

SENSITIVITAS LARUTAN NANOPARTIKEL CeO₂ TERHADAP RADIASI SINAR GAMMA TELETERAPI COBALT-60

Agus Bashori , Iis Nurhasanah dan Zaenal Arifin
Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang
E-mail: agusbashori@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

Gamma rays are ionizing radiation that are useful to kill cancer cells through radiation therapy, but radiation would be dangerous if the user escapes scrutiny. In this case the required dosimeter to detect its existence. Practically daily dose allowed for radiotherapy ranges from 1.8 Gy to 2 Gy therefore needed dosimeter capable of detecting a range of doses. This study has been conducted testing sensitivity to gamma radiation to a solution of CeO₂ nanoparticles, each of which is synthesized at a temperature of 400°C with a concentration of 2.5×10^{-4} g / ml. CeO₂ nanoparticle solution is then analyzed using a UV-Vis spectrophotometer before and after irradiated. Gamma radiation with an energy of 1.33 MV administered at doses varying from 1 Gy to 3 Gy. The test results in the form of UV-Vis absorbance spectrum CeO₂ nanoparticle solution which is used as a reference to determine changes in absorbance (ΔA) and value-G. Absorbance spectrum showed absorbance increased to dosing and a strong absorbance occurs at a wavelength of 297 nm for a solution of CeO₂ nanoparticles were synthesized at a temperature of 400°C. Sensitivity solution CeO₂ nanoparticles seen from the changes absorbansi and value-G. Gamma radiation dosing provide value change in absorbance of about 1.50×10^{-2} to 2.50×10^{-2} and values around 0.095 molJ⁻¹ to 0,439 molJ⁻¹ to a solution of CeO₂ nanoparticles were synthesized at a temperature of 400°C. These values indicate that the solution of CeO₂ nanoparticles have a sensitivity to gamma radiation..

Keywords: Absorbance , CeO₂ , dosimeter , nanoparticles , gamma radiation , G-value

ABSTRAK

Sinar gamma merupakan radiasi pengion yang bermanfaat untuk membunuh sel kanker melalui terapi radiasi tetapi radiasi ini akan berbahaya jika penggunaannya luput dari pengawasan. Dalam hal ini dibutuhkan dosimeter untuk mendeteksi keberadaannya. Secara praktis dosis harian yang diperbolehkan untuk radioterapi berkisar 1,8 Gy sampai 2 Gy oleh karena itu dibutuhkan dosimeter yang mampu mendeteksi pada rentang dosis tersebut. Pada penelitian ini telah dilakukan pengujian sensitivitas larutan nanopartikel gamma untuk larutan nanopartikel CeO₂ dengan konsentrasi $2,5 \times 10^{-4}$ g/ml. Larutan dibuat dari nanopartikel CeO₂ hasil sintesis pada temperature kalsinasi 400°C. Larutan nanopartikel CeO₂ kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis sebelum dan sesudah diradiasi. Radiasi gamma dengan energi 1,33 MV diberikan dengan dosis yang bervariasi dari 1 Gy sampai 3 Gy.. Sensitivitas larutan nanopartikel CeO₂ dilihat dari nilai perubahan absorbansi dan nilai-G. Pemberian dosis radiasi gamma memberikan nilai perubahan absorbansi sekitar $1,50 \times 10^{-2}$ sampai $2,50 \times 10^{-2}$ dan nilai-G sekitar 0,095 molJ⁻¹ sampai 0,439 molJ⁻¹ untuk larutan nanopartikel CeO₂ yang disintesis pada temperatur 400°C .Nilai tersebut menunjukkan bahwa larutan nanopartikel CeO₂ memiliki sensitivitas terhadap radiasi gamma.

Kata Kunci : Absorbansi, CeO₂, dosimeter, nanopartikel, radiasi gamma, nilai-G.

