

# STUDI INTERAKSI PARTIKEL BETA DARI SUMBER Ni-63 DENGAN SAMBUNGAN p-n Si PADA BATERAI NUKLIR BETAVOLTAIC

Muhamad Malik Mutoffar<sup>1</sup>, Robi Dany Riupassa<sup>2</sup>

Sekolah Tinggi Teknologi Bandung,  
Jl. Soekarno Hatta no. 378 Bandung, Indonesia, 40235  
alfredomm55@gmail.com (corresponding author)<sup>1</sup>

## Abstrak

Partikel beta yang dipancarkan dari sumber Ni-63 yang menumbuk sambungan p-n Si dapat disimulasikan dengan metode monte carlo. Kedalaman penetrasi menjadi salah satu parameter penting yang dapat dihitung. Daerah deplesi yang tercipta pada sambungan p-n ditentukan oleh seberapa jauh partikel beta dapat masuk ke dalam bahan. Elektron yang dipancarkan akan terhambur sampai akhirnya mencapai energi minimum. Pada penelitian ini divariasikan konsentrasi dopant dan ketebalan lapisan pada sambungan p-n Si. Metode monte carlo pada simulasi ini diselesaikan perhitungannya menggunakan CASINO v.2.48. Keluaran dari simulasi ini memiliki penerapan yang cukup luas diantaranya yaitu pada desain baterai nuklir betavoltaic.

## Kata kunci :

partikel beta, metode monte carlo, CASINO

## Abstract

Beta particles emitted from the Ni-63 source which pound the Si p-n junction can be simulated with the monte carlo method. The penetration depth is one of the important parameters that can be calculated. The depletion region created in the p-n connection is determined by how far the beta particles can enter the material. The electrons emitted will be scattered until they reach the minimum energy. In this study the concentration of dopant and the thickness of the layer in the Si p-n junction were varied. The monte carlo method in this simulation is completed using CASINO v.2.48. The output of this simulation has a fairly wide application including the design of betavoltaic nuclear batteries.

## Keywords :

beta particles, monte carlo method, CASINO

## I. PENDAHULUAN

Ketersediaan dan pengelolaan sumber energi masih menjadi persoalan serius yang terus dikaji solusinya sampai dengan saat ini. Sumber energi fosil (minyak bumi, batubara, dan gas alam) dalam memenuhi cadangan energi global sudah semakin terbatas. Pengelolannya pun seringkali dianggap tidak ramah lingkungan dan berdampak buruk pada pemanasan global. Salah satu solusi yang tengah digarap untuk dikembangkan dan dimanfaatkan yaitu energi nuklir. Beberapa negara maju baik dari segi teknologi maupun industri sangat bergantung terhadap pemenuhan kebutuhan energi negaranya dari energi nuklir. Dalam perkembangannya pemanfaatan energi nuklir pun diterapkan dalam berbagai bidang lain diantaranya bidang kesehatan, pertanian, dan eksplorasi tambang. Pemanfaatan energi nuklir yang paling utama yaitu pada pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Bentuk lain terkait konversi energi nuklir menjadi energi listrik yaitu pada pembuatan baterai nuklir betavoltaic.

Pengembangan teknologi baterai nuklir betavoltaic sampai dengan saat ini masih terkendala pada efisiensi konversi yang rendah. Efisiensi konversi bergantung pada desain dari sel betavoltaic itu sendiri yang mencakup sumber radioaktif dan bahan semikonduktor. Daerah deplesi yang tercipta pada

bahan semikonduktor ditentukan oleh seberapa jauh partikel beta dapat masuk ke bahan tersebut. Dibutuhkan simulasi interaksi partikel beta saat masuk ke bahan untuk mengetahui posisi dan energinya. Pada penelitian ini dilakukan simulasinya menggunakan metode monte carlo. Sumber radioaktif yang digunakan dalam simulasi yaitu Ni-63 dengan bahan semikonduktornya digunakan sambungan p-n Si. Hasil simulasi akan memberikan informasi distribusi jangkauan maksimum yang ditempuh elektron. Informasi ini penting dalam penentuan seberapa tebal lapisan semikonduktor yang harus dibuat agar dapat memperoleh efisiensi konversi yang besar.

