



INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research

Volume 5 Nomor 4 Tahun 2025 Page 11980-11991

E-ISSN 2807-4238 and P-ISSN 2807-4246

Website: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>

Analisis Perubahan Medan Magnet Terhadap Energi Yang Dihasilkan Siklotron Menggunakan Program *Python*

M. Ikhwan Asokhul Aziz^{1✉}, Muhammad Za'im², Amril Mukmin³

Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta

Email: asokhulaziz@gmail.com^{1✉}

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh medan magnet terhadap energi yang dihasilkan *siklotron* menggunakan program *Python*. Jenis penelitian yang digunakan pada artikel ilmiah ini adalah metode *in silico* dengan menggunakan bahasa pemrograman *Python* yang ditulis menggunakan *IDE (Integrated Development Environment) Jupyter Notebook*. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah muatan proton, massa proton, tegangan antar *dees*, jari-jari *dees*, jarak antar pelat *dees*, dan kecepatan cahaya. Sementara itu, yang menjadi variabel bebas adalah kuat medan magnet, dan yang menjadi variabel terikat adalah energi kinetik yang dihasilkan. Berdasarkan hasil penelitian, gerak proton pada *siklotron* dengan muatan proton $1,602 \times 10^{-19}$ C, massa proton $1,672 \times 10^{-27}$ kg, tegangan antar *dees* 100.000 V, jari-jari *dees* 0,2 m, jarak antar pelat *dees* 0,0005 m, dan kecepatan cahaya 3×10^8 m/s, diperoleh bahwa untuk kuat medan magnet 1,0 T, 1,2 T, 1,4 T, 1,6 T, 1,8 T, dan 2,0 T menghasilkan energi secara berturut-turut sebesar 1,644 MeV, 2,509 MeV, 3,32 MeV, 4,492 MeV, 5,89 MeV, dan 7,048 MeV. Semakin besar kuat medan magnet, maka jumlah putaran semakin banyak, sehingga lebih sering melewati celah antar *dees* yang menyebabkan kecepatan proton meningkat dan menghasilkan energi yang lebih besar. Berdasarkan penelitian ini disimpulkan bahwa semakin besar kuat medan magnet pada *siklotron*, maka semakin besar pula energi proton yang dihasilkan. Oleh karena itu, kuat medan magnet dari *siklotron* dapat disesuaikan dengan kebutuhan energi yang diinginkan.

Kata Kunci: *Radioterapi Proton, Siklotron, Python*

Abstract

Cancer is a disease caused by uncontrolled abnormal cell growth in the body. Cancer is included in deadly diseases. One of the treatments that are currently being developed to kill cancer cells is proton radiotherapy. Proton radiotherapy has the advantage of being able to reduce damage to healthy tissue around it. Proton radiotherapy requires an accelerator that is used to accelerate the movement of protons, one of the accelerators used for proton radiotherapy is the cyclotron. Research on cyclotrons is currently being carried out, one of which uses the incilico method using the python program. The purpose of this study is to determine the effect of magnetic fields on the energy produced by the cyclotron using the python program. The type of research used in this scientific article uses the incilico method using the python programming language written using the jupyter notebook IDE (Integrated Development Environment). The control variables in this study are proton charge, proton mass, voltage between dees, dees radius, distance between dees plates, and the speed of light. While the independent variable is the magnetic field strength and the dependent variable is the kinetic energy produced. Based on the research results, the motion of protons in a cyclotron with a proton charge of 1.602×10^{-19} C, a proton mass of 1.672×10^{-27} kg, a voltage between dees of 100,000 V, for a dees radius of 0.2 m, a distance between dees plates of 0.0005 m, and a speed of light of 3×10^8 m/s, it was found that for magnetic field strengths of 1.0 T, 1.2 T, 1.4 T, 1.6 T, 1.8 T, and 2.0 T, it produces energy of 1.644 MeV, 2.509 MeV, 3.32 MeV, 4.492 MeV, 5.89 MeV, and 7.048 MeV, respectively. The greater the magnetic field strength, the greater the number of rotations, so that it passes through the gap between dees more often, causing the proton speed to increase and produce greater energy. Based on this study, it is concluded that the greater the magnetic field strength in the cyclotron, the greater the proton energy produced so that the magnetic field strength of the cyclotron can be adjusted to the desired energy needs.

