

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Akselerator Partikel

Akselerator partikel merupakan instrumen presisi yang memiliki peran krusial dalam fisika nuklir dan fisika partikel, karena memungkinkan percepatan, pelacakan, serta pengendalian partikel bermuatan, seperti elektron, proton, atau ion (Das dan Ferbel, 2003). Eksperimen menggunakan akselerator telah berkontribusi pada berbagai penemuan penting, termasuk penemuan sinar-X oleh W. Röntgen (1895), penemuan elektron oleh J.J. Thomson (1897), serta pemahaman lebih lanjut mengenai reaksi partikel nuklir dan inti atom oleh Cockroft dan Walton (1932). Komponen utama akselerator umumnya terdiri atas sumber berkas (*Ion source*) atau *injector*, sistem pemercepat, sistem tabung hampa, dan sistem kendali (Diah *et al.*, 2023). Prinsip dasar interaksi partikel dalam akselerator mengikuti hukum relativistik Lorentz, seperti pada persamaan (2.1).

$$F = q (E + v \times B) \quad (2.1)$$

di mana :

F = Gaya yang dialami oleh partikel bermuatan (N)

q = Muatan listrik partikel (C)

E = Kuat medan listrik (V/m)

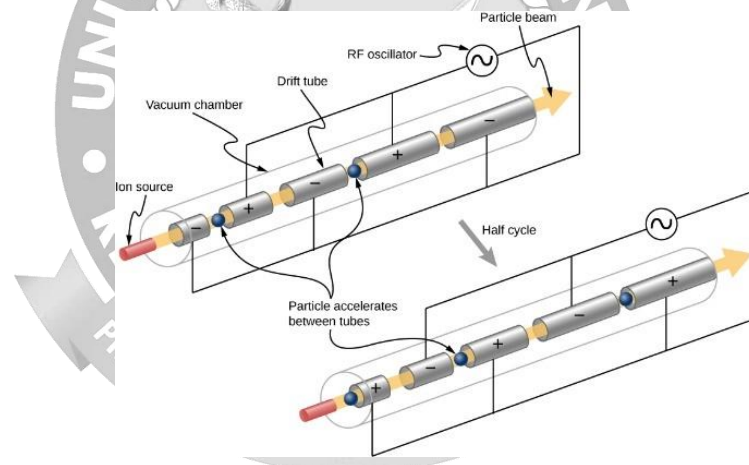
v = Kecepatan partikel (m/s)

B = Kuat medan magnet (T)

Akselerator partikel memiliki berbagai bentuk yang didasarkan pada prinsip teknis yang berbeda, yaitu interaksi antara muatan listrik dan medan elektromagnetik. Penerapan teknisnya mencakup akselerator elektrostatik dan akselerator elektrodinamik, yang menghasilkan jenis akselerator berbeda (Scherer, 2013). Berdasarkan lintasannya, akselerator terbagi menjadi:

a. Akselerator Linear (LINAC)

Akselerator linear (LINAC) adalah perangkat yang menggunakan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi untuk mempercepat partikel bermuatan. Partikel dipercepat dalam lintasan lurus saat melewati tabung linear oleh medan listrik berosilasi, dengan energi yang diperoleh bergantung pada panjang struktur pemercepat (Seeman *et al.*, 2020). Frekuensi gelombang yang digunakan bervariasi dari ratusan MHz (proton dan ion) hingga beberapa GHz (elektron). Mesin pemercepatan akselerator partikel dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Akselerator Partikel Linear

Sumber : Raible (2024)

