

DAFTAR ISI

Pengembangan sensor seismik berbasis MEMS accelerometer.....	149
Amalia C. Nur'aidha, Didik R. Santoso, Sukir Maryanto	
Pemisahan anomali regional-residual data gayabarat daerah Karangsambung Jawa Tengah menggunakan metode <i>tren surface analysis</i>	156
Ledia Damayanti, Oktaviana, Ahmad Al Farizi, Ilham Dani, dan Syamsurijal Resimeng	
Perubahan kalor jenis campuran bahan mortar dengan penambahan pasir besi	161
Hartono, Sugito dan Farzand Abdullatif	
Pengamatan makroskopik dan mikroskopik membran melalui pengukuran konduktansi dan kapasitansi listrik dalam larutan elektrolit	165
Kiagus Dahlan	
Estimasi dosis serap sel kanker nasofaring dan lidah dari perlakuan radioterapi konvensional cobalt-60 berbasis MCNPX	171
Wihantoro, Aris Haryadi, Bilalodin dan Arif Hidayat	

Pengembangan sensor seismik berbasis MEMS accelerometer

Amalia C. Nur'aidha^{*1}, Didik R. Santoso², Sukir Maryanto²

¹ Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta

² FMIPA, Universitas Brawijaya

Jl. IKIP PGRI I No.117, Kab. Bantul – D.I Yogyakarta

Jl. Veteran, Malang – Jawa Timur

*email: amalia@upy.ac.id

Abstrak - Sensor seismik merupakan komponen utama dalam bidang seismologi. Salah satu sensor seismik yang sering digunakan geofon, namun geofon memiliki kekurangan dalam mendeteksi getaran frekuensi rendah di bawah 10Hz. Dengan adanya kekurangan tersebut menjadi salah satu peluang bagi sensor MEMS yang memiliki rentang frekuensi lebih lebar dibandingkan dengan geofon. Pada penelitian ini sensor MEMS terkonfigurasi dengan pengkondisi sinyal yang telah dilengkapi dengan rangkaian integrator. Fungsi dari rangkaian integrator ini untuk mengubah MEMS Percepatan menjadi MEMS Kecepatan. Sehingga MEMS mampu mendeteksi kecepatan gerakan tanah menyerupai geofon. Hasil respon sinyal MEMS menunjukkan bahwa MEMS Kecepatan mampu mendeteksi getaran frekuensi 0.01Hz hingga 100Hz. Berdasarkan hasil respon frekuensi menunjukkan bahwa MEMS mampu digunakan sebagai sensor seismik.

Kata kunci: Sensor Seismik, MEMS, Accelerometer

Abstract – All Seismic sensors are the main component in seismology. One of the seismic sensors that are geophones, but geophones have a weakness below 10Hz. That is a MEMS sensor opportunity because MEMS has a wide frequency range than geophones. In this study, the MEMS sensor configured with a signal conditioning system that has equipped with an integrator. The function of this integrator is to convert MEMS Acceleration to MEMS Velocity. So MEMS can detect the velocity ground motion like a geophone. The result MEMS frequency signal response shows MEMS that supported with a frequency of 0.01 Hz to 100 Hz. Based on the results of the frequency response shows that MEMS has the capability as a seismic sensor.

Key words: Seismic Sensor, MEMS, Accelerometer

PENDAHULUAN

Sensor getaran untuk deteksi seismik (sensor seismik) merupakan komponen utama dalam bidang seismologi, seperti pemantauan bencana alam dan inspeksi geofisika untuk sumber daya mineral [1][2][3]. Sensor tersebut mampu mengirimkan getaran tanah yang muncul ke dalam sinyal listrik [4][5]. Beberapa sensor seismik telah dikembangkan dalam berbagai prinsip yang dapat diklasifikasikan menjadi accelerometer piezoelektrik, mikro piezoresistive, elektromagnetik, mikro kapasitansi, sensor arus eddy, serat optik, dan pendulum [6][7][5].

Salah satu sensor seismik yang sering digunakan saat ini adalah geofon dengan mengaplikasikan prinsip elektromagnetik. Sensor ini telah menjadi sensor standar yang digunakan dalam pencitraan seismik. Sensor tersebut merupakan sensor pasif yang terdiri dari kumparan yang dipasangkan dengan pegas lunak yang bergerak relatif terhadap magnet

tetap [8]. Geofon bekerja mengukur kecepatan dengan menghasilkan tegangan pada kumparan yang bergerak bebas dalam medan magnet [9].

Geofon memiliki respon sekitar 10Hz, apabila terdapat frekuensi di bawah 10Hz maka respon dari geofon akan berkurang 12dB per decade [9][10]. Geofon tipe SM-24 memiliki bentuk yang sangat sederhana dengan ukuran sensor ~3cm dan berat ±75g [11]. Tipe sensor tersebut memiliki ground noise yang relatif rendah namun sensor tersebut memiliki kekurangan yaitu, rentang frekuensi linearnya terbatas di atas frekuensi alaminya, biasanya 4-12Hz [12].

Saat ini pada bidang seismologi sangat dibutuhkan sensor yang memiliki biaya yang rendah serta dilengkapi kemampuan frekuensi yang lebar [1]. Dari berbagai sensor seismik yang telah dikembangkan, pendekatan accelerometer menghasilkan hasil yang cukup baik ketika dilakukan pengukuran getaran pada frekuensi yang rendah pada bidang seismologi [6]. Salah satu sensor yang dapat dikembangkan

dengan pendekatan accelerometer adalah sensor MEMS.

Saat ini telah terdapat trend baru dalam bidang industri untuk menggantikan geofon dengan MEMS [8]. MEMS tersebut memiliki kelebihan yang dapat menghasilkan broadband (0 hingga 800Hz), nilai noise yang lebih rendah (kurang lebih -10dB) [13] serta konsumsi daya yang rendah [14][15]. Jika dibandingkan dengan geofon sensor MEMS memiliki sensitivitas lebih tinggi, baik untuk frekuensi rendah maupun frekuensi tinggi [13]. Bandwidth MEMS ini lebih lebar jika dibandingkan dengan geofon yaitu, 10-100Hz. MEMS bekerja di bawah frekuensi resonansi percepatan, sedangkan geofon bekerja di atas frekuensi resonansi kecepatan. Cakupan frekuensi MEMS tersebut mampu merekam getaran pada frekuensi rendah menjadi sangat penting, khususnya untuk pemantauan seismik [16]. Berdasarkan hal tersebut maka pada penelitian ini akan dilakukan pengembangan sensor seismik menggunakan MEMS percepatan.

METODE PENELITIAN

MEMS percepatan termasuk dalam klasifikasi sensor kapasitif, salah satu tipe sensor ini adalah MMA7361L. MMA7361L berbentuk chip IC yang dibuat oleh Freescale Semikonduktor (Gambar 1). Sensor tersebut dilengkapi beberapa kelebihan yaitu, energi yang digunakan sangat rendah, memiliki 2 sensitivitas (1.5g dan 6g) yang dapat di atur sesuai dengan kebutuhan dengan kemampuan maksimal sensitivitas 800mV/g @1.5g serta memiliki 3 komponen penginderaan (x,y, dan z) [13].



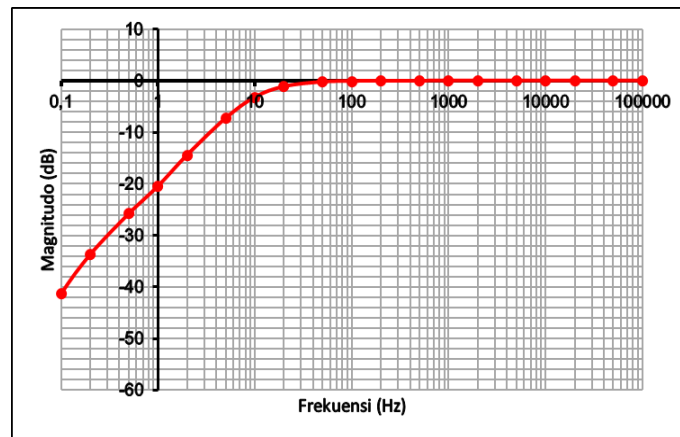
Gambar 1. Sensor MEMS Percepatan MMA7361L

Sensor MEMS tidak dapat digunakan secara langsung sebagai sensor seismik. Sensor tersebut memerlukan rangkaian tambahan (Sistem Akuisisi Data). Blok diagram (Gambar 2) merupakan desain sistem akuisisi data untuk melengkapi sensor MEMS supaya dapat digunakan sebagai sensor seismik. Sensor MEMS akan menangkap sinyal yang berasal dari sumber getar (Gerakan tanah). Keluaran dari sensor MEMS (pada pin *output*) akan diolah di dalam pengkondisi sinyal dan pemroses sinyal, sehingga dapat di tampilkan pada media penampil.

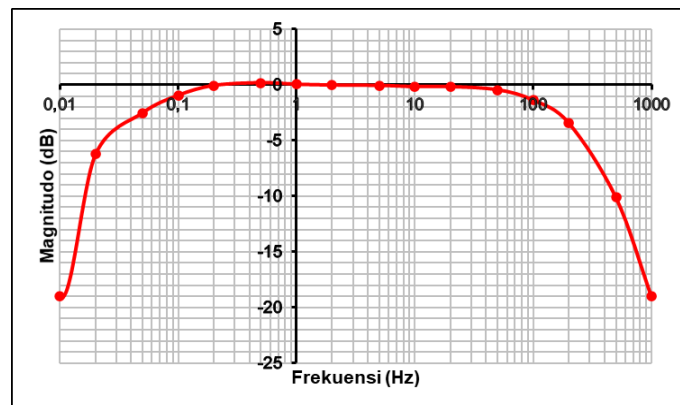
Tahap awal yang dilakukan yaitu melakukan simulasi terlebih dahulu menggunakan *software circuit maker* untuk mengetahui respon frekuensi dari sensor geofon sebagai sensor yang telah sering digunakan dalam bidang seismologi (Gambar 3). Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa geofon memiliki respon frekuensi di atas 10Hz dan tidak mampu merespon frekuensi di bawah 10Hz. Ketidakmampuan geofon ini dikarenakan sistem kerja geofon adalah meloloskan frekuensi tinggi dengan menerapkan *High Pass* untuk mengurangi *noise* yang ada disekitar sensor. Sehingga apabila akan melakukan perluasan respon ke frekuensi yang lebih rendah tidak dapat dilakukan. Dengan adanya kekurangan tersebut menjadi salah satu peluang bagi sensor MEMS yang memiliki rentang frekuensi yang lebih lebar. Gambar 4 menampilkan respon frekuensi dari sensor MEMS. Berdasarkan gambar tersebut, tampak respon frekuensi sensor MEMS mulai dari 0.01Hz hingga 100Hz.



Gambar 2. Diagram Blok Desain Akuisisi Data

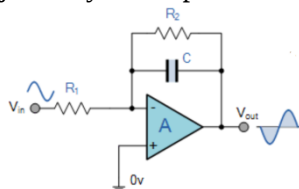


Gambar 3. Respon Frekuensi Geofon



Gambar 4. Respon Frekuensi MEMS MMA7361L

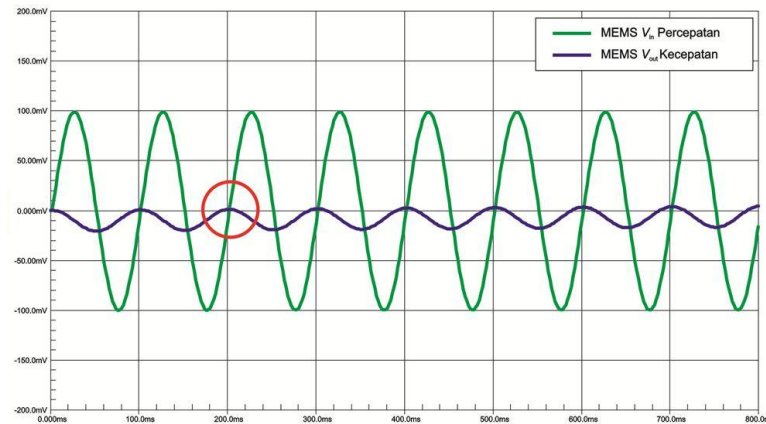
Sensor MEMS pada dasarnya bekerja mendeteksi percepatan dari gerakan tanah. Pada penelitian ini keluaran dari sensor MEMS yang berupa percepatan akan di ubah menjadi kecepatan di dalam proses pengkondisi sinyal. Proses perubahan ini dilakukan supaya sensor MEMS serupa dengan geofon yang berkerja mendeteksi kecepatan gerakan tanah. Rangkaian pengkondisi sinyal ini dilengkapi dengan rangkaian integrator yang dilengkapi kombinasi nilai $R_1 = 15k$, $R_2 = 330k$, dan $C = 1\mu$ (Gambar 5) yang berfungsi mengubah sinyal percepatan MEMS menjadi sinyal kecepatan.



Gambar 5. Rangkaian Integrator

Sebelum menerapkan sensor MEMS beserta pengkondisi sinyalnya dilakukan terlebih dahulu tahap pengujian menggunakan simulasi. Hasil simulasi keluaran pengkondisi sinyal yang dilengkapi dengan integrator ditunjukkan oleh gambar 6. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan oleh *software* tampak pada gambar, sinyal masukan yang berupa sinyal percepatan yang ditandai dengan sinyal sinus (garis hijau) terdapat perubahan pada sinyal keluaran berupa kecepatan yang ditandai dengan adanya perubahan sinyal menjadi cosinus (garis biru).

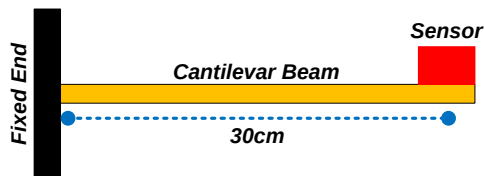
Berdasarkan dari hasil simulasi yang telah dilakukan, maka pada penelitian ini akan dilakukan pengembangan sensor MEMS sebagai sensor seismik.



Gambar 6. Hasil Simulasi Masukan dan Keluaran Sinyal pada Pengkondisi Sinyal

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi dari metode yang telah dipaparkan sebelumnya yaitu melakukan pengujian dalam skala laboratorium dengan menggunakan *cantilever beam* (Gambar 7) untuk melihat respon frekuensi dari MEMS serta membandingkan dengan geofon SM-24.

