

DAFTAR ISI

Analisis indeks kerentanan seismik dengan metode mikrotremor pada zona longsor di dusun Benge, desa Dlepih, kecamatan Tirtoyo, kabupaten Wonogiri (Fathunajah Elsha Christalianingsih, Indar Mery Sulya Aryani, Icha Khaerunnisa, Dea Mutiara Jannah, Salma Khoirunnisa, Hana Rosyida, Nugroho Budi Wibowo, Thaqibul Fikri Niyartama, Andi, Riko Afrilianto, Dian Kusuma Latif Affandi, Muh. Firman Maulana, Miqdad Haidar Zaki)	1
Analisis kondisi dinamika atmosfer berdasarkan citra satelit, model reanalisis dan data observasi (studi kasus hujan es di Depok pada 10 Januari 2023) (Rendy Syahril Amanu, Yahya Darmawan).....	8
Kajian struktur morfologi, gugus fungsi, dan sifat adsorpsi dari karbon aktif kulit singkong (<i>manihot esculenta crantz</i>) (Siti Sarah Husna, Rahmawati*, Nirmala Sari, Fera Anisa)	17
Rancang bangun modul dual frequency DC to AC inverter berbasis Arduino UNO (Riris Yuninda, Hartono*, R. Farzand Abdullatif).....	23
Prediksi polutan karbon monoksida menggunakan algoritma machine learning regresi linier berbasis sensor MQ-135 dan IoT di PT XYZ Bekasi (Putra Ramdhani*, Umi Pratiwi, Hartono).....	34
Pemodelan inversi data anomali gravitasi satelit untuk mengestimasi keberadaan dapur magma kompleks gunungapi Sindoro-Sumbing, Jawa Tengah, Indonesia (Insyahita Akmalia Mutaabidah, Sehah*, Zaroh Irayani)	42

Analisis indeks kerentanan seismik dengan metode mikrotremor pada zona longsor di dusun Bengle, desa Dlepih, kecamatan Tirtoyo, kabupaten Wonogiri

Fathunajah Elsha Christalianingsih^{1*}, Indar Mery Sulya Aryani¹, Icha Khaerunnisa¹, Dea Mutiara Jannah¹, Salma Khoirunnisa¹, Hana Rosyida¹, Nugroho Budi Wibowo^{1,2}, Thaqibul Fikri Niyartama¹, Andi¹, Riko Afrilianto¹, Dian Kusuma Latif Affandi¹, Muh. Firman Maulana¹, Miqdad Haidar Zaki¹

¹Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga
Jl.Laksda Adisucipto Sleman, Gedung Student Center Lt. III No. 3.70

²BMKG Stasiun Geofisika Sleman, DIY

*email:21106020037@student.uin-suka.ac.id

Abstrak - Tanah Longsor merupakan bencana alam yang sering terjadi di wilayah Kabupaten Wonogiri. Kejadian tanah longsor pernah terjadi di Dusun Bengle, Kecamatan Tirtoyo, Kabupaten Wonogiri. Tanah longsor tersebut mengakibatkan kerusakan rumah penduduk dan korban jiwa. Potensi bahaya tanah longsor dapat dianalisis dengan indeks kerentanan seismik (K_g). Penelitian ini bertujuan menganalisis frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0) dan indeks kerentanan seismik (K_g) pada zona longsor menggunakan metode mikrotremor. Data akuisisi mikrotremor sebanyak 21 data pada zona longsor. Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode HVSR untuk menghasilkan kurva HVSR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai A_0 memiliki rentang antara 0.99 - 7.55, nilai f_0 dengan rentang antara 0.24 Hz - 11.01 Hz, dan nilai K_g dengan rentang nilai 0.13 - 36.50. Zona terdampak tanah longsor Dusun Bengle memiliki kesesuaian arah aliran material dengan sebaran nilai K_g yang tinggi. Hingga saat ini zona tersebut masih dijadikan sebagai kawasan pemukiman yang cukup padat, sehingga diharapkan penelitian ini mampu meningkatkan kewaspadaan masyarakat dan pemerintah daerah akan adanya potensi dan ancaman bencana pada wilayah penelitian.

Kata kunci: Tanah Longsor, Metode Mikrotremor, Indeks Kerentanan Seismik

Abstract – Landslides are a natural disaster that often occurs in the Wonogiri Regency area. A landslide once occurred in Bengle Hamlet, Tirtoyo District, Wonogiri Regency. The landslide resulted in damage to residents' houses and loss of life. The potential danger of landslides can be analyzed using the seismic vulnerability index (K_g). This research aims to analyze the dominant frequency (f_0), amplification factor (A_0) and seismic vulnerability index (K_g) in the landslide zone using the microtremor method. There were 21 microtremor acquisition data in the landslide zone. Microtremor data processing uses the HVSR method to produce an HVSR curve. The research results show that the A_0 value ranges from 0.99 - 7.55, the f_0 value ranges from 0.24 Hz - 11.01 Hz, and the K_g value ranges from 0.13 - 36.50. The zone affected by the Bengle Hamlet landslide has a suitable direction of material flow with a high distribution of K_g values. Until now, this zone is still used as a fairly dense residential area, so it is hoped that this research will be able to increase awareness of the community and local government regarding the potential and threat of disasters in the research area.

Key words: Landslides, Microtremor Method, Seismic Vulnerability Index

PENDAHULUAN

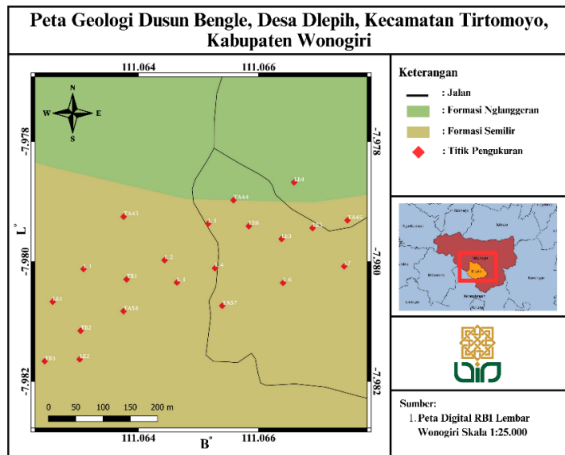
Secara geografis, Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik. Hal tersebut menyebabkan Indonesia memiliki tingkat kerawanan bencana geologi yang tinggi [1] khususnya bencana tanah longsor. Salah satu kawasan yang menjadi salah satu lokasi rawan bencana tanah longsor yang tinggi terletak pada Kabupaten Wonogiri yang berada di Provinsi Jawa Tengah. Tahun 2017 telah terjadi bencana tanah longsor di Desa Dlepih yang

menyebabkan tiga dusun atau sebanyak 1142 warga nya diungsikan dan beberapa warga di lokasi. Salah satu dusun yang mengalami bencana tanah longsor berada di

Dusun Bengle yang menyebabkan korban jiwa sebanyak dua orang.

Menurut Peta Geologi Lembar Ponorogo oleh Sampurno dan H. Samodra tahun 1997, Dusun Bengle terletak pada wilayah yang didominasi oleh perbukitan dengan lereng-lereng yang curam. Wilayah ini termasuk ke dalam tiga formasi yaitu Formasi

Nglanggeran, Formasi Semilir, dan Intrusi Andesit. Formasi Nglanggeran tersusun atas Batuan Beku berupa Andesit, Basalt, Breksi Gunungapi, serta Batupasir, sedangkan Formasi Semilir tersusun atas Batuan Sedimen berupa Breksi Batuapung, Batupasir, Kerikilan, Batupasir, dan Batulempung yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Geologi Kawasan Penelitian

Tanah longsor adalah peristiwa geologi yang terjadi akibat adanya gerakan massa batuan dan tanah yang menuruni sebuah lereng [2]. Tanah longsor dipengaruhi oleh dua hal, yaitu gaya penahan dan gaya pendorong. Gaya penahan dipengaruhi oleh faktor kekuatan batuan penyusun dan tingkat kepadatan tanah sedangkan gaya pendorong dapat dipicu oleh faktor curah hujan, kemiringan lereng, serta massa jenis batuan penyusunnya [3]. Menurut Christalianingsih, wilayah penelitian memiliki zona kerentanan pergerakan tanah yang tinggi, hal ini juga dapat menjadi faktor terjadinya tanah longsor pada wilayah tersebut [15].

Gejala umum yang ditimbulkan saat terjadi tanah longsor adalah muncul tanda-tanda awal berupa retakan-retakan di permukaan lereng. Retakan-retakan tersebut cenderung terbentuk sejajar dengan arah tebing atau lereng yang mengalami pergerakan. Retakan-retakan ini terbentuk karena adanya pergerakan massa tanah dan batuan pada lereng, yang menyebabkan permukaan lereng terbelah atau retak. Kemunculan mata air baru secara tiba-tiba dan tebing yang menjadi rapuh serta kerikil mulai berjatuhan juga merupakan gejala umum yang dapat diamati sebagai indikasi awal terjadinya tanah longsor [4].

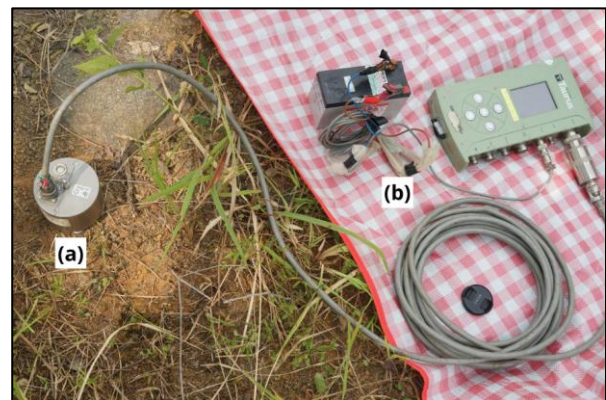
Tanah longsor dapat terjadi karena dua faktor, yaitu faktor yang bersifat pasif seperti litologi, stratigrafi, struktur geologi, hidrologi, topografi dan riwayat kejadian longor yang pernah terjadi [5]. Faktor kedua yaitu faktor aktif dipicu oleh aktivitas manusia, iklim dan getaran tanah akibat seismisitas [6] sehingga dibutuhkan identifikasi litologi lebih lanjut untuk

mengetahui tingkat rawan longsor pada kawasan tersebut. Identifikasi dapat dilakukan menggunakan pengukuran geofisika yaitu metode mikroseismik. Identifikasi litologi dapat diketahui berdasarkan beberapa parameter seperti amplifikasi dominan, frekuensi dominan, dan indeks kerentanan tanah.

Indeks kerentanan seismik berperan penting dalam upaya manajemen bencana tanah longsor, baik sebagai informasi peringatan maupun pertimbangan dalam pembuatan kebijakan mitigasi bencana. Indeks kerentanan seismik bervariasi antar wilayah satu dengan wilayah yang lain, sehingga pengetahuan akan indeks kerentanan seismik di suatu wilayah dapat mendorong kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi ancaman longsor [7].

METODE PENELITIAN

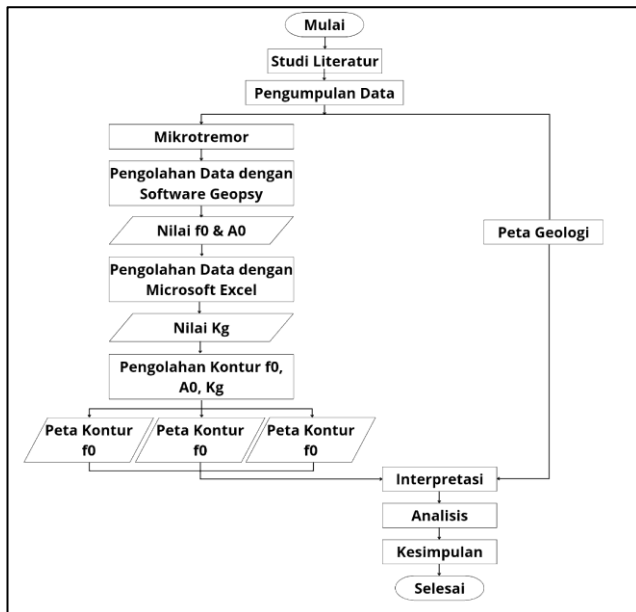
Penelitian ini dilakukan dengan pengukuran di lapangan menggunakan metode mikrotremor. Akuisisi data ini dilakukan dengan menggunakan Sensor *LE-3Dlite* (Gambar 2a) dan *Digital Portable Seismograph* (Gambar 2b).



Gambar 2. *Digital Portable Seismograph* dan Sensor *LE-3Dlite*

Pengukuran dilaksanakan selama lima hari dengan 21 titik pengukuran. Titik pengukuran terdistribusi pada kawasan zona longsor. Pengukuran ini dilakukan dengan cara meletakkan sensor yang telah disambungkan dengan *Digital Portable Seismograph* di atas tanah. Selanjutnya alat akan membaca dan merekam gelombang di bawah permukaan bumi. Data yang diperoleh berupa sinyal seismik yang kemudian dapat diunduh dan diolah dengan *software geopsy*. Pada proses pengolahan data dilakukan *filtering* pada sinyal yang diperoleh untuk menghilangkan gangguan (*noise*), hingga didapatkan nilai frekuensi dominan dan amplifikasi dominan. Kedua data tersebut, selanjutnya dilakukan pengolahan dengan menggunakan *software microsoft excel* untuk mendapatkan nilai indeks kerentanan seismik di area penelitian. Berdasarkan nilai indeks kerentanan seismik dapat dibuat kontur dengan *software surfer* agar dapat mengetahui

persebaran indeks kerentanan seismik pada wilayah penelitian. Alur proses dari penelitian ini digambarkan melalui diagram alir yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Mikrotremor disebut juga getaran tanah dengan *amplitude displacement* sekitar 0,1-1 mikron dengan *amplitude velocity* 0,001-0,01 cm/s [8]. Getaran tersebut berasal dari bawah permukaan bumi dan terperangkap di dalam lapisan sedimen, kemudian dipantulkan oleh lapisan batas antara dua jenis material dengan frekuensi yang sama. Salah satu kemungkinan sumber mikrotremor dapat berasal dari bawah permukaan maupun aktivitas alam atau manusia [9].

Salah satu metode yang dapat digunakan dalam pengolahan data sinyal mikrotremor adalah metode *HVSR* (*Horizontal to Vertical Spectra Ratio*). Metode *HVSR* digunakan untuk menghitung rasio antara spektrum Fourier dari komponen vertikal dengan komponen horizontal sinyal mikrotremor. Parameter penting yang dihasilkan dari metode *HVSR* adalah frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) [10]. Frekuensi dominan (f_0) adalah nilai frekuensi yang paling sering muncul dalam pengukuran, yang dianggap mewakili karakteristik lapisan batuan di suatu area. Dengan kata lain, f_0 dapat menunjukkan jenis dan sifat dari batuan di daerah tersebut. Faktor amplifikasi (A_0) merupakan peningkatan atau perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan signifikan antara lapisan-lapisan material di bawah permukaan bumi. Gelombang seismik akan mengalami penguatan atau amplifikasi ketika merambat melalui medium yang lebih lunak dibandingkan medium awal yang dilaluinya [11].

Berdasarkan parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) yang dihasilkan dari pengukuran mikroseismik dapat digunakan untuk

memperkirakan indeks kerentanan seismik. Menurut Nakamura (2008), indeks kerentanan seismik (K_g) adalah suatu indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan suatu lapisan tanah terhadap deformasi atau perubahan bentuk sebagai akibat dari beban atau guncangan seismik [12]. Dengan tingginya nilai indeks kerentanan seismik menyebabkan daerah tersebut memiliki potensi bahaya yang lebih tinggi dan kerusakan bangunan yang lebih besar saat terjadi gempa bumi [16]. Data indeks kerentanan seismik (K_g) dapat diperoleh dengan menggunakan software microsoft excel dengan rumus dibawah ini [13]:

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0}$$

Keterangan :

K_g : Indeks Kerentanan Seismik

A_0 : Faktor Amplifikasi

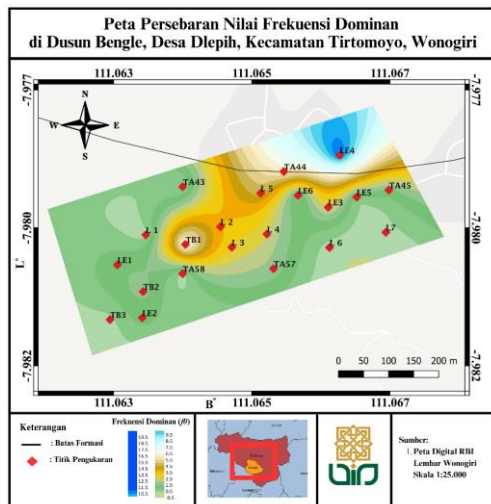
f_0 : Frekuensi Dominan (Hz)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode yang digunakan dalam pengolahan data penelitian ini yakni menggunakan metode *HVSR*. Hasil dari metode ini berupa kurva H/V yang didapatkan pada metode ini akan menghasilkan beberapa nilai, diantaranya adalah nilai frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), serta nilai indeks kerentanan seismik (K_g) pada kawasan penelitian

a. Frekuensi Dominan (f_0)

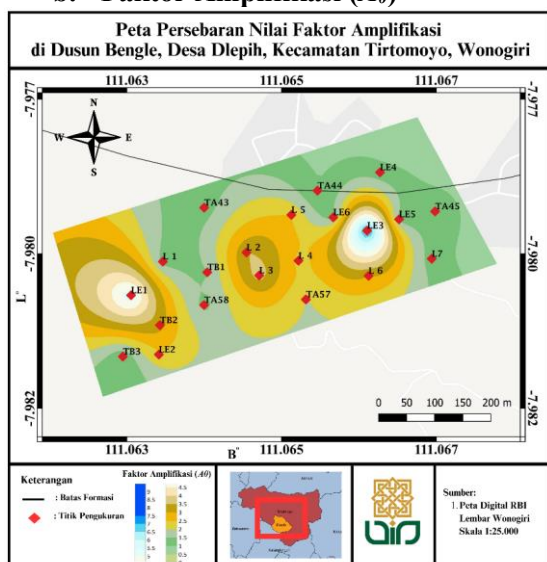
Frekuensi dominan (f_0) merupakan besarnya gelombang frekuensi yang kerap muncul secara berulang pada suatu kawasan [13]. Nilai frekuensi dominan dapat menggambarkan kondisi geologi atau karakteristik lapisan batuan bawah permukaan di daerah penelitian. Jenis dan sifat-sifat pada batuan penyusun kawasan penelitian dapat diidentifikasi juga dengan menggunakan nilai frekuensi dominan.



Gambar 4. Peta Persebaran Nilai Frekuensi Dominan (f_0) di Dusun Benge

Nilai frekuensi dominan (f_0) pada kawasan tanah longsor Dusun Benge memiliki rentang 0.24 Hz - 11.01 Hz. Persebaran nilai frekuensi dominan (f_0) dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3, Formasi Semilir memiliki rentang nilai frekuensi dominan (f_0) antara 0.25 - 2.5 Hz. Sementara sebaran nilai frekuensi dominan (f_0) pada Formasi Nglanggeran berada pada rentang 7.5 - 19.5 Hz. Sebaran nilai frekuensi dominan ini mampu merepresentasikan karakteristik geologi pada masing-masing formasi, nilai f_0 yang rendah berada pada daerah dengan dominasi batuan lunak (Formasi Semilir) dan nilai f_0 tinggi berada pada daerah dengan dominasi batuan keras (Formasi Nglanggeran).

b. Faktor Amplifikasi (A_0)



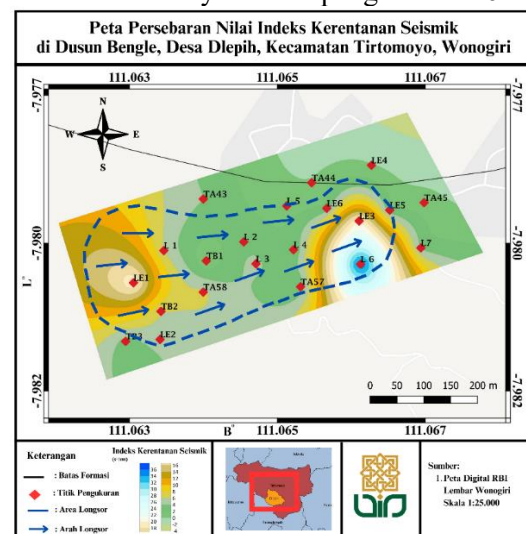
Gambar 5. Peta Persebaran Nilai Faktor Amplifikasi (A_0) di Dusun Benge

Faktor amplifikasi (A_0) merupakan reaksi gelombang seismik yang berkaitan dengan perbedaan densitas

antara lapisan endapan sedimen dengan batuan keras di bawah permukaan. Faktor amplifikasi (A_0) mengalami peningkatan nilai ketika melewati Batuan Lunak. Mengacu pada peta yang ditunjukkan Gambar 4, menunjukkan daerah penelitian didominasi oleh nilai faktor amplifikasi yang relatif rendah. Nilai A_0 pada daerah penelitian memiliki rentang antara 0.99 - 7.55, dimana nilai A_0 yang rendah antara 0.99 - 3 berada pada Formasi Nglanggeran didominasi oleh batuan keras dan nilai A_0 tertinggi yakni antara 5 - 7.55, berada pada Formasi Semilir yang didominasi oleh Batuan Lunak.

c. Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

Indeks Kerentanan Seismik (K_g) adalah parameter yang digunakan untuk mengetahui informasi tingkat kerentanan lapisan tanah suatu wilayah terhadap pergerakan tanah. Besarnya nilai indeks kerentanan seismik bergantung pada nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, dapat dilihat jika wilayah penelitian memiliki indeks kerentanan seismik rendah hingga tinggi. Indeks kerentanan seismik yang didapatkan berada pada rentang 0.13 - 36.50. Nilai indeks kerentanan terendah berada pada Formasi Nglanggeran yaitu pada titik pengukuran LE4, sementara nilai indeks kerentanan seismik tertinggi berada pada Formasi Semilir yaitu titik pengukuran L6.



Gambar 6. Peta Persebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik (K_g) di Dusun Benge

Indeks kerentanan juga menunjukkan kerentanan suatu wilayah apabila wilayah tersebut terkena dampak dari pergerakan lapisan batuan atau guncangan. Semakin tinggi nilai K_g , semakin rentan pula wilayah tersebut terdampak oleh guncangan. Berdasarkan peta yang terlihat pada gambar 5, wilayah yang memiliki indeks kerentanan seismik yang sedang dan tinggi berada pada area pemukiman. Nilai Indeks kerentanan tanah yang tinggi dan berada pada area pemukiman

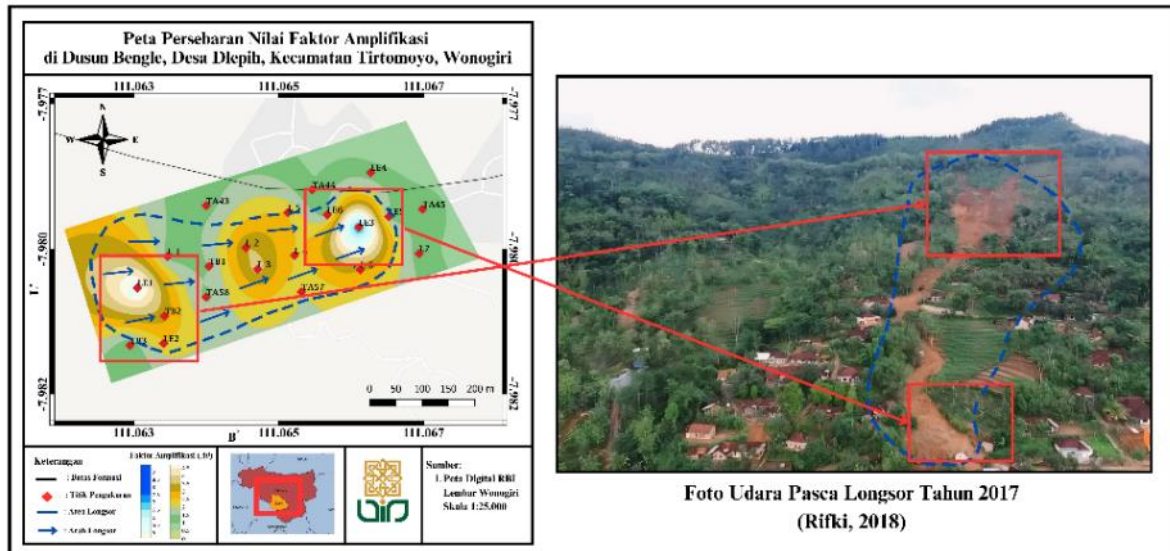
mengakibatkan wilayah tersebut memiliki potensi bahaya yang tinggi terhadap pergerakan tanah.

d. Analisis K_g pada Zona Longsor

Berdasarkan data dari BPBD Kabupaten Wonogiri, Dusun Bengle memiliki historis bencana tanah longsor pada tanggal 28 November 2017. Bencana tanah longsor pada tahun 2017 ini mengakibatkan 2 orang meninggal dunia, beberapa rumah rusak serta tiga dusun diungsikan. Penelitian mengenai potensi k

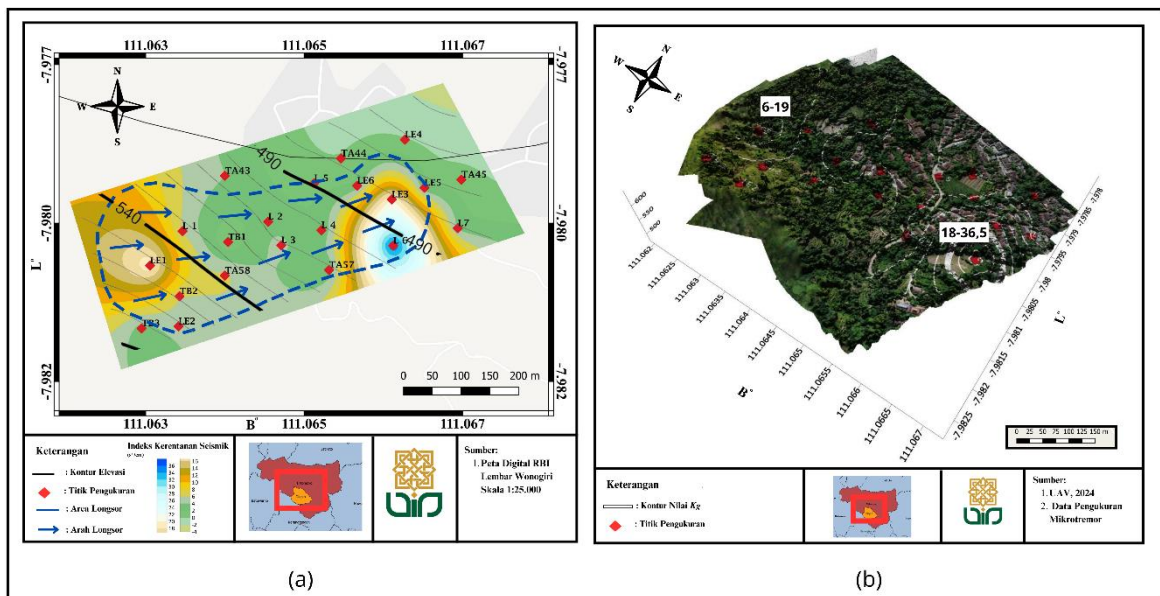
erusa
kan
akibat
bencan
suatu
wilaya
h
terhad
ap
geraka
n
tanah,

a perlu dilakukan sebagai langkah mitigasi bencana. K_g merupakan salah satu parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui potensi kerusakan



Gamb

ar 7. Foto Udara Pasca Longsor Tahun 2017



Gambar 8. Foto Udara Zona Kejadian Tanah Longsor Tahun 2017 Berdasarkan Persebaran Nilai K_g (Foto Udara 2024)



Gambar 9. Mahkota Longsor Dusun Benge

Longsor yang terjadi di dusun Benge memiliki arah aliran material dari Barat ke Timur. Pada Gambar 6. terlihat bahwa pola arah jatuhnya material longsor berkorelasi dengan pola kontur nilai faktor amplifikasi yang menunjukkan adanya akumulasi endapan sedimen pada proses perpindahan material longsor. Material longsor dengan volume yang besar terbawa hingga titik LE3, dimana titik tersebut memiliki nilai A_0 tertinggi pada wilayah penelitian. Identifikasi awal mahkota bencana tanah longsor yang terjadi di Dusun Benge dapat diamati pada Gambar 9.

Pada peta nilai indeks kerentanan tanah yang ditunjukkan Gambar 7, sebaran nilai K_g relatif sesuai dengan rekam jejak kejadian tanah longsor di tahun 2017, dimana area yang memiliki nilai K_g relatif tinggi mengakibatkan terjadinya kerusakan yang signifikan dibanding dengan wilayah dengan nilai K_g yang rendah. Kawasan dengan nilai K_g yang tinggi juga berada pada kawasan pemukiman yang padat, sehingga perlu adanya kewaspadaan baik dari masyarakat maupun pemerintah daerah akan ancaman dan potensi gerakan tanah. Penelitian ini menunjukkan bahwa daerah dengan nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi, rentan terhadap adanya bencana tanah longsor.