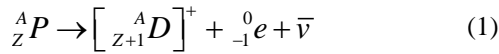
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### *Pemancar Beta*

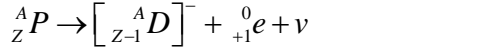
Berdasarkan pada partikel yang dipancarkan oleh inti yang tidak stabil yaitu partikel alfa, beta dan gamma, maka dikelompokkan jenis peluruhan radioaktif yaitu berdasarkan ketiga partikel ini yakni peluruhan alfa, peluruhan beta, dan peluruhan gamma (Heyde, 1999). *Betavoltaic* menggunakan peluruhan partikel beta dari inti tak stabil. Partikel beta terdiri atas dua jenis yakni elektron dan positron. Untuk kasus peluruhan dengan memancarkan elektron disebut peluruhan

beta minus ( $\beta^-$ ). Sedangkan untuk pemancaran positron disebut peluruhan beta plus ( $\beta^+$ ).

Reaksi peluruhan  $\beta^-$  dinyatakan oleh (Shultis dan Faw, 2008)



untuk reaksi peluruhan  $\beta^+$  dinyatakan oleh



$P$  adalah simbol untuk inti induk sedangkan  $D$  adalah simbol untuk inti anak.  $\bar{\nu}$  adalah antineutrino sedangkan  $\nu$  adalah neutrino elektron yang keduanya turut dipancarkan sebagai konsekuensi dari hukum kekekalan momentum. Pada *betavoltaic* yang digunakan adalah peluruhan  $\beta^-$  dengan partikel yang dipancarkan adalah elektron (Shultis dan Faw, 2008).

Partikel beta yang dipancarkan oleh radioisotop pada peluruhan beta dalam hal ini yaitu peluruhan  $\beta^-$  merupakan radiasi yang sering dimanfaatkan energinya dalam *betavoltaic*. Hal ini terkait dengan efek kerusakan yang akan ditimbulkan pada bahan semikonduktor yang lebih aman jika dibandingkan dengan radiasi alfa atau gamma. Selain itu, waktu paruh yang berhubungan dengan umur pakai *betavoltaic* juga menjadi pertimbangan dalam pemilihan pemancar atau sumber beta yang digunakan. Dalam penelitian ini, sumber beta diperoleh dari Ni-63 yang memiliki energi rata-rata sebesar 17.4 KeV.

#### Semikonduktor Sambungan p-n

Semikonduktor adalah bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara isolator dan konduktor, yaitu dengan tahanan jenis antara  $10^{-5}$  sampai  $10^5$  ohm-meter. Silikon (Si) dan Germanium (Ge) adalah bahan awal yang digunakan untuk membuat semikonduktor. Atom terdiri atas inti atom dan elektron yang bergerak mengelilingi inti pada orbitalnya masing-masing dengan tingkat energi yang tertentu pula. Elektron mengisi kapasitas orbit sesuai aturan pengisiannya. Elektron pada orbit terluar disebut elektron valensi. Akan ada keadaan yaitu pada orbit terluar akan tidak terisi penuh oleh elektron dan hal ini menyebabkan saling mengikatnya atom-atom dan juga menentukan reaksi kimianya (Rio dan Iida, 1999). Ikatan ini disebut ikatan kovalen atau ikatan elektron valensi. Apabila temperatur naik maka atom-atom akan bergetar oleh panas yang memberikan energi pada elektron-elektron dan menyebabkan elektron-elektron bebas dari ikatan atau menjadi elektron bebas. elektron yang bebas yang meninggalkan tempatnya menyebabkan ada tempat yang tidak diduduki atau disebut *hole*. *Hole* juga dapat bergerak dan sebagai hasil teori jalur (*band*) bahwa *hole* mempunyai sifat sebagai zarah bermuatan positif. Dalam kristal dengan ikatan kovalen murni yang tidak mengandung atom asing, konduksi listriknya disebabkan oleh pasangan elektron dan *hole*. Energi yang diperlukan untuk membebaskan ikatan elektron disebut energi ionisasi. Energi ini biasanya disebut celah energi (*energy gap*).

Bahan semikonduktor bersifat intrinsik jika konduktivitas listriknya tidak ditentukan oleh konsentrasi ketidakmurnian

kimia dalam kristal. Sedangkan bahan yang bersifat ekstrinsik jika konduktivitas listriknya ditentukan oleh ketidakmurnian kimia dalam kristal. Semikonduktor ekstrinsik terbagi atas dua tipe yakni tipe-p dan tipe-n. Pembawa mayoritas yang terdapat dalam semikonduktor tipe-p dan tipe-n masing-masing adalah *hole* dan elektron.

