

DAFTAR ISI

Sintesis Graphene Oxide (GO) berbasis arang dengan metode <i>liquid phase exfoliation</i> (LPE) (Zahra Izzati Aziz*, Arif Tjahjono).....	1
Simulasi dosis serap kanker payudara dengan empat sudut penyinaran menggunakan teknik radioterapi konformal tiga dimensi (Wihantoro*, Abdul Aziz Toyib, Aris Haryadi, Efita Pratiwi Adi)	9
Analisis struktur batuan di bawah permukaan kompleks arkeologis situs liyangan menggunakan <i>electrical resistivity tomography</i> dan <i>analytic signal</i> geomagnetik (Wrego Seno Giamboro*, Hafiz Hamdalah, Wahyu Hidayat, Bambang Kuncoro Prasangko, Bonang Surya Utama, and Tegar Anandya Fathoni).....	17
Rancang bangun data logger berbasis Arduino sebagai penyimpan data (Hartono, Farzand Abdullatif*, Abdullah NA, Sehad, Sugito, dan Simon Petrus RS)	23
Identifikasi struktur geologi bawah permukaan berdasarkan pemodelan 3D data gravitasi (studi kasus daerah potensi panas bumi Kepahiang) (Sukmaji Anom Raharjo*, Aditya Verry Saputra, dan Tony Rahadinata).....	28
Optimasi dosis serap pengobatan brachytherapy dengan variasi jumlah <i>seeds</i> radioisotop I-125 pada kasus kanker otak menggunakan simulasi MCNPX (Muhammad Fikri Aziz Mustofa*, M. Helmi Hakim, Ulfa Niswatul Khasanah, Fajar Arianto, Prasetyo Basuki).....	36

Sintesis Graphene Oxide (GO) berbasis arang dengan metode *liquid phase exfoliation* (LPE)

Zahra Izzati Aziz*, Arif Tjahjono

Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi,

Universitas Islam Negeri (UIN) Syarif Hidayatullah Jakarta

Jl. Ir H. Juanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat Timur, Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

*email: zahraizzatiaiz@gmail.com

Abstrak - Telah dilakukan penelitian tentang sintesis *graphene oxide* (GO) berbasis arang menggunakan metode *Liquid Phase Exfoliation* (LPE) dengan melakukan *milling* menggunakan blender selama 3 jam pada campuran 2 gram serbuk arang, 250 ml aquades, dan surfaktan berupa sabun cuci piring sebanyak 0,75 ml untuk mengeksfoliasi lapisan karbon. Terdapat tiga jenis arang yang digunakan, yaitu arang kayu jati, arang tempurung kelapa, dan isi pensil karbon 8B yang ada di pasaran. Hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan spektroskopi *energy-dispersive X-ray* (EDX), spektrofotometer UV-Vis, dan spektroskopi Raman. Hasil karakterisasi EDX menunjukkan bahwa kandungan unsur karbon (C) paling optimum terdapat pada arang kayu jati dengan nilai 90,15 *Mass%* atau 92,88 *At%*, sedangkan pada arang tempurung kelapa nilainya 76,25 *Mass%* atau 82,74 *At%*, dan pada isi pensil karbon 8B nilainya 64,11 *Mass%* atau 75,34 *At%*. Hasil karakterisasi UV-Vis menunjukkan bahwa ketiga sampel telah memiliki panjang gelombang yang sesuai dengan panjang gelombang GO, yaitu 220 nm – 270 nm. Hasil karakterisasi Raman menunjukkan bahwa impuritas ketiga sampel masih cukup tinggi yang ditandai dengan intensitas puncak D yang lebih tinggi dibandingkan puncak G, hal ini tidak lepas dari kualitas arang yang digunakan. Lapisan yang dihasilkan dari ketiga sampel berupa *multilayer*. Berdasarkan perhitungan nilai energi celah pita menggunakan metode *Tauc Plot* diketahui bahwa ketiga sampel berada dalam rentang material semikonduktor dengan nilai energi celah pita terkecil yaitu arang kayu jati sebesar 3,23 eV.

Kata kunci: Covid-19, Suhu tubuh, Denyut jantung, Saturasi oksigen

Abstract – Research has been conducted on the synthesis of charcoal-based graphene oxide (GO) using the *Liquid Phase Exfoliation* (LPE) method by milling using a blender for 3 hours on a mixture of 2 grams of charcoal powder, 250 ml of distilled water, and surfactants in the form of dish soap as much as 0.75 ml to exfoliate the carbon layer. There are three types of charcoal used, namely teak wood charcoal, coconut shell charcoal, and 8B carbon pencil fill on the market. The synthesis results were characterized using *energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDX), *UV-Vis spectrophotometer*, and *Raman spectroscopy*. The results of EDX characterization show that the most optimal carbon (C) element content is found in teak wood charcoal with a value of 90.15 *Mass%* or 92.88 *At%*, while in coconut shell charcoal the value is 76.25 *Mass%* or 82.74 *At%*, and in 8B carbon pencil fill the value is 64.11 *Mass%* or 75.34 *At%*. *UV-Vis* characterization results showed that all three samples had wavelengths corresponding to GO wavelengths, which were 220 nm – 270 nm. Raman characterization results showed that the impurity of the three samples was still quite high which was characterized by a higher peak intensity of D than the G peak, this could not be separated from the quality of the charcoal used. The resulting layer of all three samples is *multilayer*. Based on the calculation of the energy value of the bandgap using the *Tauc Plot* method it is known that the three samples are in the range of semiconductor materials with the smallest bandgap energy value, teak wood charcoal of 3.23 eV.

Key words: charcoal, graphene oxide, *Liquid Phase Exfoliation*

PENDAHULUAN

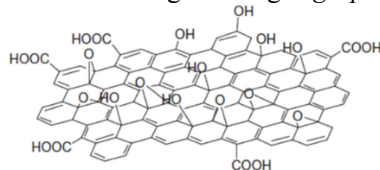
Karbon merupakan unsur keenam dalam tabel periodik yang menjadi salah satu topik yang paling menarik dan banyak dikembangkan dalam ilmu material, khususnya nanomaterial. Hal ini dikarenakan karbon memiliki modifikasi alotrop yang sebagian sifatnya bisa benar-benar berlawanan [1]. Sejak tahun 1985, alotrop karbon mulai berkembang dengan kemunculan

fullerene yang pertama kali diamati oleh Kroto dkk. Penemuan-penemuan berikutnya berkembang hingga ke alotrop karbon sintetis, termasuk di dalamnya sintesis karbon *nanotube* pada tahun 1991 dan penemuan kembali *graphene* pada tahun 2004 [2].

Graphene dikenal sebagai lapisan tunggal atom karbon padat yang dikemas ke dalam kisi kristal sarang lebah dua dimensi (2D) [3].

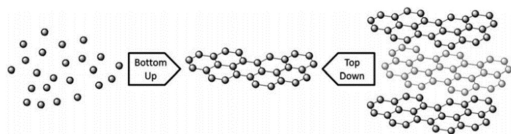
Selama lebih dari satu dekade terakhir, *graphene* telah menjadi salah satu topik penting yang dipelajari dalam bidang nanomaterial karena struktur dua dimensi (2D) dan kumpulan sifat fisiknya yang unik [4].

Terkait topik mengenai *graphene*, dikenal pula modifikasi material dari *graphene* yaitu *graphene oxide* (GO). Struktur GO dapat didefinisikan sebagai lembaran *graphene* yang memiliki gugus fungsi oksigen pada tepi dan permukaan bidangnya seperti yang digambarkan pada **Gambar 1**. Kehadiran gugus fungsi oksigen pada GO menjadikan material ini memiliki potensi yang besar untuk diaplikasikan pada berbagai bidang, seperti penggunaan elektroda berbasis GO untuk diaplikasikan dalam kimia elektroanalitik dan sensor elektrokimia. Selain itu, salah satu keunggulan dari GO adalah proses sintesisnya yang jauh lebih mudah dibandingkan dengan *graphene* [5].



Gambar 1. Struktur pada GO [6]

Secara umum, sintesis *graphene* sendiri terbagi menjadi dua jenis metode, yaitu *top-down* dan *bottom-up* seperti yang digambarkan pada **Gambar 2**. Metode *top-down* adalah proses pemecahan lapisan grafit yang ditumpuk untuk menghasilkan lembaran *graphene* tunggal. Sedangkan metode *bottom-up* adalah proses mensintesis *graphene* dari molekul karbon sehingga membentuk *graphene* [7].



Gambar 2. Skema metode *bottom-up* dan *top-down* dalam sintesis *graphene* [7].

Metode *bottom-up* dapat menghasilkan material *graphene* yang memiliki cacat jauh lebih sedikit dibandingkan dengan metode *top-down*. Meskipun demikian, metode *top-down* lebih unggul dalam hal produksi *graphene* dalam skala besar dikarenakan proses produksinya yang lebih mudah [8]. Metode dengan rute *top-down* yang utama diantaranya terdapat metode *Liquid Phase Exfoliation* (LPE) dan *Mechanical Exfoliation* (ME) [9].

Beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan metode LPE dalam proses sintesis *graphene* maupun GO oleh Eswaraiyah Varla dkk (2014) [4], Wiwid Jarinda (2017) [10], dan Yuditha Ignasia Bete dkk (2019) [11]. Dibuktikan bahwa grafit ataupun arang dapat disintesis mejadi GO menggunakan metode LPE dengan blender dan surfaktan sebagai media bantu eksfoliasi.

Proses sintesis GO berbasis arang menggunakan metode LPE dengan blender dan surfaktan untuk mengeksfoliasi lapisan karbon dilakukan pada penelitian ini. Ada tiga jenis arang yang akan digunakan, yaitu arang kayu jati, arang tempurung kelapa, dan isi pensil karbon 8B yang ada di pasaran. Penggunaan ketiga jenis arang tersebut didasarkan pada kemudahan dalam mendapatkan sumber bahan. Hasil sintesis GO kemudian dikarakterisasi menggunakan spektroskopi *energy-dispersive X-ray* (EDX), spektrofotometer UV-Vis, dan spektroskopi Raman. Hasil penelitian ini diharapkan terbentuk material GO dengan metode yang sederhana, selain itu juga akan diperoleh informasi mana di antara ketiga jenis arang tersebut yang akan menghasilkan material GO yang paling optimum.

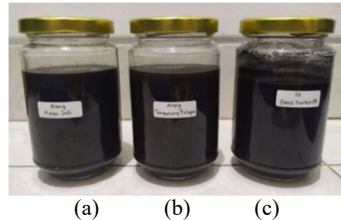
METODE PENELITIAN

A. Sintesis GO

Hal pertama yang dilakukan adalah menghaluskan arang kayu jati, arang tempurung kelapa, dan isi pensil karbon 8B menggunakan mortar hingga menjadi serbuk halus. Khusus untuk isi pensil karbon 8B, sebelumnya dipisahkan terlebih dahulu dari kayu pensil menggunakan *cutter*. Ketiga jenis arang kemudian diayak hingga ukuran 200 mesh. Masing-masing jenis arang ditimbang sebanyak 2 gram untuk pengujian menggunakan spektroskopi EDX dan sebanyak 2 gram lainnya untuk sintesis GO. Tahapan berikutnya, persiapan larutan sabun cuci piring sebanyak 0,75 ml dan aquades sebanyak 250 ml.

Seluruh bahan yang sudah disiapkan dimasukkan ke dalam blender untuk dilakukan proses *milling* dengan kecepatan konstan selama 3 jam dengan interval waktu setiap 15 menit dilakukan *restart* selama 15 menit. Total waktu proses *milling* dan *restart* selama 6 jam. Cairan sampel hasil *milling* dimasukkan ke dalam botol sampel 300 ml untuk didiamkan selama kurang lebih 3 hari. Cairan sampel kemudian diambil

menggunakan pipet tetes dan dimasukkan ke dalam botol sampel 20 ml untuk diuji menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan spektroskopi Raman. Cairan hasil sintesis GO pada penelitian ini disajikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Hasil sintesis GO pada sampel (a) Arang kayu jati (b) Arang tempurung kelapa (c) Isi pensil karbon 8B

Penampakan ketiga sampel pada **Gambar 3**, terlihat bahwa ketiganya memiliki warna yang hampir seragam, yaitu hitam pekat.

B. Karakterisasi Material

Karakterisasi Spektroskopi EDX

Instrumen spektroskopi EDX yang digunakan adalah JEOL JSM 6510 LA. Rentang energi yang digunakan yaitu 0 – 20 keV.

Karakterisasi Spektrofotometer UV-Vis

Instrumen spektrofotometer UV-Vis yang digunakan adalah Agilent Cary 60. Rentang panjang gelombang yang digunakan yaitu 200 nm – 800 nm.

Karakterisasi Spektroskopi Raman

Instrumen spektroskopi Raman yang digunakan adalah HORIBA - *The LabRAM HR Evolution Raman Microscopes*. Panjang sinar laser yang digunakan adalah 785 nm dan grating 600g/mm. Rentang pergeseran Raman yaitu $200 \text{ cm}^{-1} - 3000 \text{ cm}^{-1}$.

C. Perhitungan Energi Celah Pita dengan Metode Tauc Plot

Perhitungan energi celah pita menggunakan metode *Tauc Plot* membutuhkan data spektrum serapan UV-Vis [12]. Metode ini memanfaatkan grafik linear hubungan antara E (eV) pada sumbu horizontal (sumbu-x) dan $(\alpha h\nu)^{1/m}$ pada sumbu vertikal (sumbu-y) [13]. Persamaan untuk memperoleh nilai energi celah pita disajikan pada persamaan (1).

$$(\alpha h\nu)^{1/m} = B(h\nu - E_g) \quad (1)$$

Nilai α yang merupakan nilai koefisien absorptansi yang didapatkan dengan menggunakan persamaan $\alpha = A \frac{1}{\log(e)L}$ di mana A adalah nilai absorptansi, nilai $\log(e) = 0,4343$, dan L adalah lebar kuvet, di mana pada penelitian ini besarnya adalah 1 cm. Nilai energi foton $E = h\nu = hc/\lambda$ didapatkan dengan memasukkan nilai $hc = 1240 \times 10^{-9} \text{ eVm}$ yang diperoleh dari persamaan Planck dan nilai panjang gelombang spektrum UV-Vis. Nilai m pada perhitungan ini menggunakan nilai $m = 1/2$ yang berarti *direct allowed transition* [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

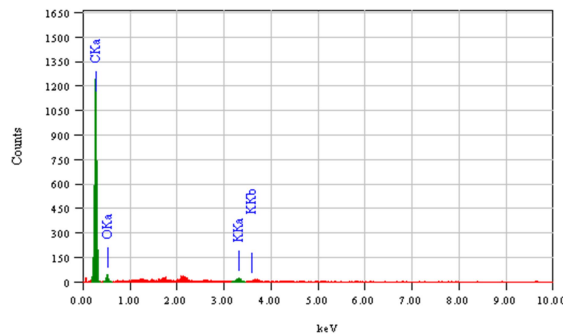
A. Analisis Hasil Karakterisasi Spektroskopi EDX

Ketiga jenis arang yang telah dihaluskan dan diayak dikarakterisasi menggunakan spektroskopi EDX. Hasil karakterisasi EDX menunjukkan bahwa ketiga jenis arang secara kualitas masih belum optimal dikarenakan masih terdapat banyak unsur-unsur yang tidak dikehendaki yang terdeteksi oleh EDX. Hal tersebut dapat disebabkan karena belum sepenuhnya proses karbonisasi dari ketiga jenis arang yang digunakan sebagai bahan baku sampel.

Secara prinsip proses karbonisasi adalah pembakaran biomassa tanpa kehadiran oksigen, sehingga hanya zat yang mudah menguap yang dilepaskan, sedangkan karbon tetap berada di dalamnya. Pada proses ini, suhu menjadi salah satu faktor penting karena berkaitan dengan kualitas arang yang dihasilkan [14]. Berkaitan dengan hal tersebut, kualitas arang yang digunakan tentunya akan berdampak terhadap kualitas material GO yang akan dihasilkan. Spektrum EDX yang dihasilkan dari arang kayu jati disajikan pada **Gambar 4**, dan rincian komposisi unsur penyusun arang kayu jati pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi unsur penyusun arang kayu jati

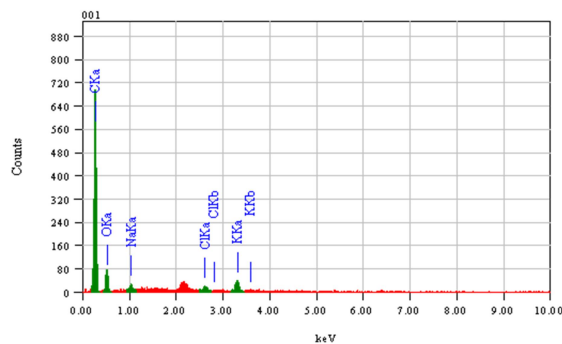
Elemen	Mass%	At%
C	90,15	92,88
O	8,77	6,78
K	1,08	0,34



Gambar 4. Spektrum EDX arang kayu jati

Tabel 1 menunjukkan unsur karbon (C) mendominasi dengan nilai 90,15 *Mass%* atau 92,88 *At%* menyatakan bahwa proses karbonisasi dari arang kayu jati yang digunakan pada penelitian ini sudah cukup baik, meskipun masih belum sempurna. Hal tersebut ditunjukkan dengan masih cukup tingginya kandungan oksigen (O) dengan nilai 8,77 *Mass%* atau 6,77 *At%*.

Spektrum EDX yang dihasilkan dari arang tempurung kelapa disajikan pada Gambar 5, dan rincian komposisi unsur penyusun arang tempurung kelapa pada Tabel 2.



Gambar 5. Spektrum EDX arang tempurung kelapa

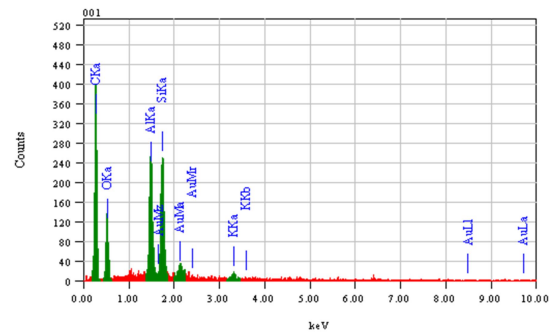
Tabel 2. Komposisi unsur penyusun arang tempurung kelapa

Elemen	Mass%	At%
C	76,25	82,74
O	19,26	15,63
Na	0,87	0,49
Cl	0,74	0,27
K	2,61	0,87

Tabel 2 menunjukkan unsur C mendominasi dengan nilai 76,25 *Mass%* atau 82,74 *At%* menyatakan bahwa proses karbonisasi dari arang tempurung kelapa yang digunakan pada penelitian ini masih belum sempurna yang terlihat dari kandungan unsur C yang masih relatif rendah, meskipun unsur

tersebut paling dominan dari semua unsur yang terdeteksi EDX. Selain itu, ada beberapa unsur yang tidak dikehendaki, terutama unsur O yang memiliki nilai *Mass%* dan *At%* yang cukup besar.

Spektrum EDX yang dihasilkan dari isi pensil karbon 8B disajikan pada Gambar 6, dan rincian komposisi unsur penyusun isi pensil karbon 8B pada Tabel 3.



Gambar 6. Spektrum EDX isi pensil karbon 8B

Tabel 3. Komposisi unsur penyusun isi pensil karbon 8B

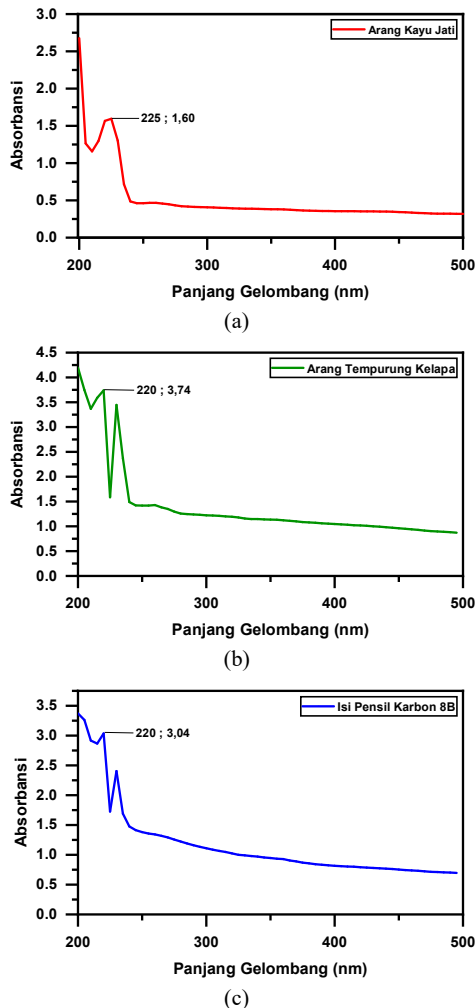
Elemen	Mass%	At%
C	64,11	75,34
O	19,96	17,61
Al	5,79	3,03
Si	7,15	3,59
K	0,72	0,26
Au	2,27	0,16

Tabel 3 menunjukkan unsur C merupakan unsur yang mendominasi dengan nilai sebesar 64,11 *Mass%* atau 75,34 *At%*. Seperti halnya arang tempurung kelapa, arang yang berasal dari isi pensil karbon 8B juga memiliki kandungan unsur C yang relatif rendah yang dapat disebabkan dari proses karbonisasi yang tidak optimum. Selain itu, terdapat unsur aluminium (Al) dan silikon (Si) yang terdeteksi. Keberadaan kedua unsur tersebut dapat mewakili keberadaan tanah liat sebagai bahan penyusun pensil [15].

B. Analisis Hasil

Karakterisasi Spektrofotometer UV-Vis

Hasil karakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis berupa spektrum panjang gelombang dan absorbansi. Spektrum UV-Vis yang dihasilkan dari setiap sampel disajikan pada Gambar 7, dan nilai panjang gelombang dan absorbansi yang dihasilkan pada setiap sampel pada Tabel 4.