KESIMPULAN

Hasil akuisisi data menggunakan metode mikrotremor pada Dusun Benge, Kecamatan Tirtomoyo, wilayah Kabupaten Wonogiri menghasilkan data frekuensi dominan dan faktor amplifikasi, serta nilai indeks kerentanan tanah. Nilai A_0 memiliki rentang antara 0.99 hingga 7.55, nilai f_0 dengan rentang antara 0.24 Hz hingga 11.01, dan nilai K_g dengan rentang nilai 0.13 hingga 36.50. Kawasan yang terdampak tanah longsor memiliki rentang nilai A_0 antara 5 - 7.55, f_0 pada rentang nilai 0.25 - 2.5 Hz, dan K_g pada rentang nilai 10 - 36.50. Nilai A_0 dan f_0 memiliki pengaruh terhadap besar kecilnya nilai K_g . Nilai K_g yang tinggi berkorelasi dengan arah aliran material tanah longsor. Titik Pengukuran LE1 yang berada pada bagian Barat wilayah penelitian menjadi titik awal kejadian tanah longsor. Material tanah longsor terbawa dan kemudian terakumulasi hingga titik LE3 yang berada pada bagian Timur wilayah penelitian. Nilai K_g yang tinggi juga berada pada wilayah pemukiman yang padat, sehingga diharapkan baik pemerintah daerah maupun masyarakat dapat meningkatkan kewaspadaan terhadap adanya potensi bahaya yang mengancam jika terjadi gerakan tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu atau berkontribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Khoirunnisa, N. B. Wibowo, H. Rosyida, I. Khaerunnisa, D. Jannah, F. E. C. dan I. M. S. A., "Analisis keberadaan manifestasi panas bumi menggunakan fault fracture density (ffd) di kecamatan Tempuran, kabupaten Magelang," *KURVATEK*, vol. 9, no. 1, pp. 63-72, 2024.
- [2] D. M. Cruden, "A simple definition of a landslide," *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, vol. 43, no. 1, pp. 27-29, 1991.
- [3] D. P. Malik, M. L dan Ayusari, "Penentuan nilai indeks kerentanan seismik daerah rawan longsor metode mikrotremor di kecamatan Tombolopao kabupaten Gowa," *Tolis Ilmiah: Jurnal Penelitian*, vol. 3, no.

- 1, pp. 14-23, 2021.
- [4] Suprpto, R. Nurmasari dan A. Rosyida, "Analisis penyebab tanah longsor di kabupaten ponorogo (studi ; dusun Tangkil, Desa Banaran, kecamatan Pulung)," *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, vol. 8, no. 2, pp. 112-119, 2017.
- [5] H. Rosyida, N. B. Wibowo, I. Khaerunnisa, I. M. S. A., D. M. Jannah, F. E. C. dan S. Khoirunnisa, "Analisis kolerasi dan determinasi antara fault fracture density (FFD) dengan bencana tanah longsor kabupaten Simalungun, Sumatera Utara," *Jurnal Teras Fisika*, vol. 6, no. 2, pp. 39-43, 2023.
- [6] M. E. Fitrianingrum dan D. Ruslanjari, "Zonasi rawan longsor di desa pagerharjo kecamatan Samigaluh kabupaten Kulonprogo Yogyakarta," *Jurnal Pendidikan Geografi*, vol. 18, no. 2, pp. 181-190, 2018.
- [7] B. W. Hastanti dan A. Miardini, "Penilaian Indeks Kerentanan Sebagai Upaya Pengurangan Risiko Longsor Di Kecamatan Banjarmangu Kabupaten Banjarnegara Jawa Tengah," *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, vol. 5, no. 2, pp. 155-170, 2021.
- [8] Ü. D. M. Mirzaoglu, "Application of microtremors to seismic microzoning procedure," *Journal Of The Balkan Geophysical Society*, p. 143 – 156, 2003.
- [9] R. H. Kusmita, "Studi Kerentanan Tanah di Wilayah Telanaipura dan Kotabaru Kota Jambi terhadap Gelombang Seismik," *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, 2020.
- [10] N. Sitorus, S. Purwanto dan W. Utama, "Analisis Nilai Frekuensi Natural Dan Amplifikasi Desa Olak Alen Blitar Menggunakan Metode Mikrotremor HVSR," *Jurnal Geosaintek*, vol. 3, no. 2, pp. 89-92, 2017.
- [11] V. Arintalofa, G. Yuliyanto dan U. Harmoko, "Analisa Mikrotremor Menggunakan Metode HVSR untuk Mengetahui Karakteristik Bawah Permukaan Manifestasi Panas Bumi Diwak dan Derekan Berdasarkan Nilai VP," *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, vol. 1, no. 2, pp. 54-61, 2020.
- [12] A. M. Haifani, "Analisis Penentuan Indeks Kerentanan Seismik Dengan Pendekatan Metoda Hvsr Untuk Tapak Instalasi Nuklir," *Seminar Keselamatan Nuklir*, pp. 12-17, 2015.
- [13] Nakamura, "On The H/V Spectrum," in *The 14th World Conferences on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.
- [14] U. M. j. Y. I. S. C. Desmita, "Kajian Respon Gempa Dan Kerentanan Bangunan Publik Berdasarkan Data Mikrotremor Di Aceh Utara," *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, Vol. 5, No 3, pp. pp. 236-246, 2021.
- [15] S. C. Desmita, U. Muksin dan Y. Idris, "Kajian Respon Gempa Dan Kerentanan Bangunan Publik Berdasarkan Data Mikrotremor Di Aceh Utara," *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, vol. 5, no. 3, pp. 236-246, 2021.

Analisis kondisi dinamika atmosfer berdasarkan citra satelit, model reanalisis dan data observasi (studi kasus hujan es di Depok pada 10 Januari 2023)

Rendy Syahril Amanu¹, Yahya Darmawan^{2*}

¹ Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

² Program Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Jl. Meteorologi No.5, Tanah Tinggi, Kec. Tangerang, Kota Tangerang, Banten 15221

*email: yahya.darmawan@bmkg.go.id

Abstrak – Hujan es adalah fenomena cuaca ekstrem dari sistem konvektif seperti awan cumulonimbus (Cb) yang jarang terjadi tetapi berdampak signifikan pada infrastruktur, pertanian, dan keselamatan. Penelitian ini menganalisis dinamika atmosfer yang mempengaruhi hujan es di Depok pada 10 Januari 2023 pukul 08.40 UTC menggunakan data satelit Himawari-9, model ERA-5, dan sounding udara atas. Data Himawari-9 dianalisis dengan perangkat lunak SATAID melalui interpretasi saluran IR dan metode RGB Day Convective Storms serta 24-hour Microphysics. Data ERA-5 menghasilkan grafik *timeseries* variabel atmosfer, sementara data sounding divisualisasikan dengan diagram Skew-T log-P dan indeks labilitas atmosfer. Analisis menunjukkan siklus hidup awan cumulonimbus dengan suhu puncak di bawah -60°C . Parameter divergensi mengindikasikan adanya konvergensi signifikan di lapisan bawah, divergensi di lapisan atas, serta kelembaban tinggi di lapisan menengah dan atas, yang mendukung pembentukan kristal es. Indeks labilitas atmosfer seperti TT, KI, SWEAT, CAPE, LI, dan Showalter Index menunjukkan ketidakstabilan atmosfer dan energi konvektif.

Kata kunci: hujan es, cumulonimbus, Himawari-9, labilitas atmosfer

Abstract – Hail is an extreme weather phenomenon from convective systems such as cumulonimbus (Cb) clouds that rarely occurs but has a significant impact on infrastructure, agriculture, and safety. This study analyzes the atmospheric dynamics affecting hail in Depok on January 10, 2023, at 08:40 UTC using Himawari-9 satellite data, the ERA-5 model, and upper-air soundings. Himawari-9 data were analyzed using the SATAID software through IR channel interpretation and the RGB Day Convective Storms and 24-hour Microphysics methods. ERA-5 data produces *timeseries* graphs of atmospheric variables, while sounding data is visualized with Skew-T log-P diagrams and atmospheric instability indices. Analysis shows the life cycle of cumulonimbus clouds with peak temperatures below -60°C . Divergence parameters indicate significant convergence in the lower layer, divergence in the upper layer, and high humidity in the middle and upper layers, which support the formation of ice crystals. Atmospheric instability indices such as TT, KI, SWEAT, CAPE, LI, and Showalter Index indicate atmospheric instability and convective energy.

Key words: hail, cumulonimbus, Himawari-9, atmospheric instability

PENDAHULUAN

Hujan es merupakan salah satu fenomena atmosfer yang berbentuk presipitasi berbentuk es. Fenomena ini biasanya dikaitkan dengan sistem cuaca konvektif seperti awan cumulonimbus (Cb), dengan es yang terbentuk sekitar 5 mm[1]. Pembentukan awan Cb di daerah ekuator dimulai dari tidak stabilnya atmosfer, menyebabkan adanya *updraft* yang kuat menyebabkan pembentukan awan cumulonimbus yang dapat mencapai hingga tropopause yang memungkinkan adanya pembentukan es di awan [2], [3].

Dimana pembentukan es di awan konvektif terjadi setelah melewati pada *freezing level*

dalam awan dengan suhu dibawah 0°C derajat Celsius yang memungkinkan pembekuan uap air hingga menjadi partikel es [4], [5]. Saat partikel es mulai bergerak turun ke permukaan akibat ada *downdraft*, partikel es tersebut akan melewati lapisan yang lebih hangat sehingga sebagian partikel es meleleh, namun jika suhu udara tetap cukup dingin atau dorongan angin yang kuat ke bawah menyebabkan partikel es tetap dalam bentuk es saat mencapai permukaan bumi [6].

Frekuensi hujan es meskipun relatif rendah dibandingkan jenis presipitasi air umumnya, namun dampak dari hujan es sering kali tidak dapat diabaikan. Kerusakan bangunan Selain itu, hujan es juga dapat merusak atap bangunan, kendaraan, dan fasilitas umum lainnya, serta

menyebabkan gangguan pada jaringan listrik dan telekomunikasi [7], [8]. Beberapa sektor lainnya seperti pertanian dan keselamatan manusia. Dalam sektor pertanian, hujan es dapat merusak tanaman secara langsung, baik yang masih muda maupun yang sudah matang [9]. Dampak lainnya yang tidak kalah penting adalah keselamatan manusia, terutama ketika hujan es turun dengan intensitas tinggi dan butiran es berukuran besar [10]. Oleh karena itu hujan es menjadi fenomena yang tidak dapat dihindari sehingga dapat menghambat kegiatan sehari-hari, dan meningkatkan kerentanan masyarakat terhadap bencana [11].

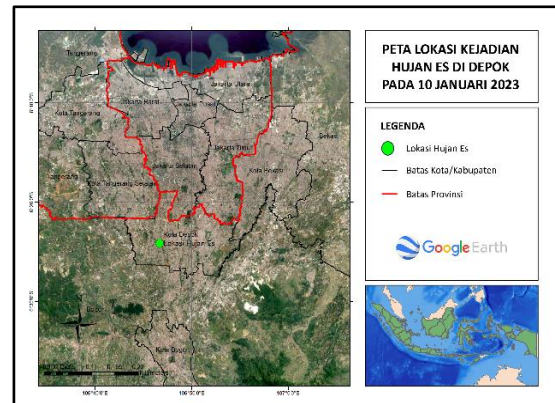
Sifat lokal dari hujan es dengan distribusi spasial dan temporal yang tidak merata menyebabkan hujan es sulit diprediksi dengan akurat [12]. Analisis hujan es membutuhkan pendekatan ilmiah dengan beberapa data seperti observasi permukaan, data satelit, radar cuaca dan model numerik agar memungkinkan identifikasi pembentukan hujan es [13]. Parameter meteorologi seperti suhu permukaan, kelembaban udara, labilitas atmosfer, konvergensi serta profil vertikal suhu menjadi beberapa parameter yang memiliki kaitan dengan kejadian hujan es [14], [15].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis fenomena hujan es dengan fokus pada faktor-faktor meteorologi yang mempengaruhi pembentukan awan cumulonimbus serta labilitas atmosfer yang berperan dalam terbentuknya es di dalam awan. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter meteorologi saat terjadinya hujan es

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah Depok, Jawa Barat, Indonesia, dengan koordinat -6.402905, 106.778419, seperti pada Gambar 1. Waktu penelitian difokuskan pada periode 07 UTC hingga 12 UTC pada tanggal 10 Januari 2023, yang mencakup rentang waktu pertumbuhan awan konvektif dari awal tumbuh hingga luruh.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data

Citra satelit Himawari 9 dan Model numerik *Global Spectral Model* (GSM) digunakan untuk menganalisis fenomena awan konvektif dengan memanfaatkan beberapa kanal seperti Tabel 1. Data tersebut diperoleh dari *Japan Meteorological Agency* (JMA) [16], yang menyediakan data dan arsip untuk berbagai kebutuhan penelitian atmosfer.

Tabel 1. Data Saluran Satelit Himawari yang digunakan

Band	Saluran	Kategori	Wavelength (μm)	Resolusi Spasial
Band 2 (VS)	VS	Spektrum Tampak	0.51-0.88	1 km
Band 7 (MI)	MI	Inframerah Tengah	3.75-4.05	2 km
Band 8 (WV)	WV	Uap Air	6.05-7.05	2 km
Band 13 (IR)	IR	Inframerah	10.3-11.3	2 km
Band 15 (IR)	IR	Inframerah	12.4-13.3	2 km

Penelitian ini menggunakan data reanalisis ERA5, yang diproduksi oleh *Copernicus Climate Change Service* (C3S) di bawah naungan *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) [17]. Data ERA5 ini dapat diakses secara daring melalui *Climate Data Store* (CDS) pada tautan <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>.

Dengan data yang digunakan seperti terlampir pada Tabel 2.

Tabel 2. Data ECMWF Reanalisis (ERA 5) yang digunakan [17]

Parameter	Unit	Resolusi Spasial	Resolusi Temporal
<i>Divergensi</i>	s ⁻¹	0.25° (~25 km)	1 jam
<i>Vertical Velocity</i>	Pa/s	0.25° (~25 km)	1 jam
<i>Specific Ice Water Content</i>	kg/kg	0.25° (~25 km)	1 jam
<i>Relative Humidity</i>	%	0.25° (~25 km)	1 jam
<i>U-wind Component</i>	m/s	0.25° (~25 km)	1 jam
<i>V-wind Component</i>	m/s	0.25° (~25 km)	1 jam

Data *sounding upper air* yang diambil dari *Wyoming University* melalui tautan <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.htm> 1, pada lokasi stasiun meteorologi Soekarno-Hatta (kode stasiun 96749, WII Jakarta) pada tanggal 10 Januari 2023, digunakan untuk menganalisis kondisi atmosfer vertikal. Pengamatan dilakukan pada dua waktu, yaitu pukul 00 UTC dan 12 UTC.

Metode

Data citra satelit Himawari 9 dilakukan interpretasi menggunakan perangkat lunak SATAID. SATAID (*Satellite Animation and Interactive Diagnosis*) adalah aplikasi yang dikembangkan oleh *Japan Meteorological Agency* (JMA) untuk analisis data satelit meteorologi secara interaktif. Aplikasi ini digunakan oleh peneliti dan praktisi meteorologi untuk memvisualisasikan, menganalisis, dan memantau kondisi atmosfer [16].

Metode RGB (Red-Green-Blue) pada satelit Himawari digunakan untuk visualisasi fenomena cuaca tertentu, seperti badai konvektif siang hari (*Day Convective Storms*) dan mikrofisika awan selama 24 jam (*24-hour Microphysics*).

Untuk *Day Convective Storms* digunakan untuk mengidentifikasi awan konvektif dengan arus naik yang kuat pada siang hari. Dengan konfigurasi menurut Shimizu A (2020).

Tabel 3. Konfigurasi composite imagery Day convective Storms [18]

Day Convective Storm				
Bands	Wavelength (μm)	Min [K/%]	Max [K/%]	Gamma
R B10-B08	7.3-6.2	-5.0K	36.0K	1
G B13-B07	10.4-3.9	-1.0K	61.0K	0.5
B B03-B05	0.64-1.6	-80%	26%	0.95

24-hour Microphysics untuk digunakan untuk menganalisis awan pada siang dan malam hari. Dengan konfigurasi berdasarkan Tabel 4.

Tabel 4. Konfigurasi composite imagery 24-hours microphysics [18]

24 Hours Microphysics					
	Bands	Wavelength (μm)	Min [K/%]	Max [K/%]	Gamma
R	B13-B15	10.4-12.4	-3.0K	7.5K	1
G	B11-B13	8.6-10.4	0.8K	5.8K	1.3
	/B11-B14	/8.6-11.2	-0.4K	6.1K	1.1
B	B13	10.4	248.6K	6.1K	1

Pengolahan data ERA 5 dilakukan menggunakan perangkat lunak GrADS. Data atmosfer berupa divergensi, kecepatan vertikal (*vertical velocity*), *specific ice water content*, dan kelembapan relatif (*relative humidity*) diinterpretasikan menjadi grafik *timeseries* menggunakan GrADS, dimana nilai masing-masing variabel diekstrak dari koordinat lokasi kejadian [19].

Data *sounding upper air* dari *Wyoming University* divisualisasikan dalam diagram Skew-T log-P untuk menunjukkan profil vertikal suhu, kelembapan, dan kecepatan angin di atmosfer. Diagram ini memberikan informasi tentang labilitas atmosfer, keberadaan inversi suhu, lapisan jenuh, dan potensi konveksi pada tanggal tersebut, yang penting untuk memahami dinamika cuaca [20].

Data labilitas atmosfer dibandingkan dengan hasil penelitian dan ambang batas dari Wirjohamidjojo dan Swarinoto (2014), Prasetyo dkk. (2020), dan Fibriantika dan Mayangwulan (2020) pada Tabel 3.

Tabel 5. Indeks labilitas atmosfer [21], [22], [23]

Indeks	Lemah	Moderate	Kuat
TT Indeks	< 42	42 - 46	> 46
K Indeks	< 29	29 - 37	> 37
SWEAT	< 135	135 - 239	> 239
CAPE	< 1000	1000 - 2500	> 2500
LI Indeks	> -2	-2 s/d -6	< -6
Showalter Indeks	> 4	4 s/d -4	< -4

dengan persamaan masing-masing indeks labilitas sebagai berikut

$$TT\ Indeks = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - T_{d500}) \quad (1)$$

$$K\ Indeks = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (2)$$

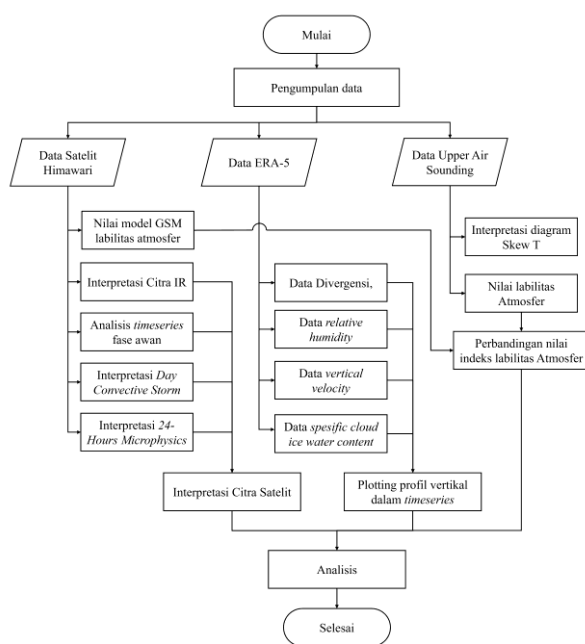
$$SWEAT = 20 (TTI - 49) + 12 T_{d1} + 2f_1 + f_2 + 125(\sin \alpha + 0.2) \quad (3)$$

$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \left(\frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} \right) dz \quad (4)$$

$$LI\ Indeks = T_{env} - T_{lift} \quad (5)$$

$$\text{Showalter Indeks} = T_{500\ hPa} - T_{850\ hPa-500\ hPa} \quad (6)$$

Metode pada penelitian kali ini dijelaskan dengan diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

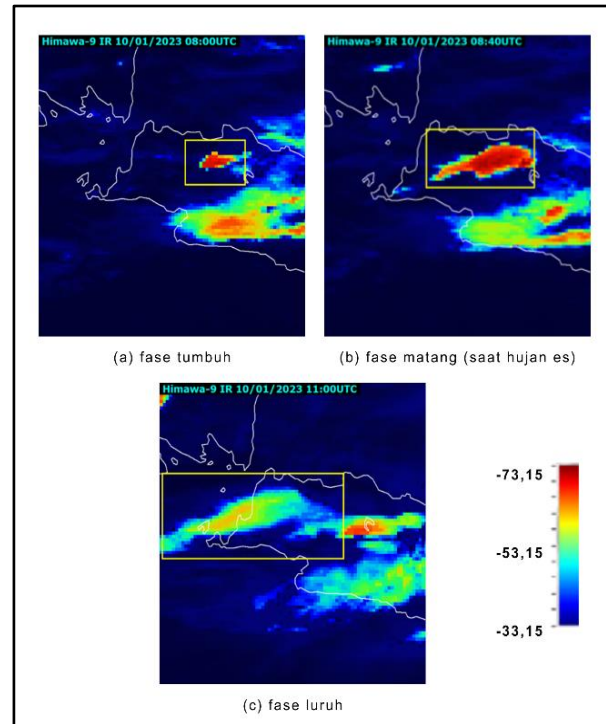
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Interpretasi Inframerah Satelit Himawari

Interpretasi citra IR dari satelit Himawari-9 pada Gambar 3 merupakan tiga fase ini siklus hidup awan cumulonimbus selama kejadian hujan es di Depok pada 10 Januari 2023. Dengan gambar (a) Fase Tumbuh (08:00 UTC), gambar (b) Fase Matang (08:40 UTC) dan gambar (c) Fase Luruh (11:00 UTC).

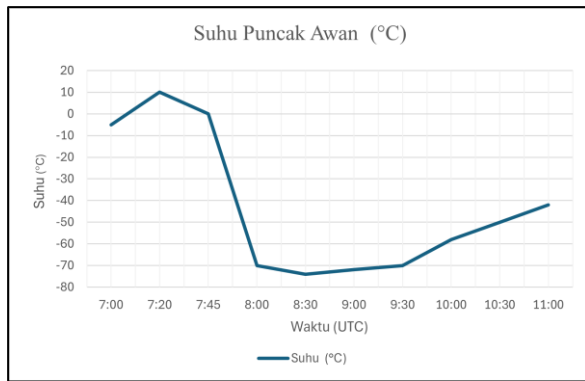
Pada fase tumbuh, citra menunjukkan awal pembentukan sel awan konvektif yang ditandai oleh area dengan warna kuning hingga oranye. Mengindikasikan bahwa awan mulai berkembang ke arah vertikal dengan puncak awan yang dingin. Pada fase matang, citra IR

memperlihatkan intensifikasi aktivitas sel awan konvektif. Warna merah pekat mendominasi, area awan cumulonimbus menunjukkan suhu puncak awan yang rendah. Pada fase luruh, aktivitas konvektif mulai melemah, yang terlihat dari menurunnya suhu puncak awan dari sel awan cumulonimbus.



Gambar 3. Interpretasi Citra IR (a) saat sel awan konvektif mulai terbentuk, (b) saat terjadi hujan es dan (c) saat sel awan konvektif mulai luruh

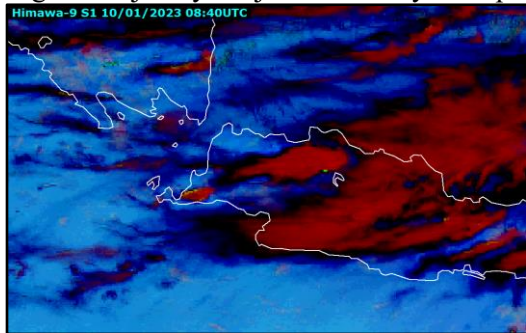
Pada Gambar 4. Menunjukkan data *timeseries* suhu puncak awan di Depok dari pukul 07.00 UTC – 11.00 UTC. Aktivitas vertikal yang tinggi pada awan cumulonimbus fase pertumbuhan yang cepat sekitar pukul 07.30 UTC hingga mencapai puncaknya di sekitar pukul 08:00 dan berlanjut hingga pukul 09:30 UTC bertepatan dengan waktu kejadian hujan es di Depok pada pukul 08.40 UTC, menunjukkan penurunan suhu puncak awan hingga di bawah -60°C menunjukkan bahwa puncak awan telah mencapai ketinggian di mana suhu atmosfer berada di bawah titik beku, sehingga memungkinkan terbentuknya partikel es.



Gambar 4. Timeseries suhu puncak awan di Depok

Berdasarkan citra *composite 24-Hours microphysics* Himawari dalam Gambar 5, wilayah Depok terlihat didominasi oleh warna merah gelap (#930000) pada Tabel 6, yang menunjukkan keberadaan awan tebal, tinggi, dan dingin, sesuai dengan klasifikasi pada tabel interpretasi. Awan jenis ini merupakan ciri khas dari awan yang terbentuk pada ketinggian yang sangat tinggi dengan suhu puncak awan yang rendah.

Awan es yang tebal dan tinggi dapat terbentuk pada sistem cuaca yang sangat aktif, seperti badai petir atau cumulonimbus. Awan jenis ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan hujan deras, angin kencang, dan bahkan hujan es jika terdapat kondisi atmosfer yang mendukung. Oleh karena itu pada pukul 08.40 UTC, ditemukan indikasi yang kuat mengenai terjadinya hujan es di wilayah Depok.



Gambar 5. Himawari-8 RGB composite imagery 24-Hours Microphysics

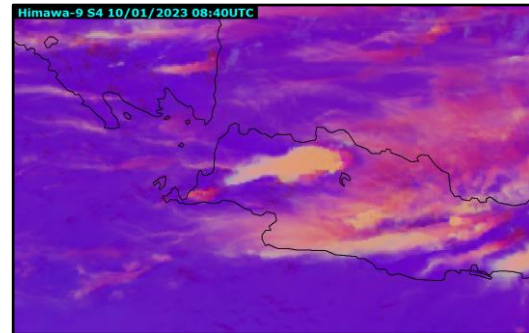
Tabel 6. Interpretasi warna metode 24-Hours Microphysics

Color	Interpretation	RGB Value	HTML
Dark Red	Thick, high and cold ice clouds	147,0,0	#930000
Light Red	Thick water clouds	157,99,40	#9D6328
Green	Clouds with small particles	32,180,125	#20B47D
Black	Thin cirrus clouds	0,0,0	#000000
Pink	Dust (Yellow sand)	255,0,146	#FF0092
Light Blue	Sands with quartz mineral	207,239,239	#CFEDEF

Pada citra *composite Day Convective Storm* Himawari pukul 08.40 UTC pada Gambar 6, wilayah Depok didominasi oleh warna kuning

(#FFFF64) seperti padapada Tabel 7 dengan sedikit warna merah pada sel awan cumulonimbus tersebut.

Warna kuning menunjukkan keberadaan awan cumulonimbus (Cb) dengan partikel es kecil yang mengalami arus naik kuat. Awan ini berpotensi menghasilkan fenomena cuaca ekstrem, termasuk hujan es dan petir. Sementara itu, warna merah menunjukkan adanya awan hujan dalam dengan partikel es besar di lapisan atas atmosfer.



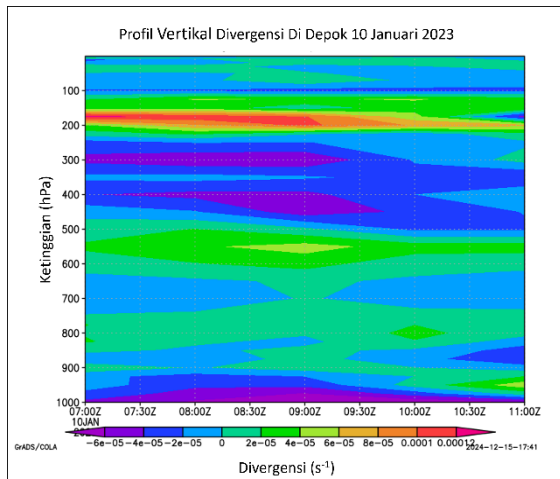
Gambar 6. Himawari-8 RGB composite imagery Day Convective Storm

Tabel 7. Interpretasi warna metode Day Convective Storm

Color	Interpretation	RGB Value	HTML
Dark Red	Deep precipitating cloud (precip. not necessarily reaching the ground) - high-level cloud, large ice particles	225,38,14	#E1260E
Yellow	Deep precipitating cloud (Cb cloud with strong updrafts and severe weather)* - high-level cloud, small ice particles *or thick, high-level lee cloudiness with small ice particles	255,255,100	#FFFF64
Light Red	Thin Cirrus cloud (large ice particles)	170,40,90	#AA285A
Light Red	Thin Cirrus cloud (small ice particles)	170,60,175	#AA3CAF
Blue	Ocean	60,0,170	#3C00AA
Green	Land	86,6,255	#5606FF

Analisis Profil Vertikal Parameter Meteorologi Data Model ERA 5

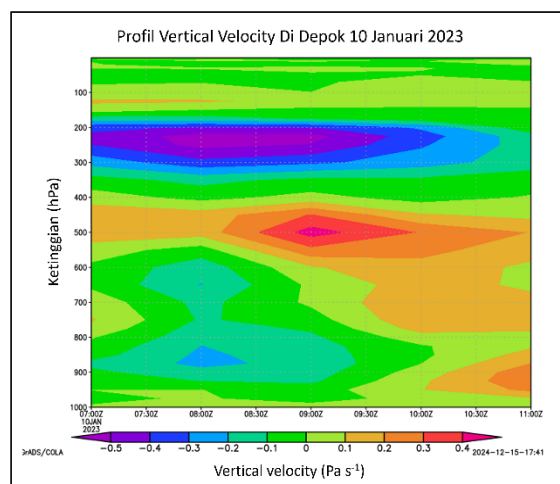
Pada Gambar 7. menginterpretasikan profil vertikal divergensi menunjukkan pola konvergensi yang signifikan di lapisan atmosfer bawah hingga menengah (sekitar 800–400 hPa) pada pukul 08.40 UTC. Konvergensi udara di lapisan ini mendukung peningkatan massa udara ke atas, yang memperkuat proses konveksi. Pada lapisan atas (200–100 hPa), terdapat pola divergensi yang kuat, menunjukkan keluarnya massa udara dari puncak awan cumulonimbus. Konvergensi di lapisan bawah dan divergensi di lapisan atas menciptakan kondisi ideal untuk pertumbuhan awan konvektif intensif. Kombinasi ini mendukung pembentukan awan cumulonimbus yang besar, yang berpotensi menghasilkan hujan es di wilayah Depok.



