

DAFTAR ISI

Hubungan parameter cuaca dengan sebaran titik api (<i>hot spot</i>) terhadap fenomena kebakaran hutan (studi kasus kabupaten Sumba Timur) (Khairunnisa Zalfa Purwanti, Ryan Sudrajat Permana Putra, Zaroh Irayani*)	1
Studi pemodelan efisiensi detektor HPGE-CSI(TL) menggunakan Monte Carlo n-Particle (MCNP) (Siti Khodijah, Ngurah Ayu Ketut Umiati, Fajar Arianto*)	7
Pemodelan inversi tiga dimensi struktur bawah permukaan kawasan panasbumi Dieng berdasarkan data anomali gravitasi citra satelit (Sehah*, Aviyatna Fikri Utami, Sunardi)	13
Desain sistem pemantauan kualitas udara jangka panjang berbasis <i>Internet of Things</i> (Andreas Setiawan*, Sigit Sulistiyanto, Cucun Alep Riyanto, Gede Arya Wiguna)	24
Penentuan momen inersia bola pejal menggunakan sensor gyroscope MPU6050 dan sensor photodiode (Umi Pratiwi*, Ika Maulita, Efita Pratiwi Adi, Adilla Luthfia)	30
Klasifikasi tumor payudara jinak dan ganas pada citra ultrasonografi (USG) berdasarkan karakteristik tekstur menggunakan metode random forest (Aida Rahmawati*, Ice Uliya Sari, Heni Sumarti)	38

Hubungan parameter cuaca dengan sebaran titik api (*hot spot*) terhadap fenomena kebakaran hutan (studi kasus kabupaten Sumba Timur)

Khairunnisa Zalfa Purwanti, Ryan Sudrajat Permana Putra, Zaroh Irayani*

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

Abstrak - Kebakaran hutan dan lahan merupakan fenomena tahunan yang terjadi di wilayah Sumba Timur. Keberadaannya dapat dideteksi dari citra titik api menggunakan satelit penginderaan jauh. Faktor cuaca dan dominasi vegetasi sabana pada musim kering diperkirakan menjadi penyebabnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur hubungan antara jumlah titik api dan empat parameter cuaca, yaitu: suhu udara, curah hujan, kelembapan, dan tekanan udara. Data titik api diperoleh dari hasil penginderaan jauh menggunakan satelit Terra-Modis, sedangkan parameter cuaca didapatkan dari hasil pengukuran oleh Badan Meteorologi dan Geofisika Sumba Timur selama tahun 2018–2022. Korelasi antar besaran dilihat dari pola statistiknya, baik untuk korelasi masing-masing besaran terhadap jumlah titik api, maupun korelasi keempat parameter dan jumlah titik api secara simultan. Hasil menunjukkan bahwa parameter yang memiliki hubungan tinggi dengan titik api adalah curah hujan, kelembapan, dan tekanan udara. Suhu udara memiliki hubungan yang rendah dengan titik api. Korelasi secara simultan menghasilkan hubungan parameter cuaca dengan titik api memiliki nilai hubungan yang tinggi.

Kata kunci: Kebakaran hutan, Titik api, Satelit, Parameter cuaca

Abstract – Forest and land fires are an annual phenomenon that occurs in the East Sumba region. Its presence can be detected from fire spot images using remote sensing satellites. Weather factors and the dominance of savanna vegetation in the dry season are thought to be the cause. This research aims to measure the relationship between the number of hotspots and four weather parameters, namely: air temperature, rainfall, humidity and air pressure. Fire spot data was obtained from remote sensing results using the Terra-Modis satellite, while weather parameters were obtained from measurements by the East Sumba Meteorology and Geophysics Agency during 2018–2022. The correlation between quantities can be seen from the statistical pattern, both for the correlation of each quantity with the number of hotspots, as well as the correlation of the four parameters and the number of hotspots simultaneously. The results show that the parameters that have a high relationship with hotspots are rainfall, humidity and air pressure. Air temperature has a low relationship with hotspots. Simultaneous correlation produces a relationship between weather parameters and hotspots producing a high relationship value.

Key words: Forest fires, Hotspots, Satellites, Weather parameter

PENDAHULUAN

Kebakaran hutan dan lahan merupakan peristiwa yang sering terjadi di Indonesia. Peristiwa kebakaran di Indonesia terjadi pada tahun 1997 hingga tahun 1998 yang membakar seluas 11,69 juta ha. Peristiwa tersebut menjadi permasalahan global karena dampaknya telah sampai ke negara tetangga [1]. Cuaca merupakan keadaan udara pada saat tertentu disuatu wilayah yang relatif sempit pada jangka waktu yang singkat. Unsur-unsur yang mempengaruhi keadaan cuaca dan iklim suatu daerah dan wilayah yaitu suhu, Curah hujan, Tekanan Udara, Kelembapan, Angin, dan Penyinaran Matahari. Kondisi iklim dapat mempengaruhi tingkat

kekeringan, banyaknya oksigen yang ada, dan kecepatan penyebaran api [2].

Penginderaan jauh (*remote sensing*) dapat dimanfaatkan dalam mendeteksi adanya kebakaran hutan dan lahan, salah satunya informasi mengenai titik panas (*hot spot*). Titik api merupakan hasil deteksi bahwa suatu wilayah memiliki suhu yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan suhu wilayah sekitarnya. Titik api memiliki beragam variasi dengan tingkat selang kepercayaan tertentu [3]. Salah satu upaya mitigasi kebakaran hutan adalah dengan mengetahui pola parameter cuaca sebagai prekursor kebakaran hutan. Parameter cuaca memiliki korelasi terhadap terjadinya kebakaran hutan dan lahan. Korelasi tersebut

teruji secara statistik untuk wilayah Sumatra dan Kalimantan yang telah diteliti sebelumnya oleh Prayoga *et al* [4].

Kabupaten Sumba Timur merupakan wilayah dengan kondisi curah hujan tidak menentu pada daerah pesisir pantai maupun daerah perbukitan. Wilayah ini didominasi dengan lahan sabana yang memiliki potensi kebakaran hutan dan lahan yang tinggi disetiap tahunnya. Seperti pada tahun 2020 terjadi kebakaran terluas di Sumba timur yang mengakibatkan titik api terus bertambah disetiap tahunnya dengan kondisi cuaca yang tidak menentu. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui hubungan antara parameter cuaca terhadap jumlah titik api di wilayah Kabupaten Sumba Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur sebagai upaya mitigasi. Parameter cuaca yang akan diuji adalah suhu udara, curah hujan, kelembapan, dan tekanan udara. Data titik api diperoleh dari citra satelit Terra-Modis. Keseluruhan data yang diuji adalah data tahun 2018–2022.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu pembuatan grafik kondisi parameter cuaca dan titik api dengan rata-rata bulanan, pembuatan peta sebaran titik api menggunakan *software* QGIS, Penghitungan nilai hubungan parameter cuaca dengan titik api menggunakan persamaan regresi non linier dan regresi linier berganda, serta koefisien korelasi.

1. Pengolahan Data Parameter Cuaca Dan Titik Api

Data parameter cuaca yang terdiri dari suhu udara, curah hujan, kelembapan, dan tekanan udara dan titik api yang diperoleh dari hasil pengukuran di Sumba Timur selama 5 tahun (2018-2022) dibuat rata-rata bulanan. Data ini dipresentasikan dalam bentuk grafik batang untuk melihat pola sebaran perubahan parameter cuaca setiap bulannya menggunakan *software* Microsoft Excel.

2. Pembuatan Peta Sebaran Titik Api

Data dipresentasikan dalam peta untuk melihat sebaran titik api berdasarkan wilayahnya menggunakan bantuan *software* QGIS. Data titik api akan di *overlay* dengan peta *shapefile*. Menghasilkan peta bulanan sebaran titik api lalu diidentifikasi jumlah rata-rata sebaran titik api

dari tahun 2018 hingga tahun 2022 di wilayah Kabupaten Sumba Timur.

3. Menentukan Nilai Hubungan Parameter Cuaca Dengan Titik Api

a. Menentukan Nilai Masing-masing Parameter Cuaca dengan Titik Api

Pengolahan data yang pertama yaitu dilakukan untuk menentukan nilai hubungan masing-masing parameter cuaca dengan titik api dengan menggunakan model regresi non linier dan koefisien korelasi. Pada penelitian ini pengolahan data yang dilakukan menggunakan bantuan *software* Microsoft Excel dengan persamaan:

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (1)$$

Keterangan:

Y = variabel tak bebas

X = Variabel bebas

a, b, c = konstanta

b. Menentukan Nilai Hubungan Parameter Cuaca dengan Titik Api Secara Simultan

Langkah pertama dengan melakukan uji asumsi klasik yang merupakan persyaratan statistik untuk mengetahui apakah data penelitian tersebut berdistribusi normal atau tidak. Jika data berdistribusi normal maka dapat dilanjutkan ke analisis regresi linier berganda dan koefisien korelasi menggunakan bantuan *software* SPSS dengan persamaan:

$$Y = a + b_T T + b_R R + b_H H + b_P P \quad (2)$$

dengan Y Variabel tak bebas, a konstanta, b_T, b_R, b_H, b_P nilai koefisien regresi, T suhu, R curah hujan, H kelembapan, dan P tekanan.

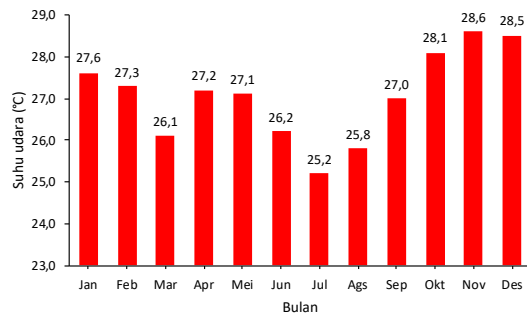
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah dilakukan pengolahan data parameter cuaca dan titik api untuk mengetahui kondisi pola parameter tersebut dan menentukan nilai hubungan parameter cuaca dengan titik api.

a. Kondisi Suhu Udara Kabupaten Sumba Timur

Kondisi suhu udara di Kabupaten Sumba Timur (yang diwakili hasil pengukuran di Kecamatan Kampera) pada **Gambar 1** menunjukkan dalam kisaran normal, yaitu berkisar 25,2 °C–28,6 °C. Suhu rata-rata terendah terjadi pada bulan Juni yaitu sebesar 25,2 °C dan suhu rata-rata tertinggi

terjadi pada bulan November yaitu sebesar 28,6 °C. Terjadi kenaikan suhu dari bulan Juni hingga November karena adanya fenomena El Nino yang berdampak dari fenomena ini yaitu mengakibatkan bencana kekeringan dan memicu potensi kebakaran hutan dan lahan. Kenaikan suhu tersebut karena wilayah NTT secara umum masih di dominasi dengan kondisi cuaca cerah tanpa tutupan awan saat puncak musim kemarau.

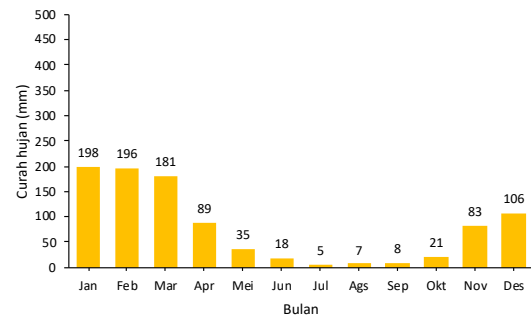


Gambar 1. Suhu udara rata-rata bulanan periode 2018-2022 di wilayah Sumba Timur.

b. Kondisi Curah Hujan Kabupaten Sumba Timur

Analisis curah hujan berdasarkan data BMKG Stasiun Klimatologi Nusa Tenggara Timur tahun 2018 sampai tahun 2022. Pada **Gambar 2** menunjukkan bahwa Kabupaten Sumba Timur memiliki tipe curah hujan monsunal yang dicirikan dengan tingginya curah hujan pada awal dan akhir tahun. Periode curah hujan Kabupaten Sumba Timur dengan nilai rata-rata curah hujannya sebesar 89 mm. Pada bulan Desember hingga Maret masuk dalam klasifikasi curah hujan menengah. Curah hujan rendah terjadi pada bulan April hingga November dimana pada bulan tersebut mengalami musim kemarau atau biasa disebut bulan kering dengan kejadian curah hujan <100 mm. Musim kemarau membuat sejumlah daerah mengalami kekeringan [5].

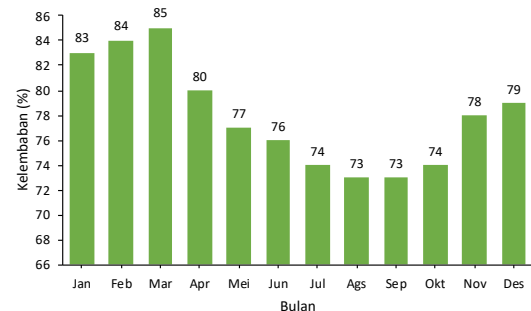
Kabupaten Sumba Timur memiliki tipe hujan monsun dicirikan oleh adanya perbedaan yang jelas antara periode musim hujan dan kemarau dalam setahun yang hanya terjadi satu kali maksimum curah hujan bulanan dalam setahun seperti curah hujan tipe monsun di Jakarta. Pola hujan ini terjadi di wilayah Indonesia bagian selatan, seperti di ujung Pulau Sumatra bagian selatan, Jawa, Bali, Nusa Tenggara dan Maluku selatan [6].



Gambar 2. Curah hujan rata-rata bulanan periode 2018-2022 di wilayah Sumba Timur.

c. Kondisi Kelembapan Kabupaten Sumba Timur

Kondisi kelembapan berdasarkan data BMKG Stasiun Klimatologi Nusa Tenggara Timur tahun 2018 sampai tahun 2022. Pada **Gambar 3** kondisi kelembapan di Kecamatan Kampera, Kabupaten Sumba Timur menunjukkan nilai rata-rata tertinggi berada pada bulan Maret dengan nilai 85% sedangkan kelembapan rata-rata terendah berada pada bulan Agustus dan September yaitu dengan nilai 73%.

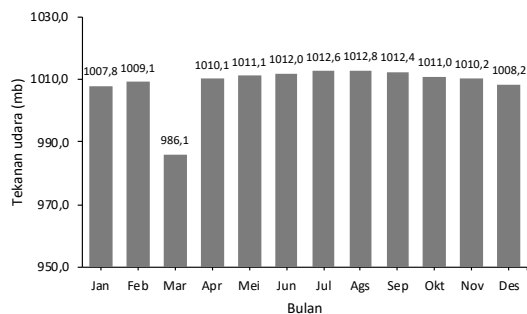


Gambar 3. Kelembapan rata-rata bulanan periode 2018-2022 di wilayah Sumba Timur.

Kelembapan udara dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu udara, tekanan udara, dan pergerakan angin. Suhu udara yang tinggi maka semakin rendah tingkat kelembapan udara pada daerah tersebut dan sebaliknya. Potensi angin kencang yang sifatnya kering saat musim kemarau di Sumba Timur merupakan penyebab dari meluasnya kebakaran hutan dan lahan. Titik api (*hotspot*) yang terdeteksi saat puncak musim kemarau dengan tingkat kelembapan rendah mengakibatkan kondisi udara dan lingkungan menjadi kering. Kondisi cuaca di Sumba Timur umumnya cerah dan berawan dengan kelembapan udara antara 50-95% [7].

d. Kondisi Tekanan Udara Kabupaten Sumba Timur

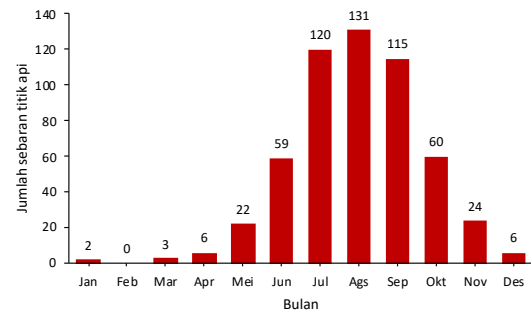
Tekanan udara berdasarkan data BMKG Stasiun Klimatologi Nusa Tenggara Timur tahun 2018 sampai tahun 2022 menunjukkan bahwa kondisi tekanan udara di Kecamatan Kambera, Kabupaten Sumba Timur menunjukkan nilai rata-rata tertinggi berada pada bulan Agustus yaitu sebesar 1012,8 mb sedangkan tekanan udara dengan nilai rata-rata terendah berada ada bulan Maret yaitu dengan nilai sebesar 986,1 mb pada **Gambar 4**. Peristiwa yang terjadi pada bulan maret dimana kondisi tekanan udara paling rendah disebabkan karena adanya badai Ferdinand. Wilayah yang terdampak badai Ferdinand akan mengalami cuaca ekstrem.



Gambar 4. Tekanan udara rata-rata bulanan periode 2018-2022 di wilayah Sumba Timur.

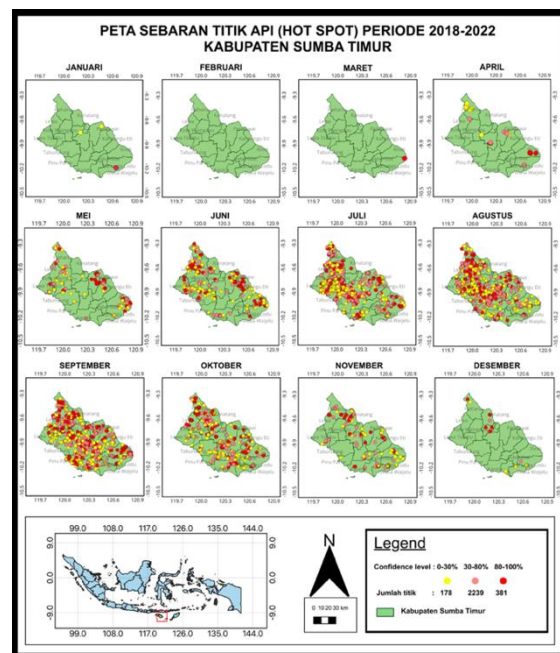
e. Kondisi Titik Api

Titik api (*hot spot*) dapat digunakan untuk identifikasi awal kejadian kebakaran hutan dan lahan. Berdasarkan hasil pengolahan data citra MODIS didapatkan nilai rata-rata bulanan titik api (*hot spot*) di Kabupaten Sumba Timur seperti pada **Gambar 5** sebaran titik api tertinggi berada pada bulan agustus dengan jumlah 131 titik api, sedangkan sebaran titik api terendah terdapat pada bulan februari dengan kondisi tidak ada sebaran titik api pada wilayah tersebut. Kejadian kebakaran hutan sabana hampir setiap tahun terjadi di Waingapu. Jumlah titik panas (*hot spot*) pada tahun 2016 hingga 2019 menunjukkan kecenderungan meningkat. Penyebab timbulnya titik panas (*hot spot*) di Waingapu yaitu ancaman kebakaran yang terjadi sepanjang tahun adalah budaya masyarakat sabana [8].



Gambar 5. Jumlah titik api rata-rata bulanan Periode 2018-2022 di wilayah Sumba Timur.

Berdasarkan pengolahan data sensor MODIS yang menghasilkan peta sebaran titik api pada **Gambar 6**. Wilayah dengan sebaran jumlah titik api memiliki simbol warna berdasarkan tingkat selang kepercayaan atau confident level dari 0% hingga 100% pada legend. Jumlah titik api yang muncul selama periode 2018–2022 berkisar 0 hingga lebih dari 500 titik api. Hal ini berkaitan dengan iklim yang bervariasi di setiap wilayah. Pada bulan Januari hingga Maret jumlah sebaran titik api masih sangat rendah, sedangkan pada bulan April dan Mei sebaran titik api mulai mendominasi. Sebaran titik api mengalami peningkatan yang tinggi pada bulan Juni, Juli, Agustus, September dengan jumlah titik api diatas 500 titik. Pada bulan Oktober, November, dan Desember mulai mengalami penurunan dengan jumlah titik api dibawah 200 titik.

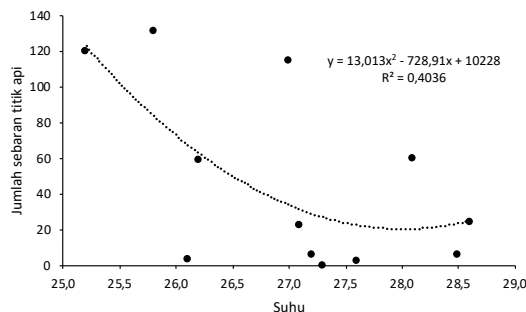


Gambar 6. Peta sebaran titik api kabupaten Sumba Timur.

f. Analisis Hubungan Parameter Cuaca dengan Titik Api

Hubungan Suhu Udara dengan Titik Api

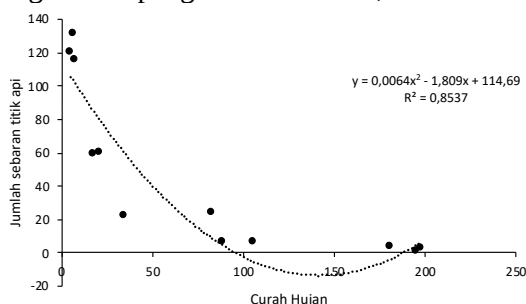
Berdasarkan data yang disajikan pada **Gambar 7** nilai hubungan antara suhu udara dengan titik api adalah 0,321. Dapat diartikan bahwa hubungan suhu dengan titik api adalah rendah. Hal ini bertentangan dengan teori yang mengatakan bahwa semakin tinggi suhu maka semakin tinggi pula tingkat maupun kejadian kebakaran hutan. Suhu udara merupakan salah satu faktor yang memudahkan bahan untuk terbakar dan tingkat terbakarnya. Secara statistik hubungan keduanya terlihat tidak linier, namun terbentuk polynomial dengan nilai pengaruh sebesar 40,3%.



Gambar 7. Hubungan suhu rata-rata bulanan dengan jumlah sebaran titik api

Hubungan Curah Hujan dengan Titik Api

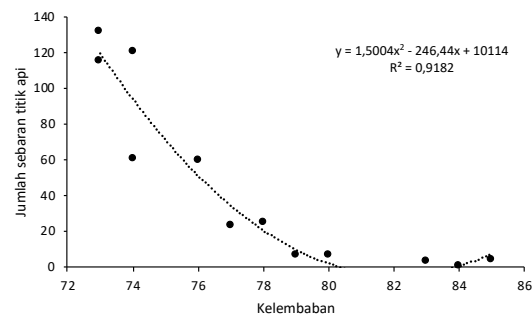
Hubungan curah hujan dengan jumlah sebaran titik api memiliki nilai koefisien korelasi sebesar 0,632 yang menunjukkan hubungan keduanya tinggi. Berdasarkan data yang disajikan pada **Gambar 8** maka terlihat bahwa jika curah hujan tinggi mengakibatkan jumlah sebaran titik api yang menurun. Jumlah titik api terendah berada pada bulan Januari hingga bulan Maret yang bersamaan dengan kondisi curah hujan yang tinggi. Secara statistik hubungan keduanya terlihat tidak linier, namun terbentuk polynomial dengan nilai pengaruh sebesar 85,3%.