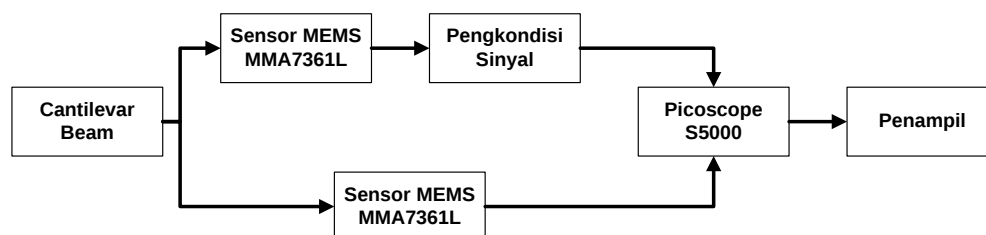


Gambar 7. Pengujian Sensor menggunakan *Cantilever Beam*

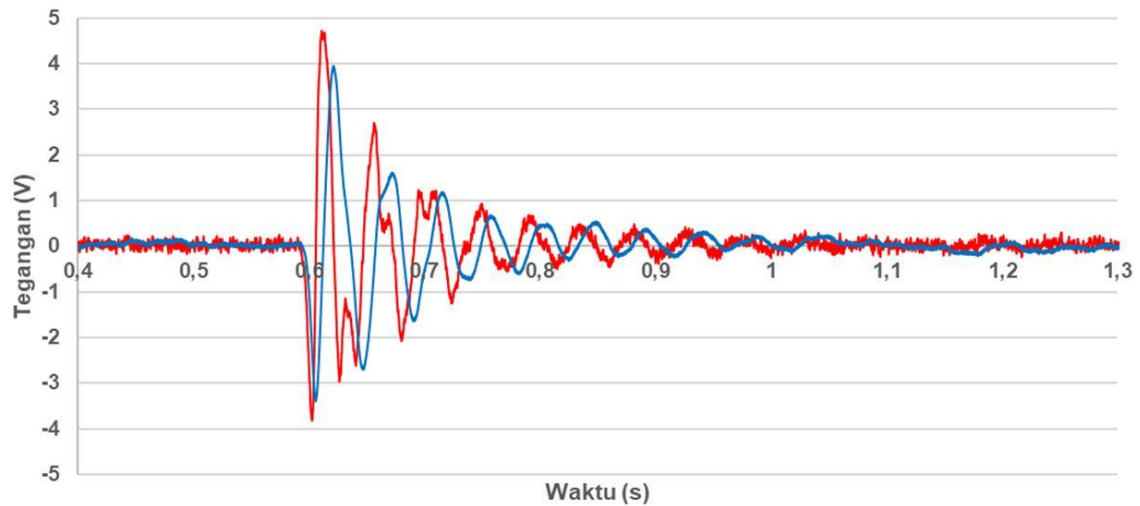
Tahap pertama pengujian yaitu, menguji sensor MEMS tanpa pengkondisi sinyal tambahan dengan sensor MEMS yang telah dilengkapi dengan pengkondisi sinyal. Gambar 8 menyajikan konfigurasi tahap pertama untuk

membandingkan sensor MEMS tanpa pengkondisi sinyal tambahan (MEMS Percepatan) dengan sensor MEMS yang telah dilengkapi dengan pengkondisi sinyal (MEMS Kecepatan).

Hasil pengujian tahap pertama disajikan pada gambar 9. Tampak hasil pengujian kedua sensor MEMS masih memiliki respon frekuensi yang sama, namun terdapat perbedaan. Dapat dilihat untuk sensor MEMS Percepatan memiliki *noise* yang cukup besar sedangkan untuk MEMS Kecepatan *noise* yang terdeteksi telah berkurang. Hal ini disebabkan karena pada pengkondisi sinyal telah dilengkapi fungsi untuk mengurangi *noise* disekitar sensor. Setelah melakukan pengujian tahap pertama, dilakukan pengujian tahap selanjutnya yaitu melakukan proses uji untuk MEMS Kecepatan dengan Geofon SM-24. Konfigurasi pengujian ini disajikan pada gambar 10.



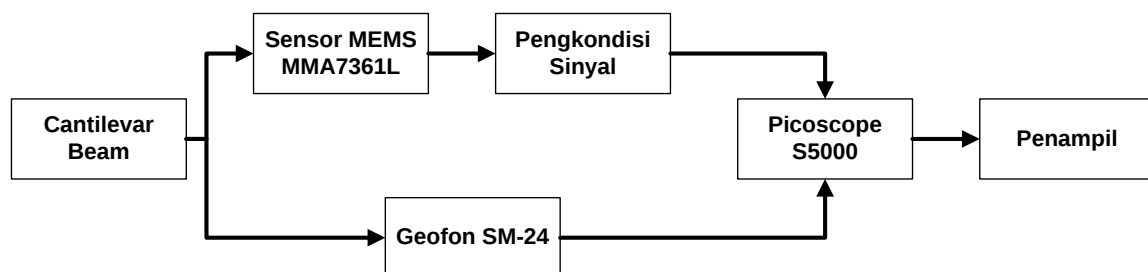
Gambar 8. Konfigurasi Pengujian MEMS Accelerometer dengan MEMS Velocity



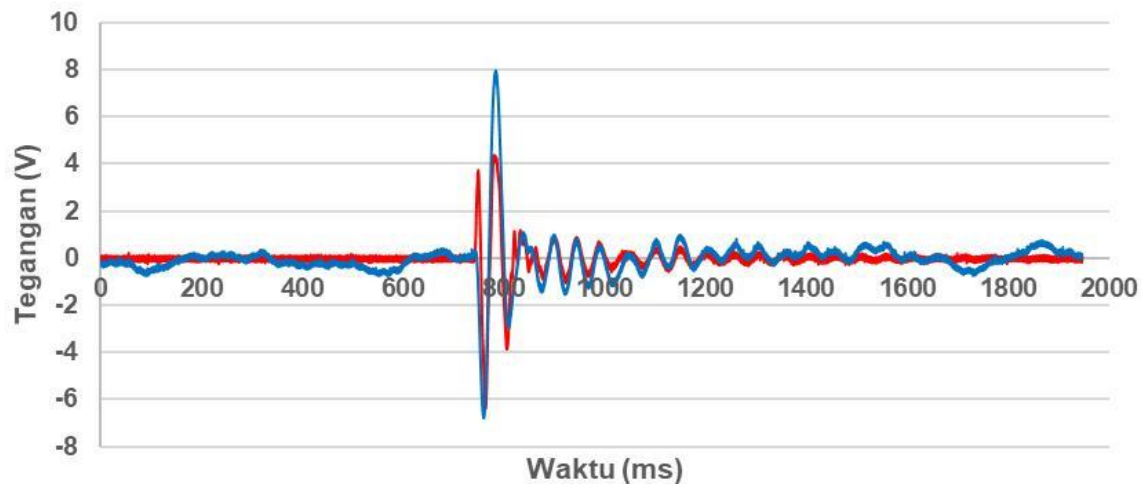
Gambar 9. Hasil Pengujian MEMS Accelerometer (Merah) dengan MEMS Velocity (Biru)

Hasil respon sinyal MEMS kecepatan dengan Geofon SM-24 tampak pada gambar 11. Garis berwarna biru merupakan sinyal yang dihasilkan oleh geofon dan garis berwarna merah adalah sinyal yang dihasilkan oleh MEMS. Pengujian respon sinyal dilakukan dengan memberikan getaran frekuensi tinggi dan frekuensi rendah. Gambar 11a merupakan hasil respon sinyal untuk frekuensi tinggi, dapat dilihat pada frekuensi tinggi baik MEMS maupun Geofon memiliki nilai amplitudo yang sama. Hal ini dapat dikatakan bahwa pada

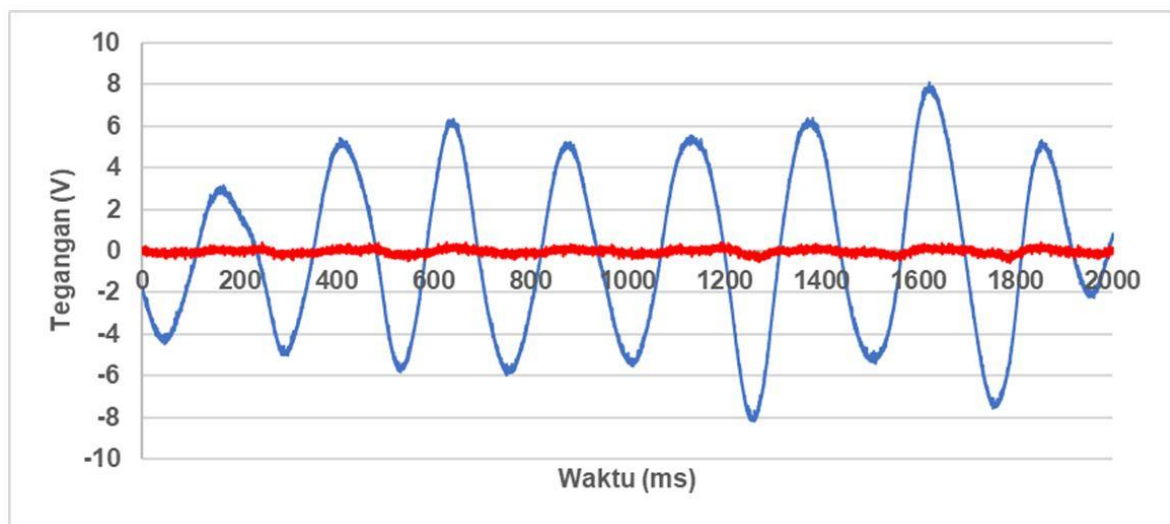
getaran frekuensi tinggi MEMS dapat mendeteksi getaran dengan baik dan sebanding dengan geofon. Sedangkan untuk hasil respon sinyal getaran frekuensi rendah disajikan pada gambar 11b, dapat dilihat pada gambar bahwa MEMS memiliki nilai amplitudo yang lebih besar jika dibandingkan dengan geofon. Hal ini disebabkan karena geofon tidak mampu mendeteksi frekuensi rendah di bawah 10Hz, sedangkan MEMS mampu mendeteksi getaran frekuensi rendah mulai dari 0.01Hz.



Gambar 10. Konfigurasi Pengujian MEMS dengan Geofon



(a)



(b)

Gambar 11. (a) Hasil Pengujian Frekuensi Tinggi MEMS (Biru) dengan Geofon (Merah), (b) Hasil Pengujian Frekuensi Rendah MEMS (Biru) dengan Geofon (Merah)

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan sensor MEMS sebagai sensor seismik. Sensor yang digunakan adalah sensor MEMS MMA7361L dilengkapi dengan pengkondisi sinyal. Dimana pengkondisi sinyal ini dilengkapi dengan rangkaian integrator yang berfungsi merubah percepatan menjadi kecepatan. Sehingga sensor MEMS mampu mendeteksi kecepatan gerakan tanah. Sensor tersebut mampu mendeteksi getaran dengan rentang frekuensi 0.01Hz hingga 100Hz. Dengan demikian sensor MEMS dapat dikatakan telah mampu digunakan sebagai sensor seismik yang mampu mendeteksi getaran frekuensi rendah hingga frekuensi tinggi

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua anggota Laboratorium Riset Measurement, Circuit and System, Universitas Brawijaya dan rekan-rekan Tim yang telah membantu mengimplementasikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Deng, D. Y. Chen, J. B. Wang, J. Chen, W. T. He, and Y. J. Fan, A MEMS based electrochemical seismic sensor, 2013 Transducers Eurosensors XXVII 17th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators

- Microsystems, TRANSDUCERS EUROSENSORS 2013, June (2013) 920–923, doi: 0.1109/Transducers.2013.6626918
- [2] T. Deng, D. Chen, J. Wang, J. Chen, and W. He, A MEMS Based Electrochemical Vibration Sensor for Seismic Motion Monitoring, *J. Microelectromechanical Syst.*, 23(1) (2014) 92–99.
- [3] T. Deng, D. Chen, J. Chen, Z. Sun, G. Li, and J. Wang, “Microelectromechanical Systems-Based Electrochemical Seismic Sensors with Insulating Spacers Integrated Electrodes for Planetary Exploration”, *IEEE Sens. J.*, 16(3) (2016) 650–653, doi: 10.1109/JSEN.2015.2491783.
- [4] G. Li et al., “A MEMS based seismic sensor using the electrochemical approach,” *Procedia Eng.*, 47 (2012) 362–365, doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.158.
- [5] D. Chen et al., “Sensors and Actuators A : Physical A micro electrochemical seismic sensor based on MEMS technologies,” *Sensors Actuators A. Phys.*, 202 (2013) 85–89, doi: 10.1016/j.sna.2012.12.041.
- [6] C. T. Chiang, “Design of a CMOS MEMS Accelerometer Used in IoT Devices for Seismic Detection,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, 8(3) (2018) 566–577, doi: 10.1109/JETCAS.2018.2825604.
- [7] M. Pandit, C. Zhao, G. Sobrevela, X. Zou, and A. A. Seshia, Seismic Recording Using A Mode Localized Mems Accelerometer, Nanoscience Center, Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge , UK MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurement & Hubei Key Laboratory of Gravitation a,” 2019 20th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS EUROSENSORS XXXIII), June (2019) 2150–2153,.
- [8] D. J. Milligan, B. D. Hom, and R. G. Walmsley, “An Ultra-Low Noise MEMS Accelerometer for Seismic Imaging,” *IEEE Sens. J.*, (2011) 8–11, doi: 10.1109/ICSENS.2011.6127185.
- [9] N. Hakimitoroghi, R. Raut, M. Mirshafiei, and A. Bagchi, “Compensation techniques for geophone response used as vibration sensor in seismic applications,” *Proc. Int. Conf. Sens. Technol. ICST*, 2017 (2018) 1–5, doi: 10.1109/ICSensT.2017.8304423.
- [10] R. G. Walmsley and P. G. Hartwell, “Hewlett packard’s seismic grade mems accelerometer,” *IEEE Sens. J.*, (2011) 585–588,.
- [11] J. Laine and D. Mougenot, “Benefits Of MEMS Based Seismic Accelerometers For Oil Exploration,” in *Transducers & Eurosensors*, (2007) 1473–1477.
- [12] R. Brincker, B. Bolton, A. Brandt, B. Allé, and D.-O. M., “Calibration and Processing of Geophone Signals for Structural Vibration Measurements,” in *Experimental Mechanics*, (2010) 1–5.
- [13] J. Lainé and D. Mougenot, “A high-sensitivity MEMS-based accelerometer,” *Lead. EDGE*, November (2014) 1234–1242.
- [14] R. Levy, G. Papin, O. Le Traon, D. Janiaud, and J. Guerard, A high resolution vibrating beam accelerometer working in nonlinear region for seismic ground sensor application, DTIP 2014 - Symp. Des. Test, Integr. Packag. MEMS/MOEMS, April (2014) 4–6, doi: 10.1109/DTIP.2014.7056683.
- [15] F. A. Levinzon, “Ultra-low-noise seismic piezoelectric accelerometer with integral FET amplifier,” *IEEE Sens. J.*, 12(6) (2012) 2262–2268, doi: 10.1109/JSEN.2012.2186564.
- [16] T. Aizawa, T. Kimura, T. Matsuoka, T. Takeda, and Y. Asano, “Application of MEMS accelerometer to geophysics,” *Int. J. Mech.*, 4(2) (2008) 1–4.