Gambar 7. Profil vertikal divergensi saat kejadian hujan es

Berdasarkan grafik profil kecepatan vertikal (vertical velocity) di Depok pada tanggal 10 Januari 2023, terlihat adanya pola dinamika vertikal atmosfer yang signifikan di beberapa lapisan pada rentang waktu 07.00 hingga 11.00 WIB.

Pada waktu kejadian hujan es, yaitu sekitar pukul 08.40 WIB, profil menunjukkan adanya nilai kecepatan vertikal negatif yang kuat pada lapisan 500–300 hPa. Nilai kecepatan vertikal negatif ini mengindikasikan adanya pengangkatan massa udara secara intensif. Profil kecepatan vertikal yang menunjukkan nilai negatif yang dominan pada lapisan tengah hingga atas atmosfer secara langsung mendukung aktivitas konveksi intensif yang berujung pada pembentukan hujan es di Depok pada pukul 08.40 WIB, 10 Januari 2023.

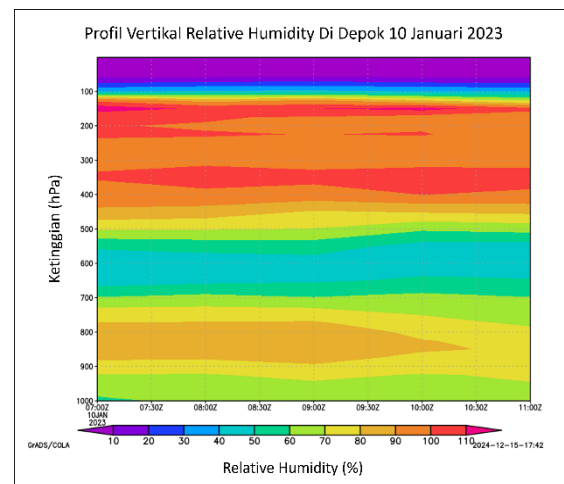


Gambar 8. Profil *vertical velocity* saat kejadian hujan es

Hasil analisis relative humidity seperti pada Gambar 9. Pada ketinggian 300–500 hPa ditemukan kelembaban relatif sebesar 70–90%,

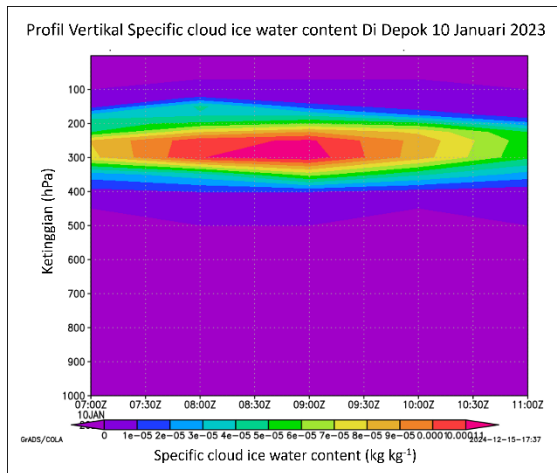
yang menunjukkan saturasi parsial dan mendukung pembentukan awan. Di atas 200 hPa, kelembaban relatif melebihi 90%, mengindikasikan kemungkinan terbentuknya awan yang dapat mendukung proses pembekuan partikel air. Sebaliknya, di lapisan bawah (700–900 hPa) kelembaban relatif lebih rendah, berkisar 40–60%, yang mendukung proses evaporasi dan pendinginan lokal, berkontribusi pada pembentukan butiran es saat terjadi konveksi kuat.

Gradien kelembaban yang signifikan antara lapisan atas dan bawah mencerminkan ketidakstabilan atmosfer yang memicu konveksi. Peningkatan kelembaban tajam di lapisan menengah (400–600 hPa) pada pukul 08.00–09.00 UTC memperkuat potensi pertumbuhan awan cumulonimbus yang mendukung terjadinya hujan es.



Gambar 9. Profil vertikal *relative humidity* saat kejadian hujan es

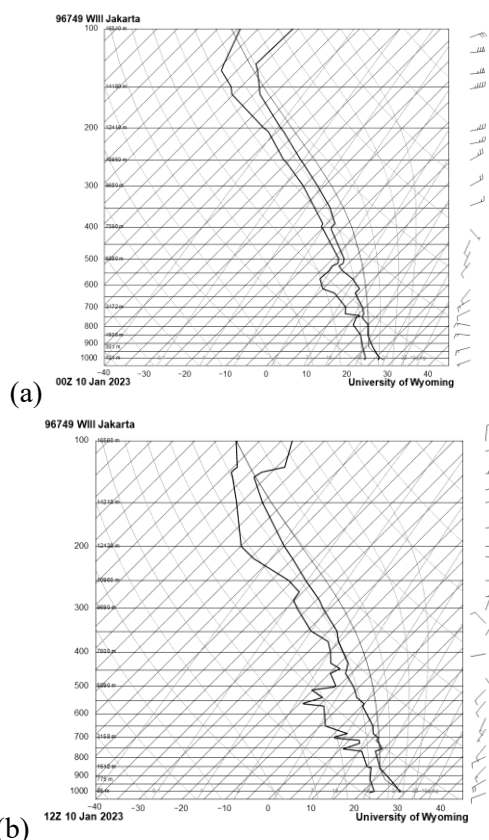
Analisis kandungan es awan menunjukkan bahwa konsentrasi tertinggi terletak di sekitar 300–400 hPa, dengan nilai maksimum mencapai 1.0×10^{-3} kg/kg sekitar pukul 08.00 UTC hingga 09.00 UTC. Konsentrasi ini menunjukkan adanya kristal es yang signifikan pada lapisan tersebut dan sesuai pada waktu kejadian hujan es di Depok pukul 08.40 UTC, memperkuat indikasi proses pembentukan hujan es melalui pengangkatan dan pembekuan di puncak awan konvektif.



Gambar 10. Profil vertikal *specific cloud ice water content* saat kejadian hujan es

Konsentrasi ini menunjukkan adanya kristal es yang signifikan pada lapisan tersebut, memperkuat indikasi proses pembentukan hujan es melalui pengangkatan dan pembekuan di puncak awan konvektif.

Analisis Labilitas Atmosfer Berdasarkan Data Model GSM dan Data Pengamatan Udara Atas Di Jakarta



Gambar 11. Diagram Skew-T dari pengamatan Upper Air Di Jakarta (a) pukul 00 UTC dan (b) pukul 12 UTC

Pada pukul 00Z, profil atmosfer menunjukkan kelembaban relatif yang cukup tinggi di lapisan menengah (300–500 hPa) dengan suhu yang mendekati titik beku. Lapisan ini menjadi kunci dalam proses pembentukan kristal es di awan. Selain itu, di lapisan bawah (700–900 hPa), kelembaban relatif yang lebih rendah mendukung proses evaporasi yang mendinginkan udara dan memperkuat ketidakstabilan lokal.

Pada pukul 12Z, terjadi peningkatan pemanasan di lapisan bawah, yang memperkuat ketidakstabilan atmosfer. Nilai CAPE (Convective Available Potential Energy) yang meningkat menunjukkan akumulasi energi yang cukup besar untuk memicu konveksi kuat. Gradien suhu yang tajam di lapisan menengah memperkuat proses konveksi, memungkinkan butiran air terdorong ke ketinggian yang lebih dingin dan membeku menjadi kristal es. Perubahan kondisi atmosfer dari 00Z ke 12Z menegaskan adanya ketidakstabilan yang mendukung terbentuknya awan cumulonimbus dengan updraft yang kuat. Struktur vertikal atmosfer ini berperan dalam menciptakan lingkungan yang kondusif untuk pembentukan es di awan dan presipitasi berbentuk hujan es.

Tabel 8. Indeks labilitas atmosfer data model GSM Himawari dan Observasi radiosonde Stasiun Meteorologi Soekarno Hatta

Indeks Labilitas Atmosfer		Nilai	Stabilitas
TT	GSM Himawari	44.4	Moderate
	Obs 00 UTC	47.3	
	Obs 12 UTC	46.8	
KI	GSM Himawari	33	Moderate
	Obs 00 UTC	36.4	
	Obs 12 UTC	30.3	
SWEAT	GSM Himawari	217	Moderate
	Obs 00 UTC	234.8	
	Obs 12 UTC	218.79	
CAPE	GSM Himawari	944	Moderate
	Obs 00 UTC	1510.74	
	Obs 12 UTC	1731.68	
LI	GSM Himawari	-3.2	Moderate
	Obs 00 UTC	-4.1	
	Obs 12 UTC	-4.48	
Showalter Indeks	Obs 00 UTC	-2.07	Moderate
	Obs 12 UTC	-1.55	

Kejadian hujan es di Depok pada 10 Januari 2023 pukul 08.40 WIB dapat dijelaskan melalui analisis parameter atmosfer yang menunjukkan tingkat ketidakstabilan signifikan. Total Totals Index (TT) berada pada kategori Moderate dengan nilai 44.4–47.3, mengindikasikan potensi konveksi sedang hingga kuat. *K-Index* (KI) juga berada pada kategori Moderate (33–36.4), mencerminkan kelembaban cukup di lapisan menengah. Nilai *Severe Weather Threat Index* (SWEAT) mencapai 234.8, menunjukkan adanya potensi cuaca buruk meskipun dalam kategori Lemah hingga Moderate. Selain itu, *Convective Available Potential Energy* (CAPE) yang sangat tinggi (1731.68 J/kg) dan *Lifted Index* (LI) negatif (-4.8) menguatkan adanya ketidakstabilan atmosfer dan energi konvektif besar yang mendukung pembentukan awan cumulonimbus. *Showalter Index* (SI) juga berada dalam kategori Moderate (-2.0 hingga -1.55), menambah bukti kuat akan ketidakstabilan atmosfer. Parameter-parameter ini secara kolektif menunjukkan kondisi atmosfer yang sangat mendukung konveksi kuat, dinamika vertikal yang intens, dan pembentukan awan cumulonimbus yang menghasilkan hujan es. Analisis ini menegaskan pentingnya pemantauan parameter atmosfer untuk meningkatkan prediksi cuaca ekstrem di wilayah tropis.

KESIMPULAN

Kejadian hujan es di Depok pada 10 Januari 2023 pukul 08.40 UTC merupakan hasil dari kombinasi faktor-faktor atmosfer yang menunjukkan ketidakstabilan yang signifikan. Analisis citra IR Himawari-9 dan RGB composite imagery menunjukkan siklus hidup awan cumulonimbus dengan suhu puncak di bawah -60°C, keberadaan partikel es, serta potensi presipitasi es. Profil vertikal ERA-5 mengindikasikan konvergensi kuat, kelembaban tinggi di lapisan menengah dan atas, serta dinamika vertikal udara yang mendukung pembentukan kristal es. Nilai indeks labilitas atmosfer (TT, KI, SWEAT, CAPE, LI, dan Showalter Index) menunjukkan ketidakstabilan atmosfer dan terdapat energi konvektif, yang memicu pembentukan awan cumulonimbus aktif. Secara keseluruhan, kombinasi faktor termodinamika, dinamika atmosfer, dan kondisi mikrofisika awan mendukung pembentukan hujan es pada waktu tersebut

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika dan rekan-rekan, atas dukungan yang diberikan. Serta kepada rekan-rekan yang telah membantu dan mendukung penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Tjasyono, “Klimatologi,” 2004, Bandung: ITB.
- [2] B. H. K. Tjasyono, S. W. B. Harijono, and B. Sri Woro, “Atmosfer Ekuatorial,” Puslitbang, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2013.
- [3] W. Sulistiyono, R. S. Ramadhan, and Y. Donni, “Kajian Kondisi Atmosfer Saat Kejadian Hujan Lebat Di Kota Surakarta Menggunakan Analisis Skala Meteorologi,” *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, vol. 7, no. 1, pp. 32–45, Jun. 2023, doi: 10.37478/optika.v7i1.2626.
- [4] S. W. Borland et al., “The structure and mechanisms of hailstorms,” *Hail: A review of hail science and hail suppression*, pp. 1–47, 1977.
- [5] A. Ali and U. Saâ, “Implementasi Metode Deteksi Hujan Es Berbasis Data Radar Cuaca Menggunakan Algoritma Severe Hail Index (SHI),” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 11, no. 3, pp. 380–386, 2022.
- [6] D. Ardiansyah, “Labilitas Atmosfer Terkait Kejadian Hujan Es (Studi Kasus Hujan Es Di Sindang Dataran Bengkulu Tanggal 25 Juni 2021),” *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, vol. 2, no. 2, pp. 34–48, 2022.
- [7] A. Irwan, “Analisa Respon Mekanik Genteng Dari Bahan Beton Busa Diperkuat Serat Tkks Akibat Beban Impak Hujan Es Dengan Menggunakan Impactor Batang Aluminium,” *Journal Of Mechanical Engineering Manufactures Materials And Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 57–63, 2019.
- [8] R. L. Lucy and S. E. Petty, “Hail Damage Assessments to Low-Sloped Roof Systems,” in *Forensic Engineering*, CRC Press, 2021, pp. 111–148.
- [9] M. Battaglia, C. Lee, W. Thomason, J. Fike, and A. Sadeghpour, “Hail Damage

- Impacts on Corn Productivity: A Review,” *Crop Sci*, vol. 59, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2019, doi: 10.2135/cropsci2018.04.0285.
- [10] K. Liu, P. Li, and Z. Wang, “Statistical modeling of random hail impact,” *Extreme Mech Lett*, vol. 48, p. 101374, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.eml.2021.101374.
- [11] T. Púček et al., “Large Hail Incidence and Its Economic and Societal Impacts across Europe,” *Mon Weather Rev*, vol. 147, no. 11, pp. 3901–3916, Nov. 2019, doi: 10.1175/MWR-D-19-0204.1.
- [12] F. Blasina, A. Echarri, G. Farber, F. Molina, S. Machín, and N. Pérez, “Implementation and evaluation of a hail-impact simulation device,” *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, no. 23, pp. 135–150, 2022.
- [13] Maulidianto, N. F. R. Tempo, and Yosafat Donni Haryanto, “Analisis Kondisi Atmosfer Saat Kejadian Hujan Es Menggunakan Data Observasi, Data Pemodelan Numerik, dan Data Satelit Cuaca (Studi Kasus: Kejadian Hujan Es di Wilayah Kapan, Kabupaten Timor Tengah Selatan Tanggal 29 November 2023),” *JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya*, vol. 11, no. 1, pp. 60–77, Aug. 2024, doi: 10.24252/jft.v11i1.45152.
- [14] E. Diniyati, D. Q. Syofyan, and A. Mulya, “Analisis Hujan Es di Kabupaten Ngawi Berdasarkan Citra Satelit Himawari-8 dan Data Reanalisis Copernicus ECMWF,” *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*, vol. 18, no. 2, pp. 69–75, Dec. 2021, doi: 10.15294/jg.v18i2.28010.
- [15] N. Ayasha, “Analisis Parameter Vertical Velocity dan Kaitannya dengan Kondisi Parameter Cuaca saat Kejadian Hujan ES (Vertical Velocity Parameter and Its Relationship with Weather Parameter Condition in the Hail Event),” *Buletin GAW Bariri*, vol. 3, pp. 17–24, Jun. 2022.
- [16] K. Bessho et al., “An introduction to Himawari-8/9—Japan’s new-generation geostationary meteorological satellites,” *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, vol. 94, no. 2, pp. 151–183, 2016.
- [17] H. Hersbach et al., “The ERA5 global reanalysis,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999–2049, Jul. 2020, doi: 10.1002/qj.3803.
- [18] A. Shimizu, “Introduction to Himawari-8 RGB composite imagery,” *Meteorological Satellite Center Technical Note*, vol. 65, p. 42, 2020.
- [19] F. Berman et al., “The GrADS Project: Software Support for High-Level Grid Application Development,” *Int J High Perform Comput Appl*, vol. 15, no. 4, pp. 327–344, Nov. 2001, doi: 10.1177/109434200101500401.
- [20] C. J. Nixon, J. T. Allen, and M. Taszarek, “Hodographs and Skew Ts of Hail-Producing Storms,” *Weather Forecast*, vol. 38, no. 11, pp. 2217–2236, Nov. 2023, doi: 10.1175/WAF-D-23-0031.1.
- [21] S. Wirjohamidjojo and Y. S. Swarinoto, “Indeks dan peredaran atmosfer tropik”. Puslitbang Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2014.
- [22] S. Prasetyo, I. Rumahorbo, U. Hidayat, and N. Sagita, “Analisis Kondisi Atmosfer pada Kejadian Hujan Es (Studi kasus: Bogor, 23 September 2020),” in *Seminar Nasional Kahuripan*, 2020, pp. 295–300.
- [23] E. Fibriantika and D. Mayangwulan, “Analisis Spasial Indeks Stabilitas Udara Di Indonesia,” *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, vol. 21, no. 1, pp. 1–12, 2020.

Kajian struktur morfologi, gugus fungsi, dan sifat adsorpsi dari karbon aktif kulit singkong (*manihot esculenta crantz*)

¹Siti Sarah Husna, ²Rahmawati*, ³Nirmala Sari, ⁴Fera Anisa

^{1,2,3}Program Studi Fisika Universitas Samudra
Kota Langsa, Aceh, Indonesia

⁴Program Studi Pendidikan Fisika UIN Ar-Raniry
Banda Aceh, Aceh, Indonesia

*rahmawati@unsam.ac.id

Abstrak – Kulit singkong (*Manihot esculenta* Crantz) merupakan limbah pertanian yang berpotensi tinggi sebagai bahan baku karbon aktif karena kandungan karbonnya yang tinggi dan keberadaan berbagai gugus fungsi aktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi temperatur karbonisasi terhadap struktur morfologi, gugus fungsi, dan sifat adsorpsi dari karbon aktif yang dihasilkan dari kulit singkong. Proses sintesis dilakukan melalui dua tahap utama: karbonisasi pada suhu 250°C, 300°C, dan 350°C, serta aktivasi kimia menggunakan larutan KOH 2% dan aktivasi fisika dengan pemanasan microwave. Karakterisasi dilakukan dengan metode SEM untuk mengamati morfologi, FTIR untuk identifikasi gugus fungsi, dan UV-VIS untuk mengukur daya adsorpsi. Hasil menunjukkan pada analisis morfologi bahwa suhu karbonisasi yang lebih tinggi meningkatkan pembentukan pori karena dekomposisi senyawa organik. Analisis gugus fungsi mengonfirmasi keberadaan ikatan O-H, C=C, C-H, dan C-O, yang menunjukkan komponen lignoselulosa dan hemiselulosa. Studi adsorpsi pada panjang gelombang 665 nm menunjukkan bahwa pemanasan berlebihan dapat menyebabkan degradasi struktural, sehingga mengurangi efisiensi adsorpsi. Peningkatan suhu karbonisasi secara umum dapat meningkatkan perkembangan pori dan luas permukaan, sehingga menaikkan kapasitas adsorpsi. Penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif dari kulit singkong berpotensi sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan dan efisien untuk aplikasi pemurnian.

Kata kunci: karbon aktif, morfologi, gugus fungsi, adsorpsi.

Abstract – Cassava peel (*Manihot esculenta* Crantz) is an agricultural waste that has high potential as a raw material for activated carbon due to its high carbon content and the presence of various active functional groups. This study aims to examine the effect of carbonization temperature variations on the morphological structure, functional groups, and adsorption properties of activated carbon produced from cassava peel. The synthesis process was carried out through two main stages: carbonization at temperatures of 250°C, 300°C, and 350°C, as well as chemical activation using 2% KOH solution and physical activation with microwave heating. Characterization was carried out using the SEM method to observe the morphology, FTIR to identify functional groups, and UV-VIS to measure the adsorption capacity. The results showed that the morphological analysis showed that higher carbonization temperatures increased pore formation due to the decomposition of organic compounds. Functional group analysis confirmed the presence of O-H, C=C, C-H, and C-O bonds, indicating lignocellulose and hemicellulose components. Adsorption studies at a wavelength of 665 nm showed that excessive heating could cause structural degradation, thereby reducing adsorption efficiency. Increasing the carbonization temperature can generally increase the pore development and surface area, thus increasing the adsorption capacity. This study shows that activated carbon from cassava peel has the potential as an environmentally friendly and efficient alternative adsorbent for purification applications.

Key words: activated carbon, morphology, functional groups, adsorption.

PENDAHULUAN

Singkong merupakan salah satu hasil produksi hasil pertanian pangan terbesar di Indonesia. Singkong atau ubi kayu itu sendiri merupakan salah satu bahan pangan pengganti beras yang memiliki peranan cukup penting dalam menopang ketahanan pangan di suatu wilayah. Hampir semua bagian dari tanaman singkong

bisa dimanfaatkan, mulai dari daging singkong, daun hingga batangnya. Daging singkong berwarna putih atau kekuning-kuningan dan dilapisi oleh kulit berwarna putih kemerahan dan kulit luar berwarna coklat [1]. Kulit singkong memiliki unsur karbon cukup banyak dan kemampuan untuk proses penyerapan ion logam karena mengandung protein, selulosa nonreduksi, dan serat kasar yang tinggi asam

sianida. Sehingga banyak terdapat gugus fungsi -OH, -NH₂, -SH, dan -CN yang digunakan sebagai ligan. Kandungan yang dimiliki kulit singkong tersebut dapat digunakan sebagai bahan untuk pembuatan karbon aktif [2], [3], [4], [5]. Karbon aktif adalah suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon dengan proses pemanasan pada suhu tinggi, dengan menggunakan gas, uap air dan bahan-bahan kimia sehingga pori-porinya terbuka. Karbon aktif merupakan karbon yang memiliki luas permukaan yang luas yang terdiri dari unsur karbon bebas dan masing-masing berikatan secara kovalen [6], [7], [8].

Pemanfaatan biomassa sebagai adsorben telah lama diteliti [8]. Limbah kulit singkong yang berasal dari industri keripik mengandung 59,31% karbon, sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan sebagai karbon aktif atau karbon aktif alami. Karakteristik karbon aktif yang berpori memiliki daya serap yang baik, maka dapat dimanfaatkan sebagai adsorben [9]. Sintesis karbon aktif melalui tahapan karbonisasi dan aktivasi. Proses aktivasi dapat dilakukan secara kimia yaitu dengan menggunakan bahan kimia sebagai aktivator agar membentuk karakteristik struktur pori, serta aktivasi melalui proses fisika yaitu dengan pemanasan menggunakan gelombang mikro. Pengalihan proses pemanasan melalui furnace menjadi pemanasan dengan gelombang mikro telah mulai digalakan dalam sintesis karbon aktif. Hal tersebut disebabkan dapat mengurangi pemakaian energi dan menghemat waktu karena pemanasan terjadi langsung pada biomassa dan aktivatornya. Paparan gelombang ultrasonik membentuk fenomena efek kavitasi yaitu tersintesisnya gelembung-gelembung, kemudian gelembung bertambah besar dan pecah serta memberikan tenaga besar sehingga terbentuk banyak pori [10], [11], [12].

Berdasarkan latar belakang diatas, penelitian ini akan dilakukan dengan variasi temperatur karbonisasi terhadap karakteristik karbon aktif Dari Kulit Singkong yang diaktivasi kimia dengan larutan KOH dan aktivasi fisika dengan menggunakan microwave. Selanjutnya dikarakterisasi dengan pengujian SEM, FTIR dan UV-VIS untuk mengetahui nilai karakterisasinya.

METODE PENELITIAN

Alat dan bahan utama yang digunakan untuk penelitian ini adalah oven, pH universal,

furnace, magnetic stirrer, mortar, ayakan 60 mesh, timbangan digital, hot plate, microwave, kertas saring, corong, gelas beaker, gelas ukur, erlenmeyer dan labu ukur 250 ml, kulit singkong, larutan KOH 2 %, alkohol 96% dan aquades. Kulit singkong yang diambil dibersihkan dahulu dari kotorannya, kemudian kulit singkong dicuci menggunakan air untuk menghilangkan kotoran yang tersisa, lalu kulit singkong dipotong-potong menjadi ukuran yang kecil. Setelah itu kulit singkong dikeringkan dengan menggunakan sinar matahari selama 5 hari. Kulit singkong yang telah kering, selanjutnya akan di proses melalui tahap karbonisasi menggunakan alat pemanas furnace dengan variasi temperatur 250°C, 300 °C, dan 350°C selama 1,5 jam. Lalu kulit singkong dihaluskan menggunakan mortar dan diayak dengan ayakan 60 mesh. Kemudian karbon aktif kulit singkong akan dilakukan aktivasi kimia dengan aktivator KOH dan aktivasi fisika melalui pemanasan microwave. Karbon aktif kulit singkong yang telah dimicrowave akan dinetralisasi untuk menetralkan pH menjadi 7. Kemudian karbon aktif kulit singkong diovenkan dengan suhu 110°C selama 2 jam untuk mengkeringkan karbon aktif kulit singkong [13]. Selanjutnya dilakukan karakterisasi SEM, FTIR dan UV-VIS sampel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Kadar Abu dan Zat Terbang

Nilai kadar abu mencerminkan sisa material anorganik yang tidak terbakar selama proses karbonisasi, yang terdiri dari mineral seperti silika, oksida logam, dan senyawa lainnya. Berdasarkan hasil penelitian, kadar abu berkisar antara 13,64% hingga 43,67%, di mana kadar abu semakin rendah dengan meningkatnya suhu pemanasan. Hal ini karena pada suhu tinggi, bahan organik dalam kulit singkong lebih banyak terbakar, menghasilkan karbon aktif dengan kandungan abu yang lebih sedikit. Penurunan kadar abu ini juga dilaporkan oleh Wahyuni dkk. (2022), yang menemukan bahwa karbonisasi bambu buluh pada suhu tinggi menghasilkan karbon aktif dengan kadar abu lebih rendah dan kualitas adsorpsi yang lebih baik [14]. Kadar abu yang rendah penting untuk kualitas karbon aktif karena kadar abu yang tinggi dapat menurunkan efisiensi adsorpsi zat dalam aplikasi seperti pemurnian air atau udara.

Kadar zat terbang menunjukkan persentase senyawa organik volatil yang dilepaskan selama proses karbonisasi. Penelitian menunjukkan kadar zat terbang pada karbon aktif dari kulit singkong berkisar antara 57,40% hingga 86,36%. Semakin tinggi suhu pemanasan, semakin besar kadar zat terbang yang dilepaskan, karena senyawa volatil seperti air, lemak, dan senyawa karbon organik mudah menguap pada suhu tinggi. Hal ini sejalan dengan temuan Khotimah dkk. (2024) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu aktivasi fisika menyebabkan senyawa volatil lebih mudah terurai sehingga menghasilkan karbon aktif yang lebih stabil [15]. Kadar zat terbang yang rendah dalam karbon aktif menandakan bahwa bahan karbon telah stabil dan memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik.

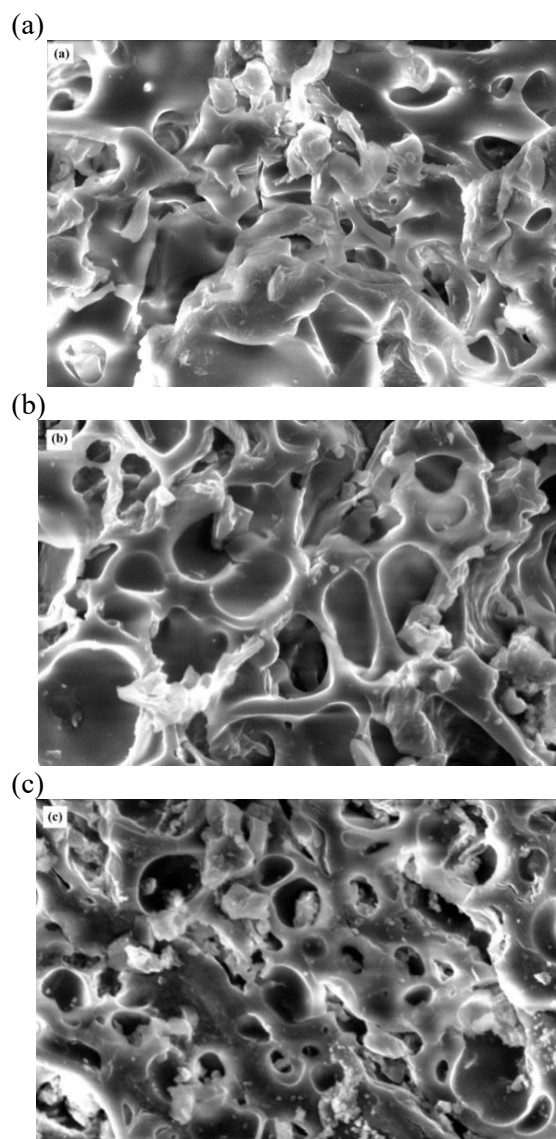
Proses karbonisasi memegang peran penting dalam menentukan kualitas karbon aktif. Suhu tinggi tidak hanya menurunkan kadar abu tetapi juga meningkatkan struktur pori pada karbon aktif, yang merupakan karakteristik utama dalam aplikasi adsorpsi. Namun, jika suhu terlalu tinggi, dapat menyebabkan kerusakan struktur karbon yang justru mengurangi efisiensi adsorpsi.