Gambar 8. Hubungan curah hujan rata-rata bulanan dengan jumlah sebaran titik api

Hubungan Kelembapan dengan Titik Api

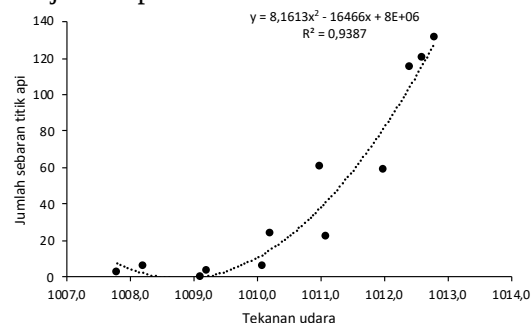
Nilai koefisien korelasi yaitu sebesar 0,736 yang menunjukkan bahwa korelasi antara kelembapan dengan jumlah sebaran titik api memiliki hubungan yang tinggi. Berdasarkan pada **Gambar 9** kelembapan udara mengalami penurunan dari bulan April hingga bulan Oktober bersamaan dengan kenaikan jumlah sebaran titik api pada bulan tersebut. Secara statistik hubungan keduanya terlihat tidak linier, namun terbentuk polynomial dengan nilai pengaruh sebesar 91,8%.



Gambar 9. Hubungan Kelembapan rata-rata bulanan dengan jumlah sebaran titik api

Hubungan Tekanan Udara dengan Titik Api

Hasil dari penghitungan nilai korelasi adalah 0,787 dan termasuk dalam kategori tinggi. Tekanan udara pada bulan Maret hingga bulan Oktober mengalami kenaikan bersamaan dengan jumlah sebaran titik api yang meningkat yang ditunjukkan. Secara statistik hubungan keduanya terlihat tidak linier, namun terbentuk polynomial dengan nilai pengaruh sebesar 93,8% yang ditunjukkan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Hubungan Tekanan Udara rata-rata bulanan dengan jumlah sebaran titik

Hubungan Parameter Cuaca dengan Titik Api Secara Simultan

Hasil pengolahan data parameter cuaca dan titik api dengan periode 2018-2022 setelah berhasil

dilakukan uji asumsi klasik dilanjutkan dengan analisis regresi linier berganda dan koefisien korelasi. Berdasarkan hasil pengolahan data dapat dilihat koefisien regresi setiap faktor perubahan cuaca memberikan pengaruh yang berbeda terhadap titik api. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap variabel cuaca dapat dijelaskan persamaan tersebut. Suhu udara, kelembapan, dan tekanan udara memiliki pengaruh negatif yang berbanding terbalik terhadap titik api. Artinya jika suhu udara, kelembapan, dan tekanan udara mengalami peningkatan, maka jumlah titik api akan berkurang. Curah hujan berpengaruh secara positif yang berbanding lurus terhadap titik api. Artinya jika curah hujan mengalami peningkatan, maka jumlah titik api berbanding lurus dengan curah hujan.

$$Y = 2608,668 - 22,480T + 0,822R - 23,748H - 0,167P \quad (3)$$

Hasil analisis hubungan parameter cuaca dengan titik api menghasilkan nilai korelasi secara simultan atau keseluruhan terhadap titik api dengan nilai hubungan yang positif (+) yaitu nilai R sebesar 0,990. Artinya parameter cuaca memiliki tingkat hubungan yang sangat kuat dengan titik api karena nilai R yang mendekati 1.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kondisi parameter cuaca disetiap bulannya berbeda-beda. Intensitas jumlah sebaran titik api meningkat saat wilayah Sumba Timur mengalami musim kemarau pada bulan Juni hingga bulan Oktober. Jumlah titik api yang muncul selama periode 2018-2022 yaitu lebih dari 500 titik api disetiap bulannya. Parameter cuaca yang memiliki hubungan tinggi dengan titik api adalah curah hujan, kelembapan, dan tekanan udara. Suhu udara memiliki hubungan yang rendah dengan titik api. Korelasi secara simultan hubungan parameter cuaca dengan titik api menghasilkan nilai hubungan yang tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada seluruh dosen, staf jurusan Fisika Universitas Jenderal Soedirman dan BMKG Stasiun Klimatologi Nusa Tenggara Timur yang telah berkontribusi atas penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nurkholis, "Analisis Temporal Kebakaran Hutan dan Lahan di Indonesia Tahun 1997 dan 2015 (Studi Kasus Provinsi Riau)," *INA-Rxiv.*, vol. 2015, pp. 1–16, 2016, [Online]. Available: <https://osf.io/preprints/inarxiv/cmzuf/> (8 Mei 2019).
- [2] S. Wirjohamidjojo and Y. S. Swarinoto, "Praktek Meteorologi Pertanian," p. 192, 2007.
- [3] Endrawati, Analisis Data Titik Panas (Hotspot) dan Areal Kebakaran Hutan dan Lahan tahun 2016. 2016. [Online]. Available: <https://rfmrc-sea.org/wp-content/uploads/2015/01/Analisis-Data-Titik-Panas-Hotspot-dan-Areal-Kebakaran-Hutan-dan-Lahan-Tahun-2016.pdf>
- [4] M. B. R. Prayoga, A. Yananto, and A. Kusumo, "Analisis Korelasi Kerapatan Titik Api Dengan Curah Hujan Di Pulau Sumatera Dan Kalimantan," *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, vol. 18, no. 1, pp. 17–24, 2017.
- [5] R. F. Karmen, "Analisis Resiko Bencana Akibat Musim Kemarau Berkepanjangan Di Jawa Timur," *Prosiding Seminar Nasional Universitas Negeri Surabaya 2023* pp. 947–957, 2023.
- [6] Tukidi, "Karakter Curah Hujan Di Indonesia," *J. Geogr.*, vol. 7, no. 2, pp. 136–145, 2010, [Online]. Available: <http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JG/article/view/84>
- [7] A. Ihsan and A. J. Patandean, "Analisis Kelembaban udara dan Temperatur Permukaan Dangkal Dengan Menggunakan Hygrometer dan Thermocouple di Daerah Pincara Kecamatan Masamba Kabupaten Luwu Utara," *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, vol. 12, no. 2, pp. 204–208, 2016. doi:10.35580/jspf.v12i2.2174.
- [8] E. I. Putra and A. A. N. Ghaniyy, "Curah Hujan, Anomali Sea Surface Temperature (SST) dan Kebakaran Hutan Sabana di Waingapu," *J. Trop. Silv.*, vol. 12, no. 2, pp. 95–101, 2021, doi: 10.29244/j-siltrop.12.2.95-101.

Studi pemodelan efisiensi detektor HPGe-CsI(Tl) menggunakan Monte Carlo n-Particle (MCNP)

Siti Khodijah, Ngurah Ayu Ketut Umiati, Fajar Arianto*

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro

Jl. Lkr. Utara Undip, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang 50275

*email: fajararianto@fisika.fsm.undip.ac.id

Abstrak – Telah dilakukan simulasi detektor HPGe dan CsI(Tl) menggunakan program MCNP. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui efek jarak sumber dan material housing terhadap efisiensi detektor. Simulasi dilakukan dengan memasukkan kode masukan agar terbentuk geometri detektor. Termasuk pemilihan jenis sumber, tally dan pengaturan jarak. Aluminium dan stainless steel ditetapkan sebagai material housing. Penyerapan radiasi terhadap detektor searah sumbu x dengan variasi 0,75 hingga 3,75 cm dapat dijalankan. Hasil simulasi menampilkan nilai cacah pada tiap-tiap bin energi yang telah ditentukan dan nilai kesalahannya masing-masing. Penggunaan housing pada detektor dan jarak sumber berpengaruh terhadap pencacahan. Nilai efisiensi terbaik detektor HPGe dan CsI(Tl) berturut-turut adalah $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ dan $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ untuk housing aluminium. Hasil simulasi ini bersesuaian dengan teori yang ada.

Kata kunci: HPGe, CsI(Tl), Efisiensi, Aluminium, Stainless steel..

Abstract – Simulation of HPGe and CsI(Tl) detectors have been carried out by using the MCNP program. This study aims to determine the effect of source distance and housing material on detector efficiency. Simulation is carried out by entering input code to form the detector geometry. Including selection of source type, tally and distance settings. Aluminum and stainless steel as a housing materials. Radiation irradiation to the detector in the direction of the x-axis with a variation of 0.75 to 3.75 cm. . The output of the MCNP program is to display the count value for each predetermined energy bin and the error value of each. The simulation results show that the use of housing of the detector and the distance of the source affect the enumeration. The best efficiency values for the HPGe and CsI(Tl) detectors are $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ and $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ of the aluminium housing. The results of simulation show results that are in accordance with the theory.

Key words: HPGe, CsI(Tl), Efficiency, Aluminium, Stainless steel.

PENDAHULUAN

Pengukuran dan identifikasi radionuklida dapat dilakukan dengan spektroskopi gamma. Daya tembus yang besar yang dimiliki sinar gamma menjadikan kelebihan tersendiri sehingga tidak memerlukan preparasi cuplikan yang rumit. Dalam mengidentifikasi atau melakukan pengukuran membutuhkan sumber radiasi dan alat ukur standar yaitu MCA dan SCA (Oktajianto et al, 2015). Dalam pengukurannya, spektrometer gamma akan mengeluarkan data berupa cacahan sebagai fungsi energi [2]. Keberhasilan pengukuran dengan spektrometri gamma ini sangat bergantung pada kualitas analisis spektrum gamma yang dihasilkan oleh detektor.

Detektor memiliki peranan penting berkaitan dengan bahan radioaktif. Sebagai contoh misalnya, detektor radiasi gamma yang berfungsi untuk menangkap radiasi, kemudian

mengubahnya menjadi sinyal atau pulsa listrik [3]. Pada perkembangannya, detektor jenis semikonduktor seperti detektor HPGe berhasil menjadikan metode pengukuran yang berkembang lebih pesat. Hal ini dikarenakan germanium memiliki daya pisah tinggi sehingga sangat baik digunakan pada spektroskopi gamma. Detektor germanium kemurnian tinggi atau yang disebut dengan HPGe cocok digunakan pada spektroskopi sinar gamma, karena memiliki resolusi yang sangat baik berkisar 0,18% pada 662 keV, volume kristal yang tersedia cukup besar dan jumlah nomor atom (Z) unsur germanium tinggi sehingga dapat meningkatkan daya henti sinar gamma [4].

Beberapa kajian tentang kristal penyusun detektor terus berkembang termasuk kristal CsI(Tl) yang tergolong kedalam jenis sintilator. Terdapat dua jenis sintilator yaitu organik dan anorganik [5]. Cesium Iodide doped Thallium atau CsI(Tl) diketahui sebagai salah satu

sintilator anorganik yang memiliki output sorotan paling terang sehingga dapat meningkatkan sinyal dan resolusi energi. Selain manfaatnya untuk identifikasi sumber radioaktif, CsI(Tl) juga telah digunakan untuk aplikasi keamanan, penelitian ruang angkasa dan kedokteran nuklir [6].

Untuk mendapatkan analisis yang akurat dalam metode spektroskopi gamma adalah dengan cara mengetahui efisiensinya. Selain menggunakan kalibrasi sumber standar, menentukan efisiensi juga dapat dilakukan dengan model perhitungan atau simulasi (Rasito, dkk). Salah satu metode perhitungan yang dapat digunakan adalah monte carlo dengan salah satu program komputernya yaitu Monte Carlo N-Particle (MCNP) yang diketahui tepat mereproduksi respon detektor untuk berbagai bentuk geometri detektor dengan akurasi yang memadai [7].

MCNP merupakan piranti lunak komputer menggunakan metode monte carlo yang dapat digunakan dalam berbagai bidang seperti pemodelan untuk proteksi radiologi, instalasi nuklir, perisai dan detektor [1]. Beberapa penelitian berkaitan dengan metode monte carlo telah banyak dilakukan, diantaranya; kalibrasi efisiensi puncak energi penuh pada detektor HPGe dan sumber [8], mengembangkan model detektor HPGe [9], investigasi pemodelan sudut/hybrid untuk menghitung efisiensi detektor HPGe pada puncak energi penuh absolut [10], eksperimen untuk penentuan efisiensi detektor HPGe [11].

LANDASAN TEORI

Radiasi Gamma

Radiasi dapat diartikan sebagai emisi energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang dapat melalui ruang vakum dan dalam media suatu material. Radiasi diklasifikasikan menjadi dua, yaitu radiasi pengion dan non pengion. Hal ini didasarkan pada kekuatannya dalam mengionisasi materi dan umumnya diberikan dalam unit elektron volt. Jenis sumber yang menghasilkan sumber radiasi gama diantaranya Cs-137 dan Co-60 [12].

Detektor High Purity Germanium (HPGe)

Detektor radiasi merupakan suatu alat yang peka terhadap radiasi, dan akan menghasilkan suatu respon tertentu. Detektor radiasi berfungsi untuk

menangkap radiasi dan mengubahnya menjadi sinyal atau pulsa listrik [3].

Detektor yang cocok digunakan pada spektroskopi sinar gamma adalah detektor germanium kemurnian tinggi (HPGe: *High Purity Germanium*) [4].

Cesium Iodide doped Thallium CsI(Tl)

Kristal CsI(Tl) memiliki struktur kubik dengan densitas sebesar 4.53 g/cm^3 dan nomor atom (Z) yang tinggi yaitu 54. Kristal ini memiliki stabilitas mekanik dan kimia yang tinggi dari sifat higroskopis. Pada prinsipnya, karakteristik dari kristal CsI(Tl) seperti pusat warna dan ketahanan resistansi radiasinya tergantung pada kemurnian dan kesempurnaan kristal [13].

Efisiensi Detektor

Efisiensi adalah suatu parameter yang sangat penting dalam pencacahan karena pulsa yang terekam menunjukkan rasio antara jumlah hitungan yang terdeteksi dipuncak dengan jumlah foton yang dipancarkan oleh sumber, setiap radiasi yang mengenai detektor akan diubah menjadi sebuah pulsa listrik dan akan dicatat sebagai cacahan [14]. Efisiensi detektor dapat ditentukan berdasarkan persamaan 1.

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{jumlah pulsa terekam}}{\text{jumlah kuantitas radiasi yang dipancarkan sumber}} \quad (1)$$

dengan ε_{abs} menunjukkan efisiensi absolut pada energi E dan jumlah radiasi yang dipancarkan atau aktivitas standar sumber radiasi gamma selama pengukuran dengan satuan Bq.

Software MCNP

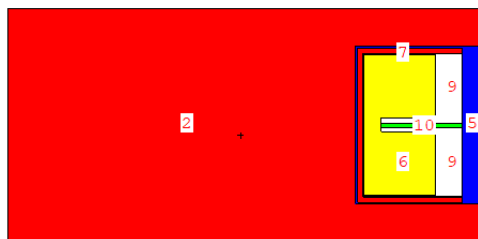
Monte Carlo N-Particle Extended Version (MCNP) yaitu versi baru dari MCNP dengan fitur tambahan dan kemampuan menyimulasikan proton. Metode monte carlo merupakan metode numerik statistik yang dipakai untuk menyelesaikan masalah yang tidak dimungkinkan diselesaikan secara analitik yaitu dengan menyimulasikan bilangan acak. MCNP merupakan piranti lunak yang diaplikasikan untuk menghitung perjalanan partikel elektron, foton, neutron, proton, dan ion dengan rentang energi hingga orde GeV. Program MCNP 2.6. yang disusun oleh tim monte carlo di Laboratorium Nasional Los Alamos, USA [15].

METODE PENELITIAN

Prosedur penelitian diawali dengan membuat model geometri detektor, model pulsa cacahan, dan definisi sumber radiasi. Pada penelitian ini menggunakan sumber radiasi Cs-137 dan Co-60. *Input* sumber yang digunakan adalah sumber titik yang telah diatur sesuai jarak yang telah ditentukan. Jarak terbagi menjadi lima variasi yaitu 0,75 cm; 1,5 cm; 2,25 cm; 3 cm; 3,75 cm.

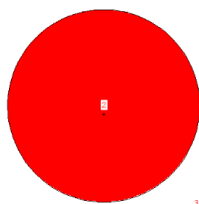
Teknik Pengambilan Data

Software visual editor atau yang biasa disebut dengan VISED, digunakan untuk menampilkan pemodelan detektor seperti pada Gambar 1 dan Gambar 2 berupa skema dua dimensi detektor.



Gambar 1. Set-Up penelitian 2D dalam Visual Editor (XY).

Pada Gambar 1 terdapat udara (angka 2), aluminium *housing* (angka 5), *crystal* (angka 6), *crystal holder* (angka 7), *vakum well* (angka 9), dan tembaga (angka 10).



Gambar 2. Set-Up penelitian 2D dalam Visual Editor (ZY)

Model Pulsa Distribusi Energi

Penentuan besaran Fisika dalam penelitian ini menggunakan beberapa jenis tally (besaran yang dicari pada MCNP) diantaranya tally energi (pada *input* file diberi kode E8) dan tally pulsa untuk foton (pada *input* file diberi kode F8p). Tally E8 merupakan bin energi untuk menampilkan nilai cacahan pada rentang energi tertentu. Pada simulasi ini dibuat rentang energi dari 0 sampai dengan 2000 keV. Tally F8p akan memberikan keluaran MCNP berupa banyaknya cacahan hasil interaksi foton dengan kristal

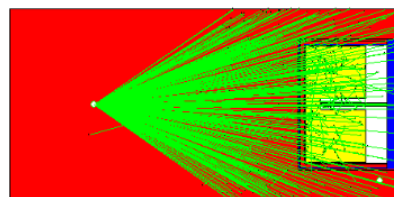
detektor. Batas akhir histori simulasi MCNP adalah 3×10^5 .

Running Program

Proses running MCNP dilakukan dengan menggunakan total commander yaitu dengan memanggil kode input MCNP “MCNP inp=fileinput.txt” Software visual editor atau yang biasa disebut dengan VISED, digunakan untuk menampilkan pemodelan detector. Partikel foton yang terdistribusi dalam detektor berjumlah 3×10^5 . Gambar 3. menampilkan partikel yang terdistribusi mengenai detektor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini geometri detektor mengikuti model GX-3519, p-type HPGe detector *manufactured by CANBERRA*. Geometri terdiri dari *electrode window*, tembaga, *crystal*, *vacuum well* dan *housing* [7]. Pada saat radiasi gamma masuk kedalam detektor dan berinteraksi di wilayah kristal, maka akan membentuk pasangan-pasangan elektron-hole, Pada saat diberi tegangan tinggi maka mengakibatkan elektron bergerak ke arah positif, hole bergerak ke arah negatif sehingga pada daerah tersebut didapatkan daerah bersih. Daerah bersih merupakan daerah yang sangat sensitif terhadap arus. Jika radiasi gamma masuk, maka radiasi tersebut akan mengeksitasi daerah bersih sehingga terjadi rekombinasi kemudian muncul arus. Semakin banyak radiasi yang dipancarkan maka rekombinasi juga akan semakin banyak. Jumlah pasangan muatan yang dihasilkan sebanding dengan energi yang disimpan oleh foton.



Gambar 3. Particle tracks menggunakan VISED

Partikel foton yang terdistribusi dalam detektor berjumlah. Seperti pada Gambar 3. *Particle tracks* menggunakan VISED, menampilkan partikel yang terdistribusi mengenai detektor.

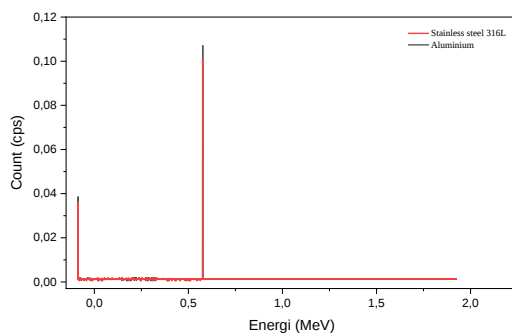
Kristal yang digunakan pada penelitian ini adalah *purity high germanium* (HPGe) dan *cesium iodide doped thallium* atau CsI(Tl) yang masing-masing memiliki massa jenis 5,323

g/cm^3 dan $4,51 \text{ g/cm}^3$. Kristal ini yang akan menyerap sumber radiasi yang dipancarkan dengan energi tertentu.

Efisiensi detektor HPGe dan CsI(Tl)

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan program MCNP dihasilkan efisiensi detektor HPGe dengan *housing* aluminium sebesar $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$ dan CsI(Tl) sebesar $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$. Hasil ini diperoleh sesuai sumber yang digunakan yaitu Cs-137 pada energi 0,662 MeV. Sedangkan untuk detektor HPGe dan CsI(Tl) dengan *housing* *stainless steel* berturut-turut adalah $(1,993 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$ dan $(1,974 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$.

Berdasarkan simulasi MCNP dan kemudian menghitung nilai efisiensinya, diperoleh perbedaan antara sumber radiasi Cs-137 yang besarnya 0,662 MeV dengan Co-60 yang besarnya 1,173 MeV. Nilai efisiensi lebih tinggi pada saat menggunakan sumber dengan energi 0,662 yaitu sebesar $1,995 \times 10^{-2} \%$. Sedangkan untuk penggunaan sumber Co-60 efisiensinya menurun menjadi $0,693 \times 10^{-2} \%$. Hal ini membuktikan bahwa besarnya sumber energi radiasi yang dipancarkan menghasilkan efisiensi yang makin kecil, jika energi yang digunakan besar.



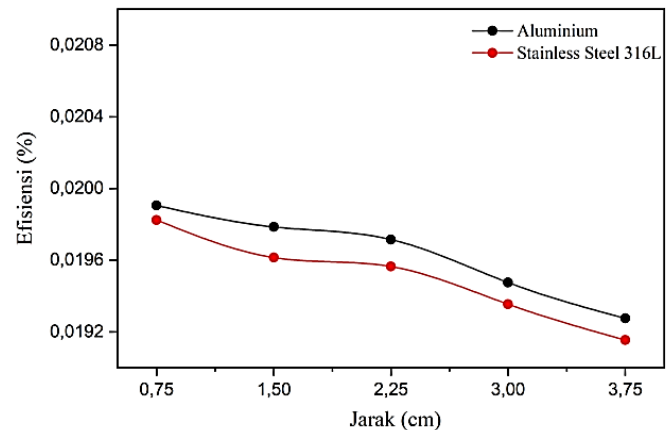
Gambar 4. Perbandingan spektrum kristal CsI(Tl) *housing* aluminium dengan *stainless steel* 316L

Berdasarkan simulasi diperoleh nilai efisiensi model detektor tanpa *housing* adalah $(2,712 \pm 0,39) \times 10^{-2} \%$, sedangkan pada saat ditambahkan *housing* aluminium dan *stainless steel* berturut-turut efisiensi detektor HPGe bernilai $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$ dan $(1,993 \pm 0,47) \times 10^{-2} \%$.