PENDAHULUAN

Sinar gamma merupakan radiasi pengion yang tidak dapat dirasakan oleh panca indra dan menimbulkan efek yang sangat berbahaya bagi manusia (Tjipta, 2015). Karenaya, digunakan dosimetri untuk mendeteksi adanya radiasi (Thamrin dkk, 1996). Dosimetri yang sering digunakan diantaranya *termoluminescence*

dosimeter (TLD), *film badge*, dan dosimeter larutan kimia. Namun yang paling banyak menyita perhatian belakangan ini adalah dosimeter larutan kimia karena aplikasinya yang begitu luas. Dosimeter larutan kimia dikembangkan mengacu pada dosimetre *Fricke* yang terbuat dari larutan FeSO₄ (7). Dosimeter *fricke* digunakan sebagai acuan karena mempunyai absorbansi tinggi terhadap

dosis serap yang mampu mendeteksi sampai 400 Gy [6]. Secara terapi medis dalam kesehariannya dosis yang diterima oleh pasien berada dalam rentang 180-200 cGy [3]. Untuk itu diperlukan dosimeter yang mampu mendeteksi pada rentang tersebut. Dosimetri larutan kimia merupakan suatu zat kimia yang memberikan tanggapan yang dapat diukur berdasarkan perubahan zat kimia apabila zat tersebut diradiasi. Pembuatan dosimeter larutan kimia dapat menggunakan nanopartikel [13]. Nanopartikel adalah partikel yang berukuran 1-1000 nanometer. Nanopartikel memiliki sejumlah sifat kimia dan fisika yang lebih unggul dibandingkan material ukuran besar. Sifat fisik membuat nanopartikel memiliki nilai perbandingan antara luas permukaan dan volume yang lebih besar jika dibandingkan dengan partikel sejenis dalam ukuran besar sehingga lebih reaktif [4]. Inilah yang menjadikan peluang penelitian lebih lanjut tentang pemanfaatan nanopartikel dalam beberapa bidang seperti pencitraan medis, industri proses pemantauan, dan ilmu dasar. Pada bidang medis nanopartikel dapat digunakan dalam mendeteksi energi radiasi tinggi seperti sinar X, sinar gamma, dan partikel bermuatan.

Nanopartikel CeO_2 memiliki sifat kimia dan fisika yang dapat digunakan pada berbagai aplikasi, seperti pendeteksi radiasi pengion, sensor gas, detektor sinar ultraviolet, dan dosimeter radiasi gamma [13]. Nanopartikel CeO_2 memiliki dua keadaan oksidasi seperti halnya Fe yang digunakan dalam dosimeter *fricke*, yaitu +3 dan +4 serta memiliki absorbansi yang kuat pada sinar UV [12]. Hal ini sebagai dasar acuan untuk melakukan penelitian sensitivitas larutan nanopartikel CeO_2 terhadap radiasi gamma.

Pada penelitian ini dilakukan penelitian terhadap nanopartikel CeO_2 yang disintesis pada suhu 400°C dan 500°C untuk mengetahui sensitivitasnya terhadap radiasi sinar gamma dengan dosis 1 sampai 3 Gy. Penelitian dilakukan menggunakan cobalt-60 FCC8000F Seri C245 sebagai sumber radiasi sinar gamma. Absorbansi larutan nanopartikel CeO_2 tiap dosis radiasi

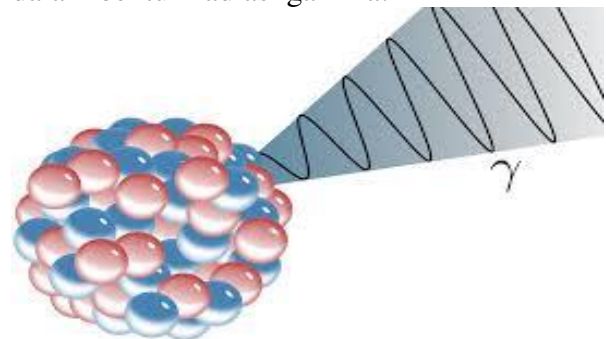
gamma diamati menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Selanjutnya absorbansi nanopartikel CeO_2 digunakan sebagai acuan untuk mengetahui perubahan absorbansi dan nilai-G. Perubahan absorbansi dan nilai-G menunjukkan sensitivitas larutan nanopartikel CeO_2 .