Analisis Karakterisasi Morfologi SEM

Pada suhu karbonisasi rendah 250°C ditunjukkan pada gambar 1(a), struktur pori pada karbon aktif belum terbentuk secara optimal. Hal ini disebabkan oleh dekomposisi senyawa organik seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang masih terbatas. Pori yang terlihat lebih kecil, dengan distribusi yang tidak seragam, menunjukkan awal pembentukan mikropori. Aktivasi kimia menggunakan KOH 2% membantu membuka struktur, tetapi efeknya terbatas pada suhu karbonisasi rendah. menunjukkan bahwa karbonisasi pada suhu rendah menghasilkan karbon dengan pori yang kurang berkembang dibandingkan suhu lebih tinggi [6], [16]. Hal serupa juga dikemukakan oleh Perdani et al. (2021), yang melaporkan bahwa karbon aktif dari kulit singkong yang dikarbonisasi pada suhu rendah memiliki struktur pori yang tidak merata dan luas permukaan yang rendah[5].

Kenaikan suhu karbonisasi menjadi 300°C, terjadi proses dekomposisi bahan organik meningkat, sehingga pori-pori mulai terbentuk lebih jelas. Pori yang lebih besar mulai muncul seperti terlihat pada gambar 1(b). Hal ini

menandakan terjadi transisi menuju pengembangan mesopori. Aktivasi fisika menggunakan microwave selama 10 menit meningkatkan energi termal, mempercepat reaksi antara karbon dan KOH, yang berkontribusi terhadap struktur pori yang lebih berkembang[6]. Hasil penelitian Gil dkk. (2019) juga menyatakan bahwa pemanasan microwave pada proses aktivasi karbon menghasilkan porositas yang lebih besar dan struktur internal yang lebih seragam, mendukung efisiensi adsorpsi [11].



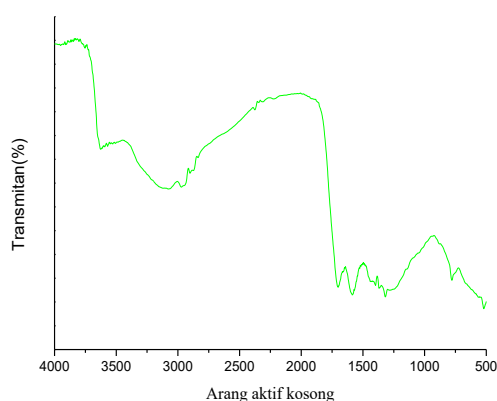
Gambar 1. Hasil analisis SEM pada pembesaran 5000x (a) Suhu 250°C, (b) Suhu 300°C, dan (c) Suhu 350°C.

Pada suhu 350°C, struktur pori terlihat paling berkembang dengan kombinasi mikropori dan mesopori yang lebih besar. Aktivasi KOH berkontribusi pada peningkatan jumlah pori aktif melalui reaksi kimia yang membentuk

saluran dalam struktur karbon. Aktivasi fisik dengan microwave juga mempercepat proses aromatisasi, menghasilkan struktur berpori tinggi. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa karbonisasi pada suhu 350°C atau lebih tinggi, diikuti oleh aktivasi kimia dengan KOH, menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan yang besar, ideal untuk aplikasi adsorpsi [16]. Besarnya ukuran rongga pori dikarenakan adanya pengaruh panas saat proses pemanasan yang menyebabkan terjadinya proses penguraian senyawa organik. Sehingga semakin tinggi suhu pemanasan maka semakin banyak rongga yang akan terbentuk [14].

Analisis Karakterisasi Menggunakan Metode FTIR

Hasil analisis gugus fungsi FTIR dari karbon aktif yang diperoleh dari kulit singkong menunjukkan beberapa pita serapan yang dapat mengindikasikan keberadaan gugus fungsi tertentu seperti pada terlihat pada gambar 2. Pada bilangan gelombang 3464,15 cm^{-1} , terdeteksi adanya serapan yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi O-H, yang umumnya terkait dengan kelompok hidroksil, yang berfungsi dalam interaksi hidrogen dan kelembaban permukaan material [17]. Selanjutnya, pada bilangan gelombang 2972,31 cm^{-1} , terdapat serapan yang mengindikasikan adanya gugus fungsi C-H stretching, yang menunjukkan keberadaan kelompok alkil pada karbon aktif. Pada bilangan gelombang 2223,92 cm^{-1} , terdeteksi adanya serapan yang mengindikasikan gugus fungsi asetilen ($\text{C}\equiv\text{C}$), yang dapat menunjukkan adanya ikatan rangkap tiga yang berperan dalam proses adsorpsi molekul gas [18].

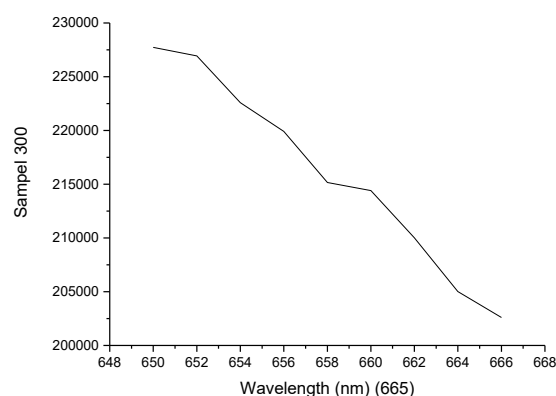


Gambar 2. Hasil analisis gugus fungsi FTIR karbon aktif kulit singkong.

Pada pita serapan bilangan gelombang 1664,57 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi $\text{C}=\text{C}$ stretching, yang berhubungan dengan adanya ikatan rangkap dua pada struktur karbon, yang memberikan sifat adsorptif pada permukaan karbon aktif. Selain itu, pada bilangan gelombang 1398,39 cm^{-1} , terdeteksi serapan gugus fungsi C-H bending, yang menunjukkan keberadaan ikatan C-H pada struktur hidrokarbon [18]. Terakhir, pada bilangan gelombang 1049,28 cm^{-1} , terdeteksi serapan yang mengindikasikan gugus fungsi C-O stretching, yang menunjukkan adanya gugus alkoksi atau fenol, yang berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap berbagai polutan atau bahan kimia tertentu [17]. Secara keseluruhan, analisis FTIR ini menunjukkan bahwa karbon aktif dari kulit singkong memiliki struktur kimia yang kaya akan gugus fungsi hidroksil, alkil, fenol, dan karbon rangkap, yang berkontribusi pada peningkatan kapasitas adsorpsinya.

Analisis Karakterisasi Menggunakan Metode UV-VIS

Daya serap yang dihasilkan pada UV-VIS dengan panjang gelombang 665 nm pada karbon aktif seperti pada gambar 3 dikarbonisasikan pada suhu 300°C berkisaran antara 0,3073, 1,0489, dan 0,0606.



Gambar 3. Hasil analisis UV-VIS dengan panjang gelombang 665 nm.

Kapasitas tinggi rendahnya daya serap karbon aktif terhadap menunjukkan banyaknya diameter pori pada karbon aktif. Karbon aktif dengan kemampuan menyerap iodnya tinggi berarti memiliki luas permukaan yang lebih besar dan juga memiliki struktur mikro dan mesoporous yang lebih besar. Rendahnya daya

serap karbon aktif dapat disebabkan oleh kerusakan atau erosi dinding pori karbon dan juga menggambarkan sedikitnya struktur mikropori yang terbentuk dan kurang dalam [15]. Semakin tinggi suhu karbonisasi maka semakin luas permukaan karbon aktif, sehingga daya adsorpsinya juga besar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pada kadar zat abu yang terkandung pada karbon aktif pada suhu 250 °C, 300 °C, 350 °C yaitu semakin tinggi pemanasan yang dilakukan maka semakin sedikit kadar abu yang dihasilkan. Sifat fisis kadar zat terbang yang dihasilkan adalah untuk mengetahui seberapa besar permukaan karbon aktif mengandung zat lain selain karbon sehingga mempengaruhi daya serapnya. Semakin tinggi suhu pemanasan yang dikarbonisasikan pada kadar zat terbang maka semakin besar pula kadar yang dihasilkan. Morfologi permukaan karbon aktif menunjukkan bahwa besarnya ukuran rongga pori dikarenakan adanya pengaruh panas saat proses pemanasan yang menyebabkan terjadinya proses penguraian senyawa organik. Sehingga semakin tinggi suhu pemanasan maka semakin banyak rongga yang akan terbentuk. Pada uji FTIR karbon aktif yang dibuat dari bahan baku kulit singkong teridentifikasi memiliki gugus fungsi O-H, C=C, C-H, dan C-O yang menunjukkan adanya kandungan lignoselulosa dan hemiselulosa. Penentuan zat penyerap adsorben menggunakan panjang gelombang 665 nm yaitu rendahnya daya serap karbon aktif dapat disebabkan oleh kerusakan atau erosi dinding pori karbon dan juga menggambarkan sedikitnya struktur mikropori yang terbentuk dan kurang dalam. Semakin tinggi suhu karbonisasi maka semakin luas permukaan karbon aktif, sehingga daya adsorpsinya juga besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Y. Purwaningsih, A. Budianto, A. A. Ningrum, and B. T. Kosagi, "Produksi Karbon Aktif Dari Kulit Singkong Dengan Aktivasi Kimia Fisika Menggunakan Gelombang Mikro", 2019.
- [2] I. Sailah, F. Mulyaningsih, A. Ismayana, T. Puspaningrum, A. Annisa, dan N.S. Indrasti, "Kinerja Karbon Aktif Dari Kulit Singkong Dalam Menurunkan Konsentrasi Fosfat Pada Air Limbah Laundry", *J. Teknol. Ind. Pertan.*, pp. 180–189, Sep. 2020, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.2.180.
- [3] L. Maulinda, N. Za, and D. N. Sari, "Pemanfaatan Kulit Singkong sebagai Bahan Baku Karbon Aktif", p. 9, 2015.
- [4] D. R. Indah and F. Saumi, "Penerapan Teknologi Pada Pengolahan Arang Aktif Dari Limbah Kulit Singkong Sebagai Anti Bakteri Alami Pada Sabun Cair Pencuci Tangan", *Martabe: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, vol. 6, no. 10, 2023.
- [5] F. P. Perdani, C. A. Riyanto, and Y. Martono, "Karakterisasi Karbon Aktif Kulit Singkong (*Manihot esculenta* Crantz) Berdasarkan Variasi Konsentrasi H₃PO₄ dan Lama Waktu Aktivasi", *IJCA Indones. J. Chem. Anal.*, vol. 4, no. 2, pp. 72–81, Sep. 2021, doi: 10.20885/ijca.vol4.iss2.art4.
- [6] "Utilization of Activated Charcoal from Cassava Peel and Straw in Reducing Cadmium Levels in Putri Cempo Landfill Leachate | Hikari | Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan". Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/presipitasi/article/view/58823>
- [7] L. Z. Chen, D. X. Miao, X. J. Feng, and J. Z. Xu, "Preparation and Characterization of Activated Carbon from Reedy Grass Leaves by Chemical Activation with Koh", *Adv Mater Res*, vol. 881–883, p. 579, 2014.
- [8] D. Dondi and Dhanalakshmi Vadivel, "Preparation of Catalysts from Renewable and Waste Materials", *Catalysts*, 2020.
- [9] N. Febrianti, V. Mauliana, dan R. Yorika, "Pemanfaatan Kulit Singkong sebagai Adsorben dalam Menurunkan Kadar BOD, COD di Air Waduk Manggar Kota Balikpapan", *Al-Ard J. Tek. Lingkung.*, vol. 8, no. 2, pp. 101–107, Mar. 2023, doi: 10.29080/alard.v8i2.1743.
- [10] K. Teawon, L. Jaegeun, "Microwave heating of carbon-based solid materials", *Carbon Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 15–24, Jan. 2014, doi: 10.5714/CL.2014.15.1.015.

- [11] M. Gil, S. Pasieczna-Patkowska, and P. Nowicki, "Application of microwave heating in the preparation of functionalized activated carbons", *Adsorption*, vol. 25, no. 3, pp. 327–336, Apr. 2019, doi: 10.1007/s10450-019-00017-5.
- [12] J. A. Siregar, Nurlily, and Y. W. Sari, "The Impact of Mg Concentration, Microwave Irradiation Time, and Sintering on Magnesium-Hydroxyapatite Synthesis", *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1505, no. 1, p. 012059, Mar. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1505/1/012059.
- [13] R. Usman and P. Wahyuningsih, "Improving the quality of palm oil liquid waste using nanocomposite TiO₂/EPB activated carbon through adsorption-photodegradation", *J. Aceh Phys. Soc.*, vol. 11, no. 3, pp. 70–74, Aug. 2022, doi: 10.24815/jacps.v11i3.25626.
- [14] D. A. Wahyuni, M. Nurhanisa, A. Bahtiar, and R. Rutdiyanti, "Optimasi Sintesis Karbon Aktif dari Bambu Buluh (*Schizostachyum brachycladum*) dengan Variasi Suhu Karbonisasi untuk Penyerapan Besi pada Air Sumur Gambut", *J. Fis. Unand*, 2022, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250995284>
- [15] N. Khotimah, A. Martin, and E. Taer, "Pengaruh Temperatur Aktivasi Fisika Terhadap Daya Serap Iodium Karbon Aktif Berbahan Dasar Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate (PET)", *Turbo J. Program Studi Tek. Mesin*, vol. 13, no. 1, Jun. 2024, doi: 10.24127/trb.v13i1.3314.
- [16] W. Xuyu, S. Wang, X. Yin, J. Chen, and L. Zhu, "Activated Carbon Preparation from Cassava Residue Using a Two-Step KOH Activation: Preparation, Micropore Structure and Adsorption Capacity", *J. Biobased Mater. Bioenergy*, vol. 8, pp. 35–42, Feb. 2014, doi: 10.1166/jbmb.2014.1408.
- [17] V. A. Tiwow, M. J. Rampe, H. L. Rampe, dan A. Apita, "Pola Inframerah Arang Tempurung Kelapa Hasil Pemurnian Menggunakan Asam", *Chem. Prog.*, vol. 14, no. 2, p. 116, Nov. 2021, doi: 10.35799/cp.14.2.2021.37191.
- [18] V. A. Mentari, G. Handika, and S. Maulina, "Perbandingan Gugus Fungsi Dan Morfologi Permukaan Karbon Aktif dari Pelepah Kelapa Sawit Menggunakan Aktivator Asam Fosfat (H₃PO₄) dan Asam Nitrat (HNO₃)", *Talenta Conference Series: Science and Technology* vol. 7, no. 1, 2018.

Rancang bangun modul dual frequency DC to AC inverter berbasis Arduino UNO

Riris Yuninda, Hartono*, R. Farzand Abdullatif

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah Indonesia
*email: hartono0606@unsoed.ac.id

Abstrak - Inverter merupakan perangkat elektronik yang memiliki fungsi untuk mengubah arus DC menjadi AC. Inverter banyak diaplikasikan dalam instrumen elektronik dalam kehidupan sehari-hari, salah satunya dalam instrumen penelitian geolistrik metode Induced Polarization (IP) domain frekuensi. Metode IP domain frekuensi dilakukan dengan menginjeksikan tegangan dan arus AC dalam frekuensi rendah 1 Hz dan 10 Hz untuk meneliti kandungan mineral bawah tanah. Oleh karena itu, diperlukan sebuah modul untuk mengubah arus searah DC menjadi arus bolak-balik AC yang memiliki dua buah frekuensi keluaran 1 Hz dan 10 Hz. Penelitian ini menggunakan topologi H-Bridge Inverter, rangkaian driver IC IR2110 untuk mengubah arus searah DC menjadi arus AC dengan frekuensi keluaran sebesar 0,99 Hz dan 9,80 Hz. Uji pembebanan dilakukan dengan memberikan variasi beban resistif berupa resistor berukuran 2 k Ω -50 k Ω dan tegangan masukan 273 VDC. Saat frekuensi 0,99 Hz arus RMS maksimal yang terukur sebesar 0,132 A, dan daya maksimal 33,05 W dan terjadi penurunan tegangan sebesar 9% dengan bentuk gelombang berupa gelombang kotak tidak sempurna yang nilai amplitudonya berubah mengikuti nilai arus keluaran. Sedangkan pada frekuensi keluaran 9,80 Hz dengan tegangan masukan 273 VDC, terjadi penurunan tegangan sebesar 10% dengan bentuk respon gelombang berupa gelombang kotak, arus RMS maksimal sebesar 0,124 A, dan daya maksimum sebesar 30,56 W.

Kata Kunci: Inverter, Dual Frekuensi, Frekuensi Rendah, *Induced Polarization*, Domain Frekuensi

Abstract – An inverter is an electronic device that converts DC (Direct Current) into AC (Alternating Current). Inverters are widely used in electronic instruments and in daily life. One application of inverters is in geoelectrical instruments such as the frequency domain Induced Polarization (IP) method. The frequency domain IP method is performed by injecting AC current at low frequencies (1 Hz and 10 Hz) to examine underground mineral content. Therefore, a module is needed to convert DC (direct current) into AC (alternating current), with two output frequencies of 1 Hz and 10 Hz. This research uses H-Bridge inverter topology and driver circuit IC IR2110 to convert DC into AC with output frequencies of 0.99 Hz and 9.80 Hz. The loading test is conducted by providing a variety of resistive loads ranging from 2 k Ω to 50 k Ω , with an input voltage of 273 VDC. For a frequency of 0.99 Hz, the maximum output current is 0.132 A, the maximum power is 33.05 W, the voltage drop is 9%, and the output voltage waveform is an imperfect square wave whose amplitude changes according to the RMS current. At an output frequency of 9.80 Hz with an input voltage of 273 VDC, the voltage drop is 10%, the maximum RMS current value is 0.124 A, the maximum power is 30.567 W, and the output voltage waveform is a square wave.

Key words: Inverter, Dual Frequency, Low Frequency, *Induced Polarization*, Frequency Domain

PENDAHULUAN

Inverter adalah rangkaian elektronik yang bekerja dengan mengubah sumber masukan berupa Direct Current (DC) menjadi bentuk keluaran berupa Alternating Current (AC) [1]. Inverter banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari baik dalam sector rumah tangga, industri, sistem sumber energi terbarukan, maupun dalam bidang research. Salah satu contoh aplikasi inverter dalam bidang research adalah sebagai salah satu komponen utama pada perangkat pengukuran geolistrik metode Induced Polarization (IP) khususnya domain frekuensi

[2], [3], [4]. Metode Induced Polarization (IP) merupakan metode eksplorasi geolistrik yang berfungsi untuk mendeteksi kandungan mineral dalam tanah atau batuan. Metode ini dilakukan dengan cara memberikan impedansi pada dua frekuensi yang berbeda kemudian diamati beda potensial yang terjadi di kedua frekuensi, oleh karenanya dibutuhkan arus AC [5], [6].

Metode IP memanfaatkan efek polarisasi dalam batuan sebagai akibat dari aliran arus listrik yang melewati suatu medium. Fenomena polarisasi dapat menjadi acuan bagaimana tingkat kemampuan suatu medium dalam

menyimpan energi listrik sementara. Domain frekuensi menggunakan prinsip pengukuran perbedaan respon impedansi dari batuan yang memiliki kandungan mineral konduktif pada dua buah frekuensi yang berbeda. Frekuensi yang umumnya digunakan pada pengukuran IP domain frekuensi adalah di bawah 10Hz [7], [8], [9], [10]. Pada range frekuensi yang digunakan untuk melakukan pengukuran geolistrik metode IP domain frekuensi adalah kelipatan sepuluh dari frekuensi rendahnya. Bila diasumsikan frekuensi rendahnya adalah 1 Hz, maka frekuensi tingginya adalah 10 Hz [4], [9].

Meskipun inverter secara komersial inverter sudah banyak dijual di pasaran, namun frekuensi keluaran yang dihasilkan dari inverter komersial mayoritas berada pada rentang frekuensi PLN yaitu sekitar 50Hz-60Hz. Inverter dengan nilai frekuensi keluaran tersebut tentu tidak dapat memenuhi kebutuhan sebagai komponen pada instrumen pengukuran geolistrik metode *Induced Polarization* (IP) domain frekuensi. Selain itu, instrumen geolistrik metode IP *frequency domain* yang banyak dijual di pasaran juga memiliki ukuran yang cukup besar serta harganya cukup mahal. Selain itu, Rao et al. (2016) telah melakukan penelitian rancang bangun inverter sebagai instrumen pengukuran IP dengan menggunakan topologi berupa *h-bridge* inverter. *H-bridge* inverter merupakan topologi inverter yang tersusun dari dua buah rangkaian *half bridge* inverter yang dihubungkan membentuk seperti huruf H. Rao et al. (2016) juga menggunakan mikrokontroler 8051 sebagai pembangkit PWM yang diprogram menggunakan bahasa C#. Frekuensi keluaran inverter tersebut adalah 0,1Hz; 0,3Hz; 1Hz; dan 3Hz dengan bentuk gelombang berupa gelombang kotak. Penelitian yang dilakukan Rao et al. (2016) tidak menggunakan IC *gate driver* MOSFET dan hanya menggunakan *optocoupler* sebagai piranti untuk mengisolir tegangan *pulse* PWM mikrokontroler dengan rangkaian inverter.

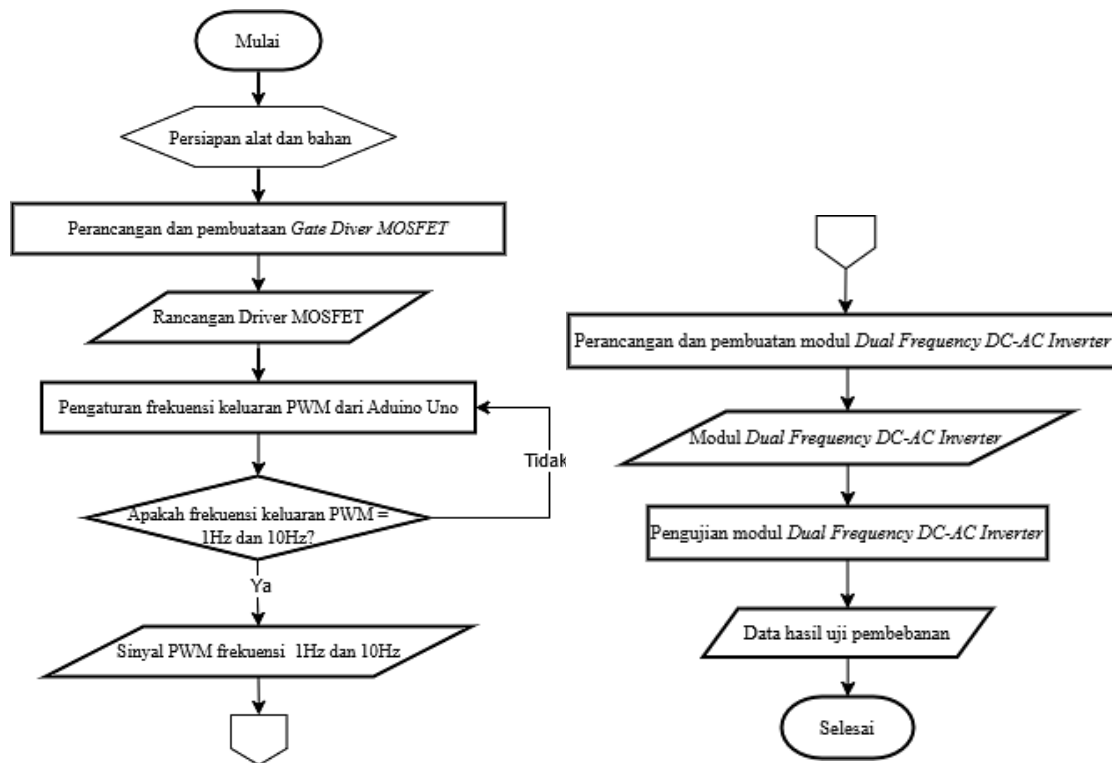
Namun, penelitian yang dilakukan oleh Rao et al. (2016) memiliki kekurangan, yaitu sulitnya

menemukan komponen yang dapat menurunkan tegangan tinggi yang nilainya ratusan volt menjadi tegangan rendah sekitar 12V sebagai tegangan masukan untuk *gate* MOSFET sisi bawah. Untuk mengatasi kekurangan-kekurangan tersebut, penelitian ini dilakukan agar dapat menghasilkan modul inverter yang dapat mengubah tegangan tinggi DC menjadi AC dengan dua buah frekuensi keluaran yaitu sekitar 1Hz dan 10Hz. Pembangkitan gelombang memanfaatkan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang merupakan metode pembangkitan sinyal dengan memodulasi lebar pulsa dengan mengatur waktu *on* dan *off* menggunakan Arduino Uno. Penelitian diharapkan diharapkan dapat menghasilkan sebuah modul inverter yang memiliki dua buah frekuensi keluaran dengan biaya produksi yang rendah, serta diharapkan dapat digunakan sebagai instrumen alternatif untuk pengukuran geolistrik metode IP domain frekuensi.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi, dan Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman. Penelitian berupa perancangan dan pembuatan modul inverter yang menghasilkan dua buah frekuensi keluaran sekitar 1Hz dan 10Hz. Bahan dan alat yang digunakan untuk mencapai tujuan pada penelitian ini diantaranya adalah mikrokontroler Arduino Uno sebagai pembangkit sinyal PWM, IC regulator tegangan L7812 dan L7805, Gate Driver MOSFET IR2110, resistor, dioda, kapasitor, 4 buah *N-Channel* MOSFET tipe IRF840, sakelar, *toggle switch*, kabel inti serabut, Lampu LED sebagai lampu indikator, papan PCB, solder, multimeter digital, serta osiloskop untuk pengukuran pada proses pembebanan, komputer/PC untuk menulis dan mengunggahnya *sketch* program pembangkit sinyal PWM Arduino Uno.

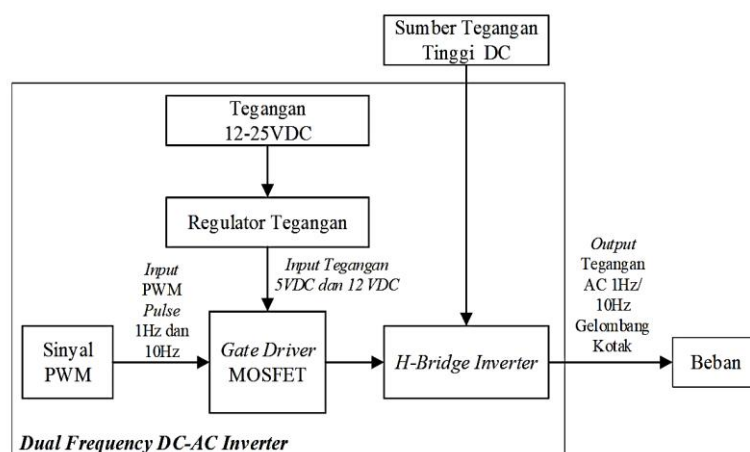
Proses penelitian dibagi menjadi beberapa langkah, seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Modul *Dual Frequency DC-AC Inverter* dirancang untuk memiliki dua buah frekuensi keluaran berupa 1Hz dan 10Hz, dengan sumber tegangan tinggi DC sebesar $\pm 200\text{VDC}$ yang diperoleh dari tegangan keluaran *DC to DC Converter*, arus RMS maksimal yang diharapkan sebesar $\pm 100\text{mA}/0,1\text{A}$. Besarnya nilai dan bentuk respon gelombang dari tegangan RMS yang diharapkan yaitu 200V berupa gelombang

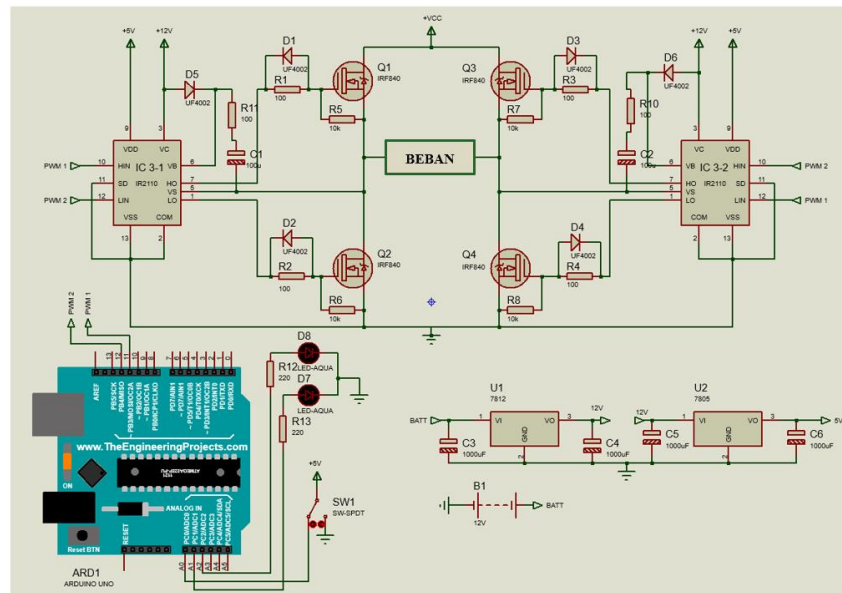
kotak. Untuk mencapai tujuan dari proses tersebut, dibuat diagram blok sistem modul untuk mempermudah proses identifikasi akan kebutuhan komponen sistem sehingga spesifikasi modul yang diharapkan dapat tercapai. Adapun gambar diagram blok sistem modul *Dual Frequency DC-AC Inverter* yang disajikan pada **Gambar 2**.



Gambar 1. Diagram blok sistem modul *dual frequency DC to AC inverter*

Langkah berikutnya adalah melakukan perancangan dan pembuatan rangkaian driver MOSFET dengan menggunakan IC IR2110. Setelah itu, mengatur frekuensi PWM Arduino Uno. Kemudian, membuat rangkaian *Dual*

Frequency DC-AC Inverter yang dirangkai menggunakan topologi h-bridge inverter. Skematik rangkian dari *Dual Frequency DC-AC Inverter* ditunjukkan pada **Gambar 23**.