Pemisahan anomali regional-residual data gayaberat daerah Karangsambung Jawa Tengah menggunakan metode *tren surface analysis*

Ledia Damayanti*, Oktaviana, Ahmad Al Farizi, Ilham Dani, dan Syamsurijal Resimeng

Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung

*email: ledia.pangestu@gmail.com

Abstrak – Pemisahan anomali regional-residual pada metode gravitasi di daerah Karang Sambung Jawa Tengah menggunakan metode *tren surface analysis*. Pemisahan anomali ini dibuat dengan menggunakan bahasa program Matlab dan kemudian dibuat penampangnya menggunakan software Surfer. Interpretasi kualitatif dilakukan dengan mengamati data gayaberat berupa anomali Bouguer. Sedangkan Interpretasi kuantitatif dilakukan untuk memahami lebih dalam hasil interpretasi kualitatif dengan membuat penampang gayaberat pada peta kontur anomali. Berdasarkan hasil analisis spektrum hasil penapisan dengan lebar jendela 23x23 km didapatkan peta anomali regional. Nilai anomali residual yang didapat berkisar antara -45 sampai 30 mGal yang menunjukkan pola anomali negatif hingga positif. Anomali negatif berkisar antara -45 sampai -10 mGal, sedangkan anomali positif berkisar antara 0 sampai 30 mGal..

Kata kunci: Metode gravitasi, pemisahan anomali regional-residual, *tren surface analysis*

Abstract – Separation of regional-residual anomalies in the gravity method in the Karang Connect area of West Java using the surface analysis trend method. The separation of this area is made using the Matlab program language and then made its appearance in the Surfer software. Qualitative interpretation is done by observing gravity data in the form of Bouguer anomalies. Whereas quantitative interpretation is carried out to understand deeper the results of qualitative interpretation by making a cross section of gravity on the anomaly contour map. Based on the results of spectrum analysis results of screening with a window width of 23x23 km, a regional anomaly map was obtained. Residual anomaly values obtained ranged from -45 to 30 mGal which showed a negative to positive anomaly pattern. Negative anomalies are range of -45 to -10 mGal, while positive anomalies are range of 0 to 30 mGal.

Key words: Gravity method, Separation Regional-Residual Anomaly, *tren surface analysis*.

PENDAHULUAN

Metode gayaberat adalah salah satu metode geofisika yang didasarkan pada pengukuran medan gravitasi. Pengukuran ini dapat dilakukan di permukaan bumi, di kapal maupun di udara. Prinsip metode ini mempunyai kemampuan dalam membedakan rapat massa suatu material terhadap lingkungan sekitarnya. Dengan demikian struktur bawah permukaan dapat diketahui. Pada dasarnya gravitasi adalah gaya tarik menarik antara dua benda yang memiliki rapat massa yang berbeda, hal ini dapat diekspresikan oleh rumus hukum Newton.

Pengolahan data metode gravitasi secara umum dipisahkan menjadi dua macam, yaitu proses dasar dan proses lanjutan. Proses dasar mencakup seluruh proses berawal dari nilai pembacaan alat di lapangan sampai memperoleh nilai anomali Bouguer di setiap titik pengamatan. Penggunaan metode gaya berat untuk eksplorasi sumber daya alam, studi

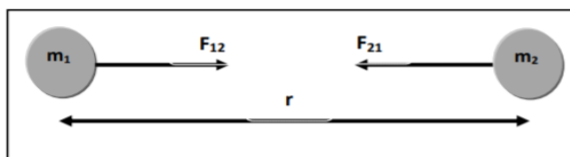
keilmuan dan maksud lainnya dilakukan dengan menerapkan konsep anomali gaya berat (anomali Bouguer). Perbedaan nilai gaya berat terukur dengan nilai gaya berat acuan, yaitu nilai gaya berat teoritis untuk suatu model teoritis Bumi (Spheroid, Geoid). Perbedaan tersebut merefleksikan variasi rapat massa yang terdapat pada suatu daerah dengan daerah sekelilingnya ke arah lateral, maupun ke arah vertikal. Anomali Bouguer merupakan penjumlahan dari anomali regional dan anomali residual. Biasanya anomali bouguer masih mengandung beberapa anomali dari berbagai sumber. Anomali dengan panjang gelombang besar yang berasal dari kontras densitas dalam disebut anomali regional. Hal ini sangat penting untuk memahami struktur dengan skala besar dari lapisan bumi seperti zona subduksi. Sedangkan anomali dengan panjang gelombang rendah yang berasal dari anomali massa di sekitar daerah eksplorasi disebut anomali

residual. Pemisahan anomali regional dan residual sangat penting dalam tahap interpretasi peta kontur gravitasi. Salah satu cara pemisahan anomali adalah menggunakan metode *tren surface analysis*.

LANDASAN TEORI

Metode gayaberat umumnya digunakan dalam eksplorasi jebakan minyak (*oil trap*). Disamping itu metode ini juga banyak dipakai dalam eksplorasi mineral dan lainnya (Kearey dkk., 2002). Prinsip pada metode ini mempunyai kemampuan dalam membedakan rapat massa suatu material terhadap lingkungan sekitarnya. Dengan demikian struktur bawah permukaan dapat diketahui. Untuk menggunakan metode ini dibutuhkan minimal dua alat gravitasi, alat gravitasi yang pertama berada di base sebagai alat yang digunakan untuk mengukur pasang surut gravitasi, alat yang kedua dibawa pergi ke setiap titik pada stasiun mencatat perubahan gravitasi yang ada. Biasanya dalam pengerjaan pengukuran gravitasi ini, dilakukan secara *looping* (Supriyadi, 2009).

Pada dasarnya gravitasi adalah gaya tarik menarik antara dua benda yang memiliki rapat massa yang berbeda, hal ini dapat diekspresikan oleh rumus hukum Newton sederhana sebagai berikut:



Gambar 1. Gaya tarik menarik antara dua benda

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

Di mana F gaya tarik menarik, G konstanta universal gayaberat ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$), m_1 dan m_2 massa benda, dan r jarak antar pusat massa.)

Nilai gravitasi bergantung kepada lima faktor, yaitu lintang, elevasi topografi daerah sekitar pengukuran, pasang surut bumi, dan variasi densitas di bawah permukaan [1]. Koreksi dalam metode gravitasi diperlukan untuk menghilangkan faktor-faktor lain yang mempengaruhi besar nilai gravitasi sehingga didapatkan nilai gravitasi yang hanya disebabkan oleh pengaruh variasi densitas di bawah permukaan. Berikut adalah koreksi-koreksi yang dilakukan kepada data gravitasi lapangan (g_{read}):

Koreksi Pasang Surut (Tide Correction)

Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan pengaruh gravitasi benda-benda di luar bumi seperti bulan dan matahari, yang berubah terhadap lintang dan waktu. Dalam prakteknya, koreksi tidal dilakukan dengan cara mengukur nilai gayaberat di stasiun yang sama (*base*) pada interval waktu tertentu. Nilai koreksi tidal ini selalu ditambahkan pada pembacaan gayaberat.

$$g_t = g_{\text{obs}} + \text{Tide}_{\text{obs}} \quad (2)$$

di mana: g_t gayaberat terkoreksi tidal, g_{obs} gayaberat bacaan, tide_{obs} koreksi tidal

Koreksi Apungan (Drift Correction)

Koreksi apungan akibat adanya perbedaan pembacaan gayaberat dari stasiun yang sama pada waktu yang berbeda, yang disebabkan karena adanya guncangan pegas alat gravimeter selama proses transportasi dari suatu stasiun ke stasiun lainnya. Untuk menghilangkan efek ini, akuisisi data gayaberat didesain dalam suatu rangkaian tertutup (*loop*), sehingga besar penyimpangan tersebut dapat diketahui dan diasumsikan linier pada selang waktu tertentu. Koreksi *drift* pada masing-masing titik stasiun adalah:

$$\text{drift}_n = \frac{t_n - t_1}{t_N - t_1} (g_N - g_1) \quad (3)$$

di mana t_n waktu pembacaan pada stasiun ke- n , t_1 waktu pembacaan pada stasiun *base* (awal *looping*), t_N waktu pembacaan pada stasiun *base* (akhir *looping*), g_1 bacaan gravimeter terkoreksi tidal pada stasiun *base* (awal *looping*), g_N bacaan gravimeter terkoreksi tidal pada stasiun *base* (akhir *looping*), dan g_{lokal} gayaberat terkoreksi *drift* dan *tidal*

Koreksi Lintang

Koreksi ini dilakukan karena bentuk bumi yang tidak sepenuhnya bulat sempurna, sehingga terdapat perbedaan antara jari-jari bumi di kutub dengan di daerah katulistiwa sebesar 21 km. Dengan demikian nilai gayaberat di kutub akan lebih besar dibandingkan nilai gayaberat di katulistiwa. Secara umum gravitasi terkoreksi lintang dapat ditulis sebagai berikut :

$$g\phi = 978031,8(1 + 5,3024 \cdot 10^{-3} \sin^2 \phi - 5,8 \cdot 10^{-6} \sin^2 2\phi) \quad (4)$$

Koreksi Bouguer

Koreksi bouguer merupakan koreksi ketinggian yang memperhitungkan adanya efek dari massa batuan yang berada di antara bidang datum

(geoid) dan titik amat dengan asumsi memiliki jari-jari tak terhingga dengan tebal h (meter) dan densitas ρ (gr/cm^3). Sehingga koreksi ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$BC = 0,0419 \cdot \rho \cdot h \cdot \text{mGal} \quad (5)$$

di mana ρ rapat massa rata-rata daerah penelitian (gr/cm^3), h ketinggian titik amat (m)

Analisis spektrum dilakukan untuk mengestimasi lebar jendela dan mengestimasi kedalaman dari anomali gayaberat. Selain itu analisis spektrum juga dapat digunakan untuk membandingkan respon spektrum dari berbagai metode *filtering*. Analisis spektrum dilakukan dengan mentransformasi fourier lintasan-lintasan yang telah ditentukan. Spektrum diturunkan dari potensial gayaberat yang teramati pada suatu bidang horizontal dimana transformasi fouriernya sebagai berikut [2].

$$F(U) = \gamma \mu F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan} \\ F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|x|(z_0 - z_f)}}{|k|} \quad (6)$$

maka persamaannya menjadi

$$F(U) = 2\pi \gamma \frac{e^{|x|(z_0 - z_f)}}{|k|} \quad (7)$$

di mana U potensial gayaberat μ anomali rapat massa, γ konstanta gayaberat, r jarak.

Nilai Anomali Baouguer yang terukur di permukaan merupakan gabungan dari beberapa sumber anomali dan struktur. Sehingga perlu dilakukan pemisahan anomali untuk memperoleh anomali target yang akan dicari. Metode *tren surface analysis* merupakan salah satu cara untuk memisahkan anomali regional, residual dan *noise*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berada pada daerah Karangsambung Jawa Tengah. Obyek penelitian ini adalah pemisahan anomali regional-residual pada penelitian metode gravitasi. Pada penelitian ini akan dibuat program komputer menggunakan MATLAB dan kemudian dibuat penampangnya menggunakan *software* Surfer. Tahapan pertama yang dilakukan dalam penelitian adalah pengumpulan data hasil akuisisi, yaitu data hasil pengukuran gayaberat berupa koordinat X , Y dan anomali bouguer lengkap. Tahapan kedua merupakan tahapan pengolahan data yang ditekankan dalam penelitian ini, terdiri dari *slicing/digitizing*,

transformasi Fourier, dan analisis spektrum. Tahapan ketiga merupakan pengolahan data lanjut yang terdiri dari Metode *tren surface analysis* yang merupakan metode dengan pendekatan *polynomial* terhadap data-data anomali bouguer yang akan diolah. TSA menggunakan prinsip dasar persamaan berikut:

$$g(x,y) = c_1 x_i^0 y_i^0 + c_2 x_i^1 y_i^0 + c_3 x_i^0 y_i^1 + \dots + c_{n+1} x_i^n y_i^n \\ g(x,y) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M x_i^{j-1} y_i^{k-1} c_j \quad (8)$$

di mana i adalah $1, 2, 3, \dots, n$.

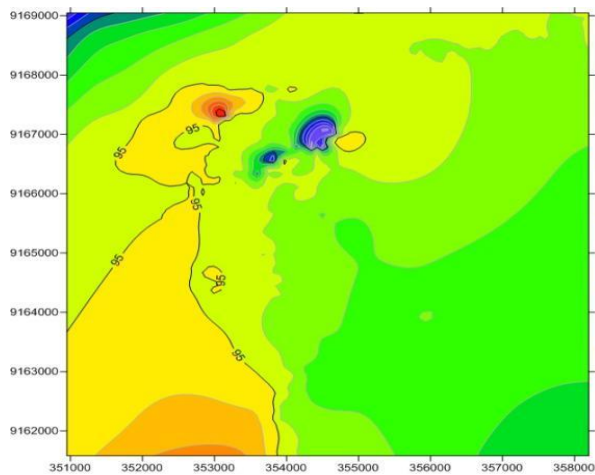
Dari persamaan tersebut akan dihitung nilai anomali dengan menggunakan orde 1, orde 2 sampai dengan orde 3. Kemudian setelah didapatkan nilai anomali regionalnya dapat dihitung anomali residual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

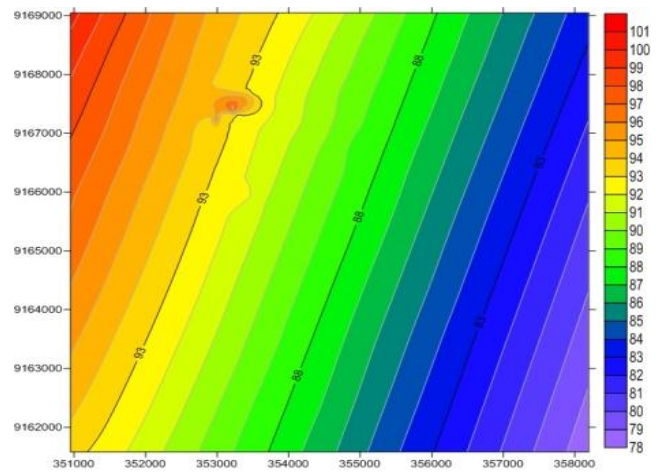
Proses pemisahan daerah anomali regional-residual dilakukan dengan menggunakan metode *polynomial tren surface analysis*. Interpretasi gayaberat secara umum dibedakan menjadi dua yaitu interpretasi kualitatif dan kuantitatif. Interpretasi kualitatif dilakukan dengan mengamati data gayaberat berupa anomali Bouguer. Anomali tersebut akan memberikan hasil secara global yang masih mempunyai anomali regional dan residual. Dengan interpretasi ini dapat dilihat arah penyebaran anomali. Interpretasi kuantitatif dilakukan untuk memahami lebih dalam hasil interpretasi kualitatif dengan membuat penampang gayaberat pada peta kontur anomali. Teknik interpretasi kuantitatif mengasumsikan distribusi rapat-massa dan menghitung efek gayaberat yang diamati. Interpretasi kuantitatif pada penelitian ini adalah analisis *tren surface*.

