

DAFTAR ISI

Inovasi pemanfaatan peta anomali pseudogravitasi untuk interpretasi pola sebaran batuan andesit masif di desa Candiwulan kecamatan Kutasari kabupaten Purbalingga dan sekitarnya (Sehah*, Sukmaji Anom Raharjo, dan Urip Nurwijayanto Prabowo).....	115
Sistem monitoring kemiringan gedung berbasis resistor variabel (Reza Pahlevi, Hartono*, dan Farzand Abdullatif).....	124
Identifikasi zona lemah pada ruas jalan utama Ajibarang – Gumelar kabupaten Banyumas menggunakan metode geolistrik resistivitas (Tita Murwiyanti, Sehah*, dan Sukmaji Anom Raharjo)	130
Analisis struktur morfologi membran kitosan/peo dan kitosan/PEG4000 (Kartika Sari, Sunardi, Agung Bambang Setio Utomo, Edi Suharyadi, Evvy Kartini, Evi Yulianti}	138
Analisis tegangan keluaran generator listrik frekuensi rendah dengan metode conjugate-gradient (Jamrud Aminuddin).....	142

**Inovasi pemanfaatan peta anomali pseudogravitasi untuk interpretasi
pola sebaran batuan andesit masif di desa Candiwulan kecamatan Kutasari
kabupaten Purbalingga dan sekitarnya**

Sehah*, Sukmaji Anom Raharjo, dan Urip Nurwijayanto Prabowo

*Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah*

**Email: sehad.geophysics@gmail.com*

Abstrak - Pemanfaatan peta anomali pseudogravitasi untuk menginterpretasi sebaran batuan andesit di Desa Candiwulan Kecamatan Kutasari Kabupaten Purbalingga dan sekitarnya telah dilakukan. Penelitian dilakukan pada bulan April hingga September 2019. Bahan dan peralatan yang diperlukan terdiri atas data anomali magnetik total, personal computer (PC), dan beberapa perangkat lunak seperti Fortran 77, Surfer 10, dan Arc-GIS 3.0. Jumlah data anomali magnetik total yang diperoleh adalah 142 data yang membentang pada posisi geografis $109,2788^{\circ}$ – $109,3072^{\circ}$ BT dan $7,3032^{\circ}$ – $7,3319^{\circ}$ LS dengan nilai berkisar $-1,376.79$ – $2,037.26$ nT. Data anomali magnetik total selanjutnya diolah melalui beberapa tahap sehingga diperoleh data anomali magnetik lokal dengan nilai berkisar $-1.238,13$ – $1.892,4$ nT. Penapisan (filtering) terhadap data anomali magnetik lokal dilakukan untuk mereduksi efek-efek magnetik di permukaan sehingga diperoleh data anomali magnetik lokal baru dengan nilai berkisar -309.321 – 770.88 nT. Untuk melokalisir sumber anomali bawah permukaan, data anomali magnetik lokal baik sebelum maupun setelah difilter ditransformasi menjadi data anomali pseudogravitasi. Untuk data anomali magnetik sebelum difilter, diperoleh data anomali pseudogravitasi berkisar $-75,992$ – $119,498$ mGal. Sedangkan untuk data anomali magnetik setelah difilter, diperoleh data anomali pseudogravitasi berkisar $-27,815$ – $41,087$ mGal. Hasil interpretasi terhadap kedua peta anomali pseudogravitasi mengindikasikan adanya sumber anomali dangkal yang tersebar di bagian barat hingga barat laut daerah penelitian, dimana sumber anomali tersebut mengarah relatif ke bawah di bagian barat. Sumber anomali tersebut diinterpretasi sebagai batuan beku andesit yang masif.

Kata kunci: Peta anomali pseudogravitasi, anomali magnetik lokal, batuan andesit, Desa Candiwulan, Purbalingga

Abstract – The use of pseudogravity anomalous map to interpret the distribution of andesite rocks in Candiwulan Village and surrounding areas, Kutasari District, Purbalingga Regency has been carried out. The research has been conducted from April to September 2019. The materials and equipments needed consisted of the total magnetic anomalies data, personal computers (PC), and some software such as Fortran 77, Surfer 10, and Arc-GIS 3.0. The amount of the total magnetic anomalies data obtained is 142 data stretching in the geographical position of 109.2788° – 109.3072° E and 7.3032° – 7.3319° S with values ranging of $-1,376.79$ – $2,037.26$ nT. The total magnetic anomalies data are then processed through several stages in order to obtain the local magnetic anomalies data with values ranging of $-1,238.13$ - $1,892.4$ nT. The filtering is applied to the local magnetic anomalies data to reduce the magnetic effects on the surface so the new local magnetic anomalies data are obtained with values ranging of $-309,321$ - 770.88 nT. To localize subsurface anomalous sources, the local magnetic anomalies data both before and after filtering are transformed into the pseudogravity anomalies data. For the magnetic anomalies data before filtering, the pseudogravity anomalies data obtained have values with ranging of 75.992 – 119.498 mGal. Whereas for the magnetic anomalies data after filtering, the pseudogravity anomalies data obtained have values with ranging of $-27,815$ to $41,087$ mGal. Interpretation results of the both pseudogravity anomalous maps indicate the presence of shallow anomalous sources distributed in the west to northwest of the research area, where the anomalous source is relative pointing downward in the western area. The anomalous sources are interpreted as andesite igneous rocks which are very massive.

Key words: Pseudogravity anomalous map, local magnetic anomaly, andesite rocks, Candiwulan Village, Purbalingga

PENDAHULUAN

Andesit merupakan salah satu jenis batuan beku ekstrusif yang tersusun atas butiran-butiran mineral yang halus (*fine-grained*). Batuan beku ekstrusif tersebut biasanya ringan dan berwarna abu-abu kegelapan. Ketika kondisi cuaca tertentu, batuan andesit seringkali terlihat berwarna coklat, sehingga untuk mengidentifikasinya diperlukan pemeriksaan secara lebih detail. Batuan andesit kaya mineral plagioklas-feldspar dan umumnya mengandung biotit, piroksen, atau amfihole. Batuan andesit banyak ditemukan di dalam aliran lava yang dihasilkan dari gunungapi tipe strato seperti Gunung Slamet. Magma yang naik hingga permukaan gunungapi mengalami proses pendinginan cepat, sehingga mengakibatkan tekstur andesit menjadi lebih halus. Butiran mineral dalam andesit umumnya sangat kecil sehingga tidak dapat diamati tanpa menggunakan alat bantu [1]. Beberapa jenis batuan andesit mengandung sejumlah besar *glass* dan sebagian juga terlihat jejak lava gas vesikular dengan tekstur amigdaloidal [2].

Salah satu desa di Kabupaten Purbalingga yang memiliki potensi sumberdaya alam batu andesit cukup banyak adalah Desa Candiwulan Kecamatan Kutasari dan sekitarnya [3]. Pengetahuan masyarakat terhadap keberadaan batuan beku di kawasan tersebut dengan nilai jual tinggi, mengakibatkan mereka melakukan penambangan batuan secara tradisional dan terkesan liar. Keberadaan batuan andesit di desa tersebut ditandai dengan keberadaan singkapan di permukaan tanah sebagaimana terlihat pada **Gambar 1**. Namun penambangan batuan andesit yang dilakukan secara tidak teratur, acak, dan terkesan liar dapat mengakibatkan berbagai dampak negatif seperti kerusakan alam, tanah longsor, potensi tebing runtuh, ketidakstabilan lahan, dan sebagainya [4]



Gambar 1. Singkapan batuan andesit di daerah penelitian. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sebagian batuan telah ditambang secara liar oleh masyarakat (dokumentasi pribadi)

Untuk mengatur kegiatan penambangan batuan andesit di Desa Candiwulan dan desa-desa di sekitarnya perlu dibuat regulasi. Regulasi disusun berdasarkan hasil-hasil pemetaan sebaran dan potensi batuan andesit di desa tersebut. Dengan demikian kegiatan penambangan batuan andesit diharapkan dapat dilakukan secara terencana dan teratur sebagai upaya untuk mempertahankan dan menjaga kelestarian lingkungan alam di desa-desa tersebut dan sekitarnya. Salah satu teknis untuk memetakan sebaran dan potensi batuan beku andesit baik di permukaan maupun bawah permukaan adalah survei magnetik [5]. Survei magnetik memanfaatkan suseptibilitas magnetik batuan sebagai instrumen untuk mengidentifikasi jenis batuan dan struktur geologi bawah permukaan seperti patahan, lipatan, intrusi batuan beku, reservoir panasbumi, akuifer air tanah, endapan mineral logam, dan lain-lain [6].

Survei magnetik memiliki sensitivitas yang cukup tinggi terhadap batuan beku. Hal ini berkaitan dengan kandungan mineral-mineral feromagnetik di dalamnya [7]. Mineral ini memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang besar, kira-kira satu juta kali daripada bahan paramagnetik dan diamagnetik. Berbagai jenis batuan beku seperti *granite*, *rhyolite*, *basalt*, dan *andesite* memiliki nilai suseptibilitas magnetik dengan rentang nilai $(0 - 97) \times 10^{-6}$ emu. Suseptibilitas magnetik batuan digunakan sebagai parameter dasar untuk melakukan pemodelan sumber anomali sehingga diperoleh informasi berbagai jenis batuan bawah permukaan [7]. Dalam artikel ini tidak dibahas hasil pemodelan; tetapi pembahasan hanya difokuskan pada hasil interpretasi secara kualitatif terhadap peta anomali magnetik lokal. Selanjutnya untuk melokalisir sumber-sumber anomali bawah permukaan secara jelas, data anomali magnetik bisa ditransformasi menjadi data anomali pseudogravitasi, sebab *closure* anomali pseudogravitasi bisa digunakan sebagai petunjuk untuk melokalisir posisi batuan bawah permukaan [8].

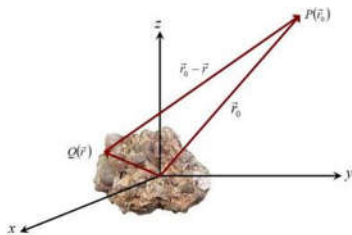
LANDASAN TEORI

A. Metode Survei Magnetik

Dalam geofisika, anomali magnetik adalah variasi lokal di dalam medan magnetik bumi yang dihasilkan dari variasi magnetisme batuan atau mineral di bawah permukaan bumi.

Pemetaan anomali magnetik di suatu lokasi sangat berguna untuk mendeteksi struktur geologi, endapan mineral, benda-benda purbakala yang terkubur, batuan bawah permukaan, dan objek lainnya [9]. Di dalam fisika, volume benda yang mengandung mineral-mineral magnetik dapat diasumsikan sebagai kumpulan dipol magnetik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**. Besar magnetisasi yang terjadi pada benda tergantung pada rekam jejaknya di dalam medan magnetik utama bumi, atau tergantung pada jumlah induksi magnetik yang diterimanya dari medan magnetik utama bumi. Nilai induksi magnetik untuk seluruh dipol magnetik di dalam volume benda tersebut dapat dihitung melalui integrasi yang dinyatakan oleh persamaan [10]

$$\vec{B}(\vec{r}_0) = C_m \nabla \int_V \vec{M}(\vec{r}) \cdot \nabla \left[\frac{1}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|} \right] dV \quad (1)$$



Gambar 2. Deskripsi anomali magnetik dari suatu volume benda, mineral, atau batuan yang termagnetisasi di bawah permukaan [10]

Medan magnetik pada persamaan (1) merupakan anomali magnetik, yang nilainya bersuperposisi dengan nilai medan magnetik utama bumi (B_0) di setiap titik di permukaan bumi. Oleh sebab itu, medan magnetik total (B_T) yang terukur pada magnetometer di setiap titik di permukaan bumi merupakan kombinasi dari nilai medan magnet utama bumi dan anomali magnetik (B_{r0}). Namun faktanya, selain kedua data tersebut, data yang terukur pada magnetometer di setiap titik adalah nilai variasi medan magnet harian. Dengan demikian, data anomali magnetik bisa diperoleh melalui koreksi harian (B_D) dan koreksi medan magnet utama bumi terhadap data medan magnetik total yang telah terukur pada setiap titik lokasi di permukaan bumi. Persamaan koreksinya dinyatakan [10]

$$\vec{B}(r_0) = \vec{B}_T - \vec{B}_D - \vec{B}_0 \quad (2)$$

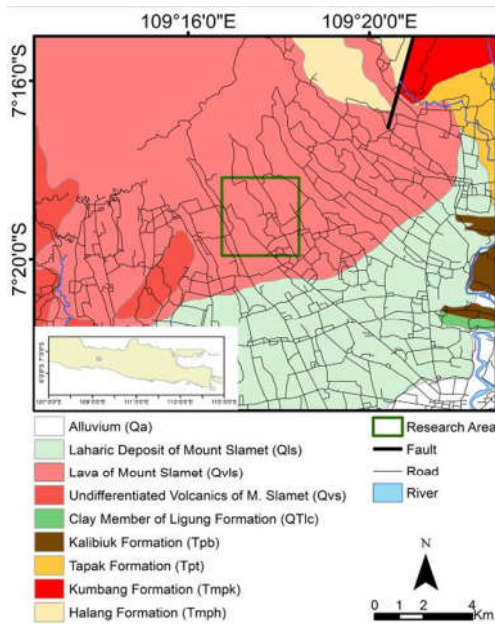
B_0 diperoleh dari nilai *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). IGRF adalah sebuah model matematika yang

mengekspesikan medan magnetik bumi dan perubahannya dalam jangka waktu yang lama di dalam distribusi global berdasarkan teorema Gaussian geomagnetisme [11].

B. Tinjauan Geologi Daerah Penelitian

Urutan stratigrafi daerah penelitian dan sekitarnya terdiri atas berbagai formasi batuan seperti *alluvium* (Qa), endapan lahar Gunungapi Slamet (Qls), lava andesit (Qvls), batuan gunungapi tak terurai (Qvs), anggota lempung dari formasi Ligung (Qtlc), formasi Kalibiuk (Tpb), formasi Tapak (Tpt), formasi Kumbang (TmPk), formasi Halang (TmPh) dan lain-lain [12]. Sedangkan formasi yang berada di sekitar daerah penelitian terdiri atas endapan lahar, batuan lava andesit dan batuan gunungapi tak terurai. Endapan lahar Gunungapi Slamet tersusun atas lava dengan bongkahan batuan beku tipe andesit-basaltik dengan diameter 10 – 50 cm, dihasilkan dari erupsi Gunungapi Slamet tua [12]. Singkapan batuan ini muncul di selatan daerah penelitian. Lava andesit ditemukan dalam bentuk endapan batuan beku yang berongga tersebar di lereng timur yang mendominasi daerah penelitian dan sekitarnya. Sedangkan batuan gunungapi tak terurai tersusun atas breksi vulkanik, lava, dan tufa; dimana penyebarannya membentuk dataran dan perbukitan. Singkapan batuan ini ditemukan di bagian barat daerah penelitian. Secara lengkap peta geologi daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Berdasarkan peta geologi, batuan andesit yang menjadi target penelitian berada pada stratigrafi paling atas di daerah penelitian. Endapan lava ini tersebar dari puncak Gunungapi Slamet ke daerah penelitian yang terletak di lereng tenggara. Batuan lava andesit ini terdiri atas batuan lava masif dengan banyak rekahan dan batuan lava vesikular dengan banyak rongga. Batuan lava andesit masif berwarna abu-abu gelap, dengan struktur berlapis, kadang membentuk struktur aliran, banyak retakan, dan bersifat afanitik dengan ukuran mineral yang terkandung sangat kecil.



Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian; daerah penelitian berada dalam garis kotak yang secara geologis didominasi oleh batuan lava andesit [12].

Adapun batuan lava vesikular berwarna abu-abu gelap dengan struktur membentuk banyak lubang atau rongga halus teratur. Keberadaan lubang atau rongga dalam batuan diperkirakan akibat pelepasan gas-gas vulkanik dari lava cair setelah berada di permukaan. Pada saat magma naik, tekanan di atasnya berkurang; dan ketika hal itu terjadi, gas yang terlarut dalam magma dapat keluar dari larutan, membentuk gelembung gas di dalamnya. Pada saat larutan magma mencapai permukaan sebagai lava dan mendingin, lava itu membeku di sekitar gelembung gas dan menjebaknya di dalam, sehingga terjadi banyak lubang atau rongga yang diisi gas [13].

METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Data anomali magnetik total diperoleh dari kawasan Desa Candiwulan dan sekitarnya, Kecamatan Kutasari, Kabupaten Purbalingga seperti terlihat pada **Gambar 4**. Pengolahan dan interpretasi data dilakukan di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi, dan Geofisika; Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman Purwokerto. Penelitian telah dilakukan selama enam bulan; yaitu April – September 2019.

B. Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan yang diperlukan di dalam penelitian ini adalah data anomali magnetik total yang telah bersih dari efek magnetik harian dan medan magnetik utama bumi (IGRF). Sedangkan peralatan yang digunakan meliputi *personal computer* (PC), yang dilengkapi dengan perangkat lunak seperti Fortran 77, Surfer 10, dan Arc-GIS 3.0. Selain itu peralatan pendukung seperti peta geologi, aplikasi *google earth*, koneksi internet, dan lain-lain juga diperlukan.



Gambar 4. Lokasi penelitian; Desa Candiwulan, Kecamatan Kutasari, Kabupaten Purbalingga dan sekitarnya.

C. Prosedur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan pengolahan data anomali magnetik total yang telah terkoreksi harian dan IGRF, tetapi masih terdistribusi pada permukaan topografi. Data anomali magnetik total ini direduksi ke bidang datar, karena secara matematis data harus terdistribusi pada bidang datar untuk pengolahan tahap berikutnya. Reduksi data dapat dilakukan menggunakan pendekatan Deret Taylor [14]

$$\Delta B(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i+1]} = \Delta B(\lambda, \vartheta, h) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(h-h_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} \Delta B(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i]} \tag{3}$$

Di mana $\Delta B(\lambda, \vartheta, h)$ adalah data anomali magnetik yang masih terdistribusi pada permukaan topografi, $\Delta B(\lambda, \vartheta, h_0)$ adalah data anomali yang telah terdistribusi di atas bidang datar, h adalah tinggi elevasi masing-masing titik data, dan h_0 adalah tinggi rata-rata topografi.