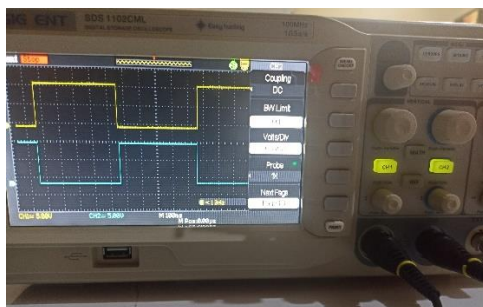
Gambar 2. Skematik rangkaian modul *dual Frequency DC to AC inverter*

Setelah keseluruhan rangkaian *Dual Frequency DC-AC Inverter* selesai, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian terhadap modul sistem inverter. Pengujian dilakukan dengan tujuan untuk mengamati tegangan arus, serta bentuk gelombang keluaran dari inverter baik saat diberi beban maupun tidak diberi beban. Uji pembebanan dilakukan dengan menghubungkan beban resistif berupa resistor dengan variasi nilai 2k-50k Ω pada pin keluaran inverter. Setelah memperoleh data hasil pengujian, tahap terakhir yang dilakukan adalah menganalisis hasil pengujian berupa frekuensi keluaran, nilai

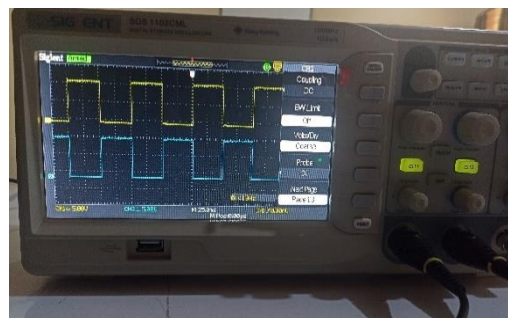
tegangan dan arus dari pembebanan, serta karakteristik pembebanan.

Pembangkitan Sinyal PWM Arduino UNO

Pembangkitan sinyal PWM dilakukan dengan menggunakan Arduino UNO pin 11 dan pin 12 berupa sinyal pulsa dengan frekuensi yang diatur menjadi 1Hz dan 10Hz. Berdasarkan hasil pengamatan dengan menggunakan osiloskop, diperoleh hasil frekuensi PWM sebesar 1Hz dan 10Hz dengan bentuk gelombang sinyal berupa gelombang kotak seperti disajikan pada **Gambar 3 4**.



(a)



(b)

Gambar 3. Bentuk respon gelombang sinyal PWM: (a)1Hz dan (b)10Hz

Pembangkitan sinyal PWM memanfaatkan dua buah pin digital 11 dan 12 dari Arduino Uno yang diatur periode *on* dan *off* menggunakan perintah *delay()*; pada *sketch* Arduino. Kedua buah pin digital ini memiliki nilai yang saling berkebalikan satu sama lainnya. Ketika pin 11 bernilai *high* (*on*), maka keluaran pin 12 akan bernilai *low* (*off*) begitu pula sebaliknya.

Perancangan dan Pembuatan Gate Driver MOSFET

Salah satu rangkaian yang juga memiliki peran penting dalam rangkaian *dual frequency* inverter pada penelitian ini adalah rangkaian *gate driver* MOSFET. *Gate driver* MOSFET memiliki fungsi sebagai rangkaian untuk *step up* tegangan sehingga dihasilkan tegangan yang cukup untuk mengaktifkan rangkaian MOSFET. *Gate driver* MOSFET yang digunakan pada penelitian ini berupa IC IR2110. Rangkaian *gate driver* MOSFET yang melibatkan IC IR2110 membutuhkan rangkaian *bootstrap capacitor* sebagai *supply* untuk menaikkan level tegangan yang masuk pada kedua *pin gate* MOSFET sisi atas yang memanfaatkan prinsip *charging* dan *discharging* kapasitor. Besarnya nilai tegangan yang tersimpan dalam kapasitor saat proses *charging* selama t sekon dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$V_c(t) = \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (1)$$

Dimana ε merupakan nilai tegangan sumber, R merupakan nilai resistansi resistor, dan C nilai kapasitansi kapasitor dari rangkaian RC. Sedangkan nilai tegangan yang dikeluarkan kapasitor saat proses *discharging* dalam t sekon dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{c \text{ discharging}}(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

dimana V_0 merupakan nilai tegangan mula-mula yang tersimpan dalam kapasitor.

Rangkaian *bootstrap capacitor* terdiri atas dioda, resistor, dan kapasitor yang dirangkai seri. Pada penelitian ini, penghitungan nilai komponen pada rangkaian *bootstrap capacitor* menggunakan pendekatan rangkaian RC. Waktu yang dibutuhkan untuk proses *charging* maupun *discharging* kapasitor atau disebut konstanta waktu (τ) pada frekuensi tertinggi yaitu 10Hz. Pemilihan frekuensi tertinggi sebagai acuan untuk menentukan nilai τ adalah guna menghindari terjadinya kegagalan *switching*

akibat periode *on/off* PWM yang terlalu lama. Adapun nilai τ dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\tau = RC \quad (3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan persamaan (3), dengan nilai $R=100\Omega$, untuk memperoleh sinyal dengan frekuensi gelombang sebesar 10Hz, waktu ON dan OFF sinyal PWM harus sebesar 0,05s. Untuk untuk mencapai nilai maksimal saat proses *charging* dan *discharging* kapasitor, waktu yang diperlukan adalah selama 5τ . Maka berdasarkan perhitungan, diperoleh nilai untuk komponen kapasitor C sebesar $\pm 100\mu F$. Setelah dilakukan pengujian dengan memberikan tegangan masukan sebesar 18,9VDC diperoleh hasil pengukuran frekuensi keluaran pada pin HO dan LO seperti pada **Tabel 1**:

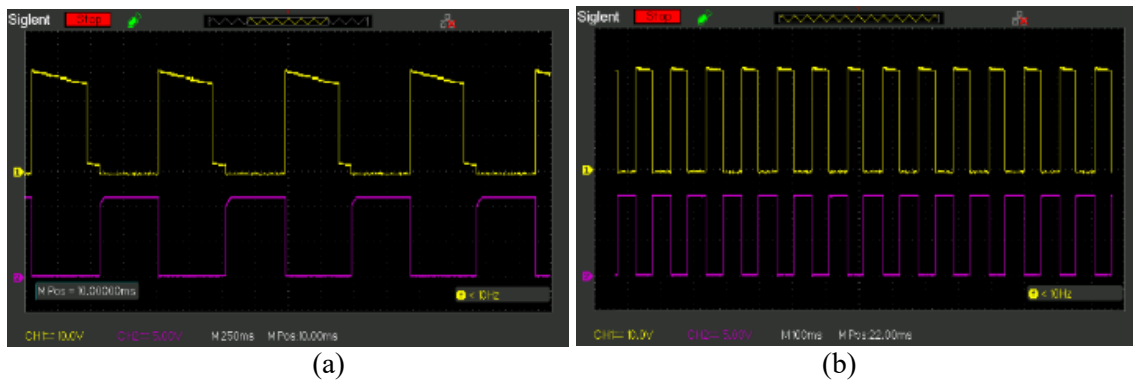
Tabel 1. Tabel hasil pengukuran frekuensi keluaran *gate driver* MOSFET

Frekuensi Switching (Hz)	Frekuensi keluaran pin HO (Hz)*	Frekuensi keluaran pin LO (Hz)*
1	0,99	0,99
10	9.80	9.80

*tanpa dihubungkan dengan beban resistor

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan **Tabel 1**, diperoleh bahwa besarnya nilai frekuensi keluaran dari *gate driver* MOSFET yang teramati pada osiloskop saat frekuensi PWM diatur untuk 1Hz adalah sebesar 0,99Hz. Sedangkan saat frekuensi PWM diatur untuk 10Hz frekuensi keluaran teramati sebesar 9,80Hz. Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh nilai tegangan terukur pada pin HO IC *gate driver* sebesar 28V atau mendapat tambahan tegangan sekitar 9V dari tegangan yang tersimpan pada *bootstrap capacitor*, dan nilai LO sebesar 11,3V baik pada fekuensi 0,99Hz maupun 9,80Hz dengan titik *ground* sebagai titik referensi.

Bentuk respon gelombang keluaran dari sinyal HO dan LO berupa gelombang kotak yang tidak sempurna untuk frekuensi 0,99Hz, sedangkan pada frekuensi 9,80Hz bentuk gelombang sinyal berupa gelombang kotak seperti pada **Error! Reference source not found.5**.

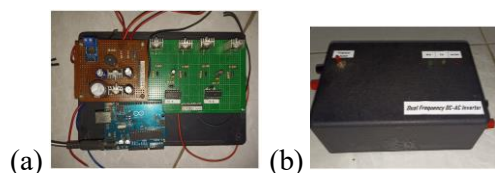


Gambar 4. Bentuk gelombang keluaran pin HO dan LO IR2110: (a) 0,99Hz; (b) 9,80Hz

Error! Reference source not found.5 merupakan gambar bentuk dari respon gelombang keluaran pin HO dan LO *gate driver* MOSFET ketika tidak terhubung dengan beban yang teramati pada osiloskop. Gelombang dengan warna kuning merupakan bentuk gelombang sinyal keluaran dari pin HO dan warna ungu merepresentasikan keluaran dari pin LO IC *gate driver* MOSFET IR2110. Penurunan tegangan yang terjadi saat frekuensi switching PWM 1Hz dikarenakan nilai komponen *bootstrap capacitor* lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai kebutuhan ukuran kapasitansi kapasitor saat frekuensi 1Hz. Akibatnya ketika proses *discharging*, muatan kapasitor yang tersimpan saat proses *charging* habis sebelum waktu yang diharapkan (setengah periode gelombang 1Hz). Oleh karena itu, tegangan keluaran pin HO yang fungsi utamanya sebagai supply tegangan untuk *gate* MOSFET sisi atas, mengalami penurunan tegangan.

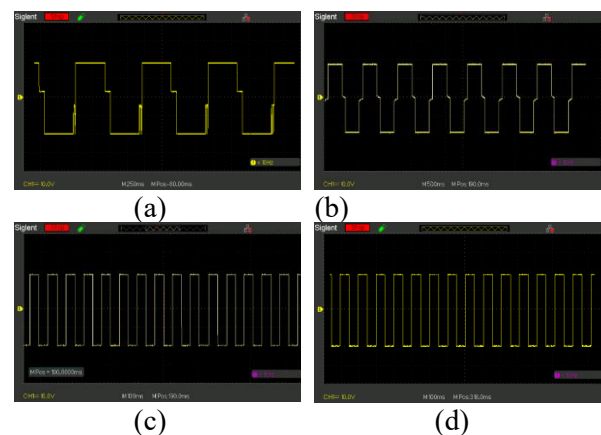
Rancang Bangun Modul Dual Frequency DC-AC Inverter

Rangkaian *dual frequency DC-AC inverter* dirancang untuk tegangan masukan $\pm 200\text{VDC}$. Pembangkitan gelombang untuk memicu waktu *switching* 4 buah MOSFET pada rangkaian *h-bridge* inverter dilakukan dengan menggunakan sinyal PWM dari pin 11 dan pin 12 Arduino Uno agar dapat menghasilkan frekuensi keluaran 1Hz dan 10Hz. **Gambar 56** merupakan tampak fisik dari hasil rangkaian modul *dual frequency DC-AC inverter*.



Gambar 5. Rangkaian keseluruhan modul *dual frequency DC-AC inveter*

Berdasarkan hasil pengamatan gelombang keluaran inverter menggunakan osiloskop, bentuk gelombang keluaran inverter ketika frekuensi PWM sebesar 1Hz adalah berupa gelombang kotak termodifikasi/gelombang kotak tidak sempurna dengan frekuensi keluaran terukur sebesar 0,99Hz. Sedangkan saat frekuensi PWM diatur menjadi 10Hz, nilai frekuensi keluaran inverter yang terukur sebesar 9,80Hz dengan bentuk gelombang berupa gelombang kotak. Berikut merupakan gambar respon gelombang keluaran inverter dari osiloskop yang diperlihatkan pada **Gambar 7**.



Gambar 6. Bentuk gelombang sinyal keluaran inverter: (a) (b) Frekuensi=0,99 Hz, (c) (d) Frekuensi=9,80 Hz

Gambar 67 (a) dan (b) merupakan tampilan bentuk gelombang tegangan keluaran inverter saat tidak diberi variasi beban resistif berupa resistor pada fekuensi 0,99 Hz. Adapun **Gambar 67 (c) dan (d)**, merupakan bentuk gelombang tegangan keluaran inverter saat diberi variasi beban resistif berupa resistor saat frekuensi keluaran bernilai 9,80 Hz. Berdasarkan hasil pengamatan pada osiloskop ketika pin keluaran dihubungkan dengan beban resistor yang divariasikan, frekuensi keluaran tidak mengalami perubahan seiring dengan perubahan

nilai variasi beban baik saat frekuensi 0,99Hz maupun saat frekuensi sebesar 9,80Hz. Namun, perubahan nilai variasi beban memengaruhi amplitudo gelombang yang berarti mempengaruhi nilai tegangan keluaran maupun arus keluaran dari inverter.

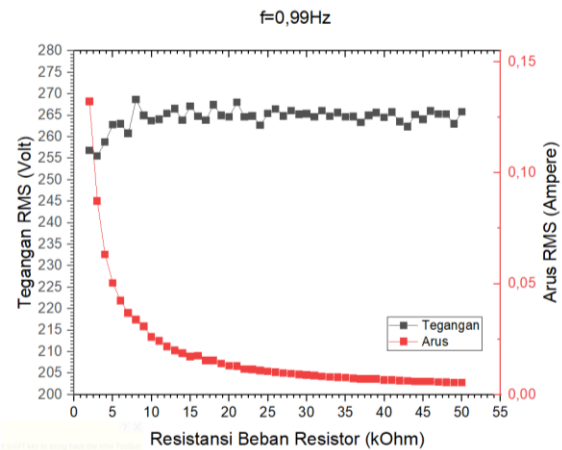
Uji Pembebanan Modul Dual Frequency DC-AC Inverter

Uji pembebanan dilakukan dengan cara menghubungkan pin keluaran inverter dengan beban resistif berupa resistor untuk melihat respon tegangan, arus, serta bentuk gelombang keluaran dari inverter. Uji pembebanan dilakukan dengan memberikan tegangan masukan sebesar 273VDC dan menghubungkan pin keluaran inverter dengan variasi nilai 2k-50k Ω sebanyak 5 kali pengulangan untuk setiap nilai beban.

Tabel 2. Sampel data tegangan dan arus keluaran *Dual Frequency DC-AC Inverter*

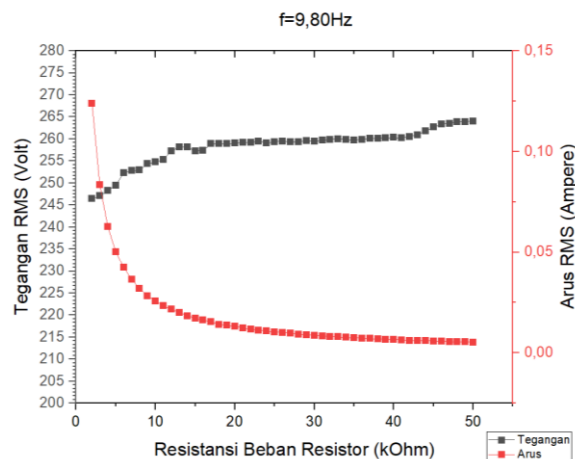
Tegangan Masukan (V)	Variasi Beban (k Ω)	$f=0,99$ Hz		$f=9,80$ Hz	
		$\bar{V}_{RMS}$ (V)	$\bar{I}_{RMS}$ (A)	$\bar{V}_{RMS}$ (V)	$\bar{I}_{RMS}$ (A)
273	Tanpa Beban	270,67	0	264,2	0
273	2	249,7	0,132	246,4	0,124
273	3	248,8	0,085	247,1	0,084
273	4	251,2	0,065	248,3	0,063
273	5	253,8	0,054	249,5	0,050
273	16	261,5	0,017	257,4	0,016
273	17	262,6	0,016	258,9	0,015
273	18	266,0	0,015	258,9	0,014
273	19	260,9	0,014	258,9	0,014
273	20	261,6	0,01	259,0	0,013
273	31	262,2	0,009	259,7	0,009
273	32	262,9	0,008	259,8	0,008
273	33	262,1	0,008	260,0	0,008
273	34	262,1	0,008	259,8	0,008
273	35	261,7	0,008	259,7	0,007
273	46	264,7	0,006	263,3	0,006
273	47	264,7	0,006	263,6	0,006
273	48	265,3	0,005	263,9	0,006
273	49	263,9	0,005	263,9	0,005
273	50	267,2	0,005	263,3	0,005

Tabel 2 menunjukkan sampel data pengukuran arus dan tegangan dengan memberikan variasi beban yang telah dirancang. Grafik pada **Gambar 78** dan **Gambar 89**, memperlihatkan bagaimana pengaruh pemberian variasi beban resistif berupa resistor 2 k Ω - 50k Ω pada dua buah frekuensi yaitu 0,99Hz dan 9,80Hz dimana nilai tegangan keluaran dari modul *Dual Frequency DC-AC Inverter* direpresentasikan dengan grafik berwarna hitam, sedangkan arus keluaran direpresentasikan dengan grafik berwarna merah.



Gambar 7. Grafik pengukuran tegangan dan arus keluaran ($f=0,99$ Hz)

Berdasarkan grafik pada **Gambar 78**, tegangan RMS maksimal dari inverter yang teramati pada frekuensi 0,99 Hz adalah saat tidak diberi beban adalah sebesar 267,74 V. Sedangkan, nilai arus maksimal yang terukur saat frekuensi 0,99 Hz ketika diberi beban resistif berupa resistor dengan variasi nilai resistor 2 k Ω -50 k Ω adalah sebesar 0,132 A yaitu saat diberi beban resistor sebesar 2 k Ω . Data hasil pengukuran tegangan dan arus RMS saat frekuensi operasi dari inverter bernilai 9,80 Hz ditunjukkan dalam sebuah grafik pada **Gambar 89**.

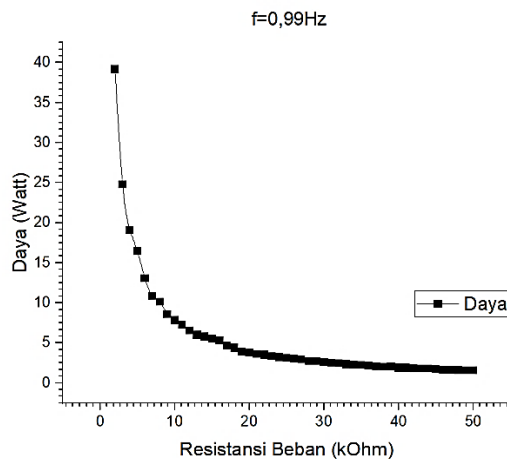


Gambar 8. Grafik pengukuran tegangan dan arus RMS ($f=9,80$ Hz)

Berdasarkan grafik pada **Gambar 8**, tegangan keluaran inverter yang terukur pada frekuensi 9,80 Hz saat tidak diberi beban adalah sebesar 264,22 V. Saat dihubungkan dengan beban resistif berupa resistor yang nilainya divariasikan mulai dari 2k-50k Ω , diperoleh nilai tegangan RMS tertinggi yang terukur sebesar 264 V. Sedangkan nilai arus RMS tertinggi yang teramati sebesar 0,124 A yaitu saat diberi beban resistor 2k Ω .

Hasil pengujian beban menunjukkan terjadinya penurunan tegangan ketika diberi beban resistif berupa resistor dengan variasi nilai $2\text{k}\Omega$ - $50\text{k}\Omega$. Besarnya nilai penurunan tegangan yang terjadi saat frekuensi $0,99\text{ Hz}$ adalah sebesar 9% yaitu saat arus keluaran inverter sebesar $0,085\text{ A}$ dan beban sebesar $3\text{k}\Omega$. Sedangkan saat frekuensi $9,80\text{ Hz}$, terjadi penurunan tegangan sebesar 10% saat arus keluaran inverter diberi bernilai $0,124\text{ A}$ dan beban sebesar $2\text{k}\Omega$. Berdasarkan hasil penelitian, penurunan atau penyusutan tegangan yang terjadi pada *dual frequency inverter* masih dalam standar PLN. Dimana nilai tegangan jatuh maksimal yang diizinkan berdasarkan standar PLN maksimum sebesar $+5\%$ dan minimum sebesar -10% [11], [12]. Penurunan tegangan inverter yang tidak sesuai dengan nilai standar akan membawa beberapa dampak negatif diantaranya akan menyebabkan kerusakan komponen elektronik, dan jika alat difungsikan sebagai alat ukur maka akan memperbesar cacat hasil pengukuran. Berdasarkan data hasil pengukuran, diperoleh informasi bahwa besarnya penurunan tegangan yang terjadi pada *dual frequency DC to AC inverter* pada penelitian ini masih sesuai dengan standar dari PLN.

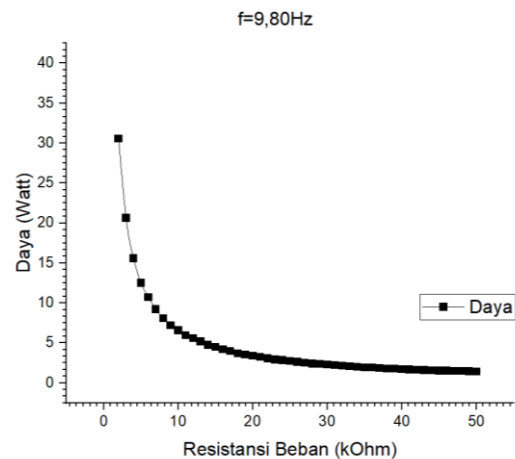
Respon daya keluaran inverter berdasarkan uji pembebanan direpresentasikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 9** dan **Gambar 10**.



Gambar 9. Daya keluaran ($f = 0,99\text{ Hz}$)

Berdasarkan data hasil uji pembebanan yang ditunjukkan dalam grafik pada **Gambar 910**, besarnya nilai daya keluaran maksimal yang terukur dari *dual frequency DC to AC inverter* pada saat frekuensi keluaran senilai $0,99\text{ Hz}$ mencapai nilai $33,05\text{ W}$. Nilai tersebut terukur saat pin keluaran inverter dihubungkan dengan variasi beban resistor terkecil yang digunakan

pada penelitian ini yaitu saat beban resistif berupa resistor yang sihubungkan senilai $2\text{k}\Omega$. Sedangkan pada frekuensi kerja $9,80\text{ Hz}$, nilai daya keluaran yang terukur adalah sebesar $30,56\text{ W}$ saat pin keluaran inverter terhubung dengan variasi beban resistor terkecil yang digunakan pada penelitian ini yaitu $2\text{k}\Omega$. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Daya keluaran ($f = 9,80\text{ Hz}$)

Hasil uji pembebanan menunjukkan bahwa nilai resistansi berbanding terbalik dengan daya keluaran inverter. Semakin besar nilai resistansi, maka daya keluaran yang terukur semakin kecil. Hal ini sesuai dengan pernyataan pada hukum Ohm yang menyatakan bahwa nilai resistansi berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan arus. Saat resistansi beban bertambah, maka arus yang dihasilkan akan semakin kecil. Arus yang semakin kecil juga berbanding lurus dengan daya yang semakin kecil. Berdasarkan data hasil pada proses pengukuran uji pembebanan dengan menggunakan beban resistif berupa resistor variasi nilai $2\text{k}\Omega$ - $50\text{k}\Omega$, tegangan masukan sebesar 273 VDC , dari penelitian ini, diperoleh rincian spesifikasi dari hasil perancangan dan pembuatan modul *Dual Frequency DC-AC Inverter*. Adapun spesifikasi dari *Dual Frequency DC-AC Inverter* yang merupakan hasil dari penelitian rancang bangun *modul dual frequency DC to AC inverter* disajikan pada **Tabel 3** berikut:

Tabel 3. Spesifikasi hasil Modul *Dual Frequency DC to AC Inverter*

<i>Dual Frequency DC-AC Inverter</i>		
No	Parameter	Nilai
1.	Tegangan masukan	273 VDC
2.	Tegangan RMS maksimal	267,74 V
3.	Arus RMS maksimal	0,132 A
6.	Frekuensi tinggi output (f_i)	9,80 Hz

7.	Frekuensi rendah <i>output</i> (f_2)	0,99 Hz
8.	Daya maksimal	33,05 W
9.	Bentuk gelombang keluaran	Gelombang Kotak
10.	<i>Duty cycle output</i>	100%

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dari penelitian rancang bangun Dual Frequency DC-AC Inverter, dapat disimpulkan bahwa:

1. Modul Dual Frequency DC-AC Inverter untuk mengubah tegangan dari catu daya DC menjadi AC berhasil dibuat. Dengan memberikan tegangan masukan sebesar 273 VDC dihasilkan respon tegangan keluaran dengan bentuk gelombang berupa gelombang kotak tidak sempurna, sedangkan pada frekuensi 0,99 Hz dengan frekuensi keluaran 9,80 Hz dihasilkan gelombang keluaran kotak sempurna.
2. Setelah dilakukan variasi pembebanan dengan menggunakan beban berupa resistor 2 k Ω hingga 50 k Ω , tegangan RMS maksimal yang terukur saat frekuensi = 0,99 Hz sebesar 267,22 V, arus RMS maksimal sebesar 0,132 A, daya keluaran maksimal sebesar 33,05 W, dan penurunan tegangan maksimal yang teramati sebesar 9%. Sedangkan ketika frekuensi = 9,80Hz, nilai tegangan RMS maksimal yang terukur sebesar 264 V, arus RMS maksimal sebesar 0,124 A, daya keluaran maksimum sebesar 30,56 W, dan mengalami penurunan tegangan maksimal yang teramati sebesar 10%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. Darojat, "Transformatorless SPWM Inverter dengan Arduino," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2020.
- [2] G. Hardiansyah, "Perancangan dan Pembuatan Inverter Sumber Tegangan Enam Pulsa Tiga Fasa Variabel Frekuensi yang Dikendalikan dengan PC," Universitas Andalas, Padang, 2007.
- [3] R. A. Purwanto, H. Hariyadi, dan R. I. Putri, "Kontrol Arus pada Inverter Satu Fasa Tipe Full Bridge menggunakan DSPF28069M dengan Metode Proporsional Integral," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 9, no. 3, hlm. 183, 2022, doi: 10.33795/elk.v9i3.391.
- [4] I. K. Rao, M. S. S. Rukmini, R. P. Das, P. T. Rao, dan G. Manikanta, "Design of Frequency Domain Induced Polarization Equipment Having Optimized Frequency of Signal Transmission," *Indian J Sci Technol*, vol. 9, no. 6, Feb 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i6/85032.
- [5] P. Kessouri dkk., "Induced Polarization Applied to Biogeophysics: Recent Advances and Future Prospects," *Near Surface Geophysics*, vol. 17, no. 6, hlm. 595–621, 2019, doi: 10.1002/nsg.12072.
- [6] Z. Umroh, "Analisis Data Geolistrik Metode IP (Induced Polarization) untuk Mengetahui Sebaran Lumpur di Bawah Permukaan (Studi Kasus Desa Jari, Kecamatan Gondang, Kabupaten Bojonegoro)," Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, Malang, 2018.
- [7] B. Aryaseta, D. D. Warnana, dan A. Widodo, "Aplikasi Metode Induced Polarization Untuk Mengidentifikasi Akifer di Daerah Sutorejo, Surabaya," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 1, hlm. 84–86, 2017.
- [8] T. Martin, K. Titov, A. Tarasov, dan A. Weller, "Spectral Induced Polarization: Frequency Domain Versus Time Domain Laboratory Data," *Geophys J Int*, vol. 225, no. 3, hlm. 1982–2000, 2021, doi: 10.1093/gji/ggab071.
- [9] W. M. Telford, L. P. Geldart, dan R. E. Sheriff, *Applied Geophysics Second Edition, 2nd ed.* Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [10] A. H. P. Yuniarto, "Aplikasi Time Domain Induced Polarization dalam Eksplorasi Emas di Blok 'Cpy' Gunung Pongkor Kabupaten Bogor," *Jurnal Geosaintek*, vol. 6, no. 3, hlm. 117, 2020, doi: 10.12962/j25023659.v6i3.6867.
- [11] I. M. A. Mahardiananta, P. A. R. Arimbawa, dan D. A. S. Santiari, "Perhitungan Drop Tegangan Sistem Distribusi Menggunakan Metode Aliran Daya," *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, vol. 3, no. 1, hlm. 13–18, 2020, doi: 10.31598/jurnalresistor.v3i1.453.
- [12] PLN, *Tegangan-Tegangan Standar.* Indonesia, 1987.

