeglang berkisar 8.5-9, dimana pada daerah tertinggi memiliki aktivitas kegempaan yang lebih tinggi dibanding daerah dengan *a-value* rendah.

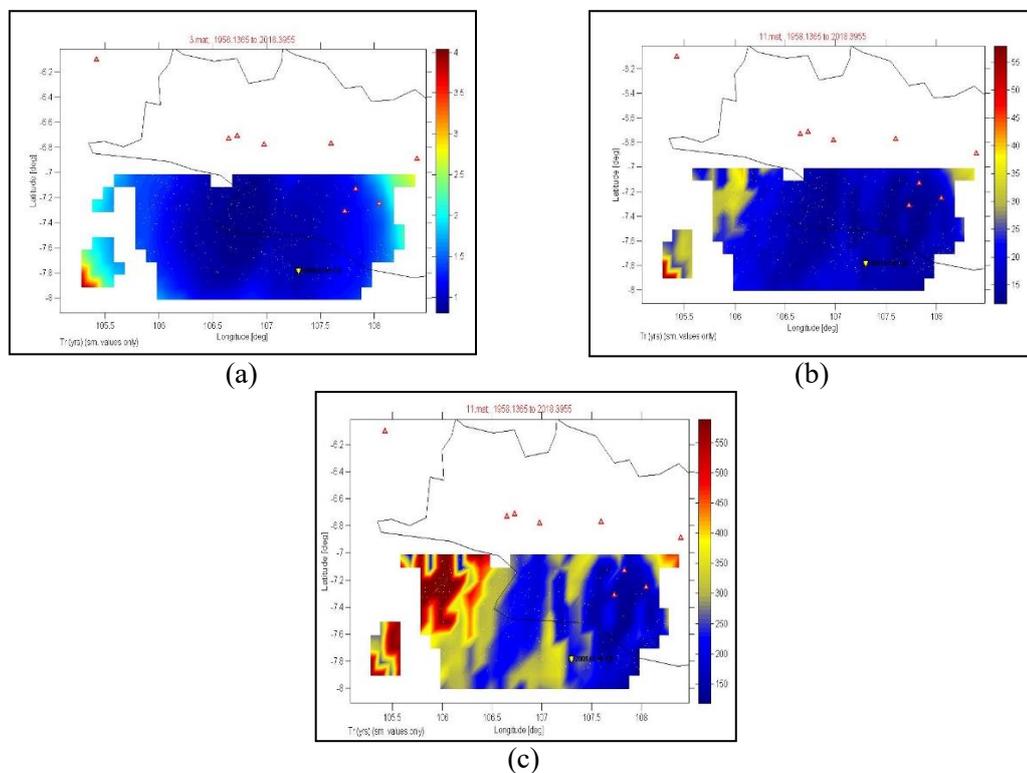
Indeks Seismisitas, Probabilitas dan Periode Ulang

Indeks seismisitas merupakan normalisasi dari banyaknya gempa bumi periode satu tahun. Didapatkan Indeks Seismisitas dengan $M \geq 4$ SR sebesar 0.632 dan Indeks Seismisitas gempa merusak dengan M terbesar yaitu 7 SR sebesar 0.004. Probabilitas gempa bumi di bagi rentang 20 tahun, di mana didapatkan hasil $P(7, 20) = 8\%$, $P(7, 40) = 15\%$, $P(7, 60) = 21\%$, sedangkan periode ulang gempa yang merusak pada gempa maksimum yaitu 7 SR sekitar 250 tahun. Pendeknya periode ulang yang terjadi biasanya berhubungan dengan aktivitas gempa bumi yang relative tinggi dalam suatu daerah penelitian tersebut.

Tabel 1. Nilai Indeks Seismisitas, Probabilitas dan Periode Ulang Wilayah Penelitian

| Indeks Seismisitas ($M \geq 4$) | a' | a_1 | a_1' | Indeks Seismisitas N_1 (7 SR) | Periode Ulang | Probabilitas (dalam tahun) | | |
|-----------------------------------|-------|-------|--------|---------------------------------|---------------|----------------------------|-----|-----|
| | | | | | | 20 | 40 | 60 |
| 0.632 | 7.067 | 4.201 | 3.974 | 0.004 | 250 thn | 8% | 15% | 21% |

Periode ulang menggunakan *software Z-Map* dengan variasi 5 SR, 6 SR, dan 7 SR didapatkan persebaran sebagai berikut:



Gambar 4. (a) Periode Ulang Gempa 5 SR; (b) Periode Ulang Gempa 6 SR; (c) Periode Ulang Gempa 7 SR.

Pada gempa bumi dengan magnitudo 5 SR terjadi periode ulang berkisar antara 1 sampai 4 tahun pada gambar 3 (a). Daerah yang memiliki waktu periode ulang lebih cepat yaitu sepanjang daerah Kabupaten Lebak sampai Kabupaten Tasikmalaya dengan periode ulang 1-2 tahun, sedangkan daerah Laut di Selatan Ujung Kulon memiliki periode ulang sekitar 3.5-4 tahun.

Periode ulang gempa bumi dengan magnitudo 6 SR berkisar antara 15 sampai 55 tahun pada gambar 3 (b). Daerah yang memiliki periode ulang lebih cepat yaitu sepanjang daerah Kabupaten Tasikmalaya dengan periode ulang berkisar 15-20 tahun, sedangkan daerah Laut di Selatan Kabupaten Pandeglang memiliki periode ulang sekitar 50-55 tahun. Periode ulang gempa bumi dengan magnitudo terbesar yaitu 7 SR berkisar antara 150 sampai 550 tahun pada gambar 3 (c). Daerah yang memiliki periode ulang lebih cepat yaitu Kabupaten Tasikmalaya dengan

periode ulang berkisar 150-175 tahun, sedangkan daerah Laut di Selatan Kabupaten Pandeglang dekat meliputi Pulau Tinjil memiliki periode ulang sekitar 500-550 tahun.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Untuk mendapatkan nilai b digunakan Metode Empiris yaitu Metode Maximum Likelihood, di mana data gempa bumi dilakukan penyeragaman skala magnitudo menjadi M_w . Hasil data gempa bumi diinput ke dalam *Software Z-Map* dan didapatkan nilai b -value, a -value, dan *Magnitudo of Completeness* (M_c). Didapatkan nilai b -value berkisar antara 0.95-1.45 dengan nilai tertinggi pada daerah laut pada Selatan Kabupaten Pandeglang yaitu 1.35-1.45 dan nilai terendah pada daerah Tasikmalaya yaitu 0.95-1.05. Nilai a -value berkisar antara 6.5-9 dengan nilai tertinggi pada daerah laut pada Selatan Kabupaten Pandeglang yaitu 8.5-9 dan nilai terendah pada daerah Tasikmalaya yaitu 6.5-7. Sedangkan nilai *Magnitudo of Completeness* (M_c) sekitar 4.6.
- 2) Dalam waktu 60 tahun telah adanya gempa bumi sebanyak 719 kejadian di wilayah Selatan Jawa Barat dan Banten dengan magnitudo berkisar antara 4-7 SR. Pada katalog gempa bumi wilayah Selatan Jawa Barat dan Banten didominasi oleh gempa dengan magnitudo sekitar 5.2-6 SR, sementara distribusi gempa bumi terhadap kedalaman didominasi oleh gempa dengan kedalaman <100 km.
- 3) Nilai indeks seismisitas sebesar 0.63 dan indeks seismisitas gempa merusak 0.004, probabilitas untuk $P(7, 20)=8\%$, $P(7, 40)=15\%$, $P(7, 60)=21\%$ dan periode ulang untuk gempa terbesar yaitu $M 7$ SR selama 250 tahun pada perhitungan Microsoft Excel. Sedangkan periode ulang yang menggunakan variasi Magnitudo 5 SR berkisar antara 1-4 tahun, variasi Magnitudo 6 SR berkisar antara 15-55 tahun dan Magnitudo 7 SR berkisar antara 150-550 tahun.

REFERENSI

- [1] A. Fulki, "Analisis Parameter Gempa, b -Value, PGA di Daerah Papua," Skripsi, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, 2011.
- [2] T. Zera, Geologi: Langkah Awal Mengenal Bumi. (Program Studi Fisika UIN Syarif Hidayatullah, Jakarta, 2007), 55-57.
- [3] S. Syafriani, "An Investigation of Seismicity for the West Sumatera Region Indonesia," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 335, 2018" pp. 2.
- [4] S. Rohadi, H. Grandis and M. A. Ratag, "Studi Variasi Spasial Seismisitas Zona Subduksi Jawa," in *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol.8 No. 1, 2007, pp. 42-47.
- [5] E. A. Suwandi, I. L. Sari and W. , " Analisis Percepatan Tanah Maksimum, Intensitas Maksimum dan Periode Ulang Gempa untuk Menentukan Tingkat Kerentanan Seismik di Jawa Barat (Periode Data Gempa Tahun 1974-2016)," (Wahana Fisika, 2(2), Bandung, 2017), pp. 12-30.
- [6] W. Pawirodikromo, *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*, Pustaka Pelajar, Yogyakarta, 2012.
- [7] K. Mogi, "Magnitude-Frequency Relationship for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problems in Earthquakes," in Bull. Earthquake Res. Inst., 1962.
- [8] B. Sunardi, M. U. Istikomah and S. , " Analisis Seismoteknik dan Periode Ulang Gempabumi Wilayah Nusa Tenggara Barat, Tahun 1973-2015," in (Jurnal Riset Geofisika Indonesia, 2017) pp. 23-28.

Pemodelan Distribusi Konduktivitas Bawah Permukaan 3-D Berbasis Data Resistivitas Menggunakan Program Aplikasi DCIP3D Versi 2.1

Nadhia Fairuz Syafira^{1,†}, Sitti Ahmiatri Saptari¹, Adhika Junara Karunianto²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Indonesia, Jalan. Ir. H. Djuanda Indonesia.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jl. Lebak Bulus Raya No.9, RT.3/RW.2, Lebak Bulus, Cilandak, RT.3/RW.2, Lebak Bulus, Jakarta Selatan, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12440, Indonesia

[†]nadhiafairuzs@gmail.com

Abstrak. Kebutuhan manusia akan berbagai aspek meningkat, termasuk dengan kebutuhan akan kandungan di dalam bumi. Dalam menggambarkan distribusi sifat fisik bawah permukaan bumi, pemodelan secara 3-D adalah cara terbaik dalam mengetahui detail kandungan bawah permukaan bumi. Untuk mempermudah pembuatan model 3-D dari bumi, digunakan program aplikasi DCIP3D. DCIP3D mengembangkan sederetan algoritma inversi untuk memulihkan model konduktivitas 3-D. Penelitian dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaan DCIP3D versi 2.1. Data yang digunakan adalah data sekunder dan sintetik. Data sekunder merupakan data geolistrik resistivitas yang terdiri dari empat lintasan hasil survei PTBGN-BATAN di wilayah Ahu Mamuju, Sulawesi Barat, 2017. Pengolahan data dilakukan dengan membuat ukuran sel *mesh* yang merupakan diskritisasi dari model bumi. Dilakukan variasi ukuran sel inti *mesh* yaitu $(5 \times 5 \times 5)$ m, $(10 \times 10 \times 10)$ m dan $(15 \times 15 \times 15)$ m. Dengan menyelesaikan berbagai file masukan untuk DCIP3D, maka model konduktivitas bawah permukaan 3-D berhasil dipulihkan. Penambahan nilai topografi pada model menyebabkan model terlihat semakin nyata. Model terbaik yang menggambarkan konduktivitas wilayah survei data sekunder adalah model dengan sel inti $(10 \times 10 \times 10)$ m karena sesuai dengan jarak antar elektroda yang digunakan saat akuisisi data.

Kata Kunci: 3-D modelling, conductivity, DCIP3D, geoelectric methods, inversion

Abstract. Human needs will increase in various aspects, including the need for content in the earth. In describing the distribution of physical properties beneath the earth's surface, 3-D modeling is the best way to find out the details of the subsurface content of the earth. To facilitate the making of 3-D models from the earth, the DCIP3D application program is used. DCIP3D develops a series of inversion algorithms to restore 3-D conductivity models. The research was conducted to optimize the use of DCIP3D version 2.1. The data used are secondary and synthetic data. Secondary data is resistivity geoelectric data consisting of four line of the results of the PTBGN-BATAN survey in the Ahu Mamuju, West Sulawesi, 2017. Data processing is done by making mesh cell size which is a discretization of the earth model. The variation of the mesh core size is done $(5 \times 5 \times 5)$ m, $(10 \times 10 \times 10)$ m and $(15 \times 15 \times 15)$ m. By completing various input files for DCIP3D, the 3-D subsurface conductivity model was successfully restored. Adding topographic values to the model causes the model to look even more real. The best model that describes the conductivity of the secondary data survey area is a model with a core cell $(10 \times 10 \times 10)$ m because it corresponds to the distance between the electrodes used during data acquisition.

Keywords: 3-D modelling, conductivity, DCIP3D, geoelectric methods,, inversion

PENDAHULUAN

Seiring bertambahnya tahun, kemajuan teknologi semakin meningkat. Begitupun kebutuhan manusia, semakin menuntut untuk dipenuhi. Pembangunan manusia sangat bergantung dengan berbagai aspek, salah satunya sumber daya yang diperoleh dari bawah permukaan bumi dari ratusan hingga ribuan meter. Kerumitan struktur bumi membuat sulit untuk mengetahui karakteristik bawah permukaan dari pengamatan langsung. Oleh karena itu harus disimpulkan dari distribusi sifat-sifat fisis yang lebih mendasar seperti densitas, konduktivitas, impedansi akustik, dan lain-lain. Sifat-sifat dasar ini diukur melalui survei

geofisika yang menekankan respon bumi terhadap berbagai jenis sinyal baik dari alam maupun buatan manusia [1]. Dalam menggambarkan distribusi sifat fisis bawah permukaan bumi, dapat dilakukan secara lateral maupun vertikal menggunakan pemodelan inversi baik 1-Dimensi, 2-Dimensi, maupun 3-Dimensi.

Salah satu program aplikasi yang dapat digunakan untuk membuat model 3-D dengan metode inversi yaitu DCIP3D. DCIP3D adalah program aplikasi yang dikembangkan oleh *Geophysical Inversion Facility, Department of Earth and Ocean Sciences*, Universitas British Columbia (UBC) – yang berfokus pada pengembangan sederetan algoritma perangkat lunak DCIP3D yang digunakan untuk melakukan *forward modelling* dan inversi resistivitas DC dan data IP melalui distribusi 3-D konduktivitas listrik dan chargeabilitas [2].

LANDASAN TEORI

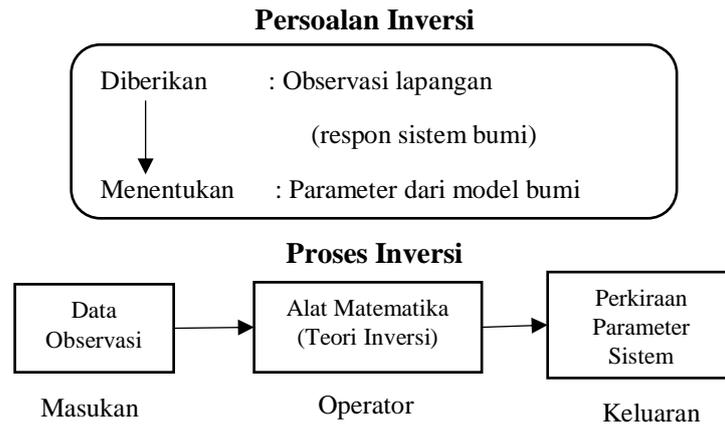
Geolistrik ialah suatu metode dalam geofisika yang mempelajari sifat aliran listrik di dalam bumi dan cara mendeteksinya di permukaan bumi. Metoda geolistrik resistivitas merupakan salah satu metoda eksplorasi geofisika yang dapat digunakan untuk mendeteksi dan memetakan keberadaan material di bawah-permukaan berdasarkan distribusi parameter resistivitas atau tahanan jenis dari material-material yang terukur di bawah-permukaan. Survei dan pemodelan geolistrik dapat dilakukan secara 1-D, 2-D dan 3-D. Survei geolistrik 3-D menggunakan sebuah model interpretasi 3-D. Kelebihan metode 3-D ini dibandingkan metode 1-D dan 2-D yaitu meningkatkan resolusi dari objek yang akan dicari. Dengan distribusi sifat fisis secara 3-D maka objek yang akan dicari akan tercitra lebih jelas wujudnya. Pada beberapa kasus, set data 3-D dibangun dari sejumlah survei 2-D paralel garis. Idealnya, harus terdapat satu set garis survei dengan pengukuran dalam arah-x, diikuti deret garis lain di arah-y.

Konsep Pemodelan Inversi

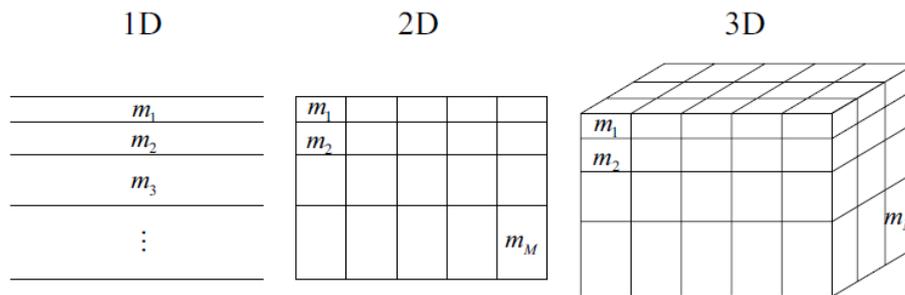
Dalam geofisika, hasil pengukuran lapangan disajikan dalam bentuk angka-angka pengukuran yang disebut data observasi. Untuk menterjemahkan data pengukuran geofisika menjadi besaran yang menggambarkan distribusi sifat fisis bawah-permukaan, dilakukan secara kualitatif dan semi kuantitatif. Untuk memperoleh distribusi sifat fisis bawah-permukaan secara lebih kuantitatif umumnya dilakukan melalui pemodelan. Model adalah representasi keadaan geologi bawah-permukaan oleh benda anomali dengan besaran fisis dan geometri tertentu. Tujuan representasi menggunakan model adalah agar permasalahan dapat disederhanakan dan respon model dapat diperkirakan atau dihitung secara teoritis dengan memanfaatkan teori-teori fisika [5]. Model dapat dinyatakan oleh parameter model yang terdiri dari parameter fisis dan geometri yang menggambarkan distribusi spasial parameter fisis tersebut.

Persoalan yang menggunakan data untuk memperkirakan model bumi yang sesuai adalah persoalan inversi [1]. Solusi untuk menyelesaikan permasalahan inversi adalah respon model. Hubungan antara respons model dengan parameter model bawah-permukaan dinyatakan oleh persamaan matematis yang diturunkan dari konsep fisika yang mendasari fenomena yang ditinjau [6]. Berdasarkan model matematika itulah, parameter fisis batuan dapat diketahui dari data observasi. Proses ini disebut *inverse modelling* atau pemodelan inversi.

Pada metode inversi 3-D, model didiskritisasi menjadi blok-blok kecil atau sel pada tiap lapisannya. Setiap bloknya mengandung nilai parameter fisis yang dicari [3]. Bentuk model bumi yang didiskritisasi disebut dengan *mesh*. Pembuatan *mesh* 3-D didasari metode *finite difference* yang merupakan solusi metode numerik [8]. *Mesh* terdiri dari sekumpulan titik yang mendukung sel. Sel tidak boleh tumpang-tindih dan harus benar-benar menutupi wilayah data [9]. Elemen persegi di dalam *mesh* dapat memiliki nilai konduktivitas yang berbeda-beda.



Gambar 1. Alur pemodelan inversi [7]



Gambar 2. Ilustrasi diskritisasi bumi yang digunakan dalam inversi 1-D, 2-D, 3-D [1]

Dasar Metode Inversi Gauss – Newton

Terdapat dua jenis masalah yang disebut sebagai masalah “inversi”. Yang pertama adalah memperoleh perkiraan untuk beberapa parameter ketika ada lebih banyak data yang tidak diketahui, sebagai masalah estimasi parameter. Permasalahan kedua adalah menemukan fungsi yang menggambarkan distribusi properti fisik untuk menggambarkan model [1]. Seringkali mudah untuk mendapatkan gambar dari algoritma inversi, tetapi tantangannya adalah untuk mendapatkan gambar "terbaik" mungkin sehingga geofisika berkontribusi secara maksimal terhadap solusi masalah tertentu. Istilah data ‘fit’ mengacu pada seberapa baik data simulasi, sesuai dengan model yang dipulihkan, sesuai dengan pengamatan.

Untuk memformulasikan permasalahan inversi secara lebih umum, parameter atau variabel yang terlibat dinyatakan dalam notasi vektor atau matriks yang mempresentasikan variabel dengan banyak komponen atau elemen. Vektor atau matriks ditulis dengan huruf tebal (bold). Data dinyatakan dalam ***d***, dengan *N* sebagai jumlah data,

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N) \tag{1}$$

Tujuan dari inversi adalah untuk memulihkan vektor model ***m*** yang merupakan parameter model

$$\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_M) \tag{2}$$

dimana *M* adalah jumlah model, yang bisa me-reproduksi data observasi *N*

$$\mathbf{d}^{obs} = (d_1^{obs}, d_2^{obs}, \dots, d_N^{obs}) \tag{3}$$

maka secara umum hubungan antara data dan parameter model dapat dinyatakan oleh

$$\mathbf{d} = \mathbf{f}(\mathbf{m}) \tag{4}$$

dimana ***f*** merupakan fungsi umum *forward modelling*. Pers. (4) dapat digunakan untuk menyatakan hubungan antara data dengan parameter model yang dipresentasikan oleh suatu fungsi linear maupun non-linear. Fungsi ***f*** memungkinkan untuk memperediksi data untuk suatu model ***m*** tertentu.

Pada metode Gauss-Newton, masalah inversi didekati dengan fungsi Gaussian. Metode Gauss-Newton adalah metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan inversi non-linear (parameter model tidak berhubungan langsung atau linear dengan respon) yang didekati dengan persamaan linear dengan mengekspansi fungsi $f(\mathbf{m})$ kedalam deret Taylor di sekitar model awal. Model awal didasari oleh suatu nilai tebakan awal dengan variabel \mathbf{m}^0 . Persamaan model awal dapat ditulis sebagai berikut [7]:

$$d_i^0 = f_i(m_1^0, m_2^0, m_3^0, \dots, m_n^0) \quad (5)$$

Dengan asumsi bahwa $f(\mathbf{m})$ bersifat linear di sekitar \mathbf{m}^0 , sehingga gangguan atau perturbasi dari respon model \mathbf{m}^0 dapat diekspansi menggunakan deret Taylor

$$\begin{aligned} f(\mathbf{m}) &= f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, m_3^0 + \delta m_3, \dots, m_p^0 + \delta m_p) \\ &= f_i(\mathbf{m}^0) + \frac{\partial f_i}{\partial m_1} \delta m_1 + \frac{\partial f_i}{\partial m_2} \delta m_2 + \frac{\partial f_i}{\partial m_3} \delta m_3 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial m_p} \delta m_p + H.O.T \\ f(\mathbf{m}) &= f(\mathbf{m}^0) + \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(\mathbf{m}^0)}{\partial m_j} \right\}_{m=\mathbf{m}^0} \delta m_j + 0(\|\delta \mathbf{m}\|^2) \end{aligned} \quad (6)$$

dimana *higher order terms* telah diabaikan.

