

Tinjauan Pustaka Skematik: Tren Penelitian Akselerator Nuklir 2018-2025

Ester Maesya Tamba¹ Vania Ayu Irfani² Ladyna Velisa Ginting³ Christina Triwahyuni Simatupang⁴ Karina Angely Sinaga⁵ Maria Putriguna Sinaga⁶ Jubaidah⁷ Rugaya⁸

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan,
Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia^{1,2,3,4,5,6,7,8}

Email: estermesyatamba@mhs.unimed.ac.id¹ vaniaayuirfani@mhs.unimed.ac.id²
ladynavelisa@mhs.unimed.ac.id³ christina.triwahyuni.simatupang@mhs.unimed.ac.id⁴
karinaangelysinaga@mhs.unimed.ac.id⁵ mariaputrigunasinaga@mhs.unimed.ac.id⁶

Abstract

This study explores nuclear accelerator applications in cancer therapy and research (2019–2025) using a Schematic Literature Review (SLR). Screening 200 journals, 20 key articles were identified, highlighting advancements in accelerator technology. Findings emphasize isotope transmutation for nuclear waste management and Accelerator Mass Spectrometry (AMS) for precise isotope measurement. The study also examines Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) in treating glioblastoma, showing its potential to reduce tumors while minimizing harm to healthy tissue. Additionally, advancements in compact neutron sources and data acquisition systems for linear accelerators (LINAC) present new clinical opportunities. This research underscores the vital role of nuclear accelerators in enhancing scientific knowledge and medical treatments.

Keywords: Nuclear Accelerator, Technology Innovation, SLR

Abstrak

Studi ini mengeksplorasi aplikasi akselerator nuklir dalam terapi dan penelitian kanker (2019–2025) menggunakan Schematic Literature Review (SLR). Dengan menyaring 200 jurnal, 20 artikel utama diidentifikasi, yang menyoroti kemajuan dalam teknologi akselerator. Temuan menekankan transmutasi isotop untuk pengelolaan limbah nuklir dan Spektrometri Massa Akselerator (AMS) untuk pengukuran isotop yang tepat. Studi ini juga meneliti Terapi Penangkapan Neutron Boron (BNCT) dalam mengobati glioblastoma, yang menunjukkan potensinya untuk mengurangi tumor sekaligus meminimalkan kerusakan pada jaringan sehat. Selain itu, kemajuan dalam sumber neutron kompak dan sistem akuisisi data untuk akselerator linier (LINAC) menghadirkan peluang klinis baru. Penelitian ini menggarisbawahi peran penting akselerator nuklir dalam meningkatkan pengetahuan ilmiah dan perawatan medis.

Kata Kunci: Akselerator Nuklir, Inovasi Teknologi, SLR



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Akselerator partikel memegang peranan fundamental dalam lanskap ilmu pengetahuan modern, khususnya dalam memajukan pemahaman kita tentang fisika partikel. Teknologi ini memungkinkan percepatan partikel bermuatan hingga kecepatan tinggi, menjadikannya instrumen utama dalam meneliti struktur fundamental materi dan interaksi antar gaya (Pandey et al., 2025). Salah satu contoh terkemuka adalah Large Hadron Collider (LHC) di Jenewa, yang telah memberikan wawasan mendalam tentang partikel subatomik dan gaya fundamental yang bekerja di alam semesta (Pandey et al., 2025). Secara prinsip, akselerator partikel memanfaatkan medan listrik untuk meningkatkan energi kinetik partikel dan medan magnet untuk mengarahkan serta memfokuskan berkas partikel, membuka jalan bagi eksplorasi fenomena fundamental. Perkembangan teknologi akselerator partikel telah melalui lintasan evolusioner yang signifikan, menghasilkan berbagai metode percepatan seperti

akselerasi linier, melingkar, dan sinkrotron, yang memungkinkan studi mendalam tentang sifat dasar alam semesta (Pandey et al., 2025). Selain kontribusinya dalam fisika partikel, akselerator juga memiliki spektrum aplikasi yang luas, terutama dalam bidang medis dan industri (Pandey et al., 2025). Dalam konteks medis, akselerator nuklir krusial untuk terapi radiasi kanker dan produksi radioisotop diagnostik (Smith et al., 2021). Di sektor industri, teknologi ini dimanfaatkan untuk sterilisasi material dan modifikasi sifat material melalui iradiasi (Jones & Lee, 2020). Perkembangan dan aplikasi akselerator nuklir yang beragam ini menunjukkan relevansinya yang berkelanjutan dalam berbagai disiplin ilmu. Meskipun literatur yang membahas aplikasi akselerator nuklir dalam berbagai bidang cukup luas, sintesis sistematis yang secara khusus memetakan tren penelitian dan inovasi signifikan dalam periode waktu tertentu, terutama yang mencakup kemajuan terkini seperti Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) dan Nanophotonic Electron Accelerator (NEA), masih memerlukan perhatian lebih. Penelitian mengenai BNCT yang memanfaatkan akselerator neutron untuk menargetkan sel kanker secara selektif (Mu'amanah et al., 2024) dan pengembangan akselerator berbasis nanofotonik untuk terapi kanker yang lebih efisien (Xu et al., 2020) menunjukkan potensi perkembangan signifikan dalam aplikasi medis akselerator. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut untuk memahami tren dan inovasi terkini dalam pemanfaatan akselerator nuklir. Untuk memahami lebih dalam perkembangan akselerator nuklir dalam beberapa tahun terakhir, beberapa pertanyaan penelitian spesifik dapat diajukan:

1. Bagaimana tren penelitian akselerator nuklir, khususnya dalam aplikasi medis seperti BNCT dan radioterapi, berkembang antara tahun 2018 dan 2025 berdasarkan literatur yang ada (Greaves et al., 2019; Winarno dkk, 2021; Mu'amanah et al., 2024; Xu et al., 2020)?
2. Inovasi teknologi akselerator nuklir signifikan apa saja yang muncul dalam periode 2018-2025, termasuk pengembangan sistem seperti MIAMI-2 untuk eksperimen iradiasi in-situ (Greaves et al., 2019) dan akselerator elektron nanofotonik (Pandey et al., 2025)?
3. Bagaimana penelitian dan pengembangan sistem pendukung akselerator, seperti sistem akuisisi data dan vakum untuk LINAC (Pamungkas dkk, 2024), berkontribusi pada peningkatan kinerja dan aplikasi akselerator nuklir?
4. Apa implikasi praktis dari penelitian dan pengembangan akselerator nuklir yang teridentifikasi dalam literatur periode 2018-2025, termasuk potensi dampaknya dalam bidang medis, industri, dan pendidikan (Mariyani & Ermawati, 2024)?

Tinjauan terhadap literatur penelitian akselerator nuklir periode 2018-2025 ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai kemajuan teknologi dan aplikasi akselerator, terutama dalam konteks medis dan pengembangan sistem pendukung. Identifikasi tren penelitian dan inovasi terkini akan berkontribusi pada pemetaan arah penelitian selanjutnya bagi akademisi dan memberikan wawasan bagi pengembang teknologi akselerator. Selain itu, pemahaman yang lebih baik mengenai efektivitas aplikasi seperti BNCT dan potensi teknologi seperti akselerator nanofotonik dapat menginformasikan strategi pengembangan dan implementasi teknologi akselerator nuklir untuk manfaat yang lebih luas dalam masyarakat.

Kajian Teori

Akselerator partikel pertama kali dikembangkan oleh dua orang fisikawan Inggris, J.D. Cockcroft dan E.T.S. Walton, di Laboratorium Cavendish, Universitas Cambridge pada tahun 1929. Akselerator itu sendiri adalah alat yang dipakai untuk mempercepat gerak partikel bermuatan seperti elektron, proton, inti-inti ringan, dan inti atom lainnya (Facure et al., 2005; Harto, 2024; Iswadi, 2012). Pemercepatan gerak partikel bertujuan agar partikel tersebut bergerak sangat cepat sehingga memiliki energi kinetik yang sangat tinggi. Dilihat dari jenis

gerakan partikel, ada dua jenis akselerator, yaitu akselerator dengan gerak partikelnya lurus (lebih dikenal dengan sebutan akselerator linier) dan gerak partikelnya melingkar (akselerator magnetik) (Grennee & William, 2001). Terdapat berbagai jenis akselerator partikel. Jenis paling sederhana, yaitu akselerator partikel DC (direct current/ arus searah) yang hanya menggunakan sepasang elektroda. Kedua elektroda tersebut diberi beda potensial listrik. Partikel bermuatan dipercepat di antara kedua elektroda tersebut. Tabung sinar katoda yang digunakan pada pesawat televisi dan layar monitor tempo dahulu dan pemercepat elektron pada pesawat sinar-X konvensional merupakan contoh dari akselerator partikel DC sederhana yang hanya menggunakan sepasang elektroda. Akselerator DC selanjutnya dikembangkan menjadi akselerator DC multielektroda. Akselerator DC semacam ini terdiri atas banyak elektroda. Antara masing-masing elektroda diberi tegangan listrik (beda potensial listrik) yang meningkat (menjadi lebih positif) atau menurun (menjadi lebih negatif) secara gradual.

Akselerator selanjutnya dikembangkan menggunakan tegangan listrik tidak searah. Jenis-jenis akselerator yang menggunakan tegangan listrik tidak searah, yaitu: siklotron, betatron, LINAC (linear accelerator), dan sinkrotron (Diah et al., 2022). Tingkat energi kinetik yang dihasilkan dari percepatan oleh akselerator sangat bervariasi. Akselerator DC dengan sepasang elektroda mampu mempercepat partikel (pada umumnya elektron) hingga mencapai energi kinetik maksimal ratusan keV. Peningkatan energi kinetik partikel membutuhkan beda potensial antarelektroda yang lebih tinggi. Hal ini terkendala dengan timbulnya breakdown electric current (arus listrik breakdown) jika tegangan listrik antarelektroda terlalu tinggi. Akselerator DC multielektroda, dengan menggunakan deretan elektroda mampu mempercepat partikel hingga mencapai energi kinetik puluhan MeV. Akselerator dengan tegangan listrik non-DC mampu mempercepat partikel hingga mencapai energi beberapa puluh MeV hingga beberapa TeV. Siklotron dan betatron mampu menghasilkan partikel bermuatan hingga mencapai energi puluhan atau ratusan MeV. LINAC pada umumnya mampu mencapai energi kinetik puluhan MeV. LINAC terkuat yang pernah dibangun (milik Universitas Stanford, USA) mampu mempercepat proton hingga mencapai energi kinetik 50 GeV.