Konsentrasi donor dan aseptor yaitu  $N_A$  dan  $N_D$  masing-masing adalah konsentrasi aseptor dan konsentrasi donor ( $\text{cm}^{-3}$ ). Hubungan perhitungan  $N_h$  dan  $N_e$  untuk semikonduktor tipe-n dinyatakan sebagai berikut (Wurfel, 2005).

$$N_{h=i} = \frac{n^2}{N_e} = \frac{n^2}{N_D} \quad (3)$$

$$N_e = \frac{n^2}{N_h} = \frac{n^2}{N_A} \quad (4)$$

$N_h$  adalah konsentrasi *hole* dan  $N_e$  adalah konsentrasi elektron (keduanya dinyatakan dalam  $\text{cm}^{-3}$ ).  $n_i$  adalah konsentrasi pembawa (*carrier*) intrinsik dari semikonduktor ( $\text{cm}^{-3}$ ). Untuk hubungan perhitungan  $N_e$  dan  $N_A$  pada semikonduktor tipe-p dinyatakan dengan hubungan (Wurfel, 2005). Pada penelitian ini sambungan p-n yang digunakan yaitu silicon dengan bandgap sebesar 1.12 eV.

#### Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo dalam penerapannya untuk studi *betavoltaic* yaitu untuk mensimulasikan secara lengkap lintasan elektron dalam bahan. Keluaran dari simulasi tersebut akan menggambarkan distribusi energi elektron selama berinteraksi di dalam bahan. Pada dasarnya metode ini menggunakan bilangan acak untuk menentukan posisi elektron. Seperti yang terlihat pada persamaan berikut yang digunakan untuk menentukan posisi awal elektron ketika masuk ke bahan (Drouin dkk, 2007).

$$X = \frac{d \sqrt{\log(R_1)}}{\sqrt{2} \times 1,65} \times \cos(2\pi R_2) \quad (5)$$

dan

$$Y = \frac{d \sqrt{\log(R_1)}}{\sqrt{2} \times 1,65} \times \sin(2\pi R_3) \quad (6)$$

Keduanya dalam satuan nanometer (nm).  $R_x$  merupakan bilangan acak antara 0 dan 1.  $d$  adalah diameter berkas elektron (nm). Untuk jarak antara dua tumbukan yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan berikut (Drouin dkk, 2007).

$$L = -\lambda_{el} \log(R_4) \quad (7)$$

$\lambda_{el}$  adalah jarak bebas rerata elektron (dalam nm) yang diperoleh dari hubungan berikut (Drouin dkk, 2007).

$$\frac{1}{\lambda_{el}} = \rho N \sum_{i=1}^n \frac{C_i \sigma_i^{el}}{A_{wi}} \quad (8)$$

$C_i$  adalah *weight fraction* dan  $A_{wi}$  adalah *atomic weight* dari elemen  $i$ .  $\rho$  adalah densitas bahan ( $\text{gr/cm}^3$ ) dan  $N_{av}$  adalah bilangan Avogadro.  $\sigma_i^{el}$  adalah *total elastic cross section* dari elemen  $i$ . Rutherford *elastic cross section* menyatakan hubungannya sebagai berikut (Joy, 1995).

$$\sigma_E = 5.21 \times 10^{-21} \frac{Z^2}{E^2} \frac{4\pi}{\alpha(1+\alpha)} \left( \frac{E+511}{E+1024} \right)^2 \quad (9)$$

$\alpha$  adalah *screening factor* yang dihitung dengan hubungan (Joy, 1995),

$$\alpha = 3.4 \times 10^{-3} \frac{Z^{0.67}}{E} \quad (10)$$

Energi antar tumbukan (dalam KeV) dapat dihitung dengan persamaan berikut (Drouin dkk, 2007).

$$E_{i+1} = E_i + \frac{dE}{dS} L \quad (11)$$

Perubahan energi terhadap jarak tempuh elektron atau yang disebut juga *stopping power* dihitung dengan persamaan Bethe yang dimodifikasi (Joy, 1995).