Gambar 7. Spektrum UV-Vis sampel (a) Arang kayu jati (b) Arang tempurung kelapa (c) Isi pensil karbon 8B

Tabel 4. Nilai panjang gelombang dan absorbansi pada setiap sampel

Nama Sampel	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi
Arang Kayu Jati	225	1,60
Arang Tempurung Kelapa	220	3,74
Isi Pensil Karbon 8B	220	3,04

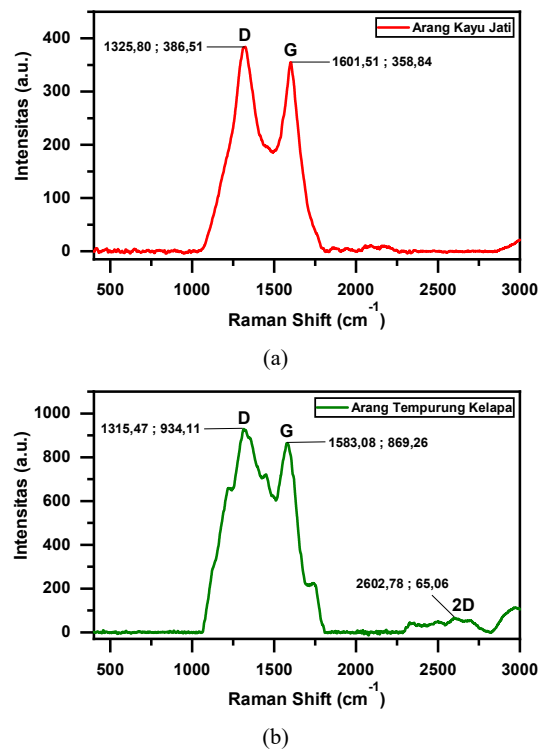
Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai panjang gelombang pada ketiga sampel berada dalam rentang nilai panjang gelombang dari GO, yaitu 220 nm – 270 nm dengan karakteristik GO yang dihasilkan berupa *multilayer* [11]. Sampel arang kayu jati memiliki nilai panjang gelombang tertinggi yaitu 225 nm. Nilai tersebut menjadi nilai yang paling jauh dari nilai minimum rentang panjang gelombang GO yang menandakan sampel arang kayu jati menjadi

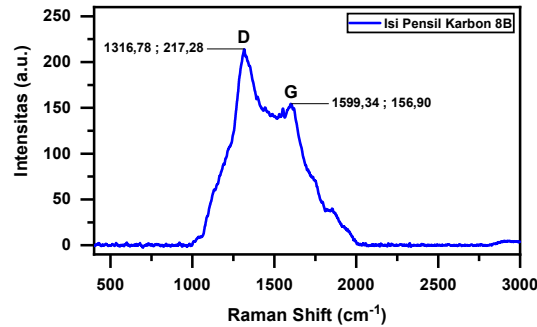
sampel dengan hasil sintesis GO paling optimum.

Nilai absorbansi pada sampel arang tempurung kelapa dan isi pensil karbon 8B menghasilkan nilai yang cukup tinggi dibandingkan dengan sampel arang kayu jati. Tingginya nilai absorbansi ini dapat disebabkan oleh larutan yang terlalu pekat. Hukum Lambert-Beer menyatakan nilai absorbansi akan berbanding lurus dengan nilai konsentrasi apabila nilai absorbansi berada dalam rentang linier pengukuran, yaitu $0,3 < A < 2,5$ [16]. Nilai absorbansi pada sampel arang tempurung kelapa dan isi pensil karbon 8B berada di luar rentang linier pengukuran, sehingga tidak dapat dibuktikan bahwa konsentrasi GO dalam kedua sampel tersebut lebih besar dari arang kayu jati.

C. Analisis Hasil Karakterisasi Spektroskopi Raman

Hasil karakterisasi menggunakan spektroskopi Raman berupa spektrum pergeseran Raman dan intensitas. Spektrum yang dihasilkan memberikan informasi mengenai karakteristik lapisan yang terbentuk dan tingkat kecacatan dari ketiga sampel. Spektrum Raman yang dihasilkan dari setiap sampel disajikan pada **Gambar 8**.





(c)

Gambar 8. Spektrum Raman sampel (a) Arang kayu jati (b) Arang tempurung kelapa (c) Isi pensil karbon 8B

Tiga jenis puncak yang dapat menjadi acuan untuk mengidentifikasi karakteristik lapisan yang terbentuk dan tingkat kecacatan dari sampel yang diuji, yaitu puncak D (*defect*) dengan rentang nilai $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$, puncak G dengan rentang nilai $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$, dan puncak 2D dengan rentang nilai $\sim 2700 \text{ cm}^{-1}$ [17]. Nilai intensitas pada setiap puncak yang muncul disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Letak puncak dan intensitas pada setiap sampel

Nama Sampel	Puncak D		Puncak G		Puncak 2D
	Raman Shift (cm ⁻¹)	Intensitas (a.u.)	Raman Shift (cm ⁻¹)	Intensitas (a.u.)	Raman Shift (cm ⁻¹)
Arang Kayu Jati	1325,8	386,51	1601,5	358,84	-
Arang Tempurung Kelapa	1315,4	934,11	1583,0	869,26	~ 2600
Isi Pensil Karbon 8B	1316,7	217,28	1599,3	156,90	-

Spektrum Raman pada **Gambar 8** dan data intensitas pada **Tabel 5** menyatakan bahwa intensitas puncak D lebih besar nilainya dibandingkan dengan puncak G. Tingginya intensitas puncak D mengindikasikan bahwa kualitas material masih belum optimum karena puncak D dapat mewakili kecacatan pada material. Rentang panjang gelombang $\sim 2500 - 2700 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan hanya sampel arang tempurung kelapa yang memiliki puncak 2D dengan intensitas lemah pada nilai $\sim 2600 \text{ cm}^{-1}$. Puncak 2D dapat mewakili karakteristik lapisan yang terbentuk dari material. Nilai puncak 2D akan berbanding terbalik dengan jumlah lapisan karbon yang terbentuk. Hal tersebut mengindikasikan bahwa material yang terbentuk

dari ketiga sampel masih memiliki banyak lapisan karbon (*multilayer*) [18]. Nilai rasio perbandingan antara intensitas puncak D dan intensitas puncak G (I_D/I_G) pada setiap sampel disajikan pada Tabel 6.

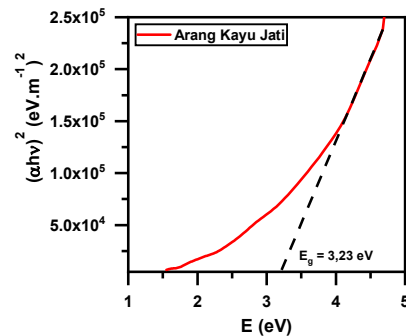
Tabel 6. Nilai rasio perbandingan I_D/I_G pada setiap sampel

Nama Sampel	I_D/I_G
Arang Kayu Jati	1,08
Arang Tempurung Kelapa	1,07
Isi Pensil Karbon 8B	1,38

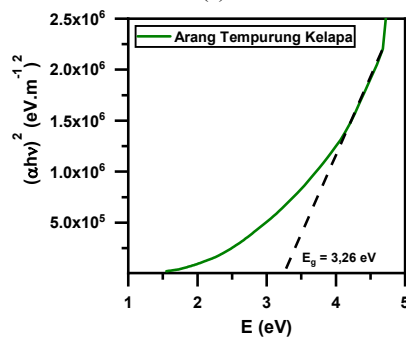
Tabel 6 menunjukkan bahwa nilai I_D/I_G terendah terdapat pada sampel arang tempurung kelapa dan arang kayu jati dengan nilai yang hampir sama. Nilai tersebut menandakan kedua sampel memiliki tingkat kecacatan lebih rendah dibandingkan dengan sampel isi pensil karbon 8B. Semakin rendah nilai I_D/I_G menyatakan bahwa kualitas material yang terbentuk lebih baik dengan cacat dan impuritas lebih rendah [19].

D. Analisis Hasil Perhitungan Nilai Energi Celah Pita dengan Metode *Tauc Plot*

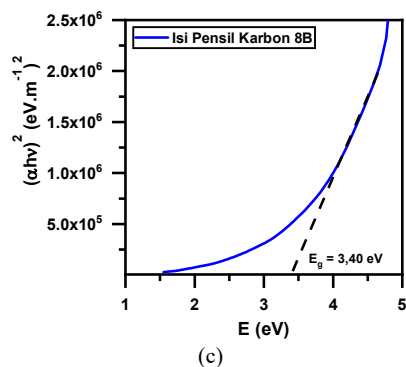
Perhitungan nilai energi celah pita menggunakan metode *Tauc Plot* menghasilkan kurva *Tauc Plot* pada **Gambar 9**, dan nilai energi celah pita yang dihasilkan pada setiap sampel pada Tabel 7.



(a)



(b)



Gambar 9. Kurva *Tauc Plot* sampel (a) Arang kayu jati (b) Arang tempurung kelapa (c) Isi pensil karbon 8B

Tabel 7. Nilai energi celah pita pada setiap sampel

Nama Sampel	Energi Celah Pita (eV)
Arang Kayu Jati	3,23
Arang Tempurung Kelapa	3,26
Isi Pensil Karbon 8B	3,40

Tabel 7 menunjukkan bahwa sampel arang kayu jati memiliki nilai energi celah pita terendah sebesar 3,23 eV. Sampel tersebut menjadi sampel dengan hasil sintesis GO paling optimum dikarenakan semakin kecil nilai energi celah pita maka sifat menghantarkan listrik yang dihasilkan akan semakin baik. Nilai energi celah pita pada ketiga sampel berada dalam rentang nilai energi celah pita dari GO dengan sifat yang dimiliki berupa semikonduktor [20].

KESIMPULAN

Material GO dapat disintesis dari arang kayu jati, arang tempurung kelapa, dan isi pensil karbon 8B yang ada di pasaran dengan menggunakan metode LPE. Hasil karakterisasi EDX menunjukkan bahwa kandungan unsur karbon (C) paling optimum terdapat pada arang kayu jati dengan nilai 90,15 *Mass%* atau 92,88 *At%*, sedangkan pada arang tempurung kelapa nilainya 76,25 *Mass%* atau 82,74 *At%*, dan pada isi pensil karbon 8B nilainya 64,11 *Mass%* atau 75,34 *At%*. Hasil karakterisasi UV-Vis menunjukkan bahwa ketiga sampel telah memiliki panjang gelombang yang sesuai dengan panjang gelombang GO, yaitu 220 nm – 270 nm. Hasil karakterisasi Raman menunjukkan bahwa impuritas ketiga sampel masih cukup tinggi yang ditandai dengan intensitas puncak D yang lebih tinggi dibandingkan puncak G, hal ini tidak lepas dari kualitas arang yang digunakan. Lapisan yang

dihasilkan ketiga sampel berupa *multilayer*. Nilai energi celah pita menggunakan metode *Tauc Plot* dihasilkan bahwa ketiga sampel berada dalam rentang material semikonduktor dengan nilai energi celah pita energi terkecil yaitu arang kayu jati sebesar 3,23 eV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Krueger, "Carbon Materials and Nanotechnology", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010. <https://doi.org/10.1002/9783527629602.ch1>
- [2] A. Hirsch, "The Era of Carbon Allotropes", *Nat. Mater.*, vol. 9, 868–871, 2006. <https://doi.org/10.1038/nmat2885>
- [3] K. Spyrou, P. Rudolf, *Functionalization of Graphene*, 1st Ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014. <https://doi.org/10.1142/9948>
- [4] E. Varrla, K.R. Paton, C. Backes, A. Harvey, R.J. Smith, J. McCauley, J.N. Coleman, "Turbulence-Assisted Shear Exfoliation of Graphene Using Household Detergent and a Kitchen Blender", *Nanoscale*, vol. 6, 11810–11819, 2014. <https://doi.org/10.1039/c4nr03560g>
- [5] D. Chen, H. Feng, J. Li, "Graphene Oxide: Preparation, Functionalization, and Electrochemical Applications", *Chem. Rev.* vol. 112, 6027–6053, 2012. <https://doi.org/10.1021/cr300115g>
- [6] M. Nasrollahzadeh, F. Babaei, P. Fakhri, B. Jaleh, *Synthesis, Characterization, Structural, Optical Properties and Catalytic Activity of Reduced Graphene Oxide/Copper Nanocomposites*, *RSC Adv.*, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4RA12552E>
- [7] R.S. Edwards, K.S. Coleman, "Graphene synthesis: Relationship to applications", *Nanoscale*, vol. 5, 38–51, 2013. <https://doi.org/10.1039/c2nr32629a>
- [8] M.P. Ghatule, U.A. Devare, "Study and Analysis on Synthesis of Graphene and its Applications in Solar Cells", *Int. J. Innov. Res. Adv. Eng.*, vol. 2, 184–186, 2015.
- [9] A.M. Al-Dhahebi, S.C.B. Gopinath, M.S.M. Saheed, "Graphene Impregnated

- Electrospun nanofiber sensing materials: a comprehensive overview on bridging laboratory set-up to industry", *Nano Converg.*, vol. 7, 2020.
<https://doi.org/10.1186/s40580-020-00237-4>.
- [10] W. Jarinda, "Preparasi dan Sintesis Nanomaterial Graphene Oxide Berbahan Dasar Abu Sekam Padi Menggunakan Metode Liquid Phase Exfoliation Kombinasi Blender+Sonifikasi, Blender, dan Sonifikasi dengan Variasi Waktu Pencampuran Bahan", Universitas Negeri Yogyakarta, 2017.
- [11] Y.I. Bete, M. Bukit, A.Z. Johannes, R.K. Pingak, "Kajian Awal Sifat Optik Graphene Oxide Berbahan Dasar Arang Tongkol Jagung yang Disintesis dengan Metode Liquid Phase Exfoliation (LPE)", *J. Fis. Fis. Sains Dan Apl.*, vol. 4, 114–120, 2019.
<https://doi.org/10.35508/fisa.v4i2.1832>.
- [12] A.Z. Johannes, R.K. Pingak, M. Bukit, "Tauc Plot Software: Calculating Energy Gap Values of Organic Materials Based on Ultraviolet-Visible Absorbance Spectrum", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 823 , 2020.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/823/1/012030>.
- [13] M.M.Y. Missa, R.K. Pingak, H.I. Sutaji, "Penentuan Celah Energi Optik Ekstrak Daun Alpukat (Persea Americana Mill) Asal Desa Oinlasi Menggunakan Metode Tauc Plot", *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 3, 86–90, 2018.
<https://doi.org/10.35508/fisa.v3i1.606>.
- [14] H. Nurdin, Hasanuddin, Waskito, Ambiyar, M. Saddikin, "Effect of Carbonization Process on Tibarau Sugarcane Briquette to Increase Calorific Value", in *2nd Int. Conf. Eng. Environ.*, UNP Press, Padang, 2019, pp. 100–105.
- [15] Y. Kim, A. Sung, Y. Seo, S. Hwang, H. Kim, "Measurement of Hardness and Friction Properties of Pencil Leads for Quantification of Pencil Hardness Test", *Adv. Appl. Ceram.*, vol. 115, 443–448, 2016.
<https://doi.org/10.1080/17436753.2016.1186364>.
- [16] C.A. De Caro, H. Claudia, *UV/VIS Spectrophotometry - Fundamentals and Applications*, Mettler Toledo, 2015.
- [17] A.C. Ferrari, J.C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, K.S. Novoselov, S. Roth, A.K. Geim, "Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, 1–4, 2006.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401>.
- [18] M.B.P. Honorisal, N. Huda, T. Partuti, A. Sholehah, "Sintesis dan Karakterisasi Grafena Oksida dari tempurung Kelapa dengan Metode Sonikasi dan Hidrotermal", *Tek. J. Sains Dan Teknol.*, vol. 16, 1–11, 2020.
<https://doi.org/10.36055/tjst.v16i1.7519>.
- [19] L. Agustina, N.P. Putri, "Analisis Fasa dan Ikatan Molekul Reduced Graphene Oxide (rGO) Berbahan Dasar Tempurung Kelapa", *Semin. Nas. Fis.*, 2018, 222–225.
- [20] D. Bhatnagar, S. Singh, S. Yadav, A. Kumar, I. Kaur, "Experimental and Theoretical Investigation of Relative Optical Band Gaps in Graphene generations", *Mater. Res. Express.*, vol. 4, 2017.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/4/1/015101>.

Simulasi dosis serap kanker payudara dengan empat sudut penyinaran menggunakan teknik radioterapi konformal tiga dimensi

Wihantoro*, Abdul Aziz Toyib, Aris Haryadi, Efiti Pratiwi Adi

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

*e-mail: wihantoro@unsoed.ac.id

Abstrak – Makalah ini menyajikan perhitungan dosis serap kanker payudara dan organ riskan sekitarnya dari perlakuan radioterapi LINAC (Linier Accelerator) 6 MV. Organ sekitar yang diamati adalah payudara kanan dan kiri, jantung, hati, paru-paru kanan dan kiri, tulang belakang dan pancreas. Teknik yang digunakan adalah konformal tiga dimensi dengan empat arah sudut penyinaran, yaitu 0° , 60° , 180° , dan 240° . Konformal tiga dimensi dibentuk menggunakan multileaf collimator (MLC) dengan bukaan geometri lingkaran berdiameter 1,3 cm. Jaringan kanker dimodelkan berbentuk bola diameter 3 cm berada di bagian dalam tengah payudara kiri. Unit kepala LINAC dimodelkan berdasarkan geometri data dari Siemens Primus. Dosis serap dihitung dengan metode Monte Carlo dari perjalanan foton dari unit kepala LINAC hingga berinteraksi dengan jaringan kanker dan organ riskan sekitarnya. Model LINAC divalidasi melalui pdd (persen dosis kedalaman) hasil pengukuran dan simulasi dengan ketelitian 90%. Penggabungan nilai dosis serap untuk keempat arah penyinaran menunjukkan dosis serap terbesar berada pada jaringan kanker sebesar 2 Gy. Organ riskan yang menerima dosis serap paling rendah adalah hati, 0,005 Gy dan yang menerima dosis serap paling tinggi adalah payudara kiri, 0,265 Gy

Kata kunci: kanker payudara, LINAC 6 MV, konformal tiga dimensi, empat arah sudut penyinaran.

Abstract – This paper presents the calculation of the absorbed dose of breast cancer and surrounding risk organs from the LINAC (Linear Accelerator) 6 MV radiotherapy treatment. The surrounding organs observed were the right and left breasts, heart, liver, right and left lungs, spine and pancreas. The technique used is a three-dimensional conformal with four irradiation angle directions, namely 0° , 60° , 180° , and 240° . Three-dimensional conformal was formed using a multileaf collimator (MLC) with a circular geometry opening with a diameter of 1.3 cm. The cancer tissue was modeled as a ball with a diameter of 3 cm in the center of the left breast. The LINAC head unit is modeled based on geometry data from Siemens Primus. The absorbed dose was calculated by the Monte Carlo method from the photon traveling from the LINAC head unit to interacting with cancer tissue and surrounding risk organs. The LINAC model was validated through pdd (percent depth dose) measurement and simulation results with an accuracy of 90%. The combination of the absorbed dose values for the four radiation directions showed that the largest absorbed dose was in cancer tissue of 2 Gy. The risk organ receiving the lowest absorbed dose was the liver, 0.005 Gy and the one receiving the highest absorbed dose was the left breast, 0.265 Gy.

Key words: breast cancer, LINAC 6 MV, three-dimensional conformal, four irradiation angle directions

PENDAHULUAN

Radioterapi merupakan metode teknik terapi dengan menggunakan sumber radiasi eksternal untuk menyembuhkan kanker. Radiasi yang dipancarkan ke jaringan yang terkena kanker akan mengalami peristiwa seperti ionisasi molekul air yang berakibat terbentuknya radikal bebas yang pada akhirnya akan mematikan sel yang dituju [1]. Hal tersebut selaras dengan tujuan radioterapi yaitu untuk mematikan sel dengan radiasi terhadap *planning target volume* (PTV) pada penderitanya dengan seminimal mungkin paparan radiasi yang diberikan

terhadap jaringan sehat yang ada di sekitarnya. Sumber radiasi eksternal radioterapi diantaranya adalah *neutron beam*, sinar-x, cobalt-60, dan *linear accelerator* (LINAC).

Dalam beberapa periode terakhir, teknologi di bidang kesehatan terus berkembang dibuktikan dengan munculnya teknik-teknik dalam radioterapi. Teknik-teknik tersebut mulai dari teknik konvensional dua dimensi sampai teknik yang lebih *advance* seperti IMRT (*Intensity Modulated Radiation Therapy*), VMAT (*Volumetric Modulated Arc Therapy*), SRS (*Stereotatic Radiosurgery*), dan teknik konformal tiga dimensi [2]. Teknik konformal

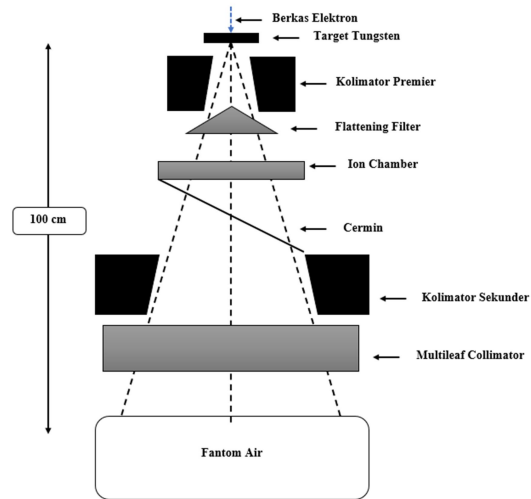
tiga dimensi yaitu teknik pengobatan dimana rencana dan pemberian pengobatan berdasarkan data *volumetric* dengan masing-masing medan radiasi sesuai dengan bentuk target dari citra CT-Scan [3]. Pelaksanaan teknik konformal tiga dimensi menggunakan *additional equipment* berupa penggunaan *Multileaf Collimator* (MLC). MLC bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pengobatan dengan cara membentuk pancaran sinar radiasi mengikuti ukuran kanker yang menjadi target [4-5].

Hasil simulasi penyinaran radioterapi konvensional gabungan dua arah, sudut 300° dan 120° menggunakan sumber gamma, berkas profil datar diperoleh bahwa pola kurva isodosis yang tidak sesuai dengan bentuk geometri payudara. Penyebaran dosis radiasi cukup tinggi yang menyebabkan luas kurva dosis maksimum melebar ke organ payudara, sedangkan untuk kanker stadium dini organ payudara dianggap organ yang beresiko terdampak [6]. Teknik konformal tiga dimensi untuk penyinaran dua arah dengan aplikasi MLC merupakan teknik minimal yang harus diterapkan berdasarkan standar internasional. Simulasi penyinaran kanker payudara menggunakan teknik konformal tiga dimensi dengan dua arah penyinaran dapat menurunkan luas kurva isodosis maksimum pada organ payudara dibandingkan dengan teknik konvensional akan tetapi masih terdapat pelebaran geometri kurva isodosis maksimum [7]. Dalam makalah ini dikaji teknik konformal tiga dimensi dengan empat sudut penyinaran yang dimaksudkan agar luasan medan isodosis maksimum yang diterima pada kanker lebih presisi menggunakan simulasi Monte Carlo (MC). Simulasi Monte Carlo sebagai salah satu metode untuk mempelajari fisika radioterapi merupakan metode yang dianggap akurat untuk simulasi transportasi radiasi dan perhitungan dosis yang dalam penelitian kali ini menggunakan bahasa pemrograman MCNPX.