Keywords: *Proton Radiotherapy, Cyclotron, Python*

PENDAHULUAN

Kanker adalah penyakit yang disebabkan oleh pertumbuhan sel abnormal yang tidak terkendali di dalam tubuh. Pertumbuhan sel abnormal ini dapat merusak sel normal di sekitarnya dan di bagian tubuh yang lain. Kanker merupakan penyebab kematian kedua terbanyak di seluruh dunia. Kanker sering menyebabkan kematian, karena penyakit ini umumnya tidak menimbulkan gejala pada awal perkembangannya. Akibatnya, kondisi ini baru terdeteksi dan ditangani setelah mencapai stadium lanjut (kemenkes, 2024). Terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mematikan sel kanker yaitu pembedahan, kemoterapi, imunoterapi, *targeted therapy*, terapi hormon atau terapi endokrin, transplantasi sel induk, dan salah satu yang sering digunakan adalah radioterapi. Berdasarkan *International Agency for Research on Cancer (IARC)*, dari 10,9 juta orang yang didiagnosis menderita kanker di seluruh dunia setiap tahun, sekitar 50% membutuhkan

radioterapi. Radioterapi adalah suatu bentuk pengobatan yang menggunakan sinar energi tinggi untuk menghancurkan sel kanker dan mencegah pertumbuhannya. Radioterapi berfungsi sebagai terapi kuratif untuk penyembuhan, terapi profilaksis (preventif) yang bertujuan untuk mencegah kemungkinan metastasis, dan terapi paliatif untuk menghilangkan gejala-gejala kanker (Mahdania, 2022).

Radioterapi selain menggunakan sinar x ada beberapa radioterapi lainnya seperti EBRT (*External Beam Radiation Therapy*), Brachyterapi, proton terapi. Proton terapi menggunakan partikel bermuatan seperti proton dan menggunakan siklotron sebagai akselerator partikel yang digunakan untuk mempercepat proton sehingga menghasilkan energi tinggi. Siklotron belum banyak digunakan di Indonesia namun saat ini sedang banyak dikembangkan, karena proton terapi memiliki keunggulan dari yang lainnya yaitu lebih efektif membunuh sel-sel di dalam kanker, keunggulan dalam melindungi jaringan-jaringan sehat dibandingkan dengan radioterapi konvensional (Khusnaedi, 2023).

Proton terapi merupakan metode pengobatan kanker yang menggunakan partikel proton, partikel subatom yang memiliki muatan positif, untuk memberikan radiasi ke jaringan tumor. Keunggulan utama dari proton terapi adalah kemampuannya untuk memberikan distribusi dosis yang lebih menguntungkan dibandingkan dengan terapi radiasi konvensional, yaitu dosis rendah di jaringan sehat dan dosis tinggi di dalam jaringan tumor, yang dikenal sebagai efek Bragg peak, sehingga mengurangi paparan terhadap jaringan sehat di sekitarnya. Keunggulan ini memberikan manfaat dosimetri yang signifikan dibandingkan terapi foton konvensional (Hyer, D. E., et al. 2021).

Sumber radiasi radioterapi proton berasal dari percepatan suatu partikel bermuatan positif yang terjadi di dalam ruang vakum atau biasa disebut akselerator (Luc, et al., 2021). Saat ini akselerator yang umum digunakan yaitu Linac, Sinkrotron, dan Siklotron. Dalam linac partikel yang dipercepat melewati setiap celah percepatan hanya sekali sementara dalam siklotron partikel melewati celah percepatan secara berulang sehingga energi yang dihasilkan siklotron lebih besar dibanding linac (Otto, 2021).