Dalam semua kasus, data observasi \mathbf{d} yang ingin dilakukan inversi ke \mathbf{m} biasanya terkait dengan kesalahan observasi dan hubungan antara \mathbf{d} dan \mathbf{m} perlu memperhitungkan *noise* aditif \mathbf{e} ini. Didapatkan

$$\mathbf{d} = f(\mathbf{m}) + \mathbf{e} \quad (7)$$

Untuk mendapatkan model terbaik, *error* harus diminimumkan sebaik mungkin. Jika Pers. (6) disubstitusi ke Pers. (7), maka didapat

$$\mathbf{d} = f(\mathbf{m}) = \mathbf{d} - f(\mathbf{m}^0) - \left\{ \sum_{j=1}^p \frac{\partial f_i(\mathbf{m}^0)}{\partial m_j} \right\}_{m=\mathbf{m}^0} \delta \mathbf{m}_j \quad (8)$$

diasumsikan vektor $\mathbf{y} = \mathbf{d} - f(\mathbf{m})$ mewakili perbedaan antara data lapangan dan perhitungan untuk model awal, sedangkan matriks Jacobian

$$J_{ij} = \frac{\partial f_{ij}}{\partial m_j} \quad (9)$$

dinotasikan sebagai A dan $\delta \mathbf{m}$ sebagai \mathbf{x} . Maka, Pers. (10) diperoleh

$$\mathbf{d} - f(\mathbf{m}) = \mathbf{y} - A\mathbf{x} \quad (10)$$

atau

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - A\mathbf{x} \quad (11)$$

Untuk formulasi permasalahan inversi, dicari koreksi atau gangguan pada model awal. Maka formulasi permasalahan yang didapat dari meminimalkan fungsi objektif yaitu,

$$\mathbf{q} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{d} - f(\mathbf{m}))^T (\mathbf{d} - f(\mathbf{m})) \quad (12)$$

Menggunakan Pers. (10), permasalahan dapat ditulis ulang sebagai *minimize*

$$\mathbf{q} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{y} - A\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - A\mathbf{x}) \quad (13)$$

Dengan menggunakan metode Gauss-Newton, maka persamaan non-linear dapat diselesaikan dengan menentukan turunan \mathbf{q} terhadap \mathbf{x} adalah 0,

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_j} = \frac{\partial (\mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{x}^T A^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T A \mathbf{x} + \mathbf{x}^T A^T A \mathbf{x})}{\partial x_j} = 0 \quad (14)$$

atau

$$2A^T A \mathbf{x} - 2A^T \mathbf{y} = 0 \quad (15)$$

Perturbasi ini ($\mathbf{x} = \delta \mathbf{m}$) kemudian diterapkan ke model awal \mathbf{m}^0 untuk menghasilkan estimasi solusi yang lebih baik untuk permasalahan

$$\mathbf{m}^1 = \mathbf{m}^0 + \mathbf{x} \quad (16)$$

Namun, model baru \mathbf{m}^1 mungkin tidak cukup sesuai dengan data sehingga mungkin perlu mengulang prosedur menggunakan \mathbf{m}^1 sebagai model awal. Penerapan berturut-turut dari prosedur ini digambarkan sebagai iterasi *least-squares fitting* (atau metode Gauss Newton). Rumus iteratif akan menjadi

$$\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{y} \quad (17)$$

dimana matriks Jacobian A dievaluasi pada \mathbf{m}^k .

Program Aplikasi DCIP3D

DCIP3D adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh *UBC – Geophysical Inversion Facility, Department of Earth and Ocean Sciences Universitas British Columbia*. Program ini bekerja hanya dengan file yang diformat untuk digunakan oleh pemodelan dan inversi kode

UBC-GIF. Model bumi ditentukan dengan menggunakan dua file: *mesh* yang mendefinisikan diskritisasi dari bumi, dan file model yang mencantumkan nilai properti fisik (atau parameter lapangan) untuk semua sel. DCIP3D menjalankan fungsi sebagai berikut [2]:

- Pemodelan maju data DC / IP untuk array elektroda 3-D yang berubah - ubah (termasuk data lubang bor) .
- Menyatukan topografi.
- Inversi dipecahkan sebagai masalah optimisasi dengan tujuan simultan (i) meminimalkan fungsi objektif model dan (ii) menghasilkan data sintesis yang sesuai dengan pengamatan pada tingkat ketidaksesuaian yang sesuai dengan statistik data tersebut.

Topografi permukaan 3-D juga sepenuhnya tergabung dalam pemodelan dan inversi. Sedangkan *inverse modelling* untuk resistivitas DC dilakukan dengan menggunakan metode Gauss-Newton. DCINV3D merupakan salah satu utilitas yang terdapat dalam DCIP3D melakukan inversi data resistivitas DC berdasarkan metode Gauss-Newton untuk mengembalikan model konduktivitas 3-D.

Metodologi Inversi DCIP3D

Program aplikasi DCIP3D memecahkan dua masalah inversi. Pertama, meng-inversi potensial DC ϕ_σ (potensial yang terukur saat efek chargeabilitas tidak ada) untuk memulihkan konduktivitas listrik $\sigma(x, y, z)$. Kedua, meng-inversi data IP untuk memulihkan chargeabilitas $\eta(x, y, z)$. Parameter fisis yang ingin dicari, dinotasikan dengan m . Untuk inversi pada DCIP3D, $m_i = \ln \sigma_i$ dipilih untuk inversi konduktivitas. Besaran m_i bisa dinotasikan sebagai konduktivitas untuk sel ke- i .

Tujuan dari inversi adalah untuk memulihkan vektor model \mathbf{m} yang merupakan parameter model [2]. Distribusi konduktivitas bumi adalah kompleks. Algoritma inversi apapun akan memproduksi model yang mereproduksi data. Pendekatan yang baik adalah mengarahkan algoritma inversi untuk menghasilkan model yang secara geologis masuk akal. Hal tersebut dapat diimplementasikan dengan memformulasikan sebuah fungsi objektif model yang ketika diminimalkan, memproduksi model dengan karakteristik yang diinginkan. Jika data yang dimuat adalah data buruk, maka informasi tentang konduktivitas yang dikodekan dalam data tidak akan pulih. Tujuannya yaitu menemukan model yang memproduksi data hanya dalam jumlah yang dibenarkan oleh perkiraan ketidakpastian atau misfit dalam data. Untuk mencapai hal tersebut hingga dihasilkan model optimum, DCIP3D mengenalkan sebuah standar misfit global, berupa fungsi obyektif yang diminimumkan, yaitu

$$\psi_d = \|W_d(d - d^{obs})\|^2 \quad (18)$$

Dimana W_d adalah matriks pembobotan atau *weighting* datum. Umumnya pengaruh data dengan kesalahan cukup besar sehingga harus diminimumkan agar hasil inversinya merupakan representasi data dengan tingkat ketelitian yang baik. Hal tersebut dapat dilakukan dengan pembobotan data dalam penyelesaian masalah inversi. Diasumsikan *noise* yang mencemari observasi ke- j adalah variabel acak *Gaussian* yang tidak berkorelasi yang memiliki *mean* nol dan standar deviasi ϵ_j . Aspek kritis inversi adalah untuk membentuk fungsi objektif model yang dikarakterisasi oleh ψ_m .

Fungsi objektif ψ_m dipilih untuk menemukan sebuah model yang memiliki struktur minimum pada arah vertikal dan horizontal, dan pada saat yang sama mendekati model referensi m_0 . Untuk mencapainya, DCIP3D meminimalkan aproksimasi yang didiskritkan ke:

$$\psi_m(m, m_0) = \alpha_s \iint w_s (m - m_0)^2 dv + \alpha_x \iint w_x \left(\frac{\partial(m-m_0)}{\partial x} \right)^2 dv + \alpha_y \iint w_y \left(\frac{\partial(m-m_0)}{\partial y} \right)^2 dv + \alpha_z \iint w_z \left(\frac{\partial(m-m_0)}{\partial z} \right)^2 dv. \quad (19)$$

Dalam Pers. (19) di atas, α_s mengontrol kedekatan dari model konstruksi terhadap model referensi m_0 . α_x , α_y , α_z mengontrol kekasaran model pada tiga arah. Semakin besar panjang skala di tiap arah, model akan semakin halus atau *smooth*. Memvariasikan nilai skala pada arah x , y , atau z , membuat konstruksi model semakin halus. Bentuk diskrit persamaan di atas adalah,

$$\psi_m = (m - m_0)^T \{ \alpha_s W_s^T w_s + \alpha_x W_x^T w_x + \alpha_y W_y^T w_y + \alpha_z W_z^T w_z \} (m - m_0) \equiv (m - m_0)^T W_m^T w_m (m - m_0) \quad (20)$$

Matriks W_s , W_y , W_z dibentuk oleh aproksimasi *finite difference* dari persamaan integral (20). Permasalahan inversi sekarang diformulasikan dengan benar sebagai masalah optimasi:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \psi_d + \mu\psi_m \\ \text{subject to} \quad & \psi_d = \psi_d^* \end{aligned} \quad (21)$$

Teknik yang tepat bisa bekerja untuk mengatasi minimisasi dan minimizer m hasil model yang dicari.

DCIP3D menyediakan program inversi berdasarkan meminimalkan metode Gauss-Newton yang membutuhkan linearisasi persamaan data dan dilakukan secara iteratif. Program ini dapat digunakan untuk melakukan inversi dengan teliti terhadap data resistivitas DC jika interpretasi berdasarkan pada kebutuhan mengembalikan model konduktivitas.

Inversi data resistivitas diasumsikan sebagai minimisasi persamaan non linear, karena data tidak bergantung secara linear pada model konduktivitas. Masalah ini di atasi dengan menggunakan pendekatan Gauss-Newton dimana fungsi objektif dilinearisasi dengan sebuah model saat ini, $m^{(n)}$, dan sebuah gangguan/perturbasi model δm , diselesaikan dan digunakan untuk memperbarui model saat ini, menghasilkan

$$(J^T + \mu W_m^T W_m) \delta m = -J^T (d^{(n)} - d^{obs}) - \mu W_m^T W_m (m^{(n)} - m_0) \quad (22)$$

dengan matriks Jacobian

$$J_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} = \frac{\partial \phi_i}{\partial \ln \sigma_j} \quad (23)$$

Pers. (22) adalah solusi persamaan linear dasar. Diasumsikan matriks Wd telah diserap ke dalam matriks sensitivitas dan vektor data. Ini adalah persamaan dasar yang diselesaikan untuk memperoleh perturbasi model. Kemudian model yang baru dihasilkan oleh,

$$m^{(n+1)} = m^{(n)} + \alpha \delta m \quad (24)$$

dimana $\alpha \in (0,1]$ membatasi *stepsize* atau ukuran langkah dan dipilih untuk memastikan bahwa fungsi objektif total berkurang.

Pemilihan parameter regularisasi untuk inversi Gauss-Newton bergantung pada besarnya *error* yang terkait dengan data. Inversi pada data yang mengandung banyak *noise* membutuhkan regularisasi yang lebih berat, sehingga diperlukan nilai yang lebih besar dari μ . Jika standar deviasi terkait datum diketahui, maka misfit data didefinisikan oleh persamaan

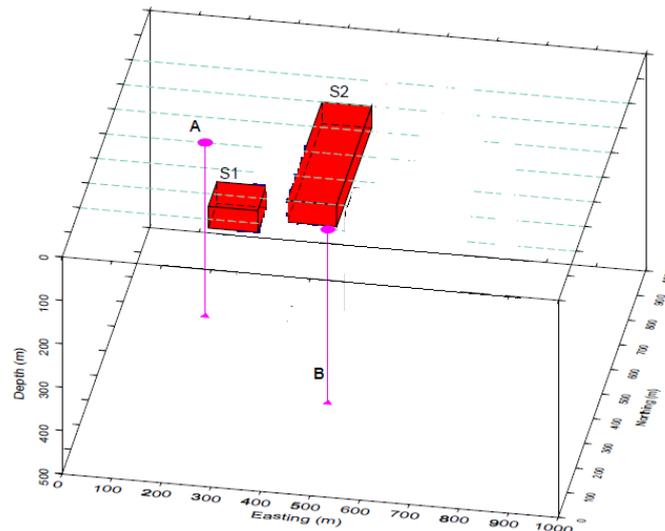
$$\psi_d = \|Wd(d - d_{obs})\|^2 \quad (25)$$

memiliki nilai yang diharapkan ψ_d^* , yang sama dengan jumlah data ketika *error* diasumsikan *noise Gaussian* independen dengan mean nol. Nilai μ harus sedemikian rupa sehingga misfit yang diharapkan tercapai.

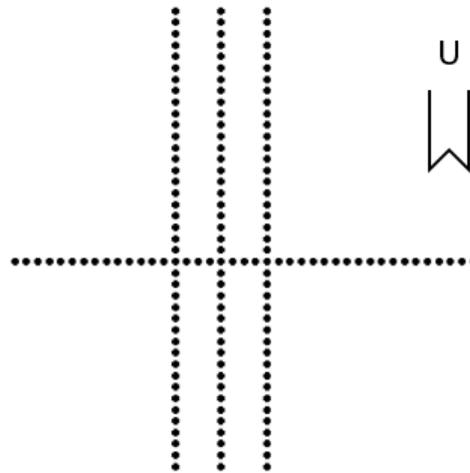
METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi data sintetik dan data sekunder. Data sintetik DC yang diperoleh dari UBC. Data terdiri dari dua blok balok terkubur dalam *uniform halfspace* atau ruang setengah seragam. Dua blok tersebut ditempatkan di permukaan. Data resistivitas DC menggunakan jarak antar elektroda 50 m dan n berkisar dari 1 sampai dengan 6.

Data sekunder hasil penelitian PTBGN – BATAN di daerah “X”, Kabupaten Ahu Mamuju, Sulawesi Barat. Data tersebut merupakan data metode geolistrik IP konfigurasi *Wenner-Alpha*, yang diambil pada 20 Maret 2017 di wilayah Ahu Mamuju dengan menggunakan alat ABEM SAS 1000.



Gambar 3. Model sintetik mengandung dua blok pada ruang *uniform halfspace*



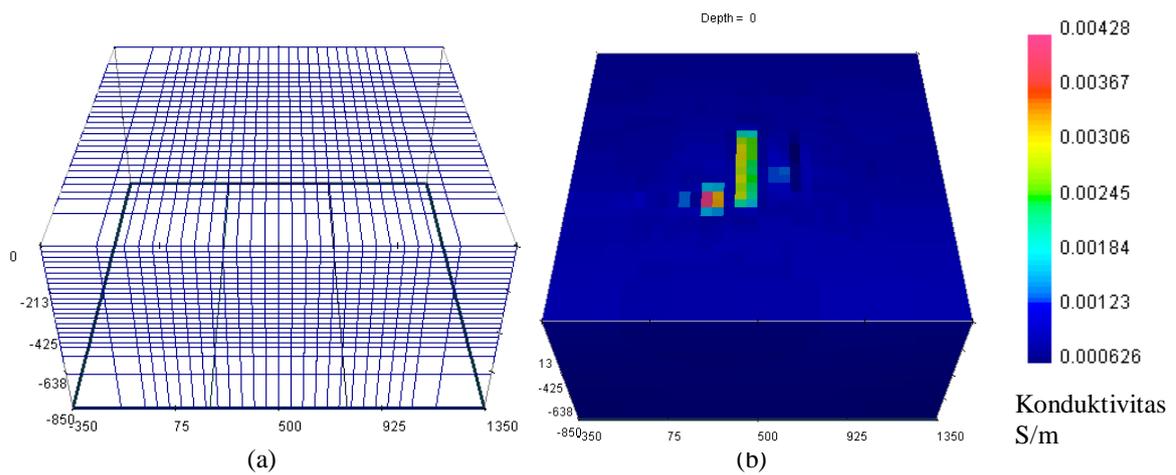
Gambar 4. Grid lintasan pengukuran

Grid lintasan data pengukuran yang digunakan penulis dapat dilihat pada gambar 3.2. Terdapat empat lintasan pengukuran, yaitu lintasan A, B, C, dan D. Lintasan A, B, dan C terletak pada utara-selatan daerah pengukuran, sedangkan lintasan D terletak pada daerah timur pengukuran. Tiap lintasan memiliki 12-n. Masing-masing lintasan terdiri atas empat puluh elektroda dengan konfigurasi Wenner-Alpha. Jarak antar elektroda adalah 10 m. Panjang lintasan adalah 400 x 400 m.

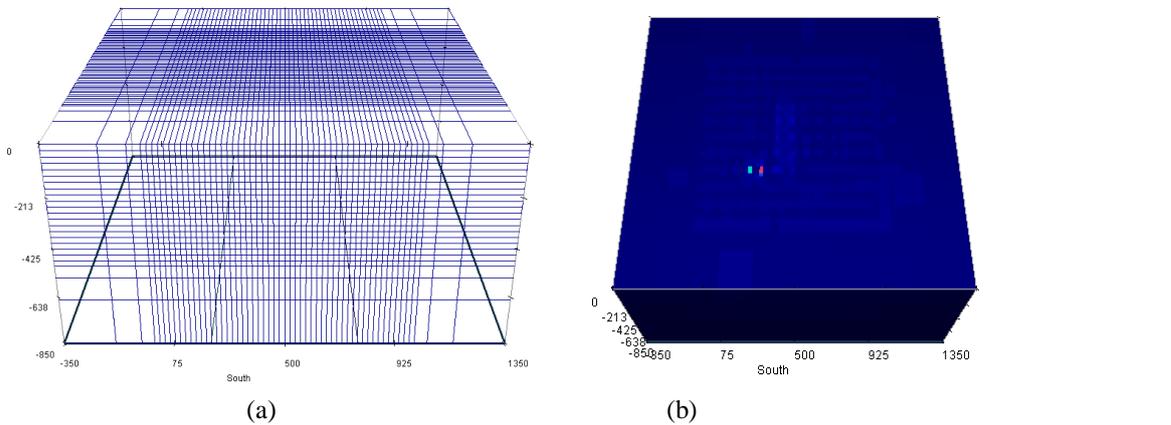
HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Sintetik

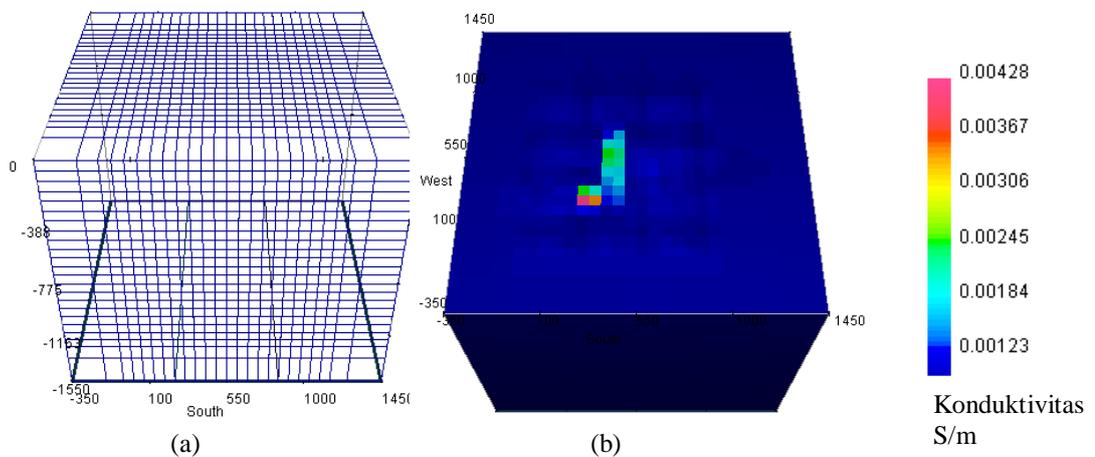
Dilakukan variasi ukuran sel zona inti *mesh* sebanyak tiga kali, yaitu dengan ukuran (50×50×50) m, (20×20×25) m dan (60×60×60) m. Zona *padding* terdiri atas enam sel masing-masing di arah timur-barat dan utara-selatan yang terbagi atas tiga sel di setiap sisi dengan panjang 50 m, 100 m, dan 200 m. Sedangkan pada kedalaman, ukuran sel *mesh* memiliki perpanjangan 50m, 100m dan 200m.



Gambar 5. (a) *Mesh*, (b) Model 3-D konduktivitas data sintetik (50 ×50 ×25) m



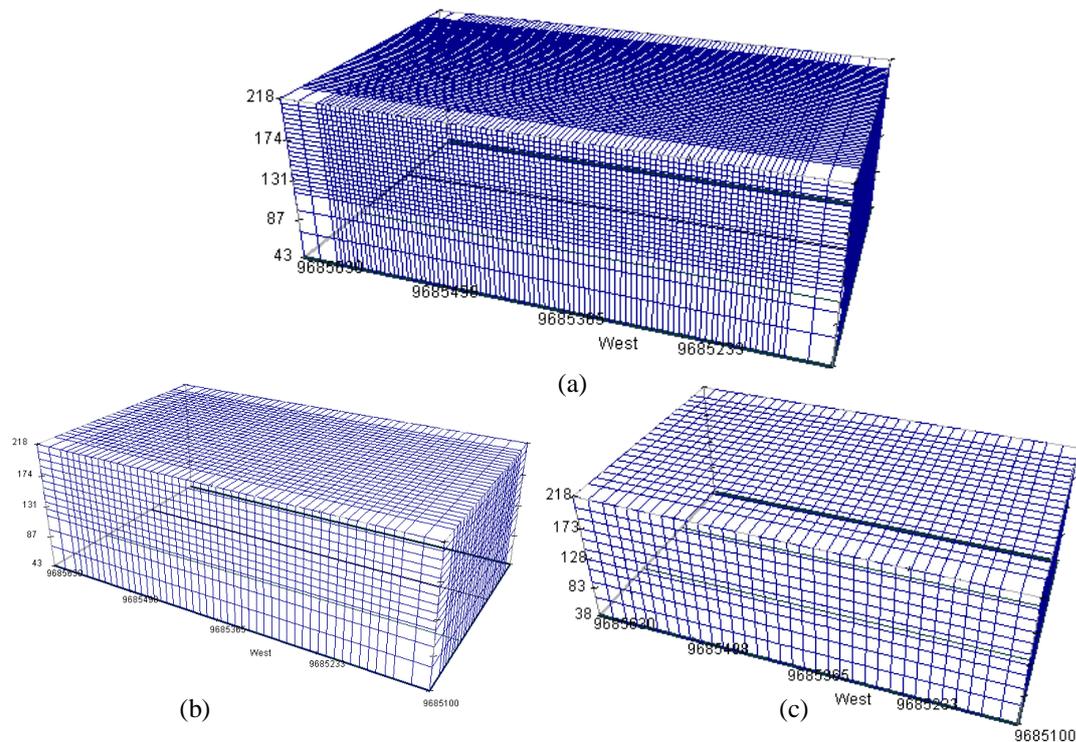
Gambar 6. (a) *Mesh*, (b) Model 3-D konduktivitas data sintetik (20 ×20 ×25) m



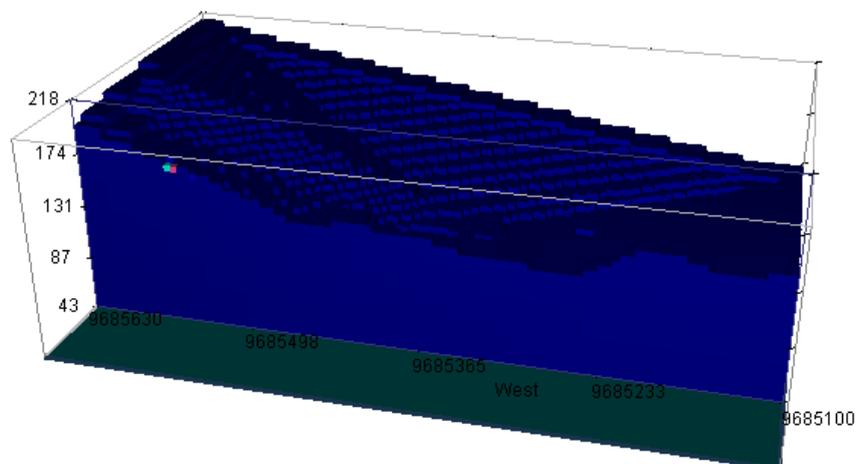
Gambar 7. (a) *Mesh*, (b) Model 3-D konduktivitas data sintetik (60 ×60 ×60) m

Data Sekunder

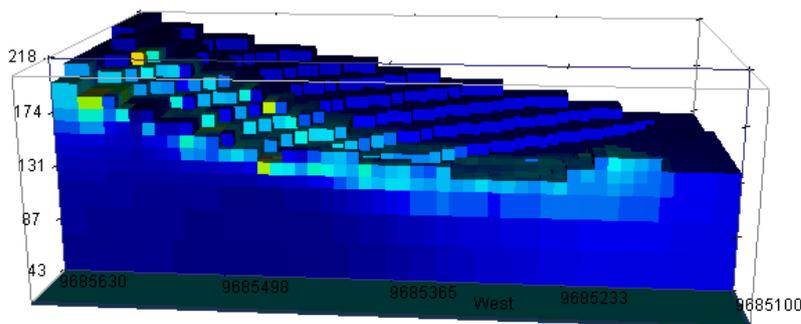
Terdapat tiga variasi sel zona inti *mesh* ($5 \times 5 \times 5$) m, ($10 \times 10 \times 10$) m, dan ($15 \times 15 \times 15$) m. Pada arah timur, panjang sel adalah 310 m yang memanjang ke Barat dengan koordinat *easting* pada 703841 m. Pada arah utara, sel memanjang ke selatan sepanjang 530 m dengan koordinat *northing* pada 9685100 m. Pada arah vertikal, sel memanjang dengan kedalaman 175 m dengan koordinat sudut atas barat daya 218 m. Zona *padding* pada arah timur dan barat utara masing – masing 1 sel dengan panjang 30 m, sedangkan pada arah utara sel memanjang sebanyak masing-masing 2 sel dengan panjang 20 m. Pada arah vertikal, zona inti terdiri atas 13 sel lalu semakin ke bawah sel semakin panjang, yaitu 3 sel dengan masing-masing panjang 20 m, 25 m, dan 30 m.



