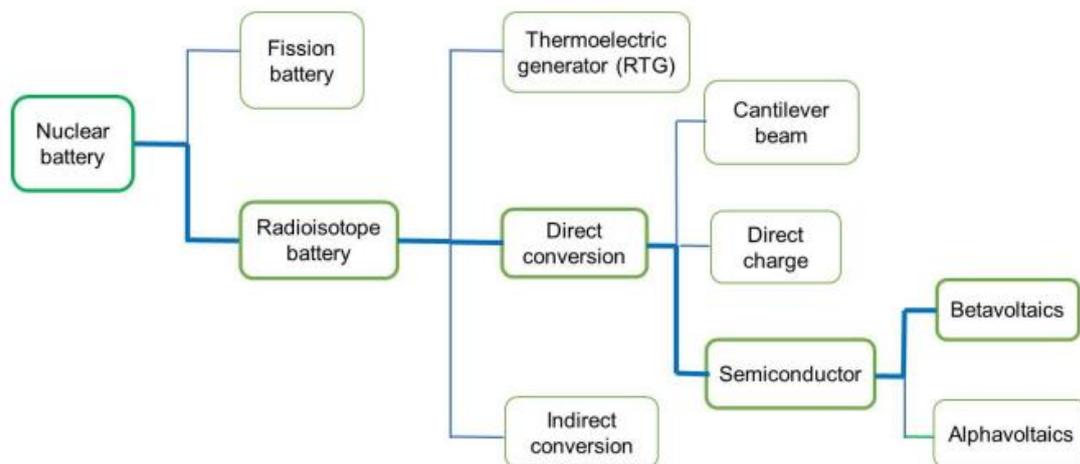


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai Nuklir

Baterai nuklir merupakan salah perangkat yang mengubah energi radiasi yang dipancarkan oleh peluruhan alami radioisotop menjadi energi listrik untuk pasokan listrik yang tahan lama dan mengharuskan pergeseran pragmatis menuju realisasi sumber energi yang lebih bersih, lebih aman dan terbarukan. Konversi energi radiasi menjadi energi listrik bukanlah hal baru, teknologi baterai nuklir dimulai pada tahun 1913 ketika Henry Moseley, seorang fisikawan Inggris, pertama kali mendemonstrasikan sel beta menggunakan radium sebagai sumber radioaktif (Moseley, 1913). Radioaktivitas alami menghasilkan partikel energi yang cukup untuk menghasilkan energi listrik. Tenaga yang dihasilkan oleh baterai nuklir pada akhirnya berasal dari energi yang dilepaskan oleh radioisotop, mirip dengan reaktor nuklir. Reaktor nuklir berbasis radioisotop memanfaatkan panas yang dihasilkan dari peluruhan spontan bahan radioaktif menjadi bahan non-radioaktif (Kumar, 2015).

Namun, sementara pembangkit listrik tenaga nuklir bergantung pada fisi nuklir yang dipicu secara artifisial atau fisi dalam reaktor nuklir, baterai nuklir bergantung pada peluruhan spontan dari inti isotop radioaktif untuk menghasilkan listrik. Analog nuklir terutama terdiri dari dua bagian utama: sumber panas radioisotop (umumnya dikenal sebagai bahan bakar) dan sistem yang mengubah energi radiasi dari peluruhan radioaktif spontan menjadi daya. Fitur lain dari baterai nuklir adalah radioisotop terbakar pada kecepatan paruhnya. Terlepas dari keunggulan baterai nuklir, baterai ini boros biaya dan terganggu dengan efisiensi konversi yang rendah; juga, ada penulakan umur terhadap pembangkit energi nuklir karena ancaman kebocoran isotop radioaktif terhadap lingkungan.



Gambar 2. 1 Jenis-Jenis Baterai Nuklir (Rizvi Alam, 2017)

Salah satu jenis baterai nuklir adalah baterai betavoltaik. Baterai betavoltaik ini menggunakan peluruhan beta. Peluruhan beta adalah suatu proses peluruhan radioaktif dengan muatan inti berubah tetapi jumlah nukleonnya tetap. Produksi beta negatif dan beta positif. Reaksi peluruhan partikel beta dapat dituliskan sebagai berikut (Abdurrouf, 2015):



2.2 Radioisotop untuk Baterai Nuklir

Pemilihan radioisotop yang sesuai untuk digunakan dalam baterai nuklir sangat penting untuk penerimaan dan penggunaannya. Karakteristik bahan radioisotop yang dipilih untuk baterai nuklir meliputi waktu paruh yang lama, energi peluruhan radiasi, metode produksi, emisi radiasi rendah dan menghasilkan radiasi lain oleh energi yang dipancarkan. Radioisotop harus dapat diproduksi dalam jumlah yang cukup dan dengan biaya yang wajar. Harus mampu digunakan dengan aman di semua keadaan dan kecil kemungkinan kecelakaan (Lange and Carroll, 2008).