Sinkrotron merupakan akselerator terkuat. Sinkrotron mampu mempercepat partikel bermuatan hingga mencapai energi kinetik sebesar puluhan GeV hingga beberapa TeV. Sinkrotron terkuat (yang sekaligus merupakan akselerator terkuat) yang dibangun manusia adalah akselerator Large Hadron Collider (LHC) yang dimiliki oleh European Organization for Nuclear Research (CERN). Akselerator LHC CERN ini mampu mempercepat proton hingga mencapai energi kinetik sebesar 6,5 TeV¹²¹ (Brüning & Rossi, 2015; Todesco et al., 2021). Saat ini, terdapat sekitar 17.500 akselerator partikel dari berbagai jenis di dunia. Akselerator tersebut dipergunakan untuk berbagai jenis penggunaan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Berbagai Jenis Akselerator Di Seluruh Dunia Berdasarkan Penggunaannya

Jenis Akselerator	Jumlah
Akselerator energi tinggi ($E > 1 \text{ GeV}$)	~ 120
Sumber radiasi sinkrotron	> 120
Produksi radioisotop medis	~ 200
Akselerator radioterapi	> 7.500
Akselerator riset termasuk riset biomedis	~ 1.000
Akselerator untuk proses industri dan penelitian	~ 1.500
Implantasi ion, modifikasi permukaan	> 7.000
Total	> 17.420

Selain berkas radiasi primer, yaitu berkas partikel yang dipercepat, akselerator dapat memproduksi berkas radiasi sekunder, yang tersusun atas partikel yang berbeda dengan partikel berkas radiasi primer. Kebanyakan berkas radiasi sekunder diproduksi dengan cara

menginteraksikan berkas radiasi primer dengan target. Berkas radiasi sekunder terdiri atas berbagai jenis partikel, baik partikel bermuatan (elektron, proton, deuteron, alfa), partikel tidak bermuatan (neutron, foton, neutrino), partikel subinti atom (muon, pion), maupun antipartikel. Pembelokan berkas partikel bermuatan yang dipercepat (berkas radiasi primer) oleh medan magnet menimbulkan foton yang disebut sebagai radiasi siklotron atau radiasi sinkrotron, yang juga termasuk sebagai radiasi sekunder. Akselerator dapat dimanfaatkan, baik dalam hal berkas radiasi primer maupun berkas radiasi sekunder yang dihasilkannya.

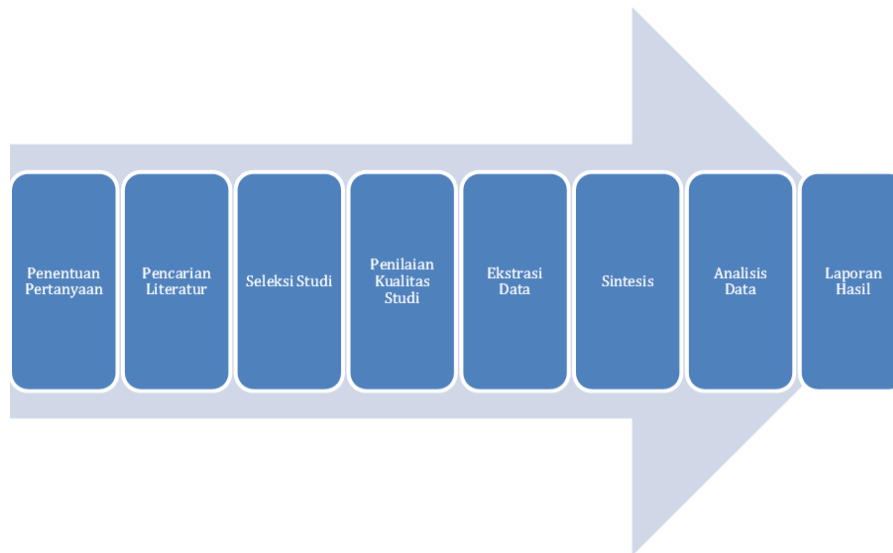
Akselerator energi tinggi (dalam order GeV hingga TeV) pada umumnya digunakan pada eksperimen fisika partikel energi tinggi, terutama berkaitan dengan studi mengenai perilaku partikel-partikel subinti atom. Dalam hal ini berkas radiasi primer dibagi menjadi dua berkas dan kemudian saling ditabrakkan. Energi tumbukan yang terjadi dapat mencapai dua kali energi kinetik dari partikel berkas. Tumbukan energi tinggi akan menghasilkan berbagai jenis partikel subinti atom yang selanjutnya dipelajari perilakunya. Dalam penggunaan lainnya, berkas primer berenergi tinggi ditembakkan pada target sehingga menghasilkan berbagai reaksi nuklir dengan inti atom target seperti reaksi transmudasi inti, reaksi spalasi, reaksi fisi, reaksi fusi, hingga reaksi fusi inti atom berat. Reaksi spalasi menghasilkan berbagai partikel termasuk neutron, proton, dan partikel-partikel subinti atom (Labaune et al, 2013; Muchammad dkk, 2007; Urfa dkk, 2021).