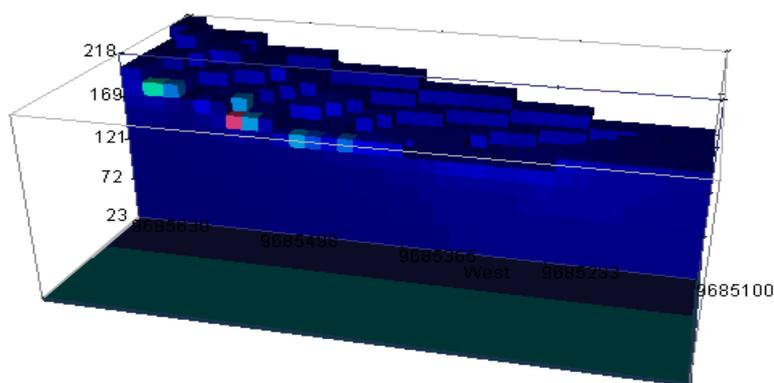
Gambar 8. Mesh data sekunder (a) ($5 \times 5 \times 5$) m (b) ($10 \times 10 \times 10$) m (c) ($15 \times 15 \times 15$) m



Gambar 9. Model konduktivitas 3-D data sekunder (a) ($5 \times 5 \times 5$) m



Gambar 10. Model konduktivitas 3-D data sekunder ($10 \times 10 \times 10$) m

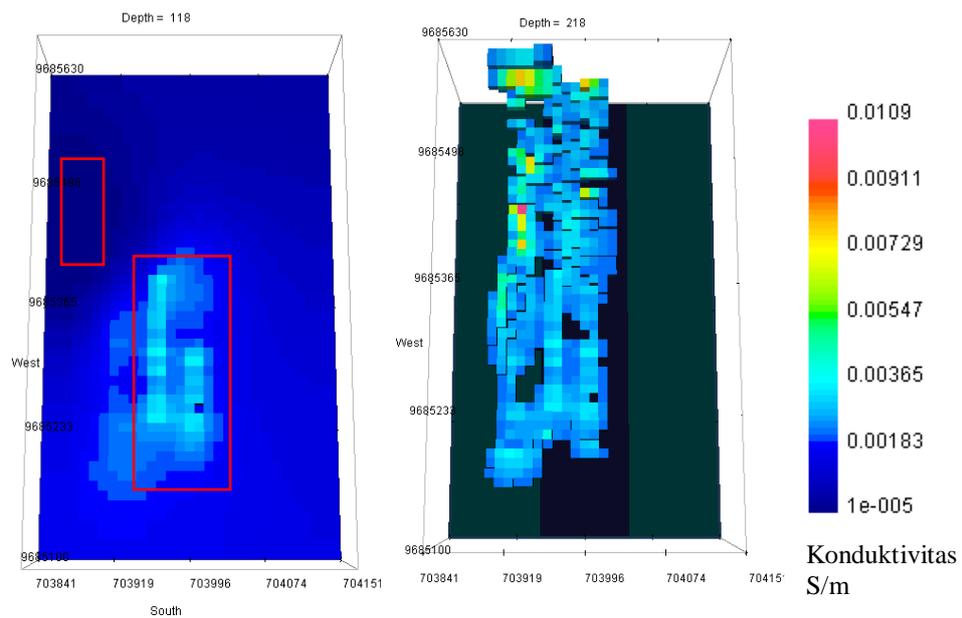


Gambar 11. Model konduktivitas 3-D data sekunder ($15 \times 15 \times 15$) m

Untuk proses pemodelan konduktivitas menggunakan DCIP3D, hanya dilakukan satu iterasi tiap ukuran *mesh*. Untuk model dengan mesh ukuran ($5 \times 5 \times 5$) m membutuhkan proses iterasi yang berlangsung selama kurang lebih dua jam. Sedangkan untuk model ($10 \times 10 \times 0$) m membutuhkan waktu proses iterasi sekitar dua puluh lima (25) menit dan model ($15 \times 15 \times 15$) m membutuhkan waktu sekitar lima belas (15) menit untuk menghasilkan model konduktivitas 3-D. Dari hal tersebut, dapat disimpulkan semakin banyak jumlah sel yang digunakan pada suatu model semakin lama waktu yang dibutuhkan proses iterasi untuk menghasilkan model konduktivitas 3-D yang sempurna.

Untuk analisis hasil model konduktivitas 3-D, digunakan model dengan variasi sel mesh ($10 \times 10 \times 10$) m dikarenakan sesuai dengan jarak antar elektroda saat akusisi data, yaitu 10 m. Konduktivitas yang dipulihkan pada model ditunjukkan pada Gbr 12. Model yang dipulihkan sangat mirip dengan model yang sebenarnya, terutama di daerah permukaan. Penampang sebelah kiri menunjukkan potongan kedalaman melalui model pada kedalaman 118 m. Terdapat dua blok terlihat yang ditandai dengan kotak merah. Blok kiri-atas menunjukkan nilai resistivitas yang paling tinggi pada penampang tersebut dan tidak memiliki batas yang tajam. Sedangkan blok yang berada di tengah menunjukkan konduktivitas yang dikelilingi permukaan resistif. Blok terbentuk dengan baik terlihat dari batasnya yang tajam.

Penampang sebelah kanan menunjukkan permukaan yang mempunyai konduktivitas paling terlihat jelas dengan memotong bagian model yang memiliki resistif yang tersebar mengelilingi blok konduktivitas tersebut. Dalam penampakannya, blok permukaan konduktif dengan topografi dipulihkan dengan baik. Blok konduktif mengikuti posisi elektroda yang terdiri atas lintasan A, B dan C. Nilai konduktivitas yang berhasil dipulihkan yaitu antara 0.00365 S/m sampai dengan 0.0109 S/m yang menunjukkan konduktivitas tertinggi terletak pada bagian atas lintasan sebelah kiri. Batas-batas blok permukaan resistif terlihat dengan jelas.



Gambar 12. Model konduktivitas 3-D data sekunder menggunakan penampang berbeda

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil interpretasi dan pembahasan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Pemodelan geolistrik resistivitas 3-D memungkinkan terjadinya variasi konduktivitas dalam tiga arah (arah-x, arah-y, arah-z) sehingga membuat pencitraan objek yang akan dicari akan tercitra lebih jelas wujudnya dibanding pencitraan dengan model 1-D dan 2-D.
- 2) Metode inversi dipecahkan sebagai masalah optimisasi dengan tujuan simultan dari meminimalkan fungsi obyektif model dan menghasilkan data sintesis yang cocok dengan pengamatan.
- 3) Berdasarkan model konduktivitas 3-D yang dipulihkan pada DCIP3D diketahui bahwa:
 - a. Ukuran sel mesh model yang terbaik untuk menggambarkan pencitraan konduktivitas bawah permukaan daerah penelitian adalah $(10 \times 10 \times 10)$ m karena sesuai dengan jarak antar elektroda yang digunakan saat akuisisi data.
 - b. Model konduktivitas yang dipulihkan dengan tambahan nilai topografi membuat model semakin nyata dalam menggambarkan permukaan bumi daerah penelitian.
 - c. Semakin banyak jumlah sel yang digunakan pada suatu model semakin lama waktu yang dibutuhkan proses iterasi untuk menghasilkan model konduktivitas 3-D yang sempurna.

REFERENSI

- [1] Oldenburg, D; Jones, F., Inversion for Applied Geophysics, University of British Columbia: Geophysical Inversion Facility, 2000-2007.
- [2] Geophysical Inversion Facility, DCIP3D: A Program Library For Forward Modelling and Inversion of DC Resistivitas and Induced Polarization Data Over 3D Structures Version 2.1, University of British Columbia.
- [3] Loke, M., Tutorial 2-D and 3-D Electrical Imaging Survey, Penang: Geotomo Software, 2002.
- [4] Loke, M; Barker, R., Practical Technique For 3D Resistivitas Surveys and Data Inversion, Gephysical Prospecting, 1996.
- [5] Supriyanto., Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi, Depok: Departemen Fisika- MIPA Universitas Indonesia, 2007.

- [6] Grandis, Hendra;, Pengantar Pemodelan Inversi Geofisik, Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, 2009
- [7] Meju, A; Max;, Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice, Society of Exploration Geophysicists, 1994.
- [8] Geophysical Inversion Facility, DCIP3D OCTREE: A Program Library for Forward Modelling and Inversion of DC/IP Data over 3D Structures using Octree Meshes Version 1.0, University of British Columbia, 2012.
- [9] Robert, Cook;, Konsep dan Aplikasi Metode Elemen Hingga, Bandung: PT.Eresco, 1990.
- [10] Dey, A;, Resistivitas Modelling For Arbitrarily Shaped Two Dimensional Structures, 1979.

Pembuatan dan Karakterisasi Keramik Magnet BaFe₁₂O₁₉ dengan Variasi Waktu *Milling* dan Temperatur *Sintering*

Syaiful Izzuddin Salam^{1,†}, Edi Sanjaya¹, Muljadi²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Pusat Penelitian Fisika LIPI, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

† shaiful.salam15@mhs.uinjkt.ac.id

Abstrak. Pada penelitian ini, dilakukan pembuatan keramik magnet barium heksaferit (BaFe₁₂O₁₉) dengan variasi waktu *milling* dan temperatur *sintering* dengan metode metalurgi serbuk. Preparasi sampel dimulai dengan menghaluskan serbuk barium heksaferit dengan *rotary ball mill* dengan media air (*wet milling*) dengan waktu 4 jam dan 12 jam. Kemudian, sampel dikeringkan selama 24 jam dan dicetak dengan beban 8 ton selama 1 menit. Sampel yang telah berbentuk pelet lalu disinter pada temperatur 1100 °C dan 1200 °C dengan waktu tahan selama 1 jam. Setelah itu, dilakukan pengukuran densitas dan porositas dengan menggunakan Metode Archimedes, analisis fasa dengan XRD, serta kuat medan magnet dengan menggunakan gaussmeter. Densitas tertinggi terdapat pada sampel yang di-*milling* selama 12 jam dan disinter pada temperatur 1200 °C, yaitu 4,495 gr/cm³. Pada sampel tersebut juga diperoleh nilai porositas terendah, yaitu 0,89 %. Dari hasil XRD, ditemukan fasa pengotor hematit (Fe₂O₃). Dari pengujian kuat medan magnet, sampel dengan kuat medan magnet tertinggi terdapat pada sampel yang di-*milling* selama 4 jam dan disinter pada temperatur 1200 °C yaitu 410,3 G.

Kata Kunci: Barium Heksaferit, Densitas, Fasa, Kuat Medan Magnet, Metalurgi Serbuk

Abstract. In this study, we made ceramic magnet of barium hexaferrite (BaFe₁₂O₁₉) with variation of milling time and sintering temperature by powder metallurgy method. First, barium hexaferrite powder mashed with a rotary ball mill. Milling is done with medium of water (*wet milling*) for 4 hours and 12 hours. Then, the sample is dried for 24 hours and printed with a load of 8 tons for 1 minute. Then, the pellet-shaped sample sintered at a temperature of 1100 °C and 1200 °C with a holding time of 1 hour. The density and porosity measurements were carried out using the Archimedes Method, phase analysis with XRD, and magnetic flux density using gaussmeter. The highest density were found in samples that were milled for 12 hours and sintered at the temperature of 1200 °C ie 4.495 gr/cm³. In that sample also obtained the lowest porosity 0.89%. From XRD analysis, we knew that hematite (Fe₂O₃) was found as impurity phase. From gaussmeter, the samples with the highest magnetic flux density were found in samples that were milled for 4 hours and sintered at a temperature of 1200 °C ie 410.3 G.

Keywords: Barium Hexaferrite, Density, Magnetic Flux Density, Phase, Powder Metallurgy

PENDAHULUAN

Barium heksaferit (BaFe₁₂O₁₉) merupakan salah satu material magnet yang populer di kalangan peneliti dan telah menjadi salah satu bahan baku favorit dalam industri magnet. Barium heksaferit memiliki sifat-sifat unggulan seperti stabil secara kimiawi, tahan korosi, memiliki resistivitas listrik yang tinggi (sekitar 10⁸ Ω cm), memiliki temperatur Curie yang tinggi (725 °C), memiliki anisotropi uniaksial magnetik yang tinggi, memiliki hampir semua syarat sebagai magnet permanen, dan mudah serta murah diproduksi [1, 2]. Barium heksaferit sering dibuat menjadi magnet permanen, komponen-komponen elektronik, penyimpanan data, absorber gelombang elektromagnetik, maupun aplikasi lainnya. Meskipun telah ditemukan berbagai macam material magnet setelah penemuannya pada tahun 1950an, barium heksaferit tetap eksis dalam dunia penelitian dan industri karena sifat-sifatnya serta ketersediaannya yang melimpah di alam.

Saat ini, barium heksaferit telah menjadi barang komersil dan dijual bebas untuk keperluan penelitian dan industri. Bahkan, serbuk barium heksaferit sebagai *raw material* dapat dengan mudahnya diperoleh secara daring. Meskipun telah tersedia dalam bentuk *raw material*, potensi

dari serbuk barium heksaferit masih dapat dikembangkan lebih jauh, misalnya melalui pemberian *dopping* unsur-unsur lain maupun perlakuan pada metode sintesis dan manufakturnya.

Salah satu metode yang populer dalam proses manufaktur material adalah metode metalurgi serbuk. Metode yang tergolong konvensional ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu preparasi material, *milling/sizing*, pencetakan, dan sintering. Variasi variabel-variabel dalam setiap tahapan tersebut akan menentukan sifat-sifat material yang dihasilkan. Pada penelitian ini dibuat keramik magnet barium heksaferit dengan metode metalurgi serbuk dari bahan baku serbuk barium heksaferit komersil. Dilakukan variasi pada waktu *milling* dan temperatur *sintering*. Setelah itu dianalisis sifat fisis, fasa yang terbentuk, dan sifat magnetnya.

METODE

Pada tahap preparasi sampel, pertama dilakukan penimbangan serbuk barium heksaferit sebanyak 20 gram untuk masing-masing perlakuan *milling*. Setelah dilakukan penimbangan, serbuk barium heksaferit dimasukkan ke dalam wadah *milling* beserta bola-bola *milling*. Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah *wet milling* dengan ditambahkan media berupa air hingga menutupi serbuk dan bola-bola *milling*. Setelah itu, wadahnya ditutup rapat dan diletakkan pada alat *rotary ball mill*. Pada penelitian ini, dilakukan variasi pada lama waktu proses *milling*, yaitu 4 jam dan 12 jam.

Setelah proses *milling* selesai, dilakukan proses pencetakan untuk memperoleh sampel dalam bentuk pelet. Sebelum dicetak, sampel yang telah di-*milling* dikeringkan terlebih dahulu untuk menghilangkan air yang terkandung saat proses *milling*. Pengeringan dilakukan dengan *Vacuum Dryer* pada temperatur 100 °C selama 24 jam. Setelah dikeringkan, sampel ditimbang kembali sebelum dicetak. Untuk membantu proses pencetakan, ditambahkan polimer Celune sebagai perekat dengan komposisi 5% wt sampel. Sampel yang telah dicampur perekat kemudian dimasukkan ke dalam cetakan berdiameter 1 cm² dan dikompaksi dengan menggunakan *hydraulic press* dengan beban 8 ton selama 1 menit.

Proses selanjutnya adalah *sintering*. Pada penelitian ini, dilakukan variasi pada temperatur *sintering*, yaitu 1100 °C dan 1200°C. *Sintering* dilakukan dengan menggunakan *high temperature furnace* dengan waktu tahan selama 1 jam. Berikut adalah daftar sampel BaFe₁₂O₁₉ yang telah dibuat.

Tabel 1. Daftar sampel BaFe₁₂O₁₉

| No. | Kode | Waktu <i>milling</i> (Jam) | Temperatur <i>Sintering</i> (°C) |
|-----|------|----------------------------|----------------------------------|
| 1 | A1 | 4 | 1100 |
| 2 | B1 | 12 | 1100 |
| 3 | A2 | 4 | 1200 |
| 4 | B2 | 12 | 1200 |

Setelah sampel selesai dibuat, tahap berikutnya adalah karakterisasi. Karakterisasi dibatasi pada pengukuran *bulk density* dan porositas, analisa fasa, dan kuat medan magnet (B). pengukuran *bulk density* dan porositas dilakukan dengan Metode Archimedes. Analisa fasa dilakukan dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) Rigaku tipe *SmartLab* 3 kW yang menggunakan sinar-X karakteristik Cu K α dengan panjang gelombang 1,541862 Å, kemudian dilakukan analisis kuantitatif dengan metode *Rietveld Refinement* menggunakan software *High Score Plus* ver.3.0.5. Kuat medan magnet diukur dengan menggunakan gaussmeter. Sebelum dilakukan pengukuran, sampel terlebih dahulu dimagnetisasi dengan menggunakan impuls *magnetizer* dengan tegangan 1200 volt.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran densitas (*bulk density*) dan porositas sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dapat dilihat pada Tabel 2. Terlihat bahwa densitas sampel yang di-*milling* selama 12 jam lebih tinggi dari densitas sampel yang di-*milling* selama 4 jam, baik untuk sampel yang disinter pada temperatur 1100°C maupun pada temperatur 1200°C . Dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu *milling*, semakin tinggi densitas yang diperoleh. Berkebalikan dengan densitas, nilai porositas semakin rendah jika waktu *milling*-nya semakin lama, baik untuk sampel yang disinter pada temperatur 1100°C maupun pada temperatur 1200°C . Hal ini terjadi karena pada saat *milling*, serbuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ terus-menerus mengalami tumbukan dengan bola-bola *milling*. Semakin lama di-*milling*, serbuk akan semakin tergerus akibat menerima energi kinetik bola-bola *milling*, hasilnya ukuran serbuk akan semakin kecil. Kemudian ketika dicetak menggunakan *hydraulic press*, sampel dengan ukuran serbuk lebih kecil akan menyisakan lebih sedikit rongga, sehingga diperoleh sampel yang lebih rapat.

Tabel 2. Hasil pengukuran *Bulk Density* dan porositas sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

| Kode Sampel | Waktu <i>milling</i> (Jam) | Temperatur <i>Sintering</i> ($^\circ\text{C}$) | Bulk Density (gram/cm ³) | Porositas (%) |
|-------------|----------------------------|--|--------------------------------------|---------------|
| A1 | 4 | 1100 | 3.445 | 6.961 |
| B1 | 12 | 1100 | 4.17 | 3.72 |
| A2 | 4 | 1200 | 3.996 | 2.293 |
| B2 | 12 | 1200 | 4.495 | 0.889 |

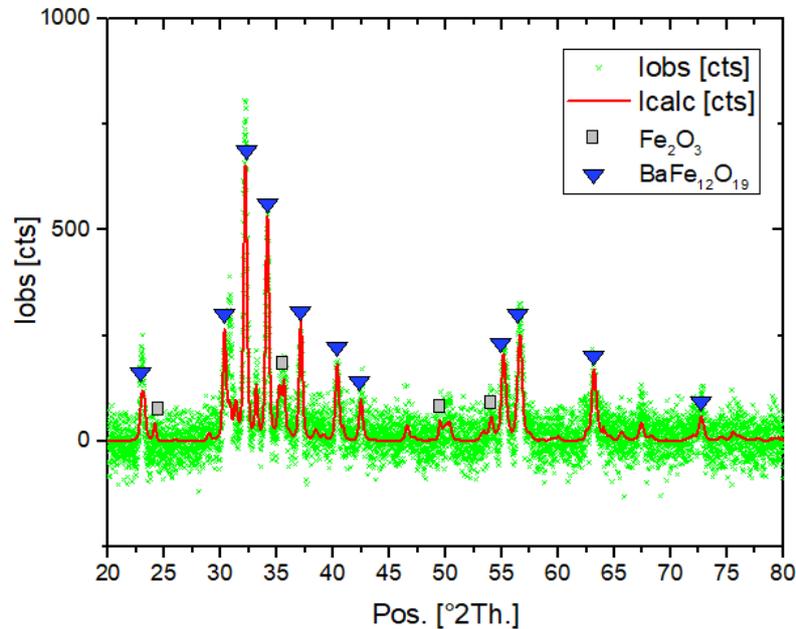
Tabel 2 menampilkan hubungan antara temperatur *sintering* dengan densitas dan porositas. Nilai densitas sampel yang disinter pada temperatur 1200°C lebih tinggi dari nilai densitas sampel yang disinter pada temperatur 1100°C . Sebaliknya, nilai porositas sampel yang disinter pada temperatur 1200°C lebih rendah dari nilai porositas sampel yang disinter pada temperatur 1100°C . Ketika disinter, sampel akan mengalami pemadatan. Permukaan partikel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ akan saling berdifusi sehingga mengurangi rongga pada sampel. Akibatnya, terjadi penyusutan volume sampel setelah disinter.

Sampel yang di-*milling* selama 4 jam dan disinter pada suhu 1200°C mempunyai nilai densitas yang paling tinggi, yaitu $4,495 \text{ gram/cm}^3$ dan nilai porositas yang paling rendah, yaitu $0,889 \%$. Jika serbuk di-*milling* lebih lama lagi, akan diperoleh nilai densitas maksimum $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, yaitu $5,295 \text{ gram/cm}^3$ [1]. Serbuk dengan waktu *milling* lebih lama dan menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil akan memiliki kekuatan mekanik yang lebih besar, karena luas total permukaan partikel-partikelnya lebih besar.

Ukuran partikel sampel juga berpengaruh terhadap temperatur *sintering* dan laju *sintering*. Pada sampel dengan ukuran partikel yang lebih kecil, kepadatan penuh (*Fully Densification*) dapat dicapai pada temperatur *sintering* yang lebih rendah [3]. Pada penelitian ini, sampel B1 dengan waktu *milling* 12 jam dan disinter pada temperatur 1100°C mempunyai densitas yang serupa, bahkan sedikit lebih tinggi dari densitas sampel A2 yang di-*milling* selama 4 jam dan disinter pada temperatur 1200°C . Densitas sampel B1 $4,17 \text{ gram/cm}^3$ sedangkan densitas sampel A2 $3,996 \text{ gram/cm}^3$. Artinya, dapat diperoleh nilai densitas yang serupa meskipun sampel disinter dengan nilai temperatur yang berbeda. Laju pemadatan juga akan lebih cepat jika ukuran partikelnya lebih kecil [3]. Dengan demikian, dikarenakan temperatur *sintering* yang lebih rendah dan laju *sintering* yang lebih cepat, sampel dengan ukuran partikel yang lebih kecil mempunyai efisiensi penggunaan energi yang lebih tinggi.

Pola difraksi sampel ditunjukkan pada **Gambar.1**. Garis merah merupakan pola difraksi hasil *Refinement*, sedangkan titik-titik hijau merupakan pola difraksi hasil eksperimen..Data pola difraksi yang dijadikan perbandingan diperoleh dari database ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*). File database $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dan Fe_2O_3 masing-masing menggunakan database ICSD 98-020-1654 [4] dan ICSD 98-002-2505 [5]. Pada proses Rietveld Refinement, diperoleh nilai χ^2 sebesar 1,223. Artinya, hasil penghalusan tersebut telah konvergen. $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hasil eksperimen mempunyai struktur heksagonal dengan nilai parameter kisi $a=5,88000 \text{ \AA}$,

$b=5,88000 \text{ \AA}$, dan $c=23,18200 \text{ \AA}$ sehingga volume unit selnya = $694,122604 \text{ \AA}^3$. Sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang dibuat pada penelitian ini ternyata tidak satu fasa, terdapat impuritas yang timbul dari proses *milling*, yaitu hematit (Fe_2O_3) yang muncul akibat serbuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ teroksidasi dengan media air yang digunakan. Adanya Fasa hematit terlihat dari terdapatnya *peak-peak* pada pola difraksi yang bukan merupakan *peak* dari $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.