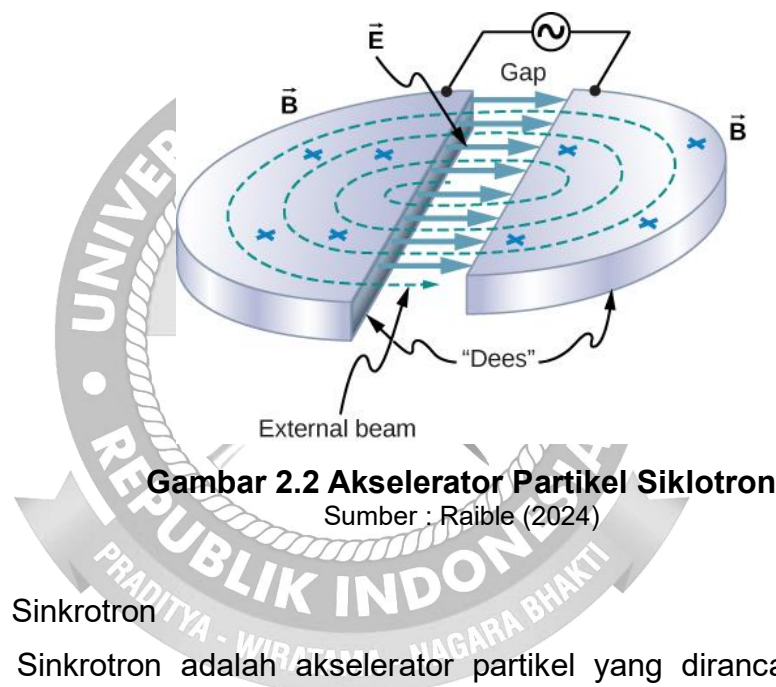
b. Akselerator Sirkular

Akselerator sirkular adalah instrumen yang mempercepat partikel dengan bergerak mengikuti orbit tetap dan berevolusi berulang kali, sehingga energi kinetik partikel dapat meningkat secara signifikan sesuai dengan jumlah putaran yang dilalui saat melewati medan listrik berosilasi (Trubnikov, 2007). Akselerator sirkular terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

1) Siklotron

Siklotron pertama kali dikembangkan oleh E.O. Lawrence (1930) sebagai akselerator partikel yang menggunakan medan magnet

statis tegak lurus untuk mengarahkan partikel bermuatan dalam lintasan melingkar (Craddock, 2010). Partikel dipercepat oleh medan listrik bolak-balik yang diterapkan di antara dua elektroda berbentuk D (*dees*) yang di ilustrasikan pada Gambar 2.2. Setiap kali partikel melewati celah antara elektroda, energi kinetiknya meningkat sehingga lintasan partikel semakin membesar.



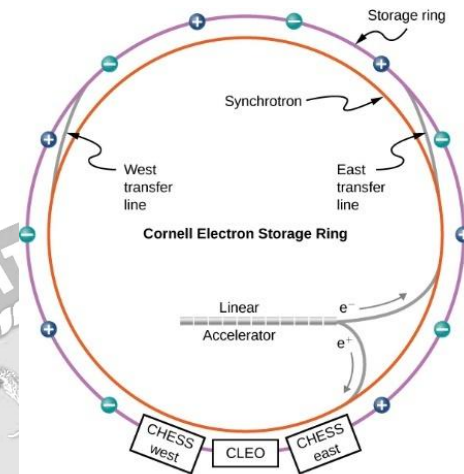
Gambar 2.2 Akselerator Partikel Siklotron
Sumber : Raible (2024)

2) Sinkrotron

Sinkrotron adalah akselerator partikel yang dirancang untuk mempercepat partikel bermuatan, hingga mencapai kecepatan sangat tinggi bahkan mendekati kecepatan cahaya dalam lintasan melingkar (Trubinikov, 2007). Keunikan sinkrotron terletak pada kemampuan medan magnet dan frekuensi yang dapat menyesuaikan dengan peningkatan energi partikel, sehingga tetap berada pada lintasan konstan meskipun kecepatannya bertambah (Dolbilov, 2017).