Pengaruh Variasi Jarak terhadap Efisiensi Detektor

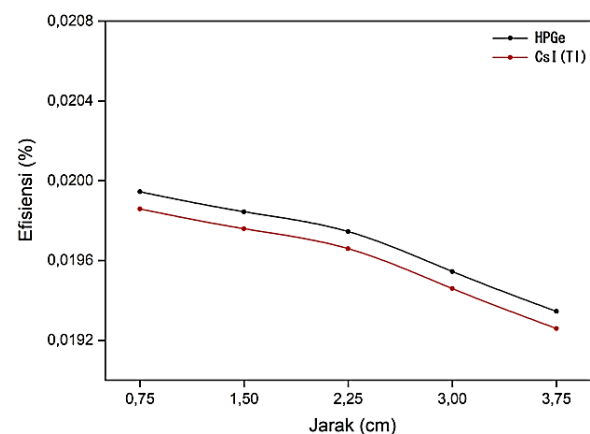
Faktor yang mempengaruhi efisiensi detektor selanjutnya adalah jarak sumber radiasi ke

detektor. Pada penelitian ini nilai efisiensi detektor pada variasi jarak sumber ke detektor diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan efisiensi detektor HPGe terhadap jarak sumber-detektor

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa nilai efisiensi paling tinggi diperoleh pada saat jarak 0,75 cm yaitu jarak yang paling dekat dengan detektor. Hal ini dapat diartikan bahwa posisi tersebut adalah posisi yang sesuai untuk mendapatkan efisiensi detektor yang maksimal. Efisiensi detektor akan naik pada saat sumber tepat dekat dengan detektor. Makin dekat jarak sumber radiasi dengan detektor sehingga efisiensi makin meningkat. Efisiensi detektor menurun pada jarak sumber yang semakin jauh dengan detektor. Hal ini dikarenakan jumlah sinar gamma yang mengenai detektor berkurang akibat interaksi sinar gamma pada materi lingkungan di luar detektor [1].



Gambar 6. Grafik efisiensi detektor HPGe dan CsI(Tl) dengan *housing* aluminium

Hasil simulasi menunjukkan hasil yang sesuai dengan teori. Kurva efisiensi terlihat lebih tinggi pada jarak yang lebih dekat dengan detektor. Artinya, semakin dekat jarak sumber

ke detektor maka efisiensi juga semakin tinggi. Pada Gambar 6. menjelaskan bahwa pada jarak yang diatur sama, detektor HPGe memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan CsI(Tl).

KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa detektor yang memiliki kinerja lebih baik adalah detektor dengan kristal germanium. Nilai efisiensi terbaik detektor HPGe dan CsI(Tl) berturut-turut adalah $(1,995 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ dan $(1,988 \pm 0,47) \times 10^{-2}\%$ untuk housing aluminium. Material aluminium memiliki densitas yang lebih ringan dibandingkan dengan *stainless steel*. Dengan densitas yang lebih kecil maka foton menjadi lebih mudah menembus material mengakibatkan probabilitas interaksinya dengan foton menjadi lebih besar. Sehingga efisiensi dengan housing aluminium lebih tinggi dibandingkan dengan housing *stainless steel*. Sehingga penggunaan aluminium lebih disarankan sebagai housing detektor dan efisiensi paling baik adalah pada kondisi jarak sumber radiasi semakin dekat dengan detektor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Dr. Ngurah Ayu Ketut Umiati, S.Si., M.Si, dan Bapak Fajar Arianto, S.Si., M.Si yang telah membimbing dan memberikan saran-saran dalam proses penelitian ini sehingga selesai dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Oktajianto, H., Setiawati, E., & Richardina V. 2015. Gamma Spectroscopy Response Analysis of Bismuth Germanium Oxide (Bgo) and Nai (Tl) Detector To Determine the Detector Efficiency Using the Monte Carlo MCNP Method. *Jurnal Sains Dan Matematika*, 23(2), 39–42.
- [2] Tursinah, R., Sukmabuana, P., dan Laksono, T.C. 2016. Simulasi Monte Carlo untuk Pengukuran Radioaktivitas Tanah Dengan Spektrometer Gamma in-Situ Terkolimasi. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir*. ISBN 978-979-17109-9-2.
- [3] Britt, C., Wen, X., Qi, H., dan Hayward, J. P. 2021. Directionality for wearable, closely packed radiation detector arrays. *Nuclear Instruments and Methods in Physic Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 986 (2021) 16470.
- [4] Britton, R., Burnet, J., Davies, A., dan Regan, P. H. 2013. Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations. *J Radioanal Nucl Chem* 295, 2035–2041.
- [5] Fabjan, C. W. dan Schopper, H., 2020. *Particle Physics Reference Library. Detector for Particles and Radiation*, Springer, ISBN 978-3-030-35318-6.
- [6] Khan, W., Zhang, C. H. Q., dan Cao, Y. 2019. Design of CsI (TI) detector system to search for lost radioactive source. *Nuclear Science and Techniques*, 30(9), 1–9.
- [7] Azbouche, A., Belamri, M., dan Tchakoua, T. 2018. Study of the germanium dead layer influence on HP (Ge) detector efficiency by Monte Carlo simulation. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2(2), 1–6.
- [8] Agarwal, C., Chaudhury, S., Goswami, A., dan Gathibandhe, M. 2011. Full energy peak efficiency calibration of HPGe detector for point and extended sources using Monte Carlo code. *J Radioanal Nucl Chem*, 287, 701–708.
- [9] Haj-heidari, M. T., Safari, M. J., Afarideh, H., dan Rouhi, H. 2016. Method for developing HPGe detector model in Monte Carlo simulation codes. *Radiation Measurements*, 88, 1–6.
- [10] Salman, A., Ahmed, Z., Allam, K. A., dan El-sharkawy, S. 2019. Investigation hybrid MCNP/Angle model for calculating the absolute full-energy peak efficiency of HPGe detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 150, 57–62.
- [11] Jeřkovský, M., Javorník, A., Breier, R., Slučiak, J., dan Povinec, P. P. 2019. Experimental and Monte Carlo determination of HPGe detector efficiency. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(3), 1863–1869.
- [12] Al-okour, A. 2021. Radiation Physics : Radiation interaction with matter. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.

- [13] Saengkaew, P., Sanorpim, S., dan Jitpukdee, M. 2016. Impact of precursor purity on optical properties and radiation detection of CsI: Tl scintillators. *Applied Physics A*, 122(8), 1–7.
- [14] Sacay, E. M. 2014. *Monte Carlo Calculated Efficiency Curve Investigation for the Ontario Power Generation Moving Bed Whole Body Counter*. Master of Applied Science in Nuclear Engineering.
- [15] Pelowitz, D. B. 2011. *MCNP Tm User ' S Manual* Version 2.6.0, April 2008 LA-CP-07-1473.

Pemodelan inversi tiga dimensi struktur bawah permukaan kawasan panasbumi Dieng berdasarkan data anomali gravitasi citra satelit

Sehah*, Aviyatna Fikri Utami, Sunardi

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

Abstrak – Data gravitasi citra satelit GGMplus dapat digunakan untuk mengetahui struktur bawah permukaan dan reservoir panasbumi, terutama untuk daerah yang sulit dijangkau seperti Dataran Tinggi Dieng. Pemodelan pada penelitian ini dilakukan secara 3D berdasarkan data anomali gravitasi residual. Tahapan penelitian yang telah dilakukan meliputi pengaksesan data, koreksi bougeur, koreksi terrain, reduksi data ke bidang datar, pemisahan data anomali regional dan residual, pemodelan inversi, dan interpretasi. Data anomali gravitasi yang telah diakses adalah data GGMplus dengan batas koordinat geografis $109,8^{\circ}$ – $110,3^{\circ}$ BT dan $7,12^{\circ}$ – $7,28^{\circ}$ LS. Setelah pengaksesan data, selanjutnya koreksi bougeur dan terrain diterapkan, sehingga diperoleh data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) dengan nilai berkisar $-56,6$ – $65,7$ mGal. Data ABL diproses sesuai tahapan penelitian hingga diperoleh data anomali residual yang berkisar $-73,59$ – $47,60$ mGal. Data anomali ini terdistribusi pada ketinggian rata-rata topografi daerah penelitian, yaitu $1.392,35$ m. Pemodelan inversi 3D terhadap data anomali residual dilakukan sehingga diperoleh model anomali bawah permukaan dengan densitas berkisar $1,00$ – $4,60$ g/cm³ yang diinterpretasi sebagai struktur geologi bawah permukaan Dataran Tinggi Dieng. Hasil interpretasi menunjukkan bahwa reservoir panasbumi terletak pada batuan lava andesit dengan densitas total berkisar $2,80$ – $3,70$ g/cm³.

Kata kunci: gravitasi citra satelit, pemodelan inversi 3D, panasbumi, Dataran Tinggi Dieng.

Abstract – GGMplus satellite gravity data can be used to determine subsurface structures and geothermal reservoirs, especially for hard-to-reach areas such as the Dieng Plateau. The modeling in the research was carried out in 3D based on residual gravity anomaly data. The research stages that have been carried out include data access, bougeur correction, terrain correction, data reduction to a horizontal surface, separation of regional and residual anomaly data, inversion modeling, and interpretation. The gravity anomaly data that has been accessed is GGM plus data with geographic position coordinates of 109.8° – 110.3° E and 7.12° – 7.28° S. After accessing the data, bougeur and terrain corrections were then applied, resulting in Complete Bouguer Anomalies data (CBA) with values ranging from -56.6 – 65.7 mGal. The CBA data was processed according to the research stages until residual anomaly data was obtained ranging from -73.59 – 47.60 mGal. These anomaly data are distributed over the average topographic elevations of the research area, i.e. $1,392.35$ m. Then 3D inversion modeling of the residual anomaly data was carried out to obtain subsurface anomalous models with a density ranging from 1.00 – 4.60 g/cm³ which was interpreted as the subsurface geological structure of the Dieng Plateau. The interpretation results show that the geothermal reservoir is located in andesite lava rock with a total density ranging from 2.80 – 3.70 g/cm³.

Key words: satellite gravity, 3D inversion modeling, geothermal, Dieng Plateau.

PENDAHULUAN

Jalur gunungapi aktif mengakibatkan wilayah Indonesia memiliki potensi panasbumi yang besar terutama keberadaan sumber energi panas yang merupakan salah satu komponen sistem panasbumi [1]. Besarnya potensi energi panasbumi di Indonesia diperkirakan mencapai 40% dari cadangan dunia [2]. Salah satu daerah yang memiliki potensi panasbumi besar adalah Dieng Volcanic Complex (DVC). DVC

merupakan kompleks gunungapi kuartar yang terletak di Jawa Tengah, yang merupakan bagian dari Busur Vulkanik Sunda Kuartar. Busur vulkanik tersebut diperkirakan telah aktif sejak masa tersier sebagai akibat subduksi Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara menunjam di bawah Lempeng Eurasia. DVC terbentuk dari gunungapi sisi belakang sebagai bagian dari rantai vulkanik ganda yang terdiri dari tiga gunungapi, yaitu Sumbing, Sindoro, dan Dieng [3].

Magma pada kompleks gunungapi di kawasan Dieng yang berdiferensiasi dapat ditemukan pada batuan gunungapi yang tersusun atas basaltik (basa) hingga andesitik. Batuan-batuan beku seperti andesit sangat umum terbentuk ketika sebagian besar magma sudah terkristalisasi [4]. Ketika sebagian besar magma sudah terkristalisasi, gas-gas telah terpisah darinya dan berkumpul di leher gunungapi. Gas tersebut bertekanan tinggi, mengakibatkan letusan eksplosif serta menghasilkan batuan beku andesit dan kawah berbentuk melingkar dengan diameter puluhan hingga ribuan meter. Salah satu gunungapi di kawasan DVC adalah Gunungapi Pagerkandang di kawah bagian utara, dan terdapat beberapa manifestasi panasbumi dalam bentuk solfatera dan fumarol yang tersebar di bagian dalam dan luar kawah. Sebagian besar aktivitas hidrotermal berhubungan dengan kawah eksplosif dan zona rekahan di kawasan DVC seperti terlihat pada **Gambar 1** [5].

Sumber utama panas dari sistem hidrotermal adalah proses magmatisme. Oleh karena itu, tempat dimana terjadi proses magmatisme, umumnya terbentuk sistem hidrotermal, baik plutonisme maupun vulkanisme. Sistem hidrotermal adalah sistem tata aliran air dimana terjadi perpindahan panas secara konduksi dan konveksi akibat interaksi fluida (air meteorik) yang berada di bawah permukaan dengan suatu sumber panas (*heat reservoir*). Reservoir panasbumi adalah formasi batuan di bawah permukaan yang mampu menyimpan fluida termal (uap dan/atau air panas) dan mudah dialiri [6]. Dinding dan penutup reservoir panasbumi ini harus bersifat tidak mudah ditembus atau dilalui oleh air atau uap. Tidak adanya lapisan penutup menjadikan sistem panasbumi menjadi terbuka dan energi panas yang ada akan hilang (*heatloss*) [7]. Umumnya batuan ini merupakan hasil letusan gunungapi seperti batuan lava dan piroklastik.



Gambar 1. Salah satu kawah pada *Dieng Volcanic Complex*.

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan reservoir panasbumi di kawasan DVC adalah metode gravitasi citra satelit. Keberadaan dan karakteristik reservoir panasbumi perlu diteliti sebagai upaya memperkirakan cadangan energi panas yang terkandung di kawasan tersebut. Metode gravitasi citra satelit telah banyak dimanfaatkan untuk pencarian berbagai sumberdaya alam seperti bauksit, seng, batubara, dan bijih-bijih logam lainnya yang sulit dieksplorasi menggunakan metode geofisika akibat kendala alam yang ekstrim atau tidak memungkinkan. Dengan menggunakan data gravitasi citra satelit, proses akuisisi data dapat menjangkau kawasan yang sangat luas dengan durasi waktu yang singkat [8]. Pertimbangan lain pemanfaatan data anomali gravitasi citra satelit adalah biaya yang relatif murah daripada akuisisi data secara langsung dengan biaya puluhan hingga ratusan juta rupiah. Data anomali gravitasi citra satelit juga relatif cukup baik digunakan untuk memodelkan struktur geologi gunungapi, cekungan air tanah, dan sumberdaya alam lain [9]. Oleh karena itu metode gravitasi citra satelit cocok diterapkan untuk tujuan penelitian ini sebab kondisi topografi kawasan Dieng cukup ekstrim dan tidak semua bagian dapat dilalui oleh manusia. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi sumber informasi terkait sumber panasbumi di daerah Dieng bagi pemerintah dan instansi terkait sehingga dapat dikelola secara maksimal.

LANDASAN TEORI

A. Metode Gravitasi

Konsep dasar metode gravitasi yang mendasari eksplorasi geofisika adalah Hukum Newton tentang gaya tarik-menarik antara dua titik massa. Besar gaya antara dua titik massa m_1 dan m_2 yang terpisah pada jarak r dapat dinyatakan dengan persamaan [10]:

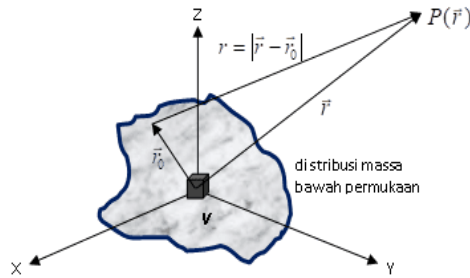
$$\vec{F}(\vec{r}) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

G adalah konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$). Telford *et.al.* [10] telah menjabarkan Hukum Newton seperti persamaan (1) untuk mendapatkan nilai potensial gravitasi di suatu titik P yang berada di luar volume V seperti ditunjukkan pada **Gambar 2** yang dapat dinyatakan sebagai [10]:

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

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 [10].

Jika integral volume persamaan (2) diterapkan untuk seluruh volume bumi, maka dapat diperoleh potensial gravitasi pada permukaan bumi. Sedangkan kuat medan gravitasi diperoleh dengan cara mendeferensialkan potensial gravitasi tersebut hingga menjadi [10]:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla U_P(\vec{r}) \quad (3)$$

Nilai medan gravitasi bumi (E) pada persamaan (3) sering disebut sebagai percepatan gravitasi bumi (g). Berdasarkan persamaan (2) dan persamaan (3), nilai percepatan gravitasi bumi dapat dinyatakan dengan persamaan [10]:

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

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

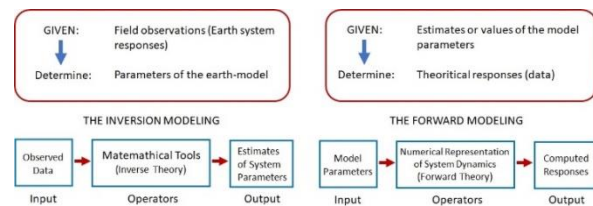
Persamaan (5) menunjukkan bahwa nilai medan gravitasi di permukaan bumi bervariasi. Variasi medan gravitasi bumi ini dipengaruhi oleh bujur, lintang, elevasi, dan distribusi massa bawah permukaan bumi yang dinyatakan sebagai fungsi rapat massa batuan bawah permukaan [10].

B. Pemodelan Inversi-3D

Umumnya peneliti mengharapkan agar data geofisika hasil akuisisi (akses) di lapangan memberikan informasi sebanyak mungkin, tidak hanya berkaitan sifat-sifat fisis batuan, namun juga kondisi geometri batuan bawah permukaan, posisi, dan kedalaman batuan itu. Informasi tersebut dapat diperoleh jika hubungan (*relation*) antara sifat-sifat fisis batuan dengan

data hasil observasi bisa diketahui. Relasi antara keduanya hampir selalu berbentuk persamaan matematis yang biasanya disebut sebagai model matematis. Berdasarkan model matematis ini, parameter-parameter fisis batuan bisa diekstrak dari data hasil observasi [11]. Proses ini disebut pemodelan inversi (*inverse modelling*), seperti dapat dilihat pada **Gambar 3**. Oleh sebab itu pemodelan inversi bisa digunakan untuk membuat model geologi akibat medan gravitasi di daerah penelitian.

Proses sebaliknya, dimana peneliti ingin mendapatkan data perkiraan hasil observasi berdasarkan parameter fisis yang sudah diketahui disebut sebagai pemodelan maju (*forward modelling*) [11]. Pemodelan maju digunakan untuk melihat respon medan gravitasi yang ditimbulkan dari model geologi yang dibuat. Oleh karena itu, pemodelan maju adalah suatu pemodelan untuk menjabarkan data dari model yang dibuat dengan menghitung respon teoritis dan distribusi sifat dari sumber anomali. Kedua jenis pemodelan tersebut mempunyai tujuan untuk memperkirakan model benda bawah permukaan berdasarkan data observasi seperti terlihat pada **Gambar 3**. Namun demikian pada penelitian ini metode pemodelan yang diterapkan adalah pemodelan inversi.



Gambar 3. Alur pengolahan data menggunakan pemodelan inversi (*inverse modeling*) dan pemodelan maju (*forward modeling*) [11].

C. Geologi Daerah Penelitian

Dalam pembentukan pegunungan Dieng, ada tiga episode yaitu formasi pra-kaldera, kaldera, dan aktivitas gunungapi. Pada episode pra-kaldera, material piroklastik Gunung Rogo Jembangan menutupi daerah utara dan selatan kompleks, yang kemungkinan terbentuk pada masa kuartar bawah. Kawah Tlerep yang berada di batas timur terbuka ke arah selatan membentuk struktur *dome* berkomposisi *hornblende* andesit. Sedangkan Kawah Prau terbuka ke arah utara dari Tlerep dan menghasilkan endapan piroklastik dan lava andesit basaltik. Pada fase awal ini terjadi letusan besar dari Gunungapi Dieng yang

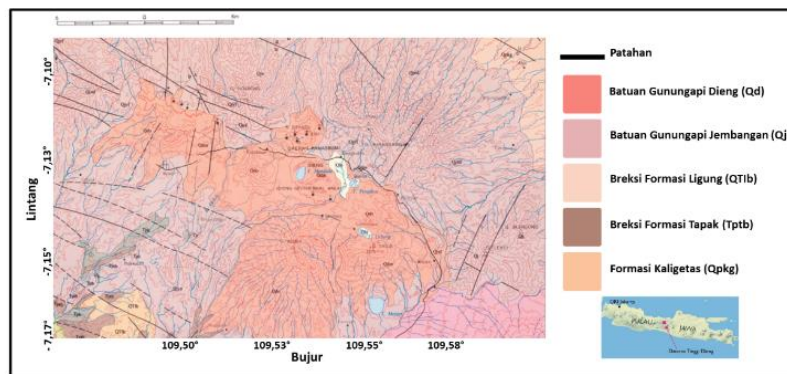
menimbulkan Depresi Batur sebagai kaldera raksasa Dataran Tinggi Dieng. Sisa morfologi yang paling terlihat adalah dengan adanya morfologi Gunung Prau sebagai salah satu dinding dari kaldera tersebut [12].

Sedangkan episode kedua merupakan aktivitas vulkanik yang berkembang di dalam kaldera tersebut. Di antaranya adalah munculnya Gunung Bisma, dengan kawah tertua yang terpotong membuka ke arah barat. Kemudian Gunung Seroja dengan umur yang lebih muda dengan tingkat erosi *selope* yang kurang kuat, serta Gunung Nagasari yang merupakan gunungapi komposit dan berkembang dari utara ke selatan di kawasan Dieng, Kecamatan Batur [12]. Adapun pada episode ketiga adalah fase aktivitas gunungapi yang menghasilkan lava andesit biotit, jatuhnya material piroklastik, dan aktivitas hidrotermal. Ada sembilan titik erupsi di Kaldera Dieng yang menghasilkan lava *dome* dan lava *flow* biotit andesit, seperti di Kawah Sikidang dan Legetang, Pakuwaja, Sikunang, *Dome* Perambanan dan lainnya [12].

Menurut Condon dkk. [13], stratigrafi Komplek Gunungapi Dieng dapat diurutkan sebagai berikut:

1. Batuan Gunungapi Dieng (Qd) berupa lava andesit dan andesit kuarsa, serta batuan klastik gunungapi.
2. Batuan Gunungapi Jembangan (Qj) berupa lava andesit dan batuan klastik gunungapi terutama andesit hipersten-augit setempat mengandung hornblende dan juga basalt olivin berupa aliran lava, breksi aliran dan piroklastik, lahar dan *alluvium*.
3. Breksi Formasi Ligung (QTib) berupa breksi gunungapi (konglomerat) bersusun andesit, lava andesit horenlenda dan tuff yang merupakan bagian atas Formasi Ligung.
4. Breksi Formasi Tapak (Tptb) berupa breksi gunungapi dan batu pasir tufan breksi bersusun andesit mengandung batupasir tumbuhan di beberapa tempat mengandung sisa tumbuhan.
5. Formasi Kaligetas (Qpkg) berupa breksi vulkanik, aliran lava, tuff, batupasir tufan dan batuan lempungan, breksi aliran dengan sisipan lava dan tuff halus sampai kasar, di bagian bawahnya ditemukan batu lempung.

Secara visual stratigrafi Komplek Gunungapi Dieng dapat dilihat pada peta geologi seperti **Gambar 4**.