Setelah data anomali magnetik terdistribusi di atas bidang datar, selanjutnya data anomali

magnetik ini dikoreksi dari efek magnetik regional untuk mendapatkan data anomali magnetik lokal dengan persamaan [14]

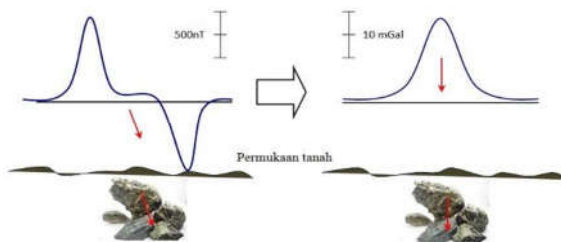
$$\Delta B_{Lokal} = \Delta B(\lambda, \vartheta, h_0) - \frac{\Delta h}{2\pi} \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{\Delta B(\lambda', \vartheta', h_0)}{\sqrt{((\lambda' - \lambda)^2 + (\vartheta' - \vartheta)^2 + \Delta h^2)^{3/2}}} d\lambda' d\vartheta' \quad (4)$$

Suku pertama (pada ruas kanan) menyatakan data anomali magnetik total yang telah terdistribusi di bidang datar (h_0), sedangkan suku kedua menyatakan data anomali magnetik regional hasil pengangkatan setinggi Δh . Data anomali lokal dianggap merepresentasikan keadaan geologi/batuan bawah permukaan yang bersifat lokal atau dekat permukaan [15].

Interpretasi kualitatif untuk mengidentifikasi sebaran dan potensi batuan andesit di Desa Candiwulan dan sekitarnya dapat dilakukan secara langsung melalui analisis peta kontur anomali magnetik lokal. Namun apabila pola kontur anomali magnetik yang diperoleh cukup rumit untuk dianalisis, maka dapat dilakukan transformasi pseudogravitasi menggunakan persamaan [14]

$$V = -\frac{C_m}{\gamma} \frac{M}{\rho} \hat{m} \bullet \nabla_{\rho} U = -\frac{C_m}{\gamma} \frac{M}{\rho} g_m \quad (5)$$

Transformasi pseudogravitasi merupakan metode yang baik untuk membantu interpretasi sumber-sumber anomali bawah permukaan khususnya yang berkaitan dengan densitas. Hal ini bukan semata-mata karena distribusi medan gravitasi secara aktual berkaitan dengan distribusi medan magnetik, namun anomali gravitasi dalam banyak kasus bersifat lebih instruktif dan mudah diinterpretasi [16]. Umumnya sumber anomali yang menjadi target dari survei terletak tepat di bawah *closure* anomali gravitasi atau pseudogravitasi seperti terlihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Skema proses transformasi dari data anomali magnetik menjadi data anomali pseudogravitasi; posisi benda tepat di bawah puncak *closure* anomali [14].

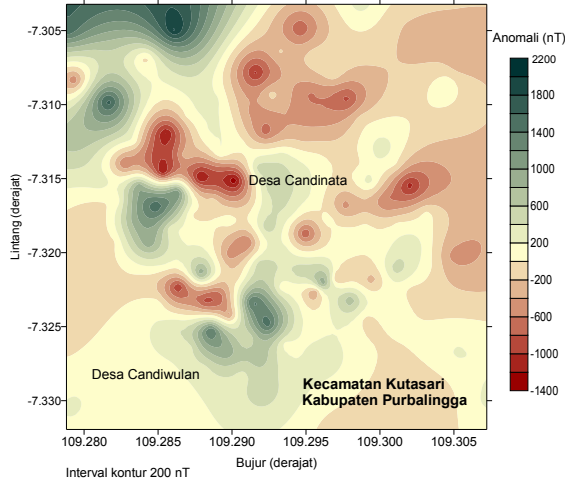
Transformasi pseudogravitasi diterapkan dalam penelitian melalui dua cara. Metode pertama; data anomali magnetik lokal ditransformasi secara langsung menjadi data anomali pseudogravitasi. Metode kedua; data anomali magnetik lokal difilter menggunakan teknik *low pass filter* untuk mereduksi efek-efek magnetik yang berasal dari permukaan topografi. Data anomali yang diperoleh adalah data anomali magnetik lokal baru. Selanjutnya data ini ditransformasi menjadi data anomali pseudogravitasi. Peta anomali pseudogravitasi yang telah dihasilkan dari dua metode, selanjutnya dianalisis dan diinterpretasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

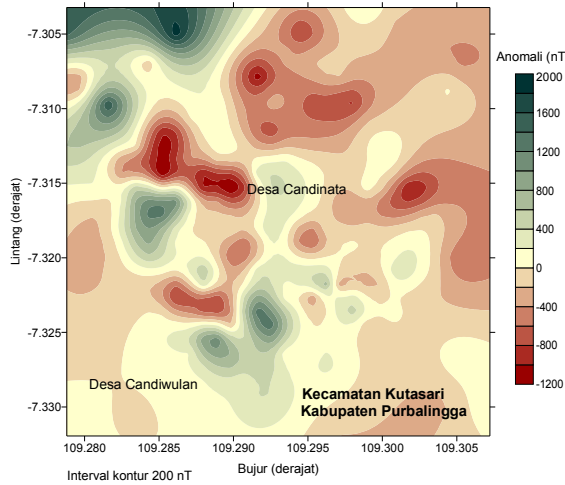
Jumlah data anomali magnetik total yang diperoleh adalah 142 dengan nilai berkisar -1.376,79 – 2.037,26 nT. Data ini menyebar pada posisi geografis 109,2788° – 109,3072° BT dan 7,3032° – 7,3319° LS yang secara visual peta konturnya dapat dilihat pada **Gambar 6**. Data ini masih terdistribusi di permukaan topografi, sehingga harus ditransformasi menuju bidang datar. Sebab persamaan yang digunakan pada tahap pengolahan data berikutnya mensyaratkan agar data anomali terdistribusi pada bidang datar. Data anomali bisa direduksi ke bidang datar menggunakan pendekatan Deret Taylor orde ke-3 seperti telah dijelaskan pada persamaan (3). Ketinggian bidang datar dipilih tinggi rata-rata topografi yaitu 436,86 meter di atas sferoida referensi [14]. Data anomali magnetik total yang telah terdistribusi di bidang datar lebih konvergen daripada ketika masih terdistribusi di permukaan topografi, dengan nilai berkisar -1.148,59 – 1.982,00 nT.

Data anomali magnetik total yang telah terdistribusi pada bidang datar harus dibersihkan dari efek magnetik regional yang berasal dari sumber anomali yang dalam dan luas. Hal ini dilakukan karena target penelitian adalah batuan bawah permukaan yang bersifat dangkal. Data anomali magnetik regional diperoleh melalui proses pengangkatan data ke atas (*upward continuation*) terhadap data anomali magnetik total yang telah terdistribusi pada bidang datar hingga ketinggian 5.000 meter. Pada ketinggian tersebut pola *closure* anomali magnetik telah menunjukkan *trend* yang halus dan relatif tetap, sehingga dipilih sebagai anomali regional [17]. Data anomali magnetik total yang telah terdistribusi pada bidang datar dikoreksi oleh data anomali magnetik regional seperti

persamaan (4) sehingga diperoleh data anomali magnetik lokal dengan nilai anomali berkisar -1.238,13 – 1.892,40 nT. Secara visual peta anomali magnetik lokal ditunjukkan pada **Gambar 7**.



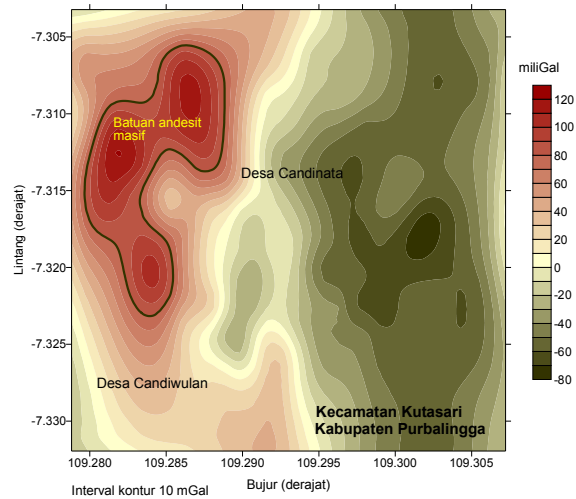
Gambar 6. Peta kontur anomali magnetik total yang terdistribusi pada permukaan topografi.



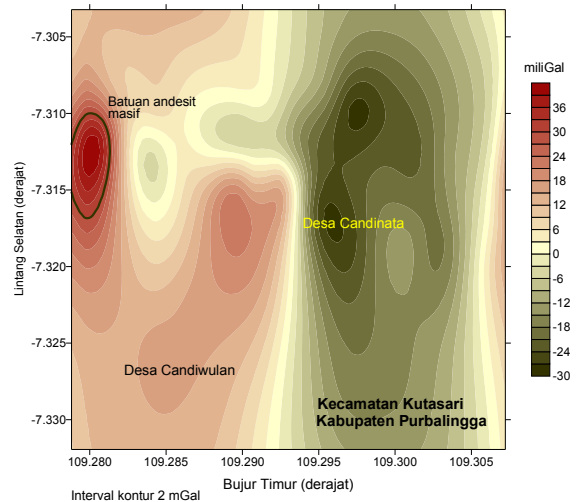
Gambar 7. Peta kontur anomali magnetik lokal yang telah terdistribusi di bidang datar (ketinggian rata-rata topografi).

Peta kontur anomali magnetik lokal seperti **Gambar 7** di atas menunjukkan *closure* anomali yang masih sangat rumit. Hal ini menyulitkan pemodelan sumber-sumber anomali di bawah permukaan bumi. Untuk melokalisir sumber anomali, transformasi pseudogravitasi dapat diterapkan dengan teknik mentransformasi data anomali magnetik lokal menjadi data anomali pseudogravitasi. Cara pertama adalah data anomali magnetik lokal ditransformasi secara langsung menjadi data

anomali pseudogravitasi; dimana hasilnya berkisar -75,992 – 119,498 mGal. Peta anomali pseudogravitasi yang diperoleh ditunjukkan pada **Gambar 8**. Sedangkan cara kedua adalah data anomali magnetik lokal difilter dengan teknik *low pass filter* untuk mereduksi efek-efek magnetik yang berasal dari permukaan topografi. Data anomali yang diperoleh adalah data anomali magnetik lokal baru dengan nilai yang berkisar -309,321 – 770,88 nT. Data ini ditransformasi menjadi data anomali pseudogravitasi, dimana nilainya berkisar -27,815 – 41,087 mGal. Peta anomali pseudogravitasi yang diperoleh ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 8. Peta kontur anomali pseudogravitasi daerah penelitian hasil transformasi data anomali magnetik lokal secara langsung.



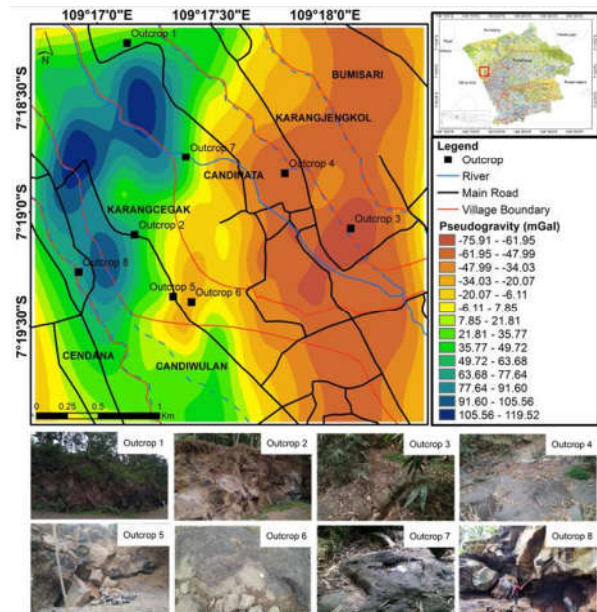
Gambar 9. Peta kontur anomali pseudogravitasi daerah penelitian hasil transformasi data anomali magnetik lokal setelah dilakukan *low pass filter*.

Peta kontur anomali pseudogravitasi terlihat lebih simpel dan informatif daripada peta kontur anomali magnetik lokal. Untuk **Gambar 8**, *closure* anomali positif mendominasi di kawasan barat hingga barat laut daerah penelitian; adapun di kawasan timur didominasi *closure* anomali negatif. Anomali positif diasosiasikan dengan kerapatan batuan yang tinggi; sehingga di bagian barat hingga barat laut daerah penelitian, diperkirakan didominasi oleh batuan andesit masif. Namun semakin kecil nilai anomali positif, semakin banyak rekahan yang terdapat di dalam batuan andesit. Hal ini sesuai dengan informasi geologi daerah penelitian. Untuk kawasan di bagian timur didominasi anomali negatif yang diinterpretasi tersusun atas batuan andesit vesikular [12].

Untuk **Gambar 9**, *closure* anomali pseudogravitasi yang paling positif terlokalisasi di kawasan barat daerah penelitian, namun dengan nilai relatif lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa *low pass filter* yang diterapkan untuk data anomali magnetik lokal berhasil mereduksi efek magnetik lokal [18], sehingga banyak *closure* anomali pseudogravitasi tereduksi. Hasil interpretasi terhadap dua peta anomali pseudogravitasi menunjukkan adanya distribusi batuan andesit yang masif di bagian barat hingga barat laut; dimana tubuh batuan andesit tersebut mengarah relatif ke bawah di bagian barat daerah penelitian. Namun secara umum, batuan andesit terdistribusi relatif dekat dengan permukaan. Menurut informasi geologi, di bawah batuan andesit terdapat formasi batuan gunungapi tak terurai yang tersusun atas breksi vulkanik, lava, dan tufa [12] dengan kerapatan yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan batuan andesit masif.

Untuk memperjelas hasil interpretasi, peta kontur anomali pseudogravitasi di-*overlay* dengan peta geografis, sehingga beberapa kawasan desa yang memiliki potensi tinggi batuan andesit dapat dipetakan. Peta anomali pseudogravitasi juga dilengkapi dengan foto-foto batuan andesit yang tersingkap pada permukaan daerah penelitian. Foto-foto batuan diambil dari beberapa titik lokasi untuk mendukung hasil interpretasi kualitatif. Singkapan batuan 1, 2, dan 8 yang terletak pada zona anomali positif merupakan lokasi penambangan batuan andesit. Demikian pula singkapan 5 dan 6 yang terletak di dekat

anomali positif juga merupakan lokasi penambangan. Sedangkan singkapan 3 dan 4 yang terletak di zona anomali negatif bukan merupakan lokasi penambangan. Tidak semua singkapan dapat didokumentasikan akibat terkendala faktor alam. Perbedaan kecil antara foto singkapan batuan dengan peta anomali pseudogravitasi bisa dipahami, mengingat peta anomali tersebut lebih merepresentasikan distribusi sumber anomali atau batuan yang berada di bawah permukaan [19]. Hasil *overlay* antara peta kontur anomali pseudogravitasi dengan peta geografis daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Peta anomali pseudogravitasi yang telah di-*overlay* dengan peta geografis dan dilengkapi foto singkapan batuan.

Berdasarkan peta anomali pseudogravitasi, sebagian besar batuan andesit diinterpretasi berada di Desa Karangcegak, Candiwulan, dan Candinata. Di kawasan barat laut tiga desa tersebut, terdapat *closure* anomali pseudogravitasi bernilai 91,60 – 119,52 mGal. Namun tepat di zona ini tidak ditemui singkapan batuan di permukaan. Kemungkinan batuan beku andesit yang sangat masif banyak terpendam di kawasan ini, dimana hal ini bisa diamati pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**. Singkapan 1 dan 8 yang paling dekat menunjukkan adanya batuan andesit yang cukup masif di permukaan. Sebaliknya di Desa Karangjengkol dan Desa Candinata bagian tenggara terdapat *closure* anomali

pseudogravitasi negatif dengan nilai -75,91 hingga -61,95 mGal yang diinterpretasi sebagai batuan andesit vesikular yang memiliki banyak rongga atau lubang sehingga densitasnya relatif kecil. Hal ini diperkuat dengan singkapan 3 yang berada di kawasan ini yang tidak menunjukkan adanya batuan andesit masif.

KESIMPULAN

Survei magnetik untuk menginterpretasi sebaran batuan andesit di Desa Candiwulan Kecamatan Kutasari Kabupaten Purbalingga dan sekitarnya telah dilakukan pada bulan April hingga September 2019. Data anomali magnetik total yang diperoleh adalah 142 data dengan nilai berkisar -1,376.79 – 2,037.26 nT, dan tersebar pada posisi geografis 109,2788° – 109,3072° BT dan 7,3032° – 7,3319° LS. Selanjutnya data anomali magnetik total tersebut diproses sedemikian hingga diperoleh data anomali magnetik lokal dengan nilai berkisar -1.238,13 – 1.892,4 nT. Penapisan (*filtering*) terhadap data anomali magnetik lokal dilakukan untuk mereduksi efek magnetik di dekat permukaan sehingga diperoleh data anomali magnetik lokal baru dengan nilai berkisar -309.321 – 770.88 nT.