Selama proses percepatan partikel dalam lintasan sinkrotron, terdapat dua peran penting yang saling bekerja sama, yaitu medan listrik dan medan magnet. Medan listrik yang berada di dalam rongga percepatan berfungsi untuk menambah energi partikel, sehingga kecepatannya terus meningkat setiap kali

melewati lintasan. Sementara itu, medan magnet bertugas menjaga agar partikel tetap bergerak dalam lintasan melingkar dijalurnya seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Akselerator Partikel Sinkrotron

Sumber : Raible (2024)

2.1.2 Akselerator Partikel Linear Proton

Akselerator partikel linear proton (proton LINAC) adalah perangkat yang berfungsi untuk mempercepat proton di sepanjang lintasan lurus dengan menggunakan medan listrik berfrekuensi tinggi yang diterapkan secara berkala pada serangkaian struktur akselerasi. Dalam proses ini, proton mendapatkan energi tambahan secara bertahap saat melewati setiap rongga akselerasi, di mana medan listrik berosilasi memastikan percepatan yang efektif pada setiap tahap (Lapostolle, 1989). Proses ini didukung oleh komponen penting seperti sumber ion (H^+) *Radio-Frequency Quadrupole* (RFQ), *Drift Tube Linac* (DTL), *Coupled-Cavity Drift Tube Linac* (CCDTL), dan *Coupled-Cavity Linac* (CCL), yang semuanya berperan dalam menghasilkan percepatan proton secara optimal sepanjang lintasan akselerator (Algin *et al.*, 2011).

Proton yang dihasilkan dari proses ionisasi hidrogen melewati serangkaian rongga percepatan dalam akselerator linear, dengan medan listrik yang berfungsi memberikan dorongan energi bertahap pada setiap tahap percepatan (Bryant, 1994). Sebagai partikel bermuatan positif, proton

sangat responsif terhadap medan listrik, sehingga percepatan berlangsung secara periodik sepanjang lintasan linear akselerator. Setiap kali melewati rongga percepatan, kecepatan dan energi proton meningkat secara signifikan, yang dirumuskan pada persamaan (2.2) berikut :

$$\Delta w = E_o LT \cos \emptyset \quad (2.2)$$

Dan energi akselerasi dapat dihitung melalui persamaan (2.3).

$$W_f = W_i + \Delta W \quad (2.3)$$

di mana :

E_o = Energi masuk (MeV)

T = Nilai *Transit Time Factor*

L = Panjang sel (M)

W_f = Energi keluar (MeV)

2.1.3 Relativitas Energi

Relativitas energi merupakan konsep fundamental relativitas khusus yang diperkenalkan oleh Albert Einstein, teori ini menghubungkan antara massa dengan energi, serta memberikan pemahaman komperhensif tentang cara kerja energi saat suatu objek bergerak mendekati kecepatan cahaya. Bahkan ketika objek dalam keadaan diam, akan memiliki energi diam yang bergantung pada massanya (Enstein, 1920). Relativitas khusus tersebut diformulasikan dalam persamaan (2.4) sebagai berikut :

$$E_o = mc^2 \quad (2.4)$$

Sedangkan ketika bergerak, energi total objek dalam relativitas khusus dapat diformulasikan dalam persamaan (2.5) berikut :

$$E = \gamma mc^2 \quad (2.5)$$

di mana :

E_o = Energi objek ketika diam (Joule)

m = Massa objek (Kg)

c = Kecepatan cahaya (3×10^8 M/S)

Perhitungan relativistik ketika objek bergerak dengan kecepatan tinggi mendekati cahaya, kita dapat menggunakan faktor Lorentz (γ) untuk

menghitung efek relativistik pada energi, massa, dan waktu. Faktor Lorentz dinyatakan dalam persamaan (2.6) sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.6)$$

Kita dapat menggunakan faktor Beta (β) untuk menyederhanakan perhitungan dengan merepresentasikan kecepatan objek relatif (v) terhadap kecepatan cahaya (c) ke dalam persamaan (2.7) berikut :

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (2.7)$$

Lalu, mengganti (β) ke dalam rumus Lorentz, persamaan Lorentz dapat ditulis ulang sebagai persamaan (2.8).