- [13] E. H. Aboadla dkk., "Suppressing voltage spikes of mosfet in h-bridge inverter circuit," *Electronics* (Switzerland), vol. 10, no. 4, hlm. 1–17, 2021, doi: 10.3390/electronics10040390.
- [14] Z. I. Amien, M. Yantidewi, dan I. Sucahyo, "Alat Eksperimen Charge Discharge Kapasitor pada Rangkaian RC Seri dengan Sensor Ina219," *Jurnal Kolaboratif Sains*, vol. 6, no. 7, hlm. 707–712, 2023, doi: 10.56338/jks.v6i7.3821.
- [15] I. Y. Basri dan D. Irfan, *Komponen Elektronika*. Padang: Sukabina Press, 2018.
- [16] C. Bell, *Beginning Sensor Networks with XBee, Raspberry Pi, and Arduino: Sensing the World with Python and MicroPython*. Apress Media LLC, 2020. doi: 10.1007/978-1-4842-5796-8.
- [17] D. Cittanti, F. Iannuzzo, E. Hoene, dan K. Klein, "Role of parasitic capacitances in power MOSFET turn-on switching speed limits: A SiC case study," dalam 2017 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov 2017, hlm. 1387–1394. doi: 10.1109/ECCE.2017.8095952.
- [18] N. Desiwantiyani, "Rancang Bangun Inverter SPWM," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2018.
- [19] C. H. Edwards dan D. E. Penney, *Elementary Differential Equations with Boundary Value Problems 4th Edition*. New Jersey: Prentice-Hall, 2000.
- [20] H. A. El-Halim, E. S. Soliman, dan A. Refky, "Performance of MOSFET Driven via a Bootstrap Capacitor for Dynamic Load Continuity Enhancement," *Journal of Engineering* (United Kingdom), vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2273819.
- [21] M. R. Fahlepy, "Teori Singkat Arus Transien (Elektronika Dasar)," *Think Physics*. Diakses: 3 Desember 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.thinkphysics.com/2020/06/teori-singkat-arus-transien-elektronika-dasar.html>
- [22] S. Fuada dkk., "Analisis Rangkaian Pembagi Tegangan dan Perbandingan Hasil Simulasinya Menggunakan Simulator Offline," *Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 6, no. 1, hlm. 28, 2022, doi: 10.22373/crc.v6i1.11200.
- [23] A. Giyantara dan R. S. Tjiang, "Desain Inverter Satu Fasa 12V DC ke 220V AC Menggunakan Rangkaian H-Bridge MOSFET," *SPECTA Journal of Technology*, vol. 3, no. 1, Des 2019, doi: 10.35718/specta.v3i1.112.
- [24] Infineon, "IR2110(S)-IR2113(S) Datasheet-500V/600V High-Side and Low-Side Gate Driver IC with Shutdown," 2019. [Daring]. Tersedia pada: www.infineon.com/gatedriver
- [25] Junaidi dan Y. D. Prabowo, *Project Sistem Kendali Elektronik Berbasis Arduino*. Bandar Lampung: CV. Anugrah Utama Raharja, 2018. [Daring]. Tersedia pada: www.aura-publishing.com
- [26] R. Kansagara, "Single Phase Half Bridge and Full Bridge Inverter Circuit using MATLAB." Diakses: 14 November 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://circuitdigest.com/electronic-circuits/single-phase-half-bridge-and-full-bridge-inverter-circuit-using-matlab>
- [27] H. Khan, "0 To 25V DC Voltage Sensor Module." Diakses: 22 Februari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.datasheethub.com/0-to-25v-dc-voltage-sensor-module/>
- [28] Y. Lee dan J. Kim, "Analysis of Bootstrap Circuit Operation with an Inverted PWM Drive Scheme for a Three-Phase Inverter for a Brushless DC Motor Drive," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 42, no. 1, hlm. 58–65, 2019, doi: 10.1109/CJECE.2019.2891850.
- [29] F. B. Lubis dan A. Yanie, "Implementasi Pulse Width Modulation (PWM) pada Penyaluran Limbah Cair Pupuk Kelapa Sawit Berbasis Arduino," *Journal of Electrical Technology*, vol. 7, no. 2, hlm. 39–46, 2022.
- [30] H. Matalata dan A. Effendi, "Unjuk Kerja Charge Controller metode PWM Menggunakan Arduino Uno," *J Teknol*, vol. 15, no. 1, hlm. 1–8, 2021, doi: 10.34151/jurtek.v15i1.3957.
- [31] A. O. Maulana, "Rancang Bangun Konverter SEPIC (Single Ended Primary

- Inductor Converter) dengan Kendali Picu Kalang Terbuka),” Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2018.
- [32] D. P. Mulyono, “Modifikasi Rangkaian Mekanik Bootstrap Untuk Meningkatkan Kinerja Gate Driver MOSFET,” Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2017.
- [33] A. A. Muntashir, E. Purwanto, dan S. D. Nugraha, “Pengembangan Sugeno Fuzzy Model Dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan V/F Scalar Control,” *PoliGrid*, vol. 1, no. 2, hlm. 65, Des 2020, doi: 10.46964/poligrd.v1i2.379.
- [34] S. Y. Panggabean, F. X. A. Setyawan, dan S. Alam, “2026-Article Text-301-1-10-20170508,” *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 11, no. 2, Mei 2017.
- [35] V. Parkash, “Fourier Series Approximation of Square and Sawtooth Waves Using Python Script in Jupyter Notebook,” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 12, no. 3, hlm. 1834–1840, 2023, doi: 10.21275/sr23326170631.
- [36] D. Sasmoko, *Arduino dan Sensor pada Project Arduino DIY*. Semarang: Yayasan Prima AgusTeknik, 2021.
- [37] S. M. Siagian, G. W. Jaya, dan I. Nurhidayati, “Analisis Jumlah Muatan Listrik Serta Energi Pada Kapasitor Berdasarkan Konstanta Dielektrik Suatu Material,” *ORBITA: Jurnal Kajian, Inovasi dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, vol. 7, no. 1, hlm. 176, 2021, doi: 10.31764/orbita.v7i1.4420.
- [38] W. Storr, “Transistor as a Switch - Using Transistor Switching.” Diakses: 11 Desember 2022. [Daring]. Tersedia pada: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_4.html
- [39] M. Suari, “Analisis Nilai Resistansi pada Konfigurasi Keypad Satu Kabel serta pemanfaatannya dalam media pembelajaran,” *Natural Science Journal*, vol. 5, no. 1, hlm. 754–765, 2019.
- [40] D. Sugiarto, “Rancang Bangun Driver Motor BLDC 6 Kutub 3 Fasa Menggunakan MOSFET 75NF75,” Universitas Jember, Jember, 2019.
- [41] T. Suhendra, “Effect of Pulse Width Modulation on Proportional, Integral, and Derivative Coefficient Characteristics,” *PROtek : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 2, hlm. 93, 2023, doi: 10.33387/protk.v10i2.5033.
- [42] R. A. Sukmayuwana, T. Hardianto, dan W. Hadi, “Kontrol Tegangan Inverter Full Bridge Satu Fasa Berbasis Arduino Uno R3 Menggunakan Kontrol PID,” *Jurnal Arus Elektro Indonesia (JAEI)*, vol. 6, no. 1, Apr 2020, doi: <https://doi.org/10.19184/jaei.v6i1.19655>.
- [43] W. Swastika, “Mengolah Citra Digital Melalui Transformasi Fourier (Bagian 1),” machung.ac.id. Diakses: 3 Januari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://machung.ac.id/artikel-prodi-if/mengolah-citra-digital-melalui-transformasi-fourier-bagian-1/>
- [44] M. K. Wardana, I. Fadlika, dan A. Fahmi, “Rancang Bangun Inverter Satu Fasa SPWM dengan Output Tegangan dan Frekuensi Variabel,” *Tekno*, vol. 28, no. 1, hlm. 1, 2019, doi: 10.17977/um034v28i1p1-16.
- [45] Erna. K. Wati, “Teori Pengolahan Sinyal Digital”. Jakarta Selatan: LP-UNAS, 2018.
- [46] A. Wijayono dan V. G. V. Putra, “Pengukuran Konstanta Dielektrik Udara Pada Perangkat Kapasitor Plat-Sejajar Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno,” *IPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika Dan Riset Ilmiah)*, vol. 4, no. 1, hlm. 13–26, 2020, doi: <https://doi.org/10.30599/jipfri.v4i1.651>.

Prediksi polutan karbon monoksida menggunakan algoritma machine learning regresi linier berbasis sensor MQ-135 dan IoT di PT XYZ Bekasi

Putra Ramdhani*, Umi Pratiwi, Hartono

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman,
Jl. DR. Soeparno No.61, Karangwangkal, Purwokerto Utara, Banyumas 53122

*email: putra.ramdhani@mhs.unsoed.ac.id

Abstrak – Karbon monoksida (CO) merupakan polutan udara berbahaya yang sulit dideteksi tanpa alat khusus. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pemantauan CO berbasis sensor MQ-135 dan teknologi Internet of Things (IoT) guna melakukan pengukuran secara real-time serta memprediksi konsentrasinya menggunakan algoritma regresi linier. Sistem ini diterapkan di salah satu PT yang ada di Kawasan Industri MM2100, Bekasi, dengan data dikumpulkan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan dikirim ke platform ThingSpeak, sementara faktor meteorologi seperti suhu, kelembapan, kecepatan angin, dan kondisi cuaca diperoleh dari Open Meteo sebagai variabel independen. Proses penelitian meliputi perancangan sistem, pengumpulan data, pemodelan regresi linier, serta evaluasi performa menggunakan RMSE, MSE, MAE, dan R-squared (R^2). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor MQ-135 memiliki standar deviasi sebesar 19,89 ppm akibat keterbatasan rentang deteksi maksimum 450 ppm, yang memengaruhi akurasi pengukuran. Selain itu, model prediksi berbasis regresi linier menghasilkan nilai R-squared sebesar 0,079 atau 7,9%, menunjukkan bahwa hubungan antara faktor meteorologi dan konsentrasi CO masih lemah, sebagian besar disebabkan oleh keterbatasan jumlah dan variasi data yang digunakan. Meskipun demikian, sistem ini tetap menunjukkan potensi dalam pemantauan polutan CO secara real-time. Peningkatan akurasi dapat dicapai melalui optimalisasi sensor, perluasan cakupan data, serta penerapan algoritma machine learning yang lebih kompleks agar sistem dapat memberikan prediksi yang lebih akurat dan andal dalam mendukung pemantauan konsentrasi CO.

Kata Kunci: Karbon Monoksida (CO), Sensor MQ-135, Polutan Udara, IoT, Prediksi CO, Machine Learning, Regresi Linier

Abstract – Carbon monoxide (CO) is a hazardous air pollutant that is difficult to detect without specialized equipment. This study aims to design a CO monitoring system based on the MQ-135 sensor and Internet of Things (IoT) technology to perform real-time measurements and predict its concentration using a linear regression algorithm. The system is implemented in one of the companies located in the MM2100 Industrial Area, Bekasi, with data collected using an ESP32 microcontroller and transmitted to the ThingSpeak platform, while meteorological factors such as temperature, humidity, wind speed, and weather conditions are obtained from Open Meteo as independent variables. The research process includes system design, data collection, linear regression modeling, and performance evaluation using RMSE, MSE, MAE, and R-squared (R^2) metrics. The results show that the MQ-135 sensor has a standard deviation of 19.89 ppm due to its maximum detection range limitation of 450 ppm, affecting measurement accuracy. Additionally, the linear regression-based prediction model yields an R-squared value of 0.079 or 7.9%, indicating a weak relationship between meteorological factors and CO concentration, primarily due to the limited amount and variation of data used. Nevertheless, this system demonstrates potential for real-time CO pollutant monitoring. Accuracy improvements can be achieved through sensor optimization, expanded data coverage, and the application of more advanced machine learning algorithms to enhance the reliability of CO concentration predictions..

Key words: Carbon Monoxide (CO), MQ-135 Sensor, Air Pollutants, IoT, CO Prediction, Machine Learning, Linier Regression

PENDAHULUAN

Kualitas udara yang buruk di daerah perkotaan dan industri menjadi permasalahan serius yang berdampak pada kesehatan dan lingkungan [1]. Bekasi, sebagai pusat industri terbesar di Asia Tenggara, mengalami peningkatan polusi udara, terutama karbon

monoksida (CO), akibat aktivitas industri dan transportasi [2][5]. CO merupakan gas berbahaya yang tidak berwarna dan tidak berbau, sehingga sulit dideteksi tanpa alat khusus [3]. Paparan CO yang tinggi dapat menyebabkan gangguan pernapasan, penyakit jantung, hingga kematian pada kelompok rentan [4]. Oleh karena itu, pemantauan dan prediksi

konsentrasi CO menjadi langkah penting dalam mitigasi polusi udara [6].

Prediksi konsentrasi CO menjadi langkah krusial karena sifat gas ini yang sangat beracun namun tidak memiliki warna maupun bau. Risiko kesehatan akibat paparan CO yang tinggi meliputi gangguan sistem pernapasan, kerusakan organ vital, dan kematian mendadak terutama pada kelompok rentan [4]. Sistem prediksi memungkinkan deteksi lebih awal sebelum konsentrasi gas mencapai tingkat yang membahayakan. Dengan memperkirakan tren polusi berbasis data historis dan faktor lingkungan, langkah mitigasi dapat dilakukan secara lebih tepat waktu. Hal ini menjadikan pendekatan prediktif sebagai pelengkap penting bagi sistem pemantauan real-time [2][4].

Monitoring kualitas udara umumnya dilakukan melalui pengukuran berkala dengan metode konvensional yang memiliki keterbatasan dalam deteksi dini pencemaran udara [1]. Jumlah sumber emisi yang besar serta cakupan wilayah yang luas mendorong perlunya sistem pemantauan yang lebih efisien berbasis teknologi untuk meningkatkan akurasi dan responsivitas dalam deteksi polutan [6]. Salah satu teknologi yang relevan dalam pemantauan kualitas udara adalah Internet of Things (IoT). Teknologi ini memungkinkan perangkat sensor berinteraksi dan mentransfer data melalui jaringan internet, sehingga kondisi udara dapat dipantau secara real-time dan gangguan dapat terdeteksi lebih awal tanpa harus melakukan inspeksi langsung [7].

Meskipun IoT memungkinkan pengukuran CO secara real-time, pengukuran semata tidak cukup untuk menghadapi variabilitas atmosfer yang kompleks. Konsentrasi CO sangat dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, kecepatan angin, dan kondisi cuaca lainnya. Misalnya, pada cuaca dingin, fenomena inversi termal dapat menyebabkan akumulasi CO di permukaan tanah dan meningkatkan risiko paparan [8][9]. Sistem prediktif berbasis model matematis diperlukan untuk mengantisipasi kondisi-kondisi tersebut. Dengan demikian, prediksi memberikan keunggulan dalam perencanaan dan mitigasi dini terhadap paparan polutan.

Berdasarkan latar belakang di atas, pada jurnal ini disampaikan pengembangan sistem pemantauan CO berbasis IoT menggunakan sensor MQ-135 yang terintegrasi dengan algoritma regresi linier untuk memprediksi persebaran polutan di wilayah industri Bekasi.

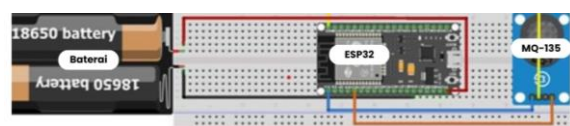
Sistem ini dirancang agar dapat mengumpulkan, mengolah, dan menampilkan data secara real-time melalui platform ThingSpeak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT serta mengevaluasi performa sistem dalam mendeteksi konsentrasi CO. Teknologi ini diharapkan dapat membantu dalam mitigasi polusi udara dengan menyediakan informasi yang akurat dan cepat, sehingga langkah preventif dapat dilakukan lebih efektif.

Selain itu, algoritma machine learning seperti regresi linier digunakan untuk memodelkan hubungan antara faktor meteorologi dan konsentrasi CO berdasarkan data historis. Pada penelitian ini, regresi linier diterapkan secara terpisah setelah pengumpulan data bulan November selesai dilakukan. Model ini bertujuan mengidentifikasi pola hubungan antar variabel guna menghasilkan prediksi konsentrasi CO di bulan Desember [6]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa regresi linier cukup efektif dalam menghasilkan prediksi awal dengan kompleksitas komputasi yang rendah [7]. Oleh karena itu, pendekatan ini dimanfaatkan sebagai langkah awal dalam membangun sistem prediktif berbasis data pemantauan CO secara real-time.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu perancangan sistem monitoring CO, pengumpulan data konsentrasi CO dan meteorologi, pemodelan prediksi CO, evaluasi model prediksi CO, dan visualisasi hasil prediksi CO.

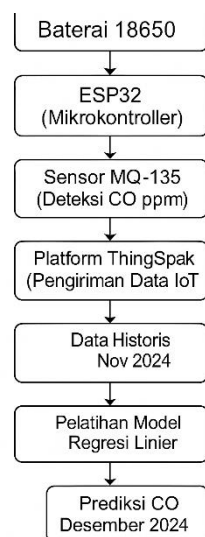
Komponen yang dibutuhkan dalam perancangan sistem monitoring CO meliputi ESP32 sebagai mikrokontroler, sensor gas MQ-135 untuk mendeteksi konsentrasi polutan CO, dan baterai Li-18650 sebagai objek penelitian. Adapun rancangan skema rangkaian sistem monitoring CO ditunjukkan pada **Gambar 1**.



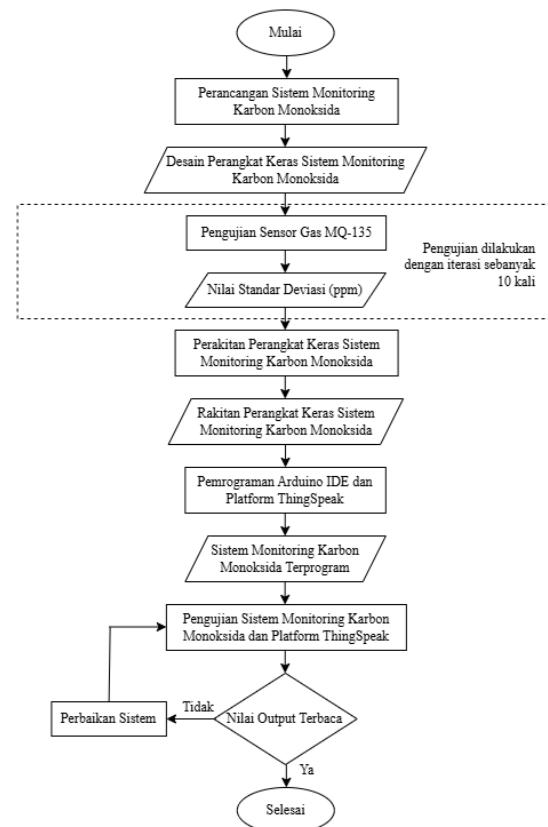
Gambar 1. Wiring Komponen Sistem Monitoring Polutan CO

Secara singkat, sistem monitoring karbon monoksida (CO) berbasis IoT dirancang menggunakan sensor MQ-135 dan

mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan platform ThingSpeak untuk pengumpulan dan transmisi data secara real-time seperti yang ditunjukkan oleh diagram blok pada **Gambar 2**. Sensor MQ-135 mendeteksi konsentrasi CO di lingkungan industri, kemudian data yang diperoleh dikirimkan ke ESP32 untuk diproses. Hasil pengukuran ditransmisikan ke ThingSpeak dan dapat dipantau secara jarak jauh melalui perangkat seperti *smartphone*. Pengembangan sistem ini dilakukan secara iteratif menggunakan metode Agile untuk memastikan penyempurnaan fitur berdasarkan umpan balik dari setiap tahap pengujian. Selain itu, hasil pengukuran CO dibandingkan dengan data uji emisi CO dari alat *Emission Gas Analyzer* di bengkel sebagai kalibrator untuk mengevaluasi standar deviasi sistem dalam kondisi nyata. Selanjutnya, diagram alir sistem monitoring diperlihatkan pada **Gambar 3**.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Monitoring CO



Gambar 3. Diagram Alir Sistem Monitoring CO

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan Pengujian Sistem Monitoring CO

Karakteristik statik sistem monitoring CO menggunakan sensor MQ-135 ditentukan melalui analisis standar deviasi untuk menilai kestabilan dan keandalannya dalam menghasilkan data yang konsisten. Standar deviasi menggambarkan tingkat variasi hasil pengukuran sensor terhadap nilai rata-rata, yang menunjukkan fluktuasi dalam pembacaan. Analisis dilakukan dengan membandingkan output sensor MQ-135 dalam ppm sebagai nilai terukur dengan nilai CO dalam % vol dari alat uji emisi sebagai nilai sebenarnya. Pengujian dilakukan dalam 10 iterasi dengan jeda 5 detik untuk memperoleh data yang representatif. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi tingkat persentase standar deviasi sensor MQ-135 dalam mendeteksi CO secara akurat.

Standar deviasi merupakan parameter statistik penting dalam pengukuran instrumen untuk menilai variasi data terhadap rata-rata, yang mencerminkan ketidakpastian dan

konsistensi hasil pengukuran [8]. Sebagai indikator keandalan sensor, standar deviasi digunakan untuk mengevaluasi respons sensor terhadap input yang diberikan. Secara matematis, standar deviasi dirumuskan dalam **Persamaan 1** [9]. Konversi nilai CO dari % vol ke ppm dilakukan menggunakan **Persamaan 2** dengan faktor skala 10.000 untuk menyesuaikan basis satuan. Hasil perhitungan rata-rata standar deviasi dari data pengujian tercantum pada **Tabel 1**.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$ppm = \% \text{ vol} \times 10000 \quad (2)$$

Tabel 1. Data Pengujian CO Sensor MQ-135

Emission Gas Analyzer Sukyoung SY-GA401 (ppm)	Sensor MQ-135 (ppm)	Selisih (ppm)
400	320	-80
500	375	-125
400	310	-90
600	450	-150
500	400	-100
500	390	-110
500	385	-115
500	395	-105
500	380	-120
500	375	-125
Standar deviasi (ppm)		19,89

Dalam karakteristik statik sensor, standar deviasi menunjukkan presisi pengukuran terhadap alat referensi, mencerminkan sejauh mana hasil pengukuran dapat diulang dalam kondisi yang sama. Standar deviasi tinggi mengindikasikan ketidakkonsistenan sensor dalam menghasilkan data, sehingga kurang andal untuk aplikasi dengan kebutuhan presisi tinggi. Sebaliknya, standar deviasi rendah menunjukkan kestabilan dan konsistensi sensor dalam kondisi tetap. Dengan nilai 19,89 ppm yang masih menunjukkan fluktuasi besar, sensor MQ-135 memerlukan optimasi melalui kalibrasi atau kompensasi faktor lingkungan. Oleh karena itu, standar deviasi menjadi faktor utama dalam menentukan kualitas pengukuran dan kelayakan penggunaan sensor.

Pengumpulan Data Konsentrasi CO dan Meteorologi

Sistem penyimpanan cloud yang terintegrasi dengan IoT menjadi dasar dalam transmisi dan pengumpulan data secara real-time. Implementasi *cloud storage* memungkinkan penyimpanan dan sinkronisasi data secara online, seperti yang difasilitasi oleh platform ThingSpeak. ThingSpeak adalah platform IoT berbasis cloud dengan protokol MQTT yang mendukung pengumpulan, penyimpanan, analisis, dan visualisasi data sensor. Data yang dikirim oleh perangkat IoT disimpan dalam kanal dan field ThingSpeak sesuai konfigurasi. Dengan integrasi ini, sistem monitoring polutan karbon monoksida berbasis IoT dapat menghubungkan sensor MQ-135 ke perangkat IoT yang terhubung ke internet [10].

Pengumpulan data konsentrasi CO, suhu, kelembapan, kecepatan angin, dan cuaca dilakukan secara otomatis dan real-time menggunakan platform ThingSpeak melalui pemrograman pada Arduino IDE. Kode pemrograman dirancang untuk mengotomatisasi pengambilan data, termasuk algoritma konversi konsentrasi CO berdasarkan output sensor MQ-135. Sensor MQ-135 bersifat universal dalam mendeteksi gas, sehingga diperlukan rumus konversi spesifik yang ditambahkan pada kode pemrograman Arduino IDE dengan parameter RL sebesar 2,5 k Ω dan Ro sebesar 10 k Ω dari referensi jurnal. Mikrokontroler mengolah dan mengonversi data sensor secara internal sebelum mengirimkan hasil pembacaan CO ke ThingSpeak. Selain itu, kode pemrograman memastikan setiap data terklasifikasi dengan tepat pada field ThingSpeak guna menjaga struktur data yang sistematis.



Gambar 4. Grafik Sistem Monitoring Polutan CO

Gambar 4 menampilkan grafik sistem monitoring CO yang menunjukkan fluktuasi konsentrasi CO pada 31 Desember 2024. Keterbatasan entry data dalam format waktu UTC pada ThingSpeak menyebabkan visualisasi

hanya menampilkan data terbaru tanpa mencakup tren historis November–Desember 2024. Pengambilan data dilakukan setiap hari kerja pukul 08.00–16.00 dengan 10 iterasi per jam dalam jeda 6 menit. Konsentrasi CO pada tanggal tersebut berkisar antara 400–450 ppm dengan beberapa lonjakan yang lebih dipengaruhi oleh rentang data dibandingkan perubahan signifikan. Faktor eksternal seperti kondisi lingkungan dan variabel meteorologi turut memengaruhi variasi emisi CO, menghasilkan pola konsentrasi yang tidak stabil.

Penggunaan Algoritma *Machine Learning* Regresi Linier

Algoritma regresi linier digunakan untuk memprediksi konsentrasi CO dengan mengidentifikasi korelasi antara faktor meteorologi sebagai variabel independen dan konsentrasi CO sebagai variabel dependen. Proses ini mencakup tahap *pre-processing*, pembagian dataset menggunakan *train_test_split*, pelatihan model dengan *LinearRegression()*, serta evaluasi menggunakan RMSE, MSE, MAE, dan *R-squared* sebagaimana dijelaskan pada **Gambar 5**. Metrik evaluasi tersebut digunakan untuk menilai akurasi model berdasarkan kedekatan prediksi dengan nilai sebenarnya [11]. Implementasi dilakukan menggunakan Python dengan *library* *scikit-learn*, *Pandas*, dan *Matplotlib* untuk pemodelan dan visualisasi. Fungsi-fungsi tersebut mendukung interpretasi hasil evaluasi guna meningkatkan keandalan model prediksi.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.preprocessing import StandardScaler, PolynomialFeatures
from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error, r2_score
from sklearn.model_selection import train_test_split, cross_val_score

# Function to load and clean the dataset
def load_and_clean_data(file_path):
    data = pd.read_csv(file_path)
    # Clean column names to remove extra quotes or whitespace
    data.columns = data.columns.str.strip().str.replace('"', '').str.replace("'", '')
    return data

# Step 1: Load the datasets
november_data = load_and_clean_data('/content/november_data.csv')
december_data = load_and_clean_data('/content/december_data.csv')

# Print cleaned column names for debugging
print("Cleaned November Data Columns:")
print(november_data.columns)

print("Cleaned December Data Columns:")
print(december_data.columns)

# Step 2: Prepare the data
X = november_data[['Temperature (°C)', 'Humidity (%)', 'Wind Speed (m/s)']]
y = november_data['CO']

# Step 3: Feature Scaling
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(X)

# Step 4: Add Polynomial Features (Optional)
poly = PolynomialFeatures(degree=2, include_bias=False)
X_poly = poly.fit_transform(X_scaled)