Saat ini siklotron belum banyak digunakan dibanding dengan linac, namun sedang banyak dikembangkan karena memiliki keunggulan dalam rasio performa dan biaya dibanding akselerator lainnya (Mayles, et al., 2007). Di Indonesia sendiri belum ada fasilitas kesehatan yang menggunakan radioterapi proton sebagai modalitas penyembuhan kanker, namun saat ini RSPAD Gatot Soebroto Jakarta sudah berencana membangun fasilitas radioterapi proton dengan jenis siklotron (PTCOG, 2024).

Dalam penelitian dan pengembangan terhadap teknologi siklotron sangat penting untuk memahami karakteristik medan magnet. Magnet merupakan salah satu komponen

utama siklotron yang berfungsi untuk menghasilkan lintasan partikel melingkar dan memfokuskan berkas partikel. Pada siklotron, frekuensi RF selalu konstan sehingga penambahan energi partikel harus diimbangi dengan penambahan medan magnet ke arah radial. Dampak dari membesarnya medan magnet secara radial adalah terjadi penyebaran (defocusing) partikel ke arah aksial sehingga memungkinkan partikel bertumbukan dengan kutub magnet. Oleh karena itu, kutub magnet dibuat sektor-sektor secara azimut sehingga dapat menghasilkan pemfokusan aksial (Kudus dkk, 2017).

Siklotron belum banyak digunakan di Indonesia namun saat ini sedang banyak dikembangkan, penelitian teknik siklotron juga dapat dilakukan dengan menggunakan metode komputerasi numerik menggunakan bahasa pemrograman python. Python merupakan bahasa pemrograman yang mudah dipahami dan dapat menyelesaikan masalah kompleks selain itu python juga bersifat open source, salah satu komponen dalam siklotron yang paling penting adalah medan magnet. Sehingga peneliti bermaksud akan melakukan penelitian dengan tujuan menganalisis perubahan medan magnet Terhadap Energi yang Dihasilkan Siklotron Sebagai Akselerator Proton Menggunakan Program Python.

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian yang digunakan dalam penyusunan karya tulis ilmiah ini adalah menggunakan metode incilico atau eksperimen yang dilakukan di komputer atau melalui perangkat lunak [simulasi komputer](#) dengan menggunakan bahasa pemrograman python yang ditulis menggunakan IDE (*Integrated Development Environment*) jupyter notebook. Penelitian ini dilakukan di Yogyakarta pada bulan September 2024 sampai Maret 2025. Dalam penelitian ini terdapat tiga variabel yang digunakan, yaitu:

1. Variabel bebas: kuat medan magnet (B).
2. Variabel kontrol:
 - Nilai muatan partikel proton $q = 1,602 \times 10^{-19}$ C.
 - Massa partikel proton $m_p = 1,672 \times 10^{-24}$ kg.
 - Tegangan antar dees $V = 100,000$ V.
 - Jari jari dees $r = 0,2$ m.
 - Jarak antar plat dees $d = 0,0005$ m.
 - Kecepatan cahaya $c = 3 \times 10^8$ m/s.
3. Variabel terikat:
 - Energi kinetik yang dihasilkan (E_k).
 - Kecepatan benda (v).

