

**SIFAT LISTRIK BAHAN KOMPOSIT Fe_xC_{1-x}
SEBELUM DAN SESUDAH IRADIASI SINAR- γ SAMPAI DOSIS 500 kGy**

Yunasfi, Salim Mustofa dan Tria Madesa.

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) – BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong - 15314 Tangerang
Email: yunasfi@yahoo.com

ABSTRAK

SIFAT LISTRIK BAHAN KOMPOSIT Fe_xC_{1-x} SEBELUM DAN SESUDAH IRADIASI SINAR- γ SAMPAI DOSIS 500 kGy. Telah dilakukan penelitian terhadap sifat listrik bahan komposit Fe_xC_{1-x} sebelum dan sesudah iradiasi dengan sinar- γ sampai dosis 500 kGy. Bahan komposit Fe_xC_{1-x} dibuat dari campuran serbuk Fe dan serbuk grafit, dengan rasio komposisi (20:80, 50:50, dan 80:20) % berat dengan berat total 20 gram. Campuran masing-masing bahan komposit ini diproses *milling* dengan teknik *High Energy Milling* (HEM) selama 4,5 jam, kemudian dibuat dalam bentuk pelet dengan tekanan 5000 psi. Pada penelitian ini, diamati perubahan sifat listrik bahan komposit Fe_xC_{1-x} setelah diiradiasi dengan sinar- γ pada berbagai variasi dosis (50–500 kGy). Karakterisasi sifat listrik bahan komposit Fe_xC_{1-x} dianalisis memakai LCR meter. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai konduktivitas dan kapasitansi bahan komposit meningkat oleh adanya radiasi sinar- γ . Nilai konduktivitas dan kapasitansi meningkat secara linear seiring dengan bertambahnya dosis radiasi sinar- γ . Peningkatannya mencapai 4,5 % untuk nilai konduktivitas, dan 11,5 % untuk nilai kapasitansi setelah diiradiasi sampai dosis 50 kGy. Pada dosis maksimum (500 kGy), peningkatan nilai konduktivitas mencapai 41,5 %, dan nilai kapasitansi naik 47,5 % berat. Diperkirakan peningkatan nilai-nilai ini didapatkan karena adanya cacat (*defect*) yang terbentuk di dalam struktur bahan komposit Fe_xC_{1-x} akibat interaksi radiasi sinar- γ dengan bahan komposit sehingga menimbulkan perubahan pada sifat listrik bahan komposit Fe_xC_{1-x} .

Kata kunci: iradiasi sinar- γ , sifat listrik, komposit Fe_xC_{1-x}

ABSTRACT

ELECTRICAL PROPERTIES OF Fe_xC_{1-x} COMPOSITE MATERIALS PRE AND POST γ -IRRADIATION UP TO 500 kGy DOSE. Research about change of electrical properties of Fe_xC_{1-x} composite materials pre and post γ -irradiation up to 500 kGy dose was carried out. Fe_xC_{1-x} composite materials were prepared by mixing Fe and graphite powders. The mixing ratios were 20:80, 50:50, and 80:20 % of weight, and total mixing weight was 20 grams. Each mixed sample was milled using High Energy Milling (HEM) for 4.5 hours, and afterwards the composite was formed into a pellet under a pressure up to 5000 psi. In this study, the changes in electrical properties of composite materials Fe_xC_{1-x} after irradiated by γ -rays at various doses (50-500 kGy) was observed. Characterization of electrical properties of composite materials Fe_xC_{1-x} was analyzed using LCR meter. The result showed that the value of conductivity and capacitance of composite materials increased by the presence of γ -ray. The value of conductivity and capacitance increases linearly with the increasing of γ -ray doses. The increase of conductivity reaches 4.5%, and the increase of capacitance reaches 11.5% at 50 kGy. At max dose of 500 kGy, the increase was 41.5% for conductivity and 47.5% for capacitance. It is estimated that the increases were obtained because of defect formed inside of the Fe_xC_{1-x} resulted from the interactions of γ -ray with Fe_xC_{1-x} , so it leads to the changes in electrical properties of Fe_xC_{1-x} .