Gambar 1. Pola difraksi sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

Setelah dimagnetisasi, nilai *magnetic flux density* sampel diukur dengan Gaussmeter, hasilnya ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Hasil pengukuran kuat medan magnet sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

| Kode Sampel | Waktu <i>milling</i> (Jam) | Temperatur <i>Sintering</i> ($^{\circ}\text{C}$) | Magnetic Flux Density (Gauss) |
|-------------|----------------------------|--|-------------------------------|
| A1 | 4 | 1100 | 365 |
| B1 | 12 | 1100 | 410.3 |
| A2 | 4 | 1200 | 338.3 |
| B2 | 12 | 1200 | 363.3 |

Dari tabel 3 terlihat bahwa sampel dengan waktu *milling* 12 jam memiliki nilai *magnetic flux density* yang lebih rendah dari sampel dengan waktu *milling* 4 jam. Kemudian, sampel yang disinter pada temperatur $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ memiliki nilai *magnetic flux density* yang lebih tinggi dari sampel yang disinter pada temperatur $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Nilai *magnetic flux density* yang paling baik, yaitu 410,3 Gauss terdapat pada sampel yang di-*mill* selama 12 jam dan disinter pada temperatur 1100°C .

KESIMPULAN

Telah berhasil dibuat keramik magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan variasi waktu *milling* dan temperatur *sintering*. Dengan waktu *milling* 4 jam dan temperatur *sintering* 1200°C , diperoleh nilai densitas yang paling tinggi, yaitu $4,495 \text{ gram/cm}^3$ dan nilai porositas yang paling rendah, yaitu 0,889 %. Sampel dengan ukuran partikel yang lebih kecil, kepadatan penuhnya (*Fully Densification*) dapat dicapai pada temperatur *sintering* yang lebih rendah. Laju pepadatan juga akan lebih cepat jika ukuran partikelnya lebih kecil. Nilai kuat medan magnet yang paling baik,

yaitu 410,3 Gauss terdapat pada sampel yang di-*mill* selama 12 jam dan disinter pada temperatur 1100°C. Kelemahan sampel BaFe₁₂O₁₉ yang dibuat pada penelitian ini adalah tidak satu fasa karena terdapat impuritas, yaitu hematit (Fe₂O₃) yang terbentuk melalui oksidasi serbuk BaFe₁₂O₁₉ saat proses *milling* dengan media air.

REFERENSI

- [1] R. C. Pullar, "Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 57, no. 7, pp. 1191–1334, 2012.
- [2] R. Doni W, A. Manaf, and P. Sardjono, "Characteristics and magnetic properties of BAM from mechanical alloying," *Int. J. Basic Appl. Sci. IJBAS-IJENS*, vol. 13, no. 04, pp. 65–68, 2013.
- [3] M. Abdullah, *Pengantar Nanosains*. Bandung: Penerbit ITB, 2009.
- [4] X. Obradors, A. Collomb, M. Pernet, D. Samaras, and J. C. Joubert, "X-ray analysis of the structural and dynamic properties of BaFe₁₂O₁₉ hexagonal ferrite at room temperature," *J. Solid State Chem.*, vol. 56, no. 2, pp. 171–181, 1985.
- [5] R. P. . Ozerov, Y. T. . Struchkov, R. G. . Gerr, M. P. . Flugge, V. G. . Tsirel'son, and M. Y. Antipin, *Golden Book of Phase Transitions*, vol. 1. Wroclaw, 2002.

Studi Teoritis Pembentukan Momen Magnetik pada *Alloy half-Heusler Mn₂Ge*

Anugrah Azhar^{1, †}, Muhammad Aziz Majidi²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Jalan Margonda Raya, Pondok Cina, Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16424, Indonesia

†anugrahazhar@uinjkt.ac.id

Abstrak. *Alloy Heusler* merupakan subkelas material yang terdiri dari paduan logam transisi dengan fenomena magnetik yang menarik karena nilai momen magnetiknya dapat diprediksi dengan menggunakan perhitungan sederhana yang dikenal dengan aturan Slater-Pauling (*SP rule*). Berdasarkan aturan SP, apabila jumlah elektron valensi dari material ini bernilai 18 (untuk *alloy half-Heusler*), momen magnetik material ini diprediksi akan bernilai $0 \mu_B$. Di sisi lain, material ini secara umum memiliki sifat *half-metal* dimana orientasi spinnya hanya terdapat di satu kanal spin saja. Berangkat dari motivasi ini, kami mengajukan studi teoritis untuk mempelajari pembentukan momen magnetik *alloy half-Heusler Mn₂Ge*. Hasil kami menunjukkan bahwa *Mn₂Ge* memiliki momen magnetik sebesar $0.03 \mu_B$ yang relative dekat dengan prediksi SP-rule dan berhasil menunjukkan fitur *half-metal* dari *Mn₂Ge*.

Kata Kunci: *alloy Heusler, half-metal, momen magnetik, Mn₂Ge.*

Abstract. *Heusler alloy is a subclass material that consists of transition metal compounds with fascinating magnetic properties due to their magnetic moment value can be predicted using a simple calculation called Slater-Pauling rule (SP rule). According to the SP rule, when the total number of the valance electron gives a value of 18 (for half-Heusler alloy), the magnetic momen of this material is predicted by the value of $0 \mu_B$. On the other hand, this material generally has half-metallic behavior in which the spin orientation only occurs on the one direction of spin channel. Starting from those issues, we propose a theoretical study to investigate the magnetic moment formation of half-Heusler alloy *Mn₂Ge*. Our results show that *Mn₂Ge* have magnetic moment of $0.03 \mu_B$ and show the half-metallic feature of *Mn₂Ge*.*

Keywords: *Heusler alloy, half-metallic, magnetic moment, Mn₂Ge*

PENDAHULUAN

Sejak awal ditemukan oleh Fritz Heusler pada awal abad ke 20 [1], *alloy Heusler* sampai saat ini masih banyak diteliti oleh para peneliti karena sifat materialnya yang menarik, terutama pada sifat magnetiknya yang dapat diprediksi menggunakan perhitungan sederhana yang dikenal sebagai aturan Slater-Pauling (*SP-rule*) [2]. Material ini secara umum memiliki sifat *half-metal* dimana orientasi spinnya hanya terdapat pada satu kanal spin saja. Karena sifat *half-metal*nya, hal ini menjadikan material ini sebagai salah satu kandidat untuk teknologi spintronic [3].

$$m = N_{vec} - 18. \quad (1)$$

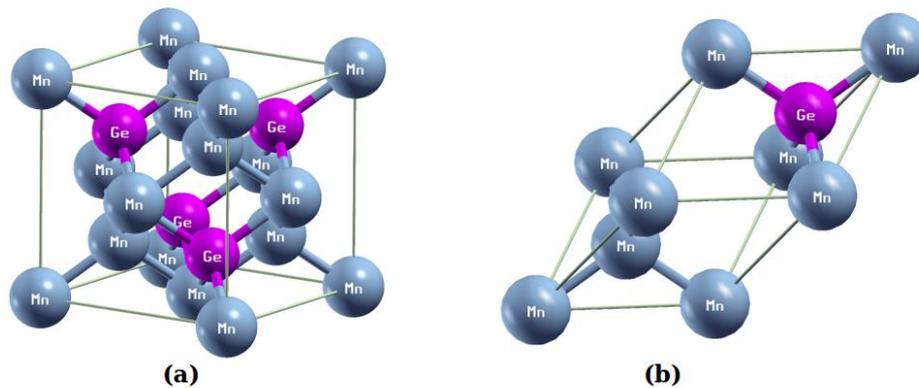
Persamaan (1) merupakan perhitungan *SP-rule* untuk *alloy half-Heusler*. Berdasarkan perhitungan momen magnet yang sangat sederhana di atas, hal ini memungkinkan seseorang untuk mensintesis material dengan nilai momen magnetik dapat diatur dengan cara memilih komposisi yang tepat material penyusunnya. Oleh karenanya, perhitungan secara *first-principle* banyak dilakukan terhadap subkelas material ini [4]–[6]. Hal yang menarik perhatian lainnya yakni, apabila jumlah electron valensi, N_{vec} , pada Persamaan (1) bernilai 18, maka momen magnet dari material tersebut akan bernilai nol, dan salah satunya dimiliki oleh *Mn₂Ge*. Di sisi lain, material *alloy Heusler* secara umum memiliki sifat *half-metal* yang berarti orientasi

spinnya hanya ada pada satu kanal spin saja. Dengan demikian, maka *alloy* Heusler dapat memiliki *net* momen magnet sebesar $0 \mu_B$ sekaligus memiliki sifat *half-metal*.

Berangkat dari isu tersebut, kami mengajukan studi teoritis pada material Mn_2Ge sebagai salah satu *alloy* Heusler yang diprediksi memiliki *net* momen magnetik sebesar $0 \mu_B$ dengan menggunakan model *tight-binding* berbasis perhitungan *first-principle* dan menerapkan koreksi suku interaksi Hubbard *inter-* dan *intra-orbital*, serta kopling Hund untuk orbital-*d* yang dilakukan dalam kerangka *Mean-Field Theory* (MFT). Kami melakukan perhitungan dengan menggunakan algoritma numerik Fortran 90/95 [7]. Untuk mempersingkat waktu komputasi, kami menerapkan skema perhitungan paralel menggunakan *Message Passing Interface* (MPI) [8].

MODEL

Mn_2Ge memiliki struktur kristal $C1_b$ dan menempati posisi Wyckoff di mana Mn (1), Mn (2), dan Ge berturut-turut $(0,0,0)$, $(0.25,0.25,0.25)$, dan $(0.75,0.75,0.75)$ seperti pada Gambar 1 [9].



Gambar 1. (a) Unit cell konvensional Mn_2Ge , (b) Unit cell primitif Mn_2Ge .

Sebelum melakukan perhitungan lebih lanjut, terlebih dahulu dilakukan penentuan basis orbital dari Mn_2Ge . Kami menyusun 24 basis orbital berdasarkan orbital dari masing-masing atom penyusun Mn_2Ge yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1. Basis orbital Mn_2Ge

| Atom | Orbitals |
|--------|---|
| Mn (1) | $ 3s\rangle, 3p_x\rangle, 3p_y\rangle, 3p_z\rangle, 4s\rangle$ $ 3d_{z^2}\rangle, 3d_{xy}\rangle, 3d_{xz}\rangle, 3d_{yz}\rangle, 3d_{x^2-y^2}\rangle$ |
| Mn (2) | $ 3s\rangle, 3p_x\rangle, 3p_y\rangle, 3p_z\rangle, 4s\rangle$ $ 3d_{z^2}\rangle, 3d_{xy}\rangle, 3d_{xz}\rangle, 3d_{yz}\rangle, 3d_{x^2-y^2}\rangle$ |
| Ge | $ 3s\rangle, 3p_x\rangle, 3p_y\rangle, 3p_z\rangle$ |

Hamiltonian yang kami ajukan mengandung 2 suku utama yakni suku non-interaksi (*bare*) dan suku interaksi [10]

$$\mathcal{H}_{total} = \mathcal{H}_{non} + \mathcal{H}_{int}. \quad (2)$$

Suku pertama dari Persamaan (2) nantinya akan diselesaikan dengan menggunakan pendekatan *tight-binding*. Persamaan (2) kemudian dapat diekspansi dalam bentuk

$$\mathcal{H}_{non} = \sum_{\mathbf{k}} \eta_{\mathbf{k}}^{\dagger} [H_0(\mathbf{k})] \eta_{\mathbf{k}}. \quad (3)$$

$\eta_{\mathbf{k}}^{\dagger}$ ($\eta_{\mathbf{k}}$) merupakan matriks kolom (baris) yang berisi operator kreasi (anihiliasi), sementara $[H_0(\mathbf{k})]$ merupakan matriks Hamiltonian yang elemen matriksnya dapat dijabarkan menjadi

$$\mathcal{H}_{0\ i,j}(\mathbf{k}) = \epsilon_i \delta_{i,j} - t_{i,j} \sum_{\delta_{nn}} e^{-i\mathbf{k} \cdot \delta_{nn}}. \quad (4)$$

- ϵ_i : Energi on-site orbital ke-i
- \mathbf{k} : vektor gelombang dalam zona Brillouin
- $t_{i,j}$: hopping integral antara orbital i dan j pada atom terdekat
- δ_{nn} : vektor translasi atom tetangga terdekat

Seluruh parameter *tight-binding* (ϵ_i dan $t_{i,j}$) diperoleh dengan terlebih dahulu melakukan perhitungan *Density Functional Theory* (DFT) menggunakan *Quantum Espresso package* [11] yang dilanjutkan dengan mengekstrak parameter-parameter *tight-binding* menggunakan *Wannier90 package* [12].

Suku ke-2 dari Persamaan (2) merupakan suku interaksi yang terdiri dari interaksi Coulomb repulsion inter- dan intra-orbital, serta kopling Hund antara orbital-d yang dapat ditulis sebagai berikut

$$H_{int} = \sum_{nia} U_{nia} \hat{n}_{nia\uparrow} \hat{n}_{nia\downarrow} + \sum_{n,m,i\alpha < \beta} \sum_{\sigma,\sigma'} \left(V_{(nia),(mj\beta)} - \frac{1}{2} J_{(nia),(mj\beta)} \right) \hat{n}_{nia\sigma} \hat{n}_{mj\beta\sigma'} - 2 \sum_{n,i,\alpha < \beta} J_{(nia),(mj\beta)} \vec{s}_{nia} \cdot \vec{s}_{mj\beta}. \quad (5)$$

- n, m : indeks unit cell
- i, j : indeks atom
- α, β : indeks orbital
- σ, σ' : indeks spin.

$U, V,$ dan J berturut-turut merupakan Coulomb intra-orbital, Coulomb inter-orbital, dan Kopling Spin untuk orbital d. Keseluruhan perhitungan kemudian dieksekusi dengan menggunakan kode programming Fortran 90/95 dengan proses paralelisasi menggunakan MPI dalam kerangka *Mean-Field Theory*. Keseluruhan alur dari algoritma perhitungan dapat dilihat pada Gambar 2.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode numerik untuk memperoleh besaran-besaran fisika menggunakan program Fortran 90/95. Sebelum melakukan perhitungan lebih lanjut, basis orbital pada tabel 1 yang merupakan elemen matriks dari matriks Hamiltonian, $[H_0(\mathbf{k})]$. Matriks $[H_0(\mathbf{k})]$ dalam Persamaan (3) mengandung blok matriks berukuran 24×24 untuk spin-up, $[H_0(\mathbf{k})]_{\uparrow}$, dan 24×24 untuk spin down, $[H_0(\mathbf{k})]_{\downarrow}$.

$$[H_0(\mathbf{k})] = \begin{bmatrix} [H_0(\mathbf{k})]_{\uparrow} & 0 \\ 0 & [H_0(\mathbf{k})]_{\downarrow} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Untuk perhitungan lebih lanjut, kami mendefinisikan fungsi Green *retarded* yang dapat dinyatakan dalam bentuk matriks sebagai

$$[G^R(\vec{k}, \omega)] = \left[(\omega + i0^+) [I] - [H_0(\vec{k})] - [\Sigma] \right]^{-1}. \quad (7)$$

Density of States (DOS) sistem dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$\text{DOS}(\omega) = -\frac{1}{\pi} \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{k}} \text{Im Tr}[G^R(\mathbf{k}, \omega)]. \quad (8)$$

Kemudian, untuk menghitung nilai momen magnetik dari sistem diperoleh dengan menghitung selisih dari jumlah spin-up dan spin-down.

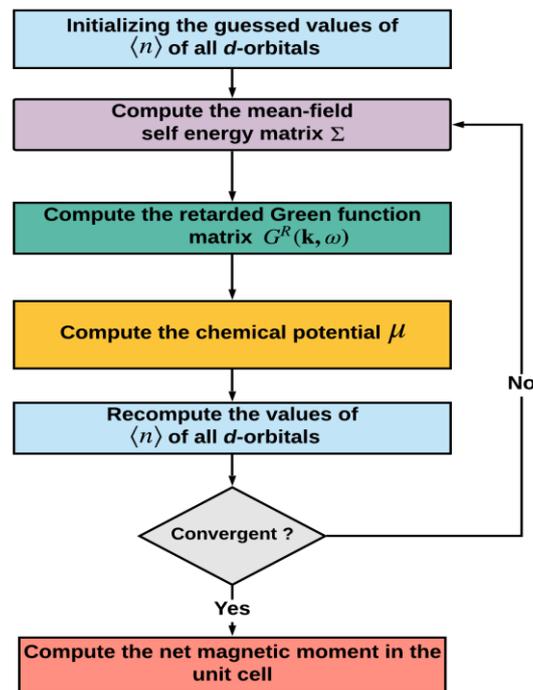
$$m = (n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) \mu_B. \quad (9)$$

Dengan $n_{\uparrow(\downarrow)}$ diperoleh menggunakan persamaan berikut

$$n_{\uparrow(\downarrow)} = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \text{DOS}_{\uparrow(\downarrow)}(\omega) f(\omega, \mu, T), \quad (10)$$

di mana $f(\omega, \mu, T)$ merupakan fungsi distribusi Fermi.

$$f(\omega, \mu, T) = \frac{1}{e^{\frac{(\hbar\omega - \mu)}{k_B T}} + 1} \quad (11)$$

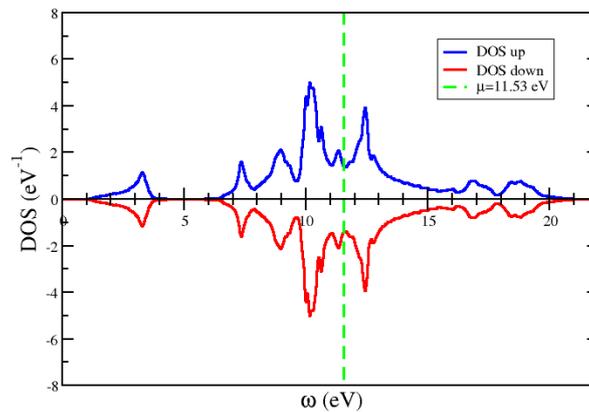


Gambar 2. Algoritma Mean-Field Theory

HASIL DAN PEMBAHASAN

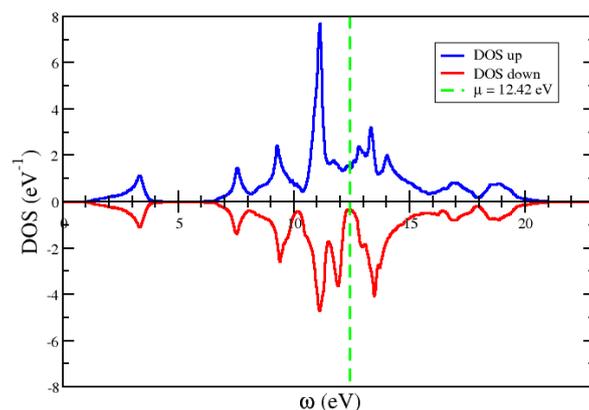
Density of States (DOS)

non-interacting DOS (*Bare* DOS) yang diperoleh dengan menggunakan persamaan (7) dihitung menggunakan grid *k-point* sebanyak $20 \times 20 \times 20$. Perhitungan *bare* DOS dimaksudkan untuk mengetahui fitur awal DOS dan potensial kimia dari Mn_2Ge sebelum diberikan interaksi.



Gambar 3. Bare DOS alloy half-Heusler Mn_2Ge

Gambar 3 menunjukkan bahwa DOS untuk *majority* dan *minority* spin berada pada keadaan yang sama yang menandakan bahwa belum adanya interaksi. Potensial kimia pada *bare* DOS bernilai 11.53 eV. Setelah fitur *bare* DOS dari Mn_2Ge sesuai dengan yang diharapkan, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan dengan mengimplementasikan suku interaksi yang dikumpulkan dalam matriks *self-energy*, $[\Sigma]$, yang terdiri atas suku Coulomb *intra-* dan *inter-orbital*, serta kopling Hund antara orbital-d. Adapun DOS dari Mn_2Ge setelah diberikan suku interaksi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Interacting DOS alloy half-Heusler Mn_2Ge .

Gambar 4 menunjukkan bahwa spin-*up* dan spin-*down* dari Mn_2Ge mengalami perubahan yang sangat signifikan, yang diikuti dengan pergeseran potensial kimia yang semula bernilai 11.53 eV menjadi 12.42 eV. Pada Gambar 4, nilai potensial kimia Mn_2Ge berada pada band untuk kanal spin-*up*, sementara pada spin-*down* berada pada gap. Hal ini menunjukkan bahwa Mn_2Ge bersifat *half-metal* yang berasal dari interaksi antara orbital-*d* pada atom-atom Mn [13].

Momen Magnetik

Nilai momen magnetik yang kami peroleh berdasarkan hasil perhitungan yakni sebesar $0.03 \mu_B$. Nilai ini relatif cukup dekat dengan prediksi dari *SP-rule* yakni $0.00 \mu_B$. Adapun nilai momen magnetik kontribusi dari masing-masing atom penyusun Mn_2Ge disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2. Momen magnetik per atom

| Atom | Magnetik momen (μ_B) |
|--------|----------------------------|
| Mn (1) | -175 |
| Mn (2) | 1.65 |
| Ge | 0.06 |

Tabel 2 menunjukkan nilai momen magnetik masing-masing dari atom penyusun Mn_2Ge . Dari nilai yang diperoleh pada Tabel 2, terlihat bahwa atom Mn (1) dan Mn (2) memiliki nilai yang hampir sama besar, namun saling berlawanan tanda. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem ini cenderung untuk membentuk anti-feromagnetik *ordering*. Karena system ini membentuk anti-feromagnetik *ordering* di mana antara spin-up dan spin-down saling meniadakan, dan membuat *net* momen magnetiknya bernilai ~ 0 . Hal ini didukung pula oleh kenyataan bahwa nilai momen magnetik Mn_2Ge berdasarkan SP-rule bernilai $0 \mu_B$.

KESIMPULAN

Kami telah berhasil membuat model teoritis *tight-binding* berbasis perhitungan *first-principle* dengan menambahkan interaksi Coulomb *intra-* dan *inter-orbital* serta interaksi Hund yang dieksekusi dalam kerangka MFT. Berdasarkan hasil yang diperoleh, nilai momen magnet dari Mn_2Ge bernilai $0.03 \mu_B$ yang nilainya dekat dengan prediksi SP-rule yakni sebesar $0.00 \mu_B$. Hasil perhitungan kami berhasil pula menunjukkan fitur *half-metal* dari Mn_2Ge .

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada fasilitas *high-performance computing* LIPI atas dukungannya terhadap riset ini. URL <http://grid.lipi.go.id>.

REFERENSI

- [1] F. Heusler and Verh, "No Title," *DPG*, vol. 5, p. 220, 1903.
- [2] C. Felser, G. H. Fecher, and B. Balke, "Spintronics: A challenge for materials science and solid-state chemistry," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 46, no. 5, pp. 668–699, 2007.
- [3] T. Graf, C. Felser, and S. S. P. Parkin, "Simple rules for the understanding of Heusler compounds," *Prog. Solid State Chem.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–50, 2011.
- [4] N. Zheng and Y. Jin, "Band-gap and Slater–Pauling rule in half-metallic Ti₂-based Heusler alloys: A first-principles study," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 19, pp. 3099–3104, Sep. 2012.
- [5] M. A. Zagrebin, V. V. Sokolovskiy, V. D. Buchelnikov, and M. A. Klyuchnikova, "First Principles Investigation of Magnetic Properties of Fe-Ni-Mn-Al Heusler Alloys," 2015.
- [6] T. Gasi *et al.*, "Iron-based Heusler compounds Fe₂YZ: Comparison with theoretical predictions of the crystal structure and magnetic properties," *Phys. Rev. B*, vol. 87, no. 6, p. 064411, Feb. 2013.
- [7] "Fortran 90 — Fortran90 1.0 documentation." [Online]. Available: <https://www.fortran90.org/>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [8] "MPI: A Message-Passing Interface Standard," 2015.
- [9] A. Kokalj, "Computer graphics and graphical user interfaces as tools in simulations of matter at the atomic scale," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 2, pp. 155–168, Oct. 2003.
- [10] A. Azhar, M. A. Majidi, and D. Nanto, "Modeling of full-Heusler alloys within tight-binding approximation: Case study of Fe₂MnAl" ARTICLES YOU MAY BE INTERESTED IN Modeling of half-Heusler compound NiMnSb within tight-binding approximation AIP Conference Modeling of Full-Heusler Alloys within Tight-Binding Approximation: Case Study of Fe₂MnAl," vol. 1862, p. 30020, 2017.
- [11] P. Giannozzi *et al.*, "QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 21, no. 39, p. 395502, Sep. 2009.
- [12] N. Marzari and D. Vanderbilt, "Maximally localized generalized Wannier functions for composite energy bands," *Phys. Rev. B*, vol. 56, no. 20, pp. 12847–12865, Nov. 1997.
- [13] X. Wang *et al.*, "Origin of the half-metallic band-gap in newly designed quaternary Heusler compounds ZrVTiZ (Z = Al, Ga)," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 62, pp. 57041–57047, 2016.