DASAR TEORI

Sinar Gamma

Sinar gamma merupakan gelombang elektromagnetik yang memiliki frekuensi tertinggi. Sinar gamma dihasilkan oleh inti-inti atom yang tidak stabil (zat radioaktif). Sinar gamma memiliki daya tembus yang sangat besar hingga dapat menembus plat timbal dengan ketebalan beberapa cm. Sumber yang dapat memancarkan sinar gamma salah satunya radioisotop Cobalt-60. Cobalt-60 dapat memancarkan sinar gamma dengan energi 1.33 MV [2][9].

Suatu inti unsur radioaktif yang mengalami peluruhan, baik peluruhan α maupun peluruhan β atau mengalami tumbukan dengan neutron biasanya berada pada keadaan tereksitasi. Sesuai sifatnya ketika inti atom berada dalam keadaan eksitasi maka secara otomatis akan kembali pada keadaan dasarnya. Ketika kembali ke keadaan dasarnya inti tersebut akan melepaskan energi dalam bentuk radiasi gamma.



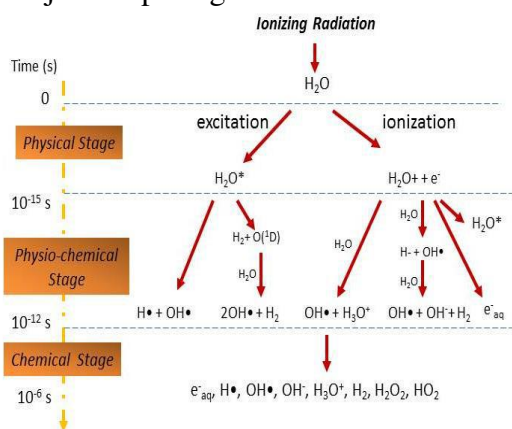
Gambar 1. Peluruhan Sinar Gamma

Teleterapi Cobalt-60

Pesawat Teleterapi Cobalt-60 merupakan salah satu peralatan yang digunakan untuk pengobatan kanker. Prinsip terapi Cobalt-60 adalah memberikan radiasi elektromagnetik yang dipancarkan Cobalt-60. Radiasi ini dapat menimbulkan kerusakan pada jaringan tumor dan dengan menggunakan block ceroben dapat meminimalisasi kerusakan pada jaringan normal. Cara yang digunakan langsung pada tumor dari berbagai arah dengan energi tertentu sehingga diperoleh dosis maksimum [10].

Radiolisis

Interaksi Radiasi dengan materi menimbulkan beberapa kejadian diantaranya Efek fotolistrik, Hamburan Compton dan Produksi pasangan. Air juga tidak luput dari interaksi dengan radiasi. Air akan menyerap energi radiasi sehingga terjadi eksitasi yaitu berpindahannya elektron dari tingkat energi yang lebih rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Proses ini juga dapat menimbulkan ionisasi dimana pada bahan yang terkena radiasi akan terjadi perubahan atom atau molekul menjadi ion karena mengalami penambahan atau pengurangan partikel bermuatan seperti elektron atau lainnya. Radiolisis juga menghasilkan radikal bebas ($H\cdot$) dan asam peroksida (H_2O_2) yang bertindak sebagai oksidator terhadap molekul yang dikenainya. Skema proses radiolisis ditunjukkan pada gambar 2



Gambar 2. Skema Peristiwa Radiolisis [11]
Nanopartikel Cerium Dioksida

Cerium dioksida (CeO_2) merupakan oksida dari logam Cerium (Ce). Ini termasuk dalam kelompok lantanida pada periodik unsur. CeO_2 umumnya hadir sebagai mikro atau nano bubuk kuning muda. CeO_2 atau ceria adalah oksida dengan struktur kubik *fluorite*, dimana tiap kation Ce^{2+} dikelilingi oleh 8 anion oksigen yang tersusun *face center cubic* (fcc) dan tiap anion oksigen mempunyai kation Ce^{2+} tetrahedral [12].