METODE PENELITIAN

Prosedur penelitian terdiri dari lima tahap. Tahap pertama adalah pemodelan unit kepala LINAC yang bertujuan untuk mendapatkan karakteristik pesawat LINAC yang sesuai standar dan nilai dosis serap maksimum yang diterima dalam simulasi menggunakan pantom air dilihat dari hasil kurva pdd dan profil dosis. Pesawat LINAC yang disimulasikan menggunakan pesawat LINAC 6 MV dengan

energi rata-rata elektron sebesar 6 MeV. Sedangkan pantom air dimodelkan dalam bentuk kubus berukuran $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$ yang didalamnya berisi air. pantom dibagi menjadi kisi-kisi kecil yang merupakan elemen volume yang dikenal dengan voxel (*volumetric and pixel*) sedangkan untuk menentukan pdd pantom dibagi menjadi voxel ke arah sumbu vertikal, sementara untuk menentukan profil dosis radiasi phantom dibagi menjadi voxel ke arah horizontal (**Gambar 1**).



Gambar 1. Model bagian-bagian utama kepala LINAC dengan SSD 100 cm [8].

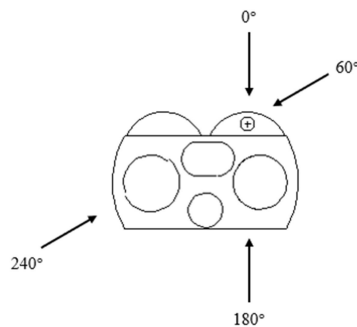
Pada tahap kedua yaitu pemodelan alat MLC. MLC dibuat beberapa batang yang berfungsi untuk mengatur besarnya ukuran medan radiasi sesuai kebutuhan yang terletak pada bagian bawah kolimator. Lebar batang 1 cm dengan ketebalan setiap batang 7,5 cm dan panjang 24 cm. Bentuk MLC disesuaikan dengan ukuran kanker yang ditentukan. MLC dimodelkan dengan bentuk balok yang pada bagian tengahnya diberi lubang dengan ukuran dan bentuknya telah disesuaikan mengikuti ukuran dan bentuk kanker. Pada pemodelan ini batang-batang MLC berhimpit satu sama lain sehingga tidak ada rongga diantara batang. Lubang yang disisipkan di tengah MLC berbentuk geometri silinder dengan diameter 1,3 cm.

Tahap Ketiga yaitu arah penyinaran. Dalam penelitian ini dilakukan pada empat medan radiasi (**Gambar 2**), yaitu:

1. Medan radiasi supraklavikula dengan sudut 0° .
2. Medan radiasi tangensial lateromedial dengan sudut 60° .
3. Medan radiasi aksila dengan sudut 180° .

4. Medan radiasi tangensial mediolateral dengan sudut 240° .

Ukuran model, densitas, dan komposisi yang disimulasikan didasarkan pada model pantom *Taiwanese Reference Woman* (TRW) yang dibuat oleh Chang dkk [9]. Organ yang disimulasikan pada penelitian ini adalah sel kanker, payudara kiri dan kanan, paru-paru, jantung, hati, pankreas, dan tulang belakang. Jaringan kanker disimulasikan dengan bentuk bola yang berada di tengah payudara kiri dengan diameter jaringan kanker sebesar 3 cm dengan kedalaman 2,5 cm dari permukaan. Pemodelan jaringan kanker menggunakan geometri bola dilakukan agar pada saat penyinaran jaringan kanker titik fokus penyinaran yang jatuh pada kanker dapat dengan mudah diketahui dan memudahkan dalam pemodelan bukaan MLC.



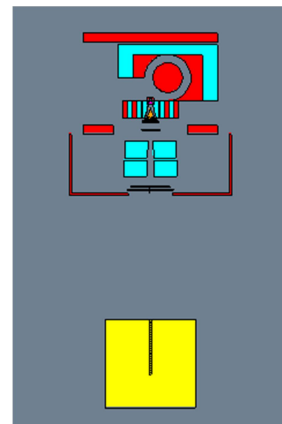
Gambar 2. Empat sudut penyinaran dengan kanker di bagian kiri payudara, dilihat dari bagian kaki pasien (bidang zx).

Tahap keempat yaitu perhitungan dosis serap dengan menggunakan *tally F6* yang menghasilkan nilai deposisi rata-rata pada sebuah bidang satuan MeV/g. Kemudian untuk mengubah satuan dalam bentuk Gy (joule/kg), nilai hasil *tally F6* dikalikan dengan $1,6 \times 10^{-10}$ joule/kg [10]. Tahap kelima yaitu pembuatan kurva isodosis yang dalam penelitian ini dilakukan dengan membuat detektor maya pada pantom organ dada. Detektor maya dibuat dengan notepad++ dalam program *vised* dengan interval setiap 2,5 cm disetiap sumbu x dan 3 cm untuk sumbu z. *Tally* yang digunakan berupa *tally F5* yang menghasilkan fluks pada detektor titik dengan satuan partikel/cm². Hasil dari *tally F5* kemudian dibuat kontur 2-dimensi dengan *software* Surfer 16.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Pesawat LINAC

Karakteristik pesawat LINAC ditentukan berdasarkan grafik pdd dan profil dosis. Untuk mendapat karakteristik pesawat LINAC, sebelumnya dimodelkan terlebih dahulu unit kepala pesawat LINAC dan pantom air dengan *software* MCNPX *Vised*. Pesawat LINAC yang dimodelkan berdasarkan model kepala Siemen Primus 6 MV yang memiliki energi rata-rata elektron sebesar 6 MeV dengan jumlah partikel sebanyak 10^7 [11]. *Listing* pemodelan Kepala LINAC dan pantom air dapat dilihat pada lampiran 2. Komponen utama unit kepala pesawat LINAC terdiri dari target, kolimator primer, *flattening filter*, cermin, monitor atau *ionization chamber*, kolimator sekunder dan ditambahkan *multileaf collimator* sedangkan pantom air terdiri dari voxel (*volumetric and pixel*) pada arah vertikal dan horizontal yang dibuat dengan ukuran $40 \times 40 \times 40$ cm³. Pemodelan pantom air dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik pesawat LINAC berdasarkan kurva pdd dan profil dosis menggunakan SSD 100 cm dan luas medan radiasi 10×10 cm². Hasil pemodelan unit kepala radioterapi pesawat LINAC 6 MV dan pantom air disajikan pada **Gambar 3**.



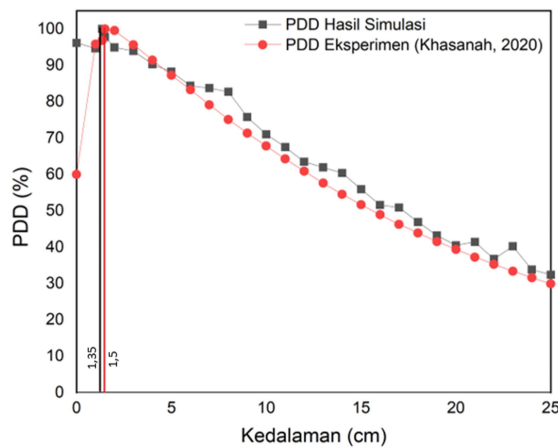
Gambar 3. Hasil pemodelan unit kepala LINAC dan pantom air

Kurva pdd dan profil dosis dihasilkan dari simulasi pemodelan LINAC dan pantom air dari hasil *running* program menggunakan kode *tally F4* yang berupa fluks rata-rata pada sebuah sel dengan satuan partikel/cm². Kode *tally F4* menggambarkan banyaknya partikel yang berada pada sebuah sel per satuan luas yang berarti semakin banyak sel yang dilewati maka nilainya akan semakin kecil. Nilai hasil simulasi berupa partikel/cm² dinormalisasi dengan dimasukkan ke dalam persamaan (1):

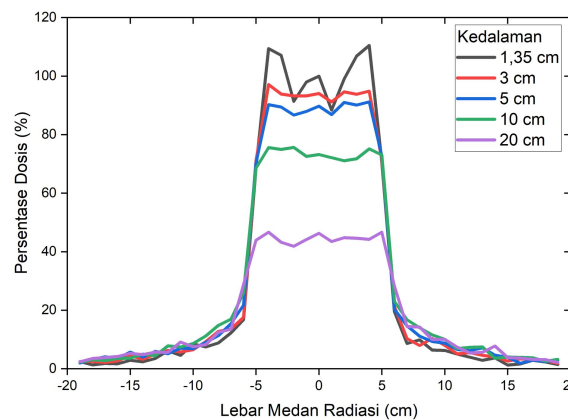
$$D_n = (X_1/X_2) \times 100 \% \quad (1)$$

dengan D_n adalah nilai dosis ternormalisasi, X_1 adalah nilai yang akan dinormalisasi, X_2 nilai terbesar (nilai *build up*) dalam simulasi.

Dalam simulasi, kurva pdd memiliki nilai tertinggi 100% pada kedalaman 1,35 cm sebesar $5,20009 \times 10^{-6}$ partikel/cm² yang artinya pada kedalaman ini merupakan nilai kedalaman karakteristik pesawat LINAC yang dimodelkan. Sedangkan kurva profil dosis radiasi dari hasil simulasi menggunakan luas medan yang sama dengan variasi kedalaman berbeda dinormalisasi 100% pada kedalaman 1,35 cm dengan nilai simulasi $5,12872 \times 10^{-6}$ partikel/cm². Nilai hasil perhitungan pdd dan profil dosis dapat dilihat tersaji secara grafis pada **Gambar 4** dan **5**.



Gambar 4. Kurva profil dosis simulasi dengan medan radiasi 10 cm x 10 cm.



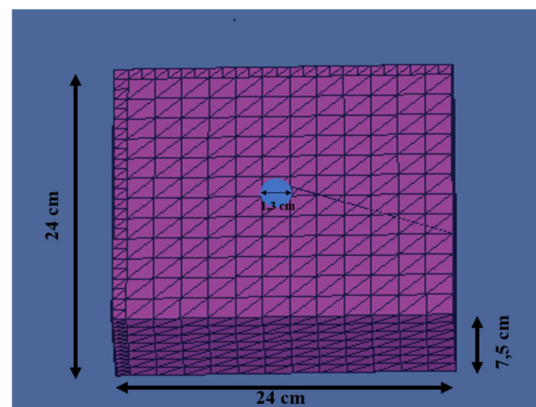
Gambar 5. Kurva profil dosis simulasi dengan medan radiasi 10 cm x 10 cm.

Nilai dosis pada medan radiasi 10 cm x 10 cm hasil simulasi ini tidak jauh berbeda dari

referensi [12]. Nilai pdd berada pada kedalaman 1,35 cm dari 1,5 cm yang direkomendasikan dan profil dosis memiliki kedataran pada kedalaman 10 cm. Dapat dikatakan model pesawat LINAC ini dapat digunakan untuk perhitungan simulasi dosis serap jaringan kanker dan organ dada.

B. Pemodelan *Multileaf Collimator* Beserta Bukaannya

MLC dimodelkan dalam geometri balok dengan ukuran 24 x 24 x 7,5 cm³ yang merupakan ukuran standar optimum agar radiasi yang mengenai blok MLC tidak dapat diteruskan, sedangkan untuk bukaan MLC dibuat dengan balok berlubang pada bagian tengahnya dengan cara disisipkan geometri silinder yang berisi massa udara dengan diameter silinder sebesar 1,3 cm (**Gambar 6**). Penentuan bukaan MLC dengan diameter sebesar 1,3 cm diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Rahma, [7] dan Khasanah [10].

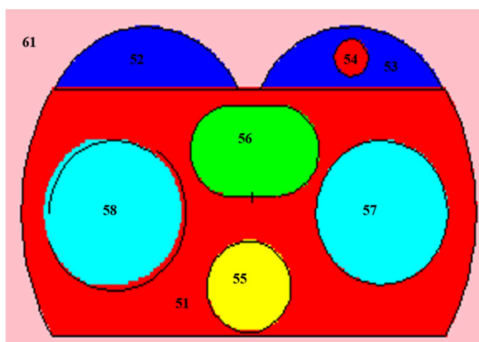


Gambar 6. Hasil simulasi MLC dengan diameter bukaan 1,3 cm.

C. Dosis Serap Jaringan Kanker dan Tiap Organ Dada

Sebelum menentukan nilai dosis serap jaringan kanker dan tiap organ dada, penelitian ini terlebih dahulu menggabungkan listing program antara unit kepala LINAC dengan pantom organ dada dengan ukuran, densitas dan komposisi berdasarkan model pantom *taiwanese reference woman* (TRW) [9]. Organ yang dimodelkan pada pantom organ dada antara lain adalah payudara, paru-paru, jantung, hati, pankreas, tulang belakang, dan sel kanker. Organ payudara dimodelkan berbentuk setengah lingkaran berjari-jari 9 cm. Organ paru-paru dimodelkan dari tumpukan silinder dengan jarak antar jari-jari silinder 1 cm. Organ jantung dimodelkan

berbentuk silinder yang dipotong dengan setengah bola pada kedua sisinya dengan diameter 4,18 cm. Organ tulang belakang dimodelkan berbentuk silinder berjari-jari 3,68 cm. Organ pankreas dimodelkan sama dengan organ jantung dengan jari-jari dari silinder dan dua buah setengah lingkaran dengan diameter 1,05. Organ hati dimodelkan berbentuk tumpukan persegi dengan jarak persegi 1 cm dengan lebar 2,05 cm, panjang 20,2 cm, dan tinggi 4 cm. Sel kanker dimodelkan dengan bentuk bola yang berada di tengah payudara kiri dengan diameter jaringan kanker sebesar 3 cm. Pemodelan jaringan kanker digunakan geometri bola (**Gambar 7**).



Gambar 7. Hasil pemodela pantom organ dada wanita dan sel kanker.

Keterangan:

- 51 = Tubuh manusia
- 52 = Payudara kanan
- 53 = Payudara kiri
- 54 = Kanker
- 55 = Tulang belakang
- 56 = Jantung
- 57 = Paru-paru kiri
- 58 = Paru-paru kanan
- 61 = Lingkungan

Hasil pada penelitian ini yaitu nilai dosis serap (Gy) dengan satuan joule/kg pada sel kanker dan organ sekitarnya dengan empat sudut penyinaran yaitu 0°, 60°, 180°, dan 240°. Dosis serap pada setiap organ diperoleh menggunakan *tally f6* dengan satuan MeV/g, kemudian untuk mengubah satuan dalam bentuk Gy. Hasil penyinaran setiap organ yang dihasilkan dari masing-masing arah penyinaran adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Hasil dosis serap pada setiap organ dengan ukuran jaringan kanker berdiameter 3 cm dengan bukaan MLC 1,3 cm.

Organ	Dosis Serap Arah penyinaran				Dosis Serap Gabungan empat arah (Gy)
	0°	60°	180°	240°	
Jaringan Kanker	0,651	0,630	0,419	0,299	2
Payudara	0,061	0,106	0,041	0,056	0,265

kiri					
Payudara kanan	0,003	0,006	0,002	0,005	0,018
Jantung	0,006	0,073	0,005	0,093	0,179
Hati	0,001	0,001	0,000	0,002	0,005
Paru-paru kiri	0,030	0,003	0,037	0,002	0,073
Paru-paru kanan	0,002	0,021	0,002	0,045	0,071
Tulang belakang	0,002	0,001	0,003	0,002	0,010
Pankreas	0,001	0,001	0,002	0,001	0,006

Penyinaran empat arah dihitung sebagai satu fraksi penyinaran dengan nilai maksimal dosis serap yang diterima adalah 2 Gy. Dari tabel diatas menunjukkan dosis serap terbesar yang didapat pada penelitian ini berada pada jaringan kanker dan payudara kiri sebesar 2 Gy dan 0,2655 Gy. Organ payudara mendapatkan dosis tinggi karena jaringan kanker berada pada payudara bagian kiri. Sedangkan dosis terkecil diterima oleh hati dan pankreas sebesar 0,0054 Gy dan 0,0062 Gy. Dosis ambang tiap organ yang dijadikan rujukan dalam perhitungan simulasi ini mengambil dari Chidambaram *et. al.* [14]

Tabel 2 Dosis ambang organ at risk [14].

Organ	Dosis Ambang
Jaringan Kanker	2 Gy/Fraksi
Payudara kiri	2 Gy/Fraksi
Payudara kanan	2 Gy/Fraksi
Jantung	< 1,3 Gy/Fraksi
Hati	≤ 1,16 Gy/Fraksi
Paru-paru	< 1 Gy/Fraksi
Tulang belakang	≤ 1,13 Gy/Fraksi
Pangkreas	< 1 Gy/Fraksi

D. Kurva Isodosis Pada Dada Wanita Dewasa

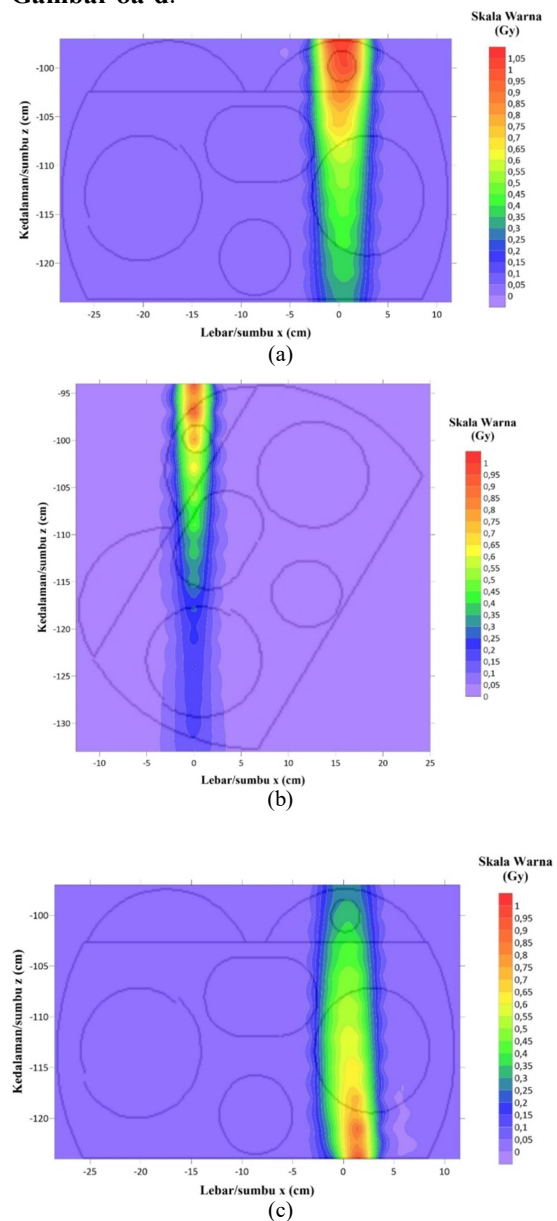
Persebaran dosis serap pada penelitian ini dibuat dalam bentuk kontur 2-dimensi untuk mengetahui sebaran dosis yang diterima organ dada dengan cara membuat detektor maya. Detektor dibuat dalam program vised dengan interval setiap 2,5 cm disetiap arah horizontal dan 3 cm disetiap arah vertikal. Persebaran dosis serap diperoleh dari hasil *running* program menggunakan *tally F5* yang menghasilkan fluks pada detektor titik dengan satuan partikel/cm². Hasil *tally F5* kemudian dinormalisasi untuk menunjukkan sebuah kontur 2-dimensi dengan *software* Surfer 16 dimana sumbu vertikal merupakan sumbu z (kedalaman), sedangkan sumbu horizontal merupakan sumbu x (lebar).

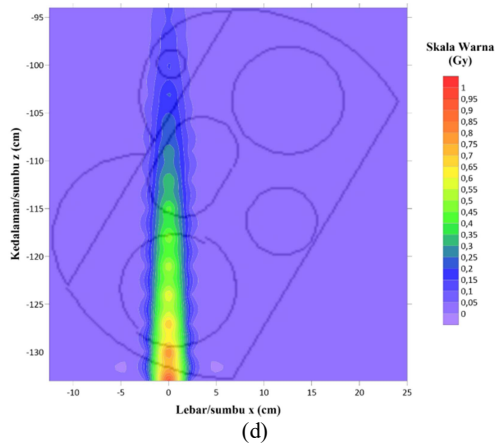
Pada proses simulasi, model unit kepala LINAC tidak dapat ditransformasikan secara

langsung sesuai dengan sudut penyinaran yang telah ditentukan. Sehingga pada simulasi penelitian ini model yang ditransformasikan adalah model pantom organ dada. Pada praktik radioterapi yang sesungguhnya hal tersebut tidak mungkin dilakukan. Proses simulasi menggunakan transformasi pantom organ dada yaitu pada transformasi pantom organ dada sudut 60° , 180° , dan 240° . Pola yang terbentuk adalah bagian organ dada jika dilihat dari kaki pasien.