Studi Komputasi Sifat Elektronik dan Sifat Optik Fotoelektroda Titanium Dioksida (TiO_2) pada Fasa Anatase dan Rutile

Elvan Yuniarti^{1,†}

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

[†]elvan.yuniarti@uinjkt.ac.id

Abstrak. Penelitian ini menitikberatkan pada fotoelektroda Titanium Dioxide (TiO_2) sebagai piranti pada *Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)*. Penelitian ini bertujuan mengetahui perbedaan karakteristik fasa anatase dan rutile. Beberapa hal yang diteliti antara lain: struktur kristal, struktur pita, densitas keadaan, sifat optik fotoelektroda TiO_2 . Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah komputasi dengan menggunakan teori DFT dan software quantum espresso. Hasil yang diperoleh struktur geometri TiO_2 unit sel TiO_2 memiliki bentuk optimal untuk model TiO_2 antase murni memiliki parameter $a=b$ 3.785 amstrong, $c=9.514$ amstrong, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Rata-rata panjang ikatan T-O sebesar 1.966 amstrong. Fasa ini memiliki tipe kisi triklinik dengan space group P1(1) memiliki unit volume 136,2991 A^3 . Fasa rutile memiliki parameter $a=b=4.5593$ amstrong dengan $c=2.958$ amstrong dengan $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Rata-rata panjang ikatan T-O sebesar 2.77 amstrong. Fasa ini memiliki tipe kisi Triklinik dengan space group P1(1) dengan unit volume 52.4233 A^3 . Pada TiO_2 fasa anatase memiliki sifat tidak langsung yaitu kordinat M dan Γ . Berdasarkan perhitungan besar bandgab yang diperoleh sebesar 3.2 eV. Hal ini sesuai dengan data eksperimen. Bandgap fotoelektroda harus lebih besar dibandingkan energi minimum yang diperlukan untuk reaksi redoks dari dye. Sedangkan karakteristik bandgap mempengaruhi nilai koefisien absorpsi terhadap cahaya dan laju rekombinasi elektron-hole. Bahan dengan celah pita langsung memiliki koefisien absorpsi yang tinggi tetapi dengan laju rekombinasi yang tinggi Hal ini sangat mempengaruhi nilai efisiensi DSSC. Sedangkan TiO_2 fasa Rutile memiliki sifat langsung memiliki band gab perhitungan sebesar 3.5 eV untuk energi potensial hubard $U+7$. Nilai ini mendekati data eksperimen.

Kata Kunci: Anatase, DFT energi gap, rutile, titanium oksida

Abstract. This research focuses on photoelectric Titanium Dioxide (TiO_2) as a tool for Sensitive Solar Cell Dyes (DSSC). Anatase and rutile phase. some of the things studied were: crystal structure, band structure, structural structure, photoelectric optical properties of TiO_2 . The method used in this study is a calculation using the DFT theory and quantum espresso software. The TiO_2 cell unit has the optimal shape for the pure antase TiO_2 model which has a parameter $a = b$ 3.785 units, $c = 9.514$ units, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. The average T-O bond length is 1,966 barrels. This phase has a triclinic lattice type with group space P1 (1) which has a volume unit of 136.2991 A^3 . The Rutile phase has a parameter $a = b = 4.5593$ with $c = 2,958$ stars with $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. The average T-O bond length is 2.77 barrels. This phase has a Triclinic lattice type with a space group P1 (1) with a volume unit of 52.44233 A^3 . The anatase phase of TiO_2 has indirect characteristics, namely M and Γ . coordinate. Based on the calculation of the large bandgap obtained at 3.2 eV. This is in accordance with the data experiment. The energy of the band tape must be greater than the minimum energy needed for the redox reaction in the dye. While the characteristics of the ribbon emphasize the value of the absorption coefficient in light and the rate of electron recombination. Materials with direct band gab have high combination coefficients but with high combination levels. This greatly influences the DSSC efficiency value. TiO_2 Rutile phase has a direct property of 3.5 eV for potential Hubbard energy $U + 7$. This value is closed to the experiment result.

Keywords: Anatase, DFT energy gab, rutile, titanium oxide

PENDAHULUAN

Penelitian tentang fotoelektroda sebagai salah satu komponen piranti dari Dye Sensitizer Solar cell (DSSC) sangat penting dilakukan guna meningkatkan nilai efisiensi solar sel. Penelitian ini mengkaji fotoelektroda Titanium Dioksida (TiO_2) secara komputasi. Penelitian ini bertujuan untuk mmengetahui sifat elektronik dan sifat optik, karakteristik struktur Kristal fotoelektroda

TiO₂ untuk fasa berbeda: Fasa rutil dan fasa anatase. Mengukur *band structure* ,*density of state* dan sifat-sifat optik pada fotoelektroda TiO₂ untuk fasa rutil dan fasa anatase. Setelah itu dibandingkan dengan hasil eksperimen. Penelitian ini memiliki perbedaan dari penelitian sebelumnya adalah perhitungan energi gab menggunakan metode koreksi menggunakan faktor Hubbard yang belum banyak dikerjakan..Hasil eksperimen yang telah dikaji adalah sebagai berikut:

Fotoelektroda Titanium Dioksida (TiO₂)

Penelitian ini memakai bahan semikonduktor TiO₂ sebagai fotoelektroda. Adapun fasa yang akan digunakan adalah fasa anatase dan fasa rutil. Analisis hasil XRD untuk fasa rutil dan anatase menunjukkan bahwa fasa anatase berada pada puncak-puncak pada bidang hkl : 101, 004, 112, 200, 211, 204, 301. Sedangkan fasa rutil berada di puncak bidang hkl :110 dan 200[1].

Fasa- Fasa yang Terbentuk Pada Lapisan TiO₂

Material TiO₂ banyak digunakan sebagai bahan solar sel memiliki tiga fasa yaitu anatase, rutil dan brokit. Material ini memiliki daya oksidatif yang tinggi terhadap fotokorosi, murah, mudah didapat dan tidak beracun. Material TiO₂ yang diharapkan memiliki permukaan yang luas agar dapat menyerap dye sehingga dapat meningkatkan arus keluaran sel surya. Permukaan yang luas diperoleh dengan membentuk bahan dalam bentuk lapisan tipis. Metode Pembuatan dapat dengan cara dip coating dan electrodeposisi. Metode dip coating berhasil membuat fasa anatase yang dipanaskan pada suhu 100°C, 300°C dan 500°C.

Pada eksperimen untuk electrodeposisi lapisan tipis TiO₂ diatas substrat ITO (indium Tin Oxide) dengan menggunakan elektrolit TiCl₄ (Titanium IV) klorida) dan katalis H₃BO₃ berada pada fasa rutil dan Anatase. Pengujian dengan spektroskopi UV Vis diperoleh data band gap lapisan TiO₂ secara eksperimen. Besar band gap untuk fasa anatase 3.25 eV dan untuk fasa rutil memiliki energi band gap sebesar 3.70 eV [2].

Teori Fungsional Kerapatan

Teori Fungsional Kerapatan (DFT) merupakan metode untuk memecahkan persamaan Schrodinger sistem yang kompleks. DFT dikembangkan berdasarkan teorema Hohenberg-Kohn dan persamaan Kohn-Sham (Hohenberg dan Kohn, 1964, Kohn dan Sham, 1965). Persamaan Schrodinger untuk sistem elektron banyak yang saling berinteraksi dinyatakan oleh persamaan (2.1) berikut:

$$\hat{H}\Psi(r_1\sigma_1, r_2\sigma_2, \dots, r_N\sigma_N) = E\Psi(r_1\sigma_1, r_2\sigma_2, \dots, r_N\sigma_N). \quad (1)$$

Dengan E adalah energi sistem, dan $\Psi(r_1\sigma_1, r_2\sigma_2, \dots, r_N\sigma_N)$ adalah fungsi gelombang elektron dengan r_i dan σ_i masing-masing adalah koordinat ruang dan spin untuk elektron ke-i. Dalam pendekatan Born-Openheimer, Hamiltonian sistem didefinisikan oleh persamaan (2) berikut:

$$\hat{H} = -\frac{1}{2} \sum_i \nabla_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \sum_i v(\mathbf{r}_i). \quad (2)$$

DFT+U

Salah satu model yang digunakan untuk menjelaskan sistem dengan korelasi kuat adalah model Hubbard. Hamiltonian model Hubbard dalam bentuk kuantisasi kedua dinyatakan sebagai berikut:

$$H_{\text{hub}} = t \sum_{i,j,\sigma} (c_{i,\sigma}^+ c_{j,\sigma} + hc) + U \sum_i n_{i,\uparrow} n_{i,\downarrow} \quad (3)$$

Dengan indeks i dan j menyatakan situs atom, sedangkan $c_{i,\sigma}^+$, $c_{j,\sigma}$ dan $n_{i,\sigma}$ masing-masing adalah operator kreasi elektron pada situs i dengan spin σ , operator anihilasi elektron pada situs j dengan spin σ , dan operator jumlah (number operator) elektron i dengan spin σ . DFT+U adalah

metode untuk melakukan koreksi terhadap akurasi DFT dalam mendeskripsikan keadaan ground state sistem berkorelasi kuat dengan penambahan suku Hubbard [3].

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *personal computer*, *software avogadro* dan *software quantum espresso*

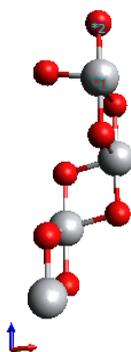
Metode Komputasi

Tahapan penelitian ini dilakukan dengan mendesain model struktur geometri TiO simulasi menggunakan teori fungsional Kerapatan (DFT). Metode perhitungan dengan teori DFT dapat memperoleh gambaran *band structure*, *densitas of state* (DOS) serta sifat optik dari fotoelektroda TiO₂ untuk dua fasa anatase dan rutile. Pada penelitian ini akan dikaji sifat dasar fotoelektroda TiO₂ meliputi sifat elektronik dan optik dari struktur bulk (padatan) dan permukaan TiO₂ secara ab initio. Model geometri TiO₂ terdiri atas unit sel TiO₂ triklinik. Unit sel triklinik terdiri atas 4 satuan rumus (*formula unit*) TiO₂ dengan parameter kisi $a = b$ dan c yang berbeda. Dengan $\alpha\beta\gamma=90^\circ$ Unit sel modifikasi adalah unit sel yang dibuat untuk mendapatkan orientasi bidang bujur sangkar TiO₂ pada kristal TiO agar cenderung sejajar dengan bidang xy dari supercell seperti ditunjukkan pada gambar. Unit sel modifikasi ini digunakan untuk mendapatkan DOS parsial dari orbital-orbital atom Ti dan O dengan orientasi yang tepat pada koordinat xyz cluster TiO₂. Metode perhitungan DOS, PDOS, LDOS, Struktur Pita dengan metode DFT.

HASIL DAN PEMBAHASAN

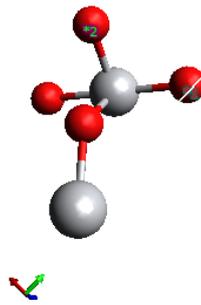
Analisis Geometri Fasa Anatase dan Rutile pada TiO₂

Anatase memiliki struktur kristal tetragonal dengan space group I_{411} and (141)[4]. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada **Gambar 1** yang menunjukkan setiap unit sel TiO₂ memiliki bentuk optimal untuk TiO₂ fasa anastase murni. Berdasarkan model TiO₂ antase murni memiliki parameter $a=b$ 3.785 amstrong dengan $c=9.514$ amstrong dengan $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Rata-rata panjang ikatan T-O sebesar 1.966 amstrong. Memiliki tipe kisi Triklinik dengan space group P1(1) dengan unit volume 136,2991 A³.



Gambar 1. Unit Sel TiO₂ Fasa Anatase

Hasil yang diperoleh untuk struktur geometri TiO₂ fasa rutile dapat dilihat pada **Gambar 2**. Setiap unit sel TiO₂ fasa rutil pada model TiO₂ rutile murni memiliki parameter $a=b=4.5593$ amstrong dengan $c=2.958$ amstrong dengan $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Rata-rata panjang ikatan T-O sebesar 2.77 amstrong. Memiliki tipe kisi Triklinik dengan space group P1(1) dengan unit volume 52.4233 A³.



Gambar 2. Unit Sel TiO₂ Fasa Rutile

Sifat Elektronik DOS Pada TiO₂ Fasa Anatase dan Fasa Rutile

Hasil perhitungan energi celah pita dengan menggunakan DOS pada TiO₂ fasa Anatase dapat dilihat pada **Tabel 1**. Hasilnya memiliki nilai yang mendekati data eksperimen pada energi potensial Hubbard U+3eV sebesar 3.07eV pada celah pita atom O dan untuk atom Ti pada energi potensial Hubbard U+7 2.97eV. Nilai tersebut masih terlalu kecil untuk celah pita TiO₂ fasa anatase eksperimen sebesar 3.2 eV.

Tabel 1. Hasil Perhitungan celah pita Ti dan O pada TiO₂ Fasa Anatase

| Energi Potensial Hubbard | Ti (Energi Celah Pita eV) | O (Energi Celah Pita eV) | Energi Fermi |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| U 0eV | 2.27 | 3.06 | 7.3391 |
| U+3 eV | 2.36 | 3.07 | 7.5338 |
| U+5 eV | 2.52 | 3.42 | 7.6782 |
| U+7 eV | 2.97 | 3.77 | 7.8298 |

Dari **Tabel 2** dibawah ini menentukan energi celah pita pada fasa rutile untuk atom-atom Ti dan O untuk orbital d dan p diperoleh hasil bahwa nilai energi celah pita yang paling tinggi berdasarkan DOS sebesar 2.8 eV untuk U+7 pada atom Ti. Nilai ini lebih kecil dari eksperimen. Sedangkan celah pita pada atom O sebesar 3.3 eV nilainya mendekati nilai eksperimen yang telah dilakukan[5].

Tabel 2. Hasil DOS untuk celah pita Ti dan O pada TiO₂ Fasa Rutile

| Energi Potensial Hubbard | Ti (Energi Celah Pita eV) | O (energi Celah Pita eV) | Energi Fermi |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| U 0eV | 1.96 | 2.36 | 8.94 |
| U+3 eV | 2.551 | 2.66 | 9.14 |
| U+5 eV | 2.5113 | 2.913 | 9.29 |
| U+7 eV | 2.88 | 3.37 | 9.42 |

Analisis Sifat Elektronik untuk Struktur Pita pada TiO₂ Fasa Anatase dan Fasa Rutile

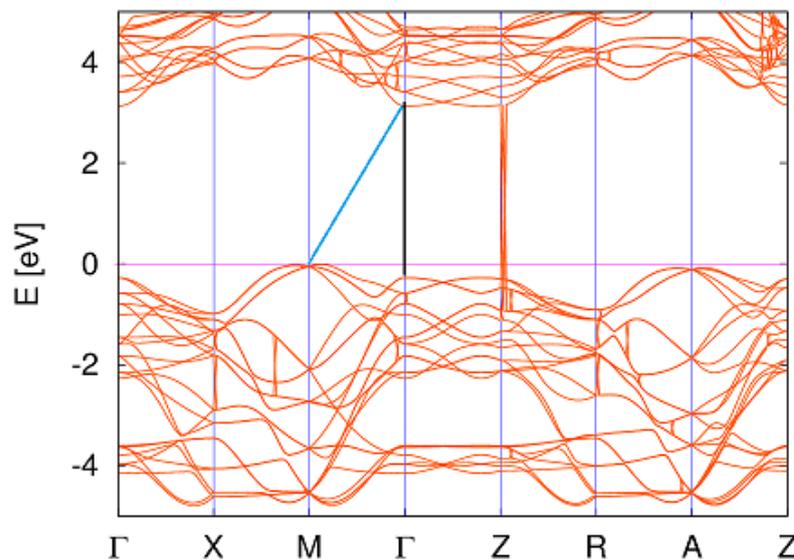
Analisis Struktur Pita pada TiO₂ Fasa Anatase

Pada perhitungan DFT+U diperoleh celah pita TiO₂ fasa anatase bersifat tak-langsung (*indirect bandgap*). Terlihat pada **Tabel 3** di bawah ini menunjukkan celah pita terpendek terbentuk antara koordinat M dan Γ dengan besar celah sebesar 2 eV. Nilai bandgap dan karakteristik bandgap akan mempengaruhi kinerja TiO₂ sebagai fotokatalis. Pada TiO₂ fasa anatase sifat langsung (*direct bandgap*) dapat dilihat besar celah terpendek antara satu kordinat yaitu ordinat M. Besar celah langsung sebesar 2.1 eV. Nilai celah langsung lebih besar dari celah tak langsung. Hal tersebut menunjukkan TiO₂ fasa anatase untuk nilai Hubart U 0eV bersifat tak langsung. Bandgap fotokatalis harus lebih besar dibandingkan energi minimum yang diperlukan untuk reaksi redoks dari dye. Sedangkan karakteristik bandgap mempengaruhi nilai koefisien absorpsi terhadap cahaya dan laju rekombinasi elektron-hole. Bahan dengan celah pita langsung

memiliki koefisien absorpsi yang tinggi tetapi dengan laju rekombinasi yang tinggi, sedangkan bahan dengan celah pita tak langsung umumnya memiliki koefisien absorpsi yang lebih rendah dengan nilai laju rekombinasi yang rendah pula. Energi Struktur celah pita pada fasa TiO_2 sebesar 3.2 eV. Hal ini sesuai dengan hasil [6].

Tabel 3. Energi Struktur Celah Pita Pada TiO_2 Fasa Anatase

| | Sifat | koordinat | Energi struktur pita |
|-------|----------------|----------------|----------------------|
| U0eV | Tidak Langsung | M dan Γ | 2.0 eV |
| U+3eV | Tidak Langsung | M dan Γ | 2.5 eV |
| U+5eV | Tidak Langsung | M dan Γ | 2.7 eV |
| U+7eV | Tidak Langsung | M dan Γ | 3.2 eV |



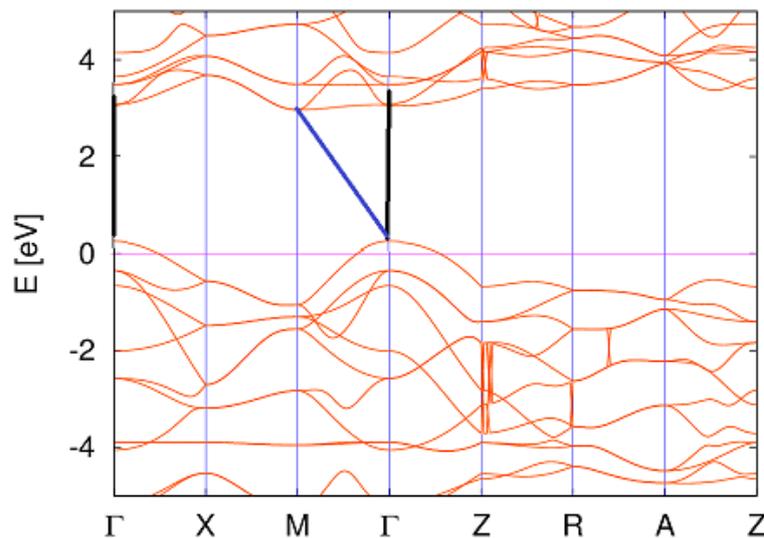
Gambar 3. Struktur Pita Elektronik TiO_2 Fasa Anatase U+7eV

Struktur Pita pada TiO_2 Fasa Rutile

Pada perhitungan DFT+U diperoleh celah pita TiO_2 fasa rutile bersifat tak-langsung (*indirect bandgap*). Terlihat pada **Tabel 4** di bawah ini menunjukkan celah pita terpendek terbentuk antara koordinat X dan Γ dengan besar celah antara -0.5 eV dengan 2 eV. Nilai bandgap dan karakteristik bandgap akan mempengaruhi kinerja TiO_2 sebagai fotokatalis. Pada TiO_2 fasa rutile sifat langsung (*direct bandgap*) dapat dilihat besar celah terpendek antara satu kordinat yaitu kordinat Γ dengan kordinat Γ . Besar celah langsung antara 0.3 eV dengan 2 eV. Nilai celah tidak langsung lebih besar dari celah langsung. Hal tersebut menunjukkan TiO_2 fasa rutil untuk nilai Hubart U 0eV bersifat langsung. Bandgap fotokatalis harus lebih besar dibandingkan energi minimum yang diperlukan untuk reaksi redoks dari dye. Sedangkan karakteristik bandgap mempengaruhi nilai koefisien absorpsi terhadap cahaya dan laju rekombinasi elektron-hole. Bahan dengan celah pita tak langsung memiliki koefisien absorpsi yang tinggi tetapi dengan laju rekombinasi yang tinggi, sedangkan bahan dengan celah pita langsung umumnya memiliki koefisien absorpsi yang lebih rendah dengan nilai laju rekombinasi yang rendah pula.

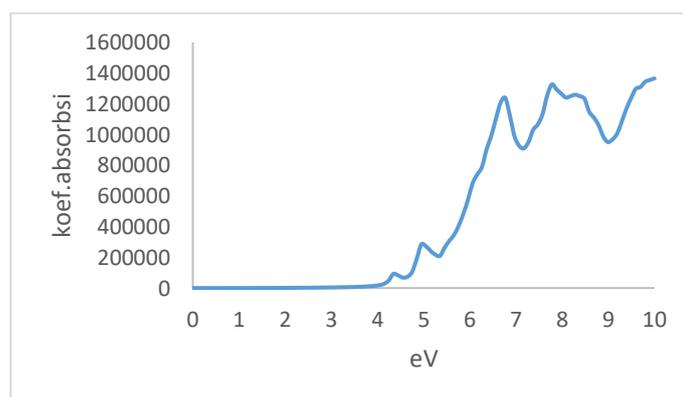
Tabel 4. Energi struktur celah pita pada TiO₂ fasa rutile

| | Sifat | Koordinat | Energi Struktur Pita |
|-------|----------|-----------------------|----------------------|
| U+0eV | Langsung | Γ dan Γ | 1.8 eV |
| U+3eV | Langsung | Γ dan Γ | 2.0 eV |
| U+5eV | Langsung | Γ dan Γ | 2.8 eV |
| U+6eV | Langsung | Γ dan Γ | 2.9 eV |
| U+7eV | Langsung | Γ dan Γ | 3.5 eV |

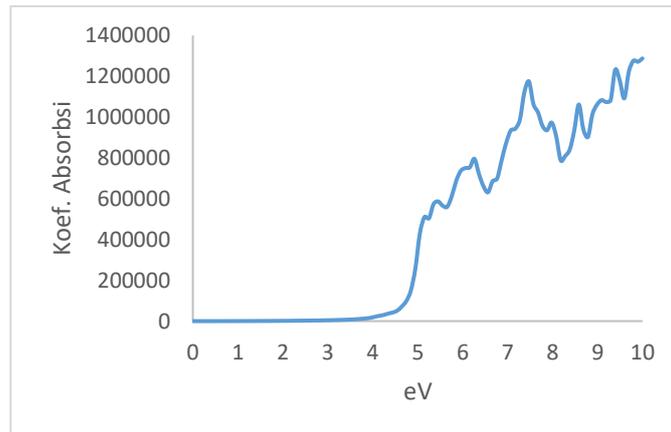
**Gambar 4.** Struktur Pita pada TiO₂ dengan Fasa Rutile untuk U+7eV

Analisis Sifat Optik TiO₂ untuk Fasa Anastase dan Fasa Rutile Nilai Koefisien Absorpsi TiO₂ Fasa Anatase dan Fasa Rutil

Hasil perhitungan koefisien absorpsi TiO₂ sebagai fungsi energy dapat dilihat pada **Gambar 5**. Koefisien absorpsi menunjukkan jumlah foton yang diserap bahan per cm kedalaman absorpsi, sedangkan kedalaman absorpsi menunjukkan jarak absorpsi cahaya dalam bahan sehingga 64% dari intensitas cahaya yang masuk diserap. Koefisien absorpsi meningkat untuk energi foton lebih besar dari 4.1 eV Koefisien absorpsi terletak pada 7.17 eV dan 8.99 eV yang memiliki koefisien absorpsi sebesar 909546 dan 950280.