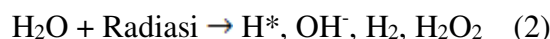
Dosimeter Larutan Kimia

Dosimeter larutan kimia yang banyak digunakan adalah dosimeter *fricke*. Dosimeter *fricke* tersusun oleh larutan sulfat besi ($FeSO_4$) sehingga disebut juga dengan dosimeter sulfat besi. Larutan *fricke* banyak digunakan dalam pendeteksian radiasi dimana larutan yang terkena paparan radiasi akan mengubah ion besi Fe^{2+} (*ferro*) menjadi ion besi Fe^{3+} (*ferri*) dan menunjukkan puncak absorbansi paling kuat pada panjang gelombang 304 nm [6]. Radiasi menyebabkan perubahan mol ion besi yang dapat ditentukan dari perubahan absorbansi larutan dan diukur dengan spektrofotometri UV-Vis. Dosimeter ini dapat digunakan pada rentang dosis 5-400 Gy [8].

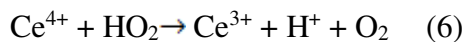
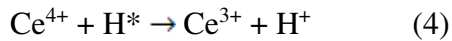
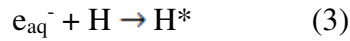
Respon dosimeter *fricke* terhadap radiasi dinyatakan dalam nilai-G. Nilai-G didefinisikan sebagai jumlah mol ion besi yang dihasilkan per joule energi yang diserap dalam larutan (Podgorsak, 2006). Nilai-G dinyatakan dalam persamaan (1).

$$G = \frac{\Delta A}{D \epsilon \rho l} \quad (1)$$

dengan ΔA adalah perubahan absorbansi, D adalah dosis (Gy), ϵ adalah koefisien molar ekstensi ($Lmol^{-1}cm^{-1}$), ρ adalah massa jenis (gr/cm^3) adalah jalur optik (cm), (1). Hasil yang mungkin terjadi akibat interaksi radiasi dengan larutan dalam dosimeter larutan kimia adalah:



Mengacu pada reaksi pada dosimeter larutan kimia maka reaksi yang terjadi antara larutan nanopartikel CeO₂ dengan radiasi diberikan pada persamaan reaksi (3) – (6).



Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometer UV-Vis merupakan alat yang digunakan untuk mengukur panjang gelombang maupun intensitas sinar ultraviolet dan cahaya tampak yang diserap oleh bahan uji dalam *cuvete* yang selanjutnya dideteksi oleh detektor.

Metode spektrofotometer UV-Vis didasarkan pada hukum Lambert-Beer. Hukum ini menyatakan bahwa jumlah radiasi cahaya tampak, ultraviolet dan cahaya-cahaya lain yang diserap atau ditransmisikan oleh suatu larutan merupakan fungsi eksponen dari koefisien molar ekstensi. Hukum Lambert-Beer dijelaskan dengan persamaan (7)

$$I_t = I_o e^{-\alpha t} \quad (7)$$

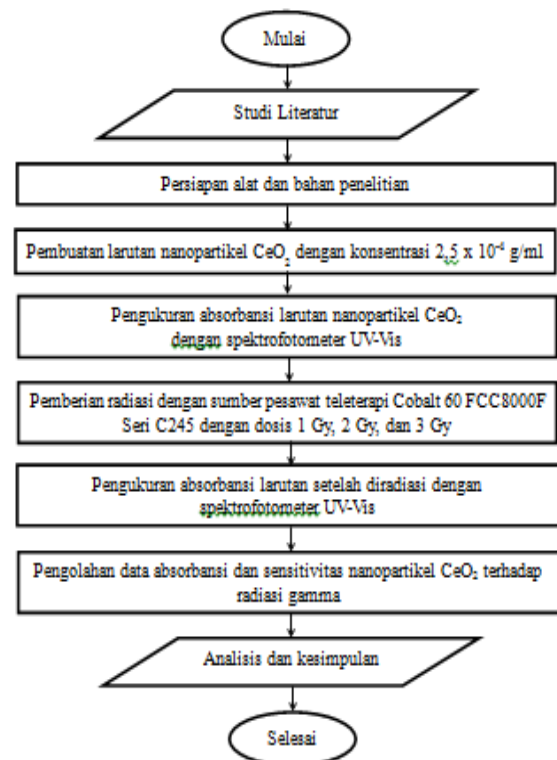
dengan I_t adalah intensitas berkas setelah melewati *sample cuvet*, I_o adalah intensitas berkas sebelum melewati *sample cuvette*, α adalah koefisien absorpsi dan t adalah panjang lintasan cahaya. Nilai absorbansi untuk larutan dengan konsentrasi dalam mol/liter ditunjukkan pada persamaan 2.11.