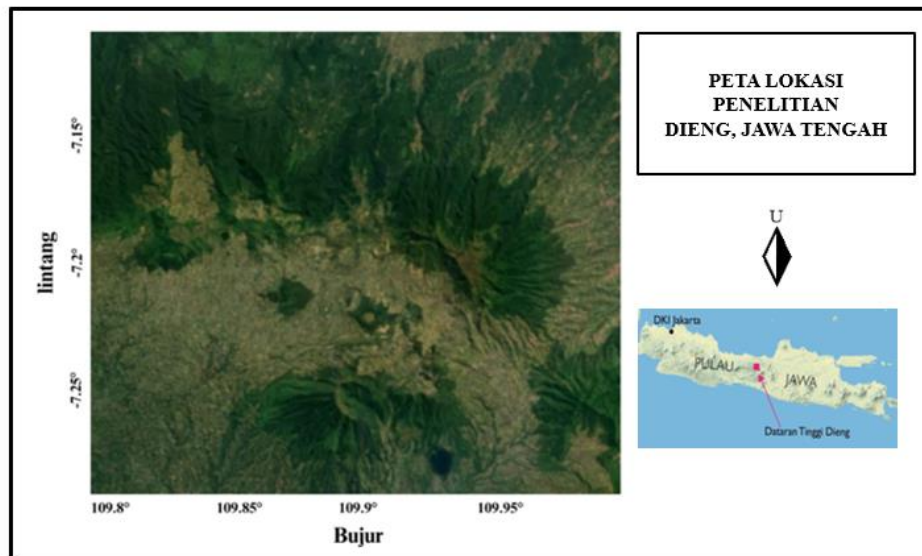
Gambar 4. Peta geologi Komplek Gunungapi Dieng (sumber: Peta Geologi Lembar Banjarnegara-Pekalongan) [13].

METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi dan Geofisika Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Purwokerto. Data penelitian merupakan data anomali gravitasi citra satelit GGMplus di kawasan manifestasi panasbumi Dieng Jawa Tengah dengan batas koordinat geografis 109,8° – 110,3° BT dan 7,12° - 7,28° LS seperti terlihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Peta lokasi Komplek Gunungapi Dieng (sumber: Google Earth).

B. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian meliputi laptop yang dilengkapi perangkat lunak seperti aplikasi Microsoft Excel 2019, Gravity 900, dan Fortran 77 untuk pengolahan data, Surfer 17 untuk membuat peta kontur daerah penelitian, Grablox 1.7 dan Bloxer 1.6e untuk pemodelan inversi 3D. Sedangkan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gravity disturbance dari GGMplus yang diakses melalui website:

<https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/> yang dilengkapi dengan data posisi geografis (bujur, lintang, dan elevasi) serta geoid [14].

C. Prosedur Penelitian

Data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) diperoleh setelah diterapkan koreksi bouguer dan koreksi terrain terhadap data gravity disturbance yang nilainya setara dengan data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas atau free air anomaly (FAA) [15]. Data FAA yang diperoleh masih tersebar di permukaan topografi, yang secara matematis dapat dituliskan $\Delta g(\lambda, \vartheta, h)$. Untuk pengolahan data pada tahap berikutnya, data FAA ini harus direduksi menuju bidang datar. Metode yang digunakan untuk mereduksi data FAA adalah pendekatan Deret Taylor dengan persamaan [16]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i+1]} = \Delta g(\lambda, \vartheta, h) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(h-h_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial h^n} \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i]} \quad (6)$$

Berdasarkan persamaan (6), $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang terdistribusi di bidang datar dapat diestimasi melalui pendekatan, yaitu nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh dari proses iterasi ke- i digunakan untuk memperoleh $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ pada iterasi ke $(i+1)$, demikian seterusnya. Proses iterasi dilakukan secukupnya, sedemikian hingga nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh telah konvergen [16]. Data $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh dari persamaan (6) belum bersih dari efek anomali regional. Oleh sebab itu data tersebut tersebut harus dibersihkan dari efek anomali regional. Data anomali regional dapat diperoleh melalui pengangkatan data (upward continuation) hingga ketinggian tertentu. Proses ini berfungsi sebagai filter tapis rendah (low pass filter), dimana data anomali diangkat sedemikian hingga perubahan closure anomali menunjukkan pola yang sangat halus dengan interval nilai yang sangat kecil. Persamaan upward continuation bisa dituliskan sebagai [16]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) = \frac{\Delta h}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta g(\lambda', \vartheta', h_0)}{\sqrt{[(\lambda - \lambda')^2 + (\vartheta - \vartheta')^2 + \Delta h^2]^3}} d\lambda' d\vartheta' \quad (7)$$

Data yang diperoleh, selanjutnya dikoreksikan terhadap data $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ dari persamaan (6), sehingga diperoleh data ABL residual dengan persamaan [17]:

$$\Delta g_{res}(\lambda, \vartheta, h_0) = \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0) - \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) \quad (8)$$

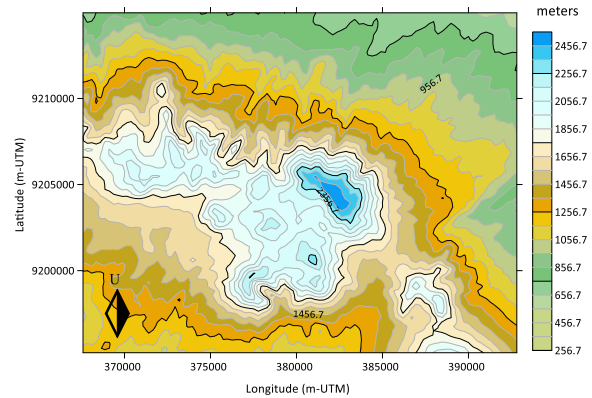
Data ABL residual merupakan data anomali gravitasi lokal yang telah bersih dari berbagai efek sumber anomali lain yang tidak menjadi target dalam penelitian dan diasumsikan hanya berasosiasi dengan sumber anomali lokal yang menjadi target penelitian. Data ABL residual yang diperoleh dapat langsung dimodelkan. Pada penelitian ini data ABL akan dimodelkan secara 3D untuk mengetahui lokasi dan kedalaman sumber panas bumi (geothermal reservoir) di Dataran Tinggi Dieng, Jawa Tengah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

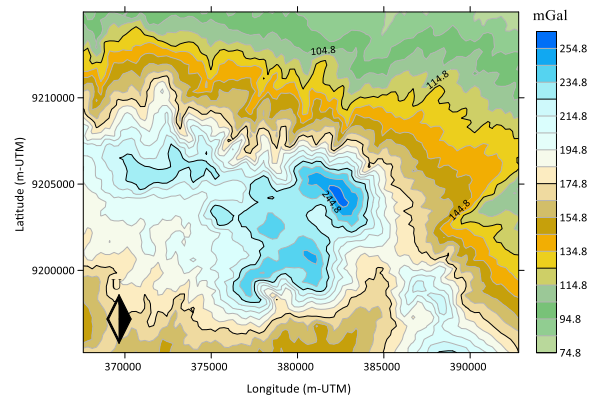
A. Hasil Pengaksesan dan Koreksi Data

Akuisisi data anomali gravitasi satelit telah diakses melalui website GGMplus berupa data posisi bujur, lintang, elevasi, *gravity disturbance* dan *geoid*. Hasil akuisisi data berjumlah 10.350 data dengan batas geografis seperti telah dijelaskan di bagian Metode Penelitian. Data anomali gravitasi yang telah terkoreksi udara bebas berkisar 74,8 – 258,3 mGal dan data elevasi daerah penelitian berkisar 256 – 2.548 m. Peta kontur topografi daerah penelitian dan peta anomali gravitasi *free-air* (FAA) ditunjukkan pada **Gambar 6** dan **Gambar 7**.

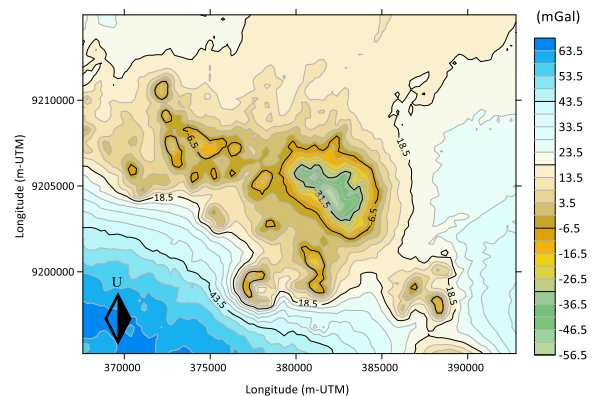
Data anomali gravitasi *free-air* ini, selanjutnya dikoreksi dengan koreksi *bouguer* dan *terrain* untuk mendapatkan data anomali *bouguer* lengkap (ABL). Koreksi *bouguer* ditujukan untuk memperhitungkan efek tarikan dari massa batuan yang terdapat pada bidang *datum* dengan asumsi memiliki jari-jari tak terhingga dengan ketebalan h (m) dan densitas ρ (g/cm^3), sehingga efek tarikan massa dari batuan dapat direduksi [18]. Perhitungan koreksi *bouguer* menggunakan Microsoft Excel. Sedangkan koreksi medan digunakan untuk mengurangi efek massa topografi di atas permukaan bumi yang relatif kasar akibat perbedaan elevasi yang besar seperti bukit dan lembah [18]. Perhitungan koreksi medan dilakukan dengan aplikasi Gravity 900. Data ABL daerah penelitian yang dihasilkan berkisar antara -56,6–65,7 mGal dengan peta kontur dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 6. Peta kontur topografi daerah penelitian.



Gambar 7. Peta kontur *free air anomaly* (FAA) daerah penelitian.

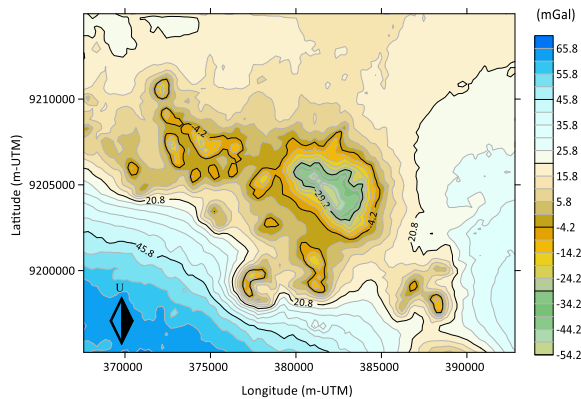


Gambar 7. Peta kontur ABL daerah penelitian.

B. Hasil Reduksi dan Pemisahan Data

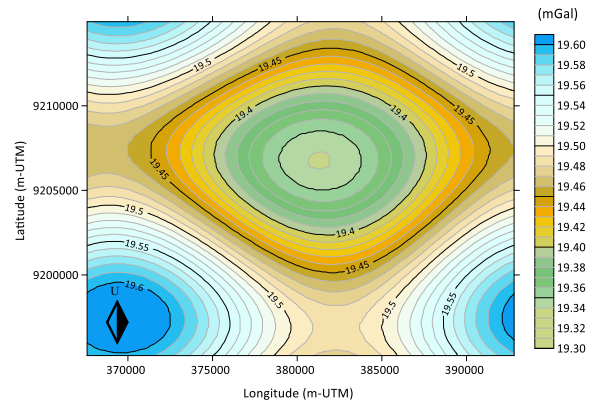
Data ABL yang masih tersebar di topografi (bidang tidak rata) harus direduksi menuju bidang datar. Reduksi ke bidang datar merupakan sebuah proses untuk mentransformasi data anomali gravitasi dari topografi ke suatu bidang datar dengan ketinggian yang sama. Reduksi data ke bidang datar bertujuan untuk mempermudah pengolahan data selanjutnya sebab data harus terdistribusi pada bidang datar [19]. Peta kontur

ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar (pada ketinggian rata-rata topografi; 1.392,35 m) ditunjukkan pada **Gambar 8** dengan nilai anomali berkisar -54,23 – 67,20 mGal.

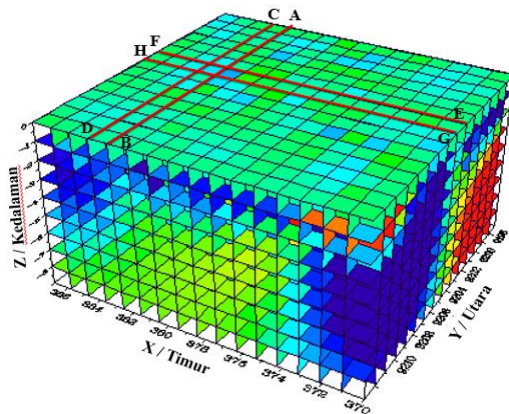


Gambar 8. Peta kontur ABL yang telah tereduksi ke bidang datar.

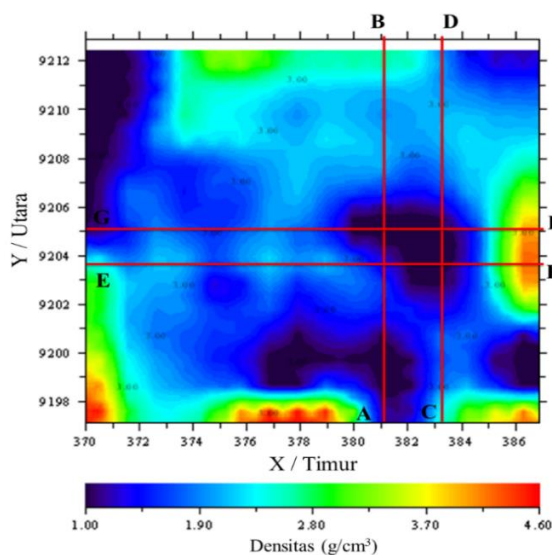
Data ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar masih merupakan superposisi antara data anomali regional dan data anomali lokal atau residual. Kedua anomali tersebut memiliki sifat yang berbeda dimana anomali regional bersifat halus dan bersumber atas batuan-batuan yang sangat dalam, adapun anomali residual bersifat kasar dan bersumber dari batuan-batuan yang dangkal. Pemisahan data anomali tersebut perlu dilakukan karena target penelitian ini adalah sumber anomali bawah permukaan yang bersifat lokal. Proses pemisahan data anomali regional - residual dilakukan menggunakan metode pengangkatan ke atas (*upward continuation*) terhadap data ABL [16]. Hasil analisis pola kontur anomali gravitasi setelah dilakukan pengangkatan data menunjukkan pada ketinggian 19.000 m pola kontur anomali telah relatif tetap dan halus, nilai anomali berkisar 19,339– 19,616 mGal dengan interval nilai anomali yang sangat kecil (0,2771 mGal). Pola kontur ini sudah tidak mengalami perubahan meskipun diangkat lagi pada ketinggian di atasnya, sehingga pada ketinggian tersebut dipilih sebagai data anomali gravitasi regional dengan peta kontur ditunjukkan pada **Gambar 9**.



bawah permukaan berupa susunan kubus-kubus kecil berdimensi $1 \times 1 \times 1 \text{ km}^3$ dengan ukuran $16 \times 15 \times 9 \text{ km}^3$. Luas wilayah pemodelan berkisar $16,86 \text{ km} \times 15,84 \text{ km}$ dengan kedalaman 9 km. Pemodelan bertujuan untuk mengetahui struktur bawah permukaan dan reservoir panasbumi daerah penelitian melalui nilai densitas hasil pemodelan berkisar $1,0 - 4,6 \text{ g/cm}^3$. Hasil pemodelan seperti **Gambar 11** menunjukkan bahwa daerah penelitian tersusun atas batuan dengan densitas dan kedalaman yang bervariasi. Nilai densitas rendah dengan kontur berwarna biru tua hingga kehijauan mendominasi kawasan ini dengan nilai berkisar $1,0 - 2,8 \text{ g/cm}^3$. Sayatan AB, CD, EF, dan GH pada model 3D dilakukan untuk tujuan interpretasi litologi. Posisi sayatan tersebut didasarkan atas lokasi sumber panasbumi (dapur magma) pada kedalaman 4 km seperti **Gambar 12**.



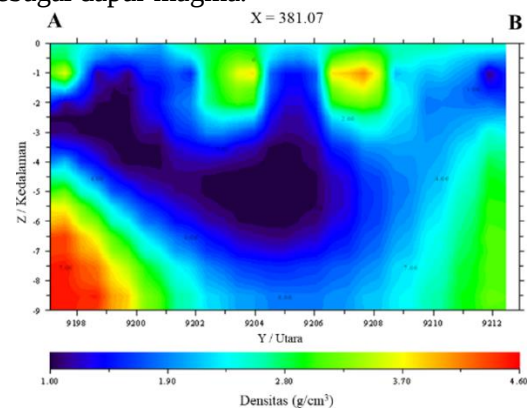
Gambar 11. Model 3D distribusi densitas batuan bawah permukaan di daerah penelitian.



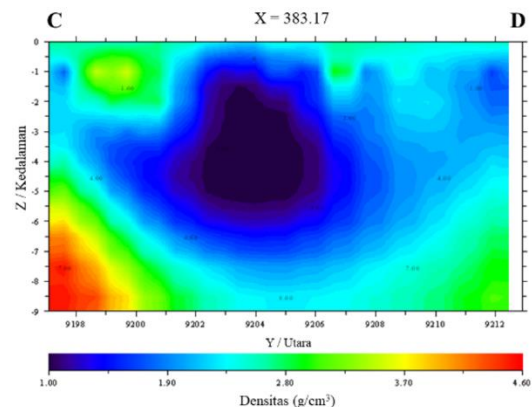
Gambar 12. Model 3D (dilihat dari atas) pada kedalaman 4 km; kontur berwarna biru tua dengan

nilai densitas kecil diinterpretasi sebagai dapur magma Gunungapi Dieng.

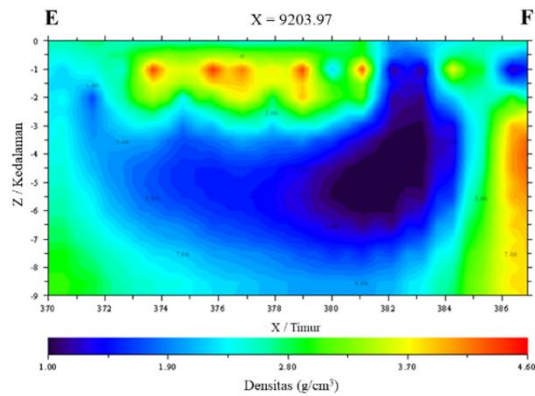
Sayatan-sayatan pada model 3D tersebut bertujuan untuk interpretasi litologi secara vertikal, sehingga lokasi dan posisi dapur magma serta reservoir panasbumi di daerah penelitian dapat diestimasi. Sayatan AB dan CD berupa sayatan sejajar dengan arah utara-selatan, sedangkan sayatan EF dan GH berupa sayatan yang sejajar dengan arah barat-timur. Seluruh sayatan melewati pusat *closure* anomali yang diperkirakan sebagai dapur magma Gunungapi Dieng seperti terlihat pada **Gambar 13** hingga **Gambar 16**. Blok batuan dengan nilai densitas paling rendah (warna biru tua) diinterpretasi sebagai dapur magma.



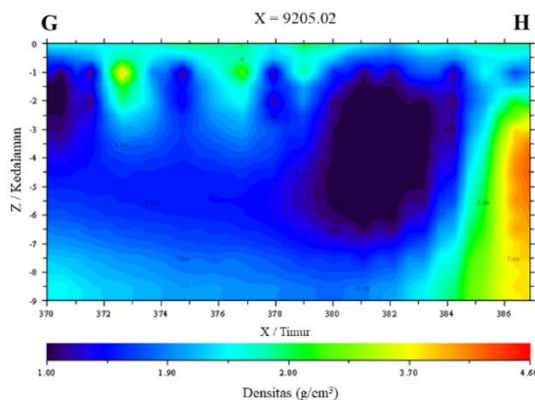
Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan AB.



Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan CD.



Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan EF.



Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan GH.

Hasil-hasil interpretasi struktur bawah permukaan daerah penelitian terhadap hasil-hasil pemodelan menunjukkan berbagai jenis batuan penyusun yang didominasi oleh batuan dengan densitas rendah. Batuan dengan densitas $1,00 - 1,90 \text{ g/cm}^3$ diperkirakan dalam fase cair dan diinterpretasi sebagai magma Gunungapi Dieng yang merupakan sumber panas dari sistem panasbumi (hidrotermal) di daerah ini. Batuan dengan densitas $1,90 - 2,80 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai batuan lava andesit-basaltik hasil pembekuan lava masa lalu dan menjadi batas bagi dapur magma kompleks Gunungapi Dieng terhadap lingkungan sekitar. Sedangkan batuan dengan nilai densitas $2,80 - 3,70 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai batuan dari Formasi Dieng dan Jembangan yang tersusun atas batuan lava andesit, batuan andesit kuarsa, batuan klastik gunungapi, *tuff*, batuan breksi gunungapi dan batuan lainnya [13].

D. Perkiraan Lokasi Reservoir Panasbumi

Sistem panasbumi di kawasan Dieng merupakan sistem panasbumi yang terbentuk pada lingkungan vulkanik dalam kaldera gunungapi.

Manifestasi panasbumi di kawasan Dieng muncul pada elevasi sekitar 2.000 m di atas permukaan laut yang didominasi oleh *steam-heated* seperti solfatera dengan endapan sulfur ekstensif, fumarol, *mud pots*, kolam lumpur, tanah teralterasi, dan tanah beruap. Berdasarkan data geologi, batuan bawah permukaan yang dijumpai di bawah permukaan didominasi oleh batuan lava andesitik-basaltik yang setempat terdapat perselingan dengan batuan piroklastik [5]. Batuan reservoir panasbumi diinterpretasi berada pada batuan lava andesit dan *tuff* yang menyusun produk vulkanik pada sistem panasbumi Dieng di bagian bawah. Batuan diorit dijumpai di bawah Gunung Pangan-Merdada yang diperkirakan terkait dengan keberadaan sumber panas pada kedalaman yang lebih dalam [5].

Berdasarkan hasil-hasil pemodelan dan interpretasi yang didukung oleh informasi geologi, batuan dari Formasi Dieng dan Jembangan batuan lava andesit, batuan andesit kuarsa, batuan klastik gunungapi, *tuff*, batuan breksi gunungapi dan lainnya diperkirakan merupakan lokasi reservoir panasbumi. Sumber energi panas ini berasal dari magma yang berada di bawah lapisan batuan lava andesit-basaltik. Magma berperan sebagai sumber panasbumi, dimana panas dihantarkan secara konduksi menuju lapisan batuan di atasnya yang terisi fluida. Perpindahan panas secara konveksi juga terjadi pada fluida hidrotermal di dalam pori-pori batuan tersebut. Selanjutnya fluida hidrotermal ini bergerak ke atas, namun tidak sampai ke permukaan tanah akibat tertahan oleh lapisan batuan yang bersifat *impermeable*. Selama perjalanan, fluida hidrotermal dapat tersimpan pada suatu reservoir yang terletak di antara sumber panas (magma) dan kawasan tampungan panas [20]. Sebagian fluida termal muncul di permukaan dalam bentuk manifestasi panasbumi melalui struktur geologi seperti sesar yang banyak dijumpai di kawasan Dataran Tinggi Dieng [5].