Pada aplikasi produksi isotop atau radioisotop, berkas primer (misalnya proton) ditembakkan pada target. Isotop baru akan terbentuk sebagai hasil reaksi transmudasi inti antara inti atom target dan partikel berkas primer. Reaksi transmudasi yang terjadi sering kali menghasilkan partikel lainnya, misalnya neutron dan foton. Dalam hal dihasilkannya neutron maka sistem akselerator dan targetnya dapat difungsikan sebagai sumber neutron. Foton yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Neutron yang dihasilkan sistem akselerator dapat dipergunakan untuk berbagai keperluan, seperti produksi isotop atau radioisotop dengan reaksi transmudasi inti terinduksi neutron, memicu reaksi fisi pada perangkat subkritik untuk berbagai keperluan, termasuk produksi radioisotop, neutron radiografi, dan NDT (Non-Destructive Test). Di antara bentuk aplikasi akselerator, yaitu mesin berkas elektron (electron beam machine/EBM). Pada EBM, digunakan berkas primer berupa elektron, artinya akselerator pemercepat elektron. Elektron dipercepat hingga mencapai energi kinetik beberapa puluh MeV. Mesin berkas elektron banyak digunakan di bidang medis dan industri. Pada aplikasi di bidang industri, berkas elektron energi tinggi ini dapat digunakan secara langsung, misalnya untuk memicu reaksi polimerisasi. Selain itu, berkas elektron dapat digunakan secara tidak langsung. Pada penggunaan tidak langsung, berkas elektron primer pada umumnya tidak digunakan secara langsung, tetapi ditumbukkan pada target yang tersusun atas logam berat (misalnya tungsten). Berkas elektron energi tinggi berinteraksi dengan medan listrik inti atom berat dan menghasilkan radiasi sekunder berupa sinar-X berenergi tinggi (hingga mencapai puluhan MeV). Berkas sinar-X energi tinggi dapat digunakan untuk berbagai keperluan (Indrayani & Wahyudi, 2020).

Pada bidang medis, berkas sinar-X energi tinggi digunakan untuk keperluan radioterapi bagi penyembuhan penyakit kanker. Pada bidang industri, berkas sinar-X energi tinggi digunakan untuk keperluan sterilisasi bahan dan berbagai produk, seperti produk pertanian, perikanan, peternakan, obat-obatan, kosmetik, makanan kemasan, dan sebagainya. Selain itu, berkas sinar-X berenergi tinggi juga digunakan untuk keperluan radiografi dan NDT. Radiasi siklotron dan radiasi sinkrotron, yaitu foton yang terbentuk akibat pembelokan berkas partikel bermuatan oleh medan magnet dipergunakan untuk berbagai keperluan, seperti riset di bidang biologi molekuler, nanomaterial, pengungkapan struktur material, dan juga radiografi. Aplikasi akselerator lainnya, yaitu untuk pemisahan isotop.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode yaitu Schematic Literatur Review (SLR) ialah teknik sistematis untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan beberapa hasil penelitian akselerator nuklir tahun 2018-2025. Penelitian ini terdiri 8 tahap (lihat gambar 1.1) yang diuraikan sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Skematis Penelitian

Penentuan Pertanyaan

Pertanyaan penelitian dirumuskan berdasarkan permasalahan yang diidentifikasi dalam penelitian terdahulu dan kesenjangan literatur yang ada. Pertanyaan penelitian dirancang untuk menggali tren penelitian, metodologi yang sering digunakan, serta temuan utama dalam topik yang diteliti. Beberapa aspek yang dipertimbangkan dalam penyusunan pertanyaan penelitian meliputi: Variabel utama yang dikaji, Metode penelitian yang umum digunakan dalam studi terdahulu dan Kesenjangan yang ditemukan dalam penelitian sebelumnya. Adapun pertanyaan penelitian ini adalah sebagai berikut: Pertanyaan pertama: Bagaimana tren penelitian mengenai akselerator nuklir, dengan fokus khusus pada aplikasi medis seperti Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) dan radioterapi, mengalami perkembangan dalam rentang waktu antara tahun 2018 hingga 2025 berdasarkan analisis literatur yang ada? Pertanyaan ini berfokus pada evolusi tren penelitian akselerator nuklir, khususnya dalam konteks aplikasi medis yang krusial seperti BNCT dan radioterapi. Pertanyaan ini dirancang untuk mengidentifikasi arah dan fokus utama penelitian yang telah dilakukan.