$$A = \epsilon l c \quad (8)$$

dengan A adalah absorbansi, ϵ , l , c , berturut-turut yaitu koefisien ekstingsi molar, tebal *cuvette* (cm) dan konsentrasi larutan (mol/L) [5].

METODE PENELITIAN

Penelitian “Sensitivitas Larutan Nanopartikel CeO₂ terhadap Radiasi Sinar Gamma Teleterapi Cobalt-60 ” dilakukan melalui 4 tahap. Berikut diagram alir penelitian yang dilakukan



Gambar 3 Diagram alir penelitian “Sensitivitas Larutan Nanopartikel CeO₂ terhadap Radiasi Sinar Gamma Teleterapi Cobalt-60 ”.

Pembuatan larutan nanopartikel CeO₂

Larutan yang digunakan pada penelitian ini adalah larutan nanopartikel CeO₂ dengan konsentrasi sebesar 2,5 x 10⁻⁴ g/ml dalam aquades. Pembuatan menggunakan bantuan radiasi ultrasonik 40 kHz. Tahapan ini dilakukan di Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika Universitas Diponegoro.

Pemberian Radiasi Gamma

Setelah larutan dibuat maka tahap selanjutnya adalah memberikan radiasi gamma pada larutan. Sumber radiasi gamma yang digunakan adalah pesawat teleterapi Cobalt 60 FCC8000F Seri C245 dengan SSD tetap 80 cm dan energi 1,33 MV. Dosis yang diberikan bervariasi dari 1 Gy sampai 3 Gy.

Pengujian Absorbansi larutan nanopartikel CeO₂

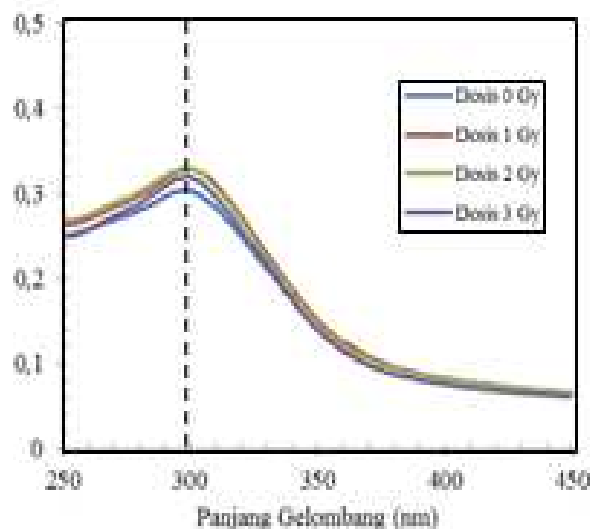
Tahapan berikutnya adalah pengujian absorbansi larutan nanopartikel CeO₂ dengan spektrofotometer UV-Vis. Pengujian dengan spektrofotometer UV-Vis dilakukan sebelum dan sesudah pemberian radiasi gamma supaya diketahui perubahan absorbansi dari larutan nanopartikel CeO₂.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spektrum Absorbansi UV-Vis Larutan Nanopartikel CeO₂