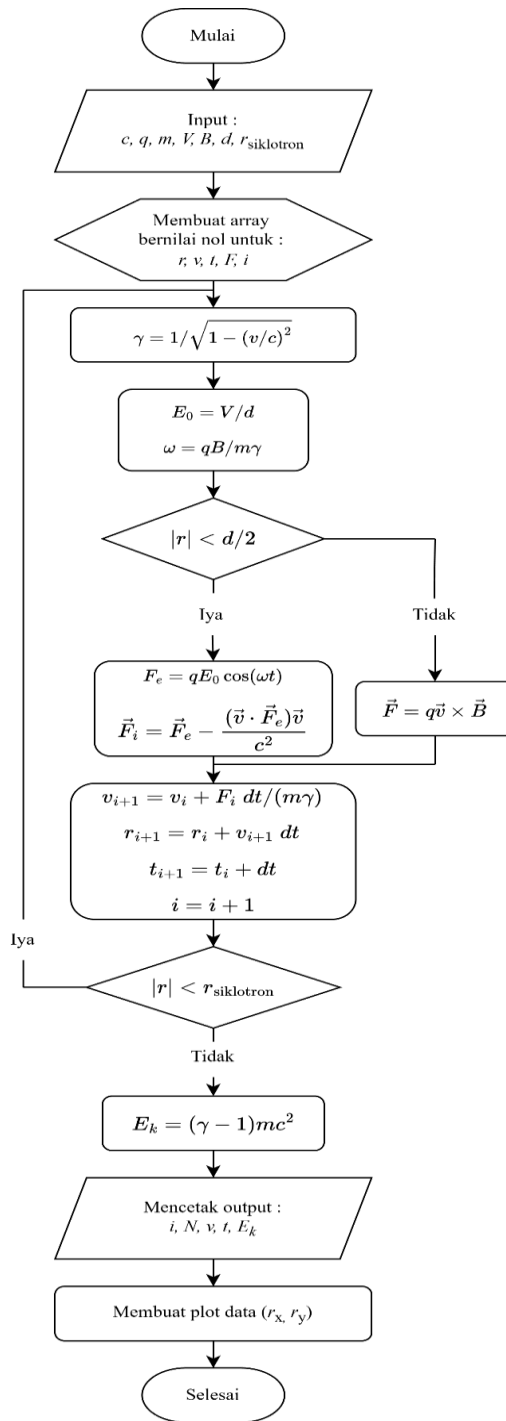
- Posisi partikel (r).

Alat yang digunakan untuk mengumpulkan data dalam penelitian ini berupa laptop merk Asus a407m dengan processor Intel Celeron N4000 CPU RAM 4096MB dan perangkat lunak python. Data dalam penelitian ini diperoleh dengan melakukan analisis simulasi numerik.

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik untuk memodelkan gerak partikel bermuatan dalam siklotron dengan mempertimbangkan efek relativistik. Langkah-langkah simulasi dimulai dengan input variabel fisika, yaitu kecepatan cahaya (c), muatan proton dan massa proton (q dan m), tegangan (V), medan magnet (B), jarak elektroda (d), dan jari-jari maksimum siklotron ($r_{siklotron}$).

Program menghitung faktor relativistik gamma (γ), medan listrik $E_0 = V/d$, dan frekuensi sudut $\omega = qB / (m\gamma)$. Berdasarkan posisi partikel, gaya yang bekerja dapat berupa gaya listrik (jika di antara elektroda) atau gaya Lorentz (jika di luar elektroda), lalu digunakan untuk memperbarui kecepatan dan posisi partikel secara iteratif.

Simulasi berakhir ketika partikel keluar dari batas siklotron, dilanjutkan dengan perhitungan energi kinetik relativistik $E_k = (\gamma - 1) mc^2$. Hasil yang diperoleh meliputi jumlah iterasi, kecepatan akhir, waktu tempuh, dan energi kinetik. Lintasan partikel juga divisualisasikan dalam grafik.



Gambar 5. Alur Penelitian

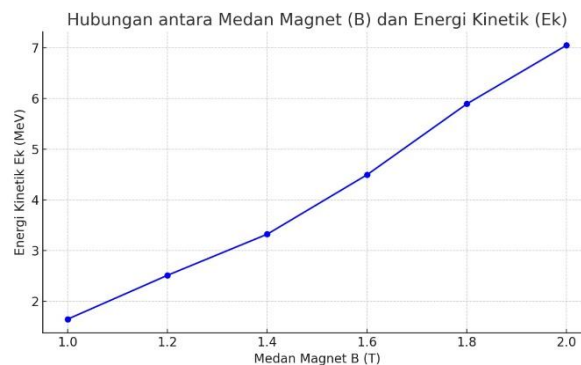
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan antara kuat medan magnet dengan energi kinetik yang dihasilkan pada siklotron dengan muatan proton 1.602×10^{-19} C, massa proton 1.672×10^{-27} kg, tegangan antar *dees* 100,000 V, jari-jari antar *dees* 0,2 m, jarak antar plat *dees* 0,0005 m, dan kecepatan cahaya 3×10^8 m/s dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengaruh B terhadap E_k pada $r = 0,2$ m, $V = 100.000$ V, $d = 0,0005$ m.