Analisis Peta Anomali Bouguer Lengkap (ABL)

Setelah melalui proses reduksi lalu digambarkan dalam bentuk peta anomali bouguer lengkap (ABL) sebagai berikut:



Gambar 2. Peta ABL



Gambar 3. Peta Anomali regional orde 1

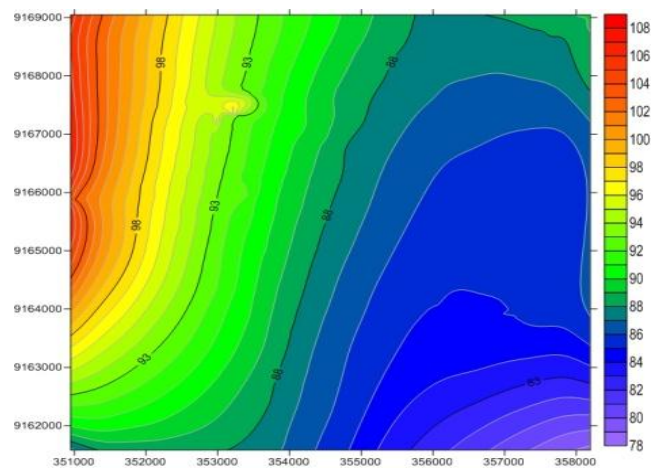
Pada peta ABL dapat dilihat bahwa memiliki rentang nilai anomali bouguer di daerah penelitian berkisar 45 hingga 125 mGal. Anomali rendah tersebar pada bagian barat laut dan utara tengah peta, anomali sedang tersebar pada timur dan selatan peta, dan anomali tinggi tersebar pada bagian barat daya dan utara peta. Perubahan dari anomali tersebut, tampak jelas adanya perubahan nilai anomali rendah ke tinggi yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh perubahan nilai kontras rapat-massa batuan yang terjadi pada daerah penelitian.

Pemisahan Anomali Regional-Residual

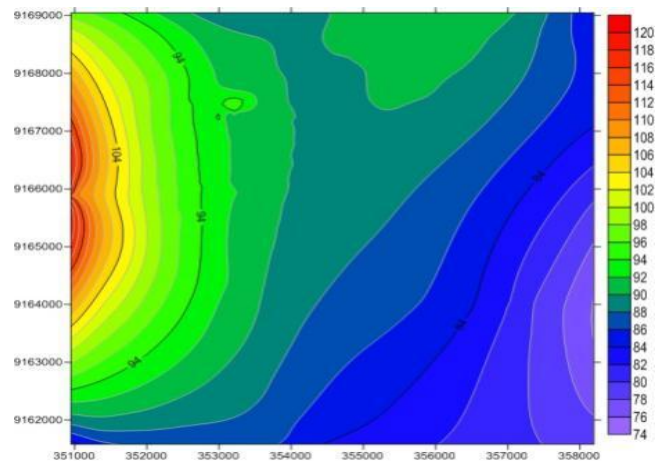
Anomali regional dan residual diperoleh dari nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL). Anomali Bouguer yang terbaca masih dipengaruhi oleh nilai anomali dalam dan anomali dangkal. Anomali Bouguer yang telah dikoreksi tersebut merupakan respon anomali yang berasal dari material bawah permukaan.

Peta Anomali Regional

Berdasarkan hasil analisis spektrum dengan lebar jendela 23×23 km didapatkan peta anomali regional. Kedalaman regional ini mengindikasikan bahwa kedalaman kerak bawah hingga basement pada daerah penelitian.



Gambar 4. Peta Anomali regional orde 2



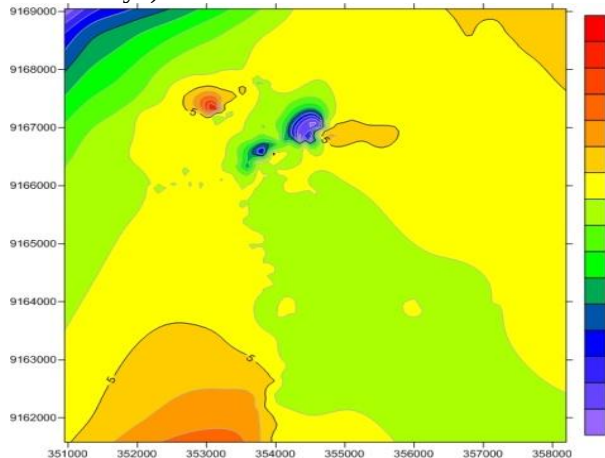
Gambar 5. Peta anomali regional orde 3

Peta anomali regional yang didapatkan menggunakan *polynomial* orde satu menghasilkan nilai anomali sebesar 78-101 mGal, orde dua menghasilkan nilai anomali 78-108 mGal, dan orde tiga menghasilkan nilai anomali 74-120 mGal. Perubahan nilai ini disebabkan adanya kontras rapat massa batuan

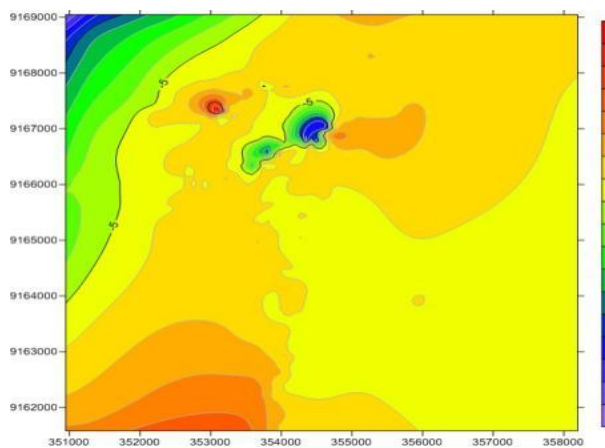
yang besar di sekitar rapat kontur ini yang kemungkinan merupakan daerah sesar.

Peta Anomali Residual

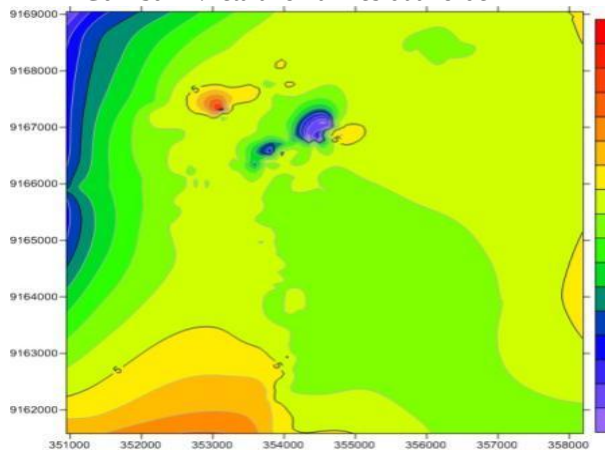
Peta anomali residual ini menunjukkan sumber anomali yang bersifat lokal, biasanya berasosiasi dengan cekungan Tersier (mengindikasikan letak *top basement* dengan sedimennya)



Gambar 6. Peta anomali regional orde 1



Gambar 7. Peta anomali residual orde 2



Gambar 8. Peta anomali residual orde 3

Nilai anomali residual yang didapat berkisar antara -45 sampai 30 mGal yang menunjukkan pola anomali negatif hingga positif. Anomali negatif bernilai -45 sampai -10 mGal, sedangkan anomali positif bernilai 0 sampai 30 mGal. Dari peta residual dapat dilihat adanya anomali tinggi serta pola kontur yang diinterpretasikan sebagai intrusi. Berdasarkan peta geologi regional diduga salah satunya merupakan intrusi dangkal.

KESIMPULAN

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

Akurasi (%)	Presisi (%)	Error (%)	Waktu respon (s)	Sistem peringatan	
				<1,5°	≥1,5°
89,34	91,07	10,66	4,13	0	1

UCAPAN TERIMA KASIH

Berdasarkan data Gayaberat Daerah Karang Sambung Jawa Tengah dari hasil *filtering* dengan menggunakan *polynomial* orde satu menghasilkan nilai anomali sebesar 78-101 mGal, orde dua menghasilkan nilai anomali 78-108 mGal, dan orde tiga menghasilkan nilai anomali 74-120 mGal. Perubahan nilai ini disebabkan adanya kontras rapat massa batuan yang besar di sekitar rapat kontur ini yang kemungkinan merupakan daerah sesar. Sedangkan Nilai anomali residual yang didapat berkisar antara -45 sampai 30 mGal. Dari peta residual dapat dilihat adanya anomali tinggi serta pola kontur yang diinterpretasikan sebagai intrusi.

PUSTAKA

- [1] Telford, WM. *Applied Geophysics Second Edition*. Cambridge University, 1990.
- [2] Blakely, R.J., *Potential Theory In Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [3] Kearey, P., *An Introduction to Geophysical Exploration 3rd Edition*. Blackwell Ltd. London, 2002.
- [4] Supriyadi, Studi Gaya Berat Relatif Di Semarang. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 5(1) 2009.

Perubahan kalor jenis campuran bahan mortar dengan penambahan pasir besi

Hartono*, Sugito dan Farzand Abdullatif

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

*email: hartono0606@unsoed.ac.id

Abstrak – Potensi energi matahari yang berupa kalor dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan, antara lain untuk pengeringan, proses destilasi air laut, atau sebagai pemanas water heater. Optimalisasi media penyerap kalor perlu dilakukan guna meningkatkan kemampuannya. Salah satu variabel yang berpengaruh pada kemampuan penyerapan kalor adalah nilai kalor jenis (c). Keberadaan unsur logam di dalam pasir perlu diteliti untuk mengetahui kemampuannya dalam meningkatkan penyerapan kalor. Kehadiran pasir besi pada campuran bahan pembuat mortar sebagai media penyerap kalor perlu diteliti. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan membuat 10 kelompok sampel mortar. Kelompok sampel dibedakan oleh komposisi campuran pasir sungai dan pasir besi yang digunakan sebagai bahan utama. Variasi campuran dibuat dengan perbandingan massa antara pasir sungai dengan pasir besi sebagai berikut: 100:0; 90:10; 80:20; 70:30; 60:40; 50:50; 40:60; 30:70; 20:80 dan 10:90. Sampel mortar yang diuji dibuat dengan ukuran $(2 \times 1 \times 1) \text{ cm}^3$. Pengujian dilakukan menggunakan kalorimeter bomb. Hasil pengujian diperoleh nilai kalor jenis terendah sebesar $1359,08 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ pada sampel dengan perbandingan campuran pasir sungai dan pasir besi 60:40. Sementara nilai kalor jenis tertinggi pada sampel tanpa pasir besi (100:0) dengan nilai $3555,76 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. Berdasarkan hasil pengujian, penambahan pasir besi dapat menurunkan kalor jenis pada media mortar.

Kata kunci: penyerap kalor, kalor jenis, pasir besi, mortar.

Abstract – Solar energy is an inexhaustible resource for diverse needs, some of which are drying, sea-water distillation, and water heating. Heat absorbing medium is an important component in such processes, and thus needs to be optimized for desirable performance. One parameter that has significant effect on the heat absorbance of absorbing media is specific heat (c). The presence of metal elements in mortar mix that constitute a heat absorbing medium was investigated. Particularly, the presence of iron-sand in mortar mix was experimentally investigated by preparing 10 groups of mortar mix. Each group is separated by its corresponding mixture composition of river-sand and iron-sand as primary materials. The variation of mixture was prepared with the ratio of river-sand and iron-sand of: 100:0; 90:10; 80:20; 70:30; 60:40; 50:50; 40:60; 30:70; 20:80 and 10:90. Each of the mortar samples, $(2 \times 1 \times 1) \text{ cm}^3$ in size, is examined using a bomb calorimeter. The measurements reveal that the lowest specific heat is $1359,08 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, which results from the sample with mixture ratio of river sand and iron sand of 60:40. The highest specific heat, $3555,76 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ in value, is shown by the sample that has no iron-sand (100:0 ratio). This shows that the addition of iron-sand lowers the specific heat of the mortar media.

Key words: heat absorber, specific heat, iron sand, mortar

PENDAHULUAN

Matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat melimpah. Pancaran gelombang elektromagnetik dari matahari dapat mencapai $75,3 \text{ juta W/m}^2$. Intensitas radiasi yang diterima pada bagian terluar atmosfer mencapai 1360 W/m^2 , pengurangan energi ini akibat jarak yang sangat jauh antara matahari ke atmosfer bumi. Energi sebesar ini tidak seluruhnya mencapai permukaan bumi, karena adanya hambatan dan penyerapan sehingga hanya 50% nya yang sampai pada permukaan bumi [1].

Wilayah negara Indonesia sebagian besar mendapatkan paparan matahari dengan jumlah yang sangat melimpah. Potensi energi matahari rata-rata di Indonesia mencapai $4,8 \text{ kWh/m}^2$ [2]. Potensi energi matahari yang berupa kalor dapat digunakan untuk berbagai hal, antara lain sebagai sarana pengeringan, untuk membantu proses penguapan pada desalinasi atau destilasi air laut, atau sebagai pemanas water heater. Pemanfaatan energi matahari untuk kebutuhan tersebut membutuhkan media yang mempunyai kemampuan menyerap energi semaksimal mungkin.

Berbagai upaya sudah dilakukan untuk mengoptimalkan penyerapan energi panas matahari. Upaya optimalisasi penyerapan kalor sudah dilakukan melalui berbagai riset dengan mengkaji berbagai material. Banyak bahan yang telah diteliti untuk keperluan ini, seperti menggunakan sekam padi sebagai media isolator kalor. Sekam padi yang mempunyai nilai konduktivitas yang rendah dapat digunakan sebagai media untuk mempertahankan kalor [3]. Hal serupa juga pernah dilakukan namun menggunakan bahan campuran yang berbeda, yaitu partikel tongkol jagung. Ukuran partikel tongkol jagung mempengaruhi nilai konduktivitas termalnya [4]. Penggunaan pasir sebagai media penyerap kalor juga sudah dilakukan oleh sebagian masyarakat, yaitu sebagai media penggoreng kerupuk. Sesuai dengan hasil penelitian, ukuran partikel pasir juga mempengaruhi kecepatan perambatan kalor [5].