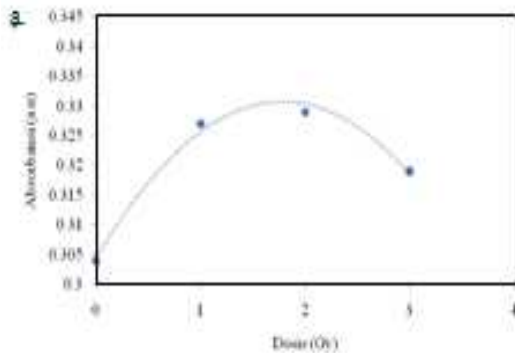
Absorbansi larutan nanopartikel CeO₂ dengan sintesis masing-masing pada temperatur 400°C diamati menggunakan spektrofotometer UV-Vis dalam rentang panjang gelombang 250 nm sampai 450 nm dan ditampilkan pada gambar 4.1. Spektrum absorbansi larutan nanopartikel CeO₂ menunjukkan respon larutan terhadap radiasi yang diterima dengan dosis 1 sampai 3 Gy. Grafik menunjukkan puncak absorbansi pada panjang gelombang 297 nm untuk larutan dengan sintesis 400°C.

Absorbansi pada panjang gelombang tersebut dijadikan sebagai acuan untuk mengamati respon larutan nanopartikel CeO₂. Nilai absorbansi yang ditampilkan pada gambar 5. menunjukkan larutan dengan sintesis 400°C sampai dengan dosis 2 Gy meningkat namun pada dosis 3 Gy grafik menunjukkan penurunan nilai absorbansi. Hal ini mungkin disebabkan larutan mengalami titik jenuh pada dosis tersebut sehingga respon terhadap radiasi sinar gamma berkurang.



Gambar 4 Spektrum absorbansi UV larutan nanopartikel CeO₂ untuk berbagai dosis radiasi gamma untuk nanopartikel CeO₂ dikalsinasi pada temperatur 400 °C

Perubahan absorbansi terjadi akibat interaksi antara sumber radiasi dengan larutan nanopartikel CeO₂. Energi foton dari sinar gamma dipindahkan ke material melalui berbagai interaksi foton. Reaksi yang dimungkinkan terjadi adalah efek fotolistrik, efek compton, produksi pasangan, dan radiolisis. Interaksi efek fotolistrik menghasilkan eletron bebas yang menggunakan energi foton tanpa ada yang dilepaskan. Efek compton terjadi dengan menyerap energi foton untuk melepas elektron menjadi eletron bebas dan sebagian energi foton dilepaskan kembali. Interaksi produksi pasangan menghasilkan elektron dan positron. Namun, interaksi yang paling dominan antara radiasi dengan larutan CeO₂ dan radiasi sinar gamma adalah radiolisis.

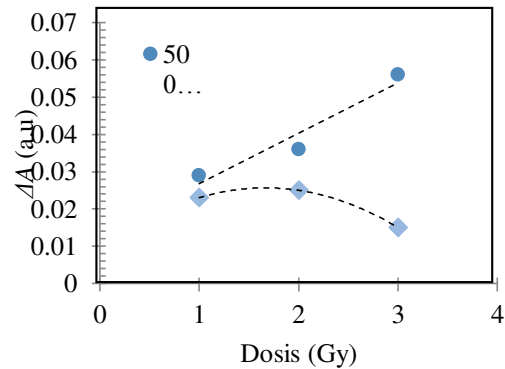


Gambar 5 Absorbansi UV larutan nanopartikel CeO₂ untuk berbagai dosis radiasi gamma untuk nanopartikel CeO₂ yang dikalsinasi pada temperatur a. 400 °C