Untuk melokalisir sumber anomali di bawah permukaan, data anomali magnetik lokal (sebelum dan setelah difilter) ditransformasi menjadi data anomali pseudogravitasi. Untuk data anomali magnetik lokal sebelum difilter, diperoleh data anomali pseudogravitasi berkisar -75,992 – 119,498 mGal. Adapun untuk data anomali magnetik lokal setelah difilter, diperoleh data anomali pseudogravitasi berkisar -27,815 – 41,087 mGal. Hasil interpretasi terhadap kedua peta anomali pseudogravitasi mengindikasikan keberadaan batuan andesit masif yang tersebar di bagian barat hingga barat laut daerah penelitian; dimana tubuh batuan andesit mengarah relatif ke bawah di bagian barat. Hasil interpretasi kualitatif ini sesuai dengan peta geologi daerah penelitian dan foto-foto batuan yang tersingkap di permukaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Rektor dan Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) UNSOED atas diterimanya proyek penelitian dan dana yang disediakan. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Kepala Laboratorium Elektronika, Instrumentasi dan Geofisika atas

peralatan Proton Precession Magnetometer (PPM) yang disediakan. Selain itu ucapan terimakasih juga disampaikan kepada tim akuisisi data di lapangan yang telah berjuang keras dalam kegiatan akuisisi data magnetik total.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. R. Prothero and F. Schwab, *Sedimentary Geology: An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy* (2nd ed.). New York: Freeman, 2004.
- [2] Anonim, *Batuan Andesit dan Proses Pembentukannya*. Diakses dari: <https://www.geologinesia.com/2016/01/batuan-andesit-dan-proses-pembentukannya.html>, Diakses tanggal 7 Juni 2019, (2016)
- [3] Ariyanto, *Penentuan Zonasi Perizinan Pertambangan Bahan Galian Andesit, Sirtu dan Tras di Kabupaten Purbalingga Jawa Tengah*. *Tesis*. Fakultas Teknik, Sains, dan Matematika. Universitas Pembangunan Nasional "Veteran". Yogyakarta, 2014.
- [4] Sucipto (Kepala Desa Candiwulan), *Komunikasi Pribadi*, 2018.
- [5] W.M. Ahnin, A. Susilo, and Sunaryo, *Mapping of Manganese Ore Deposits by Using Geomagnetic Method in Aceh Jaya District, Nangro Aceh Darussalam Province, Indonesia*, *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 2(10) (2013) 12 – 20.
- [6] N.O. Mariita, *The Magnetic Method. Presented at Short Course II on Surface Exploration for Geothermal Resources. UNU-GTP and KenGen, at Lake Naivasha. Kenya. 2 – 17 November 2007, 2007.*
- [7] B. N. Dai, C. Dong Xue, K. Xiang, T. Trong Lap, Q.J. Akhter, S. Lei Li *Magnetic Method Surveying and Its Application for the Concealed Ore-Bodies Prospecting of Laba Porphyry Molybdenum Ore Field in Shangri-La, North-western Yunnan Province, China*, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2(1) (2014) 46 – 53.
- [8] Sehad, S.A. Raharjo, dan P. Priyadi, *Transformasi Pseudogravitasi Data Anomali Magnetik untuk Melokalisir*

- Sumber Rembesan Minyak di Daerah Cipari Kabupaten Cilacap, *Wahana Fisika* 1(2) (2016) 99 – 110.
- [9] Ayad, A., and Bakkali, S., Analysis of the Magnetic Anomalies of Buried Archaeological Ovens of Ain Kerouach, *International Journal of Geophysics* (2018) 1–7.
- [10] W.M. Telford, L.P. Gedaart, and R.E. Sheriff, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 1990.
- [11] S. Macmillan, and S. Maus, International Geomagnetic Reference Field - The Tenth Generation, *Earth Planets Space* 57(1) (2005) 1135 – 1140.
- [12] M. Djuri, H. Samodra, dan S. Gafoer, *Peta Geologi Lembar Purwokerto – Tegal Jawa; Skala 1:100,000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (P3G), Bandung, 1996.
- [13] S. Iswahyudi, I.P. Jati, dan R. Setijadi, Studi Pendahuluan Geologi Telaga Tirta Marta, Purbalingga, Jawa Tengah, *Jurnal Dinamika Rekayasa*, 14(2) (2018) 86-91.
- [14] R.J. Blakely, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [15] Y. Li, and D.W. Oldenburg, Separation of Regional and Residual Magnetic Field Data, *Geophysics*, 63(2) (1998) 431-439.
- [16] D.A. Pratt, and Z. Shi, An Improved Pseudo-Gravity Magnetic Transform Technique for Investigation of Deep Magnetic Source Rocks. *ASEG 17th Geophysical Conference and Exhibition*, Sydney, January 2004, 2004.
- [17] D.O. Ogagarue, and J.E. Emudianughe, Ground Magnetic Survey of the Charnokitic Dykes in the Areas Around Omu-Ijelu, Southwestern Nigeria, *IOSR Journal of Applied Physics*, 8(3) (2016) 90-98.
- [18] L. Guo, X. Meng, Z. Chen, S. Li, and Y. Zheng, Preferential Filtering for Gravity Anomaly Separation. *Computers and Geosciences*, 51 (2013) 247-54.
- [19] Subarsyah dan Y.A. Prihandono, Metoda Pseudo-Gravity dalam Analisis Kelurusan dan Patahan di Sekitar Tinggian Asahan, Perairan Selat Malaka, *Jurnal Geologi Kelautan*, 7(2) (2009) 65-71.

Sistem monitoring kemiringan gedung berbasis resistor variabel

Reza Pahlevi, Hartono*, dan Farzand Abdullatif

Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Jenderal Soedirman Purwokerto

Jl. Dr. Soeparno 61, Kampus Unsoed Karangwangkal

*email: harlaras@gmail.com

Abstrak – Sistem deteksi kemiringan gedung bertingkat dibuat menggunakan resistor variabel yang dipasang bandul sebagai sensor. Bandul selalu menghadap ke bawah karena adanya gaya gravitasi. Gaya gravitasi berfungsi sebagai torsi untuk merubah resistansi resistor variabel. Resistor variabel disusun menjadi rangkaian pembagi tegangan supaya perubahan resistansinya berubah menjadi perubahan beda potensial yang dapat dibaca oleh arduino. Peningkatan sensitivitas dilakukan dengan memasang resistor variabel pada sebuah gear kecil dan bandul pada gear besar. Kedua gear dihubungkan secara bersinggungan. Sensor dibuat sebanyak 2 buah untuk mendeteksi perubahan kemiringan terhadap sumbu x dan sumbu y. Hasil yang didapatkan yaitu sistem deteksi kemiringan gedung bertingkat dapat dibuat menggunakan resistor variabel. Sistem deteksi memiliki karakteristik yang baik dengan akurasi sebesar 89,34%, presisi 91,07%, eror 10,66%, dan waktu respon 4,125 detik. Sistem deteksi kemiringan dapat mendeteksi perubahan kemiringan sudut dan arahnya serta dapat memberikan peringatan dini setelah sudut yang terbaca melebihi 1,5°. Threshold yang dimiliki sistem adalah 0,17°.

Kata kunci: resistor variabel, torsi, sensitivitas, karakteristik.

Abstract – The tilt detection system of multi-storey buildings are made using a variable resistor mounted by the pendulum as a sensor. The pendulum always faces down because of the force of gravity. The force of gravity serves as the torque to change the resistance of the variable resistor. Variable resistors are arranged into a voltage divider circuit so that the transform in resistance turned into alteration in difference of potential, which can be read by Arduino. The increasing of sensitivity, a variable resistor is mounted on a small gear and a large gear pendulum. Then the two gears get contact. Two sensors are made to detect the alteration in the slope of the x axis and y axis. The result is the slope detection system of multi-storey buildings can be made using a variable resistor. The detection system has good characteristics with an acceleration of 89.34%, a precision of 91.07 % error of 10.66%, and a response time of 4.13 seconds. The tilt detection system can detect changes in tilt angle and direction and can provide an early warning after the angle reading exceeds 1,5°. The system threshold is 0.17°.

Key words: variable resistor, torque, sensitivity, characteristics

PENDAHULUAN

Kemiringan pada konstruksi suatu bidang atau benda menjadi salah satu parameter dalam menentukan kekuatan konstruksi. Kemiringan suatu gedung dapat menjadi hal fatal apabila tidak diantisipasi secara dini. Ada banyak alat ukur kemiringan yang pernah dibuat, salah satunya yaitu dengan menggunakan sensor akselerometer ADXL335 [1] dan Giroskop yang digunakan untuk pengukuran sudut momen roket [2]. Alternatif lain dalam mendeteksi kemiringan gedung bertingkat dapat dibuat menggunakan resistor variabel.

Resistor variabel ialah resistor yang resistansinya dapat diubah-ubah. Resistor variabel mempunyai tiga sambungan, dua buah untuk ujungnya dan sebuah untuk pejalan [3].

Keluaran resistor variabel ini berupa resistansi yang linier sehingga dapat digunakan untuk mengukur perubahan sudut dari perubahan resistansi [4]. Resistor variabel memiliki berbagai macam jenis, salah satunya adalah jenis putar. Nilai resistansinya dapat diubah apabila porosnya diputar.

Resistor variabel dapat diputar dengan momen gaya atau torsi yang lebih besar dari momen inersia yang dimiliki oleh resistor variabel. Torsi merupakan besaran yang memiliki peran sama dengan gaya (F) pada gerak linier, namun memiliki prinsip yang berbeda. Torsi adalah besarnya gaya yang dipengaruhi oleh jarak gaya terhadap pusat rotasi (lengan gaya r) seperti **Gambar 1**. Ketika sebuah benda diam diberi torsi, maka terdapat

besaran yang mempertahankan untuk berotasi atau melawan rotasi yang dinamakan momen inersia (momen kelembaman). Semakin besar nilai momen inersia suatu benda, maka semakin sukar benda untuk diputar [5]. Persamaan torsi (τ) seperti persamaan berikut ini.

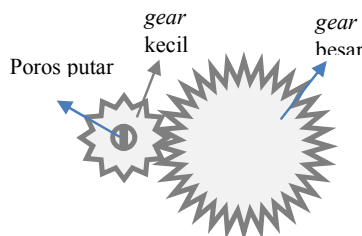
$$\tau = Fr \tag{1}$$



Gambar 1. Momen gaya atau torsi

Gaya dihasilkan oleh gaya berat bandul. Bandul dipasang pada gear yang lebih besar sedangkan resistor variabel dipasang pada gear kecil. Kemudian kedua gear tersebut disinggungkan seperti Gambar 2. Hubungan dua gear yang saling bersinggungan memiliki arah putar berlawanan antar gear dan memiliki kelajuan linear yang sama atau dapat ditulis dalam persamaan:

$$v_1 = v_2 \text{ atau } \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 \tag{2}$$



Gambar 2. Hubungan antar gear

Sedangkan hubungan yang dimiliki oleh gear kecil dengan poros putar resistor variabel merupakan hubungan dua gear yang seporos. Hubungan antar gear ini memiliki arah putar dan kecepatan sudut yang sama atau dapat ditulis dalam persamaan:

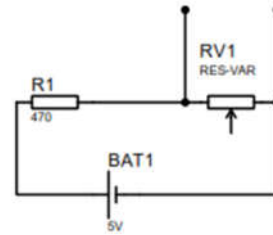
$$\omega_1 = \omega_2 \tag{3}$$

Berdasarkan Persamaan (2) dan Persamaan (3), jika terjadi perputaran yang kecil pada gear besar maka akan menghasilkan putaran yang besar pada gear kecil dan poros putar resistor variabel.

Resistor variabel yang digunakan disusun menjadi rangkaian pembagi tegangan seperti Gambar 3, dengan R_2 adalah hambatan sensor (resistor variabel). Ketika resistansi pada R_2

berubah maka akan terjadi perubahan tegangan keluaran pada rangkaian [6]. Besarnya tegangan keluaran yang dihasilkan oleh rangkaian pembagi tegangan adalah:

$$V_{out} = \frac{R_2}{(R_2 + R_1)} V_{in} \tag{4}$$

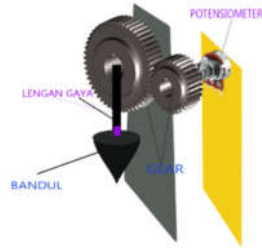


Gambar 3. Rangkaian pembagi tegangan

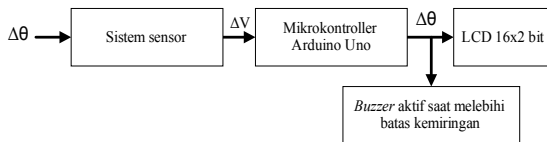
METODE PENELITIAN/EKSPERIMEN

Sensor dapat mendeteksi kemiringan apabila resistor variabel dipasang sebuah bandul. Bandul akan mempertahankan posisinya menghadap ke bawah akibat dari adanya gravitasi saat gedung mengalami perubahan kemiringan. Ketika terjadi perubahan kemiringan, bandul bekerja sebagai torsi yang mengubah besarnya resistansi resistor variabel. Gear box dengan rasio 1:3 digunakan untuk meningkatkan sensitivitasnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Sensor dirangkai menjadi rangkaian pembagi tegangan yang terdiri dari resistor tetap 470 Ω dan resistor variabel 1 k Ω seperti Gambar 3. Nilai 1 k Ω dipilih agar ketika terjadi perputaran kecil pada resistor variabel maka akan menghasilkan perubahan resistansi yang kecil juga. Keluaran sensor dihubungkan dengan arduino UNO sebagai mikrokontrol untuk diproses dan ditampilkan kemiringan yang dideteksi sistem melalui LCD. Jika kemiringan yang dideteksi melebihi ambang batas kemiringan gedung, maka buzzer akan aktif sebagai tanda bahaya. Serangkaian sistem dapat ditunjukkan dalam bentuk diagram blok seperti pada Gambar 5.



Gambar 4. Rancangan sensor kemiringan gedung.



Gambar 5. Diagram blok sistem deteksi kemiringan.

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui tegangan keluaran minimum dan maksimum yang dapat dihasilkan oleh resistor variabel yang dapat dihasilkan oleh resistor variabel. Pengujian sensor diawali dengan merangkai resistor variabel dan resistor tetap menjadi rangkaian pembagi tegangan. Tegangan masukan yang diberikan berasal dari power supply sebesar 5 volt. Pada resistor variabel yang dijadikan sebagai sensor dipasang sebuah busur. Busur berfungsi untuk pengujian perubahan tegangan keluaran yang dihasilkan apabila sudut pada resistor variabel divariasikan. Sudut yang divariasikan mulai dari -90° sampai 90° dengan interval 5° .

Resistor variabel dipasang gear box untuk meningkatkan responnya. Setelah digabungkan dengan gear box, sensor diuji kembali responnya terhadap perubahan sudut. Pengujian sensor setelah dipasang gear box dilakukan dengan memvariasikan sudut secara maksimal dari -59° sampai 60° . Dari data pengujian tersebut, maka diambil hanya pada bagian respon terbaik.

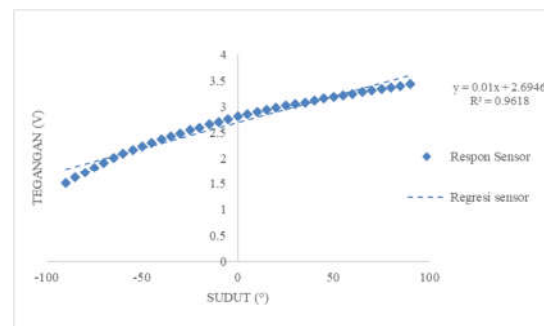
Pengujian dilanjutkan terhadap sistem sensor dengan menghitung massa bandul minimum yang dibutuhkan untuk dijadikan torsi. Kemudian bandul dengan massa yang cukup disatukan dengan sensor yang sudah terpasang gear box. Setelah itu, sistem sensor diuji respon keluarannya terhadap perubahan sudut dari sudut 0° sampai 3° dan 0° sampai -3° . Pengujian dilakukan menggunakan papan yang dipasang engsel dan busur, sehingga sistem yang berada di atasnya mengalami perubahan sudut yang sama dengan dan papan dan sesuai yang ditunjukkan busur. Jika akurasi yang didapatkan kurang bagus, maka harus

dilakukan modifikasi fungsi kalibrasi. Batas sudut pengujian 3° dipilih karena batas maksimal kemiringan yang diijinkan untuk gedung setinggi 100 m sebesar $1,6^\circ$. Batas ini dihitung berdasarkan pada batas simpangan antar lantai yang diizinkan. Dengan demikian 3° sudah cukup untuk dijadikan batas pengujian sistem. Sistem sensor dibuat sebanyak 2 buah. Sensor 1 digunakan untuk mendeteksi perubahan kemiringan terhadap sumbu x dan sensor 2 digunakan untuk mendeteksi perubahan kemiringan terhadap sumbu y.

Pengujian akhir sistem dilakukan di atas papan busur dengan memvariasikan sudut dari sudut 0° sampai 3° . Sudut yang divariasikan meliputi 8 arah mata angin yang disimbolkan dengan C, D, E, F, G, H, A, B. Hasil pembacaan sistem deteksi dicatat dan dibandingkan dengan sudut yang divariasikan. Perbandingan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik sistem deteksi kemiringan gedung. Karakteristik yang diuji meliputi akurasi, presisi, eror, dan waktu respon. Sistem peringatan dini dikatakan dapat bekerja dengan baik apabila sistem deteksi arah kemiringan dengan benar dan buzzer akan aktif setelah melebihi batas kemiringan yang diizinkan. Sistem diatur agar buzzer aktif pada sudut $1,5^\circ$, yaitu sudut yang lebih kecil dari $1,6^\circ$. Serangkaian pengujian sistem deteksi kemiringan ini dilakukan hanya sebatas skala laboratorium.