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (2.8)$$

Maka dari persamaan tersebut kita dapat peroleh nilai Beta (β), hal tersebut dinyatakan dalam persamaan (2.9) berikut :

$$\beta = \sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}} \quad (2.9)$$

2.1.4 Drift Tube Linac

Drift Tube Linac (DTL) adalah teknologi akselerator linear yang digunakan untuk mempercepat partikel bermuatan melalui serangkaian tabung *drift* di dalam rongga radiofrekuensi (Ramberger, 2008). Partikel dipercepat oleh medan listrik setiap kali berpindah dari satu tabung ke tabung berikutnya, dengan panjang tabung disesuaikan berdasarkan kecepatan partikel dan frekuensi medan listrik. DTL umumnya menggunakan desain *Transverse Magnetic* (TM) *Alvarez* dengan panjang struktur dapat dihitung dengan persamaan (2.10) sebagai berikut :

$$L_n = \sum \beta_n \lambda_{RF} \quad (2.10)$$

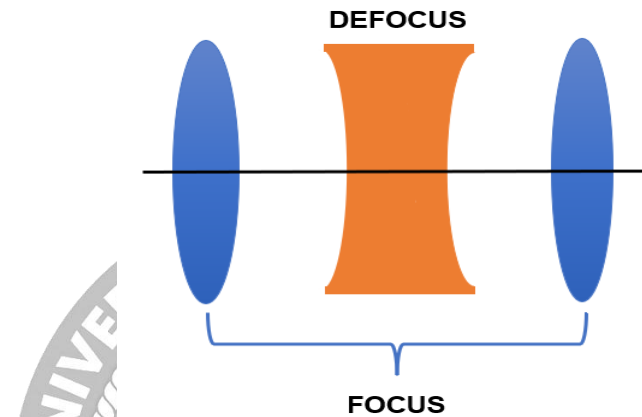
di mana :

L_n = Panjang struktur (M)

β_n = Nilai Beta

λ_{RF} = Panjang gelombang (M)

Selain itu, pemfokusan periodik dilakukan oleh *Permanent Magnet Quadrupole* (PMQ) dalam pola *Focus-Empty-Defocus-Empty* (FODO) sesuai pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pemfokusan Kisi FODO

Sumber : Dibuat Penulis (2025)

Pada struktur *Alvarez*, medan akselerasi terkonsentrasi di antara celah-celah, sementara partikel bergerak melalui tabung *drift* yang didukung oleh batang penyangga, komponen *quadrupole* dipasang di dalamnya untuk menjaga fokus partikel secara lateral (Wang *et al.*, 2023). Panjang struktur sel (L_n) dapat dihitung melalui persamaan (2.11) agar partikel tetap sinkron dengan medan akselerasi di setiap celah, sebagai berikut :

$$L_n = \frac{\beta_{n-1} + 2\beta_n + \beta_{n+1}}{2} \lambda_{RF} \quad (2.11)$$

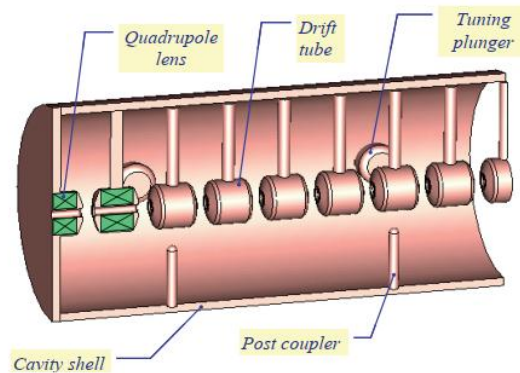
di mana :

β_{n-1} = Nilai Beta tahap pertama

β_n = Nilai Beta tahap kedua

β_{n+1} = Nilai Beta tahap ketiga

Sinkronisasi dapat dijaga dengan menyesuaikan jarak antar celah berdasarkan prinsip utama, yaitu menjaga faktor waktu transit. Struktur DTL dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Struktur *Drift Tube Linac* (DTL)

Sumber : Vretenar (2013)