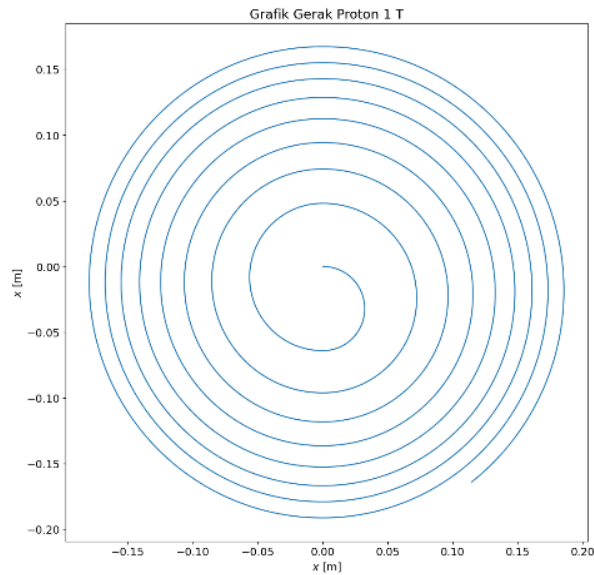
B (T)	v (m/s)	E_k (MeV)
1	$1,773603 \times 10^7$	1,644
1,2	$2,189676 \times 10^7$	2,509
1,4	$2,517212 \times 10^7$	3,32
1,6	$2,925411 \times 10^7$	4,492
1,8	$3,345923 \times 10^7$	5,89
2	$3,656819 \times 10^7$	7,048

Berdasarkan Tabel 1 diperoleh hubungan antara kuat medan magnet dengan energi kinetik yang dihasilkan pada siklotron dapat ditampilkan pada Gambar 6 di bawah ini.

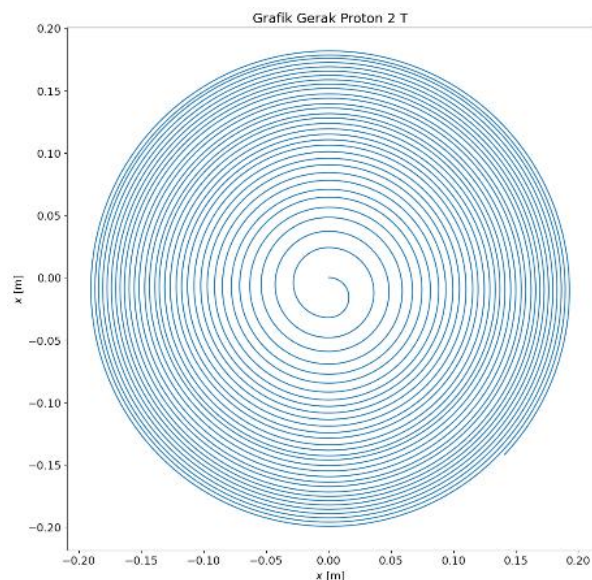


Gambar 1. Grafik Hubungan Kuat Medan Magnet (B) Dengan Tingkat Energi Kinetik (E_k) Yang Dihasilkan Siklotron