Pada kurva dengan penyinaran sudut 0° , sebaran dosis serap menumpuk pada dada bagian kiri. Jaringan kanker mendapatkan dosis yang besar dari pada bagian dada lainnya. Selain itu bagian dada sebelah kiri juga lebih banyak menyerap energi dari pada bagian lain disebabkan oleh jarak sel kanker dan organ dada sebelah kiri lebih dekat dengan sumber dibandingkan dengan rongga dada sebelah kanan saat dilakukan penyinaran dengan sudut 0° sehingga lebih banyak energi yang diserap pada bagian permukaan dada kiri yang jaraknya lebih dekat dengan sumber. Sedangkan pada penyinaran dengan transformasi pantom organ dada sudut 60° menunjukkan sebaran dosis serap bahwa dosis paling banyak diterima yaitu pada jaringan kanker dan payudara kiri hingga kedalaman -100 cm. Akan tetapi pada sudut ini organ jantung dan paru-paru sebelah kanan menunjukkan paparan yang tidak semestinya terkena. Hal ini disebabkan oleh transformasi organ dada pada arah penyinaran 60° . Pada sudut ini, organ lainnya selain jaringan kanker dan payudara kiri mendapatkan dosis yang lebih rendah, dosis serap maksimal ditunjukkan dengan warna merah sedangkan dosis serap minimum ditunjukkan dengan warna ungu. Pada penyinaran dengan transformasi pantom organ dada sudut 180° , dosis serap menumpuk pada dada bagian kiri, dosis yang lebih besar diterima oleh jaringan yang berada pada -117 cm sampai -124 cm. Selain itu pada sudut ini juga sama dengan penyinaran sudut 0° dimana bagian dada sebelah kiri juga lebih banyak menyerap energi dari pada bagian lain disebabkan oleh jarak sel kanker dan organ dada sebelah kiri lebih dekat dengan sumber dibandingkan dengan bagian dada sebelah kanan. Pada penyinaran dengan transformasi pantom organ dada sudut 240° menunjukkan sebaran dosis serap menumpuk pada dada bagian kanan. Jaringan kanker mendapatkan dosis yang kecil disebabkan oleh jarak jaringan kanker yang lebih jauh dari sumber dibandingkan dengan organ dada

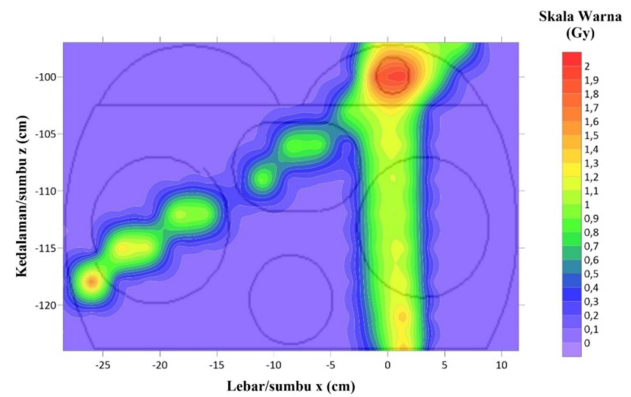
sebelah kiri dan payudara kiri saat dilakukan transformasi organ arah penyinaran dengan sudut 240° sehingga lebih banyak energi yang diserap pada bagian permukaan dada kanan yang jaraknya lebih dekat dengan sumber. Pada sudut ini terdapat organ-organ yang tidak perlu terkena penyinaran seperti paru-paru kanan dan jantung. Kurva isodosis persebaran dosis serap untuk tiap sudut disajikan berturut pada **Gambar 8a-d**.





Gambar 8. Kurva isodosis organ dada sudut (a)0°, (b). 60°, (c). 180°, dan (d).240°

Kurva isodosis gabungan semua arah penyinaran yaitu 0°, 60°, 180°, dan 240° didapat dari hasil gabungan kurva pada **Gambar 6** dimana organ yang paling banyak menerima dosis yaitu jaringan kanker pada kedalaman 2,5 cm dari permukaan kulit payudara yang pada gambar ditunjukkan pada kedalaman -100 cm dengan warna merah dominan yang berarti terjadi penumpukan dosis pada payudara sebelah kiri dari berbagai arah penyinaran yang menunjukkan juga bahwa pada daerah tersebut menunjukkan dosis paling besar. Sedangkan organ lainnya mendapatkan dosis yang lebih rendah dari pada jaringan kanker dan payudara bagian kiri terlihat dari warna ungu yang menunjukkan skala dosis kecil. Akan tetapi untuk penyinaran dari sudut 60° dan 240° terdapat organ-organ yang semestinya tidak terkena secara langsung justru menerima dosis yang besar seperti paru-paru kanan dan jantung. Oleh karena itu untuk sudut tersebut perlu diganti menggunakan sudut dimana *organ at risk* menerima lebih sedikit dosis serap seperti sudut 120° dan 300°. Kurva isodosis gabungan ke empat arah penyinaran (**Gambar 2**) disajikan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Kurva isodosis gabungan keempat arah penyinaran.

Dapat dikatakan, dosis serap semakin rendah seiring bertambahnya jarak antara sumber terhadap titik acuan. Hal ini disebabkan karena proses penyinaran akan terserap sebelumnya oleh organ yang paling dekat terlebih dahulu. Faktor lain yang mempengaruhi variasi dosis serap terhadap kedalaman diantaranya adalah energi sumber, kedalaman, ukuran medan radiasi, dan jarak sumber [15].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan:

1. Karakteristik radiasi pesawat LINAC diperoleh dari kurva pdd hasil simulasi monte carlo memiliki faktor *build-up* pada kedalaman 1,35 cm dan kurva profil dosis radiasi menunjukkan bahwa profil dosis datar terjadi pada kedalaman 10 cm.
2. Model *multileaf collimator* serta bukaanannya dibuat menggunakan simulasi monte carlo, MLC berhasil dimodelkan dengan bentuk balok ukuran 24 x 24 x 7,5 cm³. Sedangkan bukaan MLC buat dengan silinder yang diletakkan pada tengah balok dengan diameter silinder sebesar 1,3 cm.

Dosis serap tiap sudut penyinaran dan gabungan penyinaran jaringan kanker dan tiap komponen organ dada diperoleh dengan menggunakan kode *tally* F6 dengan nilai dosis serap terbesar yaitu 0,6513 Gy dengan sudut 0° pada kanker dan nilai dosis serap terkecil yaitu 0,0009 Gy dengan sudut 180° pada organ hati. Nilai dosis serap gabungan untuk jaringan kanker dan tiap komponen organ dada yaitu 2 Gy untuk jaringan kanker, 0,2655 Gy untuk payudara kiri, 0,0186 Gy untuk payudara kanan, 0,179 Gy untuk jantung, 0,0054 Gy untuk hati,

0,0734 Gy untuk paru-paru kiri, 0,0715 Gy untuk paru-paru kanan, 0,0100 Gy untuk tulang belakang, dan 0,0062 Gy untuk pankreas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada LPPM melalui dana BLU-2022.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Drapek, "Radiation Therapy", In *Mosby's Oncology Nurse Advisor*, 2nd ed., N. S. Hickey, J.M. Brant, Eds., St Louis, MO: Elsevier, 2017, 168-171.
- [2] D. Abshire and M. K. Lang, "The Evolution of Radiation Therapy in Treating Cancer", *Semin Oncol Nurs*, vol. 34, no. 2, 151-157, 2018.
- [3] G.C. Pereira, M. Traughber, R.F. Muzic, "The Role of Imaging in Radiation Therapy Planning: Past, Present, and Future", *BioMed Research International*, pp.1-9, 2014.
- [4] H. Kodrat, R. Susworo, T. Amalia, dan R. R. Sabariani, "Radioterapi Konformal Tiga Dimensi Dengan Pesawat Cobalt-60", *Journal of the Indonesian Radiation Oncology Society*, vol. 7, no.1, 37-42, 2016.
- [5] T. Y. Lim, I. Dragojevic, D. Hoffman, and E. Flores-Martinez, "Characterization of The Halcyon Multileaf Collimator System", *Radiation Oncology Physics*, vol. 20, no. 4, 106-114, 2019.
- [6] A. Mafthuatun, A. Haryadi, dan Wihantoro, "Pola kurva isodosis dari penyinaran berkas profil datar pada kanker payudara dengan teknik tangensial menggunakan MCNPX", *Jurnal Teras Fisika*, vol. 2, no.2, 19-23, 2019.
- [7] R.I. Sari, "Simulasi Penyinaran Kanker Payudara Pada Pesawat Radioterapi Co-60 dengan Filter Wedges", Skripsi, Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, 2019.
- [8] F. M. Khan, and J. P. Gibbons, *The Physics of Radiation Therapy*, 5 ed., Philadelphia, 2014.
- [9] S. J. Chang, S.Y. Hung, Y.L. Liu, and S.H. Jiang, "Construction of Taiwanese Adult Reference Phantoms for Internal Dose Evaluation", *Plos One*, 1-14, 2016.
- [10] D. S. Khasanah, "Karakteristik Pesawat Linear Accelerator (LINAC) 6 MV dengan Metode Monte Carlo", Skripsi, Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, 2020.
- [11] D. H. Sidaburta, dan E. Setiawati, "Perbandingan Dosis Terhadap Variasi Kedalaman dan Luas Lapangan Penyinaran (Bentuk Persegi dan Persegi Panjang) Pada Pesawat Radioterapi Cobalt-60", *Youngster Physics Journal*, vol. 3, no. 4, 295-302, 2014.
- [12] S. Taneja, L. J. Bartol, W. Culberson, and L. A. De Werd, "Measurement of the Energy Spectrum of a 6 MV Linear Accelerator Using Compton Scattering Spectroscopy and Monte Carlo-Generated Corrections", *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology*, 186-200, 2020.
- [13] F. N. Ihya, C. Anam, dan V. Gunawan, "Pembuatan Kurva Isodosis 2D dengan Menggunakan Kurva Percentage Depth Dose (pdd) dan Profil Dosis dengan Variasi Kedalaman Untuk Treatment Planning System", *Berkala Fisika*, vol. 16, no. 4, 131-138, 2013.
- [14] V. Chidambaram, S. Raju, A. Kumar, and N. V. Behera, "Dosimetry study for Post-Mastectomy Breast Cancer in Intensity Modulated Radiotherapy plans and Field in Field (FiF) forward plans", *Corpus*, 2016.
- [15] S. Reda, M. Hanafy, I. Bashter, E. Massoud, and E. Amin, "Monte Carlo Dose Calculation for Breast Radiotherapy using 60 CO Gamma Rays", *Journal of Nuclear and Radiation Physics*, 61-72, 2006.

Analisis struktur batuan di bawah permukaan kompleks arkeologis situs liyangan menggunakan *electrical resistivity tomography* dan *analytic signal geomagnetik*

Wrego Seno Giamboro^{1*}, Hafiz Hamdalah¹, Wahyu Hidayat¹, Bambang Kuncoro Prasongko²,
Bonang Surya Utama¹, Tegar Anandya Fathoni¹

¹ Geophysical Engineering Departement UPN "Veteran" Yogyakarta

² Geological Engineering Departement UPN "Veteran" Yogyakarta

Jl. Padjajaran/SWK 104 (Lingkar Utara) Condong Catur Yogyakarta

*email: wrego_seno@upnyk.ac.id

Abstrak – Situs Liyangan yang berada di lereng Gunung Sindoro merupakan kompleks pemukiman kuno yang dibangun di area basah yang kaya akan tumbuh – tumbuhan, ladang, dan area pesawahan. Investigasi geofisika menggunakan metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) dan Analytic Signal Geomagnetic (ASG) dilakukan di daerah penelitian untuk mengetahui struktur batuan di bawah permukaan. Data Electrical Resistivity Tomography (ERT) menunjukkan bangunan arkeologi pada situs Liyangan dibangun di atas batuan dengan tingkat nilai resistivitas rendah (<100 ohm.m) yang diinterpretasikan sebagai endapan alluvial yang memiliki saturasi air yang tinggi. Kedalaman endapan alluvial ini terdeteksi bervariasi antara 3 – 16 meter di bawah permukaan dan terdapat batuan dasar di bawah endapan alluvial ini yang berupa batuan vulkanik Gunung Sindoro. Hasil ini menunjukkan bahwa Situs Liyangan memiliki area yang subur dan kaya akan air sehingga memungkinkan peradaban masa lalu berkembang di sekitar area situs. Beberapa anomali yang diduga sebagai bangunan arkeologi yang terpendam juga terdeteksi pada penampang ERT dengan nilai resistivitas sedang – tinggi (1000-5000 ohm.m). Data ASG menunjukkan daerah Situs Liyangan yang terungkap saat ini memiliki rentang nilai intensitas kemagnetan rendah – sedang ((-55)-4.4nT), sedangkan area dugaan bangunan situs yang masih terpendam memiliki nilai intensitas magnetik tinggi (>22nT). Melalui peta ASG juga didapatkan dua buah struktur patahan berdasarkan nilai kontras intensitas magnetik yang berarah tenggara – barat laut dan timur laut – barat daya.

Kata kunci: Situs Liyangan, Geomagnetik, Resistivitas, Anomali

Abstract – The Liyangan site is located on the slopes of Mount Sindoro is an ancient residential complex built in a wet area rich in vegetation, fields, and rice fields. Geophysical investigations using the Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Analytic Signal Geomagnetic (ASG) methods were carried out in the study area to determine the rock structure below the surface. Electrical Resistivity Tomography (ERT) data shows that archaeological buildings at the Liyangan site are built on rocks with low resistivity values (<100 ohm.m) which are interpreted as alluvial deposits with high water saturation. The depth of this alluvial deposit is detected to vary between 3-16 meters below the surface and there is bedrock under this alluvial deposit in the form of volcanic rock of Mount Sindoro. These results indicate that the Liyangan Site has a fertile area and is rich in water, allowing past civilizations to develop around the site area. Several anomalies suspected to be buried archaeological structures were also detected in the ERT section with moderate to high resistivity values (1000-5000 ohm.m). The ASG data shows that the Liyangan Site area that is currently being revealed has a low to moderate magnetic intensity value range ((-55)-4.4nT), while the suspected buried site building area has a high magnetic intensity value (>22nT). Through the ASG map, two fault structures were also obtained based on the contrast value of the magnetic intensity which are trending southeast – northwest and northeast – southwest.

Key words: Geoelectric, Geomagnetic, Liyangan Site

PENDAHULUAN

Sebuah pemukiman kuno yang lenyap akibat proses erupsi Gunung Sindoro ditemukan kembali dalam kompleks situs kuno yang tertata rapih dan menjadi suatu petunjuk yang sangat penting dalam mengungkap kehidupan sosial Jawa kuno. Situs tersebut dinamakan situs Liyangan yang berada di Dusun Liyangan, Desa

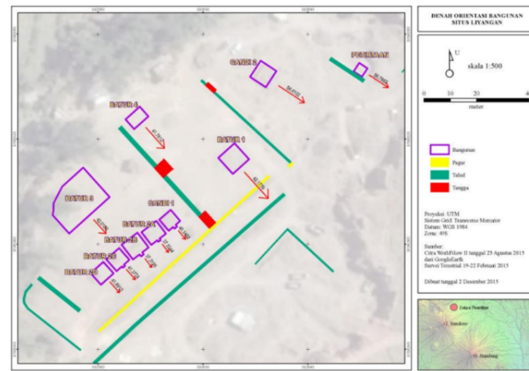
Purbosari, Kecamatan Ngadirejo, Kabupaten Temanggung, Jawa Tengah. Sebelum ditemukan, Situs Liyangan merupakan area pertanian masyarakat di sekitar Dusun Liyangan sampai akhirnya penambang pasir di sekitar situs menemukan fragmen bongkahan batu pada tahun 2000 yang menjadi awal mula pelestarian situs Liyangan [1] (**Gambar 1**).



Gambar 1. Eskavasi awal situs Liyangan oleh Balai Arkeologi Yogyakarta Pada Tahun 2010 [1].

Situs Liyangan tertimbun erupsi gunungapi Sindoro dan menimbun pemukiman kuno yang diperkirakan berasal dari kerajaan mataram kuno pada abad ke-8 sampai ke-10 masehi [2]. Terdapat beberapa bangunan kuno berupa batur, talud, petirtaan, altar dan beberapa sisa bangunan. Bangunan situs Liyangan diperkirakan menerus mengikuti lereng gunung Sindoro ke arah puncak dengan orientasi bangunan yang menghadap ke tenggara, dimana orientasi bangunan dianggap sebagai lanskap spiritual bagi pendiri bangunan ini [2] (**Gambar 2**).

Setelah dilakukan penelitian oleh Balai Arkeologi Yogyakarta, terungkap bahwa situs Liyangan merupakan area pemukiman kuno yang lengkap, mulai dari area hunian, pemujaan, dan pertanian. Melalui penelitian karbon pada benda-benda yang terdapat di situs Liyangan, terungkap bahwa situs Liyangan telah digunakan sebagai area pemukiman mulai abad ke - 2 masehi sampai abad ke - 11 masehi secara terus menerus sampai akhirnya tertutup material erupsi Gunung Sindoro di sekitar abad ke- 11 masehi [1]. Hal tersebut mengungkapkan bahwasannya usia situs Liyangan setara dengan peradaban Romawi kuno di Italia yang meyakinkan kita bahwa peradaban Jawa kuno telah memiliki sistem sosial dan peradaban yang maju.



Gambar 2. Orientasi struktur bangunan pada Situs Liyangan [2]

Pada saat ini diperkirakan baru sekitar 20% pemukiman yang terungkap dan tereskavasi oleh peneliti, dimana 80% pemukiman kuno pada situs Liyangan masih terkubur material vulkanik Gunung Sindoro. Hal tersebut menjadi permasalahan utama para peneliti arkeologi untuk memperkirakan seberapa luas area pemukiman kuno pada situs Liyangan. Melalui perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi penelitian mengenai obyek-obyek terpendam dapat dilakukan melalui penyelidikan berbagai metode geofisika. Penelitian mengenai obyek arkeologi terpendam telah dilakukan oleh beberapa peneliti [3-5]. Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa nilai anomli rendah (VLF) yang diduga sebagai candi dengan nilai konduktivitas anomali yang rendah [3]. Hasil interpretasi GPR di Candi Kedulan memiliki pola refleksi yang *chaotic* pada penampang *radargram*, dimana struktur candi terbenam sejauh 7 meter di bawah permukaan [4]. Batuan candi yang terpendam memiliki nilai intensitas kemagnetan yang tinggi yang memberikan kontras dengan batuan sekitarnya [5].

Pemahaman mengenai batuan dasar sebuah situs arkeologi dapat memberikan gambaran mengenai kondisi lanskap dan lingkungan pada saat bangunan situs tersebut dibuat. Hal tersebut memiliki korelasi dengan aktivitas sosial masyarakat di sekitar situs pada masa lampau. Gambaran mengenai batuan dasar terutama yang sudah terendapkan di bawah permukaan dapat diketahui dengan melakukan analisis bawah permukaan. Untuk itu diperlukan teknologi yang mampu memberikan gambaran bawah permukaan mengenai batuan dasar di sebuah situs arkeologi. Teknologi yang digunakan dan diaplikasi pada penelitian ini adalah *Electrical Resistivity Tomography (ERT)* dan *Analytic Signal Geomagnetic (ASG)*, teknologi ini

merupakan salah satu pengembangan teknologi dari ilmu geofisika yang digunakan untuk mengukur sebaran nilai resistivitas/tahanan jenis dan intensitas kemagnetan batuan di bawah permukaan.

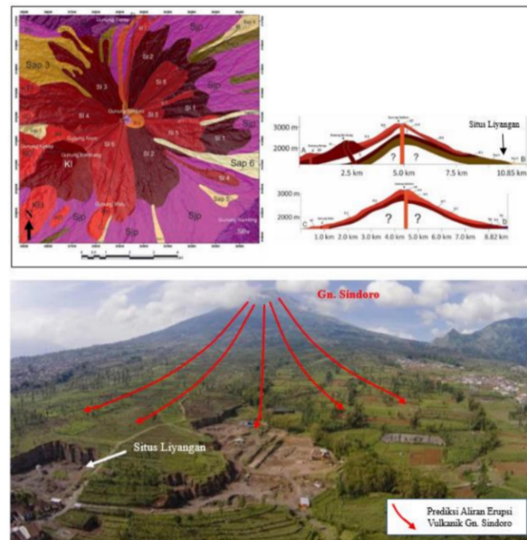
Aspek Geologi Pengendapan Material Vulkanik Gunung Sindoro

Gunungapi Sindoro merupakan salah satu gunungapi aktif yang berada di Provinsi Jawa Tengah dan termasuk ke dalam jajaran gunungapi Kuarter di Pulau Jawa. Aktivitas vulkanisme Gunungapi Sindoro dapat dipelajari dari aspek vulkanostratigrafinya. Bemmelen, mengatakan bahwa pada tahun 1600 - 1617 Sindoro pernah meletus dengan hebatnya dan meluluh-lantakkan desa-desa yang berada di kakinya. Hal ini yang diperkirakan telah mengubur Situs Liyangan sedalam 10 meter di bawah permukaan tanah. Sedangkan Balai Arkeologi Yogyakarta berkesimpulan, pemusnahan peradaban akibat letusan Gunung Sindoro yang sangat dahsyat itu terjadi sekitar tahun 971 Masehi. Pembuktian kebenaran mengenai sejarah tertimbunya Situs Liyangan perlu dilakukan kajian terhadap aspek geologi pengendapan material vulkanik dari Gunung Sindoro yang mencakup analisa vulkanostratigrafi dan fasies vulkanik Gunung Sindoro. Hal ini bertujuan untuk melihat strata dan urutan-urutan kejadian letusan masa lalu yang dapat dilihat dari lapisan tanah yang berada sekitar situs Liyangan (**Gambar 3**).

Sistem Gunungapi Sindoro dapat dibagi menjadi tiga fasies yaitu fasies sentral, proksimal, dan medial dari beberapa pusat erupsi [6].

1. Fasies Sentral Sindoro (FSS) tersebar di bagian puncak Gunungapi Sindoro yang tersusun atas kubah lava dan endapan jatuhnya freatik.
2. Fasies Proksimal Sindoro (FPS) sebagian besar disusun oleh aliran lava hasil erupsi pusat Gunungapi Sindoro yang tersebar ke segala arah dan sedikit endapan klastika gunungapi seperti endapan aliran piroklastik dan endapan jatuhnya piroklastik. Fasies ini ditemukan pada morfologi lereng atas Gunungapi Sindoro.
3. Fasies Medial Sindoro (FMS) didominasi oleh endapan klastika gunungapi seperti endapan aliran piroklastik dan endapan jatuhnya piroklastik. Endapan yang menyusun fasies ini merupakan produk Gunungapi

Sindoro yang tersebar di bagian lereng bawah.



Gambar 3. Peta geologi dan vulkanostratigrafi daerah Gunung Sindoro berdasarkan interpretasi citra dan pemetaan geologi, data umur absolut [6]

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mengaplikasikan metode geofisika *ERT* untuk mengetahui kondisi batuan bawah permukaan melalui distribusi nilai resistivitas batuan. Secara umum metode ini dikembangkan berdasarkan persamaan yang diturunkan melalui Hukum Ohm mengenai hubungan arus listrik (I) dan beda potensial (ΔV) sebagai berikut:

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

dengan, R Resistansi (Ohm), ΔV = Beda potensial (Volt), I = Arus listrik (Ampere)

Berdasarkan hubungan di atas didapatkan nilai resistivitas batuan dengan mempertimbangkan faktor geometri/konfigurasi metode *ERT* yang digunakan. Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi tahapan pengumpulan data lapangan (akuisisi), tahapan pengolahan data lapangan, dan tahapan analisis data.