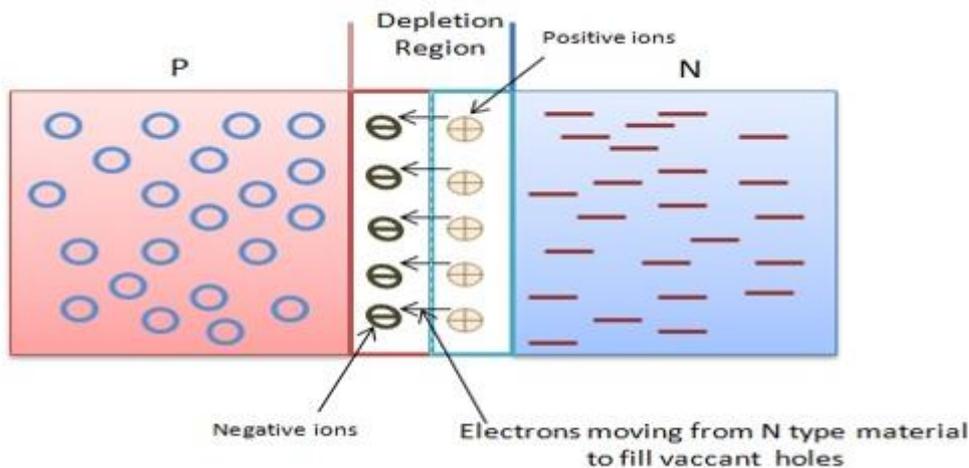
Usia baterai nuklir bergantung pada waktu paruh radioisotop, yang harus lebih lama daripada usia operasional baterai nuklir (Moseley, 1913). Waktu paruh adalah waktu yang dibutuhkan isotop asli untuk meluruh menjadi setengah dari nilai awalnya. Metode produksi isotop merupakan faktor penting karena biaya

merupakan pertimbangan penting untuk baterai nukir (Clarkson *et al.*, 2009). Sementara beberapa radioisotop terjadi secara alami sebagai bagian dari rantai peluruhan, beberapa adalah produksi dari reaksi nuklir (yaitu fisi dan fusi), sementara yang lain dapat dengan sengaja di produksi oleh radiasi dalam reactor nuklir atau fasilitas akselerator bertenaga sangat tinggi (Lange and Carroll, 2008).

Pm-147 merupakan kandidat yang ideal digunakan sebagai sumber radiasi dikarenakan memiliki kepadatan daya sebesar ($15 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ from Pm_2O_3) dan memiliki bahaya biologis yang rendah dikarenakan mengemisikan energi foton gamma yang rendah (Theses, Howard Hinderer and Howard, 2010). Sr-90 termasuk salah satu kandidat ideal dikarenakan memancarkan energi beta rendah (0,546 MeV) dan diproduksi di reaktor nuklir sebagai salah satu produksi fisi Uranium dan dianggap sebagai produk limbah (Rahastama and Waris, 2016).

2.3 Semikonduktor Berbasis P-N Junction

Semikonduktor adalah bahan yang memiliki konduktivitas yang berada diantara konduktivitas listrik konduktor dan listrik isolator yang baik misalnya gallium arsenida (GaAs), Si dan GaN (Greve, 2012). Ada 2 jenis semikonduktor yang di ketahui semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Semikonduktor intrinsik tidak memiliki pengotor dan jumlah electron di pita konduksi sama dengan jumlah lubang di pita valensi (Rockett, 2008). Semikonduktor ekstrinsik mengontrol pengotor yang ditambahkan secara substitusi untuk meningkatkan pembawa electron atau lubang (*hole*) (Fiore, 2021). Semikonduktor ekstrinsik diklasifikasikan sebagai semikonduktor tipe-P dan semikonduktor tipe-N. Semikonduktor tipe-P memiliki kerapatan lubang (*Hole*) lebih besar dari kerapatan elektron, pada material jenis ini, *hole* disebut pembawa mayoritas dan elektron disebut pembawa minoritas. Semikonduktor tipe-N dimana elektron disebut pembawa mayoritas dan *hole* disebut pembawa minoritas karena kerapatan elektron jauh lebih besar daripada kerapatan lubang (*hole*) (Fiore, 2021).