HASIL DAN PEMBAHASAN

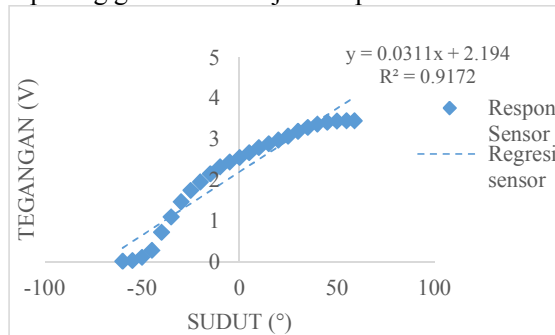
Pengujian sensor diawali dengan memposisikan jarum resistor variabel (sensor) pada kondisi -90° di atas busur derajat. Variasi sudut dilakukan dengan memutar jarum secara manual hingga mencapai sudut 90° dengan interval 5° . Hasil dari pengujian respon sensor terhadap perubahan variasi sudut ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Respon sensor terhadap perubahan sudut

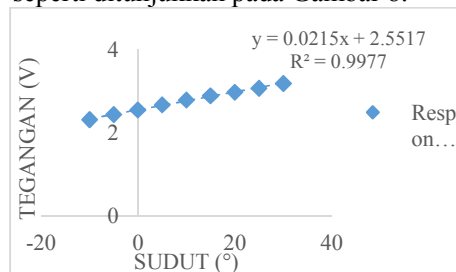
Gambar 6 menunjukkan respon keluaran sensor saat diberikan perubahan sudut dari -90° sampai 90° . Sensor memiliki sensitivitas sebesar $0,01 \text{ V}/^\circ$. Korelasi antara data yang didapatkan dengan fungsi linearnya adalah sebesar 0,96. Nilai sensitivitas sensor dapat ditingkatkan dengan menambahkan gear box. Gear box yang digunakan dalam penelitian ini memiliki rasio 1:3, sehingga perubahan 1° pada sudut sama dengan perubahan 3° pada sensor.

Hasil pengujian setelah sensor dihubungkan dengan gear box dilakukan pada interval sudut -59° sampai 60° . Tegangan masukan digunakan sebesar 5 volt sehingga perubahan maksimum keluaran yang dihasilkan adalah 3,45 volt. Hasil pengujian sensor setelah dipasang gear box ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Respon sensor dengan gear bok.

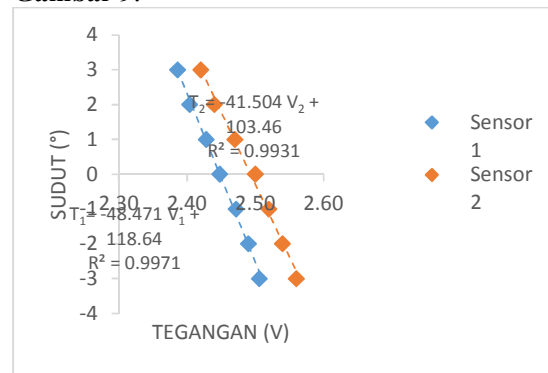
Gambar 7 menunjukkan bahwa resistor variabel bersifat tidak linear. Korelasi data yang didapatkan dengan fungsi linear anantara sensor sebelum dipasangkan gear bok dan setelah dipasang gear bok mengalami penurunan dari 0,96 menjadi 0,91. Hal ini menggambarkan sensor memiliki pembacaan yang kurang baik. Akan tetapi sensitivitas sensor meningkat dari $0,01 \text{ V}/^\circ$ menjadi $0,03 \text{ V}/^\circ$. Dengan batas kemiringan gedung adalah $1,5^\circ$, maka agar sensor dapat digunakan dapat diambil pada respon sensor yang memiliki korelasi paling bagus yaitu rentang sudut -10° sampai sudut 30° seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon sensor dari sudut -10° sampai 30°

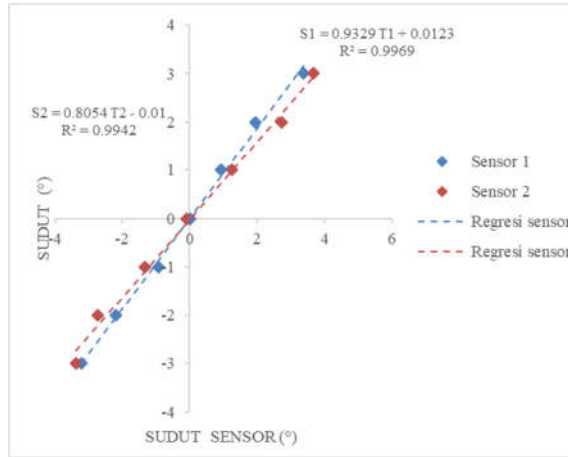
Gambar 8 merupakan respon sensor setelah dipasang gear bok saat terjadi perubahan sudut -10° sampai 30° . Sensor memiliki sensitivitas $0,02 \text{ V}/^\circ$ dengan korelasi 0,99 dan menghasilkan tegangan keluaran dari 2,32 volt sampai 3,07 volt. Respon ini sudah cukup untuk dijadikan sensor pendeteksi perubahan sudut.

Sensor sudut yang sudah bagus dipasangkan bandul agar menjadi sistem sensor yang dapat mendeteksi perubahan kemiringan. Bandul yang digunakan memiliki massa 0,8 kg. Sistem diuji respon tegangan keluarannya terhadap perubahan sudut bidang dari sudut 0° sampai sudut 3° dan sudut 0° sampai -3° . Tegangan masukan yang digunakan sebesar 5 volt. Hasil pengujian respon sistem sensor terhadap perubahan sudut ditunjukkan pada Gambar 9.



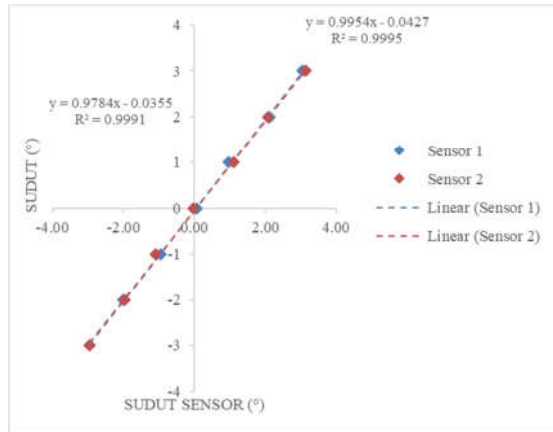
Gambar 9. Fungsi kalibrasi sensor kemiringan

Gambar 9 merupakan fungsi kalibrasi yang dimiliki oleh masing-masing sensor. Dari fungsi kalibrasi tersebut dapat diketahui setiap sensor memiliki sensitivitas sebesar $-48,47 \text{ mV}/^\circ$ dengan korelasi 0,99 untuk sensor 1 dan $-41,50 \text{ mV}/^\circ$ dengan korelasi 0,99 untuk sensor 2. Dimana T merupakan sudut dan V merupakan tegangan yang dihasilkan. Dengan demikian sensor memiliki respon yang baik untuk mendeteksi perubahan kemiringan. Sehingga fungsi kalibrasi untuk sensor 1 yaitu $T_1 = (-48,471 V_1 + 118,64)$ dan fungsi kalibrasi untuk sensor 2 yaitu $T_2 = (-41,504V_2 + 103,46)$. Fungsi kalibrasi ini merupakan fungsi yang dijadikan program untuk arduino. Setelah di program sistem diuji akurasi. Hasil pengujian sistem sensor setelah di program adalah seperti Gambar 11.



Gambar 10. Akurasi sistem sensor

Gambar 10 menunjukkan bahwa akurasi rata-rata untuk sistem sensor 1 sebesar 93,29% dan untuk sistem sensor 2 sebesar 80,54%. Akurasi yang dimiliki oleh sensor masih terlalu kecil, sehingga perlu ditingkatkan dengan menambahkan persamaan pada fungsi kalibrasinya menggunakan persamaan garis yang didapat dari hasil uji akurasi. Pada persamaan, S merupakan sudut sebenarnya dan T merupakan sudut yang dibaca sensor. Fungsi kalibrasi untuk sensor 1 yaitu $S1 = (93,29 T1 + 1,23)$ dan fungsi kalibrasi untuk sensor 2 yaitu $S2 = (80,54 T2 - 1)$. Hasil pengujian sistem sensor setelah dikalibrasi kembali seperti Gambar 11.



Gambar 11. Akurasi sensor setelah peningkatan

Gambar 11 menunjukkan bahwa sistem sensor memiliki akurasi yang lebih baik. Akurasi untuk sistem sensor 1 meningkat menjadi 99,5% dan akurasi untuk sistem sensor 2 meningkat menjadi 97,8%. Sistem sensor memiliki karakteristik yang baik dan siap untuk dijadikan sistem pendeteksi perubahan kemiringan gedung dengan sistem sensor 1

sebagai sumbu x sistem sensor 2 sebagai sumbu y, seperti Gambar 12. Program sistem deteksi dibuat dengan membuat program melalui Arduino IDE agar dapat membaca perubahan kemiringan gedung dan arah kemiringannya. Arduino UNO yang telah terprogram dirangkai dengan sistem sensor, buzzer, dan lcd untuk dijadikan sistem deteksi kemiringan gedung. Kemudian sistem deteksi diuji karakteristiknya.



Gambar 12. Susunan sensor kemiringan arah X dan Y

Hasil pengujian karakteristik sistem deteksi memiliki akurasi rata-rata sebesar 89,34%. Akurasi terendah terletak pada pembacaan arah E dan F pada sudut 1° dengan akurasi sebesar 65,8%. Pembacaan akurasi tertinggi terletak pada arah C dengan sudut 2° akurasi sebesar 100%. Presisi rata-rata yang dimiliki oleh sistem deteksi sebesar 91,07%. Presisi terendah pada pembacaan arah E dan F pada sudut 1° yaitu sebesar 74,52%. Presisi tertinggi terletak pada pembacaan arah C dengan sudut 2° yaitu sebesar 100%. Error rata-rata sistem deteksi sebesar 10,66% dengan error terendah terletak pada pembacaan arah C pada sudut 2° dengan error 0%. Error tertinggi terletak pada pembacaan arah E dan F pada pembacaan sudut 1° dengan error sebesar 34,2%. Waktu respon rata-rata sebesar 4,13 detik dengan waktu repon terendah 2 detik dan terbesar 5 detik. Pada saat perubahan kemiringan belum mencapai 1,5°, buzzer tidak aktif. Sedangkan pada saat perubahan kemiringan yang terdeteksi melebihi 1,5° buzzer aktif. Dengan demikian sistem deteksi kemiringan gedung bertingkat memiliki karakteristik yang baik.

Waktu respon yang dimiliki oleh sensor masih terlalu lama. Hal ini terjadi karena resistor variabel yang digunakan memiliki gaya gesek yang besar sehingga sulit untuk diputar. Untuk meningkatkan waktu respon dapat

dilakukan dengan memperbesar torsinya. Torsi dapat diperbesar dengan menambah massa beban atau lengan gayanya. Karakteristik yang dimiliki sensor untuk arah yang berlawanan seperti arah A dan arah E berbeda seharusnya sama. Perbedaan ini terjadi karena mata gear yang digunakan terlalu besar. Sehingga ketika gear besar bergerak, gear kecil belum ikut bergerak. Hal ini akan berakibat pada putaran resistor variabel sebagai sensor deteksi kemiringan. Sehingga sistem deteksi kemiringan memiliki karakteristik yang berbeda-beda untuk setiap arahnya. Arah A ditunjukkan oleh sumbu y positif, arah E pada sumbu y negatif. Arah C pada arah rumbu x negatif dan arah G pada arah sumbu x positif.

KESIMPULAN

Sistem deteksi kemiringan gedung bertingkat dapat dibuat menggunakan resistor variabel yang dipasang bandul sebagai sensor dengan karakteristik sebagai berikut:

Akurasi (%)	Presisi (%)	Eror (%)	Waktu respon (s)	Sistem peringatan	
				$<1,5^\circ$	$\geq 1,5^\circ$
89,34	91,07	10,66	4,13	0	1

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang sudah membantu terlaksananya penelitian ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Elektronika Instrumentasi dan Geofisika

Jurusan Fisika FMIPA Unsoed yang sudah menyediakan fasilitas untuk penelitian.

PUSTAKA

- [1] Nugraha, Y. P., Kandi, A. A. & Prastowo, T., Pemantauan Kemiringan Gedung dan Bangunan Fisis dengan Menggunakan Sensor Akselerometer ADXL335. Yogyakarta, Proseding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI & DIY, 2014.
- [2] Rifan, M. et al., Pemanfaatan 3 Axis Gyroscope L3G4200D untuk Pengukuran Sudut Momen Roket. Jurnal EECCIS, 6(2) (2012) 177-182.
- [3] Hidayat, R., Penerapan Audio Amplifier Stereo Untuk Beban Bersama dan Berganti dengan Menggunakan Saklar Ganda sebagai Pengaturan Beban, Jurnal Teknik Elektro, 5 (2) 2013.
- [4] Prayogo, W., Rivai, M. & Budiman, F., Kontrol Lengan Robot yang Meniru Pergerakan Tangan untuk Infeksi Objek yang Mengandung Gas Berbahaya. Jurnal Teknik ITS, 7(2) (2018) (ISSN 2337-3539).
- [5] Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J., Fundamental of Physics 9th edition. 9 ed. USA, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [6] Sutrisno, Elektronika Jilid 1, Bandung, ITB, 1986.

Identifikasi zona lemah pada ruas jalan utama Ajibarang – Gumelar kabupaten Banyumas menggunakan metode geolistrik resistivitas

Tita Murwiyanti, Sehad*, dan Sukmaji Anom Raharjo

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah

*email: sehad.geophysics@gmail.com

Abstrak – Penelitian menggunakan metode geolistrik resistivitas konfigurasi Wenner telah dilakukan untuk mengidentifikasi struktur batuan bawah permukaan khususnya zona lemah pada ruas jalan utama Ajibarang – Gumelar, Kecamatan Ajibarang, Kabupaten Banyumas. Akuisisi data resistivitas telah dilakukan di dua lintasan dengan panjang masing-masing lintasan sebesar 200 meter. Data yang diperoleh adalah nilai resistivitas semu batuan bawah permukaan. Hasil pemodelan terhadap resistivitas semu secara inversi menghasilkan penampang resistivitas batuan bawah permukaan secara dua dimensi (2D). Hasil interpretasi terhadap penampang resistivitas menunjukkan tiga lapisan batuan yang terdiri atas batupasir berbutir halus hingga sedang dengan nilai resistivitas 2,37 – 6,56 Ωm , batunapal gampingan dengan nilai resistivitas 6,32 – 12,60 Ωm , dan batugamping dengan nilai resistivitas 12,10 – 24,30 Ωm . Hasil interpretasi litologi terhadap penampang resistivitas menunjukkan adanya zona lemah di kawasan tersebut pada titik pengukuran $\pm 140 - 180$ meter. Zona lemah tersebut diinterpretasi sebagai lapisan batugamping dan batupasir berbutir halus hingga sedang yang bersifat lunak dan tidak kompak.

Kata kunci: zona lemah, resistivitas, jalan utama Ajibarang-Gumelar, Banyumas

Abstract – A Research using the geoelectric-resistivity method with Wenner configuration has been carried out to identify the subsurface rock structures especially weak zones on the part of main road of Ajibarang – Gumelar, Ajibarang District, Banyumas Regency. Resistivity data acquisition has been carried out on two trajectories with a length of each trajectory is 200 meters. The data acquired are the apparent resistivity values of subsurface rocks. The modeling results of apparent resistivity values in inversion have produced a two-dimensional (2D) cross section of subsurface rock resistivity. The interpretation results of the resistivity cross section have shown three layers of subsurface rocks consisting of fine to moderate grained sandstone with a resistivity value of 2.37 – 6.56 Ωm , limy marl with a resistivity value of 6.32 – 12.60 Ωm , and limestone with a resistivity value of 12.10 – 24.30 Ωm . The results of lithological interpretation of the resistivity cross section have shown the existence of a weak zone in this area at the measurement point about of 140 – 180 meters. The weak zone is interpreted as limestones and sandstones which have fine to moderate grain that is soft and not compact

Key words: weak zone, resistivity, Ajibarang-Gumelar main road, Banyumas.

PENDAHULUAN

Pembangunan sarana transportasi seperti jalan raya yang menghubungkan antar wilayah di Kabupaten Banyumas pada dasarnya adalah usaha untuk memberikan akses informasi, ekonomi, pendidikan, sosial, budaya, dan aspek lain secara lancar dan aman. Mengingat pentingnya manfaat sarana jalan raya tersebut, pembangunan jalan raya seharusnya dilakukan dengan baik dan benar. Namun, sarana jalan raya tidak selalu berbanding lurus dengan kelancaran dan kenyamanan bagi para penggunaannya akibat terjadi kerusakan seperti amblesan, lubang, dan retakan. Amblesan (*subsidence*) adalah gerakan tanah atau batuan ke bawah permukaan bumi dari suatu titik

datum, sehingga elevasi muka tanah berkurang atau menjadi lebih rendah dari semula. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah struktur geologi bawah permukaan jalan raya tersebut. Peristiwa amblesnya jalan menunjukkan bahwa kestabilan batuan penyangga di bawah jalan tersebut mulai menurun, yang mengakibatkan gangguan kontinuitas kekuatan batuan pada struktur bawah permukaan jalan [1]. Beberapa proses alami yang memicu terjadi amblesan adalah sesar normal, kars, penurunan kaldera. Sementara kegiatan manusia yang mengakibatkan amblesan adalah eksploitasi air tanah secara berlebihan, penambangan bahan-bahan galian secara masif, dan sebagainya [2].

Salah satu jalan di Kabupaten Banyumas yang mengalami amblesan adalah salah satu ruas pada Jalan Raya Ajibarang – Gumelar. Secara administratif, jalan raya ini terletak di Desa Karangbawang Kecamatan Ajibarang Kabupaten Banyumas. Di kawasan ini telah terjadi amblesan, tepatnya di jalan yang menghubungkan antara Kecamatan Gumelar dengan Ibukota Kabupaten Banyumas. Bahkan pada sebagian ruas Jalan Raya Ajibarang – Gumelar telah terjadi amblesan hingga longsor seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Sebenarnya amblesan jalan raya ini telah terjadi beberapa tahun sebelumnya, namun pemerintah hanya menambal dan belum mengambil upaya teknis untuk memperbaikinya secara kongkrit [3]. Salah satu upaya teknis untuk mengidentifikasi zona lemah (amblesan) pada jalan adalah melalui survei geolistrik. Survei geolistrik menjadi langkah awal untuk menginvestigasi struktur geologi bawah permukaan [4]. Hasil survei geolistrik ini memberikan gambaran visual zona yang teridentifikasi lemah (berpotensi longsor), sehingga dapat dijadikan acuan untuk melakukan penanggulangan secara teknis.

Teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi zona-zona lemah adalah metode geolistrik resistivitas. Metode geolistrik resistivitas adalah salah satu metode geofisika yang bertujuan mempelajari sifat fisis batuan atau objek di bawah permukaan bumi berdasarkan sifat-sifat kelistrikannya. Metode geolistrik resistivitas digunakan menggambarkan distribusi variasi nilai resistivitas listrik di bawah permukaan secara satu dimensi (1D) atau dua dimensi (2D) berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan di permukaan bumi [5]. Metode geolistrik resistivitas ini umumnya diterapkan untuk eksplorasi dangkal dengan batas pendeteksian bawah permukaan berkisar 300 – 500 meter. Nilai resistivitas yang terukur berkaitan dengan parameter fisis batuan seperti mineral, kandungan fluida, dan porositas [6]. Pada penelitian ini, konfigurasi elektroda yang digunakan adalah konfigurasi Wenner. Konfigurasi Wenner menghasilkan model penampang batuan bawah permukaan secara 2D. Selanjutnya korelasi hasil pemodelan resistivitas antar lintasan dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona lemah atau amblesan pada ruas Jalan Ajibarang – Gumelar secara visual.



Gambar 1. Amblesan jalan raya yang berakibat bencana longsor pada ruas Jalan Ajibarang – Gumelar Kabupaten Banyumas pada tahun 2017 (<https://radarbanyumas.co.id/>)

LANDASAN TEORI

Teknik akuisisi data geolistrik resistivitas dapat dilakukan dengan mengalirkan arus listrik searah (DC) ke dalam tanah atau batuan kerak bumi melalui dua buah elektroda arus C_1 dan C_2 . Arus listrik yang diinjeksikan ke tanah atau batuan akan menyebar secara radial ke seluruh medium tanah atau batuan. Polarisasi listrik yang terjadi dalam medium bawah permukaan diukur nilai beda potensialnya melalui dua buah elektroda potensial, yaitu P_1 dan P_2 . Setelah nilai kuat arus dan beda potensial diketahui, nilai resistivitas semu (*apparent resistivity*) batuan bawah permukaan dapat dihitung dengan persamaan [7]:

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

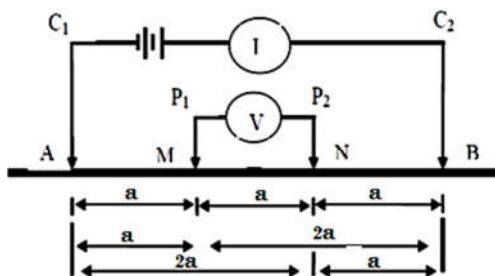
Di mana ρ_a adalah resistivitas semu, K adalah faktor geometri, ΔV adalah beda potensial, dan I adalah kuat arus. Besar faktor geometri tergantung dari konfigurasi atau model susunan dan jarak bentangan elektroda yang digunakan. Untuk konfigurasi Wenner, susunan elektroda dibuat seperti **Gambar 2** dengan nilai faktor geometri dapat dinyatakan dengan persamaan [7]:

$$K_w = 2\pi a \quad (2)$$

Dengan demikian nilai resistivitas semu dalam konfigurasi Wenner dapat dituliskan [7]:

$$\rho_a = K_w \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

Nilai-nilai resistivitas semu tersebut, selanjutnya dimodelkan sehingga diperoleh nilai resistivitas sesungguhnya.



Gambar 2. Susunan konfigurasi elektroda Wenner yang digunakan pada saat akuisisi data geolistrik resistivitas [8].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini telah dilakukan pada bulan November 2017 hingga Januari 2018. Akuisisi data geolistrik resistivitas 2D dengan konfigurasi Wenner dilakukan pada bulan November 2017 pada ruas Jalan Raya Ajibarang – Gumelar Kecamatan Gumelar Kabupaten Banyumas, sebagaimana terlihat pada **Gambar 3**. Peralatan yang digunakan pada survei geolistrik adalah Resistivitymeter merk NANIURA model NRD-300 lengkap dengan instrumen pendukungnya, peralatan *Global Positioning System* (GPS), peta geologi, lembar pengamatan, alat tulis, aplikasi *google earth*, laptop, *software* Res2Dinv 3.54, dan sebagainya.

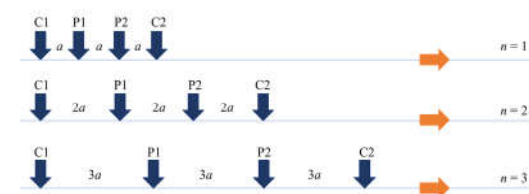


Gambar 3. Lokasi survei geolistrik resistivitas pada ruas jalan raya Ajibarang – Gumelar Kabupaten Banyumas

Teknik akuisisi data geolistrik dengan konfigurasi Wenner (*lateral mapping*) dilakukan untuk mendapatkan penampang resistivitas batuan bawah permukaan secara 2D. Akuisisi data dimulai dengan memasang seluruh elektroda pada salah satu ujung lintasan dengan jarak antar elektroda dibuat sama, misalnya a . Selanjutnya dilakukan pengukuran kuat arus (I), beda potensial (ΔV), dan posisi *datum point*. Selanjutnya seluruh elektroda tersebut digerakkan secara bersamaan ke arah ujung

lintasan yang lain sejauh a , dimana elektroda C_1 digeser ke posisi P_1 , P_1 digeser ke P_2 , P_2 digeser ke C_2 , dan C_2 digeser ke arah ujung lintasan sebesar a . Setelah itu dilakukan pengukuran besaran-besaran fisis tersebut kembali. Demikian seterusnya, akuisisi data dilakukan sehingga mencapai ujung lintasan. Untuk mendapatkan penampang resistivitas 2D pada lintasan tertentu, akuisisi data resistivitas pada suatu lintasan dapat diulangi hingga n kali; dimana setiap kali pengulangan, jarak antar elektroda selalu diperlebar menjadi $2a$, $3a$, $4a$, $5a$, $6a$ dan seterusnya seperti terlihat pada **Gambar 4**. Adapun jarak pergerakan bersama elektroda ke arah ujung lintasan dibuat tetap sebesar a [9].

Data yang diperoleh secara langsung pada masing-masing lintasan terdiri atas kuat arus listrik (I), beda potensial (ΔV), dan jarak antar elektroda (a). Adapun faktor geometri (K_w) dan nilai resistivitas semu (ρ_a) untuk setiap pengukuran data dihitung berdasarkan persamaan (2) dan (4). Panjang lintasan pengukuran dibuat 200 meter, dengan jarak spasi pergerakan elektroda ke arah kanan adalah 10 meter. Dengan demikian jumlah data terukur untuk satu lintasan adalah 63 *sheet* data berdasarkan **Gambar 4**. Jumlah lintasan untuk akuisisi data adalah 2 buah, yang terdiri atas lintasan WA-01 dan lintasan WA-02 dengan panjang masing-masing sebesar 200 meter. Pada konfigurasi Wenner, besarnya data *datum point* untuk setiap n pengukuran dapat dihitung berdasarkan jarak antar elektroda, seperti **Gambar 5** [9].

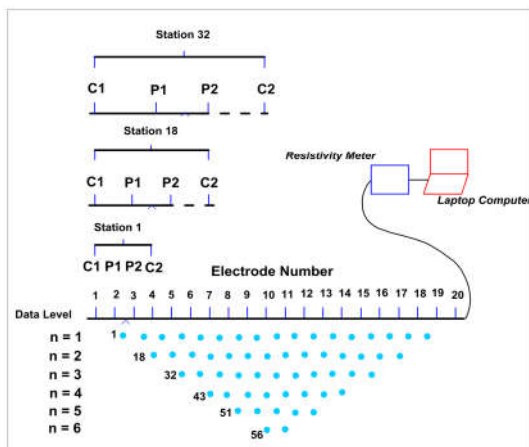


Gambar 4. Skema pergerakan elektroda arus (C_1 dan C_2) dan elektroda potensial (P_1 dan P_2) pada akuisisi data resistivitas menggunakan konfigurasi Wenner [9].

Resistivitas yang diperoleh dari akuisisi data menggunakan konfigurasi Wenner seperti persamaan (1) adalah resistivitas semu (*apparent resistivity*). Besarnya nilai resistivitas semu tergantung dari jarak antar elektroda (a) dan heterogenitas medium atau batuan bawah permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa setiap lapisan batuan di dalam kerak bumi memiliki resistivitas yang berbeda, tergantung dari beberapa parameter seperti kandungan mineral

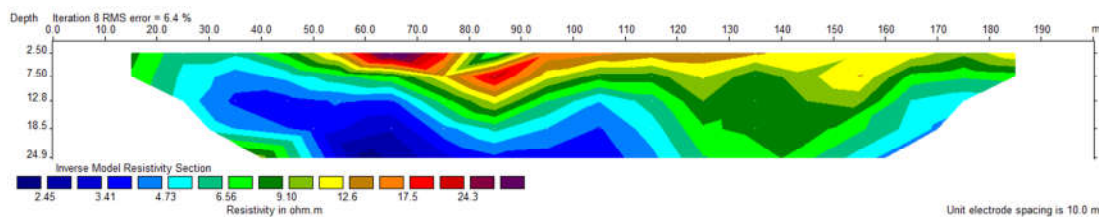
logam, tekstur, kandungan air, temperatur, permeabilitas medium, umur geologi batuan, dan sebagainya [7]. Pemodelan terhadap data resistivitas semu yang diperoleh menghasilkan penampang resistivitas batuan bawah permukaan. Resistivitas hasil pemodelan diasumsikan sebagai nilai resistivitas batuan bawah permukaan yang sesungguhnya (*true resistivity*). Selanjutnya nilai resistivitas untuk masing-masing lapisan pada penampang resistivitas diinterpretasi, sehingga diperoleh penampang litologi batuan bawah permukaan secara 2D [10], termasuk zona lemah atau amblesan.

Gambar 5. Posisi titik-titik *datum point* untuk setiap *n* pengukuran pada sebuah lintasan hasil akuisisi data resistivitas menggunakan konfigurasi Wenner [11].

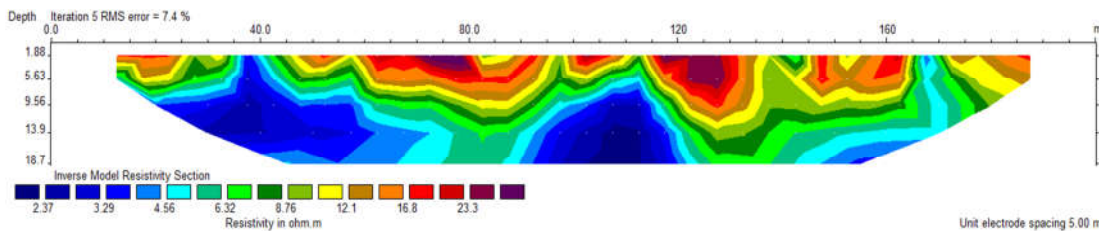


HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan akuisisi data geolistrik resistivitas menggunakan konfigurasi Wenner telah dilakukan pada dua lintasan yang diletakkan di kawasan zona lemah atau amblesan di ruas Jalan Raya Ajibarang – Gumelar Desa Karangbawang Kecamatan Ajibarang Kabupaten Banyumas, seperti telah diperlihatkan pada **Gambar 3**. Seluruh data resistivitas semu (ρ_a) masing-masing lintasan dimodelkan menggunakan perangkat lunak Res2Dinv 3.54 sehingga diperoleh penampang resistivitas batuan bawah permukaan seperti ditunjukkan pada **Gambar 6** dan **Gambar 7**. Kedalaman maksimum hasil pemodelan adalah 24,9 meter untuk Lintasan WA-01 dan 18,7 meter untuk Lintasan WA-02. Model penampang resistivitas batuan bawah permukaan yang diperoleh, selanjutnya diinterpretasi berdasarkan informasi geologi setempat, sehingga diperoleh model penampang litologi batuan bawah permukaan. Secara lengkap hasil interpretasi penampang resistivitas bisa dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.



Gambar 6. Penampang resistivitas batuan bawah permukaan hasil pemodelan konfigurasi Wenner pada Lintasan WA-01.



Gambar 7 Penampang resistivitas batuan bawah permukaan hasil pemodelan konfigurasi Wenner pada Lintasan WA-02.

Tabel 1. Hasil interpretasi litologi batuan bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas pada Lintasan WA-01

No.	Nilai Resistivitas (Ωm)	Hasil Interpretasi Litologi
1	2,45 – 6,56	Batupasir berbutir halus hingga sedang yang mudah terisi air

2	6,56 – 12,6	Batunapal gampingan
3	12,6 – 24,3	Batugamping

Catatan: posisi ujung kiri lintasan WA-01 adalah 7° 25' 51,53" LS dan 109° 3' 33,54" BT dan ujung kanan adalah 7° 25' 55,77" LS dan 109° 3' 37,52"

Tabel 2. Hasil interpretasi litologi batuan bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas pada Lintasan WA-02

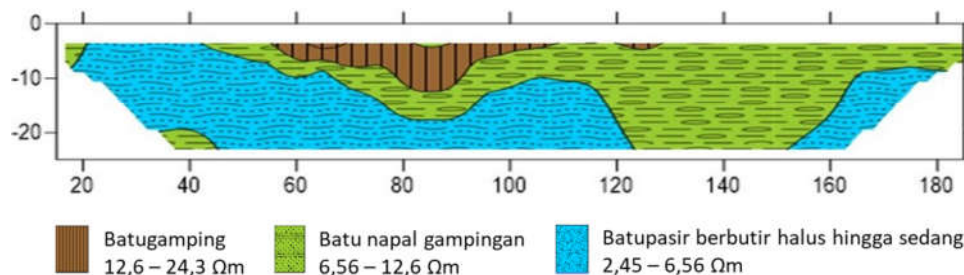
No.	Nilai Resistivitas (Ωm)	Hasil Interpretasi Litologi
1	2,37 – 6,32	Batupasir berbutir halus hingga sedang yang mudah terisi air
2	6,32 – 12,1	Batunapal gampingan
3	12,1 – 23,3	Batugamping

Catatan: posisi ujung kiri lintasan WA-02 adalah 7° 25' 51,28" LS dan 109° 3' 33,77" BT dan ujung kanan adalah 7° 25' 55,57" LS dan 109° 3' 37,52"

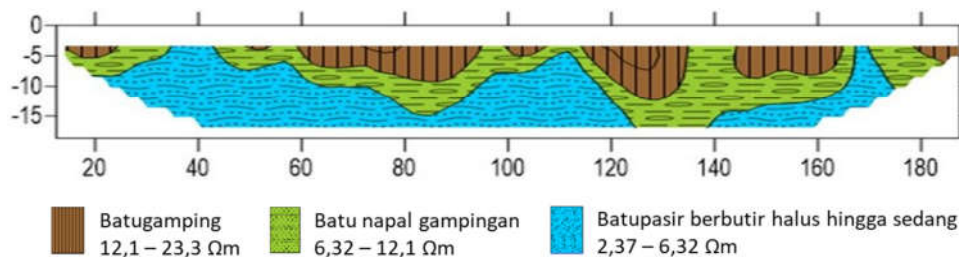
Hasil interpretasi terhadap penampang resistivitas batuan bawah permukaan di Lintasan WA-01 dan Lintasan WA-02 menunjukkan bahwa formasi batuan yang ter-cover di dalam penelitian adalah formasi Tapak yang tersusun atas batupasir, batugamping, dan napal gampingan [12]. Secara umum, daerah penelitian terdiri atas tiga formasi [12], yang meliputi formasi batuan Gunungapi Slamet tidak terurai berupa *tuff*, formasi Halang berupa *tuff* dan napal, serta formasi Tapak yang terdiri atas batupasir, batugamping, napal gampingan. Hasil interpretasi batuan ini digambar ulang menjadi model penampang litologi dua dimensi (2D) sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**. Kedua gambar ini menunjukkan keberadaan lapisan batuan sebagai zona lemah (berpotensi ambles) yaitu lapisan batugamping dengan nilai resistivitas 12,1 – 24,3 Ωm serta lapisan batupasir berbutir halus hingga sedang dengan nilai resistivitas 2,37 – 6,56 Ωm.

Lapisan batugamping terletak di permukaan jalan sehingga langsung terkena gaya berat dari kendaraan-kendaraan berat yang melintas di atasnya. Batugamping memiliki massa jenis 2,3 – 2,7 g/cm³ [13] dan bersifat *porous* dengan warna yang bervariasi seperti putih, abu-abu muda hingga tua, coklat, dan merah hingga kehitaman yang dipengaruhi zat-zat pengotor di dalam batuan. Namun demikian sifat fisik, kadar mineral, dan kenampakan batugamping dapat berubah jika mengalami diagenesa hingga pemalihan akibat tekanan dan temperatur, sehingga terjadi penghabluran kembali material penyusun batugamping [14]. Sifat batugamping yang *porous* (memiliki banyak pori dan rekahan pada tubuhnya) memicu air hujan atau air permukaan masuk dengan mudah menuju ke bawah permukaan, sehingga mengakibatkan batugamping menjadi lebih lunak.

Di bawah batugamping, diinterpretasi terdapat batunapal gampingan yang diperkirakan merupakan batuan lempung berkarbonat dengan sisipan gamping. Pada saat kondisi jenuh akan air (mengandung fluida) batuan ini memiliki sifat agak lembek dan mudah hancur atau berubah bentuk. Sedangkan pada kondisi kering batuan ini bersifat agak keras meskipun relatif rapuh. Lapisan batunapal gampingan relatif tidak tebal sehingga kontribusinya untuk memperkuat zona lemah relatif kecil. Di bagian bawah lapisan batunapal gampingan terdapat batupasir berbutir halus hingga sedang yang diestimasi tidak keras, tidak kompak, mudah ditembus air, dan dapat berubah struktur lapisannya mengikuti beban lapisan di atasnya atau sekitarnya [14]. Lapisan batupasir ini relatif tebal dan volume yang besar, sehingga dominan "mengontrol" zona lemah atau amblesan tersebut.