Energi yang dihasilkan siklotron dengan kuat medan magnet 1,0 T, 1,2 T, 1,4 T, 1,6 T, 1,8 T, 2,0 T secara berturut-turut adalah 1,644 MeV, 2,509 MeV, 3,32 MeV, 4,492 MeV, 5,89 MeV, 7,048 MeV. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kuat medan magnetnya maka akan semakin besar juga energi kinetik yang dihasilkan siklotron. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya gaya Lorentz yang bekerja pada proton, sehingga memperkecil radius lintasan geraknya dan memperbanyak jumlah putaran di dalam medan siklotron. Dengan meningkatnya jumlah putaran, proton lebih sering melewati celah antara elektroda "dees", sehingga kecepatan proton akan meningkat yang mengakibatkan energi kinetik (E_k) proton meningkat. Oleh karena itu, semakin kuat medan magnet dapat membelokkan lintasan proton dengan lebih efektif karena gaya magnet yang bekerja pada proton meningkat seiring dengan peningkatan kekuatan medan magnet tersebut. Gaya ini menyebabkan perubahan arah gerak pada proton (Endro, 2007).



Gambar 2. Hasil simulasi gerak proton pada $B = 1,0$ T



Gambar 3. Hasil simulasi gerak proton pada $B = 2,0$ T

Berdasarkan dua gambar simulasi di atas, Gambar 2 menunjukkan gerak proton dalam medan magnet sebesar $B = 1,0$ T, sedangkan Gambar 3 menunjukkan gerak proton dalam medan magnet yang lebih besar, yaitu $B = 2,0$ T. Dari perbandingan kedua gambar tersebut, dapat diamati bahwa semakin besar kuat medan magnet yang diberikan, maka jari-jari lintasan gerak proton menjadi semakin kecil. Hal ini terlihat jelas pada Gambar 3, di mana lintasan spiral proton tampak lebih rapat dibandingkan dengan Gambar 2. Selain itu, semakin besar kuat medan magnet, jumlah gerakan spiral proton juga meningkat. Terlihat bahwa pada Gambar 8, proton melakukan lebih banyak putaran yang menyebabkan Ek semakin besar dibandingkan dengan Gambar 2 pada dasarnya hal ini sesuai dengan prinsip kerja siklotron, prinsip kerja proton yang dipengaruhi oleh medan magnet berkaitan dengan sifat muatan listrik dan momen magnetik yang dimiliki oleh proton. Proton, sebagai partikel

bermuatan positif, akan merasakan gaya yang disebabkan oleh interaksi antara muatannya dan medan magnet. Ketika proton bergerak dalam medan magnet, gaya Lorentz akan mengubah arah gerakannya. Proton akan bergerak dalam lintasan melingkar atau spiral. Hal ini dapat dijelaskan melalui konsep gaya Lorentz yang dialami partikel bermuatan dalam medan magnet, yang menyebabkan partikel bergerak melingkar. Gerak melingkar pada partikel menghasilkan gaya sentripetal yaitu gaya yang arahnya melaju ke titik pusat lintasan melingkar, sehingga hubungan gaya Lorentz dan gaya sentripetal adalah:

$$F = qvB = m \frac{v^2}{r} \dots\dots\dots(13)$$

Berdasarkan persamaan (1) maka jari-jari lintasan partikel dirumuskan sebagai berikut:

$$r = \frac{mv}{qB} \dots\dots\dots(14)$$

dengan m sebagai massa proton, v kecepatan proton, q muatan proton, dan B kuat medan magnet. Berdasarkan rumus ini, dapat disimpulkan bahwa jari-jari lintasan berbanding terbalik dengan kuat medan magnet, sehingga semakin besar nilai B , maka semakin kecil jari-jari lintasan yang dihasilkan, seperti yang ditunjukkan oleh hasil simulasi tersebut.

Hal ini menunjukkan bagaimana medan magnet berperan penting dalam mengatur lintasan dan kecepatan sudut partikel bermuatan. Saat medan magnet diperbesar, meskipun arah kecepatan partikel berubah secara terus-menerus akibat pengaruh gaya Lorentz, besar kecepatan linear tetap konstan selama tidak ada gaya lain yang bekerja. Menurut Cary (2017), metode numerik yang mereka kembangkan mampu menjaga struktur lintasan dan keakuratan gerak partikel dalam medan elektromagnetik. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dalam medan magnet murni, kecepatan linear partikel tetap konstan meskipun arah geraknya berubah akibat gaya Lorentz, dan metode ini dapat mempertahankan volume serta kecepatan vektor secara tepat. Selain itu, metode ini efektif dalam mengeliminasi perilaku tidak fisik yang sering muncul pada metode lain, terutama saat diuji pada resonansi orbit, serta mampu mempertahankan energi secara konservatif dalam kondisi tertentu.