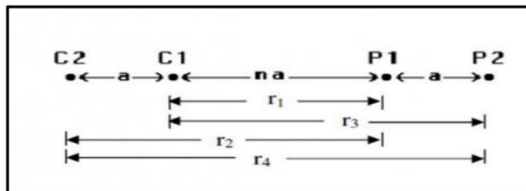
Metode *AST* merupakan salah satu filter pada data geomagnetic, dimana metode ini mengukur nilai intensitas medan magnet bumi yang dipengaruhi oleh nilai suseptibilitas batuan di bawah permukaan. Secara umum persamaan kuat medan magnet adalah sebagai berikut:

$$H = \frac{F}{q_2} = \frac{q_1}{\mu_0 r^2} \hat{r}_1 \quad (2)$$

dengan H adalah kuat medan magnet, F adalah gaya magnet, q_1 dan q_2 adalah besaran masing-masing benda, μ_0 adalah permeabilitas ruang bebas dan r adalah jarak antara m_1 dan m_2 [7]. Kemampuan suatu benda untuk termagnetisasi disebut suseptibilitasnya dan dapat dihitung dengan persamaan:

$$I = kH \tag{3}$$

Tahapan awal dalam pengumpulan data lapangan adalah tahapan persiapan. Pada tahapan ini dilakukan studi literatur mengenai obyek penelitian, pemilihan metode tepat guna, pembuatan desain pengukuran, dan persiapan peralatan lapangan. Pada tahapan studi literatur dilakukan studi mengenai literatur – literatur pendukung mengenai obyek penelitian dan dari perspektif arkeologi dan geologi di sekitar Situs Liyangan. Tahapan akuisisi data dilakukan dengan penentuan konfigurasi metode geolistrik yang digunakan agar sesuai dengan obyek pengukuran. Dalam penelitian ini konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi dipole – dipole, dimana konfigurasi ini memiliki keunggulan dalam mendeliniasi perubahan sifat resistivitas di bawah permukaan baik secara horizontal dan vertikal (**Gambar 4**).



Gambar 4. Konfigurasi dipole – dipole dalam pengukuran geolistrik [7]

Setelah dilakukan penentuan konfigurasi, tahapan berikutnya dalam pengumpulan data lapangan adalah membuat desain pengukuran lapangan. Penentuan desain pengukuran lapangan dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai aspek yang diantaranya; orientasi target, kondisi control geologi lapangan, topografi permukaan, dan ketersediaan pemukiman masyarakat di daerah penelitian. Adapun orientasi pengukuran lapangan pada penelitian ini berarah timur laut – barat daya dan tenggara – barat laut mengikuti arah orientasi Situs Liyangan (**Gambar 5**).



Gambar 5. Desain lintasan pengukuran metode geolistrik (Dimodifikasi dari Citra Google Earth yang diakses tanggal 8 Agustus 2022)

Pada akuisisi metode geomagnetik digunakan dua buah perangkat proton magnetometer yang berfungsi untuk mengukur variasi intensitas medan magnet bumi, dimana satu buah alat digunakan untuk mengukur variasi spasial medan magnet bumi dan satu alat yang lain digunakan untuk mengukur variasi temporal intensitas medan magnet bumi. Dari kedua data tersebut, kemudian didapatkan nilai intensitas medan magnet anomali melalui persamaan sebagai berikut:

$$H_a = H_{average} - H_{var} - H_{IGRF} \tag{4}$$

dengan, H_a : total intensitas medan magnet anomali, H_{ave} : rata – rata medan magnet spasial, H_{var} : variasi medan magnet temporal, H_{IGRF} : Koreksi IGRF (44700 nT).

Titik pengukuran lapangan metode geomagnetik dilakukan dengan sistem grid dimana jarak antar titik pengukuran sejauh 10 meter dengan arah grid timur – barat dan utara – selatan (**Gambar 6**).

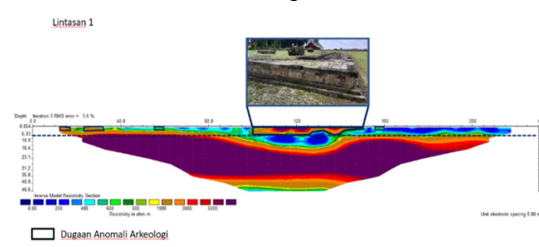


Gambar 6. Desain lintasan pengukuran metode geomagnetik (Dimodifikasi dari Citra Google Earth yang diakses tanggal 8 Agustus 2022)

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil dan Pembahasan Metode ERT

Melalui proses inversi dua dimensi (2D) data metode geolistrik didapatkan penampang resistivitas 2D (**Gambar 7**) yang menunjukkan distribusi nilai resistivitas di bawah permukaan. Penampang resistivitas kemudian diinterpretasi berdasarkan tingkat nilai resistivitasnya untuk mengetahui struktur situs Liyangan serta struktur batuan di bawah permukaan situs.



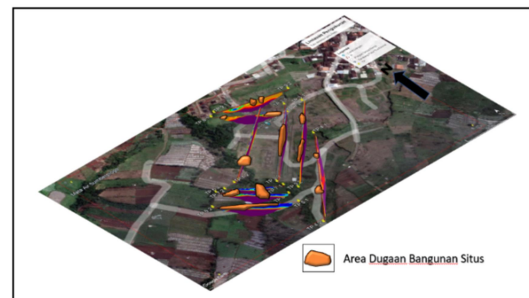
Gambar 7. Penampang 2D resistivitas batuan

Berdasarkan penampang 2D resistivitas batuan di bawah permukaan didapatkan variasi nilai resistivitas batuan di bawah permukaan. Penampang 2D menunjukkan batuan candi pada Situs Liyangan yang sudah terungkap maupun yang belum terungkap memiliki tingkat nilai resistivitas yang tinggi yakni sebesar 1000 – 5000 ohm.m. Hal tersebut karena struktur bangunan candi pada Situs Liyangan tersusun atas batuan beku vulkanik berupa batuan andesit yang merupakan produk erupsi dari Gunung Sindoro yang dapat diperoleh masyarakat sekitar pada jaman dahulu di sekitar kompleks Situs Liyangan.

Hal yang menarik dari hasil penampang 2D adalah batuan candi pada Situs Liyangan disusun di area dengan tingkat resistivitas yang rendah (1-300 ohm.m) yang menunjukkan area tersebut merupakan area yang basah dengan tingkat saturasi fluida yang tinggi. Area dengan tingkat resistivitas rendah ini menunjukkan daerah di sekitar Situs Liyangan pada masa lampau merupakan daerah basah yang kaya akan sumber daya air. Hal tersebut mengindikasikan pada masa lampau daerah di sekitar Situs Liyangan merupakan daerah yang kaya akan air sehingga dimanfaatkan oleh masyarakat pada masa itu sebagai lahan pesawahan, perkebunan dan pertanian. Hal tersebut diperkuat dengan berbagai peninggalan masa lampau pada Situs Liyangan yang diantaranya berupa produk pertanian berupa timbunan beras yang terbakar dan tertimbun di bawah permukaan.

Di bawah lapisan basah tersebut didapatkan batuan *basement* berupa batuan vulkanik hasil erupsi Gunung Sindoro yang digambarkan pada penampang 2D dengan tingkat resistivitas yang tinggi (>3000 ohm.m). Batuan *basement* ini menjadi dasar dari lapisan batuan basah yang diperkirakan berupa endapan aluvial sungai yang mengalir dari puncak Gunung Sindoro pada masa lampau. Batuan *basement* ini tersebar di seluruh daerah penelitian dengan persebaran mengikuti keluerengan Gunung Sindoro.

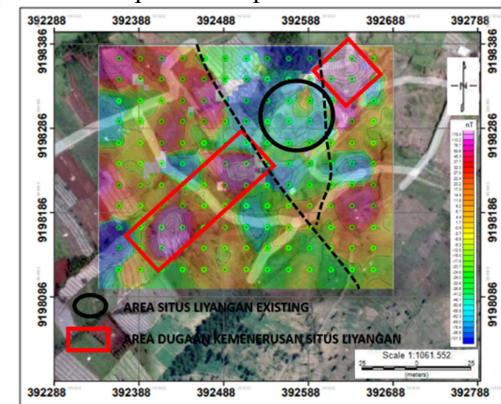
Pola sebaran batuan candi pada Situs Liyangan baik yang masih terpendam maupun yang sudah terungkap tersebar dengan arah timur laut – barat daya mengikuti keluerengan Gunung Sindoro (**Gambar 8**).



Gambar 8. Persebaran dugaan bangunan Situs Liyangan

B. Hasil dan Pembahasan Metode AST

Hasil metode geomagnetik berupa peta filter *AST* yang menunjukkan tingkat intensitas kemagnetan batuan. Peta filter *AST* pada daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Peta Analytic Signal Geomagnetic (AST)

Berdasarkan peta AST didapatkan informasi bahwa daerah penelitian memiliki tingkat intensitas yang beragam dengan range - 101,3 sampai 178 nT. Untuk area di sekitar Situs Liyangan yang sudah terungkap menunjukkan

nilai intensitas kemagnetan rendah – sedang ((-55)-4.4nT). Hal tersebut mengindikasikan daerah Situs Liyangan yang sudah terungkap merupakan area dengan tingkat sedimentasi yang tinggi atau merupakan area basah. Hal tersebut sesuai dengan analisis pada metode ERT bahwa bangunan candi pada Situs Liyangan dibangun di daerah basah yang merupakan daerah lahan pertanian yang kaya akan air. Terdapat indikasi area dugaan Situs Liyangan yang masih terpendam yang ditandai dengan garis merah yang ditunjukkan dengan nilai intensitas kemagnetan tinggi >22 nT.

Pada peta *AST* juga diindikasikan adanya struktur geologi berupa patahan yang ditunjukkan dengan garis putus – putus yang diinterpretasikan berdasarkan kontras nilai intensitas kemagnetan tinggi dan rendah dimana batas kontras nilai tersebut dapat diindikasikan sebagai struktur patahan/sesar. Didapatkan dua buah struktur patahan yang berarah tenggara – barat laut dan timur laut – barat daya. Struktur patahan ini menjadi salah satu faktor geologi yang mengontrol batuan di daerah sekitar Situs Liyangan.

KESIMPULAN

Penelitian ini dapat terlaksana atas dukungan berbagai pihak yakni Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M) UPN “Veteran” Yogyakarta yang memberikan pendanaan hibah internal yang mendanai penelitian pada publikasi ini. Penelitian ini juga dapat terlaksana atas Kerjasama dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Jawa Tengah yang telah mengakomodir dan memberikan akses penelitian di Situs Liyangan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Teknik Geofisika UPN “Veteran” Yogyakarta yang telah mengakomodasi peralatan lapangan dan pengolahan data dalam penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana atas dukungan berbagai pihak yakni Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M) UPN “Veteran” Yogyakarta yang memberikan pendanaan hibah internal yang mendanai penelitian pada publikasi ini. Penelitian ini juga dapat terlaksana atas Kerjasama dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Jawa Tengah yang telah mengakomodir dan memberikan

akses penelitian di Situs Liyangan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Teknik Geofisika UPN “Veteran” Yogyakarta yang telah mengakomodasi peralatan lapangan dan pengolahan data dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Riyanto, *Situs Liyangan dan Sejarahnya Peradaban Adiluhung di Lereng Gunung*, Yogyakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Badan Penelitian dan Pengembangan dan Perbukuan Pusat Arkeologi Nasional Balai Arkeologi Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, 2020.
- [2] D.A.Tanudirjo, J.S.E.Yuwono, dan A.M.W Adi, ”Lanskap Spiritual Situs Liyangan”, *Jurnal Berkala Arkeologi* Vol 39 No. 2 Halaman 97 – 120, 2019.
- [3] Sismanto, “Laporan Teknis Pengukuran Pada Komplek Situs Candi Kedulan Dengan Menggunakan Metode VLF”, Yogyakarta: Lab. Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, UGM, 2004.
- [4] S.Husein, B. S Saptono, P.Subagyo, “Georadar Investigation at the Kedulan Temple Excavation Site, Kalasan, Yogyakarta. Yogyakarta”, Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering, UGM, 2010.
- [5] M. Firdaus, W.S. Giamboro, dan W. Hidayat, “Identification of Buried “Archeological” Objects in the Area Around Kedulan Temple Using Geomagnetic Methods”, *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, 2021.
- [6] R. Sukhyar, N.S. Sumartadipura, dan Erfan R.D., “Peta Geologi Gunungapi Sundoro, Jawa Tengah skala 1:50.000”, Direktorat Vulkanologi, Bandung, 1992.
- [7] W.M. Telford, L.P. Geldart, and R.E. Sheriff *Applied Geophysics Second edition*. New York: Cambridge, 1990.

Rancang bangun data logger berbasis Arduino sebagai penyimpan data

Hartono, Farzand Abdullatif*, Abdullah NA, Sehad, Sugito, Simon Petrus RS

Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Jln. Dr. Soeparno 61 Grendeng Purwokerto

*email: farzand.abdullatif@unsoed.ac.id

Abstrak - Sistem perekaman data dapat dibuat dengan membangun data logger berbasis Arduino. Data logger multi channel berbasis Arduino uno telah dibuat. Pembuatan data logger ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan perekaman data pada setiap alat ukur yang membutuhkan perekaman data. Data logger dibuat dengan menggunakan modul multiplexer 74HC4051 yang memiliki 8 input sebagai media pengembangan jalur masukan pada arduino. Setiap sinyal yang masuk pada modul multiplexer akan dikirim ke Arduino uno untuk proses perhitungan dan pemilahan channel. Setiap data hasil perhitungan disimpan pada modul penyimpanan yang berupa microSD. Pengujian sistem dilakukan dengan menggunakan variasi tegangan pada setiap channel. Berdasarkan hasil pengujian, multiplexer dapat menyalurkan setiap sinyal yang diterima pada setiap channel dengan baik tanpa terjadi kesalahan jalur. Modul penyimpanan juga dapat menyimpan setiap data yang diterima oleh arduino uno dengan interval penyimpanan setiap detik. Multiplexer mempunyai tingkat akurasi 100% terhadap pemilahan jalur. Modul penyimpanan sebagai data logger juga mempunyai akurasi sebesar 100%.

Kata Kunci: data logger, penyimpanan data, multi channel

Abstract – A Data recording system using an Arduino-based multi-channel data logger has been designed. This data logger can be installed in any measuring instrument that requires data recording. The data logger comprises a 74HC4051 multiplexer module that has eight inputs for developing input lines on the Arduino. Every signal that enters the multiplexer module will be sent to Arduino Uno for calculations and channel sorting. Each calculation data is stored on a storage module in the form of a microSD. The system is tested by using voltage variations on each channel. Based on the test results, the multiplexer can properly channel every signal they receive without path errors. The storage module can also store every data received by the Arduino Uno with a storage interval of every second. The multiplexer has a 100% accuracy rate for line sorting. The storage module as a data logger also has an accuracy of 100%.

Key words: data logger, data storage, multi-channel

PENDAHULUAN

Resistivity meter merupakan peralatan utama dalam melakukan survei geolistrik resistivitas. Penggunaan alat ini dilakukan dengan cara menginjeksikan arus listrik ke dalam lapisan batuan melalui dua buah elektroda arus dan membaca respon beda potensialnya [1]. Dalam sebuah survei akan melibatkan banyak titik pengukuran untuk satu lintasan. Data pembacaan dari setiap titik pengukuran harus dicatat secara langsung untuk setiap lintasan. Hal ini merupakan salah satu kendala dan salah satu faktor penyebab waktu pelaksanaan survei menjadi lama [2].

Berbagai jenis *resistivity-meter* pabrikan sudah banyak beredar dipasaran dan beberapa sudah dilengkapi dengan sistem perekaman data. Namun demikian, harga alat tersebut

sangat mahal sehingga tidak semua institusi mempunyai alat jenis tersebut. Selain masalah harga yang sangat mahal, permasalahan lain yang dihadapi pengguna adalah peralatan pabrikan tidak dapat dikembangkan sesuai kebutuhan pengguna. Pengembangan *resistivity-meter* sudah banyak dilakukan untuk memenuhi kebutuhan masing-masing penggunanya. Pengembangan dan modifikasi mulai dari *single channel*, model digital maupun multi elektroda sudah dilakukan [2-5]. Salah satu resistivity meter sederhana yang pernah dibuat adalah model *single channel*. Permasalahan dari resistivity meter buatannya adalah tidak terdapat rangkaian pengendali arus konstan [5]. Resistivity meter multi elektroda sudah pernah dibuat dengan menggunakan rangkaian yang membutuhkan biaya rendah. *Resistivity-meter* dibangun dengan menggunakan basis

mikrokontroler sebagai pengendali sinyal. Hal serupa pernah dilakukan dengan menggunakan sistem penampil digital [6,7]. Berdasarkan artikel yang disampaikan, kedua peralatan yang dibuat masih sebatas uji laboratorium dengan menggunakan hambatan uji dan belum dilakukan kalibrasi untuk uji lapangan. Pembuatan sistem multi channel dan modul penyimpanan data sangat diperlukan untuk meningkatkan kinerja dari resistivity meter *single channel* yang masih manual.

Data logger merupakan perangkat elektronika yang terhubung dengan sensor dan berfungsi untuk mencatat data secara berkala [6]. Perangkat ini dapat diaplikasikan pada sistem-sistem yang memerlukan pencatatan ataupun perekaman data secara otomatis. Sesuai dengan fungsinya data logger dilengkapi dengan mikrokontroler dan memerlukan memori untuk menyimpan data. Memori yang digunakan dapat berupa memori internal di dalam mikrokontroler ataupun memori eksternal. Sesuai dengan tujuan penelitian yang telah dilakukan yaitu membuat sistem penyimpanan data otomatis. Sistem penyimpanan data otomatis ini nantinya akan diterapkan pada alat *resistivity-meter* sebagai data logger.

METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan pembuatan diagram blok rangkaian seperti rangkaian multiplexer, modul SD card, Arduino serta persiapan rangkaian pendukung. Setelah dilakukan perancangan rangkaian secara keseluruhan, langkah berikutnya adalah merealisasikan rangkaian demi rangkaian. Setiap rangkaian yang telah selesai dibuat dilakukan pengujian untuk memastikan dapat bekerja dengan baik.

Data logger dibuat untuk keperluan perekaman data pada alat resistivity meter, dengan demikian harus mempunyai spesifikasi yang sesuai dengan alat tersebut [8]. Data resistivity meter yang akan disimpan meliputi arus listrik, tegangan, spasi elektroda arus dan spasi elektroda potensial. Keempat variabel merupakan variabel masukan pada data logger. Data perekaman disimpan sesuai dengan format data sheets survei geolistrik resistivitas.

Multichannel yang digunakan multiplexer 74HC4051. Multiplexer adalah suatu rangkaian yang mempunyai banyak input dan mempunyai satu output. Sistem kerja multiplexer dengan cara menggunakan selektor yang dapat memiliki salah satu input dari beberapa input untuk

dijadikan output, seperti sebuah sakelar. Dalam pengujian multiplexer yang digunakan adalah multiplexer 74HC4051 yang memiliki 8 channel sebagai input, 3 selektor (S0, S1 dan S2) dan 1 output.

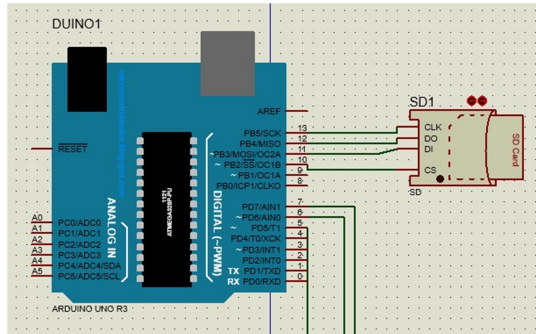
Multiplexer dapat dijalankan dengan Arduino dan mendapat perintah dari software Arduino IDE. Pengujian dilakukan dengan mengubah tegangan pada setiap channel multiplexer dan selanjutnya menghasilkan 1 output yang ditampilkan pada serial monitor. Data yang keluar sesuai dengan setiap perintah selektor. Selektor pada multiplexer menggunakan konsep gerbang logika. Dengan konsep itu maka multiplexer memiliki tabel kebenaran yang akan menentukan input yang akan keluar menjadi output. Tabel kebenaran multiplexer dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Tabel kebenaran multiplexer

S2	S1	S0	Out
0	0	0	I ₀
0	0	1	I ₁
0	1	0	I ₂
0	1	1	I ₃
1	0	0	I ₄
1	0	1	I ₅
1	1	0	I ₆
1	1	1	I ₇

Tabel 1 dapat digunakan untuk memberikan perintah pada setiap selektor untuk menentukan input yang mana dipilih menjadi outputnya. Setiap perintah dilakukan di dalam listing pada software Arduino IDE. Pengujian multiplexer dilakukan dengan cara memberikan tegangan sebesar 2 V pada setiap channel input secara bergantian.

Modul penyimpanan menggunakan modul SD card. Modul ini berperan penting dalam perancangan perekaman data logger. Setiap sinyal yang dihasilkan oleh arduino, dapat diperintahkan untuk disimpan ke dalam SD card. Hubungan antara pin modul SD card dan Arduino pada rangkaian adalah pin 10 Arduino dengan pin CS modul SD card dan pin 12 Arduino terhubung dengan pin DO pada modul SD card. Hubungan antar pin tersebut diperlihatkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Rangkaian modul SD card dengan arduino.

Pengujian modul ini dilakukan dengan menyimpan tegangan yang dikeluarkan multiplexer yang sudah diproses oleh arduino. SD card dapat bekerja sesuai dengan listing Arduino IDE. Di dalam listing terdapat perintah OPEN sebagai perintah mengirim data dan menyimpan ke SD card, perintah MY FILE.PRINT menulis data ke dalam SD card.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi dan pengujian multiplexer sebagai modul multi chanel dan modul penyimpanan dilakukan sesuai dengan langkah yang sudah diuraikan pada bagian metode. Realisasi pertama adalah modul multiplexer yang dibuat menggunakan multiplexer 74HC4051. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan tegangan pada setiap channel-channel yang terdapat pada multiplexer 74HC4051. Variasi tegangan dilakukan dengan menggunakan tegangan tetap 2 V yang diberikan pada setiap chanel input secara bergantian. Pengaturan selektor untuk menentukan input yang keluar sebagai output diatur didalam listing Arduino IDE. Hasil pengujian setiap channel multiplexer dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Data hasil pengujian multichannel menggunakan multiplexer

Input tegangan pada chanel:								Output tegangan pada chanel:							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0
0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Berdasarkan hasil pengujian multichannel didapatkan bahwa setiap channel yang ada dapat digunakan dengan baik. Pengujian pada multichannel dilakukan untuk mengetahui setiap channel bekerja dengan baik dan sesuai dengan yang diinginkan. Pada **Tabel 1** menunjukkan bahwa setiap input channel dapat dibaca oleh arduino dengan tepat yang ditunjukkan pada kolom bagian output. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa tidak terjadi kesalahan jalur pada rangkaian multiplexer. Hasil ini juga menunjukkan tingkat akurasi dari multiplexer sebesar 100%.