Penggunaan material pasir sebagai media penyerap kalor perlu diteliti lebih lanjut mengingat kemampuannya dalam menerima dan mempertahankan kalor yang diserap. Pasir besi merupakan pasir alam yang mempunyai kandungan unsur logam di dalamnya. Pasir di sekitar pantai Binangun Cilacap mempunyai potensi pasir besi yang cukup melimpah. Keberadaan unsur logam di dalam pasir perlu diteliti untuk mengetahui kemampuannya dalam menyerap dan mempertahankan kalor. Diharapkan kehadiran pasir besi dapat meningkatkan nilai konduktivitas termal dan menurunkan nilai kalor jenis pada media penyerap kalor. Semakin besar nilai konduktivitas termal suatu material maka akan semakin besar kemampuannya dalam menyalurkan energi kalor. Semakin kecil nilai kalor jenisnya akan semakin cepat meningkatkan temperaturnya. Hal ini tentu dapat dimanfaatkan untuk menyerap energi matahari lebih optimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian terkait dengan pembuatan media penyerap kalor dengan perbandingan yang tepat menggunakan campuran pasir sungai dan pasir besi.

Kalor jenis material menunjukkan kemampuan suatu material untuk merubah temperaturnya setiap mengalami perubahan kalor. Kemampuannya untuk menaikkan temperatur ketika mendapatkan tambahan kalor mempunyai peran yang sangat penting dalam konservasi energi. Secara teoritik, sejumlah kalor yang diterima oleh suatu material akan

digunakan untuk melakukan perubahan temperatur sesuai dengan persamaan berikut:

$$Q = mc\Delta T, \quad (1)$$

dengan Q merupakan kalor yang diterima material (joule), m merupakan massa dari material (kg), c menyatakan kalor jenis dari material ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) dan ΔT merupakan perubahan temperatur yang terjadi ($^\circ\text{C}$).

Berdasarkan pada persamaan (1), material dikatakan mempunyai kalor jenis yang besar apabila perubahan temperaturnya sangat kecil untuk jumlah kalor yang diterima. Hal yang sebaliknya, material yang mempunyai kalor jenis kecil akan menghasilkan perubahan temperatur yang besar untuk sejumlah kalor yang sama. Hal ini dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan material atau bahan yang akan digunakan sebagai media penyerap kalor. Berdasarkan pada persamaan (1), maka perancangan media penyerap kalor sebaiknya memilih material yang mempunyai kalor jenis kecil.

METODE PENELITIAN

Tahap pertama yang dilakukan pada penelitian ini sebelum membuat sampel adalah memisahkan pasir besi dari pasir pantai yang sudah disiapkan. Pemisahan pasir besi dilakukan menggunakan magnet permanen. Pasir yang menempel pada magnet permanen dipisahkan sebagai bahan campuran untuk membuat sampel mortar. Langkah berikutnya adalah membuat sampel mortar menggunakan campuran bahan pasir sungai, pasir besi, semen dan air. Mortar dibuat dalam 10 kelompok sampel dengan perbandingan pasir sungai dan pasir besi sebagai berikut: 100:0; 90:10; 80:20; 70:30; 60:40; 50:50; 40:60; 30:70; 20:80 dan 10:90. Kelompok sampel ini selanjutnya dikodekan berturut-turut dengan kode M-0, M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7, M-8 dan M-9. Bahan semen dan air yang digunakan pada setiap kelompok sampel dibuat tetap. Sampel mortar pada cetakan awal dibuat dengan ukuran $(6 \times 4 \times 1) \text{ cm}^3$. Pembuatan sampel dilakukan untuk setiap kelompok sampel dengan perlakuan yang sama, yaitu waktu pengadukan dan pengeringan. Adonan mortar dituang pada cetakan yang sudah disiapkan. Setiap kelompok sampel dicetak sebanyak 5 buah.

Mortar yang sudah dicetak dikeringkan secara alami dengan cara meletakkan pada tempat yang terbuka dengan aliran udara cukup. Hal ini dilakukan agar mortar mengering secara perlahan sehingga tidak pecah. Seluruh sampel yang sudah mengering dipotong dengan ukuran

(2 x 1 x 1) cm³. Ukuran ini disesuaikan dengan ukuran kalorimeter bomb.

Tahap pengujian dilakukan terhadap seluruh kelompok sampel. Sebelum melakukan pengujian, memastikan ukurannya seragam untuk semua sampel. Memastikan ukuran dilakukan dengan mengukur setiap sampel satu demi satu. Langkah berikutnya setelah memastikan ukurannya seragam adalah menimbang seluruh sampel untuk mendapatkan massa dari setiap sampel uji.

Tahapan berikutnya adalah menguji kalor jenis menggunakan kalorimeter bomb. Sampel dimasukkan dalam tabung pemanas, selanjutnya dipanaskan sampai mencapai suhu tertentu. Sampel yang sudah dipanaskan dalam tabung pemanas dikeluarkan dengan cara melepaskan penahan dan menampung sampel dalam tabung kedua yang sudah diisi dengan air dan terukur suhunya. Perubahan suhu pada tabung ini diukur sampai mencapai suhu kesetimbangan. Proses ini ditunggu sampai mencapai suhu kesetimbangan. Suhu kesetimbangan dicapai manakala suhu dalam tabung isolator sudah stabil. Perulangan pengukuran untuk setiap kelompok sampel dilakukan sebanyak 8 kali. Penentuan nilai kalor jenis menggunakan persamaan (1) dengan menetapkan nilai kalor jenis air yang digunakan sebesar 4200 J/kg°C. Perhitungan dilakukan untuk seluruh data hasil pengujian. Massa air yang digunakan rata-rata 100 gram.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi awal sampel mortar dalam cetakan seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Seluruh sampel masih dalam cetakan dalam proses pengeringan. Proses pengeringan dalam penelitian ini membutuhkan waktu selama 14 hari. Sampel yang sudah mengering dipotong dengan ukuran (2 x 1 x 1) cm³ seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**. Pengujian kalor jenis sampel dilakukan pada suhu kamar. Sampel yang sudah diurutkan sesuai dengan kode diuji satu demi satu. Data hasil pengujian rata-rata dari 8 kali perulangan untuk semua kelompok sampel seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**.



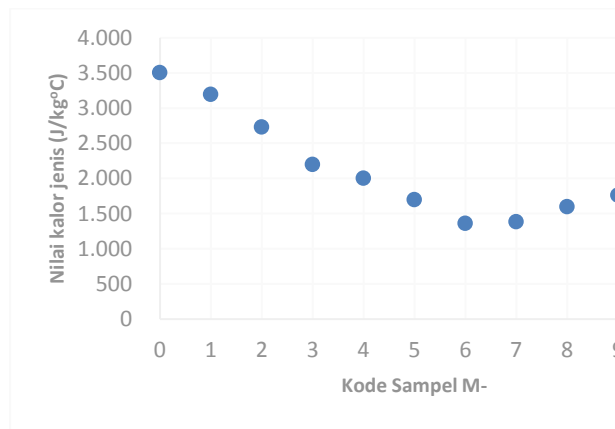
Gambar 1. Sampel mortar tercetak, terdiri dari 10 kelompok sampel



Gambar 2. Potongan mortar dari 10 kelompok sampel.

Tabel 1. Data hasil pengujian kalor jenis sampel mortar

Kode sampel	m_{mortar} (g)	m_{air} (g)	T1 (°C)	T2 (°C)	Tc (°C)	c air (J/kg°C)	c mortar (J/kg°C)
M-0	10,53	101,06	81,13	24,88	29,38	4200	3506,278
M-1	9,98	101,09	80,00	24,50	28,38	4200	3194,571
M-2	10,35	100,91	81,25	25,25	28,75	4200	2730,524
M-3	12,80	101,20	82,63	24,25	27,88	4200	2198,587
M-4	12,88	101,13	81,63	24,88	28,13	4200	2003,456
M-5	13,52	101,13	78,63	25,00	27,75	4200	1698,169
M-6	13,99	100,78	82,13	24,13	26,63	4200	1362,673
M-7	14,31	100,97	80,88	24,88	27,38	4200	1384,545
M-8	15,74	100,78	82,88	22,75	26,13	4200	1599,817
M-9	15,17	101,12	83,88	24,75	28,25	4200	1762,001



Gambar 3. Hasil uji nilai kalor jenis dari sampel mortar

Berdasarkan pada data hasil pengujian sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1** ataupun **Gambar 3**, terlihat bahwa penambahan pasir besi pada campuran bahan pembuat mortar berdampak pada penurunan nilai kalor jenisnya. Penurunan nilai kalor jenis seiring dengan penambahan pasir besi. Nilai kalor jenis terendah dicapai pada sampel M-6, yaitu pada perbandingan pasir sungai dan pasir besi (40:60)%. Penambahan pasir besi yang lebih besar dari 60% terlihat mulai meningkat nilai kalor jenisnya.

Campuran bahan mortar pada sampel M-7, M-8 dan M-9 setelah dilakukan pengadukan menghasilkan adonan yang relatif lebih encer dibandingkan dengan campuran yang lain. Semakin banyak pasir besi dalam campuran semakin encer adonan mortar yang diperoleh. Hal ini dikarenakan pasir besi tidak banyak menyerap air. Kondisi yang seperti ini menyebabkan adanya pori-pori pada saat sampel sudah mengering. Sampel M-9 terlihat paling poros jika dibandingkan dengan sampel yang sebelumnya, seperti yang terlihat pada **Gambar 4**. Keberadaan pori yang terisi udara menyebabkan penyerapan kalor pada sampel mengalami penurunan yang ditunjukkan dengan meningkatnya nilai kalor jenisnya. Analisis ini perlu diperkuat dengan melakukan pengujian SEM untuk melihat struktur dari sampel.

KESIMPULAN

Pembuatan sampel mortar sebagai media penyerap kalor sudah dibuat dan diuji terhadap nilai kalor jenisnya. Berdasarkan pada hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa penambahan pasir besi terhadap pasir sungai sebagai bahan pembuat media penyerap kalor dapat meningkatkan kemampuannya dalam menyerap kalor. Hal ini didasarkan pada nilai kalor jenis yang semakin kecil

seiring dengan penambahan pasir besi. Namun demikian, pada batas tertentu penambahan pasir besi akan menurunkan kemampuannya dalam menyerap kalor. Sampel dengan perbandingan campuran 40:60 merupakan sampel terbaik dalam menyerap kalor..

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang sudah membantu terlaksananya penelitian ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada

1. LPPM Universitas Jenderal Soedirman yang sudah menugaskan dan memberikan pembiayaan terhadap penelitian ini.
2. Laboratorium Elektronika Instrumentasi dan Geofisika Jurusan Fisika FMIPA Unsoed yang sudah menyediakan fasilitas untuk penelitian.
3. Achmad Nur Susbiantoro yang sudah membantu pengujian sampel.

PUSTAKA

- [1] Nadia Handayani, Taufik Fajar Nugroho, dan Sutopo Purwono Fitri, "Analisa Kinerja Termal Solar Apparatus Panel pada Alat Destilasi Air Payau dengan Sistem Evaporasi Uap Tenaga Matahari Menggunakan CFD", *Jurnal Teknik Pomits*, 3(2) (2014) 2301 - 9271.
- [2] Saipul Hamdi, "Mengenal Lama Penyinaran Matahari sebagai Salah Satu Parameter Klimatologi", *Berita Dirgantara*, 15(1) (2014) 7 – 16.
- [3] Hary Wibowo, Khairul Muhajir, Toto Rusianto, Ellyawan Arbintarso, *Jurnal Teknologi Technoscience*, 1(1) (2008) 29 - 34.
- [4] Nanda Pratama, Djusmaini Djasas, Yenni Darvina, "Pengaruh Variasi Ukuran Partikel Terhadap Nilai Konduktivitas Termal pada Partikel Tongkol Jagung", *Pillar Of Physics*, 7 (2016) 25 - 32.
- [5] Lina Nirwana, Muh.Rais, Jamaluddin P, "Konduktivitas Termal Pasir Kali Sebagai Media Penghantar Panas pada Proses Penyaraian Kerupuk", *Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian*, 3 (2017) S182 - S196

Pengamatan makroskopik dan mikroskopik membran melalui pengukuran konduktansi dan kapasitansi listrik dalam larutan elektrolit

Kiagus Dahlan

*Divisi Biofisika, Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, IPB University, Bogor*

Abstrak Telah dilakukan pengukuran konduktansi dan kapasitansi membran bawang bombay dan membran salak pondoh. Membran bawang bombay diberi dua perlakuan berbeda, yaitu direndam dalam air murni selama 12 jam, dan tanpa direndam. Pengukuran dilakukan secara langsung tanpa menggunakan larutan elektrolit dan dengan menggunakan larutan elektrolit. Pengukuran konduktansi membran dalam larutan elektrolit dilakukan pada berbagai frekuensi dan suhu, serta dengan variasi konsentrasi dan valensi ion larutan. Larutan elektrolit yang digunakan adalah $MgCl_2$ dan $NaCl$. Hasilnya memperlihatkan bahwa membran bawang bombay yang direndam selama 12 jam mengalami peningkatan kapasitansi listrik dan penyempitan pori yang ditandai oleh naiknya energi aktivasi ion. Perhitungan yang dilakukan menunjukkan bahwa rata-rata radius pori membran tanpa direndam dan yang direndam berturut-turut adalah sekitar 2 nm dan 0.13 nm. Pengukuran konduktansi membran salak pondoh menggunakan berbagai konsentrasi dan valensi ion memperlihatkan bahwa konduktansi membran dalam larutan elektrolit meningkat sesuai dengan peningkatan konsentrasi dan valensi ion larutan.

Kata Kunci: kapasitansi, larutan elektrolit, membran

PENDAHULUAN

Konduktansi listrik merupakan ukuran cepat lambatnya arus listrik mengalir pada suatu bahan (material) jika bahan tersebut diberi beda tegangan. Kemampuan bahan mengalirkan arus disebut konduktivitas bahan. Pada bahan yang bersifat padatan, seperti logam, arus listrik dibawa oleh elektron bebas yang ada pada bahan tersebut. Tetapi, pada cairan, seperti larutan elektrolit, arus listrik dibawa oleh ion-ion. Semakin banyak jumlah ion akan semakin besar pula arus yang dihasilkannya. Besarnya arus listrik pada larutan elektrolit juga berbanding lurus dengan jenis elektrolit (valensi dan sifat kelarutan) yang digunakan, suhu lingkungan, dan tentu saja besar kecilnya tegangan yang diberikan.

Membran dapat dideskripsikan sebagai sebuah lapisan atau lembaran tipis yang berperan sebagai batas selektif antara dua fasa. Mekanisme seleksinya bisa karena ukuran dan distribusi ukuran pori atau bisa juga karena medan elektrostatis yang ditimbulkan oleh muatan listrik yang ada pada membran tersebut. Secara umum, membran dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu membran alami dan membran sintetik. Membran alami atau membran biologi pada dasarnya adalah membran yang menyelimuti sel, baik sel otot maupun sel saraf, pada makhluk hidup. Tetapi

membran alami bisa juga berupa selaput tipis yang menyelimuti bagian tertentu atau keseluruhan bahan biologi, seperti membran telur (selaput tipis yang menyelimuti telur yang menempel pada bagian dalam cangkang telur), dan membran salak (selaput tipis yang menyelimuti buah salak yang menempel pada bagian dalam kulit salak). Membran sintetik adalah membran buatan yang dapat dibuat dari bahan-bahan organik maupun anorganik seperti polimer, gelas, keramik, dll.). Membran sintetik ada yang dibuat sebagai tiruan untuk mempelajari membran biologi, walaupun utamanya tujuan pembuatan membran sintetik adalah untuk diaplikasikan dalam proses filtrasi atau purifikasi dalam teknologi membran.