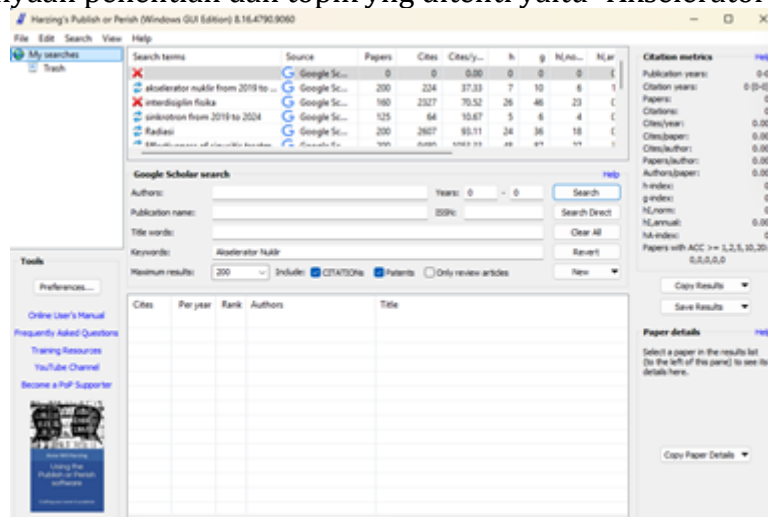
Pertanyaan kedua: Inovasi teknologi akselerator nuklir signifikan apa saja yang muncul dalam periode 2018-2025, termasuk pengembangan sistem seperti MIAMI-2 untuk eksperimen iradiasi in-situ dan akselerator elektron nanofotonik? Pertanyaan ini menggali inovasi teknologi signifikan yang muncul selama periode tersebut, menyoroti pengembangan sistem-sistem baru seperti MIAMI-2 dan akselerator elektron nanofotonik yang berpotensi merevolusi aplikasi akselerator. Selanjutnya, pertanyaan ketiga: Bagaimana penelitian dan pengembangan sistem pendukung akselerator, seperti sistem akuisisi data dan vakum untuk LINAC, berkontribusi pada peningkatan kinerja dan aplikasi akselerator nuklir? Pertanyaan ini menyoroti pentingnya penelitian dan pengembangan sistem pendukung akselerator, seperti sistem akuisisi data dan vakum untuk LINAC, dalam meningkatkan kinerja dan memperluas cakupan aplikasi akselerator nuklir.

Terakhir, pertanyaan keempat: Apa implikasi praktis dari penelitian dan pengembangan akselerator nuklir yang teridentifikasi dalam literatur periode 2018-2025, termasuk potensi dampaknya dalam bidang medis, industri, dan pendidikan? Pertanyaan ini bertujuan untuk mengidentifikasi implikasi praktis dari seluruh penelitian dan pengembangan yang terungkap dalam literatur, dengan mempertimbangkan potensi dampaknya yang luas dalam bidang medis, industri, dan pendidikan. Secara keseluruhan, pertanyaan-pertanyaan ini dirancang untuk saling melengkapi dan memberikan gambaran holistik mengenai kemajuan dan potensi akselerator nuklir.

Pencarian Literatur

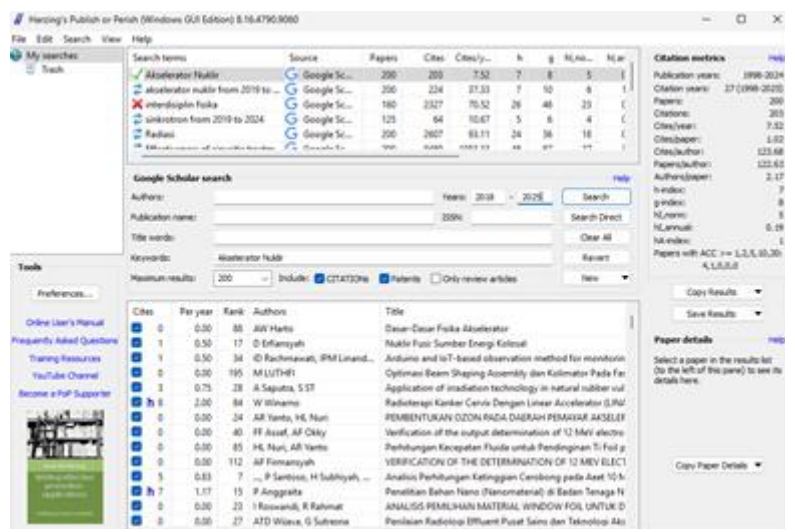
Pencarian literatur dilakukan menggunakan *Publish or Perish*, sebuah perangkat lunak yang memungkinkan pencarian artikel ilmiah dari basis data akademik, seperti *Google Scholar*. Tahapan pencarian literatur dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan kata kunci yang digunakan untuk pencarian, yang disesuaikan dengan pertanyaan penelitian dan topik yang diteliti yaitu “Akselerator Nuklir”



Gambar 1.1 Memasukkan kata kunci “Akselerator Nuklir”