Berikut adalah komponen dan fungsinya dalam struktur DTL pada akselerator partikel dari Gambar 2.5 :

a. Magnet *Quadrupole*

Memfokuskan berkas partikel dilakukan dengan menciptakan medan magnet yang mampu mempersempit atau memperlebar berkas dalam satu arah, di mana magnet *quadrupole* berperan penting dalam menjaga arah berkas partikel saat bergerak melalui akselerator (Pinson, 2020). Struktur *quadrupole* didesain terdiri atas 70% dari struktur sel sehingga panjang struktur *quadrupole* ($L_n \text{ Quadrupole}$) dapat dihitung dengan persamaan (2.12), (2.13), dan (2.14) berikut :

$$L_n \text{ Quadrupole} = 0,7 \frac{\beta_{n-1}}{2} \lambda_{RF} \quad (2.12)$$

$$L_n \text{ Quadrupole} = 0,7 \beta_n \lambda_{RF} \quad (2.13)$$

$$L_n \text{ Quadrupole} = 0,7 \frac{\beta_{n+1}}{2} \lambda_{RF} \quad (2.14)$$

b. Tabung *Drift*

Tabung konduktif berongga ini digunakan untuk melindungi partikel dari medan listrik yang bersilasi saat bergerak melalui bagian akselerator (Lapostolle, 1996). Tabung ini memungkinkan partikel

melintas sambil terlindungi dari gaya yang dapat memperlambatnya, sehingga berkas partikel tetap stabil. Panjang tabung *drift* didesain 30% dari struktur sel, sehingga panjang struktur *drift* ($L_n\text{Drift}$) dapat diketahui melalui persamaan (2.15), (2.16), (2.17) sebagai berikut :

$$L_n\text{Drift} = 0,3 \frac{\beta_{n-1}}{2} \lambda_{RF} \quad (2.15)$$

$$L_n\text{Drift} = 0,3 \frac{\beta_n}{2} \lambda_{RF} \quad (2.16)$$

$$L_n\text{Drift} = 0,3 \frac{\beta_{n+1}}{2} \lambda_{RF} \quad (2.17)$$

c. *Tuning Plunger*

Tuning Plunger digunakan untuk menyesuaikan frekuensi resonansi pada rongga akselerator, dan dengan mengatur posisinya, operator dapat memastikan medan radio frekuensi (RF) di dalam rongga sesuai dengan berkas partikel, sehingga mengoptimalkan proses percepatan (Shahriari, 2018).

d. *Cavity Shell*

Cavity Shell berfungsi melindungi komponen di dalamnya serta memberikan integritas struktural pada akselerator, sekaligus sebagai batas luar bagi medan elektromagnetik untuk memastikan bahwa medan tetap terkurung di dalam rongga guna memaksimalkan transfer energi ke berkas partikel (Seeman *et al.*, 2020).

e. Pos Kopler

Pos kopler digunakan untuk menjaga stabilitas distribusi medan elektromagnetik dalam rongga DTL dengan meningkatkan keseragaman medan di sepanjang akselerator, sehingga membantu meminimalkan fluktuasi yang dapat mengganggu proses percepatan (Khalvati & Ramberger, 2016).

2.1.5 *Transit Time Factor*

Transit Time Factor (TTF) merupakan parameter penting dalam desain dan operasi akselerator linear (LINAC) untuk mempertahankan efisiensi akselerasi (Lagniel, 2023). TTF sangat relevan dalam konteks

akselerator tabung *drift* yang memiliki celah akselerasi sempit, terutama ketika durasi partikel melintasi celah tersebut mendekati atau melebihi setengah periode dari osilasi elektromagnetik (Smith, 2007). Nilai TTF dapat dihitung dengan mempertimbangkan variasi medan dalam seluruh celah di sepanjang lintasan partikel, baik untuk partikel yang berada di sumbu (*on-axis*) maupun di luar sumbu (*off-axis*). Untuk menentukan nilai TTF kita dapat menghitungnya melalui persamaan (2.18) berikut:

$$\text{Transit Time Factor (TTF)} = \frac{\int_{-l/2}^{l/2} E(0,z) \cos(\omega t + \phi) dz}{\int_{-l/2}^{l/2} E(0,z) dz} \quad (2.18)$$

Secara umum, karena medan listrik berfluktuasi seiring waktu saat partikel melintasi rongga, energi maksimum ($q \times V$), yang dapat diperoleh oleh partikel bermuatan (q) dalam rongga lebih rendah daripada ($q \times V_0$). Oleh karena itu, *Transit Time Factor* nilainya kurang dari 1 (Alesini, 2008). atau didefinisikan sebagai persamaan (2.19).