Keywords: γ -ray irradiation, electrical properties, Fe_xC_{1-x} composite

1. PENDAHULUAN

Bahan baru berbasis karbon saat ini menjadi primadona penelitian sejak Prof. Iijima pertama kali menemukan *Carbon Nano Tube* (CNT) pada tahun 1991 (1), dimana penemuan CNT ini membuka cakrawala baru tentang kemampuan teknologi nano yang sangat memotivasi dan menggerakkan dunia penelitian mulai dari penelitian dasar sampai menuju ke aplikasi industri (2).

Penelitian sifat pergerakan elektron di dalam bahan karbon dan bahan komposit menjadi sangat menarik karena berkaitan langsung dengan ketidakaturan susunan struktur kristal dan struktur elektroniknya. Cacat atau kerusakan yang terbentuk pada bahan berbasis karbon akan mempengaruhi sifat listrik dan magnetik bahan secara bersamaan (3). Salah satu dari bahan komposit berbasis karbon yang telah diteliti dan dikembangkan sejak beberapa tahun yang lalu adalah bahan komposit Fe-C. Penelitian dan pengembangan bahan ini sangat menarik karena Fe-C menunjukkan nilai konduktivitas listrik dan transmisi cahaya yang rendah (2-5).

Iradiasi terhadap bahan komposit berbasis karbon pada umumnya menciptakan populasi cacat yang kompleks, namun masih sedikit informasi tentang sifat dasar seperti jenis cacat dan bagaimana interaksinya. Demikian pula, ada perbedaan besar dalam pemahaman efek cacat pada sifat fisik dan mikrostruktur. Pemahaman tersebut sebagian besar masih pada tingkat pemahaman fenomena saja (6-9).

Sampai saat ini, penelitian tentang efek radiasi sinar- γ terhadap sifat listrik

bahan komposit Fe_xC_{1-x} belum ada yang melakukan. Untuk itu dilakukan penelitian terhadap perubahan sifat listrik (nilai konduktivitas dan nilai kapasitansi) bahan komposit Fe_xC_{1-x} setelah diiradiasi dengan sinar- γ pada dosis yang bervariasi, yaitu dari 50 kGy sampai 500 kGy. Karakterisasi sifat listrik bahan ini dilakukan dengan menggunakan alat ukur LCR meter. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya (10-12), yang berisikan pengamatan terhadap peningkatan sifat *magnetoresistance* dan sifat magnetik bahan komposit Fe-C setelah diiradiasi dengan sinar- γ pada dosis sampai 500 kGy. Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa hasil iradiasi sinar- γ juga dapat diaplikasikan untuk meningkatkan sifat listrik bahan komposit ini. Penelitian ini perlu dilakukan dalam rangka mengaplikasikan teknik radiasi, dalam hal ini adalah radiasi sinar- γ , di bidang elektronika di masa depan.

2. METODE PERCOBAAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk besi (Fe) 99,9% dengan ukuran partikel 10-50 μm dan serbuk grafit atau karbon (C) 99,5% dengan ukuran partikel 10 μm . Serbuk Fe dan C ditimbang dalam satuan persen berat dengan komposisi sebagai berikut: Fe(20%)-C(80%); Fe(50%)-C(50%); dan Fe(80%)-C(20%). Berat total masing-masing campuran serbuk adalah 20 gram. Campuran serbuk ini diproses *milling* selama 4,5 jam menggunakan *High Energy Milling* (HEM), merk *SPEX CertiPrep 8000M Mixer/Mill* yang terpasang di Bidang

Karakterisasi dan Analisis Nuklir (BKAN), PTBIN-BATAN dengan perbandingan berat bola : berat sampel adalah sekitar 1,8 : 1. Untuk menghindari kerusakan pada alat *milling* akibat naiknya suhu motor yang terlalu tinggi, maka untuk setiap siklus proses *milling* selama 90 menit, proses dihentikan sekitar 30 menit untuk tujuan pendinginan motor. Dalam proses *milling* ini vial serta bola yang digunakan terbuat dari bahan *stainless steel*.