$$\frac{dE}{dS} = -78500 \frac{Z}{A_{wi} E} \ln \left( \frac{1.166(E+0.85J)}{J} \right) \quad (12)$$

dalam satuan keV/nm.  $J$  adalah energi potensial ionisasi (dalam KeV) yang bergantung terhadap nomor atom  $Z$ , dapat dihitung dengan persamaan berikut (Joy, 1995).

$$J = \left[ 9.76 Z + \frac{58.5}{Z^{0.19}} \right] \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

Untuk sudut hamburan  $\phi$  dan sudut hamburan azimuth  $\psi$  diperoleh dari hubungan (Joy, 1995),

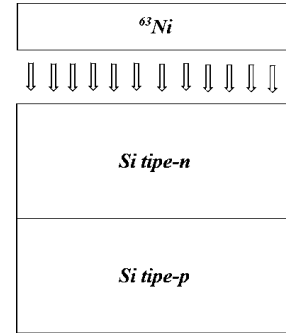
$$\cos \phi = 1 - \frac{2\alpha R_x}{(1+\alpha-R_x)} \quad (14)$$

dan

$$\psi = 2\pi R_x \quad (15)$$

### III. DESAIN DAN METODE PERHITUNGAN

Dengan pemilihan *beta emitter* dan semikonduktor seperti yang telah dikemukakan desain sambungan p-n dengan sumber beta dapat dibuat seperti pada gambar berikut.



Gambar. 1 Skema desain  $^{63}\text{Ni}:\text{Si-n}:\text{Si-p}$

Tang, dkk (2012) menyebutkan bahwa penting untuk dilakukan simulasi terkait dengan *beta stopping range* yang merupakan parameter yang dapat memberikan gambaran tentang jarak maksimum yang dapat ditempuh elektron ketika berada di dalam bahan. Hal ini terkait dengan daerah deplesi sebagai daerah tempat terjadinya rekombinasi elektron dan *hole*.  $N_D$  dan  $N_A$  yang divariasikan akan mempengaruhi jarak tempuh maksimum elektron dalam bahan sehingga berpengaruh terhadap kemungkinan bisa atau tidaknya elektron dapat masuk ke dalam daerah deplesi.

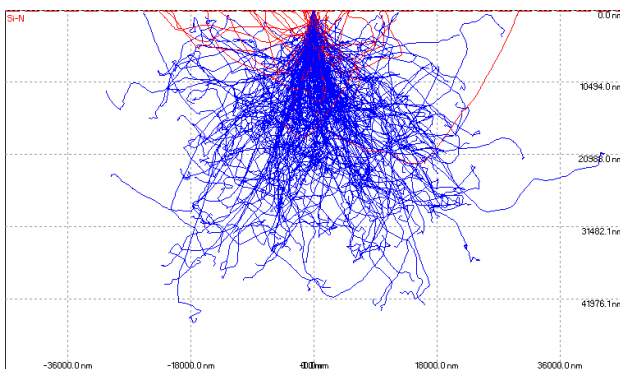
CASINO (Monte Carlo Simulation of Electron Trajectory in Solid) merupakan program yang dikembangkan dengan bahasa pemrograman C++ yang bertujuan untuk mensimulasikan lintasan elektron dalam interaksi dengan material. Terlepas dari output lain yang merupakan kelengkapan dari program ini, hasil simulasi dapat memberikan informasi yang dibutuhkan untuk proses optimasi yaitu jarak maksimum elektron. Perhitungan-perhitungan seperti dijelaskan pada bagian II.4 dilakukan dalam simulasi menggunakan program CASINO ini. Dengan melihat definisi data masukan program dan *layout* programnya maka tampak bahwa simulasi ini akan dipakai di dalam optimasi dengan menganggap bahwa sumber beta adalah sumber titik (*point source*). Jumlah elektron yang digunakan dalam simulasi ini yaitu 100.000 elektron.