Hasil-hasil pemodelan dan interpretasi terhadap data ABL residual mengindikasikan bahwa lapisan reservoir panasbumi di kawasan Dieng tersebar secara acak dan merata di dalam batuan lava andesit dan *tuff* di seluruh kaldera. Hal ini sesuai dengan hasil pemodelan 3D dapur magma di kawasan Dieng yang sangat luas dan dalam. Keberadaan magma yang masih aktif (ditandai dengan densitas yang sangat rendah) memicu terjadinya erupsi sehingga muncul banyak kawah vulkanik di kawasan Dieng.

Kawasan Dieng masih menyisakan belasan kawah aktif yang terbesar di tiga kabupaten. Pos Pengamatan Gunungapi Dieng mencatat, bahwa di Wonosobo ada kawah Pakuwaja dan Sikendang, di Batang terdapat Kawah Gerlang, Wanapriya, Wanasida, Sibanger dan Siglah. Adapun kawah paling banyak adalah di Banjarnegara, meliputi kawah Sinila, Timbang, Candradimuka, Sileri, Pager Kandang, Sikidang, Bitingan, dan Sibanteng [21]. Hasil penelitian juga didukung oleh data magnetotelurik (MT) yang menunjukkan kawasan Dieng merupakan suatu depresi yang di bawahnya terdapat sumber panasbumi [5].

KESIMPULAN

Penelitian dengan memanfaatkan data gravitasi citra satelit GGMplus untuk mengetahui struktur bawah permukaan dan reservoir panasbumi di kawasan Dataran Tinggi Dieng telah berhasil dilakukan. Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, meliputi pengaksesan data, koreksi *bougeur*, koreksi *terrain*, reduksi data ke bidang datar, pemisahan data anomali regional dan residual, pemodelan inversi, serta interpretasi. Data anomali gravitasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah data GGMplus dengan batas-batas koordinat geografis $109,8^{\circ}$ – $110,3^{\circ}$ BT dan $7,12^{\circ}$ – $7,28^{\circ}$ LS. Setelah diperoleh data, kemudian dilakukan koreksi *bougeur* dan *terrain* untuk mendapatkan data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) dengan nilai berkisar $-56,6$ – $65,7$ mGal. Reduksi ke bidang datar dan pemisahan data anomali regional-residual terhadap data ABL diterapkan sehingga diperoleh data ABL residual dengan nilai berkisar $-73,59$ – $47,60$ mGal. Data anomali ini tersebar pada ketinggian rata-rata topografi daerah penelitian ($1.392,35$ m). Pemodelan pada penelitian ini dilakukan secara inversi 3D terhadap data ABL residual. Hasil pemodelan berupa model anomali bawah permukaan dengan densitas batuan berkisar $1,00$ – $4,60$ g/cm³ yang diinterpretasi sebagai struktur geologi bawah permukaan Dataran Tinggi Dieng. Hasil interpretasi menunjukkan bahwa reservoir panasbumi terletak pada batuan lava andesit dengan densitas total berkisar $2,80$ – $3,70$ g/cm³.

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 Saudari Aina Zahra Ikhwana, S.Si. yang berkenan membantu memberikan tutorial pemodelan inversi 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W.B Hamilton, *Tectonics of The Indonesian Region*. US Government Printing Office. USA, 1979.
- [2] H. Meilani, dan W. Wuryandani, "Potensi Panasbumi sebagai Energi Alternatif Pengganti Bahan Bakar Fosil untuk Pembangkit Tenaga Listrik di Indonesia", *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*, vol. 1 no. 1, pp. 47 – 74, 2010.
- [3] M.A.I. Wardoyo, R. Prayuda, Y. Susena, F.A.W. Baradi, A. Ashari, F. Imamah, 2020, "Geomorphological Hazard at Some Area of The Outer Dieng Volcanic Complex Post Explosive Eruption Era", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* **884** 012007, 2021.
- [4] T. Winarno, J. Marin, *Buku Ajar Mineralogi*. Lembaga Pengembangan dan Penjaminan Mutu Pendidikan, Universitas Diponegoro, Semarang, 2020.
- [5] I.P. Haty, D.F. Yudiantoro, S.U. Choiriah, A. Putri, E. Magdalena, *Geologi dan Potensi Panas Bumi di Kompleks Vulkanik Dieng*. Buku. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, 2021.
- [6] H. Haluk, "Pengaruh Permeabilitas Reservoir terhadap Pembentukan Lapangan Panasbumi", *Journal of Information Science and Thechnology*, vol. 6, no. 2, hal. 94 – 97, 2014.
- [7] T.M. Yudistian, F. Hendrasto, Y. Yunis, "Penentuan Top Reservoir Panas Bumi Daerah Tulehu Berdasarkan Pemodelan 3D Menggunakan Data Geokimia, Log Pada Sumur X dan Interpretasi Data Magnetotellurik (MT)", *Journal of*

- Geosciences Engineering & Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 104 – 115, 2023.
- [8] Seha, 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. 7, no. 1, p. 01 – 07, 2023.
- [9] D.T. Sandwell and H.F. Smith, "Global Marine Gravity from Retracked Geosat and ERS-1 Altimetry: Ridge Segmentation Versus Spreading Rate", *Journal of Geophysical Research*, vol. 114 (B1), p. 1 – 18, 2009.
- [10] W.M. Telford, L.P. Gedaart, R.E. Sheriff, *Applied Geophysics*. Cambridge. New York, 1990.
- [11] Supriyanto, *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*. Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia. Depok. Indonesia, 2007.
- [12] Anonim, *Kajian Geopark Kawasan Dieng*. Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Wonosobo. Wonosobo. Indonesia, 2016.
- [13] W.H. Condon, L. Pardyanto, K.B. Ketner, T.C. Amin, S. Gafoer, dan H. Samodra, *Peta Geologi Lembar Banjarnegara dan Pekalongan*. Edisi kedua. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (P3G). Bandung, 1996.
- [14] 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, no. 16, p. 4279 – 4283, 2013.
- [15] A.D. Maulana dan D.A. Prasetyo, "Analisa Matematis pada Koreksi Bouguer dan Koreksi Medan Data Gravitasi Satelit Topex dalam Penentuan Kondisi Geologi Studi Kasus Sesar Palu Koro Sulawesi Tengah", *Jurnal Geosaintek*, vol. 5, no. 3, p. 91 – 100, 2019.
- [16] Blakely RJ. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. USA.
- [17] Seha, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, L. Ariska, "Power Spectrum Analysis of the Satellite Gravity Anomalies Data to Estimate the Thickness of Sediment Deposits in the Purwokerto-Purbalingga Groundwater Basin", *Advances in Physics Research*, vol. 5, p. 109-117, 2022.
- [18] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. USA, 1997.
- [19] Seha, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, "Pemanfaatan Data Anomali Gravitasi Citra Satelit untuk Interpretasi Kualitatif Batas Cekungan Air Tanah Purwokerto-Purbalingga", *Prosiding Seminar Nasional dan Call for Papers: Pengembangan Sumber Daya Perdesaan dan Kearifan Lokal Berkelanjutan XI*, 12-14 Oktober 2021. Purwokerto, 2022.
- [20] A. Basid, N. Andriani, S. Arfiyaningsih, "Pendugaan Reservoir Sistem Panas Bumi dengan Menggunakan Survey Geolistrik Resistivitas dan Self Potensial", *Jurnal Neutrino*, vol. 7, no. 1 Oktober 2014, hal. 57 – 70, 2014.
- [21] L. Darmawan, *Menyibak Evolusi Geologi Dataran Tinggi Dieng*. Mongabay: Situs Berita Lingkungan, 2020. Website: <https://www.mongabay.co.id/2020/04/25/menyibak-evolusi-geologi-dataran-tinggi-dieng/> [Diakses: 22 April 2024]

Desain sistem pemantauan kualitas udara jangka panjang berbasis *Internet of Things*

Andreas Setiawan^{1*}, Sigit Sulistiyanto¹, Cucun Alep Riyanto², Gede Arya Wiguna³

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Kristen Satya Wacana,
Jl. Diponegoro 52-60, Salatiga, Jawa Tengah 50711

²Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Kristen Satya Wacana,
Jl. Diponegoro 52-60, Salatiga, Jawa Tengah 50711

³Program studi Biologi, Fakultas Sains Biologi, Universitas Timor
Jl Eltari km. 9 Sasi, Kecamatan Kota Kefamenanu, Timor Tengah Utara (TTU), Nusa Tenggara Timur

*email: andreas.setiawan@uksw.edu

Abstrak - Polusi udara adalah ancaman lingkungan terbesar bagi kesehatan masyarakat global dan menyumbang jutaan kematian dini setiap tahunnya. Dalam setiap tarikan napas, manusia dapat menghirup sejumlah partikel kecil yang dapat merusak paru-paru, jantung, dan otak yang menyebabkan masalah kesehatan. Meskipun polusi udara merupakan masalah global, polusi udara tidak secara proporsional mempengaruhi seluruh dunia. Masyarakat yang tinggal di negara-negara berkembang memiliki dampak yang lebih besar karena pengelolaan lingkungan yang buruk. Metode pengelolaan limbah, polusi transportasi, pembakaran dan manajemen sampah yang tidak optimal menyebabkan terlepasnya sejumlah polutan ke lingkungan dan udara. Hal ini sering tidak disadari karena perubahan terjadi secara bertahap dalam jangka panjang. Terbatasnya sistem pemantauan udara yang terjangkau dan dapat beroperasi dalam jangka panjang, menyebabkan kurangnya antisipasi untuk masalah ini. Berpijak pada urgensi ini, dalam artikel ini disampaikan pengembangan dan ujicoba sistem pengukuran kualitas udara berbasis sensor ENS160 dan WEMOS D1 yang terintegrasi dengan platform *Internet of Things*. Pada bagian akhir dilaporkan uji coba sistem yang telah dioperasikan selama 4,5 bulan secara terus menerus. Sistem berhasil menyimpan 200.000 data yang merupakan akumulasi pengukuran setiap 1 menit, dengan kesalahan pengukuran kurang dari 1%. Hal ini memperlihatkan keberhasilan sistem sebagai sebuah sistem pengukuran kualitas udara yang handal dan terjangkau untuk jangka panjang. Dengan ditemukannya formulasi sistem pengukuran yang tepat diharapkan membantu pengelolaan dan peningkatan kesehatan lingkungan terutama terhadap pengaruh polusi udara di Indonesia.

Kata Kunci: polusi udara, sensor gas, *internet of things*, manajemen polusi udara

Abstract – Air pollution is the biggest environmental threat to global public health and accounts for an estimated million premature deaths each year. With each breath, humans can inhale a number of tiny particles that can damage the lungs, heart and brain and cause a multitude of health problems. While air pollution is a global problem, it does not proportionally affect the entire world. People living in developing countries have a greater impact due to poor environmental management. Suboptimal methods of waste management, transportation pollution, incineration and waste management lead to the release of a number of pollutants into the environment and air. This is often unnoticed as changes occur gradually over the long term. There is a lack of affordable and long-term operational air monitoring systems, leading to a lack of technological support to address this. Based on this urgency, this paper develops an air quality measurement system based on ENS160 and WEMOS D1 sensors integrated with the *Internet of Things* platform. At the end, a trial of the system that has been operated for approximately 4.5 months continuously is reported. The system successfully stores 200,000 data which is the accumulation of measurements every 1 minute. Furthermore, the error analysis of the measurement system is also shown, which is less than 1%. This shows the success of the system as a reliable and affordable air quality measurement system for the long term. With the discovery of the right measurement system formulation, it is expected to help manage and improve environmental health, especially against the effects of air pollution in Indonesia.

Key words: air pollution, gas sensors, *internet of things*, air pollution management

PENDAHULUAN

Polusi udara adalah ancaman lingkungan terbesar bagi kesehatan masyarakat secara global dan menyumbang sekitar 7 juta kematian

dini setiap tahunnya [1-2]. Polusi udara dan perubahan iklim sangat erat kaitannya karena semua polutan utama berdampak pada iklim dan sebagian besar memiliki sumber yang sama dengan gas rumah kaca. Pengelolaan kualitas

udara akan membawa manfaat bagi kesehatan manusia dan kualitas lingkungan. Partikel yang berbahaya dapat mencakup jelaga, debu tanah, hingga sulfat, berupa partikel halus yang berdiameter kurang dari 2,5 mikron atau sering disingkat PM2.5 [3-5].

Paparan PM2.5 mengurangi rata-rata harapan hidup global sekitar satu tahun pada tahun 2019 [6-7]. Penyakit paling mematikan yang terkait dengan polusi udara PM2.5 adalah stroke, penyakit jantung, penyakit paru-paru, penyakit pernapasan bagian bawah (seperti pneumonia), dan kanker [8-9]. Tingginya tingkat partikel halus juga berkontribusi pada penyakit lain, seperti diabetes pada dewasa dan gangguan kognitif pada anak-anak [10-12]. Sebagai contoh, polusi udara terkait dengan 20% kematian akibat penyakit jantung iskemik secara global, namun lebih dari 30% terjadi di wilayah Timur Tengah dan Afrika Utara [13]. Anak-anak sangat rentan terhadap dampak buruk polusi udara terhadap kesehatan, bahkan tercatat 20% kematian bayi baru lahir di seluruh dunia disebabkan oleh paparan polusi udara [14].

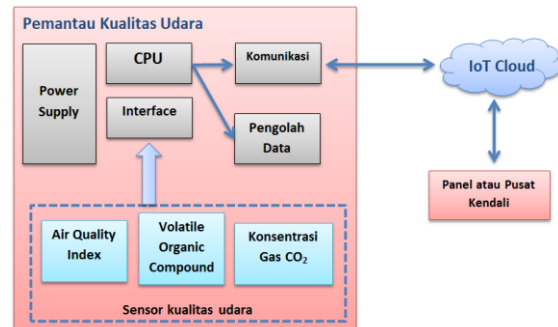
Dengan urgensi tersebut, pada jurnal ini disampaikan pengembangan sistem pengukuran kualitas udara berbasis IoT. Desain dikembangkan sebagai rintisan awal sistem pengukuran yang terjangkau dan dapat melakukan pengukuran secara periodis dalam jangka waktu panjang. Pengukuran jangka panjang merujuk pada proses pengumpulan dan analisis data dalam periode waktu yang lama untuk mengamati dan memahami tren, perubahan, dan dampak dari berbagai faktor atau intervensi. Pengukuran ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih akurat dan menyeluruh mengenai fenomena yang dipelajari dengan mempertimbangkan variabilitas dan fluktuasi yang mungkin tidak terlihat dalam jangka pendek. Dengan keunggulan ini diharapkan dapat dioperasikan pada wilayah seperti Indonesia yang memiliki daerah yang luas dan ragam latar belakang ekonomi.

METODE PENELITIAN

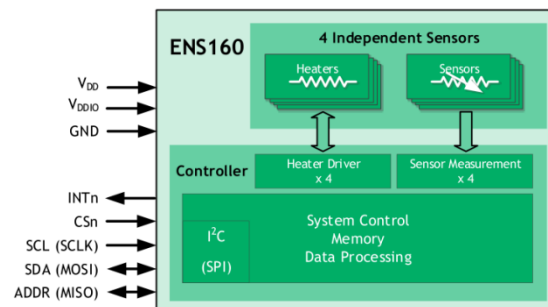
Desain Sitem Pengukuran

Sistem pengukuran yang direncanakan memiliki unit sensor kualitas udara, pusat kontrol dan interface, bagian komunikasi dan pengolah data, seperti diperlihatkan pada gambar 1. Kualitas udara akan diukur oleh sensor ENS160 yang

bekerja secara simultan untuk konsentrasi gas CO₂, VOC dan level kualitas udara AQI. Dalam formulasi sistem pengukuran ini akan digunakan jenis sensor ENS160 yang telah memiliki kemampuan pengukuran 3 parameter seperti yang direncanakan. Sensor multi-gas digital NS160 terdiri dari empat pemanas independen dan elemen sensor gas, berdasarkan teknologi oksida logam (MOX), dan pengontrol seperti yang ditunjukkan pada diagram blok fungsional gambar 2.



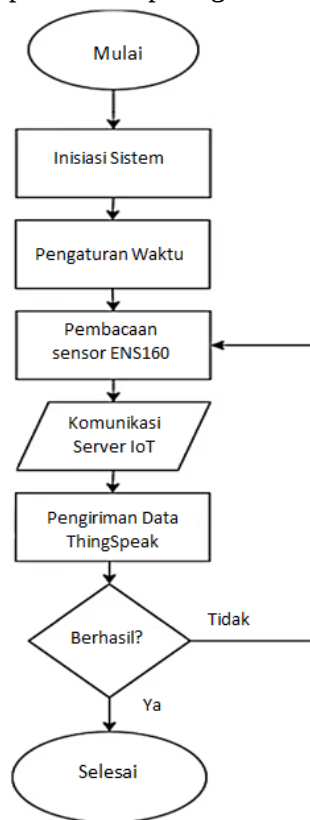
Gambar 1. Diagram blok formulasi sistem pengukuran kualitas udara.



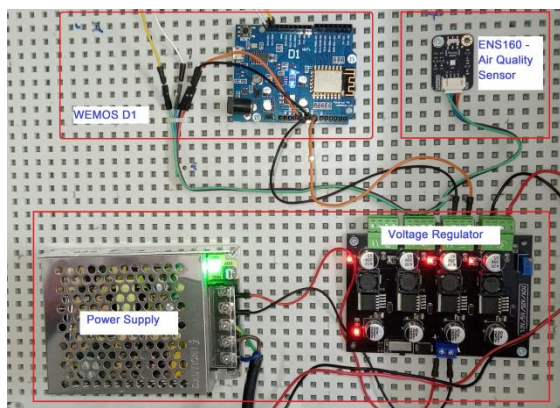
Gambar 2. Diagram blok fungsional sensor yang akan digunakan

Secara singkat cara kerja sensor diawali dari Driver Pemanas yang akan mengontrol mode pengoperasian sensor dan menyediakan daya ke masing-masing pemanas elemen sensor individu. Selama pengoperasian, driver pemanas mengatur pemanas ke arahnya titik pengaturan individu. Blok Pengukuran Sensor menentukan nilai resistansi sensor untuk setiap individu elemen sensor. Blok Kontrol Sistem selanjutnya akan memproses nilai resistansi secara internal untuk menghasilkan TVOC, eCO₂, AQI dan sinyal lebih lanjut pada antarmuka digital. ENS160 mencakup antarmuka I2C digital 2 kabel standar (SCL, SDA) atau antarmuka SPI digital 4 kabel (SCLK, MOSI, MISO, CSn) untuk komunikasi ke prosesor host utama. Memori on-chip digunakan untuk menyimpan

nilai kalibrasi. Selanjutnya diagram alir program diperlihatkan pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir cara kerja program dalam pembacaan sensor dan komunikasi IoT.



Gambar 4. Foto sistem yang dikembangkan terdiri dari papan WEMOS D1, sensor ENS160 dan unit power supply.

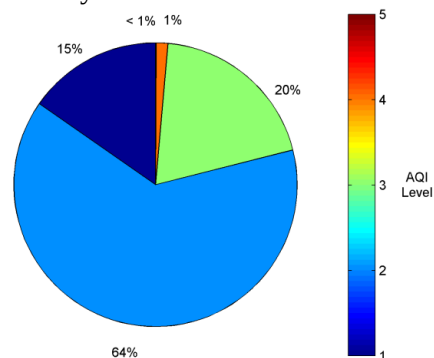
Dalam hal ini sensor akan mengirimkan data sesuai permintaan kontrol utama sistem yaitu WEMOS D1 melalui saluran SPI. Kontrol akan mengolah data yang diterima dari sensor dan selanjutnya melakukan formatting untuk berkomunikasi dengan server IoT ThingSpeak. Kontrol diprogram untuk melakukan pengukuran dan pengiriman data setiap 1 menit. Sehingga dengan 3 parameter (CO_2 , VOC dan

AQI) dalam 1 jam akan dihasilkan 3×60 atau 180 pesan. Dalam 1 hari dihasilkan 180×24 atau 4.320 pesan/hari. Selanjutnya untuk melakukan analisa data akan diunduh pada komputer klien secara periodis. Dalam analisa data selanjutnya digunakan 200.000 data pertama sejak sistem diaktifkan, atau setara 4,5 bulan pengukuran. Selanjutnya data diunduh dan dilakukan analisa menggunakan perangkat lunak Octave.

Hasil dan Analisa

Ujicoba dilakukan di ruang BU3 C, Program Studi Fisika, UKSW. Pengukuran dilakukan sejak tanggal 23 Juni 2023 hingga tercapai 200.000 data pada 19 November 2023. Foto hasil rancangan sistem diperlihatkan pada Gambar 4. Data akan selalu diperbaharui setiap menit dan ditampilkan melalui channel yang telah didaftarkan (<https://thingspeak.com/channels/2197202>).

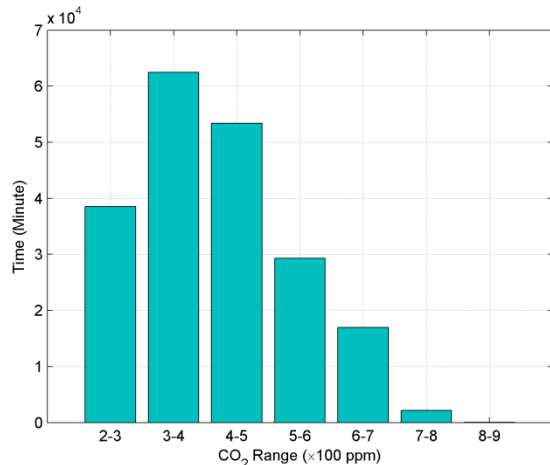
Analisa pertama untuk untuk distribusi kualitas udara ruangan tersebut diperlihatkan pada gambar 5. Rata-rata ruangan berada pada kategori AQI level 2 (64%) sehingga masih dalam kategori aman untuk kesehatan. Meskipun demikian diperlihatkan juga distribusi selanjutnya berada pada AQI level 3 (20%) yang artinya kondisi udara ruangan masih memerlukan penanganan minor agar lebih sehat. Untuk kategori AQI yang lebih tinggi tidak ditemukan kondisi menonjol (kurang dari 1%) sehingga dapat dianggap ruangan masih cukup layak digunakan dari segi kualitas udaranya.



Gambar 5. Rekapitulasi 4,5 bulan pengukuran kualitas udara AQI level, sebagian besar berada pada kualitas level 2 dengan prosentase 64% setara 13×104 menit.