Realisasi berikutnya adalah modul penyimpanan data menggunakan modul SD card. Modul SD card merupakan modul yang sudah beredar di pasaran dan hanya dilakukan instalasi dan pemrograman. Pemrograman dilakukan untuk memberikan perintah agar arduino memerintahkan SD card melakukan penyimpanan data. Perintah ini tertuang dalam program seperti yang ditunjukkan dalam potongan program **Gambar 2** dan **Gambar 3**.

```

pengujian_SD_card | Arduino 1.8.13
File Edit Sketch Tools Help

pengujian_SD_card
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
File myFile;
// cs =10;
// sek = 13
// MOSI = 11;
// MISO = 12
void setup()
{Serial.begin(9600);
Serial.println("Data Logger Starting . . . !");
delay(500);
Serial.println("Membuka Micro SD . . .");
delay(500);
if (!SD.begin(10))
{Serial.println("Gagal Membuka Micro SD!");
return;}
Serial.println("| data tersimpan");}
    
```

Gambar 2. Potongan listing program Setup modul micro SD

```

void loop() {
int sensorValue1 = analogRead(A1);
float Saluran1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);
delay(500);
int sensorValue2 = analogRead(A1);
float Saluran2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);
delay(500);
int sensorValue3 = analogRead(A1);
float Saluran3 = sensorValue3 * (5.0 / 1023.0);
delay(500);
int sensorValue4 = analogRead(A1);
float Saluran4 = sensorValue4 * (5.0 / 1023.0);
delay(500);
// kirim data ke SD card
myFile =SD.open("logger.txt",FILE_WRITE);// membu
if (myFile)//jika file tersedia tulis data
{Serial.println("Berhasil Membuka Micro SD");}
    
```

```

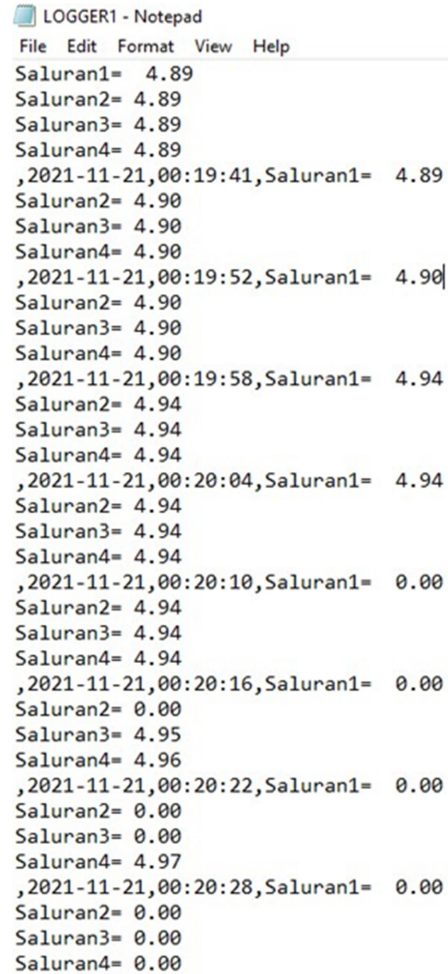
myFile.print ("Saluran1= "); // menulis data di microSD
myFile.print (Saluran1);
myFile.println ("V");
myFile.print ("Saluran2= "); // menulis data di microSD
myFile.print (Saluran2);
myFile.println ("V");
myFile.print ("Saluran3= "); // menulis data di microSD
myFile.print (Saluran3);
myFile.println ("V");
myFile.print ("Saluran4= "); // menulis data di microSD
myFile.print (Saluran4);
myFile.println ("V");
myFile.close();
}
else {
    Serial.println("gagal membuka test.txt");
}
delay(500);
}

```

Gambar 3. Potongan program looping proses penyimpanan

Pengujian penyimpanan data dilakukan dengan memberikan tegangan melalui setiap chanel multiplexer. Pengujian dilakukan terhadap 4 jalur input menggunakan tegangan 5 V. Hasil pengujian seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**. Pengujian berhasil menunjukkan perekaman data yang sangat baik. Tegangan sebagai data masukan pada setiap jalur multiplexer berhasil disimpan sesuai dengan jalurnya masing-masing. Proses penyimpanan juga tidak mengalami gagal simpan.

Berdasarkan pada hasil pengujian seluruh bagian data logger, maka dapat diperoleh keputusan bahwa data logger dapat diaplikasikan ke dalam resistivity meter. Sebagaimana yang sudah dijelaskan bahwa data logger difungsikan untuk melakukan perekaman data. Keberlanjutan dari penelitian ini adalah pengaplikasian data logger ke dalam alat resistivity meter.



```

LOGGER1 - Notepad
File Edit Format View Help
Saluran1= 4.89
Saluran2= 4.89
Saluran3= 4.89
Saluran4= 4.89
,2021-11-21,00:19:41,Saluran1= 4.89
Saluran2= 4.90
Saluran3= 4.90
Saluran4= 4.90
,2021-11-21,00:19:52,Saluran1= 4.90
Saluran2= 4.90
Saluran3= 4.90
Saluran4= 4.90
,2021-11-21,00:19:58,Saluran1= 4.94
Saluran2= 4.94
Saluran3= 4.94
Saluran4= 4.94
,2021-11-21,00:20:04,Saluran1= 4.94
Saluran2= 4.94
Saluran3= 4.94
Saluran4= 4.94
,2021-11-21,00:20:10,Saluran1= 0.00
Saluran2= 4.94
Saluran3= 4.94
Saluran4= 4.94
,2021-11-21,00:20:16,Saluran1= 0.00
Saluran2= 0.00
Saluran3= 4.95
Saluran4= 4.96
,2021-11-21,00:20:22,Saluran1= 0.00
Saluran2= 0.00
Saluran3= 0.00
Saluran4= 4.97
,2021-11-21,00:20:28,Saluran1= 0.00
Saluran2= 0.00
Saluran3= 0.00
Saluran4= 0.00

```

Gambar 4. Jalur dan hasil penyimpanan data

KESIMPULAN

Rancang bangun data logger sebagai media penyimpanan berhasil dibuat dengan jumlah chanel 8. Multy channel dibuat menggunakan multiplexer 74HC4051, sementara media penyimpanan data menggunakan modul micro SD. Multy channel dan modul micro SD dapat bekerja dengan sangat baik dan mempunyai akurasi 100%, artinya tidak mengalami kegagalan.

UCAPAN TERIMA KASIH

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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. D. Sastrawan, M. Arisawadi dan R. , "Identifikasi Lapisan Bawah Permukaan Berdasarkan Data Resistivitas 2 Dimensi," *Jurnal Sains Terapan*, vol. 6, no. 2, pp. 99-105, 2020.
- [2] D. Fatahilah, Darsono dan Nuryani, "Low-cost multi electrode resistivity meter based on microcontroller for electric resistivity tomography purpose," dalam *9th International Conference on Physics and Its Applications (ICOPIA)*, Surakarta, Indonesia, 2019.
- [3] W. Igboama dan U. N, "Fabrication of resistivity meter and its evaluation," *American Journal Of Scientific And Industrial Research*, vol. 2, no. 5, pp. 713-717, 2011.
- [4] A. Mikailu, A. I, S. MG dan M. S, "Development of Digital Resistivity Meter," *IISTE Advances in Physics Theories and Applications*, vol. 42, pp. 56-61, 2015.
- [5] M. A. A. Yohandri, "Development of A Digital Resistivity Meter Based on Microcontroller," dalam *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, Jeju, Korea, 2018.
- [6] H. E. Ficrah dan Y. , "Pengembangan Prototype Digital Resistivity Meter Multielektroda Otomatis untuk Konfigurasi Schlumberger," *Pillar of Physics*, vol. Vol. 13., pp. 74-81, 2020.
- [7] A. M. Prasetia, R. Aidil dan R. Faizal, "Penggunaan Resistivity Meter Berbasis Boost converter Untuk Identifikasi Batuan Dasar Pancang Pondasi Bangunan di Pulau Tarakan," *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 2, no. 2, pp. 127-136, 2018.
- [8] S. Badhiye, P. Chobar dan B. Wakode, "Data Logger System," *IJCTEE*, pp. 24-26, 2011.

Identifikasi struktur geologi bawah permukaan berdasarkan pemodelan 3D data gravitasi (studi kasus daerah potensi panas bumi Kepahiang)

Sukmaji Anom Raharjo^{1*}, Aditya Verry Saputra¹, Tony Rahadinata²

¹Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

²Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP), Bandung

Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah

*e-mail:sukmaji.raharjo@unsoed.ac.id

Abstrak – Telah dilakukan survei metode gravitasi di daerah potensi panas bumi Kepahiang meliputi area dengan luas $12 \times 16 \text{ km}^2$ dengan total 332 titik data pengukuran. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan dan distribusi densitas batuan bawah permukaan yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal daerah potensi panas bumi. Pemodelan dan identifikasi struktur geologi bawah permukaan menggunakan analisis derivatif yang dapat mengetahui kontak vertikal massa bawah permukaan dan dapat mengetahui jenis struktur patahan yang dihasilkan. Hasil pemodelan 3D memperlihatkan suatu blok dengan nilai densitas rendah yang berarah selatan-barat dan terletak di daerah mata air panas. Densitas batuan rendah tersebut bernilai sekitar $2,4 \text{ g/cm}^3$ dan diinterpretasi sebagai jenis batuan piroklastik yang telah mengalami pelapukan akibat naiknya larutan hidrotermal. Hasil pemodelan juga memperlihatkan suatu blok batuan dengan densitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai respon batuan andesit, basalt yang masih kompak dan memungkinkan sebagai sumber panas bagi daerah panas bumi Kepahiang.

Kata Kunci: panas bumi, gravitasi, analisis derivatif, pemodelan

Abstract – A survey of the gravity method in the Kepahiang geothermal potential area has been carried out, covering an area of $12 \times 16 \text{ km}^2$ with a total of 332 measurement data points. This study aims to identify the subsurface geological structure and the distribution of subsurface rock density associated with the hydrothermal system of the potential geothermal area. Modeling and identifying subsurface geological structures using derivative analysis can determine the type of fault structure produced by subsurface mass's vertical contact. The 3D modeling results show a block with a low-density value located in the hot spring area in a southwest direction. The low rock density is about 2.4 g/cm^3 and is interpreted as pyroclastic rock undergoing weathering due to rising hydrothermal solutions. The modeling results also show a block of rock with high density, interpreted as a response to andesite rock, basalt, which is still compact and possible as a heat source for the Kepahiang geothermal area.

Key words: geothermal, gravity, derivatives analysis, modeling

PENDAHULUAN

Daerah panas bumi Kepahiang berada di daerah Kabupaten Kepahiang dan Rejang Lebong, Provinsi Bengkulu yang merupakan daerah vulkanik tinggi dan berada di jalur subduksi pada daerah busur magmatik yang terletak di sebelah barat Pulau Sumatra. Secara geologi, batuan pada kompleks Kaba pada umumnya berjenis andesit–basaltik yang berasal dari Bukit Itam, 1960, Biring, Selojuang, Penyeluan dan Kaba. Pembentukan kompleks gunung Kaba dipengaruhi oleh aktivitas tektonik yang searah dengan pola sesar Sumatera dan antitetikanya yang berarah baratdaya timurlaut [1].

Fluida panas pada sistem panas bumi Kepahiang bertipe bikarbonat dan sulfat yang

berada pada zona *immature water*. Indikasi sistem panas bumi di daerah ini dicirikan dengan munculnya manifestasi berupa air panas dengan temperatur tertinggi 94°C , pH netral, sulfatara dan fumarol dengan temperatur hingga 360°C dan alterasi batuan di sekitar Airsempiang, puncak Kaba, dan mata air panas di daerah Sempiang dan Babakan Bogor [1].

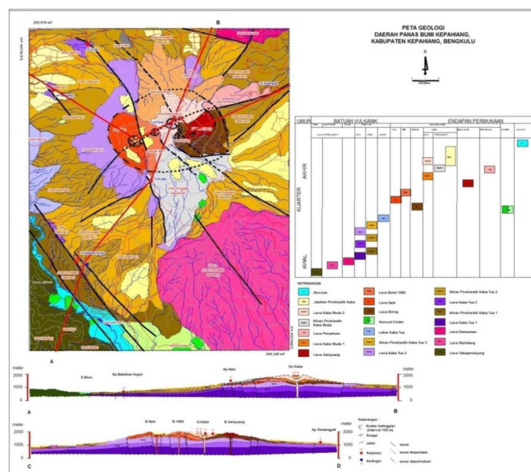
Data geologi daerah Panas Bumi Kepahiang menunjukkan adanya batuan yang memiliki sifat impermeable dengan kandungan mineral lempung jenis montmorilonit dan kaolinit yang cukup tinggi pada daerah alterasi di sekitar manifestasi Air Sempiang. Batuan alterasi yang terbentuk merupakan tipe argilik hingga argilik lanjut. Alterasi tersebut muncul pada aliran piroklastik dan lava produk Gunung

Kaba. Batuan penudung ini berada pada zona struktur sesar Sempiang yang berarah hampir utara selatan. Selain data alterasi, kemungkinan lainnya yang dapat diinterpretasikan sebagai batuan penudung adalah lava muda produk Kaba yang masif dan belum terkekarkan secara kuat [1].

Salah satu faktor penting dalam suatu sistem panas bumi adalah faktor sumber panas atau *heat source*. Sumber panas ini biasanya merupakan magma dibawah permukaan yang berasosiasi dengan batuan yang mempunyai densitas yang lebih tinggi, dan kontras dengan batuan di sekelilingnya. Kontras densitas ini dapat terlihat dari data gravitasi yang ditunjukkan adanya anomali pada peta gravitasi [2]

Untuk mengetahui zona permeabel dalam suatu sistem panas bumi diperlukan pemahaman dan informasi struktur geologi bawah permukaan yang mengontrol sistem panas bumi tersebut. Penyelidikan geologi diperlukan untuk mengetahui keberadaan struktur regional, sedangkan analisa dan pemodelan data gravitasi diperlukan untuk menemukan struktur maupun kontras litologi dengan perkiraan kedalamannya dibawah permukaan bumi [3]

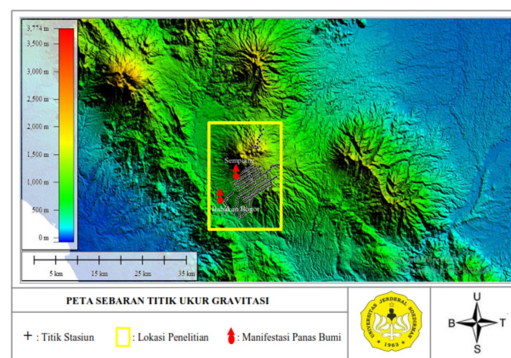
Dalam artikel ini, struktur geologi dan sumber panas dari sistem panas bumi Kepahiang diidentifikasi menggunakan analisa *derivative* medan gaya berat dengan estimasi densitas rata-rata yang diperoleh dari pengukuran densitas sampel batuan di lokasi penelitian dan pemodelan yang digunakan berupa pemodelan 3 dimensi.



Gambar 1. Peta struktur geologi daerah penelitian

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini data gravitasi yang digunakan sebanyak 332 titik dengan spasi antar titik pengukuran dalam lintasan adalah 250 meter. Data pengukuran gravitasi meliputi nilai bacaan alat, waktu pengukuran dan data *inner* atau *terrain* sekitar titik pengukuran. Nilai bacaan alat akan dikonversi ke dalam mGal yang kemudian diikatkan ke nilai gaya berat nasional (IGSN 71) DG0 Bandung. Stasiun basis (BS) dibuat di *base camp* sebagai titik *looping* pengukuran. Hasil pengukuran BS di daerah panas bumi Kepahiang terhadap DG0 menghasilkan nilai gravitasi 97786,976 mGal.



Gambar 2. Peta titik ukur gravitasi daerah panas bumi Kepahiang

Estimasi densitas yang dihasilkan adalah densitas rata-rata permukaan daerah penelitian yang dapat diperoleh dengan mengukur densitas sampel batuan dari lokasi penelitian di laboratorium dan dibandingkan dengan menggunakan analisis kualitatif dan kuantitatif seperti metode metode Nettleton dan Parasnis.

Tabel 1. Densitas batuan daerah panas bumi (Laboratorium PSDG)

No	Kode Sampel Batuan	Jenis Batuan	Densitas (g/cm ³)
1	KP.17	Lava Tua	2,08
2	KP.91	Dasit	2,69
3	KP.114	Andesit	2,39
4	RK.89	Basalt	2,47
Densitas rata-rata			2,41

Penentuan densitas secara kualitatif menggunakan metode Nettleton dilakukan dengan membuat profil topografi dan profil anomali Bouguer untuk densitas yang berbeda-beda dari tiap-tiap lintasan yang dipilih. Harga densitas yang dipilih sebagai densitas batuan permukaan (atau densitas topografi) adalah

densitas yang profil anomali Bouguernya tidak berkorelasi terhadap profil topografi.

Densitas rata-rata batuan daerah penelitian secara kuantitatif diperoleh menggunakan metode paransis. Metode paransis menggunakan persamaan regresi linear $y = mx + c$ yang diturunkan dari persamaan anomali gravitasi (persamaan 1), di mana sumbu y diperoleh dari nilai FAA ($g_{obs} - g_n + 0,3086h$) dan sumbu x didapat dari ketinggian dikalikan dengan 0,04192. Kemiringan garis trend dari grafik tersebut merupakan densitas rata-rata batuan yang ada di daerah penelitian [4].

$$\Delta g = g_{obs} - g_n + 0,3085h - 0,04192\rho_0h \quad (1)$$

Selanjutnya, parameter densitas ini digunakan untuk mendapatkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) dengan menggunakan persamaan (2). Peta kontur *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) hasil dari pemetaan nilai CBA dilakukan menggunakan *Software Geosoft Oasis Montaj 8.4*.

$$CBA = g_{obs} - g(\phi) + g_{FAC} - g_B + TC \quad (2)$$

Pemisahan anomali residual dan regional dilakukan untuk melihat anomali bawah permukaan yang terdapat di daerah penelitian yang lebih jelas. Metode pemisahan anomali regional dari CBA dilakukan dengan menggunakan filter *moving average*, yang bekerja dengan meloloskan data berfrekuensi rendah dan menghilangkan data berfrekuensi tinggi sehingga didapatkan anomali regional. Pada penelitian ini digunakan low pass filter 5x5 dengan lebar *window* yang diestimasi menggunakan analisis spektrum. Analisis spektrum dilakukan dengan melakukan *slicing* sebanyak 7 lintasan pada peta kontur CBA yang meliputi seluruh daerah pengukuran.

Analisis derivative pada data medan gravitasi yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan struktur geologi meliputi *First Horizontal Derivative* (FHD) and *Second Vertical Derivative* (SVD) yang bersifat sebagai low pass filter yang dapat memisahkan frekuensi rendah dari frekuensi tinggi [5].

Teknik FHD diterapkan untuk interpretasi kualitatif data anomali gravitasi residual, dimana kasus gradien horisontal paling tinggi merefleksikan perubahan densitas batuan dalam arah lateral [6]. Perubahan anomali secara horizontal ditandai dengan nilai maksimum FHD pada grafik FHD [4], dengan nilai FHD diperoleh dari persamaan (3).

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

Ketika diterapkan untuk interpretasi dua dimensi (2D), kurva gradien horisontal cenderung menempati ridge yang sempit. Oleh sebab itu gradien horisontal yang bernilai paling besar akan terlokalisir langsung di tepi benda (batas litologi). Hal ini dapat dimanfaatkan untuk melokalisir batas-batas kontak litologi benda anomali terhadap lingkungannya dengan cara melihat perubahan densitas benda dalam arah lateral [6].

Karena medan gravitasi memenuhi persamaan laplace, SVD dapat diperoleh dari turunan horizontal, yang dapat dituliskan pada persamaan (4)

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}\right) \quad (4)$$

dengan kriteria penentuan jenis patahan seperti pada persamaan (5) dan (6) [7].

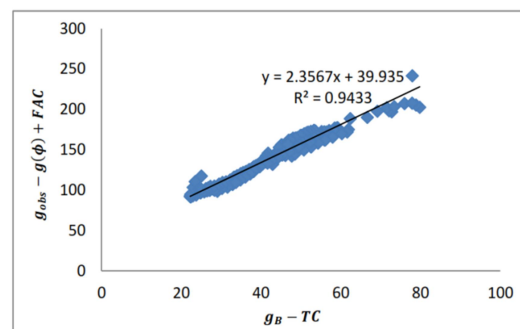
$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)_{maks} > \left|\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)\right|_{min} \text{ Patahan Turun} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)_{maks} < \left|\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)\right|_{min} \text{ Patahan Naik} \quad (6)$$

Penggunaan SVD untuk analisis sebaiknya dibatasi untuk kondisi struktur geologi yang relative sederhana dan digunakan untuk interpretasi secara kualitatif saja [8].

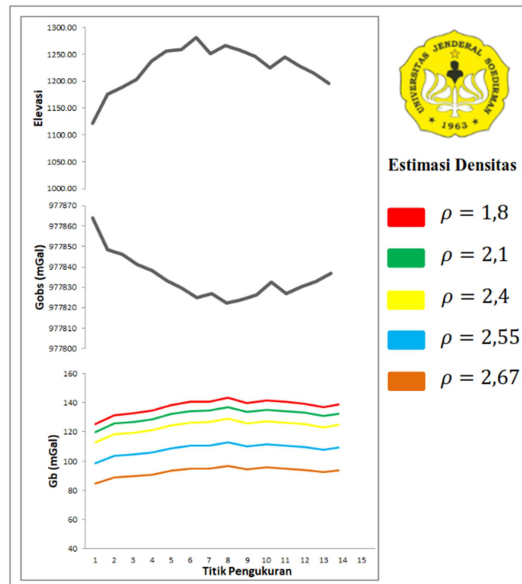
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan densitas menggunakan metode Paransis adalah 2,3567 g/cm³ dan dibulatkan menjadi 2,4 g/cm³.