Gambar 2. 2 Sambungan PN dan daerah deplesi

Daerah deplesi merupakan daerah yang dimana elektron pada sambungan tipe N bergabung Kembali dengan *hole* (lubang) dan menyisakan ion positif di sambungan tipe N dan menghasilkan ion negatif pada sambungan tipe P (Fiore, 2021). Sebelum mengetahui lebar daerah deplesi optimal dari semikonduktor, kisaran elektron dalam semikonduktor harus ditentukan. Untuk menentukan jangkauan digunakan persamaan jangkauan Katz-Penfold. Dapat dirumuskan sebagai berikut(Davis, 2017) :

$$R_{max} = \frac{0,412}{\rho} E_{\beta}^{1,265-0,0954 \ln(E_{\beta})} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana ρ adalah densitas semikonduktor, E_{β} adalah energi partikel beta. Untuk mengetahui panjang daerah deplesi dari masing-masing sambungan tipe P dan tipe N dapat dirumuskan sebagai berikut (Goldsman and Darmody, 2020):

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon V_{bi}}{q} \left[\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)} \right]} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon V_{bi}}{q} \left[\frac{N_D}{N_D(N_A+N_D)} \right]} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana x_n dan x_p adalah panjang daerah deplesi sambungan tipe n dan tipe p, ϵ adalah permitivitas, q adalah muatan dalam sambungan, N_A adalah konsentrasi akseptor, N_D adalah konsentrasi donor, dan V_{bi} adalah potensial *built in* dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{bi} = V_T \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

Setelah mengetahui nilai dari panjang daerah deplesi dari masing-masing sambungan tipe p dan tipe n. Maka kita dapat mengetahui lebar daerah deplesi keseluruhan dengan menjumlahkan panjang daerah deplesi pada sambungan tipe p dan panjang daerah deplesi pada sambungan tipe n (Goldsmann and Darmody, 2020):

$$W_D = x_p + x_n \dots \dots \dots (2.7)$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon V_{bi}}{q} \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right]} \dots \dots \dots (2.8)$$

2.4 Interaksi Partikel Beta dengan Materi

Beberapa jenis radiasi berinteraksi dengan materi dengan cara yang sangat berbeda contohnya partikel alfa yang besar, massif dan bermuatan tidak dapat menembus selembar kertas dan bahkan memiliki jangkauan terbatas diudara kering (Ridha, 2016). Radiasi dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu bermuatan dan tidak bermuatan. Partikel bermuatan secara langsung mengionisasi media yang dilaluinya, sedangkan partikel yang tidak bermuatan dapat menyebabkan ionisasi hanya secara tidak langsung atau oleh radiasi sekunder (Ridha, 2016). Dalam peristiwa interaksi partikel dengan materi terjadi perubahan momentum yang relatif besar, mengakibatkan penyimpangan yang signifikan dari pergerakan awal (Bower, 2002). Akibatnya, Gerakan dalam zat elektron dengan energi kinetik kurang dari 100 KeV, kehilangan total energi kinetik partikel saat melewati materi (Bower, 2002):

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right) = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{ion} + \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{rad} \dots \dots \dots (2.9)$$

Kehilangan energi radiasi mengacu pada partikel beta yang disebabkan oleh ionisasi atau eksitasi ketika partikel melewati bahan. Kehilangan radiasi ini disebut juga dengan kehilangan bremsstrahlung. Hubungan antara radiasi dan ionisasi kehilangan energi kinetik elektron dapat dirumuskan sebagai (Evans, 1955):

$$\frac{(-dE/dx)_{rad}}{(-dE/dx)_{ion}} = \frac{EZ}{800} \dots \dots \dots (2.10)$$

2.5 Konversi Energi Peluruhan Menjadi Energi Listrik

Terdapat dua jenis konversi energi peluruhan menjadi energi listrik yaitu konversi *thermal* dan konversi *non thermal*. Konversi energi peluruhan radioaktif menjadi listrik melalui konversi energi kinetik partikel yang terbentuk dalam peluruhan radioaktif menjadi energi panas, selanjutnya energi panas menjadi energi listrik disebut konversi *thermal*. Sedangkan konversi *non thermal* mengubah energi peluruhan menjadi energi listrik tanpa melalui siklus termal terlebih dahulu dan dapat dibedakan menjadi jenis yaitu *direct-charge*, *direct-conversion* dan *indirect-conversion*) (Bower, 2002).