2. Menentukan tahun terbit artikel yang diambil berasal dari rentang tahun 2018-2025.

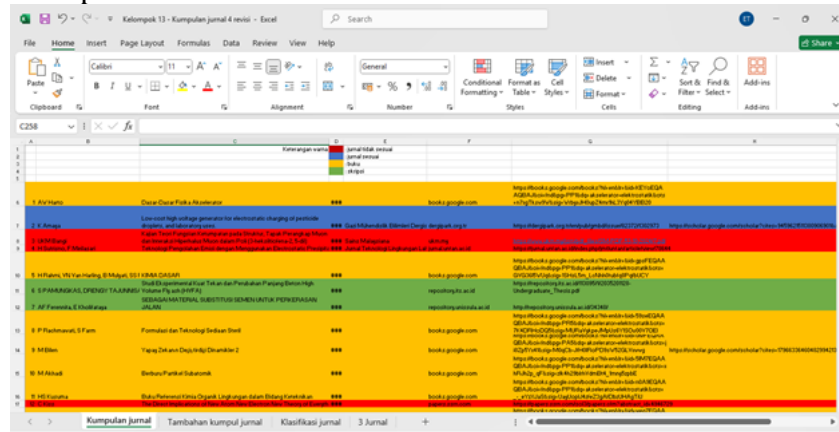


The screenshot shows the 'Publish or Perish' software interface with the search results for 'Akselerator Nuklir' from 2018 to 2025. The results table includes columns for Cites, Per year, Rank, Authors, and Title. The 'Citation metrics' section on the right shows various metrics such as Publication years, Citation years, Papers, Citations, Cites/year, Cites/paper, Cites/author, Papers/author, Authors/paper, h-index, g-index, h1-index, h2-index, and Papers with ACC.

Cites	Per year	Rank	Authors	Title
0	0.00	88	Aji Harto	Desain Desain Fisika Akselerator
1	0.50	17	D Erlaningsih	Mukla Fusi Sumber Energi Kolosal
1	0.50	34	ID Rachmawati, RIM Lina...	Autisme and IoT-based observation method for monitoring
0	0.00	195	M LUTHFI	Optimal Beam Shaping Assembly dan Kolimator Pada Far
3	0.75	28	A Saputra, SST	Application of irradiation technology in natural rubber vul
6	2.00	84	W Wilanemo	Radioterapi Kanker Cervix Dengan Linear Accelerator (S/Pa
0	0.00	24	AF Yanto, HG Nur	PERBENTUKAN OZON PADA CAKUPAN PENYARAF JAKSELIF
0	0.00	40	FF Asraf, AF Okiy	Verification of the output determination of 12 MeV electro
0	0.00	85	HE Nur, AH Yanto	Perhitungan Kepadatan Fluida untuk Pendinginan Ti-Foil p
0	0.00	112	Adi Fomansyah	VERIFICATION OF THE DETERMINATION OF 12 MeV ELECT
5	0.83	7	P Santoso, H Subhiyeh	Analisis Perhitungan Ketinggian Corong pada Areal 10 h
7	1.17	15	P Anggrita	Penelitian Bahan Nano (Diamonmaterial) di Badan Tenaga N
0	0.00	23	I Roswandi, R Rahmat	ANALISIS PEMERIKSAAN MATERIAL WINDOW FOIL UNTUK D
0	0.00	27	ATD Wicak, G Sutrisna	Pendidikan Radiologi Effluent Pusat Sains dan Teknologi Aka

Tabel 2. Melakukan Pencarian Artikel Rentang Tahun 2018-2025

3. Mendapatkan hasil pencarian sebanyak 200 artikel, yang kemudian akan diseleksi lebih lanjut dalam beberapa kriteria.



Gambar 1.1 Menyeleksi 200 Jurnal dalam Excel dalam beberapa kriteria

Seleksi Studi

Berdasarkan kriteria pencarian awal diperoleh sebanyak 200 artikel. Kemudian dilakukan proses seleksi untuk menyaring artikel yang paling relevan menggunakan kriteria berikut: Kesesuaian judul, abstrak, dan kata kunci dengan istilah terkait Akselerator Nuklir. Penghapusan artikel duplikat atau yang tidak dapat diakses. Memilih hanya jurnal ilmiah, dengan mengecualikan buku dan skripsi ataupun tesis. Fokus pada artikel jurnal yang telah ditinjau sejawat. Proses ini menghasilkan 20 artikel yang relevan, yang kemudian ditabulasi untuk dikasifikasikan dan dianalisis.