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

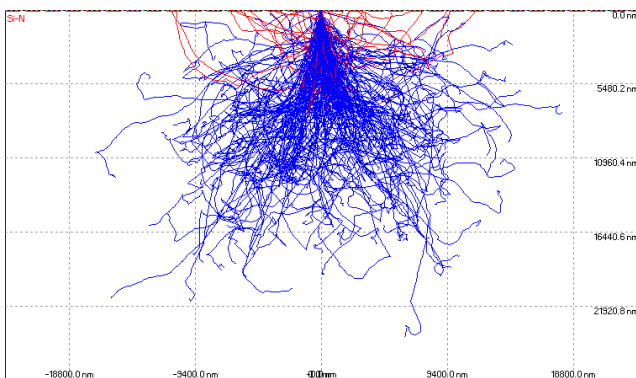
Langkah awal sebelum melakukan optimasi terhadap parameter-parameter konversi adalah dengan melakukan simulasi berkas elektron di dalam bahan. Hal ini bertujuan untuk menguji bisa atau tidaknya suatu nilai dari parameter konversi dapat digunakan didalam perhitungan. Parameter yang diuji yaitu pasangan konsentrasi donor  $N_D$  dan konsentrasi aseptor  $N_A$ , serta ketebalan lapisan semikonduktor. Informasi yang diperoleh dari hasil simulasi adalah jarak tempuh maksimum ( $Z_{max}$ ) dari elektron. Dari informasi  $Z_{max}$  ini maka dapat dilihat apakah elektron yang masuk ke bahan semikonduktor dapat mencapai daerah deplesi atau tidak.

Uji yang dilakukan dengan CASINO yaitu untuk ketebalan semikonduktor tipe-n dan tipe-p masing-masing sebesar  $1 \times 10^8$  nm. Untuk uji pada semua tipe konfigurasi terlihat bahwa daerah deplesi berada sekitar  $1 \times 10^8$  nm yang merupakan batas sambungan p-n. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa dengan variasi konsentrasi dopan pada rentang antara  $N_D$  bernilai  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  dan  $N_A$  bernilai  $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , elektron dapat mencapai daerah deplesi bahkan dapat masuk sampai ke semikonduktor tipe-p yang berada pada  $Z_{\text{max}}$  lebih dari  $1 \times 10^8$  nm. Hal ini baik untuk mendorong terciptanya rekombinasi elektron dan *hole* pada daerah deplesi. Dengan demikian nilai ketebalan semikonduktor baik tipe-n maupun tipe-p sebesar  $1 \times 10^8$  nm dapat digunakan.

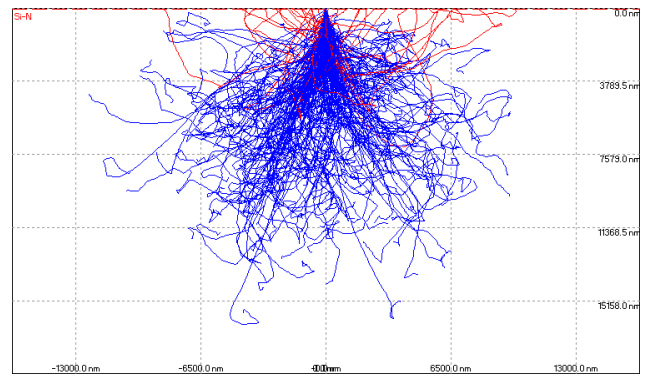
Cuplikan lintasan elektron dari sumber Ni-63 dan masuk ke sambungan p-n Si untuk beberapa nilai ketebalan lapisan Si seperti disajikan pada gambar 3, 4, 5, 6, 7, dan 8.



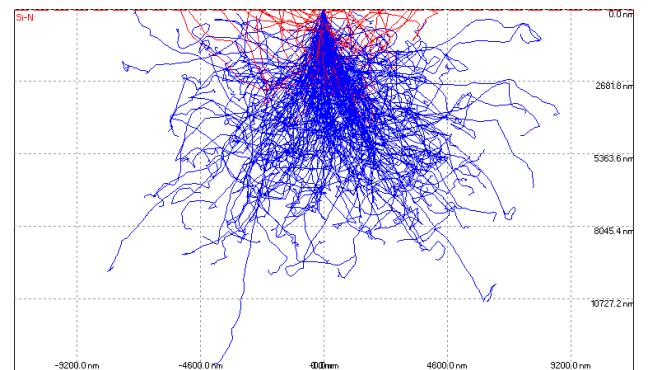
Gambar. 2 lintasan elektron untuk  $N_D = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