Sejalan dengan hal tersebut, Higuera dan Cary (2017) juga menekankan bahwa pentingnya ketepatan numerik dalam simulasi medan elektromagnetik sangat krusial untuk memprediksi gerakan partikel bermuatan secara realistis, khususnya dalam aplikasi akselerator partikel seperti *siklotron*.

Dalam konteks ini, hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat medan magnet pada *siklotron* berpengaruh secara langsung terhadap energi kinetik yang dihasilkan. Semakin besar kuat medan magnet, maka semakin besar pula energi yang dihasilkan oleh *siklotron*, karena partikel akan mengalami lebih banyak lintasan dalam celah percepatan dan memperoleh lebih banyak energi. Pada penelitian ini, energi yang dihasilkan mencapai

hingga 7,048 MeV. Oleh karena itu, kuat medan magnet pada *siklotron* dapat disesuaikan dengan kebutuhan energi yang diinginkan sesuai dengan aplikasi medis maupun industri (Otto, 2021).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, gerak proton pada *siklotron* dengan muatan proton $1,602 \times 10^{-19}$ C, massa proton $1,672 \times 10^{-27}$ kg, tegangan antar *dees* 100.000 V, untuk jari-jari *dees* 0,2 m, jarak antar plat *dees* 0,0005 m, dan kecepatan cahaya 3×10^8 m/s diperoleh bahwa untuk kuat medan magnet 1,0 T, 1,2 T, 1,4 T, 1,6 T, 1,8 T, dan 2,0 T menghasilkan energi secara berturut-turut sebesar 1,644 MeV, 2,509 MeV, 3,32 MeV, 4,492 MeV, 5,89 MeV, dan 7,048 MeV. Sehingga semakin besar kuat medan magnet maka energi kinetik juga semakin meningkat. Hal ini terjadi karena dengan kuat medan magnet yang semakin besar maka jari-jari putaran mengecil, menyebabkan jumlah putaran semakin banyak, sehingga lebih sering melewati celah antar *dees*, yang menyebabkan kecepatan meningkat dan menghasilkan energi kinetik yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriyansyah, R., & Hadi, M. S. (2022). Penentuan volume kerucut elips menggunakan Monte Carlo dengan bantuan Python. *Jurnal Pembelajaran dan Matematika Sigma (JPMS)*, 8(1). <https://doi.org/10.36987/jpms.v9i1.4069>
- Abdullah, M., & Fisika Dasar, I. I. (2017). *Institut Teknologi Bandung*.
- Azizah, M. N., Sudarti, S., & Bektiarso, S. (2022). Pengaruh paparan medan magnet extremely low frequency (ELF) 200 μ T dan 300 μ T terhadap pH dalam proses fermentasi tempe. *ORBITA: Jurnal Pendidikan dan Ilmu Fisika*, 8(1), 28–34.
- Dewi, S. W. (2010). *Simulasi lintasan partikel bermuatan (proton) di dalam cyclotron* (Skripsi). Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga: Yogyakarta. <http://digilib.uinsuka.ac.id/id/eprint/5157>
- Endro Suseno, J., & Kusbramanto, T. (2007). Simulasi gerak partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik dan induksi magnet menggunakan MATLAB versi 7.1. *Berkala Fisika*, 10(1), 99–103.
- Fitrian, A., Noor, I., & Jahrudin, A. (2023). Rancang bangun alat peraga gaya Lorentz. *Navigation Physics: Journal of Physics Education*, 5(1), 17–21. <https://doi.org/10.30998/npjpe.v5i1.1810>