$$TTF \leq 1 \quad (2.19)$$

Nilai *Transit Time Factor* sangat penting dalam menentukan efisiensi peningkatan energi partikel dalam akselerator. Sehingga, optimalisasi nilai TTF menjadi kunci dalam meningkatkan kinerja akselerator linear secara keseluruhan (Lagniel, 2023). Perhitungan nilai TTF akan dilakukan berdasarkan perhitungan integral dengan pendekatan *Simpson* yang dikodekan melalui perhitungan komputasi *Python*.

2.1.6 Program *Python*

Python adalah bahasa pemrograman interpretatif yang dirancang untuk memudahkan pembacaan dan penulisan kode. Bahasa *python* dibuat pada tahun 1991 oleh Guido van Rossum, bertujuan untuk pengembangan web, pengembangan perangkat lunak, membuat aplikasi, menyelesaikan persamaan matematika, dan pemrograman mikrokontroler (Alfian, 2020). Bahasa *Python* dapat membaca serta memodifikasi file untuk menangani data besar dan kompleks.

Dalam pengembangannya program *Python* terintegrasi dengan *Jupyter*, *Thony*, *Pycharm*, *Netbeans*, dan *Visual Studio Code* (VSCode) yang berguna dalam mengelola koleksi file *Python*. *Python* dapat bekerja pada platform *Windows*, *Mac Os X*, *Linux/Unix*, *Java Virtual Machine*, *Amiga*, *Palm*, dan *Symbian* dengan perintah sederhana sehingga memungkinkan pengembang untuk membuat program dengan dinamis (Akbar dan Tedi, 2018). Penelitian ini mengintegrasikan program *Python* dengan aplikasi *Visual Studio Code* pada platform *Windows*, ditampilkan pada Gambar 2.6, dengan pustaka *Numpy* dan *Scipy* guna melakukan perhitungan akurasi data dengan tepat.

VSCode dipilih sebagai IDE (*Integrated Development Environment*) karena merupakan editor kode sumber yang ringan tetapi memiliki kemampuan yang andal dan kompatibel dengan sistem operasi *Windows* pada desktop (Romzi dan Budi, 2020).



Gambar 2.6 Program *Python* pada Windows

Sumber : Romzi dan Budi (2020)

Penggunaan *Numpy* dan *Scipy* dalam penelitian ini didasarkan pada fitur fungsionalitas yang sangat relevan untuk komputasi ilmiah. *Numpy* menyediakan *array* multidimensional sebagai pendekatan standar untuk menyimpan data numerik, yang mendukung efisiensi dalam komputasi tingkat tinggi. *Numpy* memungkinkan optimasi perhitungan melalui vektorisasi, pengurangan penyalinan memori, dan minimisasi jumlah operasi, menjadikannya alat yang sangat andal untuk analisis data

kompleks. Sedangkan, *Scipy* melengkapi *Numpy* dengan kumpulan algoritma dan fungsi matematis yang terorganisasi dalam subpaket, untuk optimasi dan manipulasi matriks (Kadhim *et al*). Kombinasi *Numpy* dan *Scipy* memungkinkan implementasi metode komputasi yang lebih efektif dan efisien, meskipun membutuhkan keterampilan lebih tinggi. Kemampuan yang mendalam dan fleksibel, menjadi pilihan ideal untuk mendukung perhitungan energi akselerasi dan analisis parameter desain secara akurat dalam penelitian ini.