Tabel 3. Artikel yang sudah diseleksi

No.	Author	Judul	Nama Jurnal	Keterangan
1	Eisuke Sato, Alexander Zaboronok, Tetsuya Yamamoto, Kei Nakai, Sergey Taskaev, Olga Volkova, Ludmila Mechetina, Alexander Taranin, Vladimir Kanygin, Tomonori Isobe, Bryan J. Mathis, Akira Matsumura (2018)	Radiobiological response of U251MG, CHO-K1 and V79 cell lines to accelerator-based boron neutron capture therapy	Journal of Radiation Research	Data Primer
2	David A. Rotsch, M. Alex Brown, Jerry A. Nolen, Thomas Brossard, Walter F. Henning, Sergey D. Chemerisov, Roman G. Gromov, John Greene (2018)	Electron Linear Accelerator Production and Purification of Scandium-47 from Titanium Dioxide Targets	Applied Radiation and Isotopes	Data Primer
3	Yoshiaki Kiyanagi (2018)	Neutron Imaging at Compact Accelerator-Driven Neutron Sources in Japan	Journal of Imaging	Data Primer
4	J. G. Fantidis (2018)	Beam shaping assembly study for BNCT facility based on a 2.5 MeV proton accelerator on Li target	Journal of Theoretical and Applied Physics	Data Primer
5	G. Greaves, A.H. Mir, R.W. Harrison, M.A. Tunes, S.E. Donnelly, J.A. Hinks (2019)	New Microscope and Ion Accelerators for Materials Investigations (MIAMI-2) system at the University of Huddersfield	Nuclear Inst. and Methods in Physics Research	Data Primer

6	Cheol Ho Pyeon, Masao Yamanaka, Akito Oizumi, Masahiro Fukushima, Go Chiba, Kenichi Watanabe, Tomohiro Endo, Wilfred G. Van Rooijen, Kengo Hashimoto, Atsushi Sakon, Naoto Aizawa, Yasutoshi Kuriyama, Tomonori Uesugi, Yoshihiro Ishi (2019)	First nuclear transmutation of ^{237}Np and ^{241}Am by accelerator-driven system at Kyoto University Critical Assembly	Journal of Nuclear Science and Technology	Data Primer
7	Yusuke Yokoyama, Yosuke Miyairi, Takahiro Aze, Masako Yamane, Chikako Sawada, Yuka Ando, Maaike de Natris, Shoko Hirabayashi, Takeshige Ishiwa, Naomi Sato, Naoto Fukuyo (2019)	A Single Stage Accelerator Mass Spectrometry at the Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	Data Primer
8	Evgenii Zavjalov, Alexander Zaboronok, Vladimir Kanygin, Anna Kasatova, Aleksandr Kichigin, Rinat Mukhamadiyarov, Ivan Razumov, Tatiana Sycheva, Bryan J. Mathis, Sakura Eri B. Maezono, Akira Matsumura & Sergey Taskaev (2020)	Accelerator-based boron neutron capture therapy for malignant glioma: a pilot neutron irradiation study using boron phenylalanine, sodium borocaptate and liposomal borocaptate with a heterotopic U87 glioblastoma model in SCID mice	International Journal of Radiation Biology	Data Primer
9	Winarno, Veren Audia Nurmansya, Zakiatul Miskiyah (2021)	Radioterapi Kanker Cervix dengan Linear Accelerator (LINAC)	Jurnal Biosains Pascasarjana	Data Primer
10	Tomohiro Kobayashi, Shota Ikeda, Yoshie Otake, Yujiro Ikeda, Noriyosu Hayashizaki (2021)	Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use	Nuclear Inst. and Methods in Physics Research	Data Primer
11	Yoshiaki Kiyanagi (2021)	Neutron applications developing at compact accelerator-driven neutron sources	AAPPS Bulletin	Data Primer
12	Sergey Taskaev, Evgenii Berendeev, Marina Bikchurina, Timofey Bykov, Dmitrii Kasatov, Iaroslav Kolesnikov, Alexey Koshkarev, Aleksandr Makarov, Georgii Ostreinov, Vyacheslav Porosev, Sergey Savinov, Ivan Shchudlo, Evgeniia Sokolova, Igor Sorokin, Tatiana Sycheva, and Gleb Verkhovod (2021)	Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target	Biology	Data Primer
13	Kimikazu Sasa, Maki Honda, Seiji Hosoya, Tsutomu Takahashi, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Aya Sakaguchi, Saori Kurita, Yukihiko Satou & Keisuke Sueki (2021)	A sensitive method for Sr-90 analysis by accelerator mass spectrometry	Journal of Nuclear Science and Technology	Data Primer