**Gambar 5** Hubungan Energi Band Gap dengan Koefisien Absorpsi TiO₂ Fasa Anatase

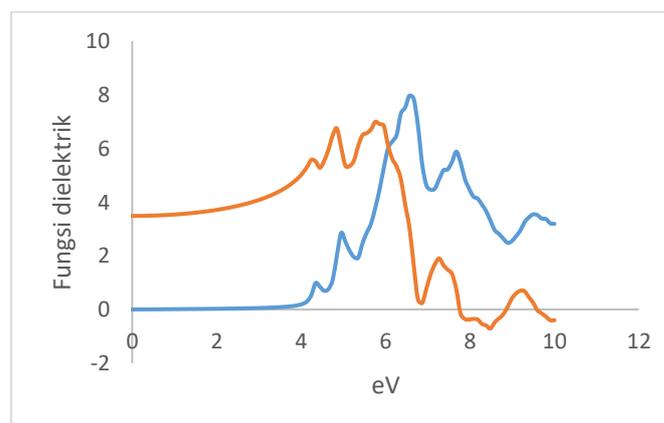
Koefisien absorpsi meningkat untuk energi foton lebih besar dari 4.1 eV. Pada TiO₂ fasa rutil koefisien absorpsi maksimum terletak pada 6.56 eV dan 8.18 eV yang memiliki koefisien absorpsi sebesar 631549 dan 787925 dapat dilihat pada **Gambar 6**.



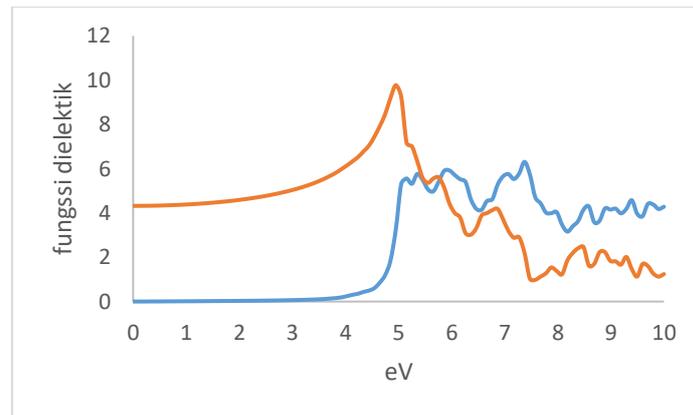
Gambar 6. Hubungan Energi Band Gap dengan Koefisien Absorpsi TiO₂ Fasa Rutile

Fungsi Dielektrik TiO₂ untuk Fasa Anatase dan Fasa Rutile

Perhitungan fungsi dielektrik yang terdiri atas suku dispersive $\epsilon_1(\omega)$ (suku riil) dan suku absorptive $\epsilon_2(\omega)$ (suku imajiner), dihitung nilai index bias (n) and koefisien ekstingsi (k) dari TiO₂ fasa anatase maupun fasa rutile. TiO₂ fasa anatase untuk suku real terlihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8** di bawah ini yang berwarna merah, Sedangkan warna biru menunjukkan hasil perhitungan suku imajiner fungsi dielektrik ($\epsilon_2(\omega)$). Dari data tersebut terlihat bahwa untuk suku real atau kemampuan dispersif TiO₂ fasa anatase dan rutile memiliki perbedaan. Fasa anatase memiliki nilai dispersif maksimum pada energi 5,1 eV dan 6.86 eV. TiO₂ fasa anatase memiliki kemampuan absorpsi di energi 5,1 eV, 7.3 eV dan 8.9 eV terlihat pada kurva imajinernya. Sedangkan TiO₂ Fasa rutile memiliki fungsi dielektrik riil menunjukkan kemampuan dispersif pada energi 5.5 eV, 6.3 eV dan 7.3eV. Sedangkan fungsi dielektrik imajiner menentukan kemampuan penyerapan pada energi 6.5eV, 8.1 eV dan 8.5 eV.

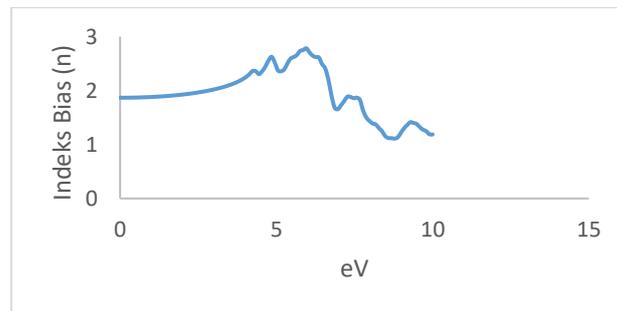


Gambar 7. Hubungan Energi Band Gap dengan Fungsi dielektrik TiO₂ Fasa Anatase

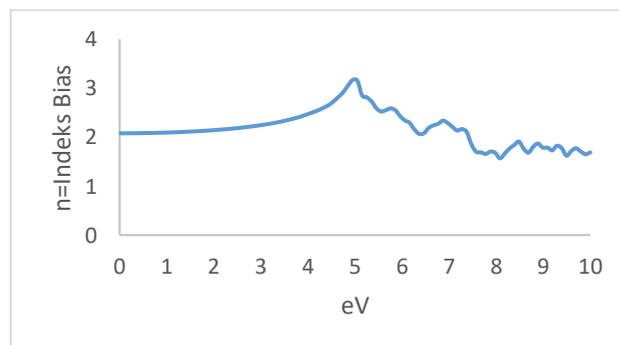


Gambar 8. Hubungan Energi Band Gap dengan Fungsi Dielektrik TiO₂ Fasa Rutile Indeks Bias TiO₂ untuk Fasa Anatase dan Rutile

Indeks bias maksimum pada TiO₂ fasa anatase diperoleh untuk puncak sebesar 2.78 pada energi 5.8eV sedangkan Indeks bias maksimum pada TiO₂ fasa rutile sebesar 3.1 eV dan energinya sebesar 5.1 eV dapat dilihat pada **Gambar 9** dan **Gambar 10**.



Gambar 9. Hubungan Energi dengan Indeks Bias TiO₂ Fasa Anatase



Gambar 10. Hubungan Energi dengan Indeks Bias TiO₂ Fasa Rutile

KESIMPULAN

- 1) Karakterisasi Struktur kristal TiO₂ fasa anatase TiO₂ anatase murni memiliki parameter $a=b=3.785$ amstrong dengan $c=9.514$ amstrong dengan $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Rata-rata panjang ikatan T-O sebesar 1.966 amstrong. Memiliki tipe kisi Triklinik dengan space group P1(1) dengan unit volume 136,2991 A³. Hasil yang diperoleh untuk struktur geometri TiO₂ fasa rutile dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Setiap unit sel TiO₂ fasa rutile pada model TiO₂ rutile murni memiliki parameter $a=b=4.5593$ amstrong dengan $c=2.958$ amstrong dengan $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Rata-rata panjang ikatan T-O sebesar 2.77 amstrong. Memiliki tipe kisi Triklinik dengan space group P1(1) dengan unit volume 52.4233 A³.

- 2) Hasil perhitungan energi celah pita dengan menggunakan DOS pada TiO_2 fasa Anatase memiliki nilai yang mendekati data eksperimen pada energi potensial Hubbard $U+3\text{eV}$ sebesar 3.07eV pada celah pita atom O dan untuk atom Ti pada energi potensial Hubbard $U+7$ 2.97eV . Nilai tersebut masih terlalu kecil untuk celah pita TiO_2 fasa anatase eksperimen sebesar 3.2 eV . Sedangkan Nilai energi celah pita yang paling tinggi berdasarkan DOS sebesar 2.8 eV untuk $U+7$ pada atom Ti. Nilai ini lebih kecil dari eksperimen. Sedangkan celah pita pada atom O sebesar 3.3 eV nilainya mendekati nilai eksperimen yang telah dilakukan sebesar 3.7eV .
- 3) Pada TiO_2 fasa anatase memiliki sifat tidak langsung yaitu kordinat M dan Γ dengan besar bandgap perhitungan sebesar 3.2 hal ini sesuai dengan data eksperimen. Bandgap fotokatalis harus lebih besar dibandingkan energi minimum yang diperlukan untuk reaksi redoks dari dye. Sedangkan karakteristik bandgap mempengaruhi nilai koefisien absorpsi terhadap cahaya dan laju rekombinasi elektron-hole. Bahan dengan celah pita langsung memiliki koefisien absorpsi yang tinggi tetapi dengan laju rekombinasi yang tinggi Hal ini sangat mempengaruhi nilai efisiensi DSSC. Sedangkan TiO_2 fasa Rutile memiliki sifat langsung memiliki band gap perhitungan sebesar 3.5 eV untuk energi potensial hubard $U+7$. Nilai ini mendekati data eksperimen.

REFERENSI

- [1] Jyoti Divya, Mohan Davendra dan Singh, 2014, *A Performance Comparison of Dye Sensitized Solar Cells Based on Mesoporous and Nanostructured Photoanodes*, International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, ISSN:23197463Vol. 3Issue 2, Impact Factor: 1.252, Available online at: www.erpublications.com.
- [2] Agustini S, dkk., 2013, *Fabrikasi Dye Sensitized Solar Cell(DSSC) Berdasarkan Fraksi Volume TiO_2 Anatase-Rutile dengan *Garcinia mangostana* dan *Rhoeo Spathacea* sebagai Dye Fotosensitizer*, JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 2, No. 2, ISSN: 2337-3539.
- [3] Kohn, W and Sam, L.J 1965, Self Consistent equations including exchange and correlation effect. Phys. Rev, 140(4A):A113)
- [4] Jer Jeng Ming, Wung Yi-Lun, Be Chang Liann dan Chow Lee, 2013, Dye-Sensitized Solar Cells with Anatase TiO Nanorods Prepared by Hydrothermal Method, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume, Article ID 280253, 8 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/280253>.
- [5] Efendi M., 2012, Analisis Sifat Optik Lapisan Tipis TiO_2 Doping Nitrogen yang disiapkan dengan Metode Spin Coating, Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng dan DIY, Purworejo 14 April 2012 ISSN:0853-0823.
- [6] Mulyani O, dkk., 2014, Sintesis Sel Surya Tersensitasi Pewarna (SSTP) Eksak Antosianin Buah Delima (*Punica Granatum*) dengan metode Sol Gel Spin Coating, Jurnal Fisika Unand Vol.3, No.2, April 2014 ISSN 2302.

Analisis Respon Sistem Kendali LQR (*Linear Quadratic Regulator*) Pada Simulasi *Gimbal* Kamera Dua Sumbu

Qalisha Putri Syahna^{1,†}, Elvan Yuniarti¹, Edi Kurniawan²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Pusat Penelitian Fisika LIPI, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

[†]qalishasyahna@gmail.com

Abstrak. Telah dilakukan penelitian untuk analisis respon sistem kendali gimbal kamera dua sumbu untuk arah *pitch* dan *roll* dengan menggunakan sistem kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Analisis dilakukan pada pengaruh nilai penguat Q dimana nilai ini divariasikan dalam perhitungan sistem kendali LQR. Hasil keluaran sistem diplot menjadi sinyal *step* sehingga dapat dilakukan analisis respon transient dimana dengan menggunakan metode ini terdapat beberapa parameter sinyal keluaran sehingga dapat dikatakan stabil seperti nilai *overshoot* dan *settling time*. Selain itu hasil keluaran sistem juga diplot menjadi sinyal sinusoidal untuk mengetahui nilai amplitudo beserta waktu amplitudo. Sebagai perbandingan, sistem kendali PID dengan metode *auto-tuning* digunakan dalam penelitian ini. Perbandingan dilakukan agar dapat mengetahui apakah sistem kendali LQR lebih tepat digunakan dalam sistem gimbal kamera dua sumbu. Hasil dari analisis variasi nilai Q yang diberikan pada kedua sudut adalah sistem berjalan dengan stabil saat nilai P sama dengan 4 untuk sudut *roll* dan nilai P sama dengan 6 untuk sudut *pitch*. Untuk pengaruh nilai penguat Q terhadap sistem menghasilkan perubahan keluaran yang signifikan saat nilai P berada pada *range* 1 hingga 10. Sedangkan hasil perbandingan antara respon sistem kendali LQR dan PID dapat membuktikan bahwa sistem kendali LQR menghasilkan respon sistem yang lebih baik.

Kata Kunci : *Gimbal*, Sistem kendali, LQR, PID, Respon sistem.

Abstract. Research has been conducted to analyzed the responses of the two axis camera gimbal control system for *pitch* and *roll* direction using the *Linear Quadratic Regulator* (LQR) control system. It focused on the effect from the value of gain Q in calculation of the LQR. The system output was plotted into a *step* signal so it will be analyzed with transient response method and plotted into sinusoidal signals to find the amplitude value along with the amplitude time. For comparison, the PID control system with the *auto-tuning* method was also used in this study. It has been done in order to find out whether the LQR control system is more appropriate to use in the two axis camera gimbal system or not. The result from the analysis of the variation of the Q value given at both angles is that the system runs stable when the value of $P=4$ for *roll* angle and $P=6$ for *pitch* angle. For the effect from value of gain Q on the whole system is it will make the output significantly changed when the $P=1-10$. While the results of the comparison can prove that the LQR control system has a better system responses.

Keywords: *Gimbal*, Control system, LQR, PID, System response.

PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan teknologi saat ini, banyak alat yang memudahkan manusia dalam melakukan kegiatan sehari-harinya. Salah satu contohnya adalah semakin mudah untuk melakukan pengambilan gambar menggunakan objek yang memiliki mobilitas yang tinggi. Objek ini biasa kita kenal dengan *drone*. Kamera yang tertempel pada *drone* akan mentransmisikan video secara langsung ke pusat pengendali sehingga pengguna dapat melakukan pengamatan suatu tempat [1] [2] [3].

Sebuah *drone* yang sedang mengudara tidak selalu dapat mempertahankan posisi dengan baik. Hal ini disebabkan karena adanya berbagai macam gangguan seperti angin, kegagalan sistem ataupun gerakan-gerakan manuver yang membuat gerak sebuah *drone* menjadi tidak stabil [4]. Agar gambar yang dihasilkan oleh *drone* memiliki kualitas yang baik, biasanya kamera diletakkan pada sebuah *gimbal* yang tertempel pada *drone*.

Gimbal merupakan alat yang biasa digantung pada *drone* dan digunakan untuk menjaga sebuah kamera untuk tetap berada pada posisi horizontal [5]. *Gimbal* mampu mempertahankan posisi kamera dengan mengatur sudut kamera ke posisi yang diinginkan setelah adanya [goyangan atau gerakan dari *drone* sehingga posisi kamera cenderung stabil. Kestabilan ini diatur oleh motor yang berada pada *gimbal* [6]. Jenis motor yang digunakan biasanya adalah motor *brushless* DC [7].

Sistem kendali diperlukan untuk mendukung stabilnya gerakan yang dihasilkan oleh motor. Banyak metode kendali yang biasa digunakan, contohnya adalah sistem kendali PID dan sistem kendali optimal dengan metode LQR (Linear Quadratic Regulator). Sistem kendali PID sendiri pernah diimplementasikan pada penggunaan *gimbal* kamera dua sumbu. Sistem kendali PID terdiri dari tiga nilai penguat yaitu nilai Kontrol Proporsional (K_p), Kontrol Integral (K_i) dan Kontrol Derivative (K_d) yang masing-masing nilai penguat ini memiliki kelebihan dan kekurangan dan dapat diimplementasikan secara bersamaan ataupun sendiri sesuai dengan target respon keluaran sistem yang diinginkan [8] [9] [10] [11]. Upaya untuk mendapatkan nilai ketiga gain pada sistem kendali PID hingga menghasilkan respon yang baik biasa dinamakan dengan *tuning* [12].

Jenis sistem kendali lainnya adalah sistem kendali optimal dengan metode LQR. Metode ini menggunakan pendekatan persamaan keadaan (*state-space*) dan aljabar Riccati yang digunakan untuk mengoptimalkan proses sistem dengan bentuk linear [13].

Metode optimasi menggunakan LQR adalah dengan menentukan sinyal masukan yang dipindahkan ke suatu keadaan sistem linier dari kondisi awal menuju ke suatu kondisi akhir yang meminimumkan indeks performansi kuadratik. Prinsip penggunaan metode LQR ini sendiri adalah dengan memperoleh sinyal kendali optimal dari umpan balik keadaan. Matriks umpan balik diperoleh dengan memecahkan persamaan Riccati [14].

Pada penelitian ini, penggunaan sistem kendali optimal metode LQR akan dibandingkan dengan sistem kendali PID yang sudah dilakukan penelitian terlebih dahulu sehingga dapat dilihat jenis sistem kendali yang mana yang cocok dengan penggunaan motor pada *gimbal*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei hingga Oktober 2018. Adapun tempat pelaksanaan penelitian adalah Pusat Penelitian Fisika (P2F), Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) Serpong, Gedung 440-442, Tangerang Selatan. Pada proses penelitian ini digunakan alat berupa 1 buah *Personal Computer* (PC) dan bahan berupa *software* MATLAB versi R2015b. Penelitian ini hanya menggunakan 1 buah alat dan bahan dikarenakan penelitian ini hanya berupa program simulasi.

Tabel 1. Definisi Parameter Respon Transien

| Parameter | Keterangan |
|--|--|
| <i>Steady-state</i> (Keadaan Tetap) | Nilai saat kurva respon mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir (biasanya 5% atau 2%) |
| <i>Rise Time</i> (Waktu Naik) | Waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 hingga 90% dari harga akhirnya. |
| <i>Settling Time</i> (Waktu Penetapan) | Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan menetap pada Keadaan Tetap. |
| <i>Peak Time</i> (Waktu Puncak) | Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali. |
| <i>Overshoot</i> (Lewatan Maksimum) | Harga puncak maksimum dari respon yang diukur dari perbandingan selisih nilai puncakan pertama terhadap nilai keadaan tetap. |

Dalam penelitian ini, dibuat 2 program simulasi menggunakan software MATLAB dan *Simulink* MATLAB. Program simulasi pertama merupakan simulasi *gimbal* dengan sistem kendali optimal metode LQR dan program simulasi kedua menggunakan sistem kendali PID. Program kedua ini merupakan simulasi yang bersifat pembandingan data hasil simulasi pertama.

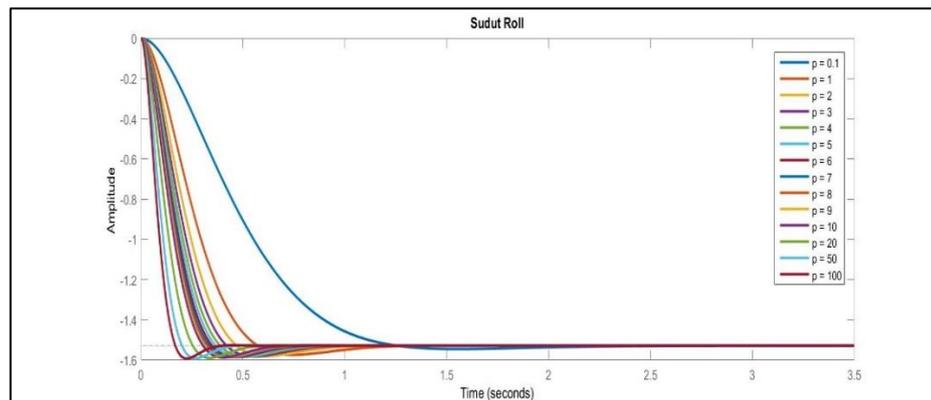
Terdapat 2 metode analisis data hasil simulasi yang digunakan. Metode pertama adalah dengan metode Respon Transien. Metode ini biasa digunakan untuk menganalisis sinyal keluaran hasil kendali dengan bentuk sinyal *step*. Beberapa nilai yang diperhatikan dalam metode ini adalah nilai *Steady-state*, *Rise Time*, *Settling Time*, *Peak Time* serta *Overshoot*. Penjelasan dari nilai-nilai di atas dapat dilihat pada Tabel 1 [15]. Metode kedua yang digunakan adalah analisis sinyal sinus. Dengan sinyal jenis ini maka terdapat dua nilai penting yang dapat diperhatikan yaitu nilai amplitudo serta waktu dari sinyal tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

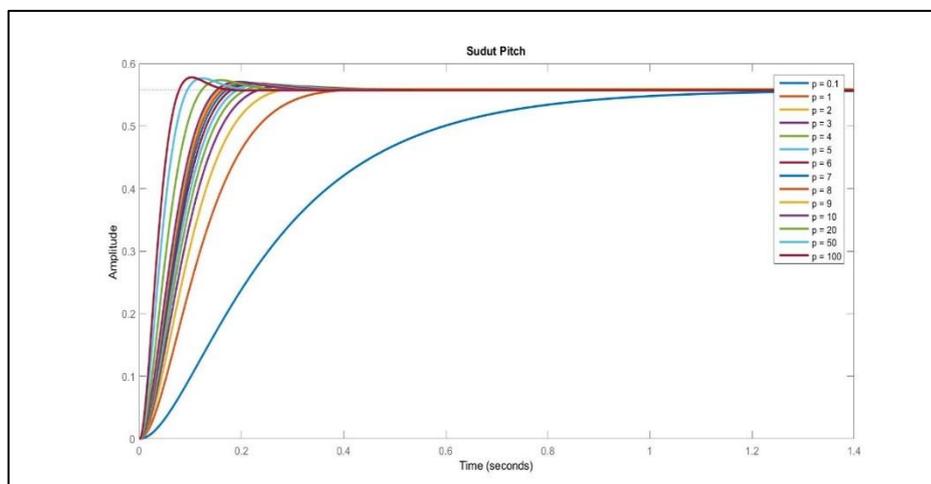
Variasi nilai Q diberikan melalui variasi nilai P pada program perhitungan kendali LQR. Terdapat 14 nilai yang berbeda yaitu 0, 1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 50, dan 100. Kemudian hasil dari simulasi diplot menjadi sinyal *step* serta sinusoidal dan hasil akhir analisis kendali LQR dibandingkan dengan hasil kendali PID.

Sistem Kendali LQR Sinyal Step

Metode analisis transien digunakan dalam pengolahan data sinyal *step*. Terdapat beberapa parameter yang terukur dari sinyal keluaran dan hasil dianalisis sehingga didapatkan nilai P yang menghasilkan keluaran paling baik dan stabil.