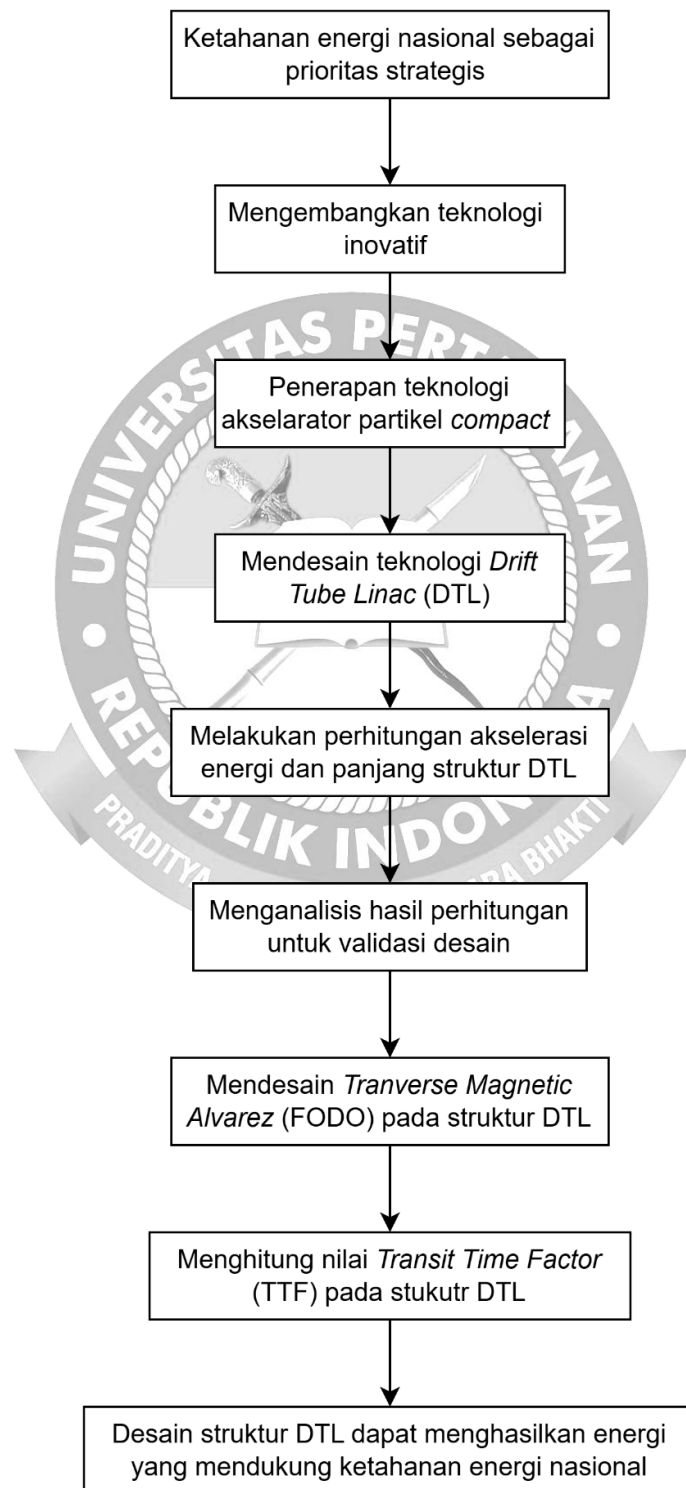
2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis dan Judul	Tujuan	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1	(A.Caliskan & Yilmaz, 2012). <i>DTL Cavity Design and Beam Dynamics for a TAC Linear Proton Accelerator</i>	Penelitian ini bertujuan untuk merancang <i>Drift Tube Linac</i> (DTL) pada akselerator proton dengan arus 30 mA dan frekuensi operasi 350 MHz dalam kerangka proyek <i>Turkish Accelerator Center</i> (TAC).	Penelitian ini menunjukkan bahwa desain DTL yang dikembangkan dapat mencapai akselerasi ion dari 3 MeV hingga 55 MeV dengan stabilitas yang baik dan efisiensi tinggi dengan panjang struktur 20,5 meter.	Persamaan penelitian ini yaitu memiliki fokus utama berupa optimasi pada nilai <i>Transit Time Factor</i> (TTF).	Perbedaan penelitian ini yaitu mendesain DTL dengan dalam 3 tangki untuk mencapai energi 55 MeV serta melakukan simulasi dengan program PATH dan PARMILA.
2	(B. Mustapha <i>et al.</i> 2014). <i>A Compact Linac Design for an Accelerator Driven System</i>	Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang LINAC compact yang efisien untuk <i>Accelerator Driven System</i> (ADS) guna menghasilkan berkas proton berenergi tinggi.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain LINAC <i>compact</i> sepanjang 150 meter berhasil menghasilkan berkas proton 1 GeV pada arus 25 mA dengan efisiensi tinggi, mengurangi kebutuhan ruang.	Persamaan penelitian yaitu dalam mendesain <i>Drift Tube Linac</i> (DTL) pada struktur akselerator linear <i>compact</i> .	Perbedaan penelitian ini adalah panjang struktur yang didesain, energi yang dihasilkan, dan arus yang digunakan dalam kinerja akselerator linear serta melakukan pengoptimalan desain rongga <i>superconducting</i> dan <i>cryomodule</i> .