- Fitriatuzzakiyyah, N., Sinuraya, R. K., & Puspitasari, I. M. (2017). Terapi kanker dengan radiasi: Konsep dasar radioterapi dan perkembangannya di Indonesia. *Jurnal Farmasi Klinik Indonesia*, 6(4), 311–320. <https://doi.org/10.15416/ijcp.2017.6.4.311>
- Goel, M., Mackeyev, Y., & Krishnan, S. (2023). Radiolabeled nanomaterial for cancer diagnostics and therapeutics: Principles and concepts. *Cancer Nanotechnology*, 14(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s12645-023-00165-y>
- Higuera, A. V., & Cary, J. R. (2017). Integrasi orde kedua yang mempertahankan struktur lintasan partikel bermuatan relativistik dalam medan elektromagnetik. *Fisika Plasma*, 24(5).
- Irawan, D., Ulum, S. R., & Viratama, I. P. (2024). Struktur atom. *Sindoro: Cendikia Pendidikan*, 3(1), 100–110. <https://doi.org/10.9644/scp.v1i1.332>
- Marliza, H., Ananta, I. G. B. T., Rusmalina, S., Malo, K. H., Meray, N. W., Khasanah, K., ... & Pratiwi, D. (2023). *Kimia dasar: Teori komprehensif*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia. <http://repository.unikal.ac.id/id/eprint/1120>
- Otto, T. (2021). Risks and hazards of particle accelerator technologies. In *Safety for Particle Accelerators. Particle Acceleration and Detection*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57031-6_2
- Permana, F. S., Effendy, N., & Wardana, A. N. (2021). Perancangan dan identifikasi kendali PID pada aliran hidrogen sumber ion siklotron Decy 13. *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir*, 24(2), 59–66.
- PTCOG. (2024). Particle therapy facilities in a planning stage. <https://www.ptcog.site/index.php/facilities-in-planning-stage> (Diakses 18 September 2024, pukul 09.30).
- Rahman, S., Sembiring, A., Siregar, D., Prahmana, I. G., Puspadini, R., & Zen, M. (2023). *Python: Dasar dan pemrograman berorientasi objek*. Penerbit Tahta Media.
- Romzi, M., & Kurniawan, B. (2020). Pembelajaran pemrograman Python dengan pendekatan logika algoritma. *JTIM: Jurnal Teknik Informatika Mahakarya*, 3(2), 37–44.
- Silakhuddin, S., & Mulyani, E. (2013). Perhitungan efek tingkat kevakuman pada beam loss di dalam tangki siklotron. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar dan Teknologi Nuklir*, ISSN 0216-3128.
- Slamet Santosa, & Taufik. (2015). Conceptual design of 30 MeV magnet system used for BNCT epithermal neutron source. In Pramudita Anggraita, Kusminarto, & Wahini Nurhayati (Eds.), *Proceeding on the Scientific Meeting and Presentation on Accelerator Technology and Its Applications* (hlm. 123). Indonesia: Center for Accelerator Science and Technology, National Nuclear Energy Agency.

- Solari, H. G., & Natiello, M. A. (2024). The construction of quantum mechanics from electromagnetism. Part II: The hydrogen atom. *arXiv:2412.06790*.
- Surbakti, N. M., Angelyca, A., Talia, A., Perangin-Angin, C. B., Nainggolan, D. O., Friskauly, N. D., & Tumorang, S. R. B. (2024). Penggunaan bahasa pemrograman Python dalam pembelajaran kalkulus fungsi dua variabel. *Algoritma: Jurnal Matematika, Ilmu Pengetahuan Alam, Kebumihan dan Angkasa*, 2(3), 98–107. <https://doi.org/10.62383/algoritma.v2i3.67>
- Tarigan, J., Situmeang, U., & Monice, M. (2022). Studi kuat medan listrik tower 213–214 Section Duri–Bagan Batu. *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 6(2), 56–65.
- The International Agency for Research on Cancer. (2024). Global cancer observatory. <https://gco.iarc.who.int/media/globocan/factsheets/populations/360-indonesia-fact-sheet.pdf> (Diakses 18 September 2024, pukul 23.40).