Radiolisis terjadi saat air menyerap energi dari radiasi sehingga terjadi ionisasi dan eksitasi. Ionisasi menyebabkan kerusakan molekul air yang terjadi dalam waktu yang sangat singkat sedangkan eksitasi ditandai dengan berpindahnya elektron dari tingkat energi yang lebih rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Proses itu menimbulkan berbagai kemungkinan, seperti melepaskan kelebihan energi kinetik radiasi, getaran, dan penguraian air. Reaksi radiolisis yang dituliskan dalam persamaan reaksi (2.2) menghasilkan e_{aq}⁻, H^{*}, OH, H₂, H₂O₂. Selanjutnya radikal yang terbentuk beraksi dengan nanopartikel CeO₂ sehingga Ce⁴⁺ berubah menjadi Ce³⁺ berdasarkan reaksi (2.5) – (2.8). Peningkatan dosis radiasi gamma yang diberikan menyebabkan bertambahnya jumlah radikal dan Ce³⁺ yang terbentuk sehingga merubah absorbansi larutan nanopartikel CeO₂.

Sensitivitas Larutan Nanopartikel CeO₂

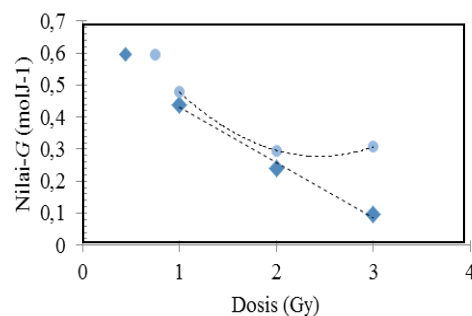
Sensitivitas larutan nanopartikel CeO₂ dapat diketahui dengan menentukan perubahan absorbansi larutan sebelum diradiasi dan sesudah di radiasi (ΔA) dan nilai-G. ΔA adalah perubahan absorbansi setelah sebelum dan sesudah diradiasi. Nilai ΔA terhadap dosis radiasi gamma ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6 Nilai ΔA larutan nanopartikel CeO₂ untuk berbagai dosis radiasi gamma

Grafik menampilkan pada larutan nanopartikel CeO₂ yang disintesis temperatur 400°C mengalami kenaikan dari 1 Gy sampai 2 Gy dan menurun pada pemberian dosis 3 Gy.

Sensitivitas selain didapat dari perubahan absorbansi juga bisa ditentukan dengan menghitung nilai-G. Nilai-G diartikan sebagai jumlah mol ion ce³⁺ yang terbentuk per satu joule energi yang diserap dari hasil interaksi radiasi dengan larutan nanopartikel CeO₂. Nilai-G larutan nanopartikel CeO₂ terhadap radiasi gamma ditunjukkan pada gambar 4.4. Gambar menunjukkan bahwa nilai-G pada pemberian radiasi gamma mengalami penurunan dengan semakin besarnya pemberian dosis radiasi gamma. Nilai-G pada larutan yang disintesis pada temperatur 400°C 0,09 molJ⁻¹ sampai 0,44 molJ⁻¹



Gambar 7 Nilai-G larutan nanopartikel CeO₂ untuk berbagai dosis radiasi gamma

Nilai-G pada dosimeter *fricke* berkisar antara 1,5 x 10⁻⁶ molJ⁻¹ sampai 1,6 x 10⁻⁶ molJ⁻¹

jauh lebih kecil dari nilai- G yang dimiliki larutan nanopartikel CeO_2 dengan nilai antara $0,09 \text{ molJ}^{-1}$ sampai $0,47 \text{ molJ}^{-1}$. Pemberian dosis yang diterima dosimeter *fricke* dengan larutan nanopartikel CeO_2 jauh berbeda. Dosimeter *fricke* bekerja dalam pemberian dosis besar sampai 400 Gy (Podgorsak, 2005) sedangkan larutan nanopartikel CeO_2 diteliti pada pemberian dosis 1 Gy sampai 3 Gy. Nilai- G yang terbentuk berbanding terbalik dengan dosis serap yang diterima oleh larutan nanopartikel CeO_2 . Hal ini menyebabkan nilai- G pada larutan nanopartikel CeO_2 jauh lebih besar dibanding dosimeter *fricke*. Nilai- G yang besar dapat diartikan bahwa larutan nanopartikel CeO_2 memiliki sensitivitas yang lebih baik dibanding dosimeter *fricke* pada pemberian dosis tertentu. Senada dengan sifat fisik larutan nanopartikel CeO_2 yang memiliki nilai perbandingan antara luas permukaan dan volume yang lebih besar jika dibandingkan dengan partikel sejenis dalam ukuran besar sehingga larutan nanopartikel CeO_2 lebih sensitif (Mikrajudin, 2008).