Campuran serbuk hasil *milling* masing-masing ditimbang sebanyak 0,5 gram, kemudian dibuat menjadi bentuk pelet menggunakan alat pres merk ENERPAC sampai tekanan 5000 psi (400 kg/cm^2), yang terpasang di BKAN, PTBIN-BATAN. Ketika tekanan pres mencapai 5000 psi, proses penekanan didiamkan pada kondisi pres tersebut sekitar 10 menit dengan tujuan agar terbentuk pelet yang sempurna, kuat dan tidak mudah pecah. Dalam proses pembuatan pelet ini, cetakan (*dies*) yang digunakan terbuat dari bahan besi KNL. Pelet yang terbentuk berukuran diameter 15 mm dengan ketebalan sekitar 1 mm.

Pelet Fe-C yang terbentuk diukur sifat listriknya (nilai konduktivitas dan nilai kapasitansi) dengan alat ukur LCR meter, yang ada di BKAN, PTBIN-BATAN, dengan parameter frekuensi pengukuran antara 1 kHz sampai 100 kHz, pada tegangan potensial 1 Volt serta pada suhu ruang.

Pelet Fe-C kemudian diiradiasi dengan sinar- γ sampai dosis 500 kGy. Iradiasi dilakukan dengan Co-60 sebagai iradiator pada fasilitas iradiasi yang terpasang di Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi (PATIR) – BATAN, Pasar Jumat

– Jakarta.

Untuk mengetahui perubahan sifat listrik pelet Fe-C yang terjadi akibat iradiasi sinar- γ , maka dilakukan kembali pengukuran sifat listriknya dengan LCR meter pada kondisi pengukuran yang sama dengan pengukuran pelet Fe-C sebelum diiradiasi dengan sinar- γ .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah pengukuran sifat listrik bahan komposit Fe_xC_{1-x} dengan alat ukur LCR meter, maka didapatkan nilai konduktansi dan nilai kapasitansinya. Sifat listrik diukur terhadap perubahan frekuensi dari 1-100 kHz. Melalui formula model W. K. Lee dkk (13), nilai konduktivitas bahan grafit dihitung, dengan rumus:

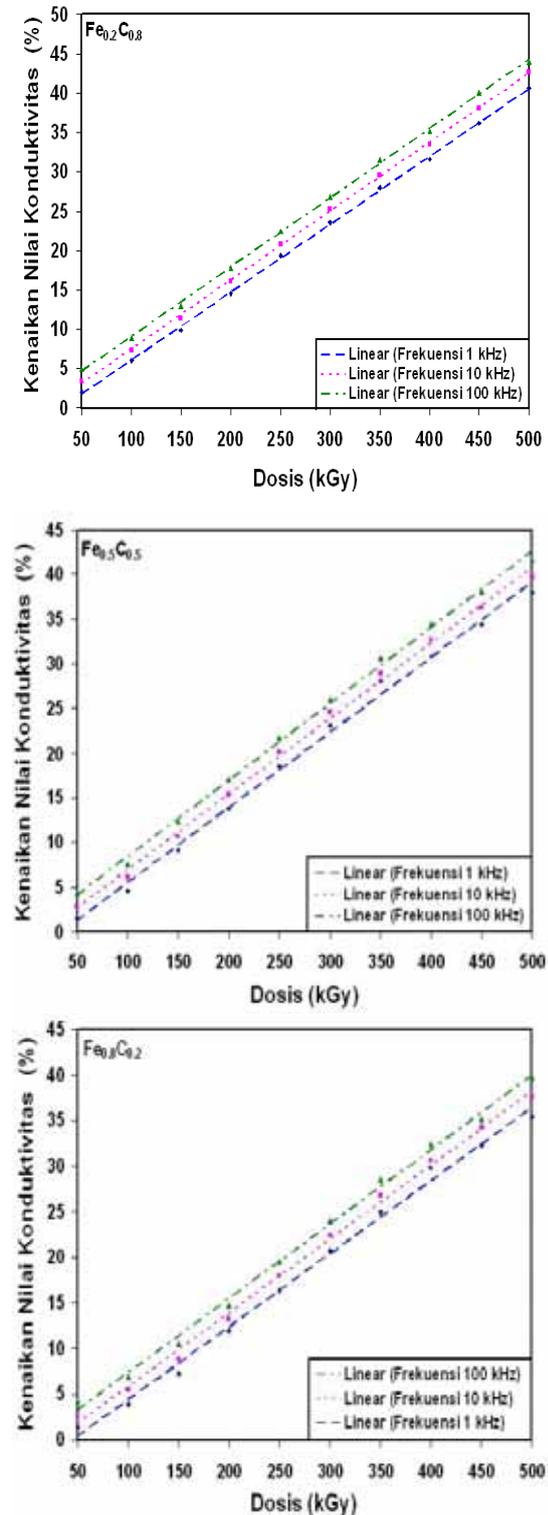
$$\sigma = G(L/A) \quad [1]$$

dimana, σ , G, L dan A masing-masing adalah konduktivitas (Siemens/cm), konduktansi (Siemens), tebal bahan (cm) dan luas permukaan bahan (cm^2). Dari hasil perhitungan nilai konduktivitas memakai rumus persamaan [1], dapat diketahui sifat listrik berupa nilai konduktivitas dari bahan komposit Fe_xC_{1-x} . Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada Gambar 1, yang menghubungkan antara dosis radiasi (kGy) pada sumbu x dengan kenaikan nilai konduktivitas (%) pada sumbu y. Pada Gambar 1 terlihat bahwa nilai konduktivitas ini mengalami kenaikan secara linear seiring dengan kenaikan nilai frekuensi pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa nilai konduktivitas bahan komposit Fe_xC_{1-x} berbanding lurus dengan perubahan frekuensi. Secara umum besaran kenaikan

nilai konduktivitas ini tidak terlalu signifikan, yaitu pada kisaran di bawah 2%. Dengan demikian kenaikan ini masih dalam batas toleransi yaitu $\pm 10\%$ dalam kaitannya nanti sebagai persyaratan untuk diaplikasikan sebagai piranti elektronik.

Dari grafik yang diperlihatkan pada Gambar 1, secara jelas terlihat bahwa nilai konduktivitas bahan komposit Fe_xC_{1-x} meningkat dengan adanya perlakuan iradiasi sinar- γ dan nilai ini meningkat seiring dengan bertambahnya dosis iradiasi sinar- γ . Semakin lama bahan komposit Fe_xC_{1-x} diiradiasi dengan sinar- γ , maka nilai konduktivitas bahan komposit Fe_xC_{1-x} tersebut semakin tinggi. Nilai konduktivitas untuk bahan komposit $Fe_{0,2}C_{0,8}$ sebelum diiradiasi dengan sinar- γ adalah 1,81 Siemens/cm pada frekuensi 1 kHz, 1,96 Siemens/cm pada frekuensi 10 kHz dan 1,99 Siemens/cm pada frekuensi 100 kHz. Nilai konduktivitas untuk bahan komposit $Fe_{0,5}C_{0,5}$ sebelum diiradiasi dengan sinar- γ adalah 1,77 Siemens/cm pada frekuensi 1 kHz, 1,78 Siemens/cm pada frekuensi 10 kHz dan 1,78 Siemens/cm pada frekuensi 100 kHz. Nilai konduktivitas untuk bahan komposit $Fe_{0,8}C_{0,2}$ sebelum diiradiasi dengan sinar- γ adalah 1,69 Siemens/cm pada frekuensi 1 kHz, 1,70 Siemens/cm pada frekuensi 10 kHz dan 1,70 Siemens/cm pada frekuensi 100 kHz. Setelah diiradiasi dengan sinar- γ sampai dosis maksimum, yaitu 500 kGy, maka nilai konduktivitas ini meningkat cukup besar. Peningkatan nilai konduktivitas ini mencapai 44% untuk bahan komposit $Fe_{0,2}C_{0,8}$, mencapai 41% untuk bahan komposit