Sifat listrik membran biologi dan membran sintetik banyak dipelajari [1-3]. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah melalui pengukuran konduktansi dan kapasitansinya. Konduktansi dan kapasitansi listrik membran dapat diukur secara langsung, dan dapat pula diukur di dalam larutan elektrolit [4,5]. Jika sebuah membran diletakkan dalam sebuah *chamber* yang dilengkapi dengan elektroda arus dan tegangan, sebagaimana terlihat pada Gambar 1, lalu diisi larutan elektrolit dan diberi beda tegangan, maka konduktansinya dapat diukur. Membran dalam hal ini akan berfungsi sebagai penghambat gerakan ion dalam larutan, sehingga konduktansi larutan akan berbeda ketika

ada dan tidak ada membran. Melalui pengukuran ini ternyata bisa didapatkan informasi makroskopik dan mikroskopik dari membran yang diamati. Pada tulisan ini akan dipaparkan beberapa hasil pengukuran konduktansi dan kapasitansi listrik membran biologi dalam larutan elektrolit, estimasi ukuran pori yang didapatkan serta potensi pengembangan aplikasi metoda ini.

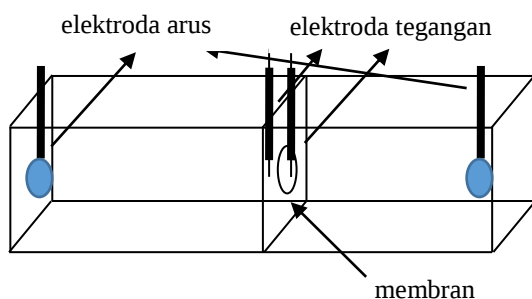
LANDASAN TEORI

Berdasarkan konsep elektromagnetika, setiap ion mempunyai energi-diri (self-energy), karena adanya interaksi elektrostatik dengan lingkungan, yang besarnya bergantung pada sifat permitivitas lingkungan (medium) tempat ion tersebut berada [6,7]. Ketika sebuah ion berada di dalam pori tentu energi-dirinya lebih besar dibandingkan ketika berada di luar pori. Perbedaan energi-diri ini, biasa dinyatakan sebagai *energy barrier* membran atau energi aktivasi ion, dan dapat dinyatakan sebagai

$$\Delta U = \frac{z^2 q^2 \alpha}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_m r} \quad (1)$$

dengan r menyatakan radius pori membran (m), z merupakan bilangan valensi ion q adalah muatan elektron, α adalah konstanta geometri yang besarnya bergantung sifat dielektrik lingkungan, ϵ_0 menyatakan permitivitas ruang hampa, dan ϵ_m adalah konstanta dielektrik membran.

Tingginya energi-diri ion ketika berada di dalam pori membran tentu, secara energetika, bukanlah kondisi yang disukai oleh ion tersebut. Oleh karena itu, untuk dapat melewati membran, ion memerlukan tambahan energi, yaitu dari energi listrik yang diberikan oleh sumber tegangan.



Gambar 1. *Chamber* untuk pengamatan konduktansi dan kapasitansi membran dalam larutan elektrolit

Dengan menerapkan pola distribusi Maxwell-Boltzman untuk distribusi ion di

dalam dan di luar pori [8], dan karena konduktansi listrik larutan berbanding lurus dengan konsentrasi, maka dapat dituliskan

$$G = G_0 \exp (-\Delta U/kT) \quad (2)$$

dengan G merupakan konduktansi larutan di dalam pori membran dan G_0 adalah konduktansi larutan di luar pori pada jarak yang jauh dari membran.

Nilai G ditentukan oleh beberapa faktor diantaranya geometri pori, konsentrasi pori dan mobilitas ion. Jika medan listrik dalam pori konstan, maka besarnya nilai konduktansi G untuk tiap pori adalah

$$G = \frac{q^2 C_0 (z_p a_p D_p + z_n a_n D_n) \pi r^2}{kTL} \quad (3)$$

dengan L adalah ketebalan membran, k adalah konstanta Boltzmann, T merupakan suhu dalam Kelvin, z_p valensi ion positif, z_n adalah valensi ion negatif, a_p fraksi ion positif, dan a_n fraksi ion negatif dalam pori.

METODE PENELITIAN

Pengukuran konduktansi dan kapasitansi membran secara langsung tanpa menggunakan larutan elektrolit dilakukan dengan menempatkan membran ke dalam *chamber* yang sudah dilengkapi dengan plat elektroda. Konduktansi dan kapasitansi membran kemudian diukur menggunakan LCR meter model Hioki 300.

Untuk pengukuran dalam larutan, alat yang digunakan adalah sebuah *chamber*, sebagaimana terlihat pada Gambar 1, yang sudah dilengkapi dengan elektroda arus dan elektroda tegangan. Di dalam *chamber* kemudian diletakkan sebuah membran, lalu *chamber* diisi dengan larutan elektrolit. Setelah sistem ini dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan, maka ion-ion akan mengalir dari satu sisi *chamber* ke sisi lainnya menembus pori-pori membran. Larutan garam yang digunakan adalah NaCl dan MgCl₂ pada berbagai konsentrasi. Membran yang digunakan adalah membran biologi, yaitu membran bawang bombay (kulit tipis yang menyelimuti bawang bombay) dan membran salak (kulit tipis yang menyelimuti buah salak). Untuk menghitung energi aktivasi ion menembus pori membran dilakukan pengukuran konduktansi pada berbagai suhu. *Chamber* dimasukkan ke dalam *water bath* lalu suhunya divariasikan.

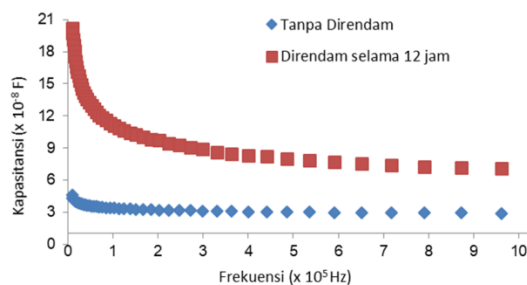
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan Makroskopik

Konduktansi sebuah komponen atau suatu material murni yang hanya memiliki satu nilai konduktivitas tidak bervariasi terhadap frekuensi. Tetapi jika material tersebut kompleks yaitu mengandung lebih dari satu nilai konduktivitas dan permitivitas listrik, maka konduktansi dan kapasitansinya bervariasi terhadap frekuensi. Gambar 2 dan 3 memperlihatkan kapasitansi dan konduktansi membran bawang bombay sebagai fungsi dari frekuensi yang diukur secara langsung, tanpa medium larutan elektrolit.

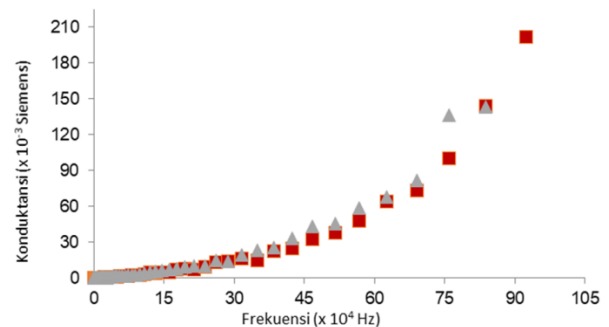
Pada penelitian ini dilakukan pengukuran konduktansi dan kapasitansi membran bawang bombay yang telah diberi dua perlakuan yang berbeda, yaitu membran tanpa direndam terlebih dahulu dan membran yang direndam dalam air murni selama 12 jam. Hasilnya, sebagaimana terlihat pada Gambar 2, setelah direndam ternyata nilai kapasitansinya meningkat. Sementara nilai konduktansinya, sebagaimana diperlihatkan Gambar 3, tidak teramati adanya perubahan.

Nilai kapasitansi berbanding lurus dengan konstanta dielektrik bahan. Hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 2 mengindikasikan adanya kenaikan permitivitas membran setelah direndam dalam air selama 12 jam. Hal ini menunjukkan adanya air yang terserap dalam membran, sehingga terbentuk susunan paralel kapasitor yang menghasilkan kenaikan nilai kapasitansi. Konstanta dielektrik air jauh lebih besar daripada konstanta dielektrik kulit bawang bombay yang berharga sekitar 30-40. Kesimpulan ini bersesuaian juga dengan hasil pengamatan fisik bahwa membran bawang bombay setelah direndam dalam air berkurang sifat lenturnya yang kemungkinan karena sudah banyak terisi air.



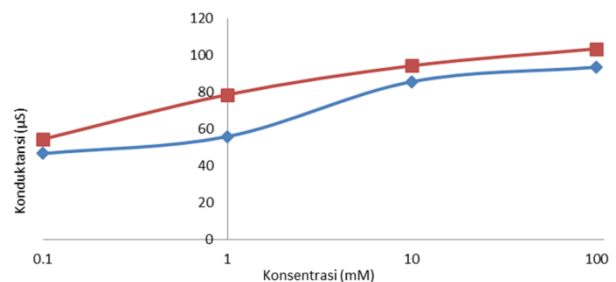
Gambar 2. Grafik perbandingan nilai kapasitansi membran bawang bombay tanpa direndam dan yang direndam selama 12 jam.

Sementara itu, pada Gambar 3 terlihat bahwa nilai konduktansi kedua membran tersebut tidak teramati mengalami perubahan. Hal ini menunjukkan bahwa, walaupun membran yang direndam sudah banyak terisi air sebagaimana didapat dari pengukuran kapasitansi, tetapi nilai konduktansinya tidak berubah. Air yang digunakan untuk merendam membran adalah air murni yang tidak atau sangat sedikit mengandung ion, sehingga tidak mempengaruhi sifat konduktivitas membran.



Gambar 3. Grafik konduktansi membran bawang bombay tanpa direndam dan yang direndam selama 12 jam.

Pada pengukuran dalam larutan elektrolit, konduktansi membran meningkat dengan semakin besarnya konsentrasi larutan eksternal. Variasi konsentrasi larutan eksternal menentukan jumlah ion dalam larutan tersebut. Semakin besar konsentrasinya maka semakin banyak pula jumlah ion dalam larutan. Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa konduktansi membran salak pondoh meningkat dengan meningkatnya konsentrasi larutan eksternal. Pada Gambar 4 ditunjukkan juga pengaruh valensi ion. Konduktansi membran salak pondoh dalam larutan MgCl_2 lebih besar daripada konduktansinya dalam larutan NaCl karena valensi ion Mg^{2+} lebih besar daripada valensi ion Na^+ .



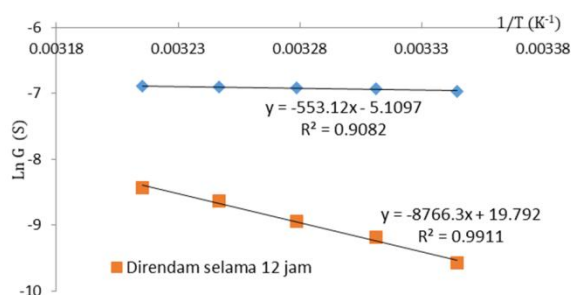
Gambar 4. Konduktansi membran salak pondoh pada berbagai konsentrasi larutan NaCl dan MgCl_2 yang diamati pada suhu ruang.

Pengamatan Mikroskopik

Pengamatan yang lebih mikroskopik didapatkan melalui penghitungan energi aktivasi ion ketika melewati membran. Nilai energi tersebut dapat dicari melalui kurva $\ln G$ terhadap $1/T$ yang didapatkan dari pengukuran konduktansi listrik pada berbagai suhu.

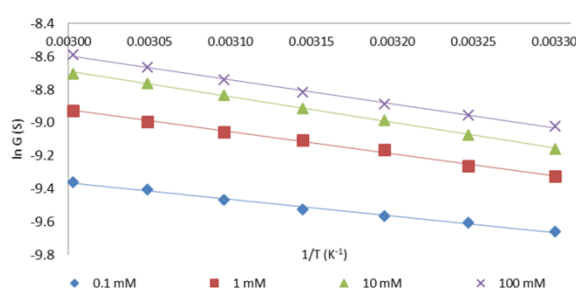
Dari persamaan (2) akan diperoleh hubungan yang linier antara $\ln G$ terhadap $1/T$, yaitu $\ln G = \ln G_0 - \Delta U/k T$. Jika dibuat plot $\ln G$ terhadap $1/T$ maka $\ln G_0$ merupakan perpotongan ke dua sumbu, sedangkan kemiringan garis adalah $\Delta U/k$. Gambar 5 memperlihatkan plot data yang dihasilkan dari pengukuran konduktansi membran bawang bombay yang menunjukkan sebuah garis lurus dengan kemiringan negatif. Nilai kemiringan tersebut sebanding dengan nilai energi *barrier* atau energi aktivasi ion. Untuk membran tanpa direndam dan membran yang direndam berturut-turut didapat energi aktivasinya sebesar $7,67 \times 10^{-21}$ J dan $1,22 \times 10^{-19}$ J.

Gambar 5 memperlihatkan bahwa energi aktivasi yang diperlukan ion untuk melewati membran yang sudah direndam selama 12 jam ternyata lebih besar dibandingkan dengan energi aktivasi untuk melewati membran yang tidak terlebih dahulu direndam. Temuan ini juga mengindikasikan bahwa pori-pori membran setelah direndam mengalami penyempitan. Hal ini sesuai dengan interpretasi yang sudah dikemukakan sebelumnya bahwa setelah direndam selama 12 jam sejumlah air terserap pada membran bawang bombay, sehingga pori-porinya mengalami penyempitan. Dengan menggunakan persamaan (1) rata-rata jari-jari pori membran diperoleh untuk membran tanpa direndam dan yang direndam berturut-turut adalah 2 nm dan 0,13 nm.



Gambar 5. Grafik hubungan antara suhu terhadap konduktansi membran bawang bombay tanpa direndam dan yang direndam selama 12 jam

Gambar 6 memperlihatkan hasil pengukuran konduktansi listrik membran salak pondoh dalam larutan $MgCl_2$ dengan konsentrasi 0,1 mM, 1 mM, 10 mM, dan 100 mM. Terlihat bahwa kemiringan kurva hampir sama pada konsentrasi larutan yang berbeda. Kemiringan kurva yang sama juga didapatkan ketika digunakan larutan elektrolit dengan valensi ion yang berbeda. Hal ini mengindikasikan bahwa membran salak pondoh yang diamati pada penelitian ini tidak bermuatan. Jika pori membran bermuatan, maka ion-ion yang berbeda valensinya atau berbeda konsentrasinya tentu memerlukan energi aktivasi yang berbeda pula ketika melintasi membran.