Gambar 8. Penampang litologi batuan bawah permukaan hasil interpretasi data resistivitas 2D pada Lintasan WA-01.

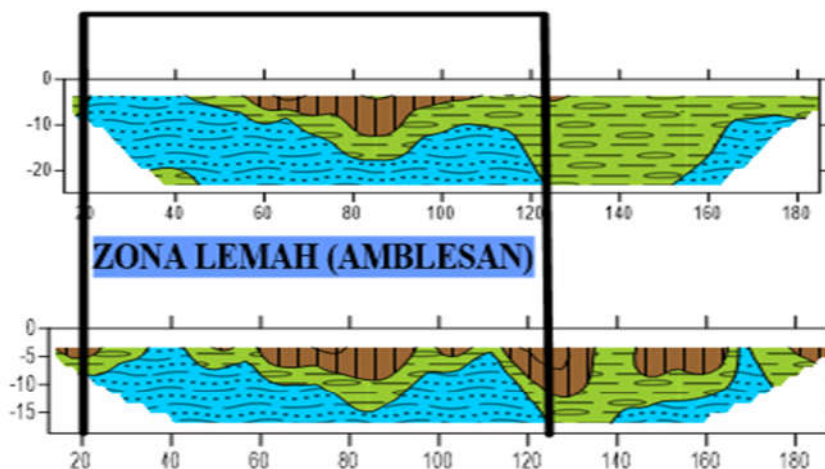


Gambar 9. Penampang litologi batuan bawah permukaan hasil interpretasi data resistivitas 2D pada Lintasan WA-02.

Gambar 9 merupakan korelasi antara Lintasan WA-01 dan Lintasan WA-02 yaitu lintasan yang sejajar dengan jalan raya di daerah penelitian. Hasil interpretasi menunjukkan adanya tiga lapisan batuan yang terdiri atas batugamping pada bagian atas, batu napal gampingan pada bagian tengah, dan batupasir berbutir halus hingga sedang di bagian bawah. Berdasarkan hasil korelasi penampang litologi batuan bawah permukaan, keberadaan zona lemah di kawasan Jalan Raya Ajibarang-Gumelar Kecamatan Ajibarang Kabupaten Banyumas dapat diidentifikasi dengan mudah. Lemahnya zona tersebut diduga akibat kontribusi dari struktur yang terbentuk dari tiga lapisan batuan tersebut, dimana batupasir sebagai faktor pengontrol utama. Lapisan batupasir diperkirakan tidak mampu menahan perubahan struktur lapisan di atasnya akibat gaya berat yang menghasilkan tekanan dari kendaraan yang melewati jalan raya tersebut [15]. Berdasarkan **Gambar 10**, zona lemah yang berpotensi mengalami amblesan diperkirakan berada pada titik pengukuran ± (20

–125) meter atau berada pada titik BMS Km 39,6 – 39,7; namun potensi amblesannya dapat melebar. Zona lemah itu sejajar dengan zona amblesan yang telah terjadi di atas permukaan jalan raya tersebut.

Berdasarkan hasil interpretasi data resistivitas dan korelasi penampang litologi Lintasan WA-01 dan Lintasan WA-02, terdapat dua faktor utama yang menjadi penyebab amblesan. Faktor pertama adalah tidak terdapat batuan keras misalnya batuan beku yang berfungsi untuk menyangga badan jalan. Faktor kedua adalah adanya gaya berat dari kendaraan besar yang sering melintas di jalan tersebut sehingga menyebabkan permukaan jalan raya mengalami tekanan besar. Kondisi ini mengakibatkan struktur batuan bawah permukaan berubah sehingga memicu terjadinya pergerakan tanah. Hal ini juga diperkuat oleh peta kerentanan pergerakan tanah di kawasan Kabupaten Banyumas, bahwa kawasan ini merupakan zona kerentanan pergerakan tanah menengah [16].



Gambar 10. Hasil korelasi penampang litologi batuan bawah permukaan pada Lintasan WA-01 dan Lintasan WA-02.

KESIMPULAN

Penelitian geolistrik resistivitas menggunakan konfigurasi Wenner telah dilakukan di jalan utama Ajibarang – Gumelar, Kecamatan Ajibarang, Kabupaten Banyumas. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi struktur batuan bawah permukaan khususnya zona lemah (amblesan). Akuisisi data resistivitas telah dilakukan pada dua lintasan; yaitu Lintasan WA-01 dan Lintasan WA-02 dengan panjang masing-masing 200 meter. Hasil akuisisi data telah menghasilkan data-data resistivitas semu untuk masing-masing lintasan. Selanjutnya pemodelan secara inversi terhadap data resistivitas semu menghasilkan penampang resistivitas batuan bawah permukaan secara 2D. Adapun interpretasi terhadap model penampang resistivitas telah menghasilkan penampang litologi daerah penelitian.

Penampang litologi masing-masing lintasan menunjukkan adanya tiga lapisan batuan yang terdiri atas batupasir berbutir halus hingga sedang dengan nilai resistivitas 2,37 – 6,56 Ωm , batunapal gampingan dengan nilai resistivitas 6,32 – 12,60 Ωm , dan batugamping dengan nilai resistivitas 12,10 – 24,30 Ωm . Berdasarkan analisis terhadap penampang litologi yang diperoleh, zona lemah atau amblesan di kawasan ini terletak pada titik pengukuran $\pm(140-180)$ meter. Zona lemah tersebut diduga merupakan kontribusi dari model struktur batuan yang terbentuk dari tiga lapisan itu. Namun demikian, kontribusi yang dominan diduga berasal dari batugamping dan batupasir berbutir halus hingga sedang yang bersifat lunak dan tidak kompak.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada Kepala Laboratorium Elektronika, Instrumentasi, dan Geofisika Fakultas MIPA UNSOED atas peralatan Resistivitymeter dan komponen pendukungnya yang disediakan. Terimakasih juga disampaikan kepada tim akuisisi data di lapangan yang telah bekerja dengan keras dalam kegiatan akuisisi data resistivitas konfigurasi Wenner di kawasan Desa Kasegeran, Kecamatan Cilongok, Kabupaten Banyumas.

PUSTAKA

- [1] Soedarsono, Analisis Amblesan Tanah Akibat Pembebanan Pada Akuifer Bebas dan Pengaruhnya Terhadap Lingkungan di Sebagian Kota Semarang, *Jurnal Pondasi* 12 (1) (2006) 76-85.
- [2] Y. Ramadhani, Penyebab Tanah Ambles: Penambangan Hingga Eksploitasi Air Tanah. *Website/Blog*. Tersedia pada: <https://tirto.id/penyebab-tanah-ambles-penambangan-hingga-eksploitasi-air-tanah-dcgK>. Diakses tanggal 23 Maret 2020, 2018.
- [3] Radar Banyumas, Rusak, Jalur Ajibarang-Gumelar Rawan Kecelakaan (Online). *Website/Blog*, Tersedia pada: <https://radarbanyumas.co.id/rusak-jalur-ajibarang-gumelar-rawan-kecelakaan/>. Diakses tanggal 23 Maret 2020, 2018.
- [4] A.A. Akinlalu, A. Adegbuyiro, and A.A. Obore, Application of Electrical Resistivity Method in Designing a Structural Model for a Proposed Filling Station Site, Akure, Southwestern Nigeria, *Global Journal of Science Frontier Research: A Physics and Space Science*, 16(6) version 1.0 (2016).
- [5] N.U. Ugwu, R.T. Ranganai, R.E. Simon, and G. Ogubazghi, Application of Geoelectrical Resistivity Method to the Assessment of Groundwater Pollution: A case Study of Onibu-Eja Active Open Dumpsite, Osogbo, Southwestern Nigeria, *International Journal of Environmental Protection*, 6(1) (2016) 160 – 174.
- [6] D. Santoso, Pengantar Teknik Geofisika. Bandung: Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung (ITB), 2002.
- [7] W.M. Telford, L.P. Gedaart, and R.E. Sheriff, *Applied Geophysics* 2nd Ed. New York, Cambridge University, 1990
- [8] H. R. Burger, *Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface*, New York, WW Norton, 2006
- [9] Sehad, S.A. Raharjo, F. Destiani, Interpretation of 2D-Subsurface Resistivity Data in The Iron Ore Prospect Area of Eastern Binangun Coastal, Regency of Cilacap, Central Jawa. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology (JGEET)* 3(4) (2018) 213 – 220.
- [10] Sehad, S.A. Raharjo, M. Vickramdani, Karakteristik Akuifer di Kawasan Prospek Bijih Besi Pesisir Desa Karang-tawang Kecamatan Nusawungu Kabupaten

- Cilacap Berdasarkan Data Resistivitas 2D, *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY* 16(3) (2018) 195 – 204.
- [11] M.H. Loke, *Electrical Imaging Surveys For Environmental and Engineering Studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, 2000.
- [12] M. Djuri, H. Samodra, dan S. Gafoer, *Peta Geologi Lembar Purwokerto – Tegal Jawa; Skala 1:100,000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (P3G). Bandung, 1996.
- [13] A.P. Putra, E.W.D. Hastuti, A., Abro, *Studi Potensi Sumberdaya Batu Gamping sebagai Bahan Baku Pembuatan Semen di Kecamatan Buay Sandang Aji Kabupaten Ogan Komering Ulu Selatan*, *Jurnal Pertambangan (JP)* 1 (3) (2017).
- [14] E, Aditya, dan D.D. Warnana, *Analisa Pengaruh Kadar Air Terhadap Sifat Resistivitas dan Konduktivitas Batu Kapur Daerah Gresik Jawa Timur*, *Jurnal Fisika Batuan* 1(1) (2013) 1 – 5.
- [15] S. Makmur, Sehad, Sugito, *Analisis Zona Lemah (Amblesan) Di Kawasan Jalan Raya Gunung Tugel Kabupaten Banyumas Berdasarkan Survei Geolistrik Konfigurasi Wenner*, *Techno* 17(2) (2016) 111 – 121.
- [16] Anonim, -. *Peta Zona Kerentanan dan Gerakan Tanah Kabupaten Banyumas*. Galeri Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG). Website/Blog. Tersedia di <https://vsi.esdm.go.id/gallery/picture.php?/142/category/16> Diakses tanggal 24 Maret 2020.

Analisis struktur morfologi membran kitosan/peo dan kitosan/PEG4000

Kartika Sari^{1*}, Sunardi¹, Agung Bambang Setio Utomo², Edi Suharyadi², Evvy Kartini³, Evi Yulianti³

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Jenderal Soedirman Purwokerto 53123

²Departemen Fisika, FMIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta 55281

³PSTBM Batan Tenaga Atom Nasioal, Serpong 15314

*email: kartika.sari@unsoed.ac.id

Abstrak – Pembuatan dan pengujian membran kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 dilakukan bertujuan untuk membandingkan struktur morfologi dan gugus fungsi yang dihasilkan dari membran kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000. Pembuatan membran Kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 dilakukan dengan metode solution casting. Karakterisasi dilakukan menggunakan FTIR (Fourier Transform Infra Red) dan SEM (Scanning Electron Microscopy). Hasil FTIR membran kitosan, kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 menunjukkan adanya interaksi gugus fungsi –OH dan C-H di dalam membran kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000. Bilangan gelombang 1500 – 945 cm^{-1} terbentuk ikatan bending antara gugus fungsi C-C dan –NH₃. Hasil SEM menunjukkan terbentuk aglomerasi dengan bertambahnya PEO dan PEG4000 pada larutan. Aglomerasi terjadi homogen di permukaan membran menunjukkan adanya pengaruh penambahan PEO dan PEG4000 pada pembentukan membran sehingga menghasilkan ikatan antar atom yang semakin renggang/tidak stabil. Hasil membran kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 dapat digunakan sebagai polimer elektrolit padat.

Kata Kunci : Gugus fungsi, aglomerasi, kitosan, PEO, PEG4000.

PENDAHULUAN

Penggunaan kitosan dikembangkan karena sifat kitosan yang merupakan suatu biopolimer organik memiliki sifat non-toksik, *biodegradable* dan hidrofilik. Kitosan terdiri dari gugus fungsi amina dan hidroksil [1-3]. Sintesis kitosan diperoleh dari cangkang hewan seperti udang, kepiting dan lobster [4]. Kitosan semakin menarik dikembangkan karena ukuran partikelnya dapat dibuat nano dan luas permukaannya kecil sehingga mudah untuk dimodifikasi dengan material kimia lainnya [5-9].

Material kimia yang banyak digunakan untuk modifikasi kitosan adalah PEO (*Polietilen Oksida*) dan PEG (*Polietilen Glikol*) [10]. Dalam penelitian ini digunakan PEG4000. PEO dan PEG4000 berbentuk serbuk, memiliki sifat dapat larut dalam air dan methanol (hidrofilik). Hal yang menarik digunakan PEO dan PEG4000 adalah fungsi dari PEO dan PEG4000 untuk mengontrol ukuran dan struktur pori membran. PEO dan PEG4000 merupakan polimer dari etilen oksida yang memiliki perbedaan pada massa molekulnya [11].

Membran merupakan daerah tipis antara dua fase yang memiliki lintasan tertentu sehingga memungkinkan fase atau komponen tertentu menembus lebih cepat

dibandingkan dengan fase atau komponen lainnya di bawah pengaruh gaya penggerak (*driving force*) [12]. Sintesis membran yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan mencampurkan kitosan dengan PEO dan PEG4000 kemudian diuji menggunakan FTIR dan SEM. Dari hasil FTIR dan SEM memberikan informasi bahwa membran kitosan/PEO atau kitosan/PEG4000 dapat digunakan sebagai polimer elektrolit padat.

METODE PENELITIAN

a. Bahan dan alat yang digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kitosan, asam asetat (Merck), PEO dan PEG4000 (Sigma-Aldrich). Sedangkan alat yang digunakan adalah neraca Ohaus Galaxy TM 160, hot plate stirrer Thermo scientific model Cimarec 2, mikrometer skrup, desikator vacuum 200 mm Vitlab, cawan petri dan gelas ukur.

b. Prosedur penelitian

Pembuatan larutan kitosan dengan menimbang kitosan sebanyak 1 gram kemudian kitosan dituangkan ke dalam gelas ukur yang berisi larutan asam asetat sebanyak 100 ml kemudian diaduk dengan menggunakan

magnetik stirrer dengan variasi kecepatan dan suhu selama 15 menit. Tambahkan sedikit demi sedikit PEO atau PEG4000 ke dalam larutan kitosan 1% sambil distirrer sampai habis selama 1 jam hingga larutan kitosan/PEO atau kitosan/PEG4000 homogen. Larutan kitosan/PEO dan kitosan/PEG 4000 dicetak ke dalam cawan petri dan dikeringkan pada suhu 60 °C selama 2 hari menggunakan *dried box*. Membran yang sudah kering dan siap dilakukan pengujian.

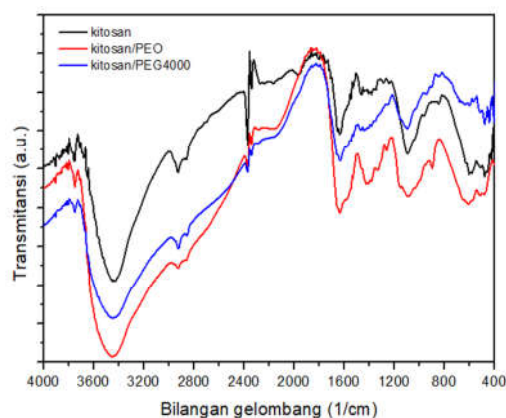
c. Karakterisasi membran kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000

Spektra FTIR membran kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 diperoleh dengan menggunakan Shimadzu 8201 PC FTIR spektrofotometer dan direkam dengan resolusi 1 cm^{-1} dengan rentang bilangan gelombang dari 400 hingga 4000 cm^{-1} untuk menentukan gugus fungsi. Struktur mikro dan distribusi grain size menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) tipe JEOL, JSM-6510LA dengan pembesaran 1000x pada suhu kamar. Sampel dilapisi dengan emas menggunakan arus listrik, $I = 60 \text{ mA}$ selama 100 detik. Prosedur ini dilakukan untuk mendapatkan kualitas gambar yang lebih baik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. FTIR membran kitosan, kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000

Hasil FTIR membran kitosan dapat dilihat pada Gambar 1. Membran kitosan daerah serapan terjadi pada bilangan gelombang 2000 – 1000 cm^{-1} . Daerah serapan juga terjadi pada bilangan gelombang 1701 cm^{-1} yang menunjukkan gugus fungsi C=O asimetri dan pada 1430 cm^{-1} terjadi gugus fungsi C=O simetri dari kitosan. Daerah bilangan gelombang 2301 cm^{-1} gugus fungsi C-OH bending. Daerah bilangan gelombang 1651 – 600 cm^{-1} menunjukkan gugus fungsi C=O, sedangkan daerah bilangan gelombang 3000 - 2500 cm^{-1} terbentuk gugus C-H bending. Puncak 3500 cm^{-1} membentuk gugus fungsi O-H bending.