Gambar 1. Sinyal Step Sudut Roll



Gambar 2. Sinyal Step Sudut Pitch

Berikut nilai parameter respon transien yang didapatkan untuk kedua sudut :

Tabel 2. Nilai Parameter Respon Transien Sudut *Roll*

| P | Peak Amplitude (rad) | Peak Time (sekon) | Overshoot(%) | Settling Time(sekon) | Rise Time(sekon) | Steady-state (rad) |
|----------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0.1 | -1.54 | 1.550 | 1.04 | 1.110 | 0.719 | -1.53 |
| 1 | -1.57 | 0.751 | 2.96 | 0.913 | 0.359 | -1.53 |
| 2 | -1.58 | 0.616 | 3.33 | 0.778 | 0.297 | -1.53 |
| 3 | -1.58 | 0.553 | 3.50 | 0.706 | 0.266 | -1.53 |
| 4 | -1.58 | 0.509 | 3.60 | 0.659 | 0.247 | -1.53 |
| 5 | -1.59 | 0.483 | 3.67 | 0.624 | 0.233 | -1.53 |
| 6 | -1.59 | 0.462 | 3.73 | 0.597 | 0.222 | -1.53 |
| 7 | -1.59 | 0.440 | 3.77 | 0.575 | 0.213 | -1.53 |
| 8 | -1.59 | 0.426 | 3.80 | 0.557 | 0.206 | -1.53 |
| 9 | -1.59 | 0.414 | 3.83 | 0.541 | 0.200 | -1.53 |
| 10 | -1.59 | 0.403 | 3.86 | 0.527 | 0.194 | -1.53 |
| 20 | -1.59 | 0.336 | 3.99 | 0.444 | 0.162 | -1.53 |
| 50 | -1.59 | 0.269 | 4.11 | 0.354 | 0.129 | -1.53 |
| 100 | -1.59 | 0.223 | 4.17 | 0.298 | 0.108 | -1.53 |

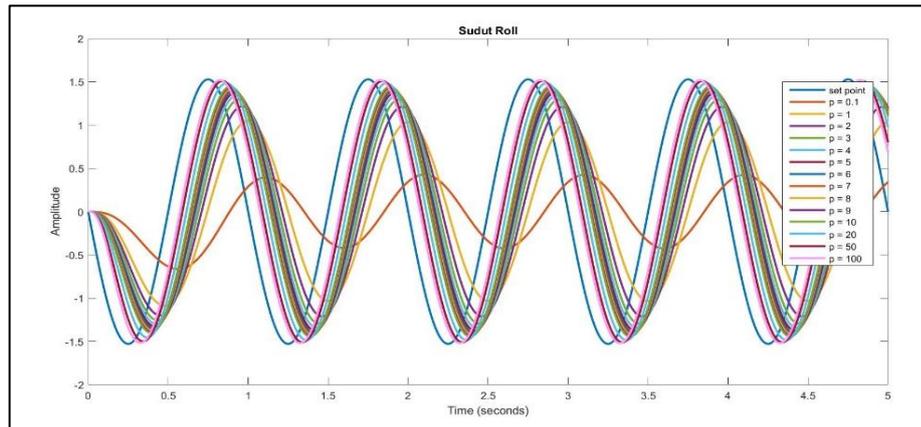
Tabel 3. Nilai Parameter Respon Transien Sudut *Pitch*

| P | Peak Amplitude (rad) | Peak Time (sekon) | Overshoot(%) | Settling Time(sekon) | Rise Time(sekon) | Steady-state (rad) |
|----------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0.1 | 0.556 | >1.400 | 0.000 | 0.971 | 0.536 | 0.558 |
| 1 | 0.559 | > 0.450 | 0.245 | 0.321 | 0.198 | 0.558 |
| 2 | 0.562 | 0.341 | 0.806 | 0.242 | 0.154 | 0.558 |
| 3 | 0.564 | 0.289 | 1.200 | 0.208 | 0.135 | 0.558 |
| 4 | 0.566 | 0.262 | 1.480 | 0.188 | 0.123 | 0.558 |
| 5 | 0.567 | 0.243 | 1.690 | 0.174 | 0.114 | 0.558 |
| 6 | 0.568 | 0.229 | 1.860 | 0.164 | 0.108 | 0.558 |
| 7 | 0.569 | 0.217 | 2.000 | 0.219 | 0.103 | 0.558 |
| 8 | 0.569 | 0.208 | 2.120 | 0.224 | 0.0991 | 0.558 |
| 9 | 0.570 | 0.201 | 2.220 | 0.222 | 0.0957 | 0.558 |
| 10 | 0.570 | 0.194 | 2.300 | 0.218 | 0.0928 | 0.558 |
| 20 | 0.573 | 0.159 | 2.810 | 0.191 | 0.076 | 0.558 |
| 50 | 0.576 | 0.124 | 3.320 | 0.155 | 0.0591 | 0.558 |
| 100 | 0.578 | 0.103 | 3.600 | 0.132 | 0.0491 | 0.558 |

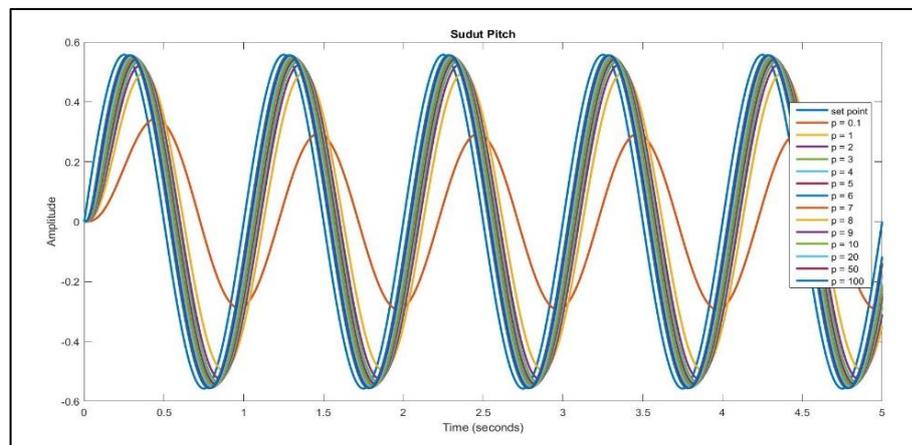
Dari nilai yang didapatkan di atas, dapat dianalisis sistem simulasi yang mana yang memiliki keluaran paling baik. Analisis ini didasarkan dengan mempertimbangkan nilai yang krusial dalam berjalannya sebuah sistem yaitu nilai *Overshoot* dan *Settling Time*. Sebuah sistem dapat dikatakan memiliki kinerja yang baik pada saat sistem dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu yang cepat dan tanpa menimbulkan nilai keluaran melebihi nilai yang seharusnya dengan sangat berbeda. Selain itu, dipertimbangkan juga pengaruh nilai P dengan mengamati nilai selisih *Overshoot* dan *Rise Time* [15]. Dengan parameter ini maka dapat dikatakan sistem yang baik terjadi saat nilai P = 4 untuk sudut *roll* dan nilai P = 6 untuk sudut *Pitch*.

Sistem Kendali LQR Sinyal Sinusoidal

Selain diplot menjadi sinyal *step*, hasil keluaran kontrol juga diplot menjadi sinyal sinusoidal. Terdapat 2 parameter yang dapat diamati dari sinyal ini, yaitu nilai amplitudo dan waktu saat sinyal tersebut mencapai nilai amplitudonya.



Gambar 3. Sinyal Sinusoidal Sudut Roll



Gambar 4. Sinyal Sinusoidal Sudut Pitch

Untuk lebih jelas seberapa berpengaruh nilai P kepada sistem ini, berikut data Nilai amplitudo serta waktunya untuk variasi 10 nilai P :

Tabel 4. Parameter Amplitudo dan Waktu Sinyal Sinusoidal Sudut Roll

| P | Amp.time set(sekon) | Amp time out (sekon) | Amplitude set (rad) | Amplitude out (rad) |
|-----|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 0.1 | 0.75 | 1.12 | 1.529 | 1.110 |
| 1 | 0.75 | 1.00 | 1.529 | 1.046 |
| 2 | 0.75 | 0.96 | 1.529 | 1.213 |
| 3 | 0.75 | 0.95 | 1.529 | 1.291 |
| 4 | 0.75 | 0.93 | 1.529 | 1.340 |
| 5 | 0.75 | 0.92 | 1.529 | 1.372 |
| 6 | 0.75 | 0.91 | 1.529 | 1.394 |
| 7 | 0.75 | 0.90 | 1.529 | 1.411 |
| 8 | 0.75 | 0.90 | 1.529 | 1.425 |
| 9 | 0.75 | 0.89 | 1.529 | 1.435 |
| 10 | 0.75 | 0.89 | 1.529 | 1.440 |
| 20 | 0.75 | 0.86 | 1.529 | 1.484 |
| 50 | 0.75 | 0.84 | 1.529 | 1.511 |
| 100 | 0.75 | 0.82 | 1.529 | 1.519 |

Tabel 5. Parameter Amplitudo dan Waktu Sinyal Sinusoidal Sudut *Pitch*

| P | Amp.time set(sekon) | Amp time out (sekon) | Amplitude set (rad) | Amplitude out (rad) |
|----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0.1 | 0.25 | 0.45 | 0.5576 | 0.343 |
| 1 | 0.25 | 0.37 | 0.5576 | 0.496 |
| 2 | 0.25 | 0.36 | 0.5576 | 0.521 |
| 3 | 0.25 | 0.34 | 0.5576 | 0.533 |
| 4 | 0.25 | 0.33 | 0.5576 | 0.5389 |
| 5 | 0.25 | 0.32 | 0.5576 | 0.5369 |
| 6 | 0.25 | 0.32 | 0.5576 | 0.5426 |
| 7 | 0.25 | 0.31 | 0.5576 | 0.5451 |
| 8 | 0.25 | 0.31 | 0.5576 | 0.5471 |
| 9 | 0.25 | 0.31 | 0.5576 | 0.5484 |
| 10 | 0.25 | 0.31 | 0.5576 | 0.5493 |
| 20 | 0.25 | 0.3 | 0.5576 | 0.554 |
| 50 | 0.25 | 0.29 | 0.5576 | 0.556 |
| 100 | 0.25 | 0.28 | 0.5576 | 0.5566 |

Dari kedua tabel di atas, terlihat bahwa semakin besar nilai P maka sinyal yang dihasilkanpun semakin mendekati sinyal *set point*. Akan tetapi semakin besar nilai P pula semakin kecil perubahan nilai yang terjadi. Dapat dilihat pada saat nilai P berubah dari 20, 50 hingga 100 perubahan nilai amplitudo di kedua sudut hanya sebesar 0.0027 dan 0.008 untuk sudut *roll* serta 0.002 dan 0.0006 untuk sudut *Pitch*. Hal ini dapat diartikan bahwa nilai P pada program sistem kendali optimal metode LQR dapat berpengaruh dengan baik hanya pada range nilai tertentu yaitu pada nilai 1 hingga 10.

Perbandingan Sistem Kendali LQR dan PID

Sebagai data pembandingan, dilakukan program simulasi *gimbal* menggunakan sistem kendali PID. Untuk mendapatkan nilai Kp, Ki dan Kd yang diperlukan dalam perhitungan kendali PID, dilakukan tuning menggunakan fitur *auto-tuning* pada blok PID di dalam program Simulink-MATLAB. Setelah dilakukan tuning dengan parameter *Overshoot* dan *Settling Time* terbaik didapatkan nilai penguatan PID sebagai berikut :

Tabel 6. Nilai Penguatan PID

| Sudut | Kp | Ki | Kd |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Roll</i> | 0.6803 | 0.6245 | 0.16970 |
| <i>Pitch</i> | 0.3592 | 0.1678 | 0.17564 |

Selanjutnya, didapatkan nilai parameter analisis respon transien dari hasil kendali PID menggunakan nilai penguatan di atas. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan hasil kendali LQR sebagai berikut :

Tabel 7. Perbandingan Sistem Kendali LQR dan PID

| Sudut | Sistem Kendali | Overshoot (%) | Settling Time (sekon) |
|--------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| <i>Roll</i> | Optimal Metode LQR | 3.609 | 0.659 |
| | PID | 9.875 | 1.422 |
| <i>Pitch</i> | Optimal Metode LQR | 1.860 | 0.164 |
| | PID | 10.556 | 2.650 |

Terlihat dengan nilai yang paling berbeda jauh dengan hasil sistem kendali optimal metode LQR adalah nilai *Overshoot* yang jauh lebih besar, yaitu 9.875% untuk sudut *roll* dan 10.556% untuk sudut *Pitch*. Selain itu respon sistem juga lebih lambat dibandingkan dengan respon sistem

kendali optimal metode LQR. Hal ini dapat dilihat dari nilai *Settling Time* yang jauh berbeda diantara keduanya. Dengan perbedaan yang cukup jelas, dapat dikatakan bahwa sistem kendali optimal dengan metode LQR dapat menghasilkan respon sistem *gimbal* dua sumbu yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali PID.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi *gimbal* kamera dua sumbu dan mengacu pada data yang didapatkan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Parameter Nilai Q pada sistem kendali optimal metode LQR berpengaruh terhadap respon sistem dimana dalam penelitian ini nilai Q yang optimal digunakan adalah dengan $P = 4$ untuk sudut *roll* dan $P = 6$ untuk sudut *pitch*.
2. Parameter nilai Q pada sistem kendali optimal metode LQR hanya berpengaruh signifikan untuk respon sistem hanya pada *range* nilai tertentu yaitu 1 hingga 10 dan akan semakin berkurang kualitas hasil kendali tersebut apabila digunakan nilai Q yang semakin besar.
3. Sistem kendali optimal dengan metode LQR menghasilkan respon sistem *gimbal* dua sumbu yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali PID dengan metode *auto-tuning*.

REFERENSI

- [1] M. K. H. R and Y. Raharjo, "Rancang Bangun Sistem Penstabil Kamera untuk Foto Udara Berbasis Wahana Udara Quadcopter," *ELECTRICIAN*, vol. 8, 2014.
- [2] K. Min, B. Gi-Sig, K. Gwan-Hyung and C. Myoung-Hoon, "The Stabilizer Design for a Drone-mounted Camera Gimbal System Using Intelligent-PID Controller and Tuner Mass Damper," *International Journal of Control and Automation*, vol. 9 no. 5, pp. 387-394, 2016.
- [3] F. A. Muhammad, M. Rivai and Suwito, "Perancangan Sistem Stabilisasi Kamera Tiga Sumbu dengan Metode Kontrol Fuzzy untuk Mobile Surveillance Robot," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, 2016.
- [4] D. B. Saputro, "Sistem Kendali Arah Gimbal 3 Axis Menggunakan Gesture Kepala," Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, 2016.
- [5] T. Shiino, K. Kawada, T. Yamamoto, M. Komichi and T. Nishioka, "Gimbals Control with The Camera for Aerial Photography inRC Helicopter," Department of Education Hiroshima University, Japan.
- [6] M. Abdo, A. Vali, A. Toloei and M. Arvan, "Stabilization Loop of Two Axes Gimbal System Using Self-Tuning PID Type Fuzzy Controller," *ISA Trans*, vol. 53, no. 2, pp. 591-602, 2014.
- [7] L. Vaghese and J. T. Kuncheria, "Modelling and Design of Cost Efficient Novel Digital Controller for Brushless DC Motor Drive," pp. 1-5, 2014.
- [8] M. Ali, "Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software MATLAB," *Jurnal Edukasi*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2014.
- [9] E. Susanto, Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) untuk Motor DC Menggunakan Personal Computer, Bandung: Dept. Teknik Elektro Intitu Teknologi Telkom Bandung.
- [10] M. J. Willis, "Proportional - Integral - Ferivative Control," 1999. [Online]. Available: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/pid/pid.pdf>. [Accessed 5 10 2018].
- [11] B. Ogunnaike and W. Ray, "Process Dynamics, Modelling and Control," Oxford University Press, New York, 1994.
- [12] S. Skogestad, "Probably The Best Simple PID Tuning In The World," *Journal of Process Control*, 2001.
- [13] U. Badri, A. I. G. S. M. Sc, I. K. MT and A. Dipl. Eng, "Kontrol Optimal Pada Motor DC Menggunakan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR)," Department of Electronis Engineering, ITS, Surabaya, 2010.
- [14] Ilham, "Kendali Linear Quadratic Regulator (LQR) pada Motor Induksi 3 Phasa dengan Direct Torque Control (DTC)," *Inspiration*, vol. 4, no. 2, 2014.
- [15] K. Ogata, Teknik Kontrol Otomatik, Jakarta: Erlangga, 1995.

Pemodelan 2-Dimensi dan 3-Dimensi Penyebaran Bijih Besi Menggunakan Data Resistivitas dan IP di Daerah “A” Provinsi Kalimantan Selatan

Siva Dwi Harum^{1,†}, Tati Zera¹, Dwi Haryanto²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN) BATAN, Jalan Lebak Bulus Raya No.9 Pasar Jum'at Jakarta Selatan

†sivadwi9638@gmail.com

Abstrak. Pulau Kalimantan, secara geologi memberikan potensi jebakan bijih besi. Bijih besi merupakan mineral yang terkandung dalam batuan sebagai bahan baku baja. Meningkatnya permintaan dunia industri terhadap mineral logam, menjadikan Indonesia bergantung pada impor. Sehingga dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui keberadaan dan sebaran bijih besi guna memenuhi kebutuhan yang memadai. Penelitian ini dilakukan di daerah “A” Provinsi Kalimantan Selatan menggunakan data resistivitas dan data *Induced Polarization* (IP) dengan konfigurasi Wenner yang terdiri dari 23 lintasan. *Induced Polarization* atau Polarisasi terimbas merupakan salah satu metode geolistrik yang sangat efektif untuk mengidentifikasi keberadaan mineral di bawah permukaan. Pengolahan dataawali dengan proses inversi 2-Dimensi untuk mendapatkan nilai resistivitas dan *chargeability* yang sebenarnya hingga mendapatkan model 3-Dimensi dengan berbagai irisan secara vertikal dan horisontal. Berdasarkan pemodelan, diduga keberadaan bijih besi ditemukan pada 16 lintasan diantaranya lintasan Q, P, O, V, M, V, L, K, W, J, I, H, G, F, E, dan D yang ditandai dengan rentang nilai resistivitas berkisar antara 85,5-1246 Ωm dan rentang nilai *chargeability* berkisar antara 4,5-16,1 msec. Penyebaran bijih besi di daerah “A” Provinsi Kalimantan Selatan mengarah ke timur laut.

Kata Kunci: Metode Geolistrik, *Induced Polarization*, bijih besi, resistivitas, *chargeability*

Abstract. Kalimantan, geologically provides a potential iron ore. Iron ore is a mineral contained in rock as a raw material for steel. Increasing industrial demand for metal minerals makes Indonesia dependent on imports. This research is conducted to find out the existence and distribution of iron ore to meet adequate needs. This research was carried out at “A” area of South Kalimantan Province using resistivity data and IP data with Wenner array consisting of 23 tracks. Induced Polarization is one of the most effective geoelectric method to identify the presence of minerals beneath the surface. Data processing is initiated by a 2-Dimensional inversion process to obtain the true resistivity and true chargeability values to obtain a 3-Dimensional model with various slices vertically and horizontally. Based on the modeling, the presence is found in 16 traps including the Q, P, O, N, M, V, L, K, W, J, I, H, G, F, E, and D traps which have resistivity value ranging between 85,5-1246 Ωm and chargeability value ranging between 4,5-16,1 msec. Distribution of iron ore in the area of the province of South Kalimantan leads to the northeast.

Keywords: Geoelectric method, Induced polarization, iron ore, resistivity, chargeability

PENDAHULUAN

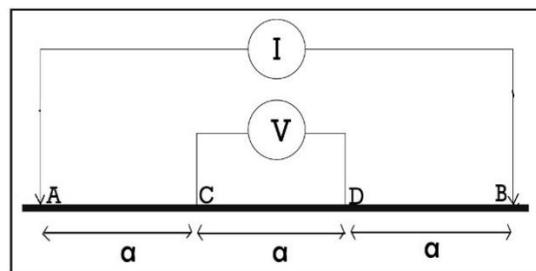
Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi mengalami peningkatan akan kebutuhan logam dasar sehingga menuntut untuk tersedianya bahan baku yang memadai. Salah satu bahan baku utama yang banyak digunakan dalam industri logam yaitu bijih besi. Guna memenuhi kebutuhan akan bijih besi perlu dilakukan eksplorasi untuk mencari jebakan mineral baru. Jebakan mineral yang dibutuhkan yaitu endapan yang mengandung bahan atau material ekonomis. Salah satu daerah yang memiliki potensi bijih besi di Indonesia adalah Provinsi Kalimantan Selatan. Penelitian ini berada di daerah “A” Provinsi Kalimantan Selatan dimana lokasi penelitian ini berada di antara formasi keramaian (kak) dan batuan malihan (Mm). Formasi Keramaian merupakan perselingan batupasir, batulanau, dan batulempung sedangkan batuan Malihan (Mm) memiliki hubungan kontak tektonik dengan batuan disekitarnya [1]. Berdasarkan hasil survei

sebelumnya, telah dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan pemodelan 2-Dimensi dan 3-Dimensi sehingga dapat mengetahui keberadaan dan penyebaran bijih besi pada daerah penelitian.

Pada survei di lapangan menggunakan metode geofisika yaitu metode geolistrik yang mempelajari sifat aliran listrik di dalam bumi dan mendeteksinya di permukaan bumi. Ada beberapa macam metode geolistrik, diantaranya metode resistivitas dan metode *Induced Polarization*. Prinsip dasar dalam kedua metode tersebut yaitu menginjeksikan arus listrik ke dalam bumi menggunakan elektroda arus yang kemudian diukur beda potensialnya menggunakan elektroda potensial. Pengukuran resistivitas didasari oleh Hukum Ohm yang menemukan hubungan antara arus (I) dengan beda potensialnya (V). Berdasarkan nilai arus dan beda potensial tersebut dapat diketahui nilai resistansinya yang dirumuskan sebagai berikut [2].

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Dimana K merupakan faktor geometri yang besarnya bergantung pada susunan elektroda (konfigurasi). Konfigurasi yang digunakan pada survei di lapangan yaitu konfigurasi wenner.



Gambar 1. Susunan elektroda konfigurasi wenner

Pada konfigurasi Wenner $AC = CD = DB = a$ yang merupakan jarak antara kedua elektroda arus dan elektroda potensial. Sehingga faktor geometri dalam konfigurasi ini dapat dirumuskan sebagai berikut

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (2)$$

Metode *Induced Polarization* ini mengamati efek polarisasi yang terjadi setelah arus listrik dimatikan sehingga metode ini sangat efektif digunakan untuk mengidentifikasi batuan yang mengandung deposit mineral. Efek polarisasi yang ditimbulkan dapat disebabkan oleh polarisasi membran dan polarisasi elektroda. Polarisasi membran disebabkan oleh menyempitnya pori-pori akibat keberadaan partikel lempung (*clay*) yang umumnya bermuatan negative yang sangat besar menyebabkan ion-ion positif pada fluida elektrolit tertarik ke arah partikel lempung yang bermuatan negatif. Proses ini menimbulkan awan-awan positif (membran) pada sisi pori-pori batuan. Sedangkan polarisasi elektroda disebabkan oleh keberadaan mineral logam pada batuan yang menghalangi aliran arus saat melewati batuan sehingga akan terjadi reaksi kimia pada bidang batas mineral logam yang menimbulkan potensial ekstra atau *overvoltage*. Ketika arus listrik dimatikan, ion-ion akan terakumulasi kembali ke posisi semula dan polarisasi elektroda meluruh secara berangsur-angsur terhadap waktu.

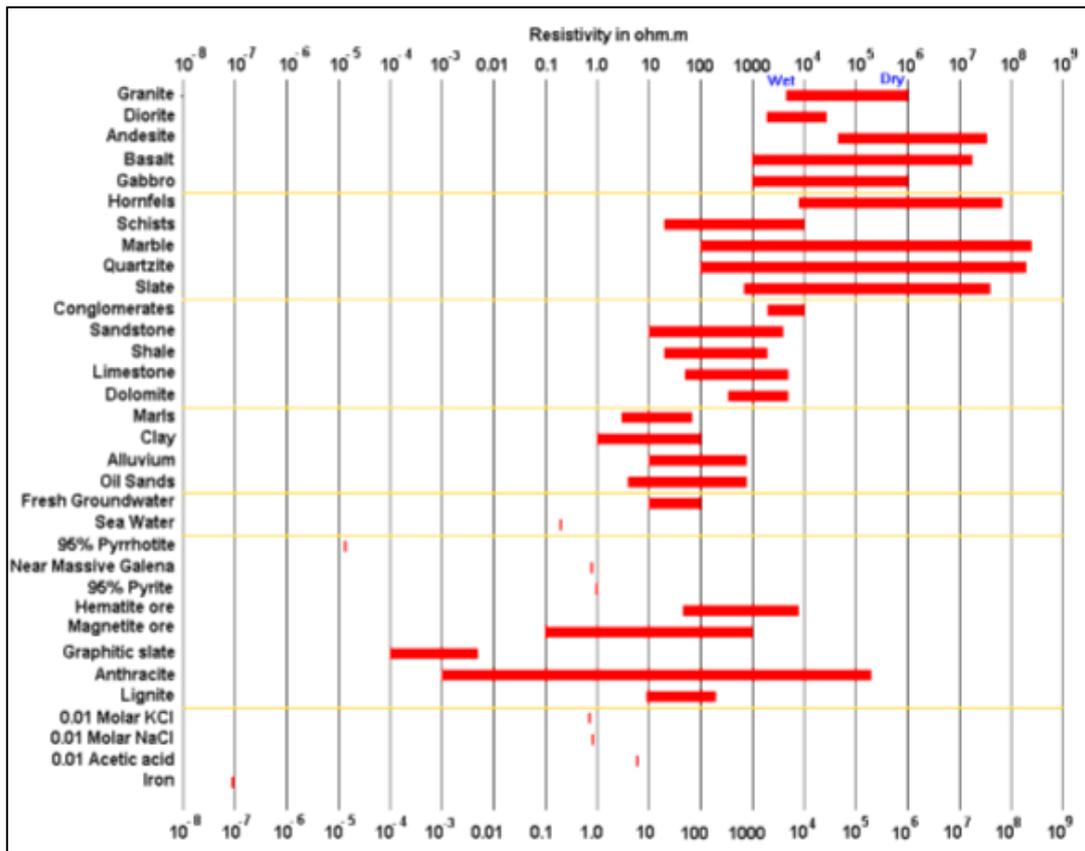
Perhitungan peluruhan potensial ketika arus diinjeksikan lalu dimatikan dan saat potensial meluruh sempurna akan menghasilkan nilai *chargeability* semu yang secara sistematis harga *chargeability* semu dituliskan sebagai berikut [3].

$$M = \frac{1}{V_0} \int V_t(t) dt \quad (3)$$

V_0 = Beda potensial saat arus dialirkan

V_t = Beda potensial sesaat setelah arus terputus

Untuk menentukan anomali bijih besi di bawah permukaan pada daerah penelitian dapat dilakukan melalui analisis dan interpretasi data yang telah diolah hingga menghasilkan pemodelan berupa model 2-Dimensi dan 3-Dimensi. Dalam analisis dan interpretasi di lapangan dilakukan dengan membandingkan nilai resistivitas dan *chargeability* yang mengacu pada referensi sebagai berikut.