$Fe_{0,5}C_{0,5}$ dan mencapai 39% untuk bahan komposit $Fe_{0,8}C_{0,2}$.



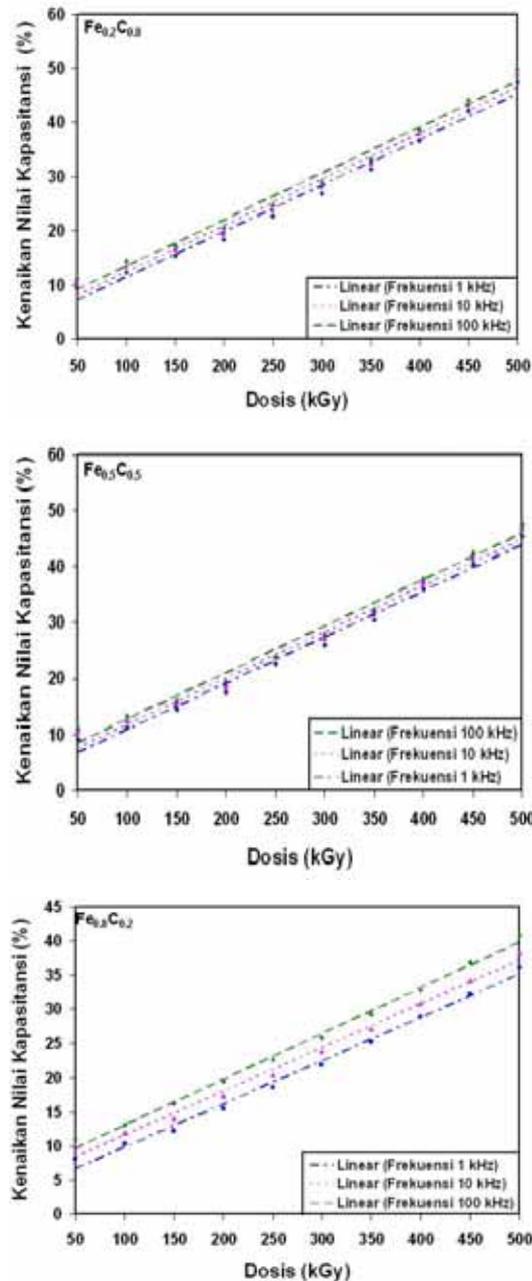
Gambar 1. Persentase peningkatan nilai konduktivitas bahan komposit Fe_xC_{1-x} oleh radiasi sinar- γ

Hal ini menunjukkan bahwa iradiasi yang dilakukan terhadap bahan komposit Fe_xC_{1-x} kemungkinan menyebabkan terjadinya kerusakan struktur bahan komposit tersebut akibat interaksi antara radiasi sinar- γ dengan bahan komposit tersebut. Peningkatan nilai konduktivitas ini oleh iradiasi sinar- γ terlihat sangat signifikan dan bersifat linear terhadap pertambahan dosis iradiasi sinar- γ . Dengan demikian, penambahan dosis radiasi sinar- γ secara jelas memperlihatkan peningkatan sifat listrik bahan komposit dari sisi nilai konduktivitas bahan komposit Fe_xC_{1-x} ini.