Analisa berikutnya terhadap konsentrasi CO_2 dalam ruangan diperlihatkan pada Gambar 6. Dari kurva distribusi diperlihatkan puncak konsentrasi berada pada selang 300-400 ppm,

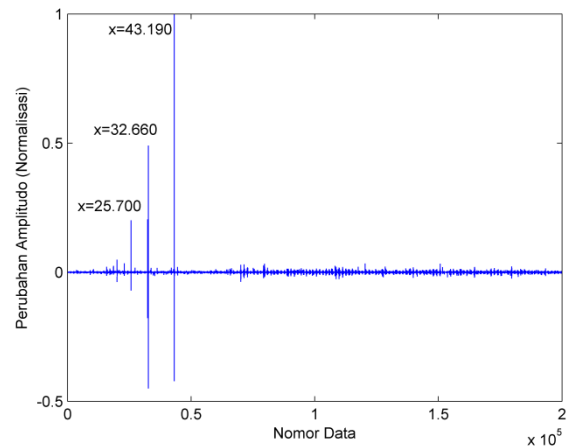
hal ini sebagai indikasi kondisi udara yang sangat baik. Meskipun mengalami peningkatan konsentrasi CO_2 namun masih berada dalam kategori aman. Dalam mekanisme kerja ENS160 tingkat VOC secara numeric diturunkan dari konsentrasi CO_2 dengan demikian dalam perhitungan ini tidak dilakukan analisa tersendiri karena memiliki perilaku yang identik.



Gambar 6. Rekapitulasi data pengukuran kadar CO_2 , konsentrasi terbesar berada pada range 300-400 ppm diikuti oleh 400-500 ppm.

Berikutnya dilakukan uji kehandalan sistem terhadap kesalahan pengukuran yang mungkin terjadi. Untuk melakukan hal ini kurva data CO_2 dilakukan diferensiasi. Tujuan diferensiasi adalah melihat perubahan pengukuran yang terlalu cepat. Secara alami konsentrasi gas CO_2 tidak dapat berubah terlalu cepat pada sebuah ruangan (tanpa gangguan). Pada penelitian lain untuk melakukan pengukuran ini diperlukan lebih dari satu sensor dan waktu pengukuran lebih dari 1 menit [15-16]. Dasar inilah yang digunakan untuk memeriksa kesalahan pengukuran. Kurva hasil pengolahan ini diperlihatkan pada Gambar 7. Terlihat bahwa sebagian besar data mengalami perubahan yang tidak ekstrim, terkecuali untuk 3 data pada nomor 25.700, 32.660 dan 43.190. Terlihat bahwa puncak perubahan bisa berkali lipat dari pengukuran sebelumnya, terutama pada data 43.190. Analisa lebih lanjut karena posisi datanya saling berdekatan sehingga diperkirakan terjadi gangguan pada waktu yang hampir sama. Meskipun demikian analisa lebih lanjut tidak dapat dilakukan karena tidak dicatat kondisi eksternal yang lain. Gangguan ini bisa muncul akibat lonjakan listrik maupun kontaminasi gas CO_2 yang cukup tinggi pada jangka pendek (misalnya semprotan parfum atau gas lain yang mengganggu kerja sensor). Dalam

percobaan ini karena parameter external tidak dipantau maka kajian ini masih terbatas pada analisa matematis.



Gambar 7. Hasil diferensiasi data pengukuran CO_2 , terlihat peningkatan puncak data yang terlalu ekstrim sebagai indikasi kesalahan pengukuran.

Telah dilakukan riset dan pengembangan sistem pemantauan kualitas udara untuk jangka panjang berbasis IoT. Sensor kualitas udara ENS160 berhasil memberikan nilai yang cukup stabil pada rentang waktu pengukuran panjang yaitu hingga 4,5 bulan. Sedangkan control utama WEMOS D1 berhasil secara simultan menarik data dari sensor dan mengirimkan ke server IoT ThingSpeak melalui jalur WIFI setiap 1 menit. Selanjutnya diperlihatkan juga keberhasilan penggunaan server IoT ThingSpeak yang mencatat data akumulasi untuk 200.000 pengukuran. Jika dikalikan dengan parameter yang diukur (AQI, CO_2 dan VOC) maka sistem berhasil merekam 600.000 data selama 4,5 bulan secara terus-menerus. Analisa kesalahan data terhadap lonjakan pengukuran diperlihatkan jauh dibawah nilai 1%. Hal ini menunjukkan kehandalan sistem untuk pengukuran jangka panjang, sekaligus memperlihatkan desain sistem yang sederhana dengan biaya yang terjangkau.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung skema Riset Fundamental, Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DRPM), Wakil Rektor Riset, Inovasi dan Kewirausahaan (WR-RIK), Universitas Kristen Satya Wacana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Xu S, A. Marcon, R.J. Bertelsen, B. Benediktsdottir, J. Brandt, K. Engemann, L.M. Frohn, C. Geels, T. Gislason, J.

- Heinrich, M. Holm, C. Janson, I. Markevych, L. Modig, H. Orru, V. Schlünssen, T. Sigsgaard, A. Johannessen, "Long-term exposure to low-level air pollution and greenness and mortality in Northern Europe," *Environment International*, vol. 181 no. 108257, pp.1-11, 2023
- [2] B. Brunekreef, M. Strak, J. Chen, *et al* "Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project," *Research Reports: Health Effects Institute*, vol. 208, pp.1-127, 2021
- [3] P. Qin, X. Luo, Y. Zeng, Y. Zhang, Y. Li, Y. Wu, M. Han, R. Qie, X. Wu, D. Liu, S. Huang, Y. Zhao, Y. Feng, X. Yang, F. Hu, X. Sun, D. Hu, M. Zhang, "Long-term association of ambient air pollution and hypertension in adults and in children: A systematic review and meta-analysis," *Science of The Total Environment*, vol. 20, no.796, pp.148620, 2021
- [4] P. Thangavel, D. Park, & Y.C. Lee, "Recent insights into particulate matter (PM_{2.5})-mediated toxicity in humans: An overview," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 12, pp.7511, 2022
- [5] W. Wathanavasin, A. Banjongjit, , Phannajit, J., *et al*, "Association of fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure and chronic kidney disease outcomes: a systematic review and meta-analysis," *Scientific Reports*, vol. 14, pp.1048, 2024.
- [6] M. Abbasi-Kangevari, M.R. Malekpour, M. Masinaei, S.S. Moghaddam, S.H. Ghamari, Z. Abbasi-Kangevari, N. Rezaei, N. Rezaei, A.H. Mokdad, M. Naghavi, B. Larijani, F. Farzadfar, C.J.L. Murray, "GBD 2019 North Africa and the Middle East Air Pollution Collaborators. Effect of air pollution on disease burden, mortality, and life expectancy in North Africa and the Middle East: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019," *Lancet Planet Health*, vol. 7, no. 5, pp.e358-e369, 2023.
- [7] O. S. Ebhota, Y. Hongxing, dan A. K. Sampene, , "Air pollution and life expectancy: New evidence from the MINT economies," *Heliyon*, vol. 9, no. 12, pp.e22396, 2023.
- [8] F. Dominici; J. Schwartz., "Air Pollution and Mortality in the US using Medicare and Medicaid Populations", *Environmental Epidemiology*, vol. 3, pp.356-357, 2019.
- [9] Y. Wei, M.D. Yazdi, Q. Di, *et al.*, "Emulating causal dose-response relations between air pollutants and mortality in the Medicare population," *Environmental Health*, vol. 20, pp.53, 2021.
- [10] K. Bhui, J. B. Newbury, R. M. Latham,, *et al.*, "Air quality and mental health: evidence, challenges and future directions," *BJPsych Open*, vol. 9, no. 4), pp. e120, 2023.
- [11] N. A. Ali, & Khoja, "Growing evidence for the impact of air pollution on depression," *The Ochsner Journal*, vol. 19, no. 1, pp.1-4, 2019.
- [12] P. Cianconi, S. Betrò, & L.Janiri, " The impact of climate change on mental health: A systematic descriptive review," *Frontiers in Psychiatry*, vol. 11, no. 74), pp.1-10, 2020.
- [13] M. M. Hossain, and M. N. Hasan, "Ambient air pollution and respiratory health problems among children: a review," *Journal of Environmental Science and Health*, vol. 37, no. 1, pp.1-22, 2019.
- [14] N. Siddika, H. Balogun, A. K. Amegah, , and J. J. K. Jaakkola, "Prenatal ambient air pollution exposure and the risk of stillbirth: systematic review and meta-analysis of the empirical evidence," *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 76, no. 2, pp.105-113, 2019.

- [15] T. H. Nasution, A. Hizriadi, K. Tanjung and F. Nurmayadi, "Design of Indoor Air Quality Monitoring Systems," *2020 4rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, Medan, Indonesia, pp. 238-241, 2020.

- [16] S. Ochie, M. R. Usikalu, A. Akinpelu, , W. A. Ayara, & O.W. Ayanbisi, "Design and construction of a home air quality monitoring system," *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, vol. 993, no. 1, pp.012022, 2020

Penentuan momen inersia bola pejal menggunakan sensor gyroscope MPU6050 dan sensor photodiode

Umi Pratiwi*, Ika Maulita, Efita Pratiwi Adi, Adilla Luthfia

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

*email:umi.pratiwi.fis@unsoed.ac.id.

Abstrak – Momen inersia sebagai konsep penting dalam sistem kerja mesin yang memerlukan gerak rotasi dan pengukuran secara manual belum mendapatkan hasil maksimal. Oleh karena itu diperlukan sistem pengukuran momen inersia bola pejal yang lebih akurat. Tujuan penelitian adalah perancangan sistem pengukuran momen inersia bola pejal berbasis digital menggunakan sensor Mpu6050 Gyroscope Angle dan sensor photodiode. Metode yang dilakukan dalam merancang sisten pengukuran momen inersia bola pejal, dilakuakn melalui beberapa tahapan yaitu membuat flowchart prinsip kerja sistem, membuat flowchart pemrograman sistem, dan perhitungan momen inersia bola pejal dan ketelitiannya. Variabel yang diukur berupa waktu tempuh bola pejal, panjang lintasan, dan sudut lintasan bidang miring. Perhitungan menggunakan variasi panjang lintasan 2m, 1,8 m dan 1,6m dengan sudut tetap, dan variasi sudut yang berbeda yaitu 15°, 10° dan 5° dengan jarak tetap. Hasil uji alat pengukuran momen inersia bola pejal diperoleh besar konstanta momen inersia bola pejal terbaik dengan k sebesar $(0,415 \pm 0,009)$. Hasil terbaik tersebut diukur pada sudut kemiringan 5° dengan panjang lintasan 2 meter. Hasil uji sistem pengukuran momen inersi bola pejal menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik dan sistem menghasilkan nilai ralat yang cukup kecil. Berdasarkan hasil analisis data tersebut, alat penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 Gyroscope Angle Sensor dan Sensor Photodiode berbasis arduino dapat digunakan sebagai alternatif sistem pengukuran momen inersia yang lebih tepat dan lebih handal.

Kata Kunci: momen inersia bola pejal, sensor Gyroscope MPU6050, sensor photodiode, arduino.

Abstract – Moment of inertia as an important concept in machine working systems that require rotational motion and manual measurements has not yet achieved maximum results. Therefore, a more accurate system for measuring the moment of inertia of a solid ball is needed. The aim of the research is to design a digital-based system for measuring the moment of inertia of a solid ball using the Mpu6050 Gyroscope Angle sensor and a photodiode sensor. The method used in designing a system for measuring the moment of inertia of a solid ball is carried out through several stages, namely making a flowchart of the system's working principles, making a system programming flowchart, and calculating the moment of inertia of a solid ball and its accuracy. The variables measured are the travel time of the solid ball, the length of the path, and the angle of the inclined plane. The calculation uses variations in path lengths of 2m, 1.8m and 1.6m with fixed angles, and different angle variations, namely 15°, 10° and 5° with fixed distances. The test results of the tool for measuring the moment of inertia of a solid ball obtained the best constant moment of inertia of a solid ball with k of (0.415 ± 0.009) . The best results were measured at a slope angle of 5° with a path length of 2 meters. The test results of the solid ball moment of inertia measurement system show that the system can work well and the system produces quite small error values. Based on the results of this data analysis, a tool for determining the moment of inertia of a solid ball using the MPU6050 Gyroscope Angle Sensor and an Arduino-based Photodiode Sensor can be used as an alternative moment of inertia measurement system that is more precise and more reliable.

Key words: moment of inertia of a solid ball, MPU6050 Gyroscope sensor, photodiode sensor, Arduino.

PENDAHULUAN

Pengukuran momen inersia dalam fisika memiliki peranan penting dalam memahami perilaku rotasi suatu objek terhadap sumbu tertentu. Momen inersia, atau sering juga disebut inertia rotasional adalah ukuran dari kecenderungan suatu benda untuk tetap dalam

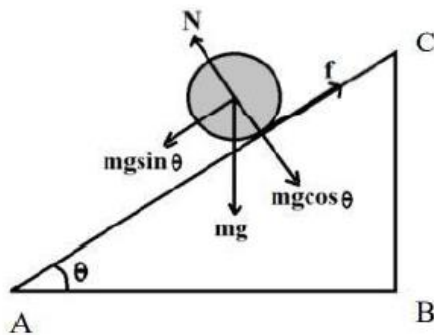
keadaan rotasi atau tidak berotasi. Salah satu eksperimen yang penting dalam memahami momen inersia rotasional adalah penentuan momen inersia bola pejal [1].

Penentuan momen inersia bola pejal melibatkan pengukuran karakteristik rotasi suatu objek terhadap sumbu tertentu [2]. Momen inersia sebuah objek adalah ukuran dari

seberapa sulit objek tersebut untuk berubah kecepatan sudutnya saat diberi gaya yang memutar [3], [4]. Dalam eksperimen ini momen inersia bola pejal dapat ditentukan dengan menggunakan kombinasi sensor *gyroscope* MPU6050 dan sensor fotodioda [5].

Penggunaan sensor *gyroscope* dan sensor fotodioda dalam penentuan momen inersia bola pejal memberikan keunggulan dalam akurasi pengukuran, kemudahan dalam pengolahan data [6] dan dapat dilakukan melakukan pengukuran secara langsung [7]. Sensor *gyroscope* mampu memberikan informasi langsung tentang perubahan kecepatan sudut bola pejal pada tiga sumbu ruang: *roll*, *pitch*, dan *yaw* [8], [9]. Sedangkan sensor fotodioda memiliki kepekaan terhadap intensitas cahaya sehingga dapat memberikan data waktu yang dibutuhkan oleh bola pejal untuk berputar sepanjang sumbu tertentu [10], [11]. Dengan menggunakan kedua sensor tersebut dapat diperoleh data yang akurat dan komprehensif mengenai karakteristik rotasi bola pejal.

Perhitungan momen inersia (kelembaman/ k) sebuah bola pejal dengan massa m dan jejari r yang berotasi terhadap sumbu pusat massa, dapat ditentukan berdasarkan ilustrasi Gambar 1 dan Persamaan 1 [12], [13].



Gambar 1. Gerak menggelinding pada bidang miring

Persamaan 1 menunjukkan percepatan bola pejal berotasi dengan lintasan sudut tertentu.

$$a = \frac{g \sin \theta}{1 + \frac{I}{mr^2}} \quad (1)$$

Jika $I = kmr^2$ maka diperoleh, Persamaan 2:

$$k = \frac{g \sin \theta}{a} - 1 \quad (2)$$

Dengan mengganti nilai $a = \frac{s}{t^2}$ maka diperoleh:

$$k = \frac{gt^2 \sin \theta}{a} - 1 \quad (3)$$

Hasil dari penurunan tersebut dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, termasuk ilmu material, rekayasa mesin, dan rekayasa struktur. Dalam ilmu material, pengetahuan tentang momen inersia bola pejal dapat digunakan untuk memahami sifat-sifat mekanik dari bahan dan material yang digunakan dalam berbagai aplikasi teknik [14]. Sementara dalam rekayasa mesin, pemahaman tentang momen inersia bola pejal sangat penting dalam merancang dan mengoptimalkan kinerja mesin-mesin yang melibatkan gerakan rotasi, seperti motor listrik, turbin, dan mesin pemutar lainnya. Begitu juga dalam rekayasa struktur, pengetahuan tentang momen inersia bola pejal dapat membantu dalam merancang struktur bangunan atau konstruksi yang efisien dan aman terhadap beban rotasi yang bekerja pada struktur tersebut [15]–[17].

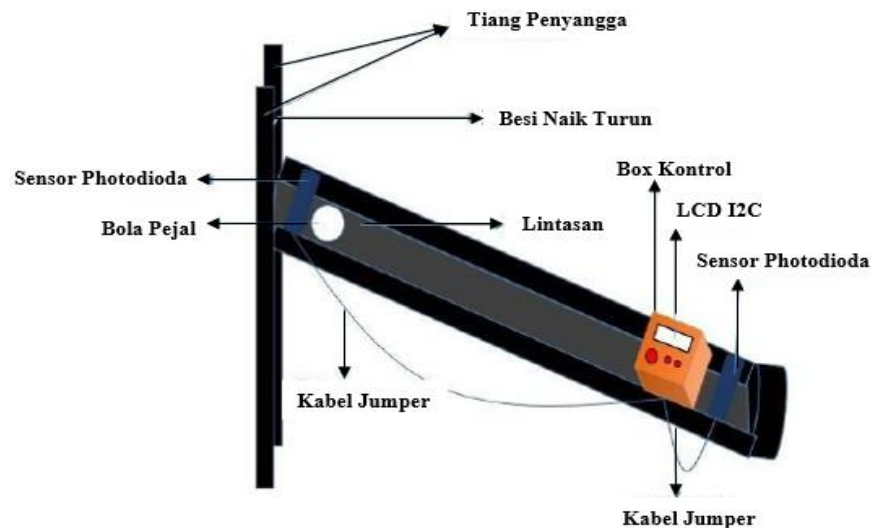
Berdasarkan pemaparan di atas, tujuan penelitian ini adalah perancangan sistem pengukuran momen inersia bola pejal berbasis digital menggunakan sensor Mpu6050 Gyroscope Angle dan sensor photodioda. Pengukuran menggunakan mikrokontroler dalam mengontrol sensor yang digunakan agar lebih presisi.

METODE PENELITIAN

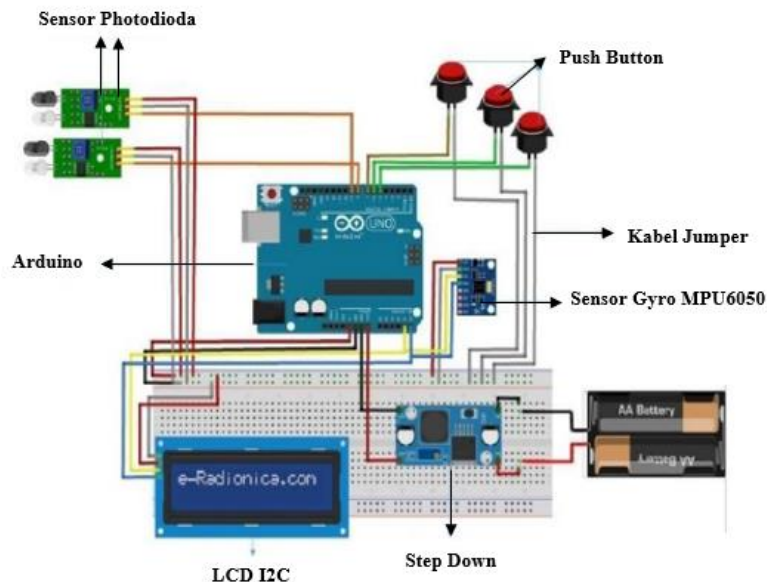
A. Desain Sistem Penentuan Momen Inersia Bola Pejal

Desain sistem penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 *Gyroscope Angle* Sensor Berbasis Arduino disajikan pada Gambar 2a dan sistem elektronika pada Gambar 2b. Peralatan yang digunakan dalam penentuan momen inersia terdiri dari arduino, MPU6050 *Gyroscope Angle* Sensor, sensor photodioda, push button, step dow. Cassing alat menggunakan bahan dasar dari besi galvalum dan kayu. Pemilihan besi galvalum karena memiliki sifat ringan dan tahan lama. Sedangkan pemilihan kayu karena mudah dibentuk. Komponen elektronika yang diperlukan untuk menampilkan hasil berupa *bread board* dan LCD I2C. Ketinggian peyangga 1 m, panjang lintasan bidang miring 2 m dengan lebar 3,5 cm.

Bola pejal yang digunakan berupa kelereng dengan diameter 2,40 cm.



(a)



(b)

Gambar 2. a) Desain sistem, b) Rangkaian elektronika sistem penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 Gyroscope Angle Sensor

B. Rangkaian Elektronika dan Diagram Alir Sistem

Diagram alir rangkaian sistem penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 Gyroscope Angle Sensor Berbasis Arduino disajikan pada Gambar 2b. Diagram alir terdiri dari diagram alir prinsip kerja sistem secara keseluruhan dan diagram alir program algoritma menggunakan mikrokontroler arduino. Sensor photodiode digunakan untuk memperoleh variabel waktu

luncur bola pejal berdasarkan selisih deteksi obyek oleh photodiode 1 dan photodiode 2. Sensor MPU6050 Gyroscope Angle untuk memperoleh nilai momen inersia berdasarkan sudut yang diukur. Penentuan nilai momen inersia dilakukan dengan tiga variasi jarak tempuh bola pejal dan tiga variasi sudut permukaan luncur.

Gambar 3 menunjukkan diagram alir pemrograman algoritma menggunakan Arduino IDE. Sistem diberikan input berupa sudut, jarak,

dan waktu. Jarak sudah ditentukan terlebih dahulu dengan tiga variasi dan besarnya sudut diperoleh dari sensor MPU6050 *Gyroscope Angle*. Variabel waktu diperoleh oleh sensor photodiode. Dari ketiga variabel tersebut diperoleh perhitungan konstanta kelembamana sebagai proses perhitungan momen inersia bola pejal.