Gambar 2. Nilai Resistivitas Material [4]

Tabel 1. Nilai Chargeability Mineral [5]

| Mineral | Chargeability (msec) |
|--------------|----------------------|
| Pyrite | 13,4 |
| Chalcocite | 13,2 |
| Copper | 12,3 |
| Graphite | 11,2 |
| Chalcopyrite | 9,4 |
| Bornite | 6,3 |
| Galena | 3,7 |
| Magnetite | 2,2 |
| Malachite | 0,2 |
| Hematite | 0,0 |

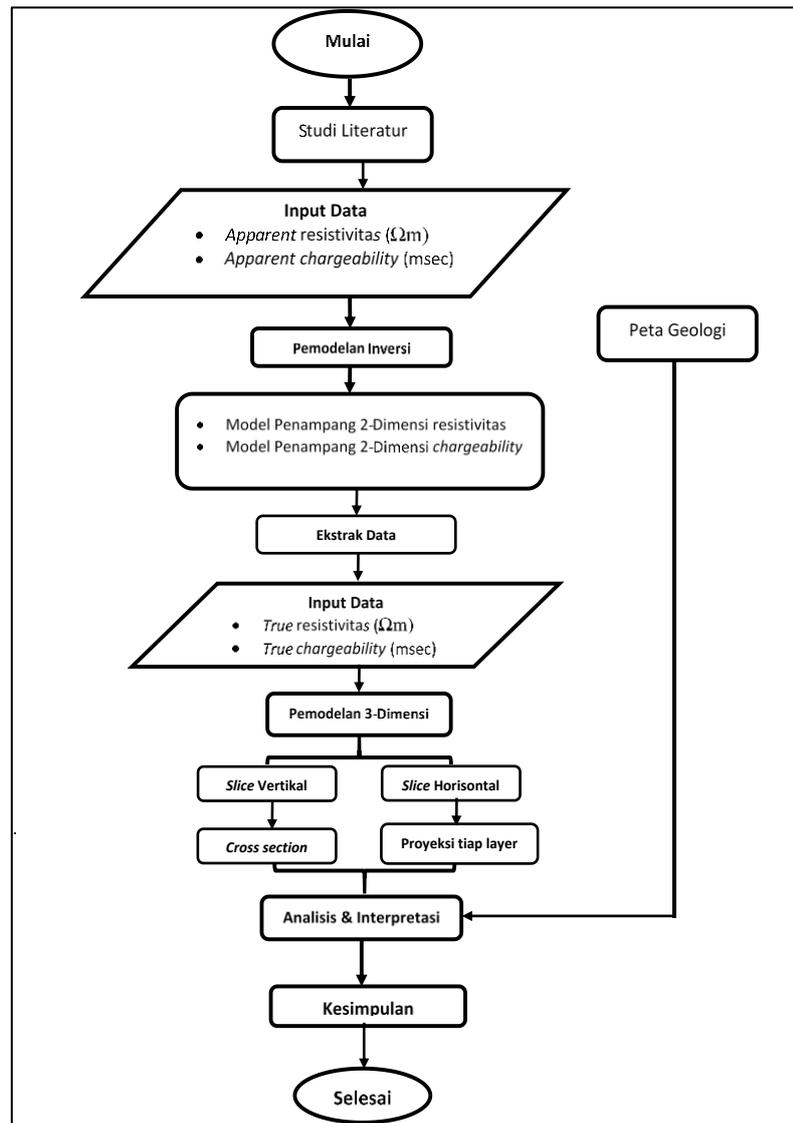
Tabel 2. Nilai Chargeability Beberapa Mineral dan Batuan [5]

| Material | Chargeability (msec) |
|----------------------|----------------------|
| 20% Sulfides | 2.000 – 3.000 |
| 8% - 20% Sulfides | 1.000 – 2.000 |
| 2% - 8% Sulfides | 500 – 1.000 |
| Volcanic Tuffs | 300 – 800 |
| Sandstone, Siltstone | 100 – 500 |
| Shale | 50 – 100 |
| Granite | 10 – 50 |
| Limestone, Dolomite | 10 – 20 |

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan di daerah “A” Provinsi Kalimantan Selatan menggunakan data resistivitas dan data IP dengan konfigurasi Wenner. Titik pengukuran pada hasil survei terdiri dari

23 lintasan dengan luas daerah penelitian 1000 x 1000 meter. Setiap lintasan memiliki jarak yang berbeda-beda dan jarak masing-masing elektrodanya sejauh 25 meter. Dalam penelitian “Pemodelan 2-Dimensi dan 3-Dimensi Penyebaran Bijih Besi Menggunakan Data Resistivitas dan IP di Daerah “A” Provinsi Kalimantan Selatan” ini meliputi beberapa tahapan. Berikut merupakan diagram alir penelitian.



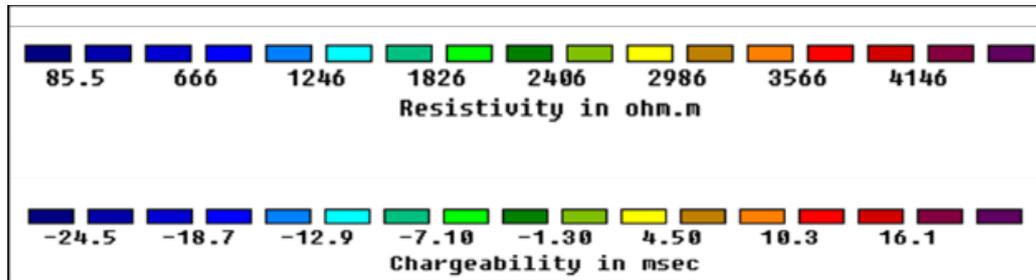
Gambar 4. Diagram alir penelitian

Data yang diperoleh, kemudian diolah hingga menghasilkan pemodelan 2-Dimensi dengan menggunakan *software* RES2DINV dan pemodelan 3-Dimensi menggunakan *software* Voxler 4. Pada pemodelan 3-Dimensi akan divisualisasikan ke dalam beberapa macam model irisan baik secara vertikal dan horizontal serta model irisan tiap *layer* berdasarkan elevasinya. Hal tersebut dilakukan untuk mempermudah proses analisis dan interpretasi terutama untuk mengetahui penyebaran bijih besi pada daerah penelitian.

Untuk mengindikasikan keberadaan bijih besi di daerah penelitian ditunjukkan dengan nilai resistivitas rendah dan *chargeability* yang tinggi [6]. Seluruh hasil pengolahan data tiap lintasan kemudian diinterpretasikan nilai anomali resistivitas dan *chargeability* dengan mengkorelasikan nilai referensi (Gambar 3, Tabel 1, Tabel 2) dan kondisi geologi daerah tersebut.

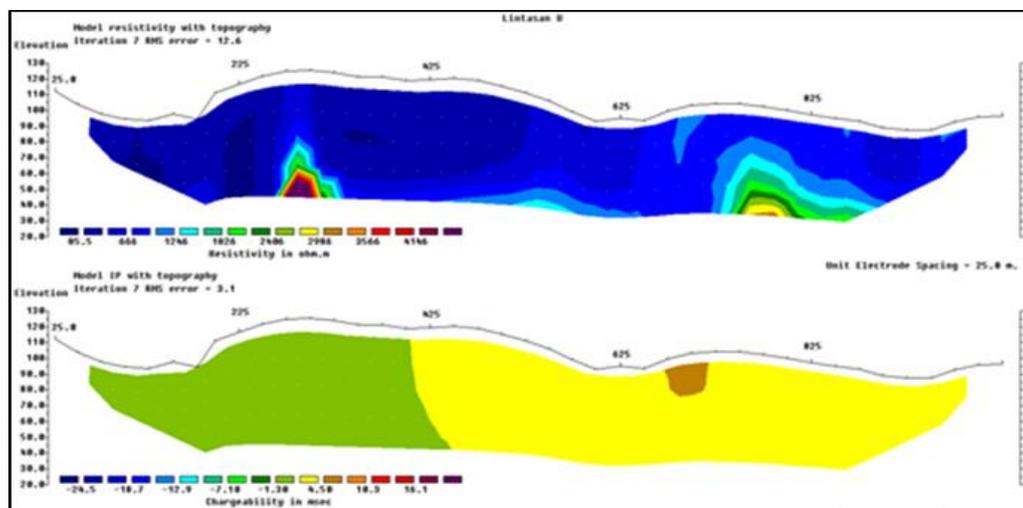
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data, menghasilkan sebanyak 23 lintasan yang setiap lintasannya terdiri dari penampang resistivitas dan penampang *chargeability*. Penampang resistivitas tersebut memvisualisasikan rentang nilai berkisar antara 85,5-4146 Ωm dan rentang nilai untuk *chargeability*-nya berkisar antara -24,5- 16,1 msec. Berikut merupakan rentang nilai resistivitas dan *chargeability* penampang model 2-Dimensi dari semua lintasan.



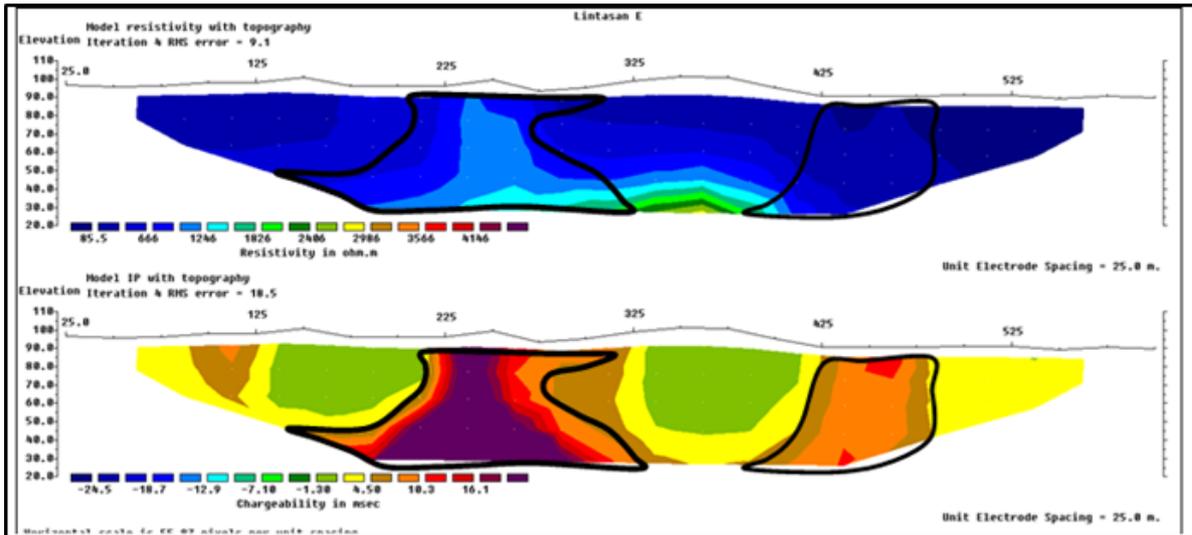
Gambar 5. Rentang nilai resistivitas dan *chargeability*

Berikut merupakan beberapa lintasan hasil pemodelan 2-Dimensi yang telah di inversi menggunakan *software* RES2Dinv.



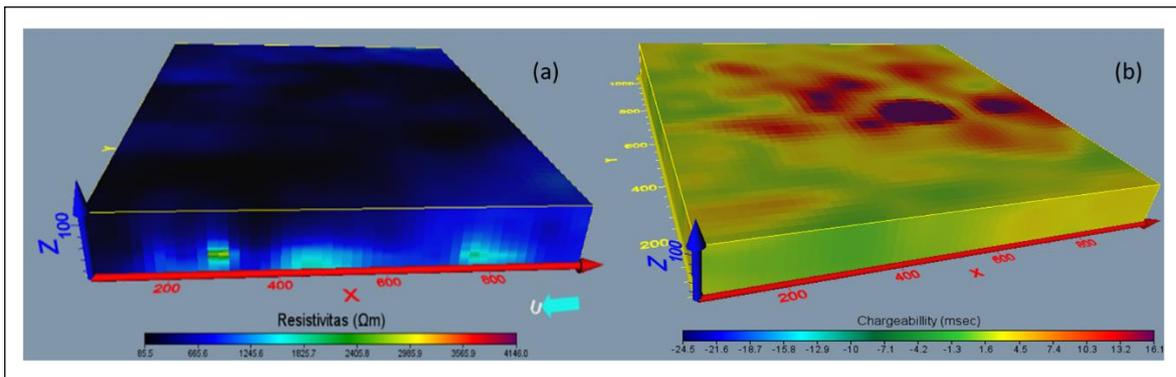
Gambar 6. Pemodelan 2-Dimensi Lintasan U

Pada lintasan U terbentang sepanjang 925 meter dengan elevasi 29,97 meter hingga 116,87 meter di atas permukaan yang memiliki 41 titik pengukuran. Titik pengukuran awal terletak pada titik 62,5 meter hingga 987,5 meter dengan permukaan yang sedikit bergelombang. Berdasarkan model (Gambar 6) menunjukkan tidak ada warna yang kontras antara kedua penampang sehingga diduga lintasan U tidak berpotensi mengandung bijih besi.



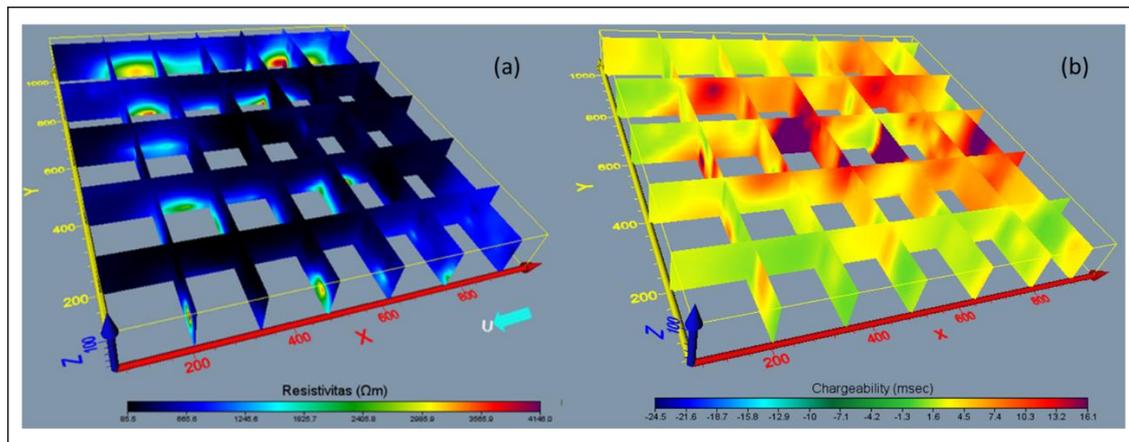
Gambar 6. Pemodelan 2-Dimensi Lintasan E

Pada lintasan E diduga ditemukan dua buah anomali bijih besi. Titik pertama yang terindikasi mengandung bijih besi berada pada bentangan 137,5-312,5 meter dengan elevasi pada 28-92,5 meter di bawah permukaan ditandai dengan rentang nilai resistivitas berkisar antara 85,5-1246 Ωm dan rentang nilai chargeability berkisar antara 10,3-16,1 msec. Sedangkan titik anomali bijih besi kedua berada pada bentangan 375-800 meter dengan elevasi sekitar 26-87 meter di bawah permukaan yang memiliki rentang nilai resistivitas berkisar antara 85,5-1246 Ωm dan rentang nilai chargeability berkisar antara 4,5-16,1 msec. Berdasarkan pemodelan 2-Dimensi semua lintasan, didapatkan nilai *true resistivitas* dan *true chargeability* yang digunakan untuk membuat pemodelan 3-Dimensi. Pemodelan 3-Dimensi ini dilakukan menggunakan *software* Voxler 4, sehingga didapatkan bentuk *solid model* yang merupakan gabungan dari seluruh lintasan.



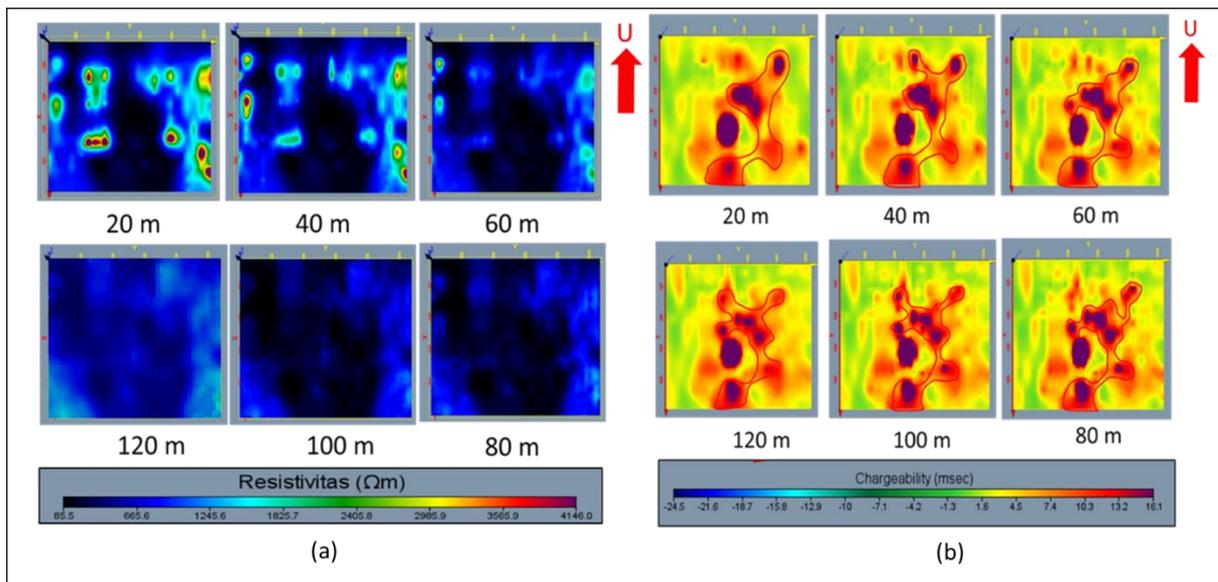
Gambar 7. Model 3-Dimensi resistivitas (a). Model 3-Dimensi chargeability

Gambar 7 menunjukkan pemodelan 3-Dimensi dari data resistivitas dan *chargeability*-nya. Namun, kekurangan dari model di atas yaitu tidak dapat menampilkan bagian dalam dari model sehingga perlu dilakukan pengirisan secara vertikal. Irisan vertikal yang membagi antara utara-selatan dan barat-timur yang kemudian digabungkan hingga membentuk *cross section* (Gambar 8). Pengirisan pun juga dilakukan pada model *chargeability*-nya sehingga menghasilkan pemodelan seperti gambar berikut.



Gambar 8. Model *cross section* resistivitas (a) *cross section* chargeability (b)

Pada pemodelan 3-Dimensi keberadaan bijih besi di representasikan dengan warna biru tua hingga biru muda dengan rentang nilai resistivitas berkisar antara 85,5-1246 Ωm . Namun untuk memastikan penyebaran yang lebih akurat diperlukan dukungan model 3-Dimensi *chargeability*. Berdasarkan *cross section chargeability* terlihat beberapa daerah yang memiliki warna kontras terhadap daerah sekitar yang ditandai dengan warna kuning kecoklatan hingga ungu. Kontras warna tersebut memiliki rentang nilai *chargeability* yang tinggi berkisar antara 4,5-16,1 msec. Diduga warna yang kontras tersebut menunjukkan adanya anomali bijih besi. Selanjutnya, dilakukan pengirisan secara horisontal yang kemudian di proyeksinya tiap *layer* berdasarkan elevasinya. Berikut merupakan pengirisan horisontal yang divisualisasikan tiap *layer* berdasarkan elevasinya.



Gambar 9. Irisan horisontal resistivitas (a) *chargeability* (b) berdasarkan elevasi

Pada model terlihat adanya distribusi nilai resistivitas yang rendah ditandai dengan warna biru tua hingga biru muda dengan rentang nilai resistivitas berkisar antara 85,5-1246 Ωm . Warna tersebut diduga mengandung bijih besi terlihat pada *layer 1* sampai *layer 3* yang menunjukkan warna biru sangat pekat. Pada *layer 4* sampai *layer 6* warna biru tersebut terlihat semakin samar dan menyebar. Berdasarkan model irisan *chargeability* berdasarkan elevasi, keberadaan bijih besi ditandai dengan daerah yang memiliki nilai *chargeability* tinggi dengan rentang warna kuning kecoklatan hingga ungu. Warna tersebut memiliki rentang *chargeability* berkisar antara 4,5-16,1 msec. Pada irisan *layer chargeability* menunjukkan titik penyebaran bijih besi di daerah penelitian yang tersebar hingga elevasi ke 120 dan penyebarannya mengarah ke timur laut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan interpretasi melalui model 2-Dimensi dan 3-Dimensi yang telah dikorelasikan dengan nilai referensi resistivitas dan *chargeability* serta kondisi geologinya didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis dan interpretasi yang telah dilakukan pada model 2-Dimensi menunjukkan keberadaan bijih besi di daerah "A" Provinsi Kalimantan Selatan yang ditemukan sebanyak 16 buah lintasan diantaranya lintasan Q, P, O, N, M, V, L, K, W, J, I, H, G, F, E, dan D yang ditandai dengan rentang nilai resistivitas berkisar antara 85,5-1246 Ωm dan rentang nilai *chargeability* berkisar antara 4,5-16,1 msec.
2. Berdasarkan model 3-Dimensi resistivitas dan *chargeability*-nya penyebaran bijih besi di daerah "A" Provinsi Kalimantan Selatan terlihat di beberapa titik yang menyebar hingga evelasi ke 120 yang mengarah ke arah timur laut.

REFERENSI

- [1] Amuzigi. [Online]. Available: <https://www.amuzigi.com/2015/11/geologi-lembar-banjarmasin-kalimantan.html>. [Accessed 12 Juli 2018].
- [2] W, Lowrie, *Fundamentals of Geophysics Second Edition*, New York: Cambridge University, 2007.
- [3] Eddy, Hadrian, "Pemodelan Data IP-Resistivity dan MAGnetik untuk Melokalisir Daerah Endapan Nikel Laterit di Daerah "LTD" Sulawesi Tenggara," Universitas Indonesia, Jakarta, 2010.
- [4] M, Loke, "Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys," [Online]. Available: www.geoelectrical.com.
- [5] W, Telford; L, Geldart; R, Sherrif, *Applied Geophysics Second Edition*, 1990: New York: Press Syndicate of The University of Cambridg.
- [6] Muhammad, Nafian, "Identifikasi Mineral Bijih Besi dengan Menggunakan Metode Induced Polarization di Daerah Oku Selatan, Sumatera Selatan," in *Prosiding Seminar Nasional E-Journal (SNF 2015)*, Jakarta, 2015.
- [7] Kartika, Yuni, "Pemodelan 3-Dimensi Data Induced Polarization untuk Mengidentifikasi Bijih Besi di Daerah "A" Kabupaten Tanah Laut,," Universitas Islam Negeri, Jakarta, 2017.