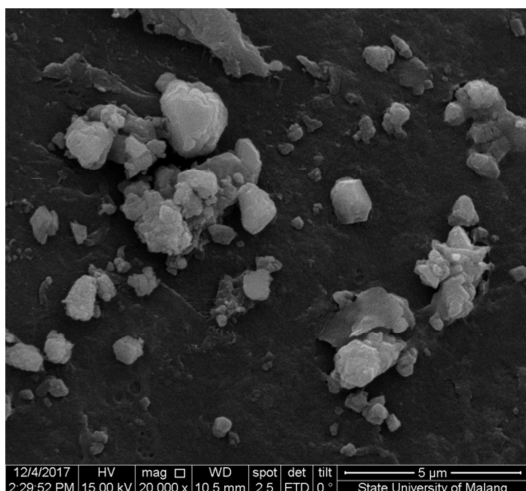
Gambar 1. FTIR membran kitosan, kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000

Membran kitosan/PEO menunjukkan gugus fungsi O-H terjadi pada bilangan gelombang 3449 cm^{-1} . Gugus fungsi C-H (stretching) terjadi pada bilangan gelombang 2924 cm^{-1} dan pada bilangan gelombang 2237 cm^{-1} terjadi C-H bending. Untuk daerah gelombang 1636 cm^{-1} terjadi gugus fungsi C=O. Sedangkan daerah gelombang 1096 cm^{-1} terjadi gugus fungsi C-O dan NH_3 . Daerah gelombang 964 – 841 cm^{-1} menunjukkan gugus fungsi C-O-C dan 602 – 478 cm^{-1} merupakan gugus fungsi C-C.

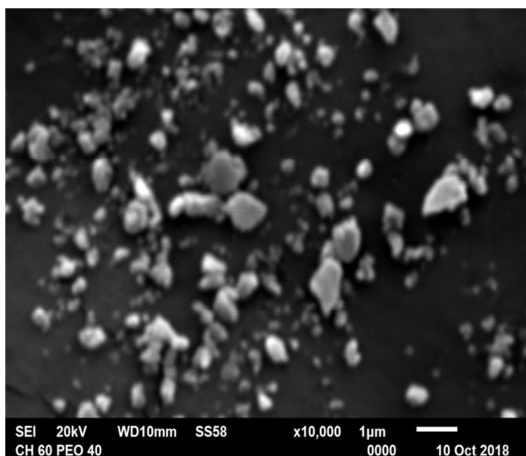
Hasil FTIR membran kitosan/PEG4000 menunjukkan bahwa gugus fungsi –OH terjadi pada daerah bilangan gelombang 3448 cm^{-1} . Daerah bilangan gelombang 2924 cm^{-1} menunjukkan terbentuknya gugus fungsi C-H. Sedangkan pada daerah bilangan 2855 – 2338 cm^{-1} terbentuk gugus fungsi C-H stretching. Gugus fungsi C-O dan NH_3 terbentuk pada daerah bilangan 1635 cm^{-1} . Daerah bilangan gelombang 1096 cm^{-1} dan 478 cm^{-1} terbentuk ikatan C-O dan ikatan C-C.

b. SEM

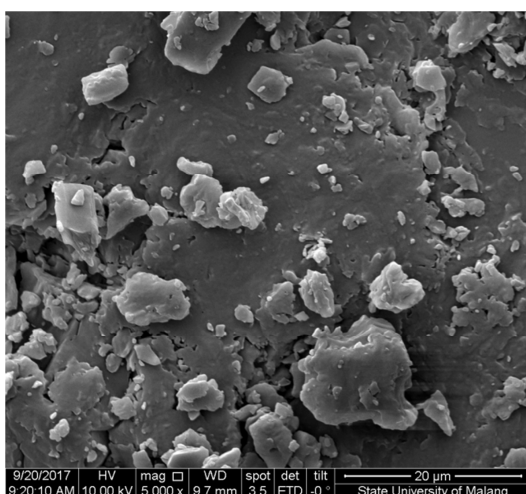
Hasil SEM membran kitosan, kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 dapat dilihat pada Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 2. Membran kitosan



Gambar 3. Membran kitosan/PEO



Gambar 4. Membran kitosan/PEG4000

Gambar 2, 3, dan 4 menunjukkan struktur morfologi permukaan terdiri dari distribusi butiran menyebar homogen dan aglomerasi antara molekul-molekul penyusun kitosan, PEO

dan PEG4000 serta cenderung berpori. Ukuran butiran penyusun membran kitosan adalah 15,1 nm, kitosan/PEO adalah 11,30 nm dan kitosan/PEG4000 adalah 10,35 nm.

Perubahan struktur permukaan membran disebabkan masuknya ion $-NH_3$ ke dalam pori-pori yang bisa memudahkan kontak antar partikel dalam membran. Kontak antar partikel tersebut akan menyebabkan membran lebih fleksibel, stabil ukuran, dimensi dan memiliki kation atau anion bebas bergerak yang akan berfungsi sebagai pembawa muatan serta tidak bersifat higroskopis. Membran yang dihasilkan lebih tipis, tidak kaku dan tidak akan berubah bentuk serta tidak mudah menyerap air.

Membran yang memiliki sifat tersebut dapat digunakan sebagai elektrolit padat. Jadi dapat disimpulkan bahwa kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 dapat digunakan sebagai polimer elektrolit padat untuk aplikasi baterai sekunder.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Terjadi pembentukan gugus fungsi baru $-OH$ pada kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 pada panjang gelombang 3500 cm^{-1} dan terjadi interaksi ikatan bending antara $-OH$ dan NH_3 pada panjang gelombang $1500 - 945\text{ cm}^{-1}$.
2. Kitosan/PEO dan kitosan PEG4000 menghasilkan membran lebih fleksibel dan tidak bersifat higroskopis.
3. Kitosan/PEO dan kitosan/PEG4000 dapat digunakan sebagai bahan alternatif sebagai membran polimer elektrolit padat baterai sekunder.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Kementerian Ristek/BRIN melalui Universitas Jenderal Soedirman melalui pendanaan BLU Skim Riset Peningkatan Kompetensi Tahun 2020.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. G. Abdullah, R. R. Hanna, Y. A. K. Salman, "Structural, optical, and electrical characterization of chitosan: methylcellulose polymer blends based film," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 28(14) (2017) 10283–10294.

- [2] S.Kartika, BSU. Agung, A. Abraha, Roto, K. Evvy, Y. Evi, S. Edi., IJENeM 13(1) (2020) 1-8. .
- [3] A. Badawi, E. M. Ahmed, N. Y. Mostafa, F. Abdel-Wahab, S. E. Alomairy, "Enhancement of the optical and mechanical properties of chitosan using Fe₂O₃ nanoparticles," J. Mater. Sci. Mater. Electron. 28(15) (2017) 10877–10884.
- [4] S. Kartika, S. Edi, Roto, A. Kamsul, Material Science Forum 948 (2018) 192-197..
- [5] W. Zhang, J. Zhang, W. Xia, "Effect of ball-milling treatment on physicochemical and structural properties of chitosan," Int. J. Food Prop. 17(1) (2014) 26–37.
- [6] Rochima, E., Azhary, S.Y., Prata, R.I., Panatarani, C., Joni, I.M, "Preparation and characterization of nano chitosan from crab shell waste by beads milling method", International conference on Food Science and Engineering (2016) 193.
- [7] Liu, T.Y., Ma, Y., Yu, S.F., Shi, J., Xue, S., "The effect of ball milling treatment on structure and porosity of maize starch granule", Innovative Food Science and Emerging Technologies (2011) 586-593.
- [8] Zhan, W., Zhang, J., Xia, W. "Effect of ball milling treatment on physicochemical and structural properties of chitosan", International Journal of Food Properties (2014) 26-37.
- [9] Ker, W.L., Ward, SDW., McWatters, KH., Resurreccion, AVA., Effect of milling and particle size on functionality and physicochemical properties of cowpea flour, American Association of Cereal Chemists Inc. Publication no. C-2000-0212-02R. (2000).
- [10] M. Barchuk et al., "Structure and surface properties of chitosan/PEO/gelatin nanofibrous membrane," J. Polym. Res. 23 (2) (2016) 1–7.
- [11] A. Datta, Characterization of Polyethylene Glycol Hydrogels for Biomedical Applications, Thesis, University of Pune, India, (2007).
- [12] M. Mulder, *Basic Principles of Membran Technology*, Khewer Academic Publisher. (1991).
- [13] Shukur. MF., Ithnin. R., Kadir. MFZ, Proton Conducting polymer electrolyte based on plasticitized chitosan/PEO blend and application in electrochemical devices. Optical Materials 5 (2013) 1834-1841.

Analisis tegangan keluaran generator listrik frekuensi rendah dengan metode conjugate-gradient

Jamrud Aminuddin

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

Abstrak- Analisis numerik terhadap tegangan keluaran generator listrik berdasarkan persamaan induksi elektromagnetik telah dilakukan dengan metode conjugate-gradient. Parameter fisis yang digunakan sebagai input merupakan angka-angka hasil eksperimen dari referensi tentang generator listrik frekuensi rendah, yaitu: magnet permanen, luas penampang, dan sudut antara medan magnet dan momen magnet. Parameter yang dijadikan fungsi target dalam metode conjugate-gradient adalah jumlah lilitan pada solenoid dan tegangan keluaran yang dibangkitkan melalui energi mekanik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tingkat kesalahan dengan metode ini sekitar 5%. Secara keseluruhan, analisis numerik ini menunjukkan bahwa tegangan keluaran dapat diseimbangkan melalui pengaturan jumlah solenoid dan kecepatan putaran generator

Kata Kunci: conjugate-gradient, generator, induksi, solenoid, tegangan

Abstract – – The numerical analysis of the output voltage of the electric generators based on the electromagnetic induction equation has been carried out using the conjugate-gradient method. The physical parameters used as constant numbers are from the experimental results of the electric generator with lower frequency, i.e.: the permanent magnet, cross-sectional area, and the angle between the magnetic field and the magnetic moment. The other parameters considered in the conjugate gradient-method are the number of coils of the solenoid and the output voltage which is generated from the kinetic energy. The results of the calculation show that the error rate of the method is approximately 5%. Overall, this numerical analysis shows that the output voltage can be balanced through the adjustment of the number of coils of the solenoid and the rotational speed of the generator.

Key words: conjugate-gradient, generator, induction, solenoid, voltage

PENDAHULUAN

Generator listrik merupakan alat untuk mengubah energi kinetik dalam bentuk putaran menjadi energi listrik. Generator paling sering digunakan untuk berbagai jenis sistem pembangkit, seperti: tenaga air, tenaga panas bumi, tenaga uap dan tenaga angin, serta tenaga gelombang laut [1,2]. Pada prinsipnya tidak semua energi kinetik yang bersumber dari alam memiliki kecepatan putaran yang tinggi untuk membangkitkan listrik. Sebagian energi tersebut hanya mampu memutar poros generator dengan kecepatan rendah. Generator yang mampu membangkitkan listrik dengan kecepatan putaran yang rendah dikenal dengan istilah generator listrik frekuensi rendah [3,4].

Ada dua buah jenis generator yang biasa digunakan, yaitu generator sinkron dan asinkron. Generator sinkron merupakan generator dengan kecepatan putar rotor sama dengan kecepatan medan putar stator seperti generator medan magnet permanen. Sedangkan

generator asinkron memiliki kecepatan putar rotor yang berbeda dengan kecepatan putar medan stator seperti generator induksi. Generator induksi banyak digunakan pada pembangkit listrik skala kecil karena harganya yang lebih murah, tidak membutuhkan sikat, konstruksinya yang sederhana, serta mudah dan murah perawatannya [5,6].

Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang terjadi pada solenoid yang digerakkan pada magnet. Sebaliknya sebuah magnet yang digerakkan pada solenoid juga menimbulkan induksi elektromagnetik [2,7]. Dimensi kumparan dan besarnya medan magnet pada sebuah generator serta besarnya kecepatan pergerakan di antara keduanya dapat dibuat bervariasi berdasarkan kebutuhan daya listrik yang diinginkan [3]. Fenomena tersebut memerlukan analisis yang tepat untuk menghasilkan sebuah generator yang efektif dan efisien dalam menghasilkan arus listrik [8-10]. Metode yang selama ini dikembangkan dalam perancangan generator

listrik adalah eksperimen. Untuk itu, dalam studi ini dikembangkan sebuah metode komputasi untuk menentukan dimensi generator sebelum eksperimen dilakukan.

Salah satu metode yang memungkinkan untuk menentukan beberapa parameter fisis terkait dengan optimasi kinerja generator adalah metode *conjugate-gradient*. Metode *conjugate-gradient* merupakan prosedur yang digunakan untuk menemukan minimum lokal dari fungsi yang terdiferensialkan. Metode *conjugate-gradient* juga dapat digunakan untuk mencari solusi numerik dari suatu persamaan linier tertentu yang matriksnya simetris dan definit positif. Metode ini bersifat iteratif sehingga dapat diaplikasikan pada sistem persamaan diferensial [11-13].

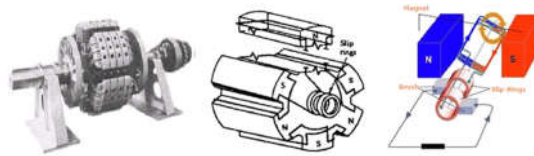
Berdasarkan uraian di atas maka dalam tulisan ini dilakukan analisis tegangan keluaran generator listrik frekuensi rendah untuk menghasilkan arus listrik. Metode yang digunakan merupakan pengembangan referensi [1] dan [3]. Metode untuk menganalisis dimensi kumparan dan besarnya medan magnet pada sebuah generator serta besarnya kecepatan pergerakan di antara keduanya akan dianalisis dengan metode *conjugate-gradient* [11-14].

METODE

Analisis gaya gerak listrik dari sebuah generator dilakukan melalui tiga tahapan utama. Ketiga tahapan tersebut adalah: perumusan persamaan gaya gerak listrik, penyusunan algoritma beserta realisasinya dalam bahasa pemrograman, dan perhitungan beserta analisisnya. Perumusan persamaan yang terkait dengan generator listrik dimulai dari prinsip induksi elektromagnetik, kemudian dihubungkan dengan perubahan fluks magnetik dikenal dengan Hukum Faraday [2,7]. Persamaan gaya gerak listrik (GGL) selanjutnya dianalisis dengan menggunakan metode *conjugate-gradient* [11-14]. Metode ini diimplementasikan dalam bahasa pemrograman Matlab [14,15]. Analisis dilakukan terhadap banyaknya solenoid, kecepatan sudut putaran, dan tegangan keluaran generator [3].

Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang dapat terjadi jika sebuah kumparan digerakkan pada sebuah magnet. Dapat juga terjadi sebaliknya, sebuah magnet yang digerakkan terhadap solenoid. Solenoid merupakan kumparan kawat yang berbentuk silinder yang jarak antar lilitannya sangat rapat. Kedua benda tersebut dapat

menghasilkan induksi elektromagnetik atau gaya gerak listrik induksi [2,7]. Bentuk dasar penampang generator diperlihatkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Penampang generator [7]

Hubungan antara gaya gerak listrik (GGL) induksi dengan perubahan fluks magnetik dikenal dengan Hukum Faraday. Menurut percobaan Faraday, jika fluks magnetik yang melalui suatu rangkaian diubah dengan cara apapun, maka GGL induksi akan sama besar dengan laju perubahan fluks yang diinduksikan dalam rangkaian. Fluks ini dapat dihasilkan dari medan magnet dalam bentuk simpal arus. Hukum Faraday menyatakan bahwa tegangan elektrik imbas ϵ di dalam sebuah rangkaian sama dengan kecepatan fluks yang melalui rangkaian tersebut. Jika kecepatan perubahan fluks dinyatakan di dalam Weber per detik ($W \cdot s^{-1}$), maka tegangan gerak elektrik ϵ akan dinyatakan dalam Volt (V). Besarnya GGL (*electromagnetic force*) induksi dapat dinyatakan sebagai perubahan fluks magnetik ϕ_B dalam selang waktu (t):

$$\epsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \tag{1}$$

Tanda negatif menunjukkan arah tegangan gerak elektrik imbas yang merupakan kontribusi dari Hukum Lenz, dengan tegangan gerak elektrik akan melawan perubahan yang diterima simpal. Jika persamaan (1) dikenakan pada sebuah solenoid dengan N lilitan, maka sebuah tegangan gerak elektrik akan muncul dalam setiap lilitan. Sehingga semua tegangan gerak elektrik dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\epsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d(N\phi_B)}{dt} \tag{2}$$

dengan $N\phi_B$ menyatakan nilai tautan fluks (*fluks linkages*) di dalam solenoid, N adalah jumlah lilitan dan ϕ_B menyatakan fluks magnetik. Jika $\phi_B = N\phi_B$, maka persamaan (2) dapat ditulis dalam bentuk:

$$\epsilon = -\frac{d(NBA)}{dt} = -NB \frac{dA}{dt} \tag{3}$$

Jika N dan B konstan terhadap waktu, sedangkan A luas penampang yang berubah terhadap sudut, dan sudut berubah terhadap waktu, maka persamaan (3) dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\varepsilon = -NB \frac{dA}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \tag{4}$$

Jika $\vec{B} \cdot \vec{A} = |\vec{B}| \cdot |\vec{A}| \cos \theta$, maka persamaan (4) menjadi

$$\varepsilon = NBA \omega \sin \theta, \tag{5}$$

dengan θ adalah besarnya sudut antara medan magnet dan momen magnet, dan ω adalah kecepatan sudut. Persamaan (5) menunjukkan GGL induksi yang ditimbulkan dapat diperbesar dengan memperbanyak jumlah lilitan pada solenoid, menggunakan magnet yang lebih kuat, dan mempercepat putaran generator listrik [1,2,7].

Berdasarkan persamaan (5), penentuan jumlah lilitan solenoid, besarnya kecepatan radial, sudut medan magnet, dan magnet permanent dilakukan dengan metode *conjugate-gradient*. Metode tersebut adalah sebuah algoritma untuk mencari solusi numerik sistem persamaan linier yang matriksnya simetris dan definit positif. Metode ini bersifat *iteratif*, sehingga dapat diaplikasikan pada sistem yang sedikit kompleks jika diselesaikan dengan metode langsung. Secara matematis metode ini dimulai dengan sebuah pemahaman

$$\min \{f(x) : x \in R^n\} \tag{6}$$

di mana $f : R^n \rightarrow R$ adalah fungsi yang *differentiable* dan terbatas. Untuk menyelesaikan masalah ini, dimulai dengan memberikan nilai awal $x_0 \in R^n$, sebuah metode *non linear conjugate gradient*, membangun barisan $\{x_k\}$ berdasarkan rumus:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \tag{7}$$

dengan $\alpha_k > 0$ diperoleh dengan metode *line search* dan d_k dibangun dari:

$$d_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k s_k \quad ; \quad d_0 = -g_0 \tag{8}$$

dengan β_k adalah parameter *conjugate-gradient*, $s_k = x_{k+1} - x_k$ dan $g_k = \nabla f(x_k)$ [11-14].