C. Pengujian Ketelitian

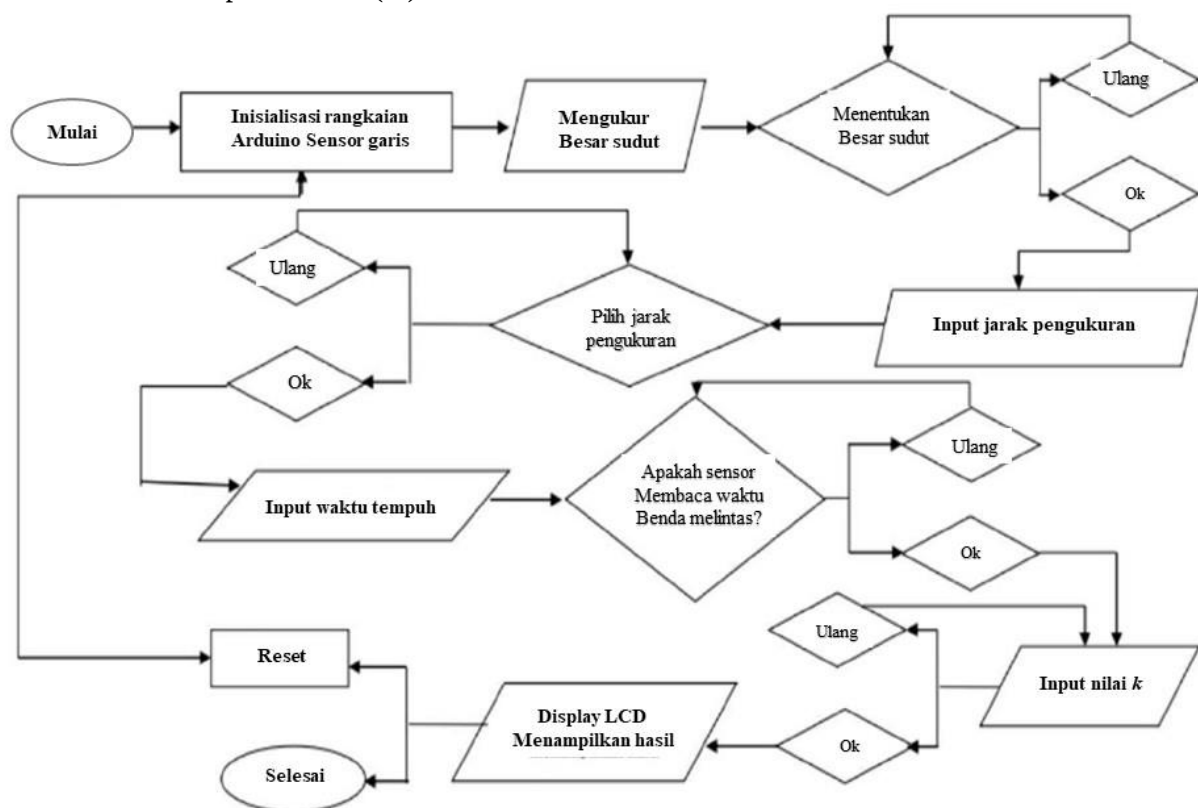
Berikut ini skema pengujian ketelitian alat yang direalisasikan. Setelah diperoleh data dari pengujian, maka langkah selanjutnya adalah menganalisa data tersebut dan melakukan perhitungan analisis nilai persentase (%) keberhasilan dan persentase (%) kesalahan

(*error*) pada alat viskositas fluida. Rumus-rumus pencarian persentase kesalahan dan keberhasilan adalah berdasarkan persamaan berikut ini [18].

$$\%Kbr = \frac{NS - NT}{NS} \times 100\% \quad (5)$$

$$Ralat = \frac{\%Kslhn}{100\%} \times NS \quad (6)$$

dengan %Kbr persentase keberhasilan, %Kslhn persentase kesalahan, NS nilai sebenarnya, dan NT nilai terukur.



Gambar 3. Flowchart prinsip kerja alat penentuan momen inersia menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope Angle dan sensor photodiode

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan momen inersia bola pejal secara konvensional mengalami kesulitan dalam menentukan besar sudut dan waktu yang dibutuhkan karena masih menggunakan alat yang manual berupa busur dan stopwatch. Hal ini akan mempengaruhi akurasi data yang diperoleh. Oleh karena itu peneliti ini dilakukan untuk pengembangan alat peraga momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 Gyroscope Angle Sensor dan sensor photodiode, sehingga dapat mencatat data sudut dan waktu secara otomatis.

Ketika bola pejal digelindingkan ke bidang miring yang dibagian atas dan bawah telah ditempatkan sensor maka sensor akan menangkap pergerakan benda. Pada saat benda melewati atau mengenai sensor yang telah dipasang sesuai gambar desain alat peraga, maka sensor akan mengirimkan sinyal. Sinyal tersebut digunakan sebagai tanda waktu yang dibutuhkan benda untuk melaju dari sensor pertama sampai sensor terakhir. Semua data yang terdiri dari jarak, waktu, percepatan gravitasi bumi, dan sudut kemiringan bidang miring dikirimkan ke sistem arduino dan ditampilkan pada layar monitor.

Sebelum dilakukan perhitungan dilakukan pengujian terhadap komponen yang dipakai pada sistem. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk menguji kinerja komponen sistem agar berjalan dengan baik. Langkah pertama dilakukan pengujian sensor photodiode untuk mengetahui tingkat keakuratan kecepatan yang terukur pada sistem. Pengukuran dilakukan dengan bantuan alat *stopwatch* manual. Selain untuk mengetahui tingkat akurasi (keakuratan), pengujian terhadap ketepatan sensor photodiode juga bertujuan untuk mengetahui nilai kesalahan (*error*) yang terjadi pada pembacaan sistem. Hasil dari pengujian ketepatan sensor photodiode menggunakan stopwatch disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian ketepatan sensor photodiode

Jarak (m)	Perhitungan	Rata-rata (t)	Selisih	Error
2	Manual	1,065	-0,002	0,2%
	Sensor photodiode	1,063		
1,8	Manual	1,009	-0,001	0,1%
	Sensor photodiode	1.008		
1,6	Manual	0,949	-0,001	0,1%
	Sensor photodiode	0,948		

Kedua, pengujian pembacaan sensor sudut MPU6050 Gyroscope. Pengujian terhadap sensor MPU6050 Gyroscope Angle dilakukan untuk mengetahui tingkat keakuratan pembacaan sensor tersebut terhadap sudut antara lintasan dan lantai, sensor presentase nilai kesalahan (*error*) yang terjadi pada sensor tersebut. Pengujian dilakukan dengan mengamati hasil yang ditampilkan pada layar LCD dan dibandingkan dengan busur manual. Hasil pengujian sensor MPU6050 Gyroscope *angel* dan perhitungan manual disajikan pada Tabel 2. Pada sudut 15° menghasilkan kesalahan (*error*) paling kecil diantara sudut lainnya.

Tabel 2. Hasil pengujian sensor MPU6050 Gyroscope Angle

Sudut (m)	Perhitungan	Rata-rata (t)	Selisih	Error
15°	Manual	1,064	-0,0014	0,1%
	Sensor MGA	1,063		
10°	Manual	1,301	-0,0064	0,6%
	Sensor MGA	1,295		
5°	Manual	1,822	-0,003	0,3%
	Sensor MGA	1,819		

Ketiga, pengujian sistem peraga penentuan momen inersia menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope *angel* dan sensor photodiode. hasil pengujian sensor photodiode dan menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope *angel* memiliki ralat terkecil pada sudut 15° . Percobaan dengan variasi jarak ditunjukkan dan menghasilkan *k* konstanta kelembaman bola pejal pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian sistem peraga dengan variasi jarak

Jarak (m)	Sudut	<i>K</i> manual	<i>K</i> sistem	Error (%)	Ralat
2	15°	0,432	0,420	1,229	0,005
1,8	15°	0,427	0,410	1,723	0,007
1,6	15°	0,425	0,408	1,700	0,007

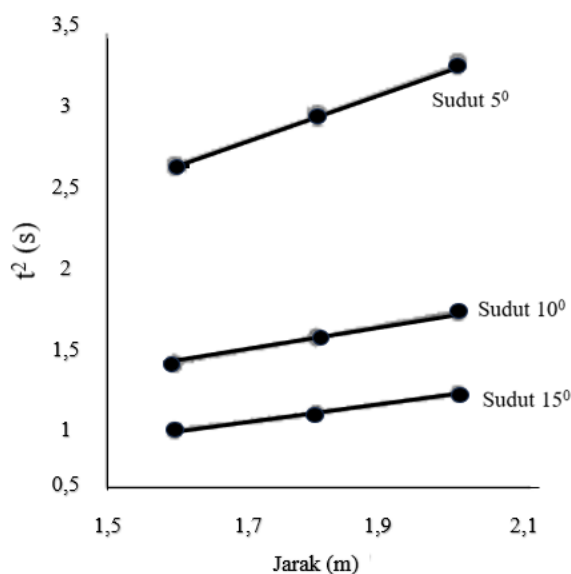
Keempat, pengujian sistem peraga penentuan momen inersia menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope *angel* dan sensor photodiode. Hasil pengujian dengan variasi sudut menghasilkan nilai momen inersia bola pejal (*k*) ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian sistem peraga dengan variasi sudut untuk menentukan nilai *k*

Jarak (m)	Sudut	<i>k</i> manual	<i>k</i> sistem	Error (%)	Ralat
2	15°	0,432	0,420	1,230	0,005
2	10°	0,436	0,434	0,171	0,001
2	5°	0,415	0,390	2,523	0,010

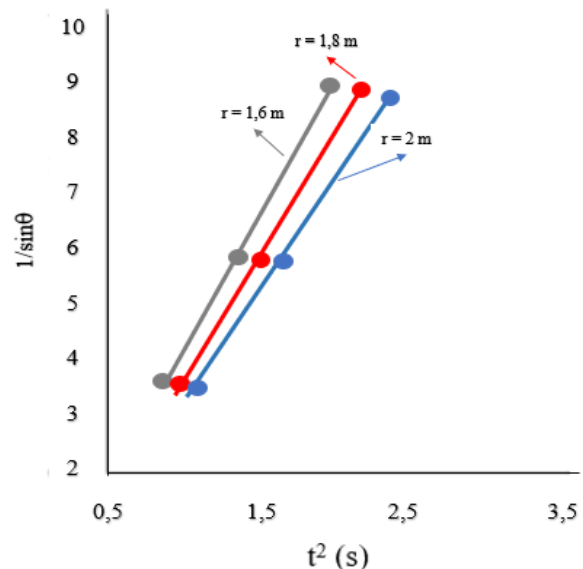
Hasil pengujian menggunakan variasi sudut dan variasi jarak diperoleh nilai momen inersia bola pejal (k) dengan ralat bervariasi. Pada sudut 10° menghasilkan ralat paling kecil. Hasil ralat ini sangat tergantung pada pemasangan posisi bidang miring dengan sudut pandang paralaks yang tepat.

Perhitungan momen inersia bola pejal (k) dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar lintasan yang ditempuh maka akan menghasilkan nilai k yang semakin besar. Nilai k dengan mengganti nilai a menunjukkan bahwa nilai s berbanding lurus dengan kuadrat t menghasilkan Gambar 4.



Gambar 4. Grafik kuadrat waktu tempuh terhadap panjang lintasan dengan sudut tetap

Pada Gambar 5 memperlihatkan kuadrat waktu tempuh terhadap $1/\sin \theta$ pada jarak tetap. Berdasarkan Gambar 5 menunjukkan grafik linear sesuai dengan Persamaan 4. Grafik 5 menunjukkan kuadrat waktu berbanding dengan $1/\sin \theta$.



Gambar 5. Grafik kuadrat waktu tempuh terhadap $1/\sin \theta$ dengan jarak tetap

Hasil uji terhadap sistem pengukuran momen inersia bola pejal, diperoleh nilai konstanta momen inersia bola pejal sebesar $(0,415 \pm 0,009)$. Hasil terbaik tersebut diukur pada sudut kemiringan 5° dengan panjang lintasan 2 meter. Nilai momen inersia bola pejal mendekati ketetapan (referensi).

KESIMPULAN

Telah berhasil dilakukan perancangan sistem peraga pengukuran momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 Gyroscope Angle Sensor berbasis arduino yang dapat menghitung nilai sudut, jarak, waktu dan konstanta momen inersia bola pejal. Hasil uji sistem peraga pengukuran momen inersia bola pejal menunjukkan bahwa alat dapat bekerja dengan baik. Selain itu, hasil uji coba sistem menghasilkan nilai ralat yang cukup kecil. Alat peraga sistem pengukuran momen inersia bola pejal berbasis sensor dapat digunakan sebagai alat untuk menentukan momen inersia suatu benda dan lebih presisi dengan pengukuran digital.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada tim riset Instrumentasi dan Elektronika Protechno dan seluruh pihak yang telah membantu dalam penelitian ini hingga pembuatan laporan dan uji esensi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. C. Paendong, J. C. Rende, and A. Komansilan, "Manajemen Pembelajaran Collaborative Pada Materi Momen Inersia Di Sma Negeri 2 Tondano," *Charm Sains J. Pendidik. Fis.*, vol. 4, no. 3, pp. 129–136, 2023.
- [2] L. Sholihah and N. B. H. Putri, "Analisis konsep momen gaya, momen inersia, dan keseimbangan benda tegar pada rumah adat osing banyuwangi," *J. Inov. Pendidik. Sains dan Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 76–84, 2023.
- [3] D. Mulhayatiah, H. Y. Suhendi, R. Zakwandi, Y. Dirgantara, and M. A. Ramdani, "Moment of inertia: development of rotational dynamics KIT for physics students," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 434, p. 012014, Dec. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/434/1/012014.
- [4] V. A. Zorich, "On the asymptotics of the principal moments of inertia of a convex body in the isotropic state," *J. Math. Sci.*, vol. 259, no. 1, pp. 104–107, Nov. 2021, doi: 10.1007/s10958-021-05603-z.
- [5] A. I. Dumitrascu, A. Bordea, and F. Cazan, "On the improvement of performance in motorsport by means of acceleration measurements," in *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X*, Dec. 2020, p. 102, doi: 10.1117/12.2572059.
- [6] J. K. Ma and Y.-R. Tong, "Design and Development of Intelligent Torsion Pendulum Method for Rotational Inertia Measurement Experiment," in *2018 9th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, Oct. 2018, pp. 442–446, doi: 10.1109/ITME.2018.00105.
- [7] L. Sun, S. Wang, H. Wang, W. Zhao, J. Li, and C. Shang, "Design and accuracy test of polar moment of inertia measuring equipment for projectile and rocket," *Vibroengineering Procedia*, vol. 44, pp. 87–92, Aug. 2022, doi: 10.21595/vp.2022.22695.
- [8] V. Choudhary and K. Iniewski, Eds., *MEMS*. CRC Press, 2017.
- [9] Y. Wu and L. Pei, "Gyroscope Calibration via Magnetometer," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 16, pp. 5269–5275, Aug. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2720756.
- [10] H.Y. Tsai *et al.*, "Wearable Inverse Light-Emitting Diode Sensor for Measuring Light Intensity at Specific Wavelengths in Light Therapy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 5, pp. 1561–1574, May 2019, doi: 10.1109/TIM.2019.2899444.
- [11] D. Tohl, M. N. Teferra, A. Wallace, A. T. T. Pham, and Y. Tang, "Re-Referencing and Calibration for Robust Ratiometric Light Intensity Measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3194929.
- [12] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons, 2013.
- [13] E. Olguín Díaz, "Classical Mechanics," 2019, pp. 101–144.
- [14] I. Sriyanti, M. Ariska, N. Cahyati, and J. Jauhari, "Moment of inertia analysis of rigid bodies using a smartphone magnetometer," *Phys. Educ.*, vol. 55, no. 1, p. 013005, Jan. 2020, doi: 10.1088/1361-6552/ab58ba.
- [15] T. Yanrong, L. Huiping, C. Lei, and S. Wanting, "Design of Wireless Automatic Detection System for Moment of Inertia," in *2023 13th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, Nov. 2023, pp. 684–687, doi: 10.1109/ITME60234.2023.00142.
- [16] D. V. Villamizar, "Moments of inertia by summation," *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 45, 2023, doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2023-0277.
- [17] X. M. Zhang, D. M. Wang, J. Y. Li, C. M. Shang, J. X. Xiong, and H. C. Xie, "Deviation analysis of rotational inertia measurement based on torsion bar method," *Vibroengineering Procedia*, vol. 21, pp. 178–183, Dec. 2018, doi: 10.21595/vp.2018.20317.
- M. Afdali, M. Daud, and R. Putri, "Perancangan alat ukur digital untuk tinggi dan berat badan dengan output

suara berbasis arduino uno,” *ELKOMIKA*
J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun.
Tek. Elektron., vol. 5, no. 1, p. 106, 2017.

Klasifikasi tumor payudara jinak dan ganas pada citra ultrasonografi (USG) berdasarkan karakteristik tekstur menggunakan metode random forest

Aida Rahmawati*, Ice Uliya Sari, Heni Sumarti

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang

*email: 2108026003@student.walisongo.ac.id

Abstrak – Penyakit kanker payudara terus meningkat setiap tahun di Indonesia. Saat ini, kanker payudara tidak hanya menyerang pada usia lanjut, tetapi juga pada usia muda. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa klasifikasi kanker payudara dapat dilakukan dengan menggunakan ultrasonografi. Tujuan penelitian mengeksplorasi penggunaan metode Random Forest untuk mengklasifikasikan kanker payudara pada citra ultrasonografi (USG), berdasarkan karakteristik tekstur. Hasil uji data pelatihan diperoleh akurasi sebesar 100% dan uji coba dengan variasi folds diperoleh akurasi antara 51% sampai 54%. Meskipun belum optimal, penggunaan metode Random Forest menunjukkan potensi sebagai algoritma klasifikasi, untuk diagnosis tumor payudara. Faktor seperti pemilihan fitur, kualitas data set, dan parameter model menjadi pertimbangan penting untuk penelitian lanjut guna mendukung diagnosis yang lebih akurat. oleh tenaga kesehatan.

Kata Kunci: ultrasonografi, tumor payudara, karakteristik tekstur, random forest.

Abstract – The incidence of breast cancer continues to increase every year in Indonesia. Currently, breast cancer affects not only older individuals but also younger ones. Several studies indicate that breast cancer classification can be performed using ultrasonography. This research aims to explore the use of the Random Forest method for classifying breast cancer in ultrasound (USG) images based on texture characteristics. The training data test results showed an accuracy of 100%, and trials with varying folds achieved an accuracy between 51% and 54%. Although not yet optimal, the use of the Random Forest method demonstrates potential as a classification algorithm for breast tumor diagnosis. Factors such as feature selection, data set quality, and model parameters are important considerations for further research to support more accurate diagnosis by healthcare professionals.

Key words: ultrasonography, breast cancer, texture characteristic, random forest.

PENDAHULUAN

Kanker adalah kondisi penyakit yang dicirikan oleh pertumbuhan sel yang tidak terkendali dan berpotensi menyerang jaringan tubuh. Dalam satu tahun terakhir, Indonesia mengalami 348.809 kasus baru kanker. Terdiri dari 58.000 kasus kanker payudara, 32.000 kasus kanker leher rahim, dan 30.000 kasus kanker usus besar, dengan total kematian akibat kanker diangka 207.000 [1]. Terdapat 5 jenis kanker di dunia yang paling besar yaitu; kanker hati (*liver cancer*), kanker payudara (*breast cancer*), kanker lambung (*stomach cancer*), kanker usus besar (*colorectal cancer*), dan kanker paru-paru (*lung cancer*). Hasil survei yang dilakukan oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menunjukkan bahwa antara 8-9% wanita menderita kanker payudara.

Kanker merupakan salah satu penyebab kematian paling umum. hingga Sampai saat ini penderita kanker mencapai 8,2 juta orang

meninggal karena kanker [2]. Tingkat kesembuhan dan angka kematian meningkat ketika tumor payudara jinak dan ganas ditemukan dan diklasifikasikan dengan benar. Salah satu metode diagnostik yang paling umum untuk mengevaluasi kelainan pada payudara adalah citra ultrasonografi (USG).

Pencitraan gelombang suara ultrasonik atau yang biasa disebut USG adalah metode pencitraan medis yang menggunakan gelombang suara berfrekuensi ultrasonik untuk menggambarkan struktur jaringan dan organ tubuh. Beberapa kelebihan dari USG mencakup ekonomis, portabilitas yang baik, aman, akurat, aman serta tanpa mengeluarkan radiasi berbahaya. Identifikasi hasil melalui interpretasi manual gambar USG bergantung pada diagnosis dokter serta operator. Ada potensi kesalahan yang mungkin terjadi dalam proses manual ini. Sebagai langkah signifikan dalam diagnosis, klasifikasi, dan deteksi dini kanker, penting

untuk dilakukan analisis gambar USG menggunakan komputer [3].

Ultrasonografi menggunakan frekuensi suara cukup tinggi yaitu berkisar antar 1-15MHz [4]. Pemeriksaan USG dapat memberikan hasil optimal dalam berbagai pemeriksaan organ tubuh, memberikan sejumlah keunggulan baik bagi pasien maupun para sonografer atau radiolog [5]. Diagnosis tumor dapat dilakukan dengan pendekatan triple test, yaitu melalui pemeriksaan klinis, mamografi, dan sitologi aspirasi. Karena tidak semua wilayah memiliki fasilitas mamografi, ultrasonografi (USG) dapat digunakan sebagai alternatif [6]. Kelebihan USG dibandingkan dengan metode pencitraan diagnostik lainnya tidak melibatkan penggunaan radiasi pengion, memiliki biaya yang relatif terjangkau, bersifat non-invasif, serta memberikan kemudahan dan kecepatan dalam pelaksanaannya [7].

Saat ini hasil pemeriksaan USG memiliki tingkat akurasi diagnosis yang rendah karena seringkali terdapat perbedaan antar dokter radiologi mengenai hasilnya. Situasi ini diperkirakan bahwa meningkatnya kompleksitas kemungkinan terjadi pada citra USG karena citra tersebut rentan terhadap gangguan speckle yang dapat menurunkan kualitas visual. Gangguan speckle pada citra USG timbul akibat interferensi antara gelombang yang dipantulkan dan gelombang yang tiba di probe transduser, sehingga citra memiliki pola tekstur berbintik yang kasar [8]. Selain itu, citra ultrasonografi juga mengandung gangguan semacam "salt and pepper," yang muncul sebagai penanda pada gambar [9]. Hasil citra dari ultrasonografi dijelaskan berdasarkan sistem kategori BIRADS (Breast Imaging, Reporting & Data System). BIRADS merupakan suatu sistem yang mengklasifikasikan hasil pemeriksaan *screening* (pencitraan untuk mendeteksi kanker payudara) ke dalam kategori yang telah ditentukan secara jelas. [10]. Guna mengatasi permasalahan tersebut dapat diatasi menggunakan metode Radom Forest

Random Forest, salah satu algoritma pembelajaran mesin, dapat menangani variabilitas dan kompleksitas dalam data gambar. Kita dapat membedakan tumor payudara jinak dan ganas dengan melihat karakteristik tekstur pada gambar USG [11]. Random Forest adalah suatu koleksi dari decision trees yang dibuat dari sampel yang dipilih secara acak, namun dengan aturan pembagian simpul yang berbeda. Dalam model

ini, setiap pohon menggunakan subset fitur dan berusaha menemukan ambang batas terbaik untuk membagi data. Akibatnya, banyak pohon dilatih dengan cara yang lebih lemah, dan masing-masing pohon menghasilkan prediksi yang berbeda [12].

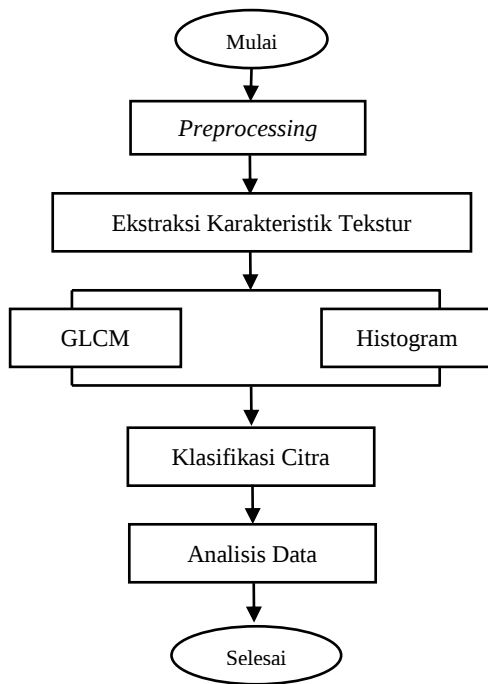
Peluang baru untuk meningkatkan akurasi klasifikasi tumor payudara telah muncul berkat kemajuan teknologi. Analisis citra berbasis karakteristik tekstur, yang menggunakan algoritma pembelajaran mesin dan teknik pengolahan gambar merupakan salah satu metode yang banyak digunakan. Dalam penelitian ini, metode Random Forest akan digunakan untuk mengklasifikasikan tumor payudara jinak dan ganas pada gambar USG berdasarkan karakteristik tekstur.