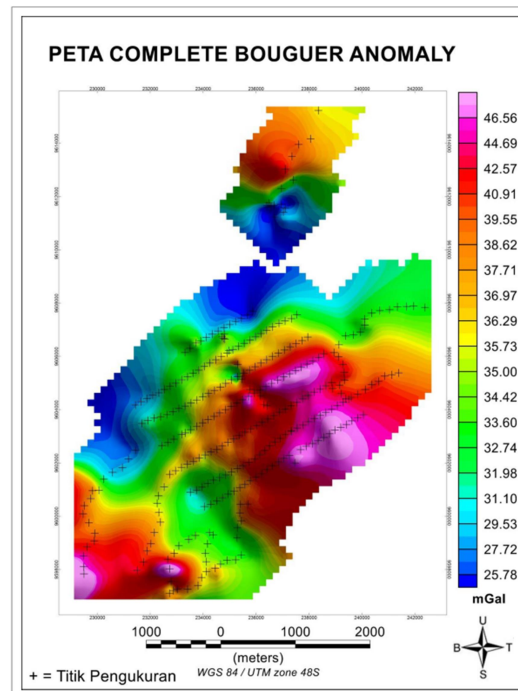
Gambar 3. Estimasi densitas batuan dengan metode Paransis

Metode secara kualitatif yang juga digunakan yaitu Nettleton (**Gambar 4**). Penentuan densitas batuan dilakukan dengan korelasi antara grafik topografi, gravitasi observasi dan densitas. Anomali Bouguer titik ukur pada suatu lintasan diplot dengan berbagai macam densitas. Nilai densitas diperoleh apabila nilai anomali gravitasi yang dihasilkan tidak mempunyai korelasi dengan topografi. Pada penelitian ini diperoleh nilai densitas di daerah penelitian yaitu $2,4 \text{ g/cm}^3$.



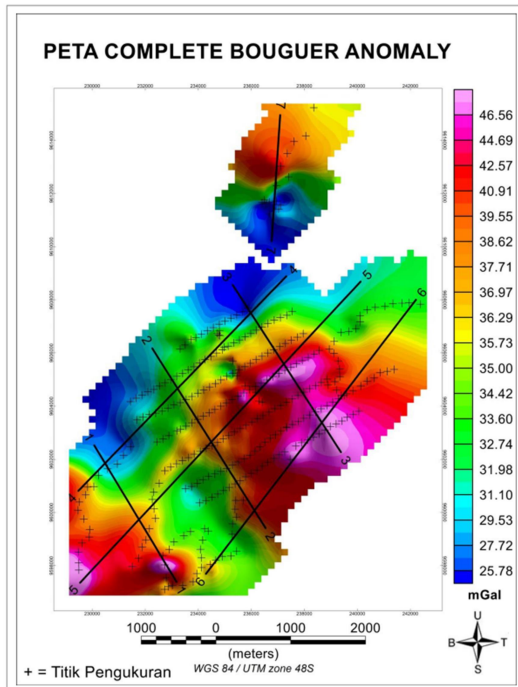
Gambar 4. Estimasi densitas batuan dengan metode Nettleton

Nilai *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) diperoleh dari persamaan (2) dengan nilai densitas batuan yang digunakan yaitu $2,4 \text{ g/cm}^3$, dan sebaran nilainya terlihat pada **Gambar 5**, dan slicing lintasan pada peta CBA di **Gambar 6**.



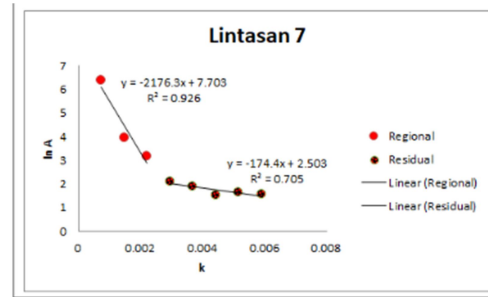
Gambar 5. Peta Complete Bouguer Anomaly (CBA)

Dari Peta CBA, nilai anomali pada daerah penelitian berkisar $25,78 \text{ mGal}$ sampai $46,56 \text{ mGal}$, dengan anomali CBA tinggi, berada di bagian timur dan barat daya dengan nilai $> 39,55 \text{ mGal}$. Anomali ini ditafsirkan sebagai respon dari batuan dasit dan andesit. Anomali sedang, berada di tengah bagian barat, selatan, timur dan tenggara dengan nilai $31,98\text{-}39,55 \text{ mGal}$ yang ditafsirkan sebagai respon batuan basalt yang didominasi oleh batuan piroklastik yang telah mengalami pelapukan lemah-sedang. Anomali rendah, tersebar di bagian barat, barat laut dan utara dengan nilai $25,78\text{-}31,98 \text{ mGal}$ yang ditafsirkan sebagai respon batuan yang telah mengalami pelapukan dari tingkat lemah sampai kuat akibat naiknya larutan hidrotermal.



Gambar 6. Irisan tujuh lintasan pada analisis spektrum

Analisis spektrum dilakukan dengan *slicing* tujuh lintasan (Gambar 6) pada peta kontur Complete Bouguer Anomaly (CBA) yang mencakup seluruh daerah penelitian, proses ini bertujuan untuk memperoleh data anomali bouguer dari masing masing *slicing* yang selanjutnya ditransformasi dalam bilangan gelombang dengan melakukan transformasi fourier, dan hasilnya terlihat pada Gambar 7.

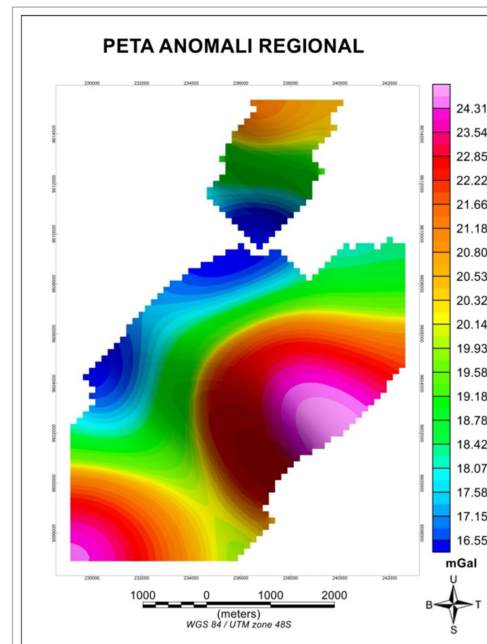
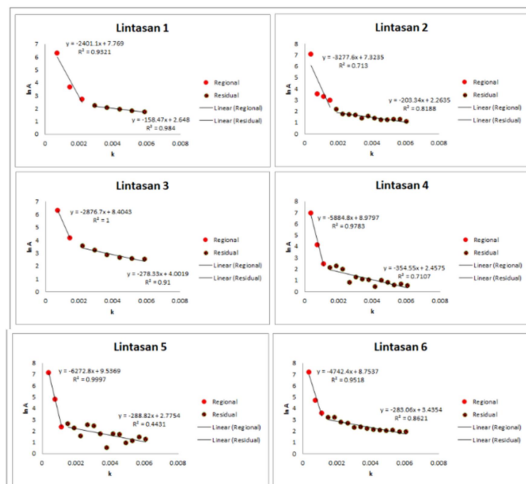


Gambar 7. Grafik Analisis Spektrum Tujuh Lintasan

Dari tujuh lintasan tersebut, nilai rata-rata sumber anomali regional berada pada kedalaman 3.947,4 m dan nilai rata-rata kedalaman anomali residual 248,71 m, yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Spektrum

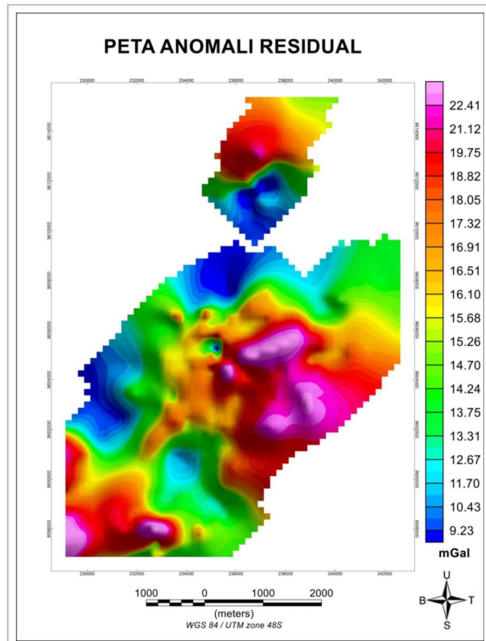
Lintasan	Kedalaman Regional (m)	Kedalaman residual (m)	N
1	2401,1	158,4	11,01
2	3277,6	203,3	15,27
3	2876,7	278,3	14,83
4	5844,8	354,5	21,31
5	6272,8	288,8	22,24
6	4742,4	283,1	21,07
7	2176,3	174,4	23,92
Rata-rata	3947,4	248,7	18,52
Window			19



Gambar 9. Anomali regional daerah penelitian

Daerah dengan anomali tinggi pada peta anomali regional (Gambar 9) berada di bagian timur, tenggara, selatan dan barat daya dengan nilai anomali gravitasi 20,14 -24,31 mGal yang

diinterpretasi sebagai respon batuan dasit yang masih kompak dan masif.

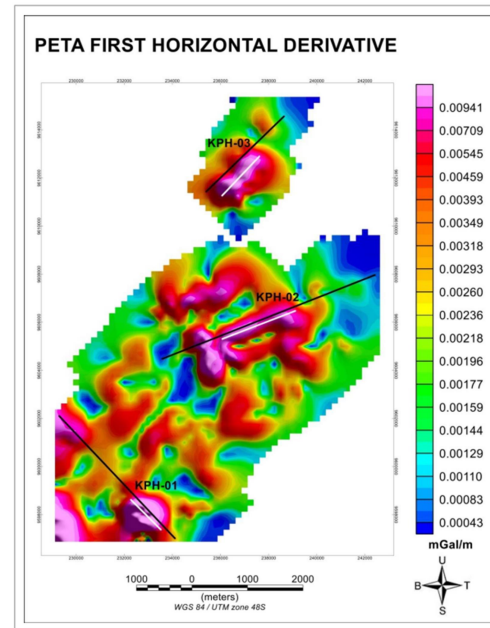


Gambar 10. Anomali residual daerah penelitian

Anomali residual daerah penelitian (Gambar 10) merupakan respon dari objek bawah permukaan yang menunjukkan struktur pada kedalaman yang dangkal. Terdapat beberapa indikasi adanya struktur geologi berupa patahan yang diinterpretasi dari anomali residual, seperti liniasi di bagian utara, tengah dan barat daya. Pada bagian utara hingga barat terlihat pola anomali dengan liniasi dan kerapatan kontur antara anomali rendah dan sedang yang cukup tajam.

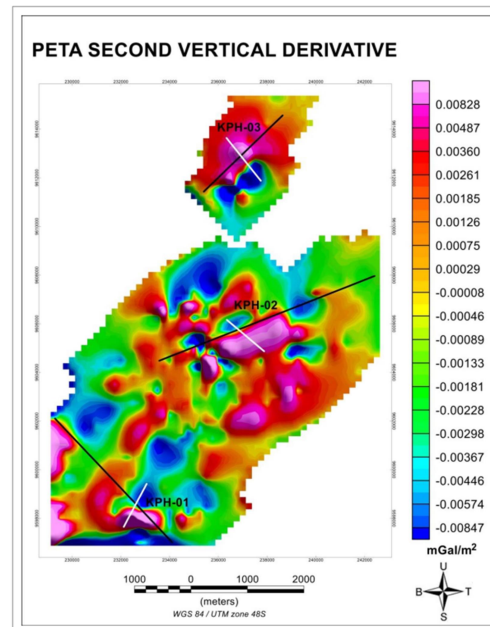
Liniasi ini menggambarkan seperti suatu struktur kaldera yang melingkupi mata air panas Sempiang daerah Gunung Kaba. Liniasi ini diperkirakan merupakan segmen struktur patahan aktif Sumatera yang memanjang dari selatan hingga utara Pulau Sumatera dan merupakan kontrol struktur air panas Babakan Bogor.

Analisis gradien horizontal dan vertikal biasanya dilakukan sebagai bagian dari interpretasi kualitatif dan semi kuantitatif yang diharapkan dapat memperjelas batas sumber anomali dari peta anomali residual [8]. First Horizontal Derivative (FHD) dilakukan terhadap peta anomali residual untuk memperjelas keberadaan struktur patahan dan hasilnya terlihat pada Gambar 11. Nilai FHD tinggi 0,00545-0,00941 mGal/m pada daerah penelitian menunjukkan adanya struktur geologi berupa patahan.



Gambar 11. Peta Kontur Anomali FHD

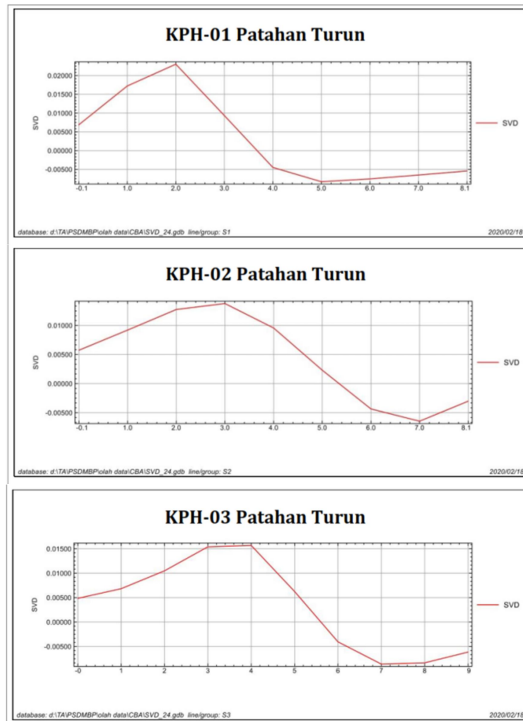
Data geologi berupa struktur patahan yang ditunjukkan dengan garis berwarna hitam pada peta kontur anomali FHD (Gambar 11) ternyata bersesuaian dengan nilai FHD yang tinggi. Selanjutnya dilakukan analisa Second Vertical Derivative (SVD) untuk mengidentifikasi jenis patahannya dengan melakukan irisan (slicing) tegak lurus terhadap arah patahan pada peta kontur anomali SVD (Gambar 12).



Gambar 12. Peta Kontur Anomali SVD

Grafik Kurva SVD seperti ditunjukkan pada Gambar 12 menunjukkan nilai mutlak

maksimum dan nilai mutlak minimum, dan dengan menggunakan persamaan (5) dan (6) bisa ditentukan jenis patahannya.



Gambar 13. Grafik nilai SVD pada irisan tegak lurus patahan

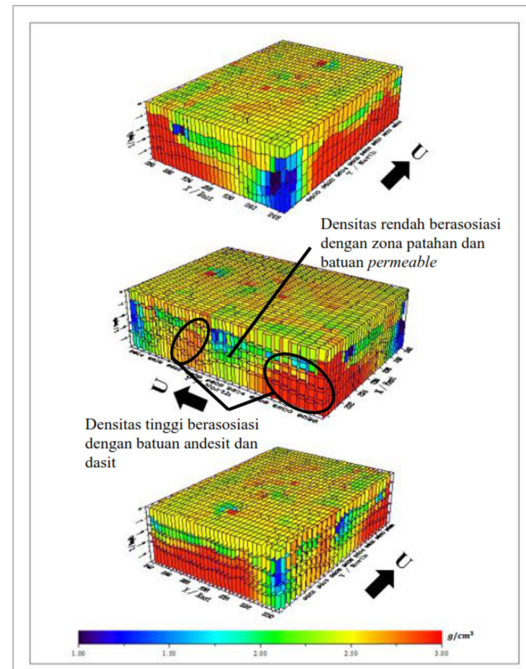
Jenis patahan dari hasil irisan ketiga lintasan pada **Gambar 13** memiliki jenis patahan turun yang ditunjukkan dari nilai mutlak maksimum lebih besar dari nilai mutlak minimum dan sesuai dengan jenis patahan dari data geologi.

Model geologi 3D bawah permukaan pada penelitian ini dibuat menggunakan Perangkat lunak Grablok, dengan model awal berupa blok dengan densitas awal $2,67 \text{ g/cm}^3$ dimana sumbu X dibagi menjadi 26 blok, sumbu Y menjadi 33 blok dan sumbu Z menjadi 5 blok, sehingga menghasilkan 4290 blok minor. Data dari nilai Complete Bouguer Anomaly (CBA) diinversikan terhadap model awal, dengan teknik optimasi *singular value decomposition*.

Hasil pemodelan gravitasi 3D daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 14**, dengan model 3D disajikan dalam bentuk penampang dan distribusi densitas dalam arah X, Y dan Z. Batuan dengan densitas tinggi terdapat di sekitar gunung Kaba terlihat hingga ke permukaan dan diperkirakan berasosiasi dengan batuan dasit dan andesit.

Batuan dengan densitas rendah yang berada di sekitar mata air panas Sempiang dan Babakan

Bogor diperkirakan berasosiasi dengan zona patahan yang menyebabkan densitas batuan menjadi lebih rendah dan memungkinkan batuan menjadi permeable. Zona tersebut sangat memungkinkan menjadi zona reservoir panas bumi.



Gambar 14. Model 3D daerah penelitian

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa dari data gravitasi, struktur geologi berupa patahan turun pada daerah potensi panas bumi Kepahiang dapat diidentifikasi. Berdasarkan hasil pemodelan 3D, terindikasi batuan dengan densitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai respon batuan beku yang masih kompak dan memungkinkan sebagai sumber panas bagi daerah panas bumi Kepahiang, dan batuan dengan densitas rendah yang diperkirakan sebagai zona patahan dan batuan permeabel.

DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Kusnadi, “Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Panas Bumi Kepahiang,” 2010.
 [2] E. B. Purwasatriya and A. Widagdo, “Tinjauan Potensi Panas Bumi Gunung Slamet Berdasarkan Data Gravitasi dan Geologi,” *Proceeding Semin. Nas. Inov.*

- dan Rekayasa Teknol. Ke-3*, no. October, 2014.
- [3] Y. Daud *et al.*, “First horizontal derivative and Euler Deconvolution in application for reconstructing structural signature over the Blawan-Ijen Geothermal area,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 254, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/254/1/012008.
- [4] D. S. Fitriani, S. N. A. Putri, and I. F. Putrajy, “Metode Gravitasi Untuk Identifikasi Sesar Weluki Dengan Analisis First Horizontal Derivative Dan Second Vertical Derivative,” vol. IX, pp. 53–60, 2020, doi: 10.21009/03.snf2020.01.fa.10.
- [5] H. A. Azkia and Y. Daud, “Integrated geophysical and geological methods to identify structure existence as a permeable zone in a geothermal field,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2320, no. March, 2021, doi: 10.1063/5.0038802.
- [6] U. N. P. Sehad and S. A. Raharjo, “Pemanfaatan Data Anomali Gravitasi Citra Satelit Untuk Interpretasi Kualitatif Batas Cekungan Air Tanah Purwokerto,” *Prosiding*, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.lppm.unsoed.ac.id/ojs/index.php/Prosiding/article/view/1841%0Ahttp://jurnal.lppm.unsoed.ac.id/ojs/index.php/Prosiding/article/download/1841/1600>.
- [7] S. Prabu *et al.*, “IDENTIFIKASI PATAHAN MIKRO PENYEBAB GEMPA BUMI,” vol. V, pp. 79–84, 2016.
- [8] P. Sumintadireja, D. Dahrin, and H. Grandis, “A note on the use of the second vertical derivative (SVD) of gravity data with reference to Indonesian cases,” *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 127–139, 2018, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.1.9.

Optimasi dosis serap pengobatan brachytherapy dengan variasi jumlah seeds radioisotop I-125 pada kasus kanker otak menggunakan simulasi MCNPX

Muhammad Fikri Aziz Mustofa^{1*}, M. Helmi Hakim¹,
Ulfa Niswatul Khasanah¹, Fajar Arianto², Prasetyo Basuki³

¹Program Studi Fisika, Universitas Nahdlatul Ulama Blitar Jl. Masjid No.22 Kota Blitar 6612

²Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro,
Jl. Lkr. Utara Undip, tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang 50275

³Pusat Teknologi Nuklir bahan dan Radiometri BATAN, Jl. Tamansari No. 71 Bandung 40132

*e-mail: faziz.fikri@gmail.com

Abstrak - Metode pengobatan brachytherapy dalam bidang fisika medis dapat dilakukan dengan cara menempatkan sumber radioaktif dekat dengan jaringan sakit di dalam organ. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui cara menentukan dosis serap brachytherapy kanker otak tepatnya di lobus parietal serta mengetahui pengaruh pada variasi jumlah seeds dengan dosis serap yang diterima. Ada beberapa sumber radioaktif yang dapat dilakukan pada metode brachytherapy, salah satunya I-125 radionuklida yang memiliki energi rendah sebesar 35,5 keV dan memiliki waktu paruh sebesar 59,4 hari. Pada penelitian ini dilakukan simulasi brachytherapy dengan software MCNPX. Hasil simulasi menunjukkan energi dosis serap masing masing sebesar 183,81 Gy untuk 10 seeds, 377,53 Gy untuk 20 seeds, 569,918 Gy untuk 30 seeds, 765,82 Gy untuk 40 seeds, dan 972,76 Gy untuk 50 seeds, besaran dosis serap tersebut ditunjukkan untuk jenis radioisotop I-125. Dari hasil tersebut diketahui bahwa adanya pengaruh jumlah seeds dengan dosis serap yang diterima pada brachytherapy kanker otak dan jumlah seeds yang optimal sebanyak 33 seed

Kata Kunci: Brachytherapy, Dosis Serap, MCNPX, Kanker Otak

Abstract – Brachytherapy treatment methods in the field of medical physics can be done by placing a radioactive source close to the diseased tissue in the organ. The purpose of this study was to determine the calculate of the absorbed dose of brain cancer brachytherapy and to determine the effect of variations in the number of seeds with the absorbed dose received. Several radioactive sources can be used in the brachytherapy method, one of which is I-125 radionuclide which has a low energy of 35.5 keV and a half-life of 59.4 days. In this study, a simulation of brachytherapy with MCNPX software was carried out. The simulation results show that the energy absorbed dose is 183.81 Gy for 10 seeds, 377.53 Gy for 20 seeds, 569.918 Gy for 30 seeds, 765.82 for 40 seeds, and 972.76 for 50 seeds. radioisotope I-125. From these results, it is known that there is an effect of the number of seeds with the absorbed dose received on brain cancer brachytherapy and the optimal number of seeds is 33 seeds.