Penamaan parameter yang terkait dengan persamaan (5) dalam metode *conjugate gradient*, dimulai dari asumsi bahwa optimasi akan dilakukan terhadap nilai tegangan keluaran

(ε) sebagai fungsi dari jumlah lilitan (N) dan kecepatan radial (ω),

$$\varepsilon(N, \omega) = NBA \omega \sin \theta. \tag{9}$$

Dari persamaan (9), maka diketahui fungsi target dalam bentuk:

$$\partial_N \varepsilon(N, \omega) = BA \omega \sin \theta, \tag{10}$$

dan

$$\partial_\omega \varepsilon(N, \omega) = NBA \sin \theta. \tag{11}$$

Parameter lainnya yang merupakan fungsi yang berpengaruh terhadap besarnya gaya-gerak listrik pada persamaan (5) dianggap sebagai konstanta hitungan numerik. Pada prinsipnya semua variabel dapat dijadikan sebagai fungsi target, tetapi setelah mempertimbangkan faktor teknis, maka parameter lainnya dianggap konstan dalam proses perhitungan dengan metode *conjugate-gradient*. Parameter fisis yang dianggap konstan dalam prosedur ini adalah B (medan magnet), A (luas penampang) dan θ (sudut antara medan magnet dan momen magnet).

Prosedur lengkap dengan metode *conjugate-gradient* terhadap persamaan (5) untuk menganalisis beberapa parameter fisis yang terkait dengan generator listrik adalah:

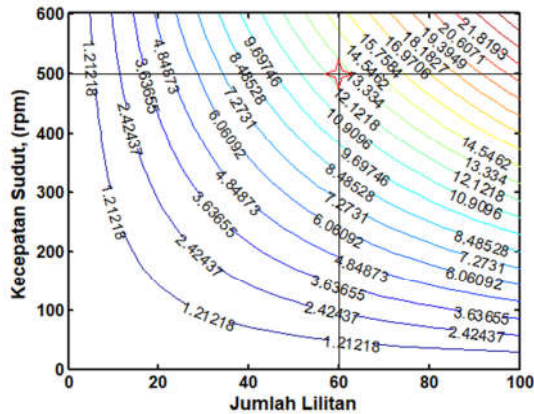
0. Menentukan parameter yang dianggap konstan (B , A , dan θ), nilai awal perhitungan ($N_0, \omega_0, \alpha_0^N, \alpha_0^\omega, \delta_0^N, \delta_0^\omega, G_0 \equiv G_0^{N,\omega}, d_0^N, d_0^\omega$), dan melakukan estimasi awal terhadap nilai ε_0 , setelah itu prosedur berikut dilakukan sampai iterasi ke- n :
1. $N_n = N_{n-1} + \alpha_{n-1}^\omega d_{n-1}^\omega$ dan $\omega_n = \omega_{n-1} + \alpha_{n-1}^N d_{n-1}^N$
2. $G_n^{N,\omega} = [\partial_N \varepsilon(N, \omega) \quad \partial_\omega \varepsilon(N, \omega)]$
3. $\beta_n^{N,\omega} = \frac{G_n^T G_n}{G_{n-1}^T G_{n-1}}$ (Superscript T \equiv transpose matriks)
4. $\delta_n^N = N_n - N_{n-1}$ dan $\delta_n^\omega = \omega_n - \omega_{n-1}$
5. $d_n^N = -G_n^N + \beta_n \delta_n^N$ dan $d_n^\omega = -G_n^\omega + \beta_n \delta_n^\omega$
6. $\alpha_n^N = \alpha_{n-1}^N \frac{\left[\frac{d_{n-1}^N}{d_n^N} \right]}{\left[\frac{d_{n-1}^N}{d_n^N} \right]}$ dan $\alpha_n^\omega = \alpha_{n-1}^\omega \frac{\left[\frac{d_{n-1}^\omega}{d_n^\omega} \right]}{\left[\frac{d_{n-1}^\omega}{d_n^\omega} \right]}$
7. $d_n^N = -G_n^N + \beta_n \delta_n^N$ dan $d_n^\omega = -G_n^\omega + \beta_n \delta_n^\omega$
8. Nilai GGL pada iterasi ke- n :
 $\varepsilon_n(N, \omega) = N_n B A \omega_n \sin \theta$

$$9. \text{ Error: } \eta_n = \left| \frac{\epsilon_n - \epsilon_{n-1}}{\epsilon_{n-1}} \right| \times 100\% .$$

Prosedur tersebut diimplementasikan dalam pemrograman Matlab [14,15]. Hasil yang ditargetkan adalah tegangan keluaran optimum dengan jumlah lilitan dan kecepatan putaran yang bervariasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Gambar 2 diperlihatkan hasil estimasi dengan metode *conjugate-gradient*. Parameter fisis yang digunakan sebagai bilangan konstan merupakan pengujian angka-angka hasil eksperimen dari referensi. Pada referensi tersebut, digunakan magnet permanen (*B*) sebesar 1,0833 Tesla ($\approx 0,0002$ Weber), luas penampang (*A*) sebesar 2 cm², dan sudut antara medan magnet dan momen magnet (θ) sebesar 45°. Jumlah lilitan sebanyak 63 dengan tegangan keluaran sebesar ≈ 12 Volt yang dibangkitkan dengan kecepatan putaran 500 rpm (*revolution per minute*) [2,3,9]. Jumlah lilitan berdasarkan perhitungan komputasi berada pada angka yang hampir sama dengan eksperimen pada referensi [2,3,9], yaitu pada kisaran 60.



Gambar 2. Hasil perhitungan tegangan keluaran dengan metode *conjugate-gradient*. Garis kontur menunjukkan besarnya tegangan keluaran (Volt) berdasarkan jumlah lilitan dan kecepatan angular generator listrik.

Tegangan keluaran dengan fungsi target berupa kecepatan putaran (ω) pada angka 500 rpm menunjukkan angka antara 12-13 Volt. Hasil ini menunjukkan bahwa hasil metode *conjugate-gradient* dengan menggunakan angka-angka hasil eksperimen menunjukkan akurasi sekitar 95%. Untuk itu pada perhitungan selanjutnya dilakukan variasi terhadap

parameter konstan dengan asumsi bahwa tegangan keluaran berdasarkan metode *conjugate-gradient* dikoreksi sebesar $\pm 5\%$. Waktu yang digunakan untuk perhitungan dalam Matlab sangat singkat karena menggunakan parameter angka yang kecil.

Tabel 1. Pengaruh magnet permanen terhadap tegangan keluaran

Magnet permanen (Weber)	Tegangan keluaran (Volt)
0,0001	6,0609
0,0002	12,1218
0,0003	18,1827
0,0004	24,2437
0,0005	30,3046
0,0006	36,3655
0,0007	42,4264
0,0008	48,4873
0,0009	54,5482

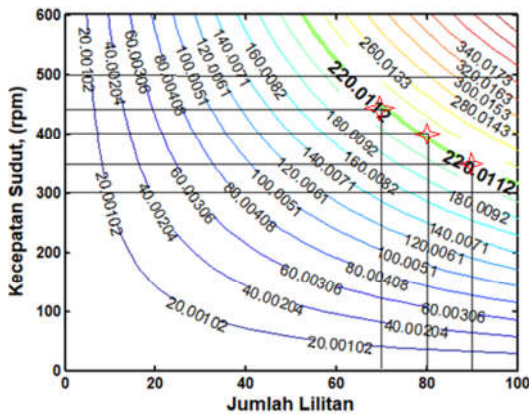
Tabel 1 merupakan pengembangan hasil perhitungan dengan metode *conjugate-gradient*. Parameter yang dijadikan standar pada Gambar 2 adalah kecepatan putaran pada angka 500 rpm dan jumlah lilitan pada angka 60 dengan tegangan keluaran yang terbaca pada garis kontur sebesar 10,1015 Volt. Bilangan konstan yang divariasikan pada bagian ini adalah magnet permanen, sedangkan parameter lainnya dibuat tetap. Nilai parameter konstan yang tidak divariasikan dalam perhitungan ini adalah luas penampang (*A*) sebesar 2 cm², dan sudut antara medan magnet dan momen magnet (θ) sebesar 45°. Kedua nilai tersebut diambil dari hasil eksperimen pada referensi [2,3,9]. Hasil estimasi dengan metode *conjugate-gradient* menunjukkan bahwa pengaruh magnet permanen yang ditingkatkan setiap 0,0001 Weber mampu meningkatkan tegangan keluaran generator listrik sebesar 5 Volt.

Tabel 2. Pengaruh luas penampang terhadap tegangan keluaran

Luas penampang (cm ²)	Tegangan keluaran (Volt)
1,5	10,1015
2,0	12,1218
2,5	14,1421
3,0	16,1624
3,5	18,1827
4,0	20,2031
4,5	22,2234
5,0	24,2437

Tabel 2 merupakan pengembangan metode perhitungan pada Tabel 1 dengan parameter

standar yang sama. Parameter yang divariasikan adalah luas penampang generator (A). Nilai parameter konstan yang tidak divariasikan dalam perhitungan ini adalah magnet permanen (B) sebesar 0,0002 Weber, dan sudut antara medan magnet dan momen magnet (θ) sebesar 45° . Parameter konstan tersebut merupakan nilai yang diperoleh dari hasil eksperimen untuk generator frekuensi rendah. Parameter yang tidak pernah divariasikan secara eksperimen adalah θ sebesar 45° [8,9]. Nilai tersebut digunakan untuk menganalisis parameter yang ideal untuk menghasilkan tegangan keluaran pada angka ≈ 12 Volt. Pada Tabel 1, angka yang mendekati adalah 12,1218 Volt dengan magnet permanen 0,0002 Weber sehingga nilai tersebut digunakan pada bagian ini. Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada magnet permanen 0,0002 Weber dengan peningkatan luas penampang $0,5 \text{ cm}^2$ akan meningkatkan tegangan keluaran generator sebesar ≈ 2 Volt.



Gambar 3. Hasil perhitungan teoretis tegangan keluaran generator dengan target 220 Volt (diperlihatkan pada garis kontur). Ada tiga keadaan untuk mendapatkan nilai yang ditargetkan antara jumlah lilitan dan kecepatan.

Gambar 3 merupakan hasil estimasi rancangan generator listrik dengan daya keluaran 220 Volt. Tegangan tersebut dipilih dengan asumsi bahwa tegangan yang umum digunakan di Indonesia adalah 220 Volt [3]. Parameter fisis yang digunakan sebagai bilangan konstan merupakan pengujian secara teoretis berdasarkan kecenderungan hasil pada Tabel 1 dan 2. Fungsi target berupa jumlah lilitan dan kecepatan putaran seperti pada Gambar 3 dihasilkan melalui pengujian beberapa bilangan konstan dengan prosedur yang sama seperti pada Gambar 2. Pada pengujian ini digunakan luas penampang

generator sebesar 10 cm dan magnet permanen 0,0009 Weber. Dengan menggunakan prinsip eksperimen maka sudut antara medan magnet dan momen magnet tidak divariasikan tetapi menggunakan angka yang umum digunakan dalam pembuatan generator, yaitu sebesar 45° [8,9]. Hasil estimasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa tegangan 220 Volt diperoleh pada kecepatan antara 300-450 rpm dengan jumlah lilitan antara 70-90.

Hasil ini juga memberi petunjuk bahwa untuk mendapatkan nilai tegangan yang ditargetkan, maka perlu dilakukan analisis keseimbangan antara kecepatan putaran dan jumlah lilitan [6,8,10]. Metode ini hanya merupakan alat bantu dalam proses pembuatan generator listrik. Dalam eksperimen dibutuhkan beberapa koreksi untuk memastikan tegangan keluaran generator listrik. Metode ini juga dapat diaplikasikan dengan mengubah fungsi target dan parameter konstan [11,13]. Berdasarkan nilai-nilai yang digunakan sebagai input yang tidak lain adalah hasil eksperimen dengan akurasi sekitar 95%, maka metode ini sangat direkomendasikan untuk kajian optimasi lainnya.

KESIMPULAN

Analisis parameter yang berpengaruh pada kinerja generator listrik telah dilakukan secara teoretis dengan metode numerik. Perumusan dimulai dengan meninjau Hukum Faraday dan Hukum Lenz tentang gaya gerak listrik (GGL) akibat induksi elektromagnetik. Dari perumusan tersebut diperoleh persamaan tegangan keluaran generator listrik sebagai fungsi dari medan magnet, luas permukaan generator, kecepatan putaran, sudut antara medan magnet dan momen magnet, dan jumlah lilitan solenoid. Dari persamaan tersebut, ditetapkan dua buah fungsi target untuk menganalisis tegangan keluaran generator listrik dengan metode *conjugate-gradient*, yaitu kecepatan putaran dan jumlah lilitan. Fungsi lainnya dianggap sebagai parameter konstan. Parameter konstan tersebut juga divariasikan untuk mengetahui efeknya terhadap tegangan keluaran dari generator listrik.

Pengujian metode ini dilakukan dengan menggunakan data-data eksperimen yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang diperoleh melalui pengukuran secara langsung. Hasil estimasi dengan metode *conjugate-gradient* menunjukkan bahwa metode ini sangat

akurat dengan tingkat kesalahan hanya 5%. Selanjutnya inovasi baru yang dilakukan dalam analisis numerik ini adalah estimasi keseimbangan antara jumlah lilitan dan kecepatan putaran generator dengan target keluaran disesuaikan dengan tegangan untuk instrument listrik yang umumnya digunakan di Indonesia, yaitu 220 Volt. Hasil estimasi terakhir menunjukkan bahwa untuk mencapai nilai yang ditargetkan diperlukan peningkatan jumlah lilitan untuk menekan energi untuk memutar generator listrik.

Metode *conjugate-gradient* yang telah diterapkan hanya merupakan alat bantu dalam proses pembuatan generator listrik. Dalam eksperimen dibutuhkan beberapa koreksi untuk memastikan tegangan keluaran generator listrik. Parameter yang digunakan untuk hasil yang terakhir belum mempunyai angka pembandingan berdasarkan hasil eksperimen. Untuk itu sangat disarankan agar hasil ini dapat diimplementasikan dengan membuat *prototype* generator berdasarkan hasil perhitungan teoretis yang diperoleh dalam analisis ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ilmiah ini merupakan bagian dari kegiatan penelitian hibah bersaing dengan sumber dana Dikti, nomor kontrak: DIPA-023.04.2.189899/2014. Untuk itu saya ucapkan terima kasih atas dukungan dana dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga saya ucapkan kepada rekan-rekan yang tidak bisa disebutkan semuanya dalam ruang sempit ini, atas diskusinya yang sangat bermanfaat.

PUSTAKA

- [1] G.A. Caxaria, D.M. Sousa, and H.M. Ramos, Small Scale Hydropower: generator analysis and optimization for water supply systems, *World Renewable Energy Congress 2011 Sweden*, 8-13 May Lingskoping-Sweden, (2011) 1386-1393.
- [2] P. Irasari, D. Hidayati, dan Nurafni, Analisis Prototipe Generator Kecepatan Rendah Untuk Pembangkit Listrik Skala Kecil, *Majalah Teknologi Indonesia*, 29(1) (2006) 47-51.
- [3] P. Irasari, A.S. Nugraha, dan M. Kasim, *Analisis Getaran pada Generator Magnet Permanen 1 Kw Hasil Rancang Bangun Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik*, *Journal of Mechatronics, Electrical Power, & Vehicular Technology* 1(1) (2010) 19-26.
- [4] M.E.A. Farrag, and G.A. Putrus, *Analysis of the Dynamic Performance of Self-Excited Induction Generators Employed in Renewable Energy Generation*, *Energies* 7 (2014) 278- 294.
- [5] A. Gupta, and S. Wadhvani, *Analysis of Self-Excited Induction Generator for Isolated System*, *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)* 2(2) (2012) 353 –358.
- [6] M. Hadziselimovic, I. Zagradsnik, and B. Stumberger, *Induction Machine: Comparison of Motor and Generator Characteristics*, *Acta Technica Jaurinensis* 6(1) (2013) 39-47.
- [7] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd Edition, John Wiley and Sons, USA, 1998
- [8] M. Senthilkumar, *Optimal Capacitor for Maximum Output Power Tracking of Self Excited Induction Generator Using Fuzzy Logic Approach*, *International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE)* 2(5) (2010) 1758-1762.
- [9] K. Thakur, *A Reliable and Accurate Calculation of Excitation Capacitance Value for an Induction Generator Based on Interval Computation Technique*, *International Journal of Automation and Computing* 8(4) (2011) 429 – 436.
- [10] G.K. Shilpa, and P.F. Dias, *Stability of Voltage Using Different Control Strategies in Isolated Self Excited Induction Generator for Variable Speed Applications*, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJEET)* 4(3) (2013) 2366 – 2370.
- [11] S. Sanmatias, and E.A. Vercher, *Generalized Conjugate Gradient Algorithm*, *Journal of Optimization Theory and Applications* 98 (1998) 489–502.

- [12] Z. Wei, G. Li, and L. Qi, *New Nonlinear Conjugate Gradient Formulas for Large-scale Unconstrained Optimization Problems*, Applied Mathematics and Computation 179(2) (2006) 407-430.
- [13] I. Abdullahi, and R. Ahmad, *Global Convergence Analysis of a New Hybrid Conjugate Gradient Method for Unconstrained Optimization Problems*, Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences 2(13) (2017) 40-48.
- [14] G. Liendfield, and J. Penny, *Numerical Methods using MATLAB*. Ellis Horwood Limited. New York, 1995.
- [15] J. Aminuddin, *Dasar-Dasar Fisika Komputasi Menggunakan MATLAB*, Edisi Pertama. Gava Media. Yogyakarta, 2008.