Gambar 6. Grafik $\ln G$ terhadap $1/T$ membran salak pondoh dalam larutan $MgCl_2$ untuk 4 nilai konsentrasi yang berbeda yang diukur pada rentang suhu (30-60) $^{\circ}C$.

Potensi Pengembangan: Mekanisme Penyumbatan Pori

Penyumbatan (*pore blocking*) pada pori membran merupakan salah satu masalah utama dalam teknologi membran. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mempelajari dan mengatasinya [9-11]. Penyumbatan dapat menyebabkan laju fluks larutan turun secara drastis. Lebih dari itu, penyumbatan juga dapat mengubah pola filtrasi atau purifikasi karena berubahnya ukuran pori atau distribusi ukuran pori. Penyebab terjadinya penyumbatan bisa karena adanya interaksi listrik atau kimia antara filtrat dan membran, bisa juga karena sifat permukaan membran akibat adanya variasi ukuran pori.

Melalui pengukuran konduktansi pada berbagai suhu dapat diamati bagaimana proses penyumbatan berlangsung. Penyumbatan bisa dikelompokkan dalam 2 katagori, yaitu penyumbatan parsial dan penyumbatan penuh. Penyumbatan parsial adalah penyumbatan pada dinding pori tetapi tidak sampai menutup penuh lubang pori. Penyumbatan parsial dapat terjadi karena banyaknya filtrat yang melewati pori

yang besar sehingga sebagian filtrat menempel pada dinding pori. Akibatnya diameter pori mengecil. Penyumbatan penuh adalah penyumbatan yang menutupi pori secara penuh sehingga filtrat tidak bisa lagi melewati pori tersebut. Penyumbatan penuh dapat terjadi karena banyaknya filtrat yang menumpuk di permukaan membran sehingga menutupi pori-pori yang kecil. Akibatnya jumlah pori berkurang.

Dengan mengukur konduktansi membran pada berbagai suhu sebelum dan sesudah filtrasi, dan membuat plot $\ln G$ terhadap $1/T$, maka akan didapat kemungkinan hasilnya sebagai berikut: i) Jika terjadi penyumbatan parsial pada pori-pori yang kecil dan atau pori-pori yang besar, maka energi aktivasi ion akan membesar; ii) Jika terjadi penyumbatan penuh pada pori-pori yang kecil, maka energi aktivasi ionnya akan mengecil karena diameter pori rata-rata membesar. Jika pengamatan ini dilakukan pada beberapa selang waktu selama proses filtrasi, maka mekanisme penyumbatan bisa didapatkan.

Pengamatan mikroskopik ini tanpa merusak karena tanpa perlakuan apapun terhadap membran yang diamati. Membran diukur konduktansi listriknya pada rentang suhu tertentu. Batas minimum dan maksimum suhu yang digunakan tentu saja dapat diatur disesuaikan dengan daya tahan membran terhadap suhu. Berbeda halnya kalau pengamatan menggunakan SEM (*scanning electron microscope*). Sampel yang akan diamati harus diberi perlakuan pelapisan terlebih dahulu agar lebih konduktif, dan tentu hal ini sangat sulit dilakukan kalau yang diamati adalah membran biologi.

KESIMPULAN DAN SARAN

ada penelitian ini telah dilakukan pengukuran konduktansi dan kapasitansi membran bawang bombay yang telah diberi dua perlakuan yang berbeda, yaitu membran bawang bombay tanpa direndam dan membran bawang bombay yang direndam dalam air murni selama 12 jam. Hasilnya menunjukkan bahwa setelah direndam ternyata nilai kapasitansinya meningkat, sedangkan nilai konduktansinya tidak mengalami perubahan. Hasil pengamatan ini mengindikasikan bahwa membran yang direndam sudah banyak menyerap air. Kesimpulan ini juga dikuatkan oleh hasil pengukuran konduktansi pada berbagai suhu yang menunjukkan bahwa pori membran bawang bombay mengalami penyempitan

setelah direndam selama 12 jam akibat banyaknya air yang diserap membran. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa rata-rata radius pori membran tanpa direndam dan yang direndam berturut-turut adalah sekitar 2 nm dan 0,13 nm.

Pada penelitian ini juga telah dilakukan pengukuran konduktansi membran salak pondoh menggunakan berbagai konsentrasi dan valensi ion. Hasilnya adalah bahwa konduktansi membran dalam larutan elektrolit meningkat sesuai dengan peningkatan konsentrasi dan valensi ion larutan. Tetapi dari kurva $\ln G$ terhadap $1/T$ didapatkan kemiringannya relatif sama yang mengindikasikan bahwa membran salak pondoh yang diamati pada penelitian ini relatif tidak bermuatan.

Pengukuran konduktansi pada berbagai suhu ini dapat pula diaplikasikan pada proses filtrasi untuk mengamati bagaimana terjadinya penyumbatan pada membran selama berlangsungnya filtrasi. Penyumbatan pori pada dasarnya bisa dikelompokkan dalam 2 kategori, yaitu penyumbatan parsial dan penyumbatan penuh. Penyumbatan parsial mengakibatkan ukuran pori rata-rata mengecil, sedangkan penyumbatan penuh pada pori membran berukuran kecil akan menghasilkan ukuran pori rata-rata yang membesar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa Program Magister Biofisika Institut Pertanian Bogor karena data yang digunakan pada tulisan ini merupakan hasil seleksi terhadap laporan praktikum mata kuliah Biofisika Membran yang diasuh penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. D. Hecce and A. E. Garcia, "Cell penetrating peptides: how do they do it?", *Journal of Biological Physics*, 33 (2007) 345–356.
- [2] D. Schmidt, Q. X. Jiang and R. MacKinnon. "Phospholipids and the origin of cationic gating charges in voltage sensors", *Nature*, 444 (2006) 775–779.
- [3] S. H. Chung, O. S. Andersen and V. Krishnamurthy, *Biological Membrane Ion Channels: Dynamics, Structure, and Applications*, Springer, 2007.

- [4] J. Juansah, I. W. Budiastra, K. Dahlan and K. B. Seminar, "Electrical Properties of Garut Citrus Fruits at Low Alternating Current Signal and its Correlation with Physicochemical Properties During Maturation", *International Journal of Food Properties*, 17 (7) (2014) 1498-1517
- [5] W. Maulina, J. Juansah and K. Dahlan, "The electrical conductance studies on the chicken-egg membrane in presence of alkali chlorides", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 187 (2018) 012011
- [6] R. M. Guljarani, *Bioelectricity and Biomagnetism*, John Wiley & Sons, 1998.
- [7] H. T. Tien and A. Ottova-Leitmannova, *Membrane Biophysics*, Elsevier, 2000.
- [8] M. Hoch, *Statistical and Thermal Physics: An Introduction*, CRC Press, 2011.
- [9] S. Meng et al., "Membrane fouling and performance of flat ceramic membranes in the application of drinking water purification", *Water*, 11(2606) (2019) 1-16
- [10] H. A. Maddah et al., "Evaluation of various membrane filtration modules for the treatment of seawater". *Applied Water Science*, 8(150) (2018)
- [11] Q. F. Alsalhy, T. M. Albyati and M. A. Zablouk, "A study of the effect of operating conditions on reverse osmosis membrane performance with and without air sparging technique", *Chemical Engineering Communications*, 200 (2013) 1-19.

Estimasi dosis serap sel kanker nasofaring dan lidah dari perlakuan radioterapi konvensional cobalt-60 berbasis MCNPX

Wihantoro*, Aris Haryadi, Bilalodin dan Arif Hidayat

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Jl Dr. Suparno 61 Grendeng, Purwokerto (53123)

*email:wihantoro@unsoed.ac.id

Abstrak- Modifikasi radioterapi diperlukan untuk memaksimalkan dosis serap sel kanker dan meminimalkan dosis terimaan organ sekitarnya. Pada perlakuan kanker nasofaring, target penyinaran PTV dilakukan dengan menggeser posisi obyek 3 cm ke depan dan 2 cm ke atas dari pusat GTV. Penelitian ini menitikberatkan pada penentuan dosis serap radiasi kanker nasofaring dan lidah, dengan teknik penyinaran latero-lateral (sudut 90° dan 270°) dan supraclave (sudut 0°). Berbasis pemrograman MCNPX, berkas sinar gamma dimodelkan berdasar spesifikasi head unit GammaBeam100-80, SSD 80 cm, medan radiasi untuk supraclave (12 x 12) cm² dan (17 x 9) cm² untuk latero-lateral. Hasil menarik yang masih perlu dikaji lanjut adalah, dari total 2,0 Gy per fraksi penyinaran yang ditembakkan, dosis serap gabungan untuk penyinaran latero-lateral dan supraclave dari GTV dan PTV, masing-masing adalah 2,99 Gy dan 2,89 Gy. Sedang dosis terimaan pada lidah dari GTV dan PTV masing-masing adalah 0,16 Gy dan 0,13 Gy yang tergolong aman di bawah batas ambang dosis yang diperbolehkan.

Kata Kunci: Kanker Nasofaring, lidah, latero-lateral, supraclave, GTV dan PTV, dosis serap, MCNPX

Abstract – Modification of radiotherapy were presented to maximize the absorption dose of cancer cells and minimize the received of surrounding organs. As for nasopharyngeal cancer's treatment, the center of the radiation beam were shifted onto a position of 3 cm forward and 2 cm upwards from its GTV's center. This study focuses on the determination of radiation absorption dose for nasopharyngeal and tongue cancers, using radiation techniques of latero-lateral (beam direction of 90° and 270°) and supraclave (0° of beam direction). Using the MCNPX code-programmed, the gamma ray beams were modeled based on the specifications of the head unit of GammaBeam100-80, SSD 80 cm, the radiation field for the supraclave (12 x 12) cm² and (17 x 9) cm² for latero-lateral. As from a total of 2.0 Gy per fraction of gamma beam irradiation, the absorption doses from both supraclave and lateral were 2.99 Gy and 2.89 Gy, each for GTV and PTV areas. Meanwhile, the dose received onto the tongue for the target GTV and PTV were 0.16 Gy and 0.13 Gy, respectively, which was indeed, below the safety dose threshold allowed.

Key words: nasopharyngeal cancer, tongue, latero-lateral, supraclave, GTV dan PTV, absorbed dose, MCNPX

PENDAHULUAN

Sel kanker nasofaring atau kanker nasofaring terletak pada tenggorokan paling atas di belakang rongga hidung, di depan tulang belakang, di atas rongga mulut dan di bawah otak dan mata [1,2]. Perlakuan kanker nasofaring dengan radioterapi dilakukan untuk memaksimalkan dosis serap pada sel kankernya dan mencegah terjadinya penumpukan dosis pada satu atau beberapa organ sekitar. Teknik penyinaran dua medan radiasi, *latero-lateral* dan *supraclave* diterapkan untuk maksud ini[3]. Medan penyinaran *lateral* meliputi daerah tumor primer, sedangkan medan penyinaran *supraclave* meliputi daerah yang mengalami penyebaran pada kelenjar getah bening [4].

Penetapan dosis radiasi total untuk pasien diberikan dengan sistem fraksinasi, yaitu pemberian dosis total dibagi menjadi beberapa dosis radiasi penyinaran dalam jangka waktu tertentu. Menurut Komite Penanggulangan Kanker Nasional [3] pemberian dosis radiasi dilakukan selama 5 kali dalam seminggu, dengan dosis per fraksi/hari sebesar 4 Gy yang terdiri dari 2 Gy untuk teknik *latero-lateral* dan 2 Gy untuk *supraclave*. Juga dosis total yang diarahkan ke sel kanker nasofaring sebesar 60 - 70 Gy untuk penyinaran *latero-lateral* dan 50 Gy untuk *supraclave*[4,5].

Distribusi dosis radiasi Co-60 pada sel kanker dan organ sekitarnya didalam tubuh pasien tidak dapat diukur secara langsung menggunakan dosimeter. Oleh sebab itu diperlukan suatu simulasi yang dapat

menentukan distribusi dosis radiasi yang diserap oleh tubuh. Salah satu metode yang digunakan adalah metode Monte Carlo dengan program MCNPX. Tujuan kajian ini adalah memodelkan *phantom* organ kepala, leher dan dada laki-laki dewasa serta menentukan distribusi dosis serap sinar gamma dari sumber Cobalt-60 pada kanker nasofaring dan organ sekitar yang fokus pada organ lidah dan kelenjar getah bening. Target penyinaran radiasi dibedakan dalam kontur GTV (*gross tumour volume*) pada pusat sel kanker nasofaring dan PTV (*planning tumour volume*) pada area organ-organ sekitar kanker. Organ lidah dijadikan fokus pada kajian ini, karena adanya gejala pasien yang mengalami gangguan tidak bisa meludah setelah mengalami perlakuan penyinaran kanker nasofaring [4,5,6].

LANDASAN TEORI

Fluks Foton dan Fluks Energi

Fluks foton (ϕ) adalah jumlah foton (dN) per satuan luas tertentu (dA).

$$\phi = \frac{dN}{dA} \quad (1)$$

Satuan fluks foton adalah foton/m².

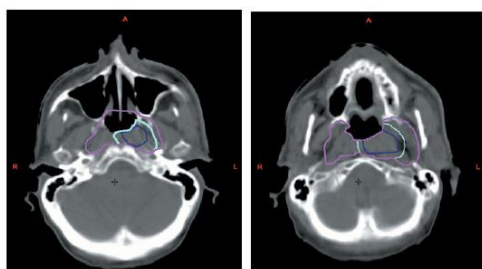
Fluks energi (ψ) didefinisikan sebagai jumlah energi (dE) yang melintasi area (dA).

$$\psi = \frac{dE}{dA} \quad (2)$$

Fluks energi memiliki satuan MeV/m²[7].

Definisi Volume Kanker

Definisi volume kanker merupakan prasyarat dalam perencanaan perawatan 3-D dan untuk memperoleh dosis yang akurat. Beberapa sasaran dan volume struktur kritis yang dapat membantu dalam proses perencanaan pengobatan dan memberikan dasar untuk perbandingan hasil pengobatan [5].



Gambar 1. garis Biru (GTV), Cyan (CTV), Ungu (PTV) dan di luar garis adalah organ beresiko [5,6].

METODE

Arah penyinaran *supraclave* (sudut 0°) merujuk pada sumbu-y positif koordinat kartesian dan *latera-lateral* (sudut 90° serta 270°).merujuk pada sumbu-x positif dan negatif, dengan posisi obyek yang disinari horisontal (tidur) [5].

Geometri organ memanfaatkan input dalam program MCNPX *Visual Editor* meliputi densitas, material penyusun, bentuk dan ukuran *surface* [8,9]. Pemodelan organ kepala dan leher laki laki dewasa dibentuk mirip dengan aslinya dan bentuk geometri sesuai referensi yang dikeluarkan *phantom* Taiwan dengan spesifikasi laki-laki dewasa berumur 20 - 66 tahun, berat badan 69 kg dan tinggi badan 168,7 cm serta panjang kepala dan leher 27 cm. Organ-organ yang terdapat di dalam geometri kepala dan leher yaitu nasofaring, mata, lidah dan kelenjar tiroid [10].