# Step 5: Split the data into training and testing sets
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_poly, y, test_size=0.2, random_state=42)
```

Gambar 5. Pemrograman Algoritma *Machine Learning* Regresi Linier

Regresi linier merupakan algoritma *machine learning* yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu variabel dependen dan satu atau lebih variabel independen. Tujuan dari regresi linier, yaitu untuk menemukan hubungan linier antara variabel-variabel tersebut dan memprediksi nilai variabel dependen berdasarkan nilai variabel independen. Secara matematis, algoritma ini memodelkan hubungan dalam bentuk persamaan garis lurus yang dirumuskan dalam **Persamaan 2.1** berikut.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad (3)$$

dengan Y adalah variabel dependen, $X_1, X_2, \dots, X_n$ adalah variabel independen, β_0 adalah intercept (titik potong dengan sumbu Y), $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ adalah koefisien yang menunjukkan seberapa besar pengaruh masing-masing variabel independen terhadap variabel dependen, dan ϵ adalah error (kesalahan atau deviasi antara prediksi dan nilai aktual). Dalam konteks *machine learning*, regresi linier digunakan untuk memprediksi nilai kontinu dari suatu variabel berdasarkan nilai variabel lain. Dengan kata lain, model ini dapat bekerja berdasarkan asumsi adanya hubungan linier antara variabel input dan output, sehingga prediksi dapat dilakukan dengan akurat menggunakan garis regresi yang dihasilkan [11].

Metrik evaluasi digunakan untuk menilai performa model *machine learning* berdasarkan tingkat kesalahan atau akurasi prediksi dibandingkan dengan data aktual. Dalam evaluasi prediksi konsentrasi CO menggunakan regresi linier, metrik RMSE, MSE, MAE, dan *R-squared* digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan dan keakuratan model. RMSE, MSE, dan MAE menggambarkan sejauh mana prediksi model menyimpang dari nilai aktual dalam satuan atau kuadrat satuan data, sedangkan *R-squared* menunjukkan proporsi variansi data yang dijelaskan oleh model [11]. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa performa model dapat diinterpretasikan melalui nilai RMSE, MSE, MAE, dan *R-squared*. Nilai-nilai tersebut disajikan dalam **Tabel 2** sebagai representasi tingkat kesalahan dan keakuratan model secara keseluruhan.

Tabel 2. Metrik Evaluasi Model Regresi Linier

Metrik Evaluasi	Nilai
RMSE	0,92
MSE	0,85
MAE	0,74
R-Squared	0,07

Hasil evaluasi model regresi linier untuk prediksi konsentrasi CO bulan Desember menunjukkan nilai RMSE dan MSE sebesar 0,923 serta MAE sebesar 0,745. Nilai-nilai ini dihitung berdasarkan rata-rata selisih kuadrat (MSE), akar kuadrat dari MSE (RMSE), dan rata-rata selisih absolut antara nilai aktual dan prediksi (MAE). Meskipun menunjukkan tingkat kesalahan prediksi yang moderat, nilai *R-squared* hanya mencapai 0,079, yang mengindikasikan model hanya mampu menjelaskan 7,9% variansi data. Berdasarkan klasifikasi Chicco et al. (2021) dalam **Tabel 3**, model regresi linier ideal memiliki *R-squared* di atas 0,8. Dengan demikian, performa model ini masih jauh dari standar ideal, mengindikasikan kendala dalam pengolahan data serta keterbatasan model dalam menangkap pola hubungan variabel meteorologi dengan konsentrasi CO.

Tabel 3. Standar Nilai Evaluasi Model Regresi Linier

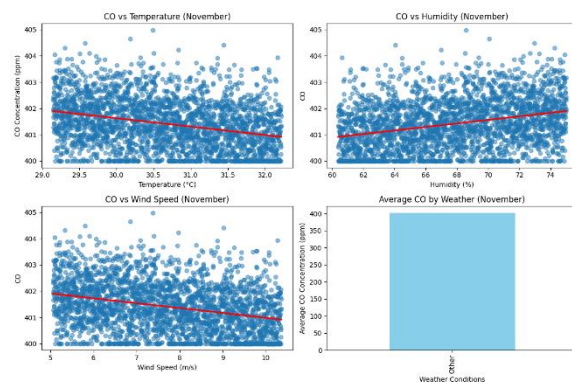
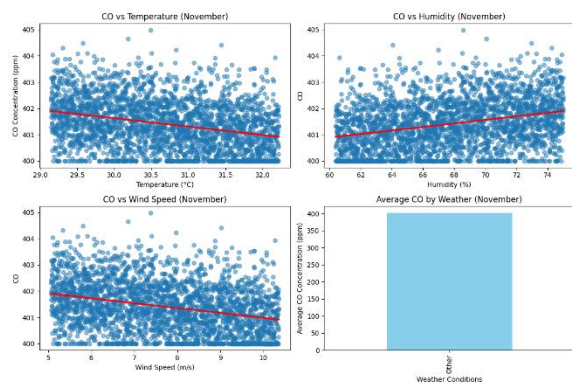
Metrik	Nilai Baik	Penjelasan
MAE	Mendekati 0, tergantung skala data	Mengukur rata-rata perbedaan absolut, Nilai rendah menunjukkan prediksi akurat
MSE	Mendekati 0	Mengukur rata-rata kuadrat error. Sensitif terhadap outlier
RMSE	Mendekati 0 sesuai dengan data	Serupa dengan MSE, memberikan satuan yang sama dengan target data
R ²	0,7-1,0	Mengukur proporsi variabilitas yang dijelaskan oleh model. Semakin dekat ke 1 semakin baik

Tingginya nilai metrik evaluasi terutama disebabkan oleh skala data yang kecil, dengan hanya 2790 baris data untuk bulan Desember, sehingga model kesulitan menangkap pola kompleks dan variabilitas dalam data. Selain itu, distribusi data yang kurang merata turut mempengaruhi hasil evaluasi model. Kombinasi skala dataset yang terbatas dan distribusi data yang tidak representatif berkontribusi pada rendahnya nilai *R-squared*, mengindikasikan bahwa regresi linier kurang optimal dalam kondisi ini. Untuk mengatasi kendala tersebut, diperlukan peningkatan skala dan kualitas data agar model memiliki lebih banyak informasi

untuk pelatihan dan pengujian. Selain itu, penyeimbangan jumlah data dari berbagai kondisi cuaca dalam lingkup yang lebih luas dapat membantu meningkatkan akurasi model.

Visualisasi Hasil Prediksi dengan Streamlit

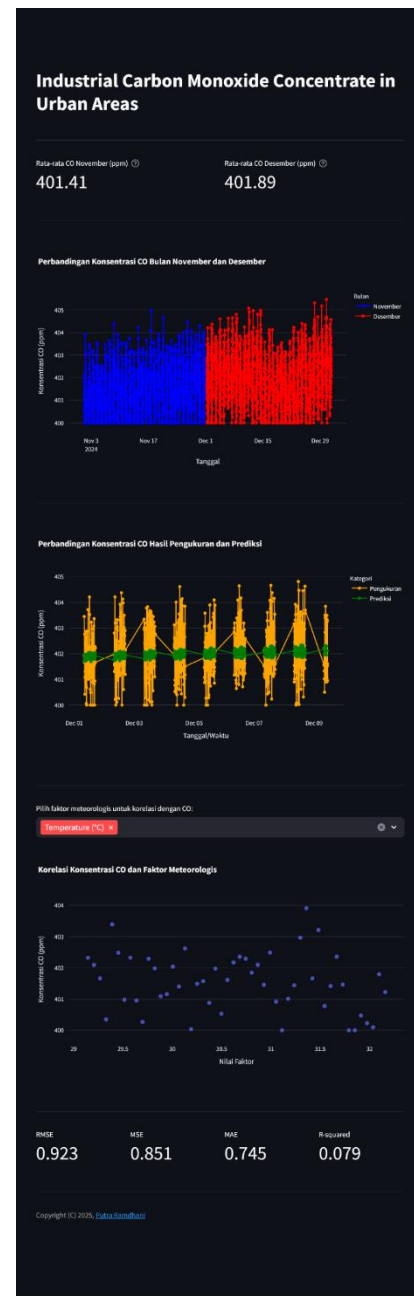
Regresi linier digunakan dalam machine learning untuk menganalisis hubungan antara faktor meteorologi seperti suhu, kelembapan, dan kecepatan angin terhadap konsentrasi CO [12]. Hasil prediksi divisualisasikan menggunakan scatter plot dengan garis regresi untuk mengidentifikasi tren perubahan konsentrasi CO. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi dampak faktor meteorologi terhadap polusi udara serta analisis performa model prediksi dalam berbagai kondisi.

**Gambar 6.** Grafik Korelasi Konsentrasi CO dan Faktor Meteorologi Bulan November 2024**Gambar 7.** Grafik Korelasi Konsentrasi CO dan Faktor Meteorologi Bulan Desember 2024

Berdasarkan **Gambar 6** dan **7**, hubungan antara konsentrasi CO dan suhu menunjukkan tren menurun pada November dan Desember, sebagaimana ditunjukkan oleh garis regresi dengan gradien negatif. Garis ini merepresentasikan pola umum hubungan antara CO dan faktor meteorologi dengan mereduksi efek fluktuasi individu. Peningkatan suhu

cenderung menurunkan konsentrasi CO, kemungkinan akibat peningkatan dispersi udara atau reaksi kimiawi CO dengan polutan lain. Efek ini lebih jelas pada Desember, menunjukkan pengaruh suhu yang lebih signifikan dibandingkan November. Temuan ini mengindikasikan bahwa suhu yang merupakan salah satu faktor meteorologi termasuk dalam faktor penting yang memengaruhi konsentrasi CO di udara.

Hubungan antara konsentrasi CO dan faktor meteorologi menunjukkan pola yang bervariasi, dengan kelembapan memiliki korelasi positif, sementara kecepatan angin menunjukkan korelasi negatif. Peningkatan kelembapan cenderung mempertahankan CO di atmosfer lebih lama akibat stabilitas udara yang lebih tinggi dan berkurangnya turbulensi, terutama pada Desember. Sebaliknya, peningkatan kecepatan angin mempercepat dispersi CO melalui adveksi dan turbulensi, sehingga menurunkan konsentrasinya, dengan efek yang lebih signifikan pada Desember dibandingkan November. Cuaca juga berperan, di mana kondisi cerah cenderung meningkatkan akumulasi CO di permukaan akibat stabilitas udara, sedangkan badai petir dapat mendukung dispersi vertikal melalui turbulensi atmosfer. Namun, pengaruh cuaca terhadap konsentrasi CO dalam skala bulanan tidak terlihat signifikan, kemungkinan akibat variasi lokal yang tidak tercermin dalam dataset yang terbatas.



Gambar 8. Visualisasi CO di Streamlit

Berdasarkan visualisasi Streamlit pada **Gambar 8**, rata-rata konsentrasi CO di udara tercatat 401,41 ppm pada November 2024 dan 401,89 ppm pada Desember 2024. Nilai ini jauh melampaui Nilai Ambang Batas (NAB) 25 ppm untuk paparan 8 jam sehari sesuai Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi (2011) [13]. Konsentrasi CO yang tinggi menunjukkan kondisi yang tidak sesuai dengan standar keselamatan kerja. Paparan CO pada level ini berpotensi menimbulkan dampak kesehatan serius bagi tenaga kerja. Oleh karena itu, diperlukan upaya mitigasi untuk mengurangi risiko akibat tingginya kadar CO di udara.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, sistem monitoring polutan CO berbasis IoT dengan sensor MQ-135 berhasil diimplementasikan dan mampu mengukur konsentrasi CO secara real-time menggunakan platform ThingSpeak. Namun, sensor memiliki standar deviasi 19,89 ppm, yang menunjukkan keterbatasan akurasi dalam mendeteksi CO hingga 450 ppm. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi CO di lokasi penelitian melebihi Nilai Ambang Batas (NAB), sehingga berpotensi membahayakan kesehatan tenaga kerja. Model prediksi menggunakan regresi linier menunjukkan adanya hubungan antara faktor meteorologi dan konsentrasi CO, tetapi performa model kurang baik, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai R-squared sebesar 0,079. Hal ini mengindikasikan bahwa model belum mampu menjelaskan variabilitas data dengan baik akibat keterbatasan jumlah dan skala data yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. S. Suroshe, P. G. Student & Dharpal S. V., (2022). "Prediction of Air Quality Index Using Regression Models, *GIS SCIENCE JOURNAL*, vol. 9, no. 8, p. 576, 2022.
- [2] S. D. Latif, M. Almalayih, A. Yafouz, A. N. Ahmed, N. Zaini, D. Irwan, N. AlDahoul, M. Sherif, and A. El-Shafie, "Prediction of atmospheric carbon monoxide concentration utilizing different machine learning algorithms: A case study in Kuala Lumpur, Malaysia, *Environmental Technology & Innovation*, vol. 32, p. 103387, 2023
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103387>
- [3] B. Harpad, S. Salmon, dan R. M. Saputra, "Sistem monitoring kualitas udara di kawasan industri dengan Nodemcu Esp32 berbasis Iot", *Jurnal Informatika Wicida*, vol. 12, no. 2, p. 39–47, 2022.
<https://doi.org/10.46984/inf-wcd.1955>
- [4] N. M. O. W. Sari, E. Hani, Agung H. S. "Prediksi Karbon Monoksida Menggunakan Model Machine Learning Berdasarkan Perbandingan Model Time Series Studi Kasus DKI Jakarta", *Jurnal Kolaboratif Sains*, vol. 7, no. 3, p. 13, 2024.
<https://doi.org/10.56338/jks.v7i3.4819>
- [5] M. D. Safira, A. Syafiuddin, H. Z. Fasya, dan B. Setianto, "Literature review: kualitas udara di kawasan industri di berbagai lokasi di Indonesia", vol. 9, 2022.
<http://dx.doi.org/10.32883/jph.v9i2.1988>
- [6] A. Ksibi, A. Salhi, A. Alluhaidan, S. A. El, "Insights for Wellbeing: Predicting Personal Air Quality Index Using Regression Approach", 2020.
- [7] S. B. Sonu, A. Suyampulingam, "Linear Regression Based Air Quality Data Analysis and Prediction using Python", *2021 IEEE Madras Section Conference (MASCOS)*, p. 1–7, 2021.
<https://doi.org/10.1109/MASCOS51689.2021.9563432>
- [8] A. Alhashimi, "Statistical Sensor Calibration Algorithms" *Elektronisk resurs*, Luleå University of Technology, 2018.
- [9] A. S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [10] S. Pasha, "Thingspeak Based Sensing and Monitoring System for IoT with Matlab Analysis", vol. 2, No. 6, 2016.
<https://www.neliti.com/id/publications/263492/thingspeak-based-sensing-and-monitoring-system-for-iot-with-matlab-analysis#cite>
- [11] R. Ritonga, I. R. Munthe, A. P. Juledi, dan Masrizal, "Optimalisasi kinerja pegawai pertanian Studi kasus penggunaan algoritma regresi linear", PT. Literasi Nusantara Abadi Grup. https://repository-penerbitlitnus.co.id/id/eprint/309/1/OPTIMALISASI%20KINERJA%20PEGAWAI%20PERTANIAN_Full.pdf
- [12] A. Ali, dan W. K. Mashwani, *A Supervised Machine Learning Algorithms: Applications, Challenges, and Recommendations*, 2023.
- [13] Kementerian Tenaga Kerja dan Transmigrasi, *Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor PER.13/MEN/X/2011 Tahun 2011 Tentang Nilai Ambang Batas Faktor Fisika dan Faktor Kimia di Tempat Kerja*, , October 2011.
<https://peraturan.go.id/id/permenakertrans-no-per-13-men-x-2011-tahun-2011>

Pemodelan inversi data anomali gravitasi satelit untuk mengestimasi keberadaan dapur magma kompleks gunungapi Sindoro-Sumbing, Jawa Tengah, Indonesia

Insyahita Akmalia Mutaabidah, Sehah*, Zaroh Irayani

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman,
Jl. DR. Soeparno No.61, Karangwangkal, Purwokerto Utara, Banyumas 53122

*email: sehah@unsoed.ac.id

Abstrak – Pemodelan inversi tiga dimensi (3D) telah dilakukan untuk memodelkan struktur geologi dapur magma pada kompleks Gunungapi Sindoro dan Sumbing. Pemahaman struktur bawah permukaan gunungapi penting dalam upaya mitigasi bencana dan peningkatan sistem peringatan dini. Data yang digunakan adalah data anomali gravitasi satelit resolusi tinggi dari Global Gravity Model Plus (GGMplus) dengan resolusi spasial 220 m di daerah penelitian dengan luas 423,81 km². Hasil pengaksesan data GGMplus adalah data gravity disturbance dengan nilai yang berkisar 69,44–299,01 mGal. Data telah diolah dengan menerapkan koreksi Bouguer untuk memperoleh data Anomali Bouguer Sederhana (ABS) dan koreksi terrain untuk memperoleh data Anomali Bouguer Lengkap (ABL). Selanjutnya reduksi data ke bidang datar dilakukan dengan menggunakan aproksimasi Deret Taylor. Langkah berikutnya adalah pemisahan data anomali regional dan residual dengan menggunakan metode upward continuation. Pemisahan data anomali tersebut menghasilkan data anomali residual dengan rentang nilai -74,96–29,05 mGal. Hasil pemodelan inversi 3D pada data anomali gravitasi residual menunjukkan blok anomali rendah dengan nilai densitas berkisar 1,50 ~ 1,59 g/cm³, yang terletak pada posisi geografis 109,989° BT dan -7,304° LS dengan kedalaman sekitar 1–5 km, diinterpretasikan sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro. Hasil pemodelan juga menunjukkan blok anomali rendah pada posisi geografis 110,071° BT dan -7,385° LS dengan kedalaman berkisar 1–6 km, yang diinterpretasikan sebagai dapur magma Gunung Sumbing.

Kata Kunci: Komplek Gunungapi Sindoro-Sumbing, dapur magma, anomali gravitasi satelit, pemodelan inversi.

Abstract – Three-dimensional inversion modeling has been carried out to model the geological structure of the magma chamber in the Sindoro and Sumbing Volcanic complexes. Understanding the subsurface structure of volcanoes is important in disaster mitigation efforts and improving early warning systems. The data used is high-resolution satellite gravity anomaly data from the Global Gravity Model Plus (GGMplus) with a spatial resolution of 220 m in the research area with an area of 423.81 km². The results of accessing GGMplus data are gravity disturbance data with a value range of 69.44 – 299.01 mGal. Data has been processed by applying Bouguer correction to obtain Simple Bouguer Anomaly (SBA) data and terrain correction to obtain Complete Bouguer Anomaly (CBA) data. Furthermore, data reduction was carried out on a horizontal surface using the Taylor Series approximation. The next step is regional and residual anomaly data was separated using the upward continuation method. Separation of the anomaly data produces residual data with values ranging from -74.96 – 29.05 mGal. The results of 3D inversion modeling on residual anomaly data show a low anomaly block with density values ranging from 1.50 ~ 1.59 g/cm³, located at a geographical position of 109.989° E and -7.304° S with a depth of around 1 - 5 km, interpreted as the magma chamber of Sindoro Volcano. The modeling results also show a low anomaly block at a geographic position of 110.071° E and -7.385° S with a depth ranging from 1 – 6 km, interpreted as the magma chamber of Sumbing Volcano.

Key words: Sindoro-Sumbing Volcanic complexes, magma chamber, satellite gravity anomaly, inversion modelling.

PENDAHULUAN

Metode gravitasi merupakan salah satu metode eksplorasi geofisika yang memanfaatkan variasi nilai medan gravitasi yang terukur di permukaan bumi [1]. Nilai medan gravitasi dipengaruhi massa jenis, khususnya batuan yang terdapat di dalam kerak bumi [2]. Selain itu variasi nilai medan gravitasi juga dipengaruhi oleh struktur geologi bawah permukaan dan topografi pada permukaan bumi yang kasar, sehingga metode gravitasi dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis-jenis batuan dan struktur geologi bawah permukaan berdasarkan variasi nilai

medan gravitasi di permukaan bumi [3]. Metode gravitasi dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi model struktur geologi bawah permukaan seperti patahan (fault), lipatan (fold), cekungan air tanah (groundwater basin), dapur magma, batuan dasar (*basement*), dan sebagainya [3,4].

Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing merupakan dua gunungapi aktif yang terletak di Provinsi Jawa Tengah. Dua gunungapi ini terletak pada bagian utara zona tumbukan antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia [5]. Tumbukan dua lempeng tektonik mengakibatkan munculnya jalur

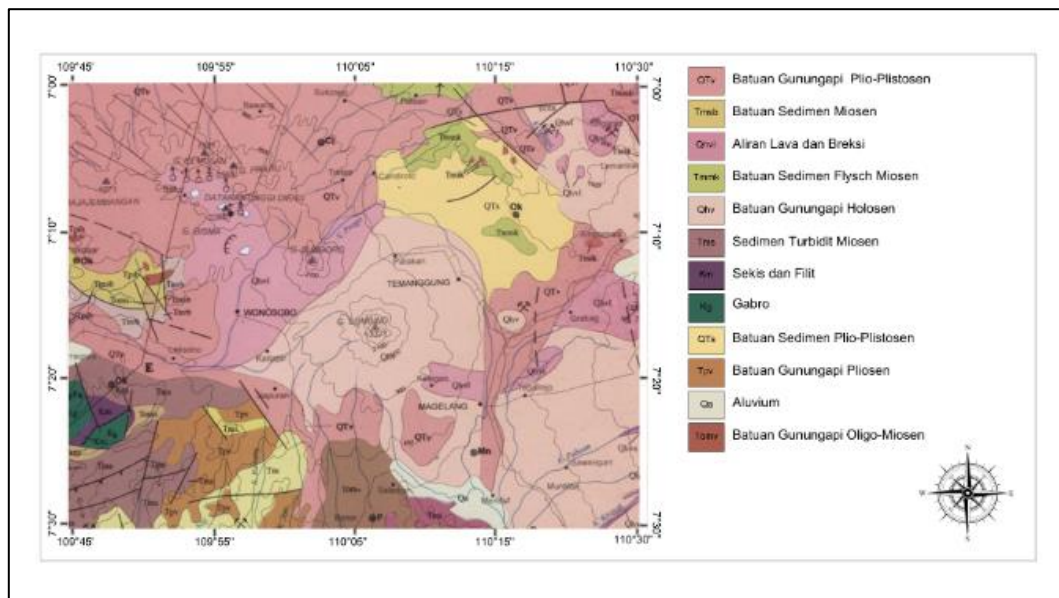
magmatisme yang memanjang di Pulau Jawa. Kemudian erupsi terjadi di sekitar jalur tersebut hingga tumbuh banyak gunungapi aktif di Pulau Jawa dan pulau-pulau lain di sekitar zona tumbukan. Daerah penelitian termasuk ke dalam Zona Gunungapi Kuarter yang memanjang dari barat hingga timur Pulau Jawa dan terbentuk dari hasil pengendapan material dan batuan gunungapi berumur kuarter [6]. Letusan gunung berapi dapat menghasilkan awan panas, aliran lava, lahar, dan gas beracun. Untuk itu, pemahaman terkait struktur bawah permukaan gunungapi penting dalam upaya mitigasi bencana dan peningkatan sistem peringatan dini.

Gunungapi Sindoro memiliki ketinggian ± 3150 mdpl, sedangkan Gunungapi Sumbing memiliki ketinggian ± 3371 mdpl [7]. Dua buah gunungapi tersebut terletak di lokasi yang relatif berdekatan, tetapi diperkirakan memiliki karakteristik letusan yang berbeda. Gunungapi Sindoro tertutup aliran lava dan breksi serta lahar dan kubah lava bersusunan andesit basaltik [8]. Sedangkan Gunungapi Sumbing tertutup batuan vulkanik Holosen berupa breksi gunungapi, aglomerat, lahar, lava, tuf, lapili, dan boulder lava [8]. Secara lengkap peta geologi kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan beberapa satuan stratigrafi dan litologinya ditunjukkan pada Tabel 1 [8].

Tabel 1. Satuan stratigrafi dan litologi batuan bawah permukaan kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing [8]

No.	Formasi Batuan	Satuan Litologi	Umur Batuan
1.	Aluvium (Qa)	Kerakal, kerikil, pasir lempung, lumpur, pecahan koral dan batuapung.	Holosen
2.	Aliran Lava dan Breksi (Qhvl)	Aliran lava dan breksi, lahar dan kubah lava, bersusunan andesit basal.	Holosen
3.	Batuan Gunungapi Holosen (Qhv)	Breksi gunungapi, aglomerat, lahar, lava, tuf, lapilli, dan bom.	Holosen
4.	Batuan	Breksi gunungapi	Pliosen

	Gunungapi Pliosen (Tpv)	bersisipan tuf dan batupasir tufan.	
5.	Batuan Gunungapi Plio-Plistosen (QTV)	Breksi gunungapi, aliran lava, tuf, breksi aliran, lahar, batupasir tufan dan batulempung tufan bersisipan tuf halus kasar.	Plio-Plistosen
6.	Batuan Sedimen Plio-Plistosen (QTs)	Perselingan breksi gunungapi, tuf kasar, konglomerat, tuf halus dan batulempung tufan.	Plio-Plistosen
7.	Batuan Sedimen Miosen (Tmsb)	Serpil, napal, batupasir gampingan.	Miosen
8.	Batuan Sedimen Flysch Miosen (Tmmk)	Bagian bawah berupa batuan sedimen tipe <i>flysch</i> berlapis, terdiri atas perselingan batulanau, batulempung, batupasir gampingan dan batugamping pasiran.	Miosen
9.	Sedimen Turbidit Miosen (Tms)	Perselingan konglomerat, batupasir, batulempung, napal, tuf breksi dan riolit.	Miosen
10.	Batuan Gunungapi Oligo-Miosen (Tomv)	Breksi gunungapi, tuf, lava bersusun andesit-basal dan dasit, berselingan dengan batupasir sela, konglomerat dan setempat batugamping serta breksi batuapung, tuf dasit dengan retas diorit.	Miosen
11.	Sekis dan Filit (Km)	Sekis ambifol-mikaglofan dan filit yang terdapat sebagai kepungan tektonik	Kapur
12.	Gabro (Kg)	Gabro yang terdapat sebagai kepungan tektonik	Kapur



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian; Kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing Jawa Tengah [8]

LANDASAN TEORI

A. Metode Gravitasi

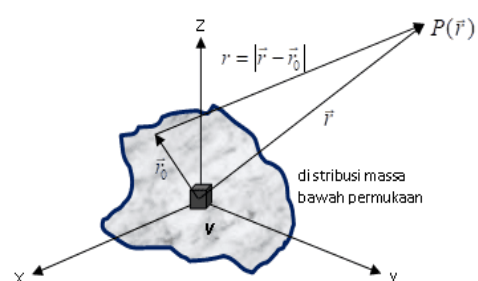
Prinsip dasar metode gravitasi dalam eksplorasi Geofisika adalah hukum Newton tentang gaya tarik-menarik antara dua massa, dimana besar gaya antara dua buah titik massa m_1 dan m_2 yang terpisah dengan jarak r dan dapat dinyatakan dengan persamaan [9]:

$$\vec{F}(\vec{r}) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

F merupakan gaya tarik-menarik antara dua titik massa (N), G adalah konstanta gravitasi umum ($6,67428 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$), m_1 dan m_2 adalah massa dua titik yang berbeda (kg), r adalah jarak antar pusat massa (m), dan $\hat{r}$ adalah arah vektor. Telford et.al. [9] telah menjabarkan Persamaan (1) untuk memperoleh nilai potensial gravitasi pada suatu titik P di luar volume V seperti ditunjukkan pada **Gambar 2** yang dapat dinyatakan dengan persamaan [9]:

$$U_P(\vec{r}) = - \int_V \frac{G}{|\vec{r}^2 - \vec{r}_0^2|} dm = -G \int_V \frac{\rho(\vec{r}_0)}{|\vec{r}^2 - \vec{r}_0^2|} d^3 \vec{r}_0 \quad (2)$$

dengan

$$|\vec{r}^2 - \vec{r}_0^2| = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2r r_0 \cos \gamma}$$


Gambar 2. Potensial gravitasi pada titik P di permukaan bumi akibat distribusi massa yang kontinu di bawah permukaan [9].

Jika integral volume Persamaan (2) diterapkan untuk seluruh volume bumi, maka potensial gravitasi pada permukaan bumi dapat diperoleh. Adapun kuat medan gravitasi bisa diperoleh dengan cara mendiferensialkan potensial gravitasi tersebut sehingga menjadi [9]:

$$\vec{E}(\vec{r}) = |-\nabla U_P(\vec{r})|$$

Nilai medan gravitasi bumi sering disebut sebagai percepatan gravitasi bumi (g). Berdasarkan Persamaan (2) dan (3), nilai

percepatan gravitasi bumi dinyatakan dengan persamaan [9]:

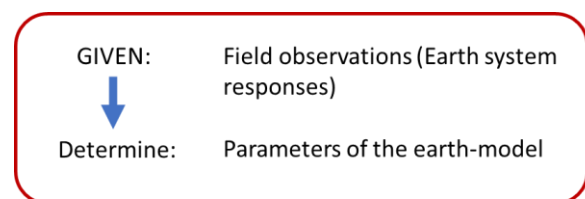
$$g(\vec{r}) = |-\vec{E}(\vec{r})| = |\nabla U_P(\vec{r})| \quad (4)$$

$$g(\vec{r}) = -G \int_V \frac{\rho(\vec{r}_0)(z_0 - z) d^3 \vec{r}_0}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} \quad (5)$$

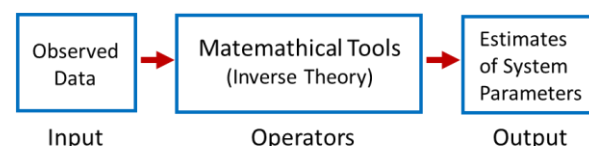
Persamaan (4) menunjukkan bahwa nilai medan gravitasi di permukaan bumi bervariasi. Variasi medan gravitasi bumi ini dipengaruhi oleh posisi geografis (bujur dan lintang), elevasi, serta distribusi massa batuan bawah permukaan bumi yang dinyatakan sebagai fungsi densitas batuan bawah permukaan.

B. Pemodelan Inversi-3D

Secara umum data anomali medan gravitasi hasil observasi di lapangan diharapkan bisa memberikan informasi sebanyak mungkin, tidak hanya terkait sifat-sifat fisis batuan saja, tetapi juga kondisi geometri batuan bawah permukaan, posisi, dan kedalamannya. Informasi itu dapat diperoleh jika relasi antara sifat-sifat fisis batuan dan data observasinya dapat diketahui. Relasi antara keduanya hampir selalu berbentuk persamaan matematis yang umumnya disebut sebagai model matematis. Berdasarkan model matematis tersebut, parameter-parameter fisis batuan dapat diekstrak dari data observasi [10]. Proses ini disebut sebagai pemodelan inversi (*inverse modelling*), seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**. Pemodelan inversi bisa diterapkan untuk membuat model geologi bawah permukaan dari pengaruh medan gravitasi daerah penelitian.