2.5.1 Difusi Pembawa Muatan Minoritas (Numerik)

Pada saat semikonduktor di radiasi oleh sumber beta, pembawa minoritas menyebar dan akhirnya bergabung Kembali dengan pembawa mayoritas. Distribusi pembawa minoritas dapat dijelaskan dengan persamaan difusi pembawa minoritas (MCDE) (Lundstrom, 2015):

$$D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + G_L = 0 \text{ untuk elektron} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + G_L = 0 \text{ untuk lubang (hole)} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana Δn adalah konsentrasi elektron minoritas pada sambungan p dan Δp adalah konsentrasi *hole* (lubang) minoritas pada sambungan n. D_n dan D_p adalah konsentrasi difusi elektron dan difusi *hole*. τ_n dan τ_p adalah waktu rekombinasi (Lundstrom, 2015).

2.5.2 Arus dan Tegangan

Terdapat beberapa parameter semikonduktor yang membantu dalam mengetahui nilai efisiensi seperti nilai dari arus hubungan singkat dan tegangan rangkaian terbuka. Besar dari arus hubungan singkat dapat dirumuskan sebagai berikut (Lutz, 2007):

$$I_{sc} = I_D + I_N \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana I_D adalah arus daerah deplesi dan I_N adalah arus pasangan elektron-hole. Untuk tegangan rangkaian terbuka dapat dirumuskan sebagai berikut (Prelas et al., 2016):

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \right) \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana n adalah faktor ideal, k_B konstanta Boltzmann, T temperatur absolut, q muatan elektron dan I_o adalah arus saturasi.

2.5.3 Daya, Fill Factor, dan Efisiensi (η)

Adapun parameret yang mendukung dalam mengetahui kinerja dari baterai adalah daya, *fill factor* dan efisiensi. Untuk persamaan daya input radiasi dapat dirumuskan sebagai berikut (Prelas et al., 2016):

$$P_{in} = 1.6 \times 10^{-19} A E_{avg} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana A adalah aktivitas sumber beta, E_{avg} adalah energi rata-rata sumber beta dan $1.6 \times 10^{-19} C$ adalah nilai dari muatan per elektron. Dengan persamaan daya maksimum sebesar:

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \dots \dots \dots (2.16)$$

Fill Factor (FF) didapatkan dari hasil perbandingan antara daya maksimum dengan hasil tegangan maksimum dan arus maksimum dirumuskan sebagai:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dengan V_{mp} adalah tegangan maksimum, I_{mp} adalah arus maksimum, V_{oc} adalah tegangan rangkaian terbuka dan I_{sc} adalah arus hubungan singkat. Untuk efisiensi konversi energi dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta_{conv} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{1.6 \times 10^{-19} A E_{avg}} \dots \dots \dots (2.18)$$

2.6 Metode Monte Carlo

Metode *monte carlo* merupakan salah satu Teknik simulasi dimana percobaan computer dilakukan dengan menghasilkan bilangan *pseudeorandom* secara berulang. Jika hukum probabilitas untuk proses dasar dari fenomena yang relavan diketahui, proses ini dihasilkan di komputer seolah-olah pernah terjadi dan perilaku dari keseluruhan sistem diselidiki. Dengan demikian, simulasi *Monte Carlo* mampu

memproduksi fenomena seperti aslinya tanpa pendekatan apa pun. Ini adalah metode kalkulasi transpor kompleks radiasi dalam materi (Nikjoo, Uehara and Emfietzoglou, 2012).