Banyak dilakukan penelitian terkait tumor payudara, salah satu penelitian dilakukan oleh Arwoko [13] mengenai klasifikasi tumor payudara jinak dan ganas menggunakan fitur koefisien *Discrete Cosine Transform* (DCT). Tingkat akurasi yang dihasilkan dengan fitur koefisien DCT hingga 84%, dan penelitian sebelumnya oleh Nanhadini dkk. [14] mengenai klasifikasi kanker kulit dengan metode Random Forest berhasil mencapai tingkat akurasi sebesar 97,3%. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan akurasi dan bantuan yang diberikan kepada tenaga kesehatan saat membaca citra USG, yang berfokus pada kasus tumor payudara yang jinak dan ganas, dengan mempertimbangkan karakteristik tekstur.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini database yang digunakan bersumber dari *Kaggle* dengan data yang diambil sebanyak 162 citra terdiri dari 81 kanker jinak dan 81 kanker ganas. Ukuran citra USG pada penelitian ini 256×256 pixel.

Teknik Pengolahan Data



Gambar 1. Prosedur penelitian

Setelah tahapan pengumpulan data, akan dilakukan langkah-langkah pengolahan data seperti; flowchart pada Gambar 1 yang terdiri dari preprocessing, berupa konversi citra dari skala RGB (*Red, Green, Blue*) ke abu-abu. Kemudian Ekstraksi karakteristik tekstur menggunakan Histogram dan Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM).

Ekstraksi Karakteristik Tekstur

Ekstraksi ciri adalah prosedur untuk mendapatkan suatu atribut yang dapat digunakan untuk menggambarkan gambar itu sendiri. Suatu objek dapat diidentifikasi berdasarkan kategorinya, yang merupakan suatu karakteristik. Ekstraksi tekstur adalah perulangan elemen pada citra tekstur dasar yang biasa disebut "texel". Tekstur dibuat secara alami sehingga bersifat acak, sedangkan tekstur pada citra buatan pola eksklusif atau berulang secara periodik biasanya memiliki penempatan probabilitas periodik, semi periodik, atau acak. Histogram dan GLCM digunakan untuk mengekstraksi ciri.

Histogram

Histogram adalah representasi grafis dari distribusi frekuensi nilai-nilai piksel dalam citra. Ini memberikan gambaran tentang seberapa sering intensitas piksel tertentu muncul dalam citra. Histogram orde pertama tidak

memperhitungkan hubungan spasial antara piksel, hanya fokus pada frekuensi kemunculan nilai piksel. Histogram dapat dihitung dengan mengelompokkan nilai piksel ke dalam "bins" atau interval nilai, dan menghitung jumlah piksel dalam setiap bin. Dengan histogram, kita dapat melihat sebaran intensitas piksel secara keseluruhan[15].

Output dari histogram mengindikasikan skala abu-abu (*grayscale*). Beberapa metode statistik yang dimanfaatkan untuk mengekstrak ciri-ciri tekstur melibatkan: [16]

1) Rata-rata (*Mean*) merupakan nilai tengah dari intensitas citra.

$$\mu = \sum_{n=0}^N f_n P(f_n) \quad (1)$$

dengan μ mewakili nilai rata-rata, f_n adalah tingkat kecerahan citra, $p(f_n)$ menyatakan distribusi histogram dari tingkat kecerahan n , dan N adalah tingkat kecerahan maksimum.

2) Standar deviasi adalah indikator dari tingkat variasi kontras rata-rata.

$$\sigma = \sqrt{\mu_2} = \sqrt{\sigma^2} \quad (2)$$

dengan σ adalah standar deviasi, dan z adalah probabilitas kemunculan nilai keabuan.

3) Varian merupakan variasi elemen suatu citra.

$$\alpha_2 = \sum_{n=0}^N (f_n - \mu)^2 P(f_n) \quad (3)$$

dengan α_2 adalah skewness, dan n adalah nomor piksel dari 0 sampai N .

4) *Skewness* merupakan kemiringan relatif dari kurva histogram citra.

$$\alpha_3 = \frac{1}{\alpha_2} \sum_{n=0}^N (f_n - \mu)^3 P(f_n) \quad (4)$$

dengan α_3 adalah *skewness*.

5) Kurtosis merupakan keruncingan relatif dari kurva histogram citra.

$$\alpha_4 = \frac{1}{\alpha_2^2} \sum_{n=0}^N (f_n - \mu)^4 P(f_n) - 3 \quad (5)$$

dengan α_4 adalah kurtosis

6) Entropi adalah representasi dari tingkat ketidakberaturan sebuah citra.

$$H = - \sum_{n=0}^N P(f_n)^2 \log P(f_n) \quad (6)$$

dengan f_n merupakan intensitas keabuan, μ adalah *mean*, dan $P(f_n)$ merupakan nilai histogram.

GLCM (Gray Level Co-Ocurrence Matrix)

Haralick mengusulkan GLCM pada tahun 1973 dengan 28 atribut untuk mengrepresentasikan pola spasial. GLCM memanfaatkan perhitungan orde kedua, yang berarti bahwa dalam mengukur tekstur, keterkaitan antara dua piksel citra asli diperhitungkan. Sebagai perbandingan, metode pengukuran tekstur pada orde pertama melibatkan perhitungan statistik berdasarkan nilai piksel citra asli saja, seperti varians, dan tidak menunjukkan hubungan ketetanggaan piksel [17].

Beberapa atribut yang dimanfaatkan menurut GLCM melibatkan [16]:

1) Energi, mengukur jumlah elemen kuadrat dalam GLCM, memiliki nilai 1 untuk gambar konstan. Kemudian sudut kedua dan keseragaman merupakan istilah lain dari energi.

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P(i,j)^2 \quad (7)$$

Jumlah skala abu-abu dinyatakan N-1 yaitu 256, dan matriks GLCM yang telah ternormalisasi dinyatakan dengan $P(i,j)$.

2) *Correlation* digunakan untuk menilai sejauh mana ketergantungan linear dari tingkat keabuan yang sedang diukur. Setiap diukur, terdapat nilai korelasi yang mencerminkan hubungan positif antara Tingkat keabuan. Hasil korelasi mengukur sejauh mana piksel berkorelasi dengan piksel tetangganya dalam keseluruhan gambar.

$$\sum_{i=0}^{g-1} \sum_{j=0}^{g-1} \frac{\{i \times j\} \times P(i,j) - \{\mu_x \times \mu_y\}}{\sigma_x \times \sigma_y} \quad (8)$$

dengan μ_x , μ_y , σ_x , σ_y , dengan berturut-turut merupakan *mean* dan standar deviasi dari matriks P_x dan P_y .

3) Homogenitas mengukur bagian tertentu didasarkan dengan pola pengelompokan berdasarkan perbedaan tingkat abu-abunya(*grayscale*).

$$\sum_{i=0}^{g-1} \sum_{j=0}^{g-1} \frac{P(i,j)}{1 + |i - j|} \quad (9)$$

Matriks GLCM yang telah ternormalisasi dinyatakan dengan $P(i,j)$.

4) Ukuran kontras intensitas antara satu piksel dengan piksel lainnya dalam seluruh gambar disebut sebagai *Contrast*. Nilainya menjadi nol ketika gambar bersifat konstan.

$$\sum_{i=0}^{g-1} |i - j|^2 P(i,j) \quad (10)$$

Random Forest

Random Forest adalah suatu teknik dalam pembelajaran mesin yang memanfaatkan sejumlah besar pohon keputusan sebagai dasar untuk proses klasifikasi yang disatukan. Algoritma ini merupakan hasil penggabungan dari metode Random Sub Spaces dan Bagging [18]. Ada tiga aspek utama yang terlibat dalam implementasi algoritma Random Forest:

1. Membangun pohon prediksi dengan menggunakan bootstrap sampling.
2. Setiap pohon keputusan melakukan prediksi dengan memanfaatkan prediktor yang dipilih secara acak.
3. Dalam tahap klasifikasi, hasil prediksi dari setiap pohon keputusan digabungkan menggunakan metode *majority vote*.

Pada penelitian ini, klasifikasi data menggunakan algoritma Random Forest dengan skenario uji dataset yang menggunakan pembagian persentase (*percentage split*). Pembagian ini melibatkan pengelompokan total data menjadi dua bagian, yaitu data latih dan data uji. Dalam penelitian ini, seluruh jumlah data digunakan (100% dari total data). Persentase split yang diuji mencakup 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%, tujuannya adalah untuk mendapatkan hasil yang objektif dari berbagai persentase split yang berbeda.

Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) merupakan perangkat lunak(*software*) pembelajaran mesin yang terkenal, yang dikembangkan di University of Waikato, Selandia Baru. Weka merupakan platform yang mencakup visualisasi, algoritma analisis data, serta pemodelan prediktif, dilengkapi dengan antarmuka grafis yang memudahkan pengguna untuk mengakses fungsionalitas tersebut dengan mudah. Dalam penelitian ini menggunakan WEKA karena mendukung untuk beberapa pengembangan data agar lebih spesifik, mendukung processing data, clustering, klasifikasi serta visualisasi data [19].

Teknik Analisis Data

Olaniyi dkk. [20] mengusulkan konsep terkait indeks evaluasi kinerja dalam konteks metode klasifikasi, dengan memanfaatkan perhitungan matriks konfusi. Matriks konfusi dirinci sebagai berikut:

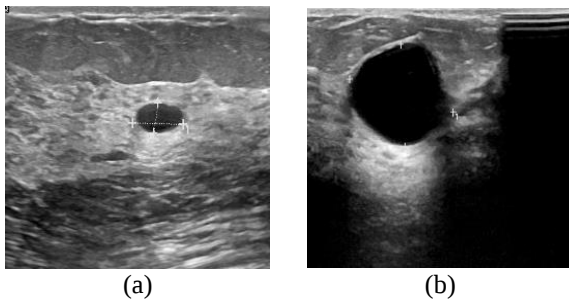
$$\text{Sensitivitas} = \frac{TP}{TP+FN} \times 100\% \quad (11)$$

$$\text{Spesifisitas} = \frac{TN}{FP+TN} \times 100\% \quad (12)$$

$$\text{Akurasi} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100\% \quad (13)$$

True Negative (TN), False Positive (FP), False Negative (FN), True Positif (TP), Indeks pengukuran yang merupakan hasil dari pengelompokan data dengan menggunakan perangkat lunak WEKA untuk menghasilkan matriks kebingungan. TP menunjukkan data yang benar-benar positif dalam sistem klasifikasi, sedangkan TN adalah data yang benar-benar negatif dalam sistem klasifikasi [21].

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Citra USG Tumor (a) Jinak dan (b) Ganas dari Dataset Kaggle

Data penelitian yang digunakan adalah citra USG bersumber dari database *Kaggle*. Gambar 2 (a) dan 2(b) menunjukkan citra hasil USG pada tumor jinak dan ganas setelah *processing*. Perbedaan terlihat dalam konsistensi ukuran dan warna citra setelah diproses, diubah menjadi skala abu-abu (*grayscale*) untuk langkah selanjutnya.

Tabel 1. Nilai Rata-rata Karakteristik Tekstur Histogram dan GLCM

No	Atribut	Rata-rata Jinak	Rata-rata Ganas
1	Mean	88,509 ± 21,9736	80,2508 ± 20,1578
2	Standar Deviasi	51,5097±8,5647	52,6224 ± 10,0629
3	Varian	2726,1145±896,861	2869,9329 ± 1034,5162
4	Entropi	10,8694 ± 0,1419	10,8256 ±

			0,1487	
5	Skewness	0,5135 ± 0,3487	0,5731 ± 0,3623	
6	Kurtosis	-0,3151 ± 0,6738	-0,2535 ± 0,932	
7	Energi	0,0362 ± 0,0515	0,0424 ± 0,0667	
8	Contrast	76,5236 ± 38,5236	61,2999 ± 31,1563	
9	Correlation	0,9844 ± 0,0098	0,9882 ± 0,0064	
10	Homogenitas	0,2284 ± 0,0604	0,2403 ± 0,0648	

Ekstraksi ciri tekstur dilakukan dengan menggunakan 10 atribut, di mana 6 diantaranya didasarkan pada histogram dan 4 berasal dari GLCM. Hasil ekstraksi histogram mencakup nilai *mean*, variasi, standar deviasi, kurtosis, skewness, dan entropi. Sementara itu, atribut GLCM melibatkan korelasi, energi, homogenitas dan kontras. Tabel 1 menunjukkan nilai rata-rata dari ciri tekstur, dengan perbedaan yang signifikan terlihat pada atribut standar deviasi, varian, entropi, dan kurtosis. Sebaliknya, perbedaan yang lebih kecil terlihat pada *mean*, skewness, energi, kontras, korelasi, dan homogenitas. Perbedaan nilai rata-rata antara citra USG tumor jinak dan tumor ganas mencerminkan variasi dalam karakteristik tekstur. Rata-rata dari ciri tekstur ditambahkan dengan nilai dari standar deviasi untuk mengevaluasi sebaran data. Standar deviasi bermanfaat untuk menilai tingkat kontras citra, di mana semakin rendah kontras citra akan diikuti oleh standar deviasi yang lebih rendah, dan sebaliknya. Untuk setiap nilai atribut yang diperoleh, atribut dengan sebaran data seragam termasuk skewness, kontras, korelasi, energi, dan homogenitas. Sementara itu, atribut dengan sebaran data acak termasuk *mean*, varian, entropi, standar deviasi, dan kurtosis.

Tabel 2. Hasil analisis data

No	Persentase Split	TP	FP	FN	TN	Accuracy %	Precision %	Recall %
1	Training	81	0	0	81	100%	100%	100%
2	5	46	40	35	41	54%	53%	57%
3	10	44	39	37	42	53%	53%	54%
4	15	41	39	40	42	51%	51%	51%
5	20	45	41	36	40	52%	52%	56%
6	25	45	43	36	38	51%	51%	56%

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 2 memberikan hasil yang bervariasi tergantung

pada persentase pembagian data latih dan uji. Pada tahap *training* saat menunjukkan nilai 100% artinya data yang diolah berhasil dan dapat mengelompok dengan baik, Meskipun pada tahap pelatihan (*training*) didapatkan hasil yang sangat baik dengan akurasi, presisi, dan recall mencapai 100%, namun pada uji data dengan persentase split yang berbeda, terjadi fluktuasi hasil klasifikasi.

Pada variasi percentage split 5% dan 10%, meskipun akurasi masih berada pada kisaran 53-54%, presisi dan recall menunjukkan angka yang kurang konsisten, dengan nilai tertinggi pada recall sebesar 57%. Pada percentage split 15%, hasil klasifikasi menunjukkan penurunan dengan akurasi, presisi, dan recall sekitar 51%. Sementara pada percentage split 20% dan 25%, terlihat sedikit peningkatan kembali dengan recall mencapai 56%, namun masih mempertahankan tingkat akurasi yang relatif rendah.

Random Forest dapat memberikan hasil yang sangat baik pada tahap pelatihan, namun pada uji data nyata dengan variasi pembagian persentase, performanya menjadi lebih tidak stabil. Oleh karena itu, perlu dilakukan perbaikan selanjutnya terkait faktor-faktor yang memengaruhi fluktuasi hasil klasifikasi, serta eksplorasi metode atau parameter yang dapat meningkatkan konsistensi dan akurasi hasil klasifikasi pada kasus kanker payudara. Meskipun demikian, penelitian ini tetap memberikan kontribusi positif dengan menggambarkan tantangan dan potensi pengembangan lebih lanjut dalam penggunaan teknologi Random Forest untuk mendukung diagnosis kanker payudara melalui citra ultrasonografi [12].

Pada penelitian ini metode klasifikasi menggunakan Random Forest menghasilkan nilai *accuracy* tertinggi sebesar 54%, nilai *precision* tertinggi sebesar 53%, dan nilai *recall* tertinggi sebesar 57%. Hasil ini jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Julia dkk. [22] mengenai klasifikasi tumor payudara dengan metode Naive Bayes dengan nilai akurasi sebesar 80%. menunjukkan bahwa akurasi yang dihasilkan lebih rendah. Hal ini disebabkan karena pada penelitian sebelumnya, tahap preprocessing gambar tidak melalui tahap cropping, filtering, dan penggunaan data yang terbatas. Selain itu, citra yang digunakan berbeda, pada penelitian ini menggunakan citra USG sedangkan pada penelitian sebelumnya menggunakan cita

mamografi. Kelebihan pada penelitian ini bisa digunakan untuk tools tambahan diagnosa tumor payudara.

KESIMPULAN

Telah dilakukan klasifikasi jenis tumor payudara jinak dan ganas berbasis karakteristik tekstur dengan 81 citra tumor jinak dan 81 citra tumor ganas yang merupakan citra USG. Penelitian ini menggunakan metode Random Forest dengan 2 sesi yaitu *training* dan *testing*. Pada tahap *training* dihasilkan *accuracy* sebesar 100%, *precision* 100%, dan *recall* 100%. Selanjutnya pada tahap *testing* dilakukan 5 variasi persentase split dengan nilai tertinggi pada persentase split 5, dihasilkan *accuracy* sebesar 54%, *precision* 53%, dan *recall* 57%. Penelitian ini perlu dikembangkan kembali untuk memberikan kontribusi dalam bidang medis terutama dalam diagnosa tumor payudara dan menjadi instrumen tambahan dalam bidang medis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Globocan, "Cancer Today," Int. Agency Res. Cancer. <http://gco.iarc.fr/today/>, 2018.
- [2] B. Asliminarti, "Literatur Review Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Tingkat Pengetahuan," 2020.
- [3] Akhmadi, R. Nia Pratiwi, D. Rusita, and Nurhasuna, "Peran Radiografer Dalam Pemeriksaan Ultrasonografi (Usg)," *JRI (Jurnal Radiogr. Indones.,* vol. 4, no. 2, pp. 79–81, 2021, doi: 10.55451/jri.v4i2.92.
- [4] M. Papadakis, S. J. McPhee, M. W. Rabow, and K. R. McQuaid, *Current Medical Diagnosis & Treatment*. 2007.
- [5] M. Khan, *Pass Ultrasound Physics Exam*. Blue Cube Venture, LLC, 2014.
- [6] E. Luthfiana AS, A. Mayub, and N. Nirwana, "The Ultrasonography Examination of Fetal Heart Beats as the Application of Mechanic Waves Principle," *Bencoolen J. Sci. Educ. Technol.,* vol. 1, no. 2, pp. 29–37, 2020, doi: 10.33369/bjset.1.2.29-37.
- [7] J. Bates, *Abdominal Ultrasound*. 2004. doi: 10.1002/9781119860792.ch37.

- [8] A. Nugroho, "Klaasifikasi Nodul Tiroid Berbasis Ciri Tekstur pada Citra Ultrasonografi.," *Tesis. Yogyakarta Progr. Pascasarj. Univ. Gadjah Mada Yogyakarta*, 2015.
- [9] H. K. N. Yusufiyah, "Klasifikasi Nodul Payudara Berbasis Ciri Bentuk pada Citra Ultrasonografi.," *Tesis. Yogyakarta Progr. Pascasarj. Univ. Gadjah Mada Yogyakarta.*, 2015.
- [10] D. A. Khusna, "Klasifikasi Lesi Citra Ultrasonografi Payudara Berdasarkan Karakteristik Tepi.," *Tesis. Yogyakarta Progr. Pascasarj. Univ. Gadjah Mada Yogyakarta.*, 2016.
- [11] J. Ha, M. Kambe, and J. Pe, *Data Mining: Concepts and Techniques*. 2011. doi: 10.1016/C2009-0-61819-5.
- [12] S. Shalev-Shwartz and S. Ben-David, *Understanding machine learning: From theory to algorithms*, vol. 9781107057. 2013. doi: 10.1017/CBO9781107298019.
- [13] H. Arwoko, "Klasifikasi Kanker Payudara pada Citra Ultrasound Menggunakan Fitur Koefisien Discrete Cosine Transform (DCT).," *Pros. HUBISINTEK*, vol. 2, no. 1, p. 451, 2022.
- [14] M. S. Nandhini, M. A. Sofiyan, S. Kumar, and A. Afridi, "Skin Cancer Classification using Random Forest," *Int. J. Manag. Humanit.*, vol. 4, no. 3, pp. 39–42, 2019, doi: 10.35940/ijmh.c0434.114319.
- [15] K. S. and I. D. R. M. Haralick, "Textural Features for Image Classification," *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. SMC-3, no., pp. 610–621, 1973.
- [16] K. Harismah, D. Vitasari, A. Fuadi, and T. Setyawan, "Diversifikasi Minyak Sereh dan Minyak Cengkeh Sebagai Bahan Repellent Pembuatan Tinta Anti Nyamuk," *4th Univesity Res. Coloquium*, pp. 526–530, 2016, [Online]. Available: <https://publikasiilmiah.ums.ac.id/xmlui/handle/11617/10986>
- [17] A. Kadir, A., & Susanto, "Teori dan Aplikasi Pengolahan Citra.," (*Dewibertha Hardjono, Ed.*). Yogyakarta: Andi.No Title, 2013.
- [18] & Sari, C. A., Sari, W. S., Nilawati, F. E., Doheir, M. and C. A. Sari, "Analysis of Childbirth Methods Using Random Forest Algorithms.," 2022, doi: <https://doi.org/10.12487/AMRI.v1i1.xxxx.x>.
- [19] R. Arora and S. Suman, "Comparative Analysis of Classification Algorithms on Different Datasets using WEKA," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 54, no. 13, pp. 21–25, 2012, doi: 10.5120/8626-2492.
- [20] E. O. Olaniyi, A. A. Adekunle, T. Odekuoye, and A. Khashman, "Automatic system for grading banana using GLCM texture feature extraction and neural network arbitrations," *J. Food Process Eng.*, vol. 40, no. 6, 2017, doi: 10.1111/jfpe.12575.
- [21] E. Frank, M. A. Hall, and I. H. Witten, "The WEKA workbench," *Data Min.*, pp. 553–571, 2017, doi 10.1016/b978-0-12-804291-5.00024-6., 2017.
- [22] B. Julia, H. Sumarti, and H. H. Kusuma, "Klasifikasi Tumor Payudara Berbasis Ciri Tekstur pada Citra Mammografi Menggunakan Metode Naive Bayes," *MIND (Multimedia Artif. Intell. Netw. Database) J.*, vol. 7, no. 2, pp. 165–176, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.26760/mindjournal.v7i2.165-176>