KESIMPULAN

Hasil-hasil penelitian yang telah didapat memberikan kesimpulan :

1. Larutan nanopartikel CeO_2 dengan konsentrasi $2,5 \times 10^{-4} \text{ g/ml}$ yang disintesis pada temperatur 400°C menunjukkan peningkatan absorbansi pada dosis 1 sampai 2 Gray dan mengalami penurunan pada dosis 3 Gy setelah diradiasi sinar gamma.
2. Perubahan absorbansi larutan nanopartikel CeO_2 dengan konsentrasi $2,5 \times 10^{-4} \text{ g/ml}$ yang disintesis pada temperatur 400°C cenderung meningkat seiring dengan peningkatan dosis yang diberikan.

Nilai- G larutan nanopartikel CeO_2 dengan konsentrasi $2,5 \times 10^{-4} \text{ g/ml}$ hasil sintesis pada temperatur 400°C dengan dosis 1 Gy adalah $0,44 \text{ molJ}^{-1}$, pada pemberian dosis 2 Gy sebesar $0,23 \text{ molJ}^{-1}$, sedangkan pada dosis 3 Gy sebesar $0,09 \text{ molJ}^{-1}$

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Beshir, W.B., Eid, S., Gafar, S.M. dan Ebraheem, S., 2014, *Application of Solution of Rhodamine B in Dosimetry*, National Center for Radiation Research and Technology, Cairo.
- [2] Chandra, R., 2004, *Nuclear Medicine Physics*, Lippincott Williams & Wilkins : USA.
- [3] Haryanto, R., Syaefudin O.R., dan Boisoirie, T.S., 2006, *Radiasi Eksternal Karsinoma Nasofaring sebagai Penyebab Gangguan dengar Sensorineural*, Volume 42 No. 3, 108-114.
- [4] Mikhrajudin, A, 2008, *Pengantar Nanosains*, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung
- [5] Mulja, M., dan Syahrani, A., 1990., *Aplikasi Analisis Spektrofotometri UV VIS*, Mechipso Grafika, Surabaya.
- [6] Podgorsak, E., B., 2005, *Eksternal Photon Beams : Physical Aspect in Radiation Oncology Physics : A Handbook for Teachers and Students*, International Atomic Energy Agency, Publishing Section IAEA, Vienna.
- [7] Schested, K., 1970, "The Fricke Dosimeters Manual on Radiation Dosimetry"(Holm,N.W., and Berry, R.J.Eds) Marcell Dekker, New York.
- [8] Senvar, C. B., 1959, *Chemical Dosimetry of Gamma Rays, Neutrons, and Accelerated Electrons*, Department of Physical Chemistry, Faculty of Science, University of Ankara.
- [9] Soeminto, B., 1985, *Manfaat Tenaga Atom untuk Kesejahteraan Manusia*, CV Karya Indah, Jakarta.
- [10]Suhartono, Z. 1990, *Dosimetri Radioterapi*, PSPKR-BATAN, Jakarta.
- [11]Sunder, S., D.W. Shoesmith, and N.H. Miller. 1997. Oxidation and Dissolution of Nuclear Fuel (UO_2) by the Products

of the Alpha Radiolysis of Water. *Journal of Nuclear Materials* 244: 66-74

- [12] Trovarelli, A., 2002, *Catalyst by Ceria and Related Materials*, Imperial College Press, London.
- [13] Ying-Ying L, Xiang D, dan Hai-qian, Z., 2013 *CeO₂ Nanowires Aqueous γ -Radiation Dosimeter for Low Dose Sensitively Detecting*, *Procedia Engineering*, 52, 202 – 207.