Key words: Brachytherap,; Absorbed Dose, MCNPX, Brain Cancer

PENDAHULUAN

Kanker otak dapat disebut juga dengan sel abnormal dan tidak terkendali pada jaringan otak, dimana sel tersebut mengambil alih ruang yang berada pada jaringan otak [1]. Menurut data dari WHO (*World Health Organization*) kanker otak memiliki persentase 1.5 % dari semua jenis kasus kanker di Indonesia pada tahun 2020 dan menepati peringkat 15, kemudian untuk persentasi kematian sebesar 2,3 % dari kasus kanker yang ada di indonesia [2].

Pengobatan kanker di Indonesia saat ini sering dilakukan dengan cara kemoterapi maupun pembedahan [3], namun terdapat

metode penyembuhan kanker yang dapat digunakan dengan menggunakan sumber isotop radioaktif yang didekatkan ke jaringan yang sakit dan menghasilkan dosis yang mana dapat mematikan sel kanker tersebut.

Metode ini disebut dengan metode *brachytherapy* metode ini secara umum dapat dijelaskan dimana dapat mengendalikan radiasi yang dipancarkan ke target akan sesuai dengan pola yang telah ditentukan dan dikembalikan lagi ke tempatnya dengan menggunakan modul penggerak dalam kurun waktu yang telah ditentukan [4]. Penelitian menunjukkan bahwa ada pengaruh dosis terhadap variasi jumlah *seeds* yang diberikan [5].

MCNPX merupakan kode transpor radiasi Monte Carlo yang dirancang dengan tujuan mengimplementasikan jenis-jenis partikel pada rentang energi yang luas. MCNPX merupakan generasi lanjutan dari rangkaian kode transportasi Monte Carlo yang dimulai di Laboratorium Nasional Los Alamos [6]. MCNPX ini juga sudah tersebar secara luas paket perangkat lunaknya sebagai simulasi penggunaan teknologi nuklir serta banyaknya komunitas pengguna yang besar di seluruh dunia, beberapa pengaplikasian MCNPX ini mencakup banyak bidang seperti proteksi radiasi dan dosimetri, proteksi radiasi, fisika medis dan juga disain detektor [7].

LANDASAN TEORI

Metode Pengobatan Kanker

Radioterapi merupakan salah satu metode penyembuhan, yang menggunakan radiasi pengion untuk membunuh sel kanker sebanyak mungkin. Radioterapi dapat dijadikan pengobatan setelah ditemukannya sinar-X pada abad 19 disamping pengobatan yang lain yakni kemoterapi dan pembedahan. Radioterapi ada beberapa jenis diantaranya adalah radioterapi eksternal yang memanfaatkan sinar-X atau foton yang diletakkan ke target dengan jarak tertentu diluar tubuh [8]. Kemudian menurut *National Cancer Institute* ada juga radiasi internal atau sering disebut dengan metode *brachytherapy* dimana memanfaatkan sumber radioaktif yang diletakkan pada sel kanker, sumber radiasi tersebut meliputi radium 226, cobalt 60, cesium 137 atau sebagainya [9].

Brachytherapy Otak

Brachytherapy adalah alat yang menggunakan iradiasi gamma, di mana sumber radioisotop didekatkan ke area target dan radiasi gamma diberikan untuk menghasilkan dosis yang mampu membunuh sel kanker/tumor. *Brachytherapy* ini juga dapat disebut dengan pengobatan tumor atau kanker dengan kombinasi penyinaran radiasi eksternal dengan radioterapi metode ini dapat digunakan pada penderita kanker stadium I-II hingga stadium lanjut sesuai dengan indikasi dan batasan-batasan tertentu [9]. Bahan radioaktif yang sering digunakan adalah Iodine-125. Bahan radioaktif tersebut efektif untuk melawan melanoma (asal mula kanker) dengan ukuran kecil hingga sedang [10].

Sumber Radionuklida I-125

Ada berbagai jenis radionuklida di bumi, baik alami maupun buatan. Radionuklida yang terjadi secara alami, yaitu radiasi dari sinar matahari. Kemudian untuk radiasi buatan berasal dari radiasi dari teknologi nuklir yang dimanfaatkan untuk dijadikan pembangkit listrik.

Pemanfaatan radionuklida sangat banyak sekali termasuk dalam bidang medis, radionuklida digunakan untuk melakukan treatment atau terapi pada penderita penyakit tertentu,

Iodine 125 memiliki kontrol lokal dan kelangsungan hidup yang sebanding dengan perawatan seperti SRS (Stereotactic Radio Surgery), I-125 ditanamkan pada sekitar sel tumor yang berada di otak [11]. Dalam penelitian yang dilakukan di (Pusat Radioisotop dan Radiofarmaka) PRR-BATAN energi sebesar 35,5 keV atau 0,355 MeV [12]. Untuk energi aktifitas setiap seeds nya sebesar 16,15 mCi dengan rentang antara 4,04–40,38 mCi [13].

Software MCNPX

Software Monte Carlo Nano Partikel telah digunakan selama kurang lebih 80 tahun dimana digunakan untuk memecahkan berbagai masalah dalam fisika medis. Pentingnya MCNPX dalam perencanaan pengobatan contohnya parameter dosimetri, kurva distribusi *isodose*, dan *figure of merit* (FOMs) dipertimbangkan berkas foton dari berbagai berkas foton dari berbagai energi [14].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yazdani Darki, *dkk* [15], MCNPX berguna untuk menghitung sifat redaman pada organ tubuh manusia, MCNPX juga digunakan untuk pemodelan dan perhitungan yang ditimbulkan dikarenakan adanya interaksi dari radiasi dengan material dan partikel dari energi yang berbeda-beda. Ketika sebuah foton melewati sebuah bahan, maka foton tersebut akan kehilangan energi yang sering disebut sebuah proses hamburan Compton, efek fotolistrik dan produksi pasangan [16].

Penentuan Jumlah Seeds Optimum Brachyterapi Otak

Dosis serap dapat dihitung dengan cara mengkalikan antara dosis serap pertransformasi (D/Trans) dikalikan dengan bilangan

transformasinya (U_x) dengan persamaan sebagai berikut:

$$D = D/trans \times U_x \tag{1}$$

Sebelum menggunakan persamaan 1 diatas perlu menentukan total transformasinya dengan cara membagi total aktifitas (A_0) dengan konstanta peluruhan (λ) dengan persamaan sebagai berikut:

$$U_x = A_0 \tau = \frac{A_0}{\lambda} \tag{2}$$

Setelah itu menentukan dosis serap pertransformasi dengan persamaan sebagai berikut:

$$D/Trans = \frac{Tally \times 10^6 \times 1,602 \times 10^{-19}}{m_o} \tag{3}$$

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan jenis penelitian kuantitatif dengan metode simulasi, dengan tujuan untuk melihat sebab akibat dari suatu perlakuan. Melalui simulasi pada program komputer dengan menggunakan *Software* MCNPX. *Software* tersebut untuk memperoleh nilai dosis serap yang dapat diberikan pada pengobatan *brachytherapy* otak pada posisi *lobus parietal* dengan sumber radioistop I-125 dengan bervariasi jumlah *seeds* yang digunakan. Metode yang digunakan peneliti pada dasarnya sama dengan eksperimen secara langsung dengan alat *brachytherapy* pada subjek manusia.

Penelitian dilakukan dengan instrumen pengumpulan data yang digunakan berupa Komputer, Notepad ++, Vised. Kemudian data yang digunakan untuk bahan dan densitas pemodelan phantom adalah ORNL/TM-8381 (ORNL MIRD Phantom versi 1996). Adapun inputnya adalah ORNL/MIRD, dengan variasi jumlah *seeds* yang digunakan yakni 10 *seeds*, 20 *seeds*, 30 *seeds*, 40 *seeds*, dan 50 *seeds*.

Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan membuat simulasi *brachytherapy* otak yang menggunakan program MCNPX dengan metode Monte Carlo Tahap simulasi dibagi menjadi tiga tahapan, yakni tahapan pembuatan geometri *phantom* model ORNL-MIRD versi 1996, mendefinisikan sumber radiasi serta tempat bagian yang akan diberi sumber radiasi.

Geometri *phantom* model ORNL-MIRD merupakan bentuk geometri tubuh manusia yang terdiri oleh 3 bagian utama yakni bagian kepala, badan serta kaki. Pada model ini juga dapat disertakan bagian organ dalam yang dianggap penting yang meliputi usus halus, kolon menurun, kolon sigmoid, bladder, prostat dan hati. Pada geometri *phantom* terdiri dari tiga bagian utama yakni:

- *Silindir ellipse* untuk menunjukkan bagian badan dan lengan
- Dua buah lingkaran kerucut yang dipotong ujungnya untuk bagaian anggota gerak kaki
- *Silindir* melingkar yang diletakkan pada batas setengan *Silindir ellipse* yang menggambarkan kepala dan leher.

Tabel 1. Data sumber radiasi untuk input MCNP-X

Sumber	Keterangan
Radioisotop	I-125
Bentuk	Titik-Titik
Variasi	10 seeds,20 seeds,30 seeds,40 seeds, dan 50 seeds
Energi I-125	0.355 MeV
Jenis Partikel	Foton dan Elektron
Penempatan Sumber	Otak

Sumber radiasi perlu didefinisikan untuk mensimulasikan perjalanan partikel, dalam penelitian ini peneliti model sumber radiasi dimodelkan dalam bentuk *seeds* yang ditanamkan secara acak dan merata di sekitar otak dengan titik geometri (-2,5000; 0,5000; 94,3000). Definisi sumber yang diperlukan dapat dijadikan inputan MCNP-X berupa jenis partikel yang dipancarkan, energi dan juga kelimpahan partikel, arah berkas partikel, dan geometri yang berupa posisi dan bentuk sumber radioaktif. Sumber radiasi yang digunakan dalam pemodelan ini dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Model Pulsa Distribusi Energi

Tally F8 digunakan untuk menghitung pulsa distribusi energi yang didapatkan dari tangkapan radiasi oleh detektor, kartu F8 digunakan untuk memasukkan data *cell*. Mode yang digunakan pada *tally F8* berupa N untuk neutron, P untuk foton dan E untuk elektron, dan P,E digunakan untuk elektron dan foton secara simulasi.

Penelitian ini menggunakan mode P,E untuk mengetahui karakteristik foton dan elektron apabila berinteraksi dengan materi. nilai energi total yang dideposisi oleh keseluruhan foton disimpan dalam energi bin,

pengubahan nilai tally dari tally tinggi dengan satuan pulsa ke tally deposisi energi dengan tiap satuan muatan elektron dengan satuan MeV.

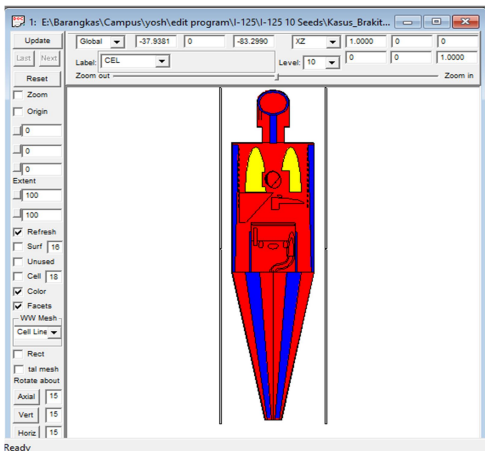
Running Program

Running ini dilakukan dengan menggunakan dua software vised dimana software ini digunakan untuk running program dengan tujuan untuk melihat sebaran dosis yang telah diberikan dengan tipe radioisotop dan jumlah seeds yang sesuai dengan isi program yang telah dimasukkan dalam bentuk angka

Software vised juga digunakan untuk menampilkan hasil running kedalam bentuk phantom manusia dewasa dan hasil radiasi pada otak yang telah dimasukkan kedalam program sesuai dengan jenis radioisotop dan jumlah seeds yang diberikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geometri Phanthom ORNL-MIRD ini dibuat oleh Oak Ridge National Laboratory dengan menggunakan analisis matematis dosis yang dikeluarkan oleh komite MIRD.



Gambar 1. Tampilan geometri phantom model ORNL-MIRD dari depan dan samping

Pemodelan untuk kanker otak secara tepat dan diletakkan di dalam otak tidak mudah untuk dilakukan. Pendekatan yang cukup sederhana dapat dilakukan dengan cara mengasumsikan bahwa keseluruhan elektron ditempatkan secara lokal, dan pengaruh foton diluar relatif bisa diabaikan terhadap dosis serap pada kanker.

Geometri otak didefinisikan dengan densitas sebesar 1,04 g/cm² dan teletak di dalam cranium (tulang tengkorak) dengan tipe elipsoid. secara bergantung fraksi elektron yang

diserap dapat diamati dengan tidak mengabaikan pengaruh dari banyaknya foton pada jaringan.

Pada Brachytherapy otak akan didapat tally berupa energi yang diserap per transformasi pada organ saat seeds dimplankan. I-125 akan meluruh hingga keaktifan akan habis, maka dari itu, perlu dilakukan perhitungan total dari bilangan transformasi yang terjadi pada seeds yang diimplankan yang telah melebihi waktu paruh radionuklida tersebut. Energi yang diserap akan berupa satuan MeV. Untuk mengetahui dosis serap yang didapat persatuan massa organ harus dikonversikan kedalam Gy.

Dalam kasus Brachytherapy otak total aktivitas didapat dari banyaknya seeds yang diimplankan dikalikan dengan aktifitas setiap seeds hasil deposisi tiap transformasinya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil running pada brachytherapy otak

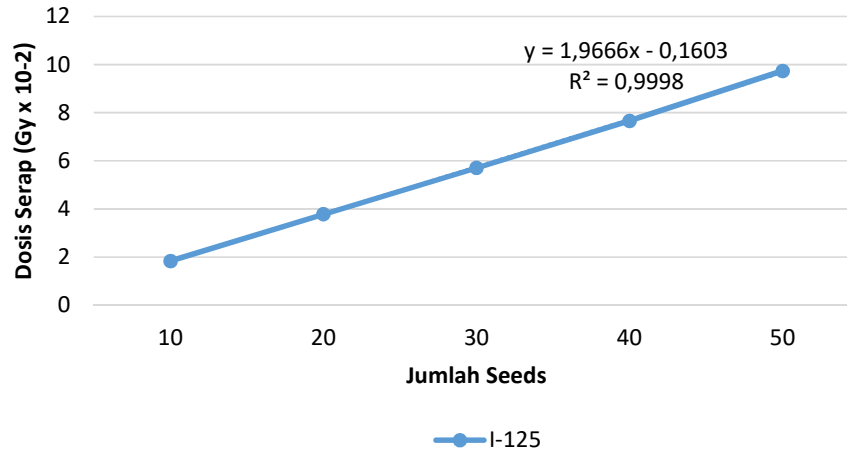
Jumlah Seeds	Energi I-125 (MeV)
10	$6,53 \times 10^{-2}$
20	$6,63 \times 10^{-2}$
30	$6,70 \times 10^{-2}$
40	$6,80 \times 10^{-2}$
50	$6,91 \times 10^{-2}$

Hasil running dari Tabel 2 kemudian akan dikonversikan kedalam satuan Gy/Trans. Dengan menentukan umur hidup, total bilangan transformasi yang dihitung pada setiap variasi seeds yang diimplankan sebagaimana yang persamaan 3. Di dapat bahwa dosis serap pada otak dengan menggunakan radionuklida I-125 dengan memvariasikan jumlah seeds dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Dosis serap brachytherapy otak

Jumlah Seeds	Dosis Serap I-125 (Gy)
10	183,81
20	377,53
30	569,918
40	765,82
50	972,76

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa dosis serap pada brachytherapy otak untuk radioisotop I-125 cukup tinggi dikarenakan tipe golongan radioisotop, merujuk pada keputusan kepala BAPETEN tentang ketentuan keselamatan kerja terhadap radiasi bahwasanya I-125 merupakan radioisotop yang memiliki radioaktivitas yang tinggi dan berada di golongan 2.



Gambar 2. Dosis serap brachyterapy otak dengan sumber radioisotop I-125

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah *seeds* yang diimplankan pada organ otak maka, didapatkan hasil simulasi dosis serap semakin besar. Hal ini didukung pula dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Rauhsan dkk, dalam penelitian tersebut jumlah *seeds* mempengaruhi dosis serap yang didapat pada target organ dan volume yang dilakukan pengobatan *brachyterapy* [5]

Dosis serap pada *brachyterapy* kanker otak dengan radioisotop I-125 yang memiliki dosis serap yang tinggi apa bila jumlah *seeds* yang diimplankan semakin banyak, hal ini dapat dilihat pada **Gambar 2**. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin banyak *seeds* yang diimplankan maka besar pula dosis serap yang didapat pada organ dan volume otak.

Dari hasil simulasi yang didapat dapat ditunjukkan bahwa penggunaan radioisotop I-125 pada pengobatan *brachyterapy* kanker otak menunjukkan bahwa dosis serap dapat digunakan sebagai patokan awal dosis serap sebelum dilakukan penerapan secara langsung, hal ini dibuktikan dengan hasil simulasi dengan MCNPX dimana nilai kesalahan relatif yang didapat kurang dari 1% dimana nilai ini menunjukan ketelitian dalam distribusi foton pada organ otak secara merata [17].

KESIMPULAN

Berdasarkan rumusan masalah dan tujuan yang telah disinggung sebelumnya peneliti dapat menyimpulkan bahwa terdapat pengaruh dari jumlah *seeds* yang diimplankan dengan besar

dosis serap yang diterima pada organ dan volume otak untuk pengobatan *brachyterapy* otak dengan menggunakan radioisotop I-125 dimana semakin banyak *seeds* yang diimplankan maka akan semakin besar dosis serap yang diterima. Besar dosis optimal yang dapat diberikan dengan menggunakan radioisotope I-125 sebanyak 33 seeds.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] WHO, 'Global Cancer Observatory', 2020. [Online]. Tersedia di: <https://gco.iarc.fr/>. [Diakses: 30-Des-2021]
- [2] A.P. Nusantoro dan M. K. Ns, *Modul Ajar Patofisiologi*, 2020.
- [3] N. Fitriatuzakiyyah, R. K. Sinuraya, dan I. M. Puspitasari, "Cancer Therapy with Radiation: The Basic Concept of Radiotherapy and Its Development in Indonesia", *Indones. J. Clin. Pharm.*, vol. 6, no. 4, h. 311–320, 2017, doi: 10.15416/ijcp.2017.6.4.311.
- [4] T. Harjanto dan A. Satmoko, "Desain Modul Penggerak Sumber Isotop Iridium-192 Pada Perangkat Brakiterapi Hdr", *PRIMA-Aplikasi dan Rekayasa dalam Bid. Iptek Nukl.*, vol. 11, no. 2, h. 52–60, 2017.
- [5] R. Fikr, A. W. Harto, dan T. Budiyo, "The Effect of Amount of Seed and Activities of Radionuclide Sources 125I and 103Pd on The Distribution of Absorbed Doses in the Prostate Gland Brachytherapy Simulation using Monte

- Carlo N Particle eXtended Simulator”, 2019.
- [6] B. Pelowitz, *MCNPX TM User ' S Manual*. California: Los Alamos National Laboratory, 2008.
- [7] H. Khodajou-Chokami, S. A. Hosseini, M. Reza Ay, dan H. Zaidi, “MCNP-FBSM: Development of MCNP/MCNPX Source Model for Simulation of Multi-Slice Fan-Beam X-Ray CT Scanners”, *Med. Meas. Appl. MeMeA 2019 - Symp. Proc.*, h. 1–6, 2019, doi: 10.1109/MeMeA.2019.8802137.
- [8] W. Winarno, “Radioterapi Kanker Cervix Dengan Linear Accelerator (LINAC)”, *J. Biosains Pascasarj.*, vol. 23, no. 2, h. 75–86, 2021.
- [9] M. Khairati, S. Ramantisan, A. N. Kurniawan, dan A. D. Prastanti, “Teknik Radioterapi Eksternal Dan Internal Pada Kasus Kanker Endometrium Inoperable”, 2021.
- [10] Hacettepe, R. Fizi, dan D. Tez, *Vajinal Kaf Brakiterapi Uygulamaları İçin Yoğunluk Ayarlı Aplikatör Tasarımı : Dozimetri Fizibilite Çalışması*, 2018.
- [11] R. V. Viola *et al.*, “Rules on informed consent and advance directives at the end-of-life: the new Italian law”, *Clin. Ter.*, vol. 171, no. 2, h. e94–e96, 2020, doi: 10.7417/CT.2020.2195.
- [12] B. Chitti *et al.*, “The role of brachytherapy in the management of brain metastases: a systematic review”, *J. Contemp. Brachytherapy*, vol. 12, no. 1, h. 67, 2020.
- [13] H. Lubis *et al.*, “Evaluasi pembuatan iodium 125 menggunakan sasaran gas xenon-124 diperkaya 99, 98%”, *Jurnal Forum Nuklir STTN*, 2011, vol. 5, no. 2.
- [14] M. J. Petr, C. M. McPherson, J. C. Breneman, dan R. E. Warnick, “Management of newly diagnosed single brain metastasis with surgical resection and permanent I-125 seeds without upfront whole brain radiotherapy”, *J. Neurooncol.*, vol. 92, no. 3, h. 393–400, 2009.
- [15] S. Yazdani Darki dan S. Keshavarz, “Studies on mass attenuation coefficients for some body tissues with different medical sources and their validation using Monte Carlo codes”, *Nucl. Sci. Tech.*, vol. 31, no. 12, h. 1–15, 2020.
- [16] S. M. Vahabi dan M. S. Zafarghandi, “Applications of MCNP simulation in treatment planning: a comparative study”, *Radiat. Environ. Biophys.*, vol. 59, no. 2, h. 307–319, 2020.
- [17] R. Amaliah, “Dosimetri Brachytherapy Pada Kanker Serviks Berdasarkan AAPM TG-43”, *J. Ilmu Fis. Teor. dan Apl.*, vol. 1, no. 2, h. 7–13, 2019.