Dari hasil pengukuran dengan alat ukur LCR meter juga diperoleh nilai kapasitansi masing-masing bahan komposit Fe_xC_{1-x} , dengan variasi parameter frekuensi saat pengukuran adalah 1 kHz -100 kHz. Plot nilai hasil pengukuran ini diperlihatkan pada grafik di Gambar 2, yang menunjukkan hubungan antara dosis iradiasi (kGy) pada sumbu x dengan kenaikan nilai kapasitansi (%) pada sumbu y. Pada Gambar 2 diketahui bahwa tingkat kestabilan atau besaran perubahan nilai kapasitansi terhadap perubahan frekuensi adalah secara keseluruhan hampir sama, yaitu meningkat sekitar 2% di semua frekuensi pengukuran. Kecenderungan perubahan nilai kapasitansi ini sama dengan kecenderungan perubahan nilai konduktivitas bahan komposit Fe_xC_{1-x} seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Pada Gambar 2 juga terlihat fenomena dengan semakin tinggi frekuensi maka nilai kapasitansi bahan komposit Fe_xC_{1-x} juga meningkat. Selain itu, nilai kapasitansi ini

juga meningkat seiring dengan bertambahnya dosis iradiasi sinar- γ . Dari Gambar 2 juga terlihat bahwa semakin besar kandungan C di dalam campuran bahan komposit ini, maka nilai kapasitansinya semakin besar pula. Hal ini menunjukkan juga bahwa penambahan unsur karbon dapat memperbaiki sifat listrik berupa naiknya nilai kapasitansi bahan komposit tersebut. Bila dibandingkan antara bahan komposit $Fe_{0,2}C_{0,8}$, bahan komposit $Fe_{0,5}C_{0,5}$ dan bahan komposit $Fe_{0,8}C_{0,2}$, diketahui bahwa peningkatan nilai kapasitansi bahan komposit $Fe_{0,2}C_{0,8}$ adalah yang paling besar, kemudian diikuti oleh bahan komposit $Fe_{0,5}C_{0,5}$ dan bahan komposit $Fe_{0,8}C_{0,2}$, tetapi perbedaan diantara bahan komposit itu tidak terlalu signifikan yaitu sekitar 5%. Nilai kapasitansi bahan komposit $Fe_{0,2}C_{0,8}$ sebelum diiradiasi adalah 0,4579 μ F (untuk frekuensi 1 kHz), 0,4447 μ F (untuk frekuensi 10 kHz) dan 0,4385 μ F (untuk frekuensi 100 kHz). Nilai kapasitansi bahan komposit $Fe_{0,5}C_{0,5}$ sebelum diiradiasi adalah 0,3548 μ F (untuk frekuensi 1 kHz), 0,3274 μ F (untuk frekuensi 10 kHz) dan 0,3200 μ F (untuk frekuensi 100 kHz). Nilai kapasitansi bahan komposit $Fe_{0,8}C_{0,2}$ sebelum diiradiasi adalah 0,1863 μ F (untuk frekuensi 1 kHz), 0,1591 μ F (untuk frekuensi 10 kHz) dan 0,1457 μ F (untuk frekuensi 100 kHz). Setelah diiradiasi dengan sinar- γ sampai dosis maksimum, yaitu 500 kGy, maka nilai kapasitansi ini meningkat cukup besar. Peningkatan nilai kapasitansi ini mencapai sekitar 50 %, untuk bahan komposit $Fe_{0,2}C_{0,8}$, mencapai sekitar 47% untuk bahan komposit $Fe_{0,5}C_{0,5}$, dan

mencapai sekitar 40% untuk bahan komposit $Fe_{0.8}C_{0.2}$ setelah diiradiasi dengan sinar- γ sampai dosis 500 kGy. Artinya, kenaikan rata-rata berkisar 40-50%, dan ini menunjukkan perubahan nilai yang signifikan



Gambar 2. Persentase peningkatan nilai kapasitansi bahan komposit Fe_xC_{1-x} oleh radiasi sinar- γ

Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa dengan adanya perlakuan iradiasi sinar- γ terhadap bahan komposit Fe_xC_{1-x} , maka nilai konduktivitas dan nilai kapasitansinya meningkat, dan nilai ini semakin meningkat seiring dengan bertambahnya dosis radiasi sinar- γ . Hal ini disebabkan oleh interaksi antara radiasi sinar- γ dengan bahan komposit Fe_xC_{1-x} , sehingga terjadi kerusakan struktur bahan komposit ini (14).