THE INVERSION MODELING



Gambar 3. Alur pemodelan data anomali gravitasi secara inversi (*inverse modeling*) [10].

Adapun proses sebaliknya, dimana kita ingin mendapatkan data prediksi hasil observasi berdasarkan parameter fisis yang sudah

diketahui disebut sebagai pemodelan maju (*forward modelling*) [10]. Permodelan maju digunakan untuk melihat respon medan gravitasi yang ditimbulkan dari model geologi yang dibuat. Dengan demikian *forward modelling* merupakan suatu proses pemodelan untuk menjabarkan data dari suatu permodelan dengan menghitung respon teoritis dan distribusi sifat dari sumber anomali. Dua jenis pemodelan ini memiliki tujuan untuk mengestimasi model geologi bawah permukaan berdasarkan data hasil observasi. Namun dalam penelitian ini pemodelan terhadap sumber anomali yang dilakukan adalah pemodelan inversi.

METODE PENELITIAN

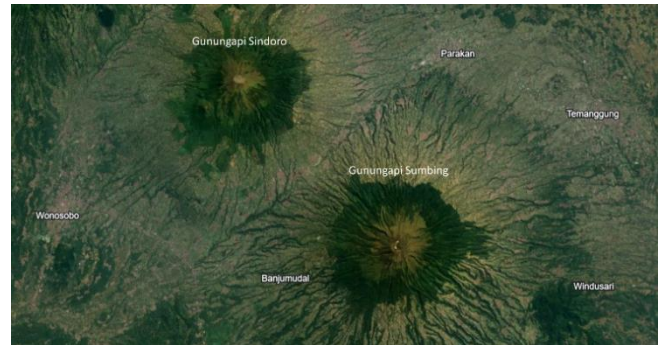
A. Lokasi Penelitian

Kegiatan penelitian ini telah dilaksanakan di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi dan Geofisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto. Data penelitian merupakan data anomali medan gravitasi citra satelit untuk kawasan Gunungapi Sindoro dan Sumbing, dengan posisi koordinat $7^{\circ}15'00''$ LU – $7^{\circ}26'24''$ LS serta $109^{\circ}57'00''$ BT – $110^{\circ}7'48''$ BT. Lokasi daerah penelitian kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing dapat dilihat dari **Gambar 3**.

B. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian meliputi laptop atau komputer yang dilengkapi dengan berbagai perangkat lunak dan program aplikasi seperti Microsoft Excel 2019, Surfer 17, Matlab 2015, Plato FTM95, Grablox 1.7, Bloxer 1.6e, dan Google Earth 7.3. Sedangkan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gravitasi dari GGMplus yang dapat diperoleh secara lengkap melalui website atau laman: <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>.

Pengaksesan data ini menghasilkan data *gravity disturbance* yang nilainya setara dengan data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas, data posisi geografis (lintang dan bujur), data geoid, serta data elevasi.



Gambar 3. Peta lokasi Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing (sumber: Google Earth).

C. Pelaksanaan Penelitian

Akuisisi data telah dilakukan melalui website GGM Plus untuk memperoleh data *gravity disturbance*, posisi geografis, data geoid, dan data elevasi. Data *gravity disturbance* setara dengan data anomali medan gravitasi terkoreksi udara bebas [11]. Data ini memiliki resolusi spasial 220 m yang jauh lebih baik dibandingkan data Topex dengan resolusi 1,85 km [11]. Selanjutnya data anomali Bouguer lengkap (ABL) diperoleh setelah dilakukan koreksi Bouguer dan terrain terhadap data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas. Data ABL tersebut masih tersebar di permukaan topografi yang dapat dituliskan sebagai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h)$ [12]. Oleh karena itu, data ABL ini harus direduksi ke bidang datar pada ketinggian rata-rata topografi [13]. Reduksi data ke bidang datar dapat dilakukan dengan pendekatan Deret Taylor seperti persamaan [13]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{(i+1)} = \Delta g(\lambda, \vartheta, h) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(h-h_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial h^n} \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{(i)} \quad (5)$$

Nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ pada persamaan (5) yang terdistribusi pada bidang datar dapat diestimasi melalui pendekatan, yaitu nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh dari proses iterasi ke- i digunakan untuk memperoleh nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ pada iterasi selanjutnya atau $(i+1)$. Proses iterasi dilakukan secukupnya, sedemikian hingga nilai yang diperoleh menunjukkan konvergen [13].

Data ABL yang diperoleh dari persamaan (5) belum bersih dari efek anomali regional. Oleh sebab itu data ABL ini harus dibersihkan dari efek regional. Data anomali regional dapat diperoleh melalui pengangkatan data ABL hingga ketinggian tertentu, sedemikian hingga pola anomalnya cenderung tetap dengan interval nilai yang sangat kecil. Proses

pengangkatan ke atas dapat dilakukan menggunakan persamaan [13]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) = \frac{\Delta h}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta g(\lambda', \vartheta', h_0)}{\sqrt{[(\lambda - \lambda')^2 + (\vartheta - \vartheta')^2 + \Delta h^2]^3}} d\lambda' d\vartheta' \quad (6)$$

Data yang diperoleh, selanjutnya dikoreksikan terhadap data ABL yang dihasilkan persamaan (5), sehingga diperoleh data anomali magnetik residual menggunakan persamaan [14]:

$$\Delta g_{res}(\lambda, \vartheta, h_0) = \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0) - \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) \quad (7)$$

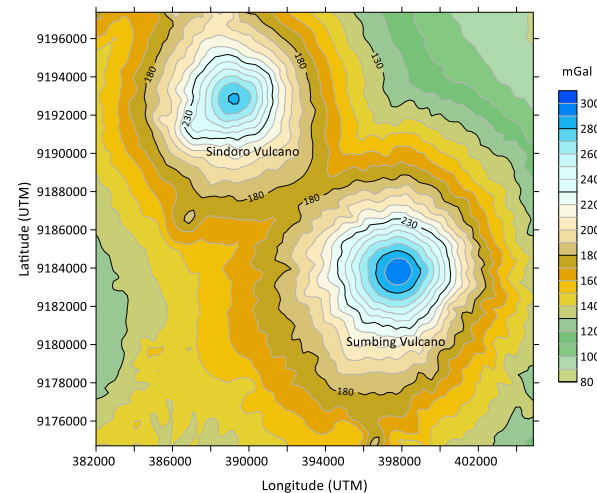
Data anomali gravitasi residual merupakan data anomali medan gravitasi yang telah bersih dari berbagai efek sumber anomali regional dan diasumsikan hanya berasosiasi dengan sumber anomali lokal yang menjadi target pada penelitian, yaitu struktur geologi bawah permukaan kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing [15]. Data anomali gravitasi residual yang diperoleh dapat langsung dimodelkan. Namun apabila masih terdapat efek dari sumber-sumber massa lokal yang kuat yang bersumber dari permukaan topografi, maka dilakukan proses pemfilteran lagi untuk menghilangkan noise-noise tersebut. Pemodelan inversi 3D dilakukan terhadap data ABL residual pada daerah penelitian [16]. Setelah mendapatkan hasil-hasil pemodelan, selanjutnya interpretasi litologi dilakukan untuk mengestimasi tipe-tipe batuan dan keberadaan dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengaksesan Data Anomali Gravitasi

Data anomali gravitasi citra satelit telah diakses melalui website GGMplus dan menghasilkan data gangguan gravitasi (*gravity disturbance*) berjumlah 15.504 data, dengan posisi geografis $7^{\circ}15'00''$ – $7^{\circ}26'24''$ LS dan $109^{\circ}57'00''$ – $110^{\circ}7'48''$ BT. Data *gravity disturbance* tersebut setara dengan anomali gravitasi terkoreksi udara bebas (*Free Air Anomaly*, FAA) [17] dengan nilai berkisar 69,45–299,01 mGal. Sedangkan elevasi daerah penelitian berkisar 385,59–3.265,55 m. Secara visual, peta kontur FAA ditunjukkan pada **Gambar 4**. Berdasarkan peta kontur FAA tersebut, Gunungapi Sumbing memiliki nilai anomali gravitasi yang relatif lebih tinggi

daripada Gunungapi Sindoro. Kondisi ini diperkirakan terkait dengan ukuran tubuh gunung, dimana Gunungapi Sumbing lebih besar dibandingkan Gunungapi Sindoro, seperti dapat dilihat pada **Gambar 3**.



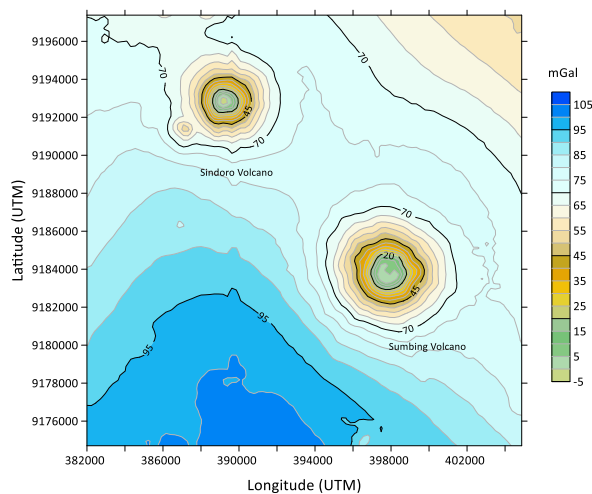
Gambar 4. Peta kontur anomali gravitasi terkoreksi udara bebas (FAA) kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing.

B. Hasil Pengolahan Data Anomali Gravitasi

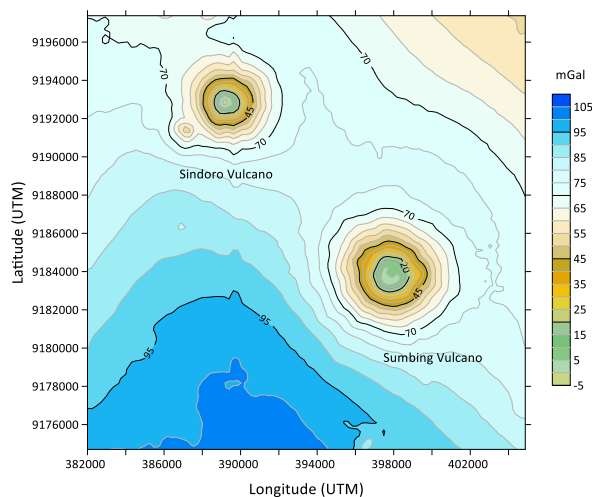
Data FAA yang telah diunduh dilakukan koreksi Bouguer dan *terrain* untuk mendapatkan data ABL. Koreksi Bouguer bertujuan untuk memperhitungkan efek tarikan massa batuan yang terdapat pada bidang *datum* dengan asumsi memiliki jari-jari tak terhingga, ketebalan h (m) dan densitas ρ (gr/cc), sehingga efek tarikan massa batuan tersebut dapat direduksi. Sedangkan koreksi *terrain* digunakan untuk mengurangi efek massa topografi di permukaan bumi yang relatif kasar akibat perbedaan elevasi yang besar seperti bukit dan lembah sekitar titik data. Setelah koreksi-koreksi diterapkan, diperoleh data ABL dengan nilai berkisar -66,71–63,298 mGal dan peta kontur seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**. Anomali rendah biasanya mengindikasikan keberadaan zona panas, yang kaya fluida atau batuan yang telah mengalami alterasi sehingga kehilangan sifat magnetiknya. Oleh sebab itu anomali rendah pada peta kontur tersebut diperkirakan sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro dan Sumbing [18].

Data ABL yang masih tersebar di topografi harus direduksi ke bidang datar (*horizontal surface*). Reduksi ke bidang datar merupakan suatu proses untuk mentransformasi data anomali gravitasi di topografi menuju ke suatu bidang datar (dengan ketinggian yang sama).

Reduksi ke bidang datar merupakan syarat agar data ABL dapat diproses pada tahapan berikutnya, khususnya pemisahan data anomali regional-residual melalui pengangkatan ke atas (*upward continuation*) [13]. Reduksi data ke bidang datar dilakukan pada ketinggian rata-rata agar iterasi dapat segera mencapai konvergen [13]. Peta kontur ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar (ketinggian rata-rata topografi daerah penelitian, 1.101,76 m) ditunjukkan pada **Gambar 6**. Secara visual, kedua kontur tersebut mirip, sebab perubahan nilainya tidak terlalu signifikan.



Gambar 5. Peta kontur Anomali Bouguer Lengkap (ABL) daerah penelitian.

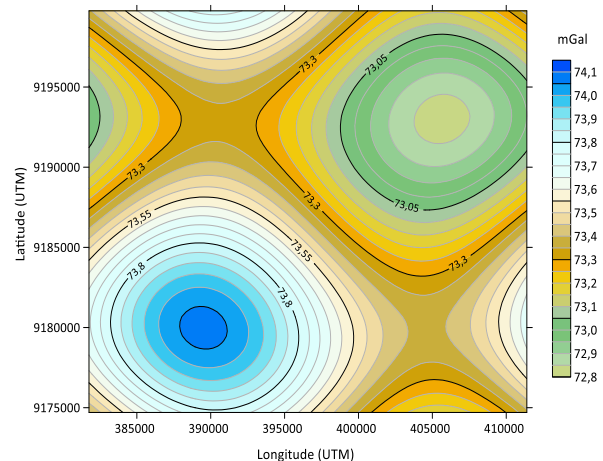


Gambar 6. Peta kontur Anomali Bouguer Lengkap (ABL) daerah penelitian yang telah terdistribusi pada bidang datar.

C. Hasil Pemisahan Data Anomali Gravitasi

Data ABL pada bidang datar perlu dipisahkan dari anomali gravitasi regional untuk mendapatkan data anomali gravitasi residual (lokal) daerah penelitian [19]. Peta kontur

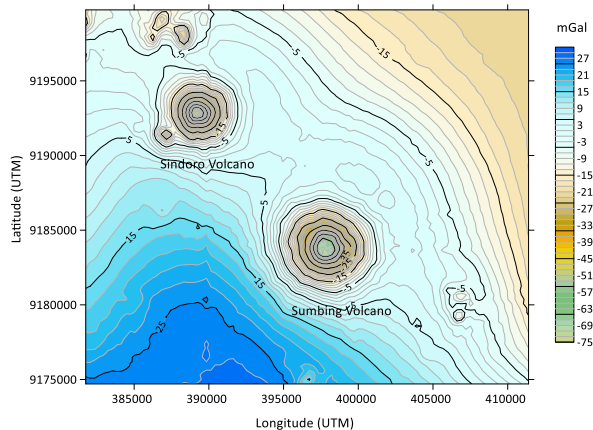
anomali gravitasi regional menunjukkan anomali yang berasosiasi dengan sumber-sumber yang sangat dalam dan luas. Adapun anomali residual menunjukkan struktur geologi atau batuan bawah permukaan yang relatif dangkal. Dalam penelitian ini data anomali regional diperoleh melalui proses pengangkatan ke atas (*upward continuation*). Pengangkatan data merupakan suatu proses transformasi data untuk membawa data anomali medan gravitasi dari bidang datar ke bidang datar lain yang berada di atasnya [13]. Peta kontur anomali regional memiliki pola halus dan tidak terdapat *closure* anomali lokal, dimana interval nilai anomali antara satu titik *grid* dengan titik-titik *grid* di sekitarnya sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi medan gravitasi yang berasal dari sumber-sumber lokal (dekat permukaan bumi) telah tereduksi, seperti terlihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Peta kontur anomali gravitasi regional daerah penelitian.

Hasil analisis terhadap pola kontur ABL setelah dilakukan pengangkatan ke atas menunjukan bahwa pada ketinggian 15.000 m di atas bidang sferoida referensi, pola kontur telah relatif tetap dan halus dengan interval nilai yang sangat kecil. Data anomali gravitasi regional yang diperoleh memiliki nilai yang berkisar 72,83 – 74,07 mGal. Pola kontur anomali ini sudah tidak mengalami perubahan atau relatif tetap sehingga ketinggian tersebut dipilih sebagai ketinggian data anomali regional daerah penelitian [20]. Selanjutnya data anomali gravitasi residual diperoleh dari selisih data anomali regional terhadap data ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar. Perhitungan ini menghasilkan data anomali gravitasi residual dengan nilai yang

berkisar $-74,96 - 29,05$ mGal. Peta anomali gravitasi residual ditunjukkan pada **Gambar 8**.



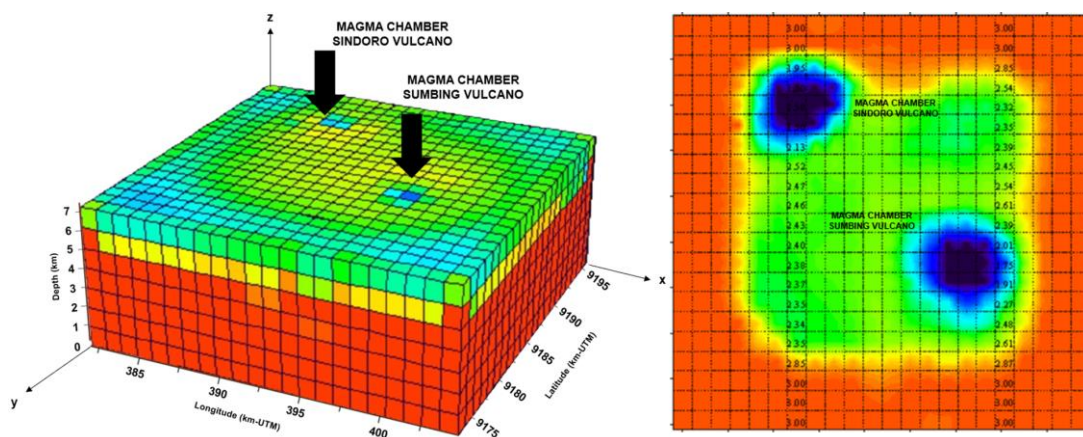
Gambar 8. Peta kontur ABL residual daerah penelitian.

D. Hasil Pemodelan dan Interpretasi Data

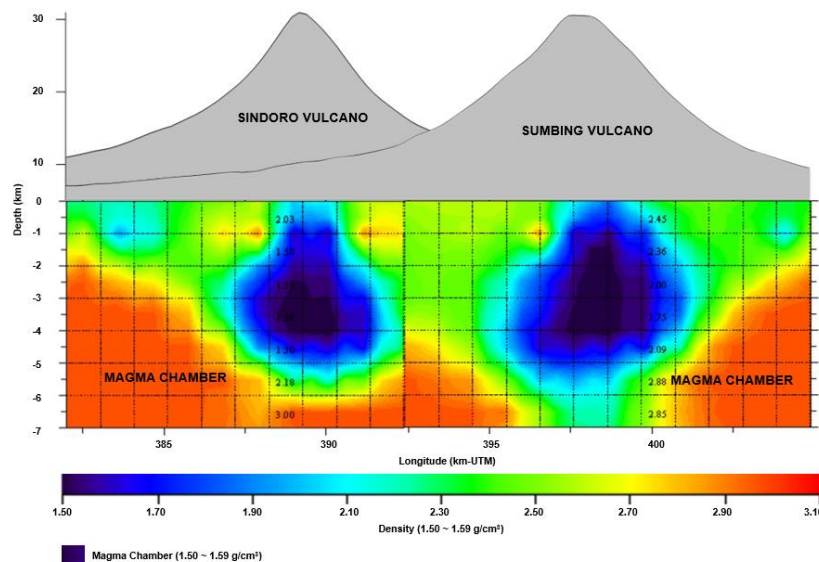
Data anomali gravitasi residual dimodelkan secara inversi 3D menggunakan aplikasi Grablox dan Bloxer. Luas wilayah pemodelan berkisar $22,9 \text{ km} \times 22,7 \text{ km}$ dengan kedalaman 7 km. Dimensi (volume) setiap blok pada pemodelan ini adalah $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. Pemodelan bertujuan untuk mengetahui struktur bawah permukaan khususnya dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing. Hasil pemodelan inversi 3D menunjukkan bahwa nilai densitas batuan bawah permukaan di daerah

penelitian berkisar $1,50 - 3,10 \text{ g/cm}^3$. Selanjutnya model 3D yang diperoleh menunjukkan adanya blok batuan dengan densitas sangat rendah, berkisar $1,50 - 1,59 \text{ g/cm}^3$, yang terletak saling berdekatan dalam arah tenggara dan barat laut. Blok batuan dengan densitas rendah dapat diinterpretasi sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro (di sebelah utara) dan Gunungapi Sumbing (di sebelah selatan).

Hasil pemodelan 3D juga menunjukkan bahwa kompleks Gunungapi Sindoro dan Sumbing tersusun atas beberapa jenis batuan dengan litologi berupa batuan beku ($2,7 - 2,9 \text{ g/cm}^3$), batuan lava andesit ($2,6 \text{ g/cm}^3$), batuan lempung ($2,3 - 2,5 \text{ g/cm}^3$), tanah dan batupasir ($1,6 - 2,2 \text{ g/cm}^3$), serta dapur magma ($1,5 \text{ g/cm}^3$). Hasil pemodelan inversi 3D data anomali gravitasi residual menunjukkan bahwa model dapur magma Gunungapi Sindoro dan Sumbing yang diperoleh memiliki bentuk tak beraturan dengan nilai densitas berkisar $1,5 - 1,59 \text{ g/cm}^3$ dengan kedalaman berkisar $1 - 5 \text{ km}$ untuk Gunungapi Sindoro dan $1 - 6 \text{ km}$ untuk Gunungapi Sumbing. Kedalaman tersebut diukur dari ketinggian topografi (rata-rata) daerah penelitian. Secara lateral posisi/lokasi dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing berdasarkan hasil pemodelan ditunjukkan pada **Gambar 9**. Sedangkan perlapisan batuan dan kedalamannya dapat dilihat pada **Gambar 10**.



Gambar 9. Posisi dapur magma Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing berdasarkan hasil pemodelan.



Gambar 10. Struktur bawah permukaan dan kedalaman dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing berdasarkan hasil pemodelan (dilihat dari arah selatan daerah penelitian).

E. Pembahasan

Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing diperkirakan terbentuk dari proses konstruktif pada kala Holosen [21] yang menghasilkan produk vulkanik berupa magma dan bentukan tubuh gunungapi. Peristiwa subduksi antar dua buah lempeng tektonik yaitu Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia telah berakibat melelehnya sebagian material batuan kerak bumi. Lelehan ini membentuk magma dan bergerak melalui celah dan rekahan ke permukaan bumi sebagai akibat tekanan dan temperatur yang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa magma Gunungapi Sindoro dan Sumbing diestimasi berasal dari zona subduksi [21]. Model yang diperoleh menunjukkan tidak ada keterkaitan dapur magma Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing sehingga aktivitas vulkanik dua gunung tersebut berbeda. Namun untuk memantau aktivitas vulkanik secara lebih detail, metode seismik dapat direkomendasikan. Gunungapi Sindoro dan Sumbing termasuk gunungapi yang masih aktif. Berdasarkan pengamatan, Gunungapi Sindoro relatif lebih aktif daripada Gunungapi Sumbing. Gunungapi Sindoro telah mengalami peningkatan aktivitas vulkanik pada bulan Desember 2011, meliputi gempa vulkanik dalam dan gempa vulkanik dangkal. Gunung ini juga pernah mengalami letusan freatik pada tahun 2018 [22]. Peningkatan aktivitas vulkanik Gunungapi Sindoro terbanyak terjadi pada tanggal 10 Februari 2021, yaitu 48 kali kegempaan.

Sedangkan pada 11 dan 12 Februari 2021 terjadi sebanyak 38 kali [23].

KESIMPULAN

Penelitian metode gravitasi menggunakan data satelit telah dilakukan pada kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing, Jawa Tengah. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh struktur geologi dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing berdasarkan model inversi 3D data anomali gravitasi satelit. Pemahaman terkait struktur bawah permukaan gunungapi penting dalam upaya mitigasi bencana dan peningkatan sistem peringatan dini. Penelitian telah dilaksanakan melalui beberapa tahap, yaitu pengaksesan data, koreksi data, reduksi data ke bidang datar, pemisahan data anomali regional dan residual, serta pemodelan data anomali dan interpretasi. Data anomali gravitasi yang diakses adalah data GGMplus yang memiliki resolusi spasial 220 m. Setelah dilakukan koreksi Bouguer dan terrain, diperoleh data anomali Bouguer lengkap (ABL) dengan nilai berkisar -2,63–102,83 mGal. Setelah dilakukan reduksi data ke bidang datar dan pemisahan data anomali regional dan residual, maka diperoleh data ABL residual dengan nilai yang berkisar -74,96–29,05 mGal.

Hasil pemodelan inversi 3D terhadap data ABL residual menunjukkan blok anomali rendah dengan nilai densitas yang berkisar 1,50 – 1,59 g/cm³ yang dapat diinterpretasi sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro dan Gunungapi

Sumbing. Model 3D yang diperoleh menunjukkan bahwa dapur magma Gunungapi Sindoro diestimasi terletak pada posisi geografis $109,989^{\circ}$ BT dan $-7,304^{\circ}$ LS serta kedalaman yang berkisar 1 – 5 km. Sedangkan Gunungapi Sumbing diestimasi terletak pada posisi geografis $110,071^{\circ}$ BT dan $-7,385^{\circ}$ LS dengan kedalaman berkisar 1 – 6 km. Selain dapur magma, kompleks Gunungapi Sindoro dan Sumbing tersusun atas beberapa jenis batuan dengan litologi berupa batuan beku ($2,7 - 2,9 \text{ g/cm}^3$), batuan lava andesit ($2,6 \text{ g/cm}^3$), batuan lempung ($2,3 - 2,5 \text{ g/cm}^3$), serta tanah dan batupasir ($1,6 - 2,2 \text{ g/cm}^3$).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Kepala Laboratorium Elektronika, Instrumentasi, dan Geofisika Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman atas fasilitas ruangan untuk kegiatan penelitian. Terimakasih juga disampaikan kepada Sherina Cikal Buliyanti, S.Si. dan rekan-rekan lainnya yang telah berkenan membantu menyampaikan tutorial pemodelan data anomali gravitasi secara inversi 3D.

PUSTAKA

- [1] C. M. Lichoro, "Gravity and Magnetic Method", Presented at *SDG Short Course I on Exploration and Development of Geothermal Resources: Organized by UNU-GTP, GDC and KenGen*, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, p. 10–31, 2016.
- [2] W. J. Hinze, R. R. B. Von Frese, , & Saad, A. H. 2013. *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
- [3] Y.L. Ekinici and E. Yigitbas, "Interpretation of Gravity Anomalies to Delineate Some Structural Features of Biga and Gelibolu Peninsulas, and their Surroundings (North-West Turkey)", *Geodinamica Acta*, vol. 27, no.4, p. 300-319, 2015.
- [4] F. Frappart, and G. Ramillien, "Monitoring Groundwater Storage Changes Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Mission: A Review", *Remote Sensing*, vol. 10, No. 829, p. 1-25, 2018.
- [5] S. Bronto, "Fasies Gunungapi dan Aplikasinya", *Jurnal Geologi Indonesia*, vol. 1, no.2, p. 59–71, 2006.
- [6] J. A. Haqiqi, T. Winarno, dan J. Marin, "Pemetaan Fasies Vulkanik berdasarkan Geomorfologi dan Stratigrafi Batuan Gunungapi pada Gunungapi Sindoro, Jawa Tengah", *Jurnal Geosains dan Teknologi*, vol. 2, no.1, hal. 24-32.
- [7] Anonim, "Sindoro dan Sumbing, Gunung Kembar yang Menantang", 2023. Website. Tersedia pada alamat: [https://integrasi-opd.temanggungkab.go.id/frontend/d_informasi/170#:~:text=Tinggi%20Gunung%20Sumbing%20sekitar%203.340,Sindoro%20\(3.155%20m%20dpl\)](https://integrasi-opd.temanggungkab.go.id/frontend/d_informasi/170#:~:text=Tinggi%20Gunung%20Sumbing%20sekitar%203.340,Sindoro%20(3.155%20m%20dpl).). (Diakses: 15 Maret 2025).
- [8] T. C. Amin, N. Ratman, dan S. Gafoer, *Peta Geologi Lembar Jawa Bagian Tengah, Skala 1:500.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1999.
- [9] W.M. Telford, L.P. Gedaart, and R.E. Sheriff, *Applied Geophysics*, Cambridge, New York. 770 pp. , 1990.
- [10] Supriyanto, *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*, Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia. Depok, 38pp., 2007.
- [11] C. Hirt, S. Claessens, T. Fecher, M. Kuhn, , R. Pail, M. Rexer, "New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field", *Geophysical Research Letters*, vol. 40, p. 4279-4283, 2013.
- [12] Sehad, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, *Pemanfaatan Data Anomali Gravitasi Citra Satelit sebagai Data Utama Riset Geofisika untuk Mitigasi Bencana. Laporan Akhir Riset Dasar*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, 2021
- [13] R.J. Blakely, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, USA, 1995.
- [14] Sehad, U. N. Prabowo, S. A. Raharjo, R. Kurniati, "Utilization of Satellite Gravity Anomaly Data for Two-Dimensional Modeling of Subsurface Structure of Slamet Volcano, Central Java, Indonesia", *Malaysian Journal of Geosciences*, vol. 07, no. 01, p. 01-07, 2023.

- [15] S. O. Eteje, O. F. Oduyebo, and P. D. Oluyori, "Modelling Local Gravity Anomalies from Processed Observed Gravity Measurements for Geodetic Applications", *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, vol. 6, no. 5, p. 144-162, 2019.
- [16] K. S. Essa, "A Fast Interpretation Method for Inverse Modeling of Residual Gravity Anomalies Caused by Simple Geometry", *Journal of Geological Research*, 327037, 2012.
- [17] F. Ulumuddin and S. C. Susanto, "Manfaatkan Data Gravitasi Resolusi Tinggi melalui GGMPlus", 2021. Website. Tersedia pada URL: <https://www.its.ac.id/news/2021/06/11/manfaatkan-data-gravitasi-resolusi-tinggi-melalui-ggmplus/>. [Diakses 22 Nopember 2022].
- [18] Seha, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, and A.Z. Ikhwana, "Physical Modeling of Magma Chamber of Slamet Volcano by Means of Satellite Gravimetric Data", *Communications in Science and Technology*, vol.7, no.2, p.160-167, 2022.
- [19] L. Guo, X. Meng, Z. Chen, S. Li, and Y. Zheng, "Preferential Filtering for Gravity Anomaly Separation", *Computers and Geosciences*, vol. 51, p.247-254, 2013.
- [20] S. A. Ganiyu, B. S. Badmus, M. O. Awoyemi, D. Akinyemi, O. T. Olurin, "Upward Continuation and Reduction to Pole Process on Aeromagnetic Data of Ibadan Area, South-Western Nigeria", *Earth Science Research*, vol. 2, no. 1, p. 66-73, 2013.
- [21] M. Ridho, A. Subandrio, S. Umiyatun, "Geologi dan Pengembangan Geowisata pada Daerah Temanggal dan Sekitarnya, Kecamatan Tempuran, Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah", *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea*, vol. 6, no. 2, hal. 87-97, 2019.
- [22] Habibullah, A.D. Laksono, R.P. Dewa, dan W. Hidayat, "Pemodelan Spasial untuk Prediksi Daerah Bahaya Akibat Letusan Gunungapi Sindoro", *Seminar Nasional Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis 2012*, Surakarta, 2012.
- [23] A. Puspitoningrum, "Aktivitas Vulkanik Gunung Sindoro Temanggung Naik 86 Kali Kegempaan", 2021. Website. Tersedia di: <https://jateng.idntimes.com/news/jateng/anggun-puspitoningrum-1/aktivitas-vulkanik-gunung-sindoro-temanggung-naik-86-kali-kegempaan>. Diakses: 15 Maret 2025.