14	Akira Yoneyama, Heesup Choi, Masumi Inoue, Jihoon Kim, Myungkwan Lim, and Yuhji Sudoh (2021)	Effect of a Nitrite/Nitrate-Based Accelerator on the Strength Development and Hydrate Formation in Cold-Weather Cementitious Materials	Materials	Data Primer
15	Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Sato, Norihiro Matsudaa, Satoshi Kuniedaa, Yurdunaz Çelikb, Naoya Furutachic and Koji Niitac (2022)	Benchmark study of particle and heavy-ion transport code system using shielding integral benchmark archive and database for accelerator-shielding experiments	Journal of Nuclear Science and Technology	Data Primer
16	Liisa Porra, Tiina Seppälä, Lauri Wendland, Hannu Revitzer, Heikki Joensuu, Paul Eide, Hanna Koivunoro, Noah Smick, Theodore Smick & Mikko Tenhunen (2022)	Accelerator-based boron neutron capture therapy facility at the Helsinki University Hospital	Acta Oncologica	Data Primer
17	Rizky Mu'amanah, Mokhammad Tirono, Yohannes Sardjono, Isman Mulyadi Triatmoko, Gede Sutrisna Wijaya (2024)	Dose Analysis of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for Breast Cancer Based on Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) V.3.34	Tri Dasa Mega	Data Primer
18	Taris Mariyani, Imas Ratna Ermawati (2024)	Pengembangan Alat Peraga Ring Electromagnetic Accelerator Pada Perkuliahan Listrik Magnet Materi Medan Magnet Berarus	Jurnal Luminous: Riset Ilmiah Pendidikan Fisika	Data Primer
19	Bayu Pamungkas, M. Khoiri, Taxwim (2024)	Rancang Bangun Sistem Akuisisi Data Sumber Elektron dan Sistem Vakum untuk Fasilitas LINAC di PRTA – BRIN	Jurnal CRANKSHAFT	Data Primer
20	Shikha Pandey, Ananya Singh and Arshad Kamal (2025)	Nanophotonic electron accelerator: A review of particle accelerator technology	International Journal of Science and Research Archive	Data Primer

Penilaian Kualitas Studi

Setelah proses seleksi, dilakukan penilaian kualitas studi untuk memastikan bahwa artikel yang digunakan memiliki standar akademik yang tinggi. Penilaian kualitas dilakukan dengan melihat: Keandalan metodologi penelitian yang digunakan dalam setiap artikel. Kedalaman analisis yang dilakukan oleh penulis dalam artikel tersebut. Relevansi hasil penelitian terhadap pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan. Artikel yang memiliki kelemahan signifikan dalam metodologi atau analisis dapat dieksklusi pada tahap ini jika dianggap tidak cukup kuat untuk mendukung penelitian.

Ekstraksi Data

Setelah artikel yang lolos seleksi dikonfirmasi kualitasnya, tahap berikutnya adalah ekstraksi data. Ekstraksi data dilakukan dengan mengumpulkan informasi penting dari setiap artikel untuk dianalisis lebih lanjut. Informasi yang diekstraksi dari setiap artikel mencakup:

Judul dan penulis, Tahun publikasi, Metode penelitian yang digunakan, Sampel dan populasi penelitian DAN Hasil utama dan kesimpulan penelitian. Data yang telah diekstraksi disusun dalam tabel atau format sistematis lainnya untuk memudahkan sintesis informasi.

Sintesis

Setelah data dari setiap artikel diekstraksi, dilakukan sintesis untuk mengidentifikasi tema utama, pola penelitian, serta perbedaan dan kesamaan antar studi. Sintesis dilakukan dengan mengelompokkan artikel berdasarkan: Variabel penelitian, Metode penelitian yang digunakan, dan Hasil utama dan temuan penelitian. Dengan cara ini, penelitian dapat menyusun pemetaan literatur yang lebih jelas serta menghubungkan hasil penelitian sebelumnya dengan pertanyaan penelitian yang diajukan.

Analisis Data

Setelah sintesis dilakukan, data yang telah dikumpulkan dianalisis secara mendalam untuk menemukan tren penelitian, kesenjangan penelitian, serta kontribusi utama dari studi terdahulu. Analisis dilakukan dengan pendekatan berikut: Menganalisis tren penelitian: Bagaimana perkembangan penelitian dalam bidang ini? Mengidentifikasi kesenjangan penelitian: Apakah ada aspek yang belum cukup diteliti? Menilai keterkaitan antar penelitian: Bagaimana hubungan antara berbagai temuan dalam studi sebelumnya? Hasil analisis ini menjadi dasar bagi penyusunan kesimpulan dan rekomendasi penelitian.

Laporan Hasil

Tahap terakhir adalah menyusun laporan hasil yang berisi rangkuman dari seluruh proses yang telah dilakukan. Laporan ini mencakup: Ringkasan dari pertanyaan penelitian, Metode pencarian dan seleksi artikel, Temuan utama dari analisis data dan Implikasi penelitian dan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya. Hasil analisis dapat disajikan dalam bentuk tabel, diagram, atau model konseptual untuk memberikan gambaran yang lebih jelas terhadap penelitian yang telah dilakukan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan 20 artikel jurnal yang telah ditetapkan memenuhi kriteria. Berikut keterangan hasil pembahasan dalam Tabel 4.

Tabel 3. Hasil pembahasan dari 20 artikel yang memenuhi kriteria

Peneliti	Judul	Hasil Pembahasan	Keterangan
Terapi Medis (Radioterapi & BNCT): Kriteria: Artikel yang membahas penggunaan akselerator dalam pengobatan kanker, khususnya radioterapi dan Boron Neutron Capture Therapy (BNCT).			
Eisuke Sato et al. (2018)	Radiobiological response of U251MG, CHO-K1 and V79 cell lines to accelerator-based boron neutron capture therapy	Artikel ini membahas penyeimbangan akselerator proton dengan target lithium di Budker Institute of Nuclear Physics (BINP) untuk terapi boron neutron capture (BNCT). Sumber neutron berbasis akselerator ini