MCNPX adalah kode transpor radiasi *Monte Carlo* untuk keperluan umum yang dirancang untuk melacak banyak jenis partikel pada rentang energi yang luas. Program MCNPX dimulai pada tahun 1994 sebagai perpanjangan dari MCNP4B dan LAHET 2.8 untuk mendukung proyek *accelerator Production of Tritium (APT)* (Pelowitz, 2008). Perhitungan dalam program MCNPX diubah dalam bentuk kode yang disebut TALLYX. Tabel 2.1 merupakan jenis perhitungan diidentifikasi berdasarkan jenis perhitungan dan jenis partikel.

Tabel 2. 1 Kode pada perhitungan (TALLY) dan satuan masing-masing perhitungan (Pelowitz, 2008)

Kode	Deskripsi Perhitungan	Satuan	Satuan
F1:<p1>	Arus terintegrasi di atas permukaan	Partikel	MeV
F2:<p1>	Fluks rata-rata diatas permukaan	Partikel/cm ²	MeV/cm ²
F4:<p1>	Fluks rata-rata pada sel	Partikel/cm ²	MeV/cm ²
F6:<p1>	Energi deposisi rata-rata pada sel	MeV/g	Jerks/g
F7:N	Energi deposisi fisi rata-rata pada sel	MeV/g	Jerks/g
F8:<p1>	Distribusi energi yang dibuat di detector oelh radiasi	Pulses	MeV
F5a:N atau F5a:P	Fluks pada detector titik atau cincin	Partikel/cm ²	MeV/cm ²

Pada penelitian ini perhitungan yang digunakan adalah Tally F6 dan F4. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan Tally F6 dan F4 dapat dirumuskan sebagai berikut (Judith F, 2000) :

$$\frac{W \times T_l \times \sigma_T(E) \times H(E) \times \rho_a}{m} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$\frac{W \times T_l}{V} \dots \dots \dots (2.20)$$

Dimana W berat partikel, T_l panjang lintasan, $\sigma_T(E)$ total penampang mikroskopis, $H(E)$ nomor pemanas, ρ_a densitas, m massa, dan V adalah volume (Judith F, 2000).

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu

No.	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1.	Haiyang, 2011	<p>Metode: menambahkan elektroda pada baterai betavoltaik berjenis elektroda pektinat yang sering digunakan dalam baterai fotovoltaik dan membandingkan dengan kinerja baterai betavoltaik yang ditambahkan dengan elektroda titik.</p> <p>Hasil: besar arus hubungan singkat dari (I_{sc}) baterai betavoltaik dengan eletroda pektinat menghasilkan sebesar 6 nA dan baterai dengan eletroda point menghasilkan sebesar 9 nA. akan tetapi kedua eletroda memiliki arus bocor yang sama besar.</p>
2.	Zheng,2021	<p>Metode: menggunakan kode Monte Carlo untuk mengetahui laju tingkat generasi pasangan elektron-<i>hole</i> dalam bahan GaAs di bawah iradiasi sumber beta ^{63}Ni dan menganalisis pengaruh parameter terhadap kinerja baterai berdasarkan variasi ketebalan sel tipe p dari 0.1 sampai 5 μm dan tipe n sebesar 10 μm – ketebalan sel tipe p.</p> <p>Hasil: dalam percobaan ini daya keluaran yang optimal di hasilkan pada ketebalan sel tipe p 0.1 μm dan ketebalan sel tipe n 9.9 μm sebesar 0.086 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dengan efisiensi sebesar 1.67%.</p>
3.	Carla,2021	<p>Metode: simulasi kode Monte Carlo MCNP6® dilakukan untuk mengetahui</p>

		<p>model baterai betavoltaik dan kuantifikasi radiasi berdasarkan luas permukaan 10×10 dari diode silicon terhadap ketebalan dari 147Pm.</p> <p>Hasil: berdasarkan dari hasil simulasi, ketebalan sumber yang ideal dan menghasilkan jumlah daya besar sebesar 0.005 cm.</p>
4.	Zhang,2018	<p>Metode: metode Monte Carlo dan ko-simulasi model numerik digunakan mengetahui nilai efisiensi dari betavoltaik PIN berbasis SiC oleh sumber 147Pm berdasarkan ketebalan lapisan I.</p> <p>Hasil: berdasarkan hasil simulasi, efisien akan menurun ketika ketebalan lapisan I bertambah dan akan menurun ketika konsentrasi doping lapisan I meningkat. Efisien bernilai 3.74% ketika konsentrasi doping dan ketebalan lapisan I masing-masing sebesar $5 \times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ and $20\ \mu\text{m}$.</p>