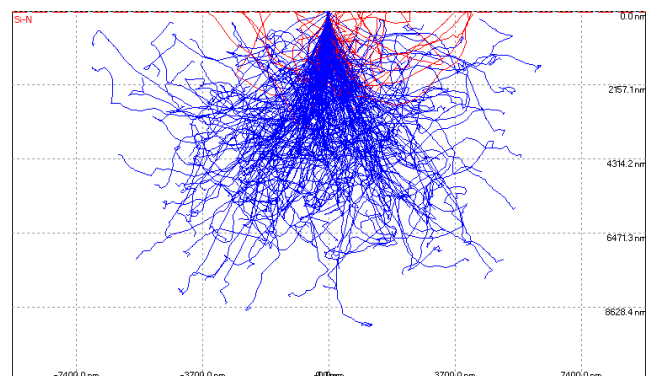
Gambar. 3 lintasan elektron untuk  $N_D = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



Gambar. 4 lintasan elektron untuk  $N_D = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



Gambar. 5 lintasan elektron untuk  $N_D = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

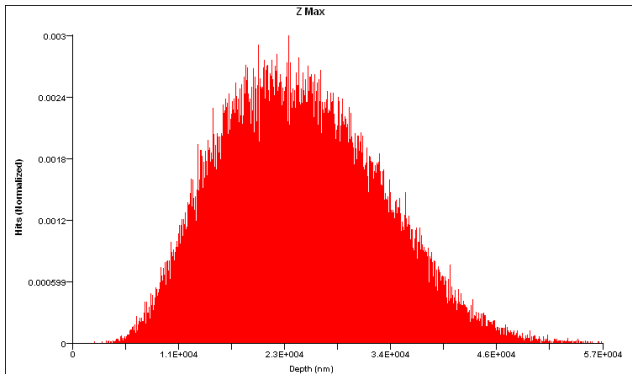


Gambar. 6 lintasan elektron untuk  $N_D = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

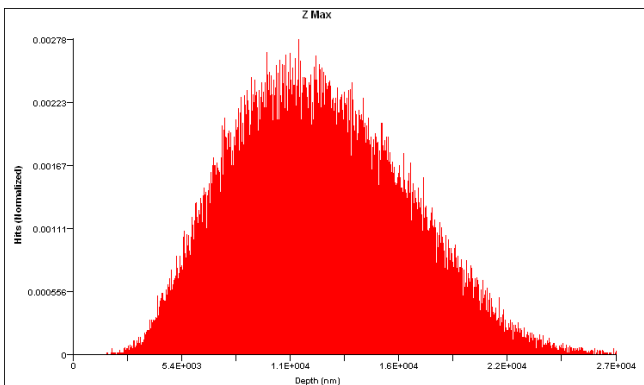
Terlihat untuk lintasan elektron pada ketiga gambar tersebut terbagi atas dua. Lintasan yang berwarna biru merupakan lintasan elektron yang kita tinjau terkait dengan studi kedalaman penetrasi. Lintasan lainnya yang berwarna merah merupakan *backscattered electron*. Dalam penelitian ini tidak dilakukan tinjauan terhadap *backscattered electron* baik lintasan maupun distribusinya.

Selain plot lintasan elektron, perhitungan dengan CASINO juga memperoleh hasil berupa distribusi energi elektron. Cuplikan beberapa gambaran distribusi energi elektron untuk

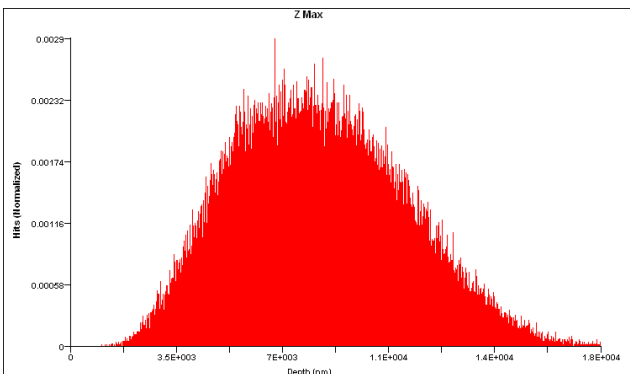
masing-masing konsentrasi donor dan aseptor dapat ditunjukkan seperti pada gambar berikut.