Interaksi antara radiasi sinar- γ dengan bahan komposit Fe_xC_{1-x} , terutama oleh hamburan (efek) *Compton* yang menyebabkan ionisasi atom-atom bahan. Efek *Compton* ini menyebabkan fenomena eksitasi elektron-elektron orbital, sehingga menghasilkan pasangan elektron-hole. Elektron-elektron yang terionisasi ini memberikan energi kinetik yang cukup untuk dapat menyebabkan penambahan ionisasi atau memberikan energi yang cukup pada atom untuk menimbulkan pergeseran (8). Jika energi dari atom yang bergeser ini tidak cukup untuk merobohkan atom lain yang ada di sekelilingnya, maka yang ditimbulkan adalah bukan berupa eksitasi tetapi berupa perubahan kisi atom (disebut dengan istilah interstisi) setelah atom-atom tersebut bergeser dari posisinya. Energi yang ditransferkan ke atom-atom ini melalui proses reaksi tumbukan kemungkinan dapat menimbulkan kenaikan suhu pada jalur yang dilalui elektron, yang akan menyebabkan penurunan nilai resistivitas elektrik (15). Penurunan nilai resistivitas (ρ) ini menunjukkan peningkatan nilai konduktivitas listrik (σ) karena nilai ρ berbanding terbalik

dengan nilai σ , yang dapat ditulis dalam persamaan [2], berikut (15) :

$$\rho = 1/\sigma \quad [2]$$

dengan ρ dan σ berturut-turut adalah resistivitas (Siemen atau Ωm) dan konduktivitas listrik (Siemen/m atau $\Omega^{-1}m^{-1}$)

Peningkatan nilai C_x berhubungan dengan peningkatan nilai σ karena C_x berbanding lurus dengan σ , yang dapat dijelaskan pada persamaan [3], berikut(16) :

$$C_x^2 = (\sigma A)/(r\omega^2 l) \quad [3]$$

dengan C_x , ω , A , l dan r berturut-turut adalah konduktivitas listrik (F), frekuensi sudut ($2\pi f$) (rad/dt), luas penampang sampel (m^2), tebal sampel (m) dan resistansi seri yang disebabkan oleh elektroda alat ukur (Ω).

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan ini dapat disimpulkan bahwa dengan adanya perlakuan iradiasi sinar- γ terhadap bahan komposit Fe_xC_{1-x} maka sifat listrik bahan komposit tersebut semakin meningkat, yang ditandai dengan meningkatnya nilai konduktivitas dan nilai kapasitansinya. Sifat listrik ini cenderung semakin meningkat seiring dengan penambahan dosis iradiasi sinar- γ . Besaran atau persentase peningkatan nilai ini mencapai sekitar 41,5%, untuk nilai konduktivitas, dan sekitar 47,5% untuk nilai kapasitansi setelah iradiasi dengan sinar- γ sampai dosis 500 kGy. Peningkatan nilai ini diperkirakan terjadi karena adanya cacat yang terbentuk di dalam struktur bahan

komposit Fe_xC_{1-x} akibat interaksi antara radiasi sinar- γ dengan bahan komposit tersebut. Cacat yang terbentuk ini menyebabkan nilai resistivitas listrik bahan berkurang sehingga daya tampung listriknya semakin banyak atau dengan kata lain nilai konduktivitas meningkat. Dengan meningkatnya nilai konduktivitas listrik maka nilai kapasitansinya juga meningkat karena nilai kapasitansi berbanding lurus dengan nilai konduktivitas. Dengan demikian, iradiasi dengan sinar sinar- γ dapat meningkatkan sifat listrik bahan komposit Fe_xC_{1-x} .