Selain *setting input* geometri, diperlukan juga *setting input* transport foton diantaranya jumlah foton yang dipancarkan sebanyak 2×10^8 foton serta *tally f5* dan *f6* untuk menghitung fluks energi per satuan luas dan dosis serap masing-masing organ dalam *phantom* [9].

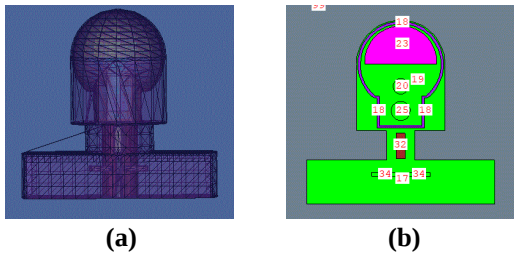
HASIL DAN PEMBAHASAN

Teknik *latero-lateral* target penyinaran disimulasikan pada sel kanker daerah GTV (daerah pusat pertumbuhan) dan PTV (daerah bawah sel kanker). Sedangkan teknik *supraclave* target penyinaran disimulasikan pada daerah kelenjar getah bening di area sekitar dada. Target penyinaran dibuat berbeda guna mengetahui perbandingan distribusi dosis serap pada masing-masing target serta agar dapat merusak sel kanker dengan maksimum dan tidak terjadi penumpukan dosis radiasi pada bagian organ tertentu sehingga jaringan sehat yang terkena radiasi tidak mengalami kerusakan yang parah [11].

Model Phantom Organ Kepala, Leher dan Dada Laki-laki Dewasa

Bentuk geometri, densitas dan volume komposisi tiap organ dibuat berdasar model *Phantom Taiwanese Reference Man* (TRM) yang dibuat oleh Chang dkk. [10]. Pemodelan organ kepala, leher dan dada laki-laki dewasa secara tepat tidaklah mudah untuk dilakukan. Oleh karena itu dilakukan pendekatan dengan membuat geometri organ menggunakan bentuk silinder dan bola sehingga hampir menyerupai geometri organ sebenarnya (**Gambar 2**). Organ

yang disimulasikan adalah kanker nasofaring, mata, lidah, dan kelenjar tiroid.



Gambar 2. Geometri *phantom* organ kepala, leher dan dada laki-laki dewasa hasil simulasi yang dipotong pada titik pusat kanker bidang-xy (a) bentuk 3D dan (b) bentuk 2D

Geometri nasofaring dideskripsikan berupa bola berdiameter 1,55 cm, densitas $1,03 \text{ g/cm}^3$, dan volume $1,95 \text{ cm}^3$. Sementara geometro lidah bentuknya berupa silinder, berdiameter 3,88 cm, panjang 2,89 cm, densitas $1,03 \text{ g/cm}^3$, dan volume $69,54 \text{ cm}^3$.

Dosis Serap per organ

Pada penyinaran *lateral* dilakukan dua target penyinaran yaitu target pusat sel kanker (GTV) dan bawah sel kanker (PTV). Sedangkan penyinaran *supraclave* target penyinaran pada daerah kelenjar getah bening. Penyinaran dengan target radiasi berbeda bertujuan agar sel kanker nasofaring memperoleh dosis serap maksimum dan homogen serta tidak merusak jaringan normal sekitar [9,12]. Dosis serap setiap organ dihasilkan dari masing-masing penyinaran dengan target pusat sel kanker dan penyinaran target bawah sel kanker dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 1. Dosis serap untuk target penyinaran GTV

Organ	sp-clave	latero-lateral		
	0° (max 2 Gy)	90° (max 1 Gy)	270° (max 1 Gy)	Gab (max 2 Gy)
Kanker NF	0,005	1,497	1,496	2,998
Mata kana	0,004	0,657	0,656	1,317
Mata kiri	0,004	0,597	0,596	1,197
Lidah	0,002	0,080	0,080	0,162
Kel Tiroid	0,116	0,026	0,026	0,168

Target penyinaran *supraclave* (sudut 0°) berada pada bagian bawah leher daerah supraklavikula yang terdapat kelenjar getah bening. Daerah ini disinari karena potensi penyebaran sel kanker yang besar atau sudah

ada sel kanker yang tersebar pada kelenjar getah bening penyebab sel kanker [13]. Target penyinaran sudut 0° tidak diarahkan tepat pada sel kanker, karena organ sekitar bagian atas nasofaring terdapat banyak organ vital yang sensitif terhadap radiasi dan dapat menimbulkan efek samping dan komplikasi. Sehingga dosis serap sel kanker yang didapat pada penyinaran sudut 0° sangat kecil.

Tabel 2.. Dosis serap untuk target penyinaran PTV (bawah pusat sel kanker)

Organ	latero-lateral		
	90° (max 1 Gy)	270° (max 1 Gy)	Gab (max 2 Gy)
Kanker NF	1,446	1,446	2,898
Mata kanan	0,184	0,183	0,371
Mata kiri	0,270	0,269	0,543
Lidah	0,064	0,064	0,130
Tiroid	0,079	0,079	0,274
Getah Ben	0,006	0,006	0,596

Hasil simulai yang diperoleh dari teknik penyinaran *supraclave* dan *lateral* menunjukkan organ-organ yang berada pada posisi yang lebih dalam dan lebih jauh dari sel kanker dan kelenjar getah bening sebagai target radiasi akan menyerap dosis yang lebih rendah. Jika dibandingkan antara hasil simulasi penyinaran *supraclave* dan *latero-lateral* untuk target GTV dan PTV terdapat perbedaan terimaan dosis pada setiap organ. Dibanding kanker nasofaring dan lidah, kelenjar tiroid menyerap dosis lebih tinggi untuk penyinaran *supraclave* (sudut 0°) dibandingkan dengan teknik *lateral* (sudut 90° dan 270°) target radiasi GTV maupun PTV. Hal tersebut karena penyinaran *supraclave*, target radiasi adalah daerah kelenjar getah bening. Sedangkan sel kanker, mata, dan esofagus menyerap dosis lebih tinggi saat dilakukan penyinaran *lateral* (sudut 90° dan 270°) target pusat sel kanker. Hal itu disebabkan organ-organ tersebut adalah target radiasi sehingga terkena lebih banyak radiasi dibandingkan organ-organ lainnya. Organ esofagus, trakea dan tulang belakang menyerap dosis lebih tinggi pada penyinaran *lateral* (sudut 90° dan sudut 270°) target radiasi bawah sel kanker.

Secara umum dosis total yang diberikan pada sel kanker nasofaring adalah sebesar 70 Gy[3,4]. Dosis total radiasi dibagi menjadi dosis yang lebih kecil disebut fraksi. Dosis serap radiasi yang direncanakan pada target sel kanker setiap fraksi penyinaran adalah 4 Gy dalam satu

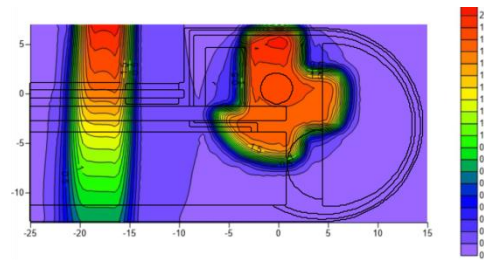
kali penyinaran yang terdiri dari 2 Gy untuk penyinaran *lateral* (sudut 90° dan 270°) dan 2 Gy untuk penyinaran *supraclave*. Sedangkan organ normal sekitar sel kanker tidak boleh menerima dosis melebihi batas ambang, yaitu 1,6 Gy [13].

Berdasarkan hasil simulasi dosis serap total yang didapatkan nilai dosis serap pada sel kanker target penyinaran GTV maupun PTV melebihi batas penyinaran per fraksi yaitu 2 Gy. Sedangkan penyinaran *supraclave* dosis serap yang didapat kurang memenuhi dosis yang ditetapkan yaitu 2 Gy. Hal tersebut disebabkan oleh faktor geometri *phantom* yang tidak rata, sel kanker terletak lebih dekat permukaan, sehingga saat penyinaran radiasi datang tegak lurus tepat mengenai sel kanker yang menyebabkan perbedaan terimaan dosis serap. Selain itu faktor densitas, volume dan massa yang terdapat pada masing-masing organ mempengaruhi setiap jumlah dosis serap, semakin besar massa organ maka semakin kecil jumlah dosis serap, begitu sebaliknya semakin kecil massa organ maka semakin banyak dosis yang diserap [14].

Distribusi Dosis Serap Total (kurva idosis) target GTV dan PTV

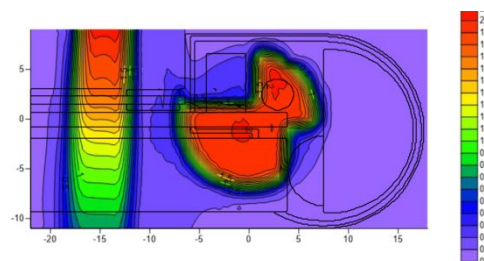
Distribusi dosis serap total pada Phantom organ kepala sampai dada dibuat dalam bentuk kontur untuk mengetahui sebaran dosis yang diterima terhadap kedalaman. Kontur ini dapat menunjukkan distribusi dosis serap dalam satu sayatan Phantom (koordinat xz), yaitu pada titik pusat sel kanker menuju kedalaman (sumbu z) dan menuju sisi kanan dan kiri Phantom (sumbu x) agar dapat melihat sebaran dosis radiasi terhadap organ-organ yang berada disekitar sel kanker. Distribusi dosis serap ini diperoleh dari hasil running program MCNPX menggunakan *tally f5* yang menghasilkan nilai fluks energi dengan satuan MeV/cm², kemudian dikonversi ke satuan dosis serap. Distribusi dosis serap total untuk target GTV disajikan pada **Gambar 3**.

Luas lapangan pada penyinaran *supraclave* berukuran (17 x 9) cm². Penyinaran *supraclave* (sudut 0°) target yang diradiasi adalah kelenjar getah bening (bagian dada), sehingga sebaran dosis serap yang paling besar diterima adalah bagian dada bukan bagian pusat sel kanker (daerah kepala).



Gambar 3. Kurva isodosis gabungan tiga penyinaran (sudut 0° , 90° dan 270°) untuk target GTV untuk sayatan koordinat-xz.

Kurva isodosis (**Gambar 3**) terlihat merata ke organ sekitar sel kanker, karena pemberian lapangan radiasi yang luas sehingga radiasi sumber mempunyai jangkauan luas juga pada organ sekitar [14]. Hasil kontur penyinaran *lateral* dengan target radiasi daerah pusat sel kanker (GTV) menunjukkan bahwa yang paling tinggi terkena radiasi adalah permukaan pada daerah hidung, akibatnya penyinaran dengan target radiasi pusat sel kanker jika terus menerus dilakukan akan menimbulkan efek berbahaya. Sehingga dilakukannya penyinaran *latero-lateral* dengan target penyinaran yang berada pada daerah bawah sel kanker, PTV (**Gambar 4**) dengan merujuk pada penyinaran teknis di RSUD Margono



Gambar 4. Kurva isodosis gabungan tiga penyinaran (sudut 0° , 90° dan 270°) untuk target PTV untuk sayatan koordinat-xz.

KESIMPULAN

Total Dosis serap (gabungan) target radiasi GTV untuk kanker nasofaring terekam sebesar 2,99 Gy dan organ lidah 0,162 Gy, sedangkan pada target radiasi PTV, kanker nasofaring menerima 2,89 Gy, dan organ lidah 0,130 Gy.

UCAPAN TERIMA KASIH

Disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat LPPM UNSOED atas dana penelitian dan Unit Radioterapi RSUD Prof. Margono Soekarjo atas

akses data dan rujukan fasilitas dan kerjasamanya dalam penelitian ini.

PUSTAKA

- [1] Hasan, Isnaniah dan Irwan Ramli, "Brakhiterapi Nasofaring. *Radioterapi & Onkologi Indonesia*. 5(2) (2014) 77 – 84
- [2] Asroel, A Harry, Penatalaksa-naan Radioterapi pada Karsinoma Nasofaring. Fakultas Kedokteran. Universitas Sumatera Utara, 2002.
- [3] KPKN, Komite Penanggulangan Kanker Nasional. *Pedoman Nasional Pelayanan Kedokteran Kanker Nasofaring*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2017.
- [4] Barrett, Ann., Dobbs, Jane., Morris, Stephen, dan Roques, Tom., *Practical Radiotherapy Planning. Fourth Edition*. Hachette UK Company 338 Euston Road, London NW1 3B”H, 2009.
- [5] Çeçen, Yiğit., Monte Carlo radiation transport in external beam radiotherapy”. *Bitlis Eren Univ J Sci & Technol.*, 3 (2013) 1-5
- [6] Immanuel, Richard B., “Evaluasi Verifikasi Lapangan Radiasi Pada Kasus Kanker Serviks Dan Kanker Nasofaring Menggunakan Pesawat Terapi Co-60”. *Skripsi*. Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Program Studi S1 Fisika Peminatan Fisika Medis Dan Biofisika Depok, 2010.
- [7] Khan, F. M., *The Physics of Radiation Therapy*. Edisi Kelima. William and Wilkins. Maryland. USA, 2014.
- [8] Pelowitz, Denise. B., MCNPX User Manual Versi 2.6.0. LA-CP-07-1473. Los Alamos National Laboratory. New Mexico, 2008.
- [9] X-5 Monte Carlo Team, MCNP – “A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 5”. LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory. New Mexico, 2003.
- [10] Chang, Shu-Jun., Shih-Yen Hung, Yan-Lin Liu, Shiang-Huei Jiang, Construction of Taiwanese Adult Reference Phantoms for Internal Dose Evaluation. *PLoS ONE*, 11(9) (2016) 1 - 14
- [11] Santoso, Boedy Setya., Bakti Surarso, Widodo Ario Kentjono, Radioterapi Pada Karsinoma Nasofaring, *Jurnal THT-KL*, 2(3) (2009) 134 - 141
- [12] Lazarine, Alexis D., *Medical Physics Calculations With MCNPTM: A Primer*. Thesis. Texas A&M University, 2006
- [13] Berris, T., Mazonakis, M., Stratakis, J., Tzedakis, A., Fasoulaki, A., Damilakis, J., “Calculation of Organ Doses From Breast Cancer Radiotherapy: A Monte Carlo Study”, *Journal Of Applied Clinical Medical Physics*, 14(1) (2013) 133–146.
- [14] Nugraheni, D.T., Gunawan, V., Anam, C., “Prediction of 2D Isodose Curve on Arbitrary Field Size in Radiation Treatment Planning System (RTPS)”, *Jurnal Sains dan Matematika*, 23(1) (2015) 7-13