3	(Huachang Liu et al. 2018). <i>The Design and Construction of CSNS Drift Tube Linac</i>	Tujuan penelitian ini adalah merancang <i>Drift Tube Linac</i> (DTL) untuk <i>China Spallation Neutron Source</i> (CSNS) guna mempercepat berkas H^- dari 3 hingga 80 MeV dengan efisiensi tinggi.	DTL CSNS berhasil dirancang dan dioptimalkan dengan konfigurasi magnet FFDD serta <i>tuning RF</i> menjaga stabilitas medan resonansi pada 324 MHz. DTL ini siap mendukung operasi CSNS sebagai penghasil neutron.	Persamaan penelitian ini adalah merancang <i>Drift Tube Linac</i> (DTL) dengan H^- sebagai sumber ion yang digunakan pada penelitian.	Perbedaan dari penelitian ini adalah konfigurasi magnet yang digunakan, jumlah tangki pada struktur, jenis ion yang dihasilkan, jumlah hasil energi, serta menggunakan metode <i>Tuning RF Bead-Pull</i> untuk memastikan stabilitas operasi.
4	(P. F. MA. 2021) <i>Development of a Compact 325 MHz Proton Interdigital H-Mode Drift Tube Linac with High Shunt Impedance</i>	Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan menguji LINAC (<i>Drift Tube Linac</i>) proton H^- mode interdigital (IH-DTL) yang berfrekuensi tinggi dan <i>compact</i> , khususnya dirancang untuk aplikasi medis.	Penelitian ini berhasil mengembangkan IH-DTL 325 MHz yang efisien dan <i>compact</i> untuk mempercepat proton dari 3 MeV ke 7 MeV dalam ruang linear sepanjang 1 meter dengan stabilitas yang tinggi dan berpotensi digunakan sebagai injektor pada sinkrotron medis.	Persamaan penelitian ini adalah mengembangkan <i>Drift Tube Linac</i> (DTL) yang <i>compact</i> untuk menghasilkan ion proton dengan fokus utama meningkatkan efisiensi akselerasi pada akselerator linear.	Perbedaan penelitian yaitu LINAC didesain dengan menggunakan dinamika berkas KONUS (<i>Kombinierte Null Grad Struktur</i>) yang dimodifikasi sehingga tidak ada elemen fokus magnetik di dalam rongga, yang memperkecil dimensi perangkat.

2.3 Kerangka Berfikir



Gambar 2.7 Kerangka Berpikir

2.4 Hipotesis

- a. Jika struktur *Drift Tube Linac* (DTL) dirancang berdasarkan distribusi nilai Beta (β) relativistik pada setiap tahap akselerasi, maka energi proton yang dihasilkan akan meningkat secara bertahap dan stabil, dengan panjang total struktur kurang dari 20 meter. Desain ini diharapkan sesuai untuk pengembangan akselerator linear proton berukuran *compact* dalam mendukung ketahanan energi nasional.
- b. Desain struktur sel DTL mempertimbangkan sinkronisasi fase antara partikel proton dan medan listrik osilasi, maka nilai *Transit Time Factor* (TTF) yang diperoleh akan berada dalam kisaran optimal ($TTF \leq 1$). Nilai tersebut mencerminkan efisiensi tinggi dalam transfer energi dan mendukung kinerja akselerator yang stabil dan efektif.