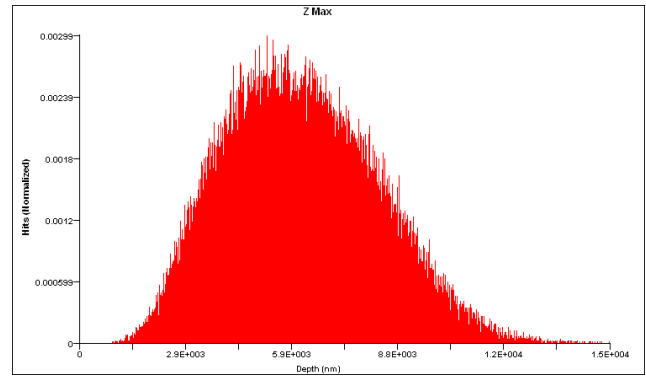
Gambar. 7  $Z_{\max}$  untuk  $N_D = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



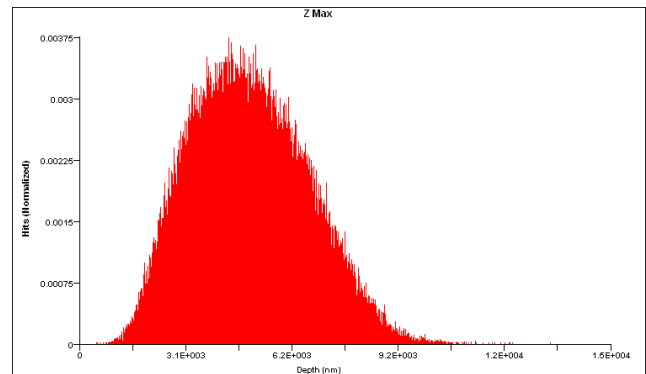
Gambar. 8  $Z_{\max}$  untuk  $N_D = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



Gambar. 9  $Z_{\max}$  untuk  $N_D = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



Gambar. 10  $Z_{\max}$  untuk  $N_D = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



Gambar. 11  $Z_{\max}$  untuk  $N_D = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Kurva distribusi energi elektron seperti pada cuplikan di gambar 7, 8, 9, 10 dan 11 menunjukkan persamaan dengan hasil plot lintasan elektron pada gambar 2, 3, 4, 5 dan 6. Terdapat persamaan untuk variasi ketebalan lapisan semikonduktor sebesar 1, 3, dan 5 cm. Terlihat bahwa untuk masing-masing nilai ketebalan dengan konsentrasi donor yang semakin besar akan memberikan jangkauan maksimum elektron yang semakin kecil. Hal ini berkaitan dengan densitas dari bahan. Semakin besar konsentrasi dopant maka bahan akan semakin rapat sehingga mengakibatkan elektron akan mengalami lebih banyak hamburan. Hal ini cenderung membuat elektron akan lebih cepat mencapai energi minimumnya yaitu sebesar 0.5 KeV.

## V. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa metode monte carlo dapat bekerja dengan baik untuk melakukan simulasi interaksi partikel beta dari sumber Ni-63 kedalam bahan semikonduktor sambungan p-n Si. Hasil yang diperoleh berupa plot lintasan elektron beserta distribusinya. Dari perhitungan kedalaman penetrasi elektron menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi dopant maka elektron akan semakin banyak mengalami hamburan sehingga jarak tempuh di dalam bahan menjadi semakin kecil.

**REFERENSI**

- [1] Heyde, K, *Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics : An Introductory Approach*, Second Edition, IOP Publishing Ltd. 1999.
- [2] Shultis, J K dan Faw, R E, *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering*, Second Edition, CRC Press Boca Raton. 2008.
- [3] Rio, S R dan Iida, M, *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*, cetakan pertama, Pradnya Paramita. 1999.
- [4] Wurfel, P, *Physics of Solar Cells : From Principles to New Concepts*, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA. 2005.
- [5] Drouin, D., Couture, AR., Joly, D., Tastet, X., Aimez, V., Gauvin, R. CASINO V2.42 - A Fast and Easy-to-use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users, *Scanning*, **29**, 92-101. 2007.
- [6] Joy, D C. *Monte Carlo Modelling for Electron Microscopy and Microanalysis*, Oxford University Press. 1995.
- [7] Tang XB, Liu YP, Ding D, Chen D. Optimization design of GaN betavoltaic microbattery, *Science China Technology Science*, **55**(3), 659-664. 2012.