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada : Bapak Nada Marnada yang telah mengizinkan kami untuk menggunakan fasilitas radiasi di PATIR-BATAN, Ps. Jumat, Bapak Setyo Purwanto sebagai Kepala Bidang Karakterisasi dan Analisis Nuklir, PTBIN-BATAN yang telah memberi kesempatan kepada kami untuk melakukan penelitian ini, yang merupakan sebagian dari hasil kegiatan 2009 yang dibiayai dari DIPA PTBIN-BATAN.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Gogotsi Y, Jeon JD, Macnallan MJ. Carbon coating on silicon carbide by reactions with chlorine-containing gases. *J Mater Chem* 1997; 7(9) : 1841-8.
2. Bondar AM, Iordache I. Carbon ceramic composites designed for electrical application. *J Optoelect Adv Mat* 2006; 8(2): 631-7.

3. Itozawa K. Magnetic recording medium containing iron carbide. United State Patent 4748080, 2004.
4. Guay P, Bary LS, Alain R. On the control of carbon nanostructures for hydrogen storage applications. Carbon 2004: 2187-93.
5. Okotrub AV, Kuznetsov VL, Sharaya A, Butenko YV, Chuvilin AL, Shubin YV et al. Chemistry for sustainable development : synthesis of Fe/C nanocomposites by decomposition of iron pentacarbonyl in electric arc discharge; 2002,10 : 743-9.
6. Banhart F. Irradiation effects in carbon nanostructures. Rep Prog Phys 1999; 62 :1181-221,
7. Telling RH, Ewels CP, Ahlma A, El-Barbary AA, Heggie MI. Wigner defects bridge graphite gap. Nat Mat, Adv on Line 2003, www.nature.com/naturematerials
8. Schwarze GE, Niedra JM, Frasca AJ, Wieserma WR. Radiation and temperature effects on electronic components investigated under the CSTI high capacity power project. Tenth Symposium on Space Nuclear Power Propulsion, New Mexico: January 10-14;1993.
9. Krasheninnikov AV, Nordlund K. Beam interactions with materials & atoms : irradiation effects in carbon nanotubes, Nucl Instr Meth In Phys Rev 2004 ;B 216, 355-6.
10. Yunasfi, Purwanto S, Wisnu A A. Sifat magnetor resistance bahan komposit $Fe_{0,2}C_{0,8}$ sebelum dan sesudah iradiasi sinar gamma pada dosis 250 kGy. JSTNI 2009, 10(1): 51 – 8.
11. Yunasfi, Mustofa S, Purwanto S, Mashadi, Madesa T. Perubahan sifat magnetik bahan komposit Fe-C oleh radiasi sinar gamma. J Sains Mater 2007. Edisi Khusus : 178-81.
12. Yunasfi. Efek iradiasi sinar gamma terhadap sifat magnetik bahan komposit Fe_xC_{1-x} , J Sains Mater 2009, Edisi Khusus: 89-93.
13. Lee WK, Liu JF, Nowick AS. Limiting behavior of ac conductivity in ionically conducting crystals and glasses . A New University Phys Rev Lett 1991; 67(12):1559 – 61.
14. Katokoski J. Irradiation mediated tailoring of carbon nanotube. Report Series in Physics, University of Helsinki, Finland, 2007. <http://ethesis.helsinki.fi/irradiat.pdf>.
15. Fade MAI, Hassan HH, Osman H, and Attia G. Effect of gamma radiation on the electrical properties of carbon black : loaded unvulcanized styrene-butadiene rubber for application to radiation dosimetry. The Arabian J Sci Eng 1986 ,11(3). 270-5.
16. William H, Hayt JR. Engineering electromagnetics. 5th ed. McGraw-Hill International Edition, 1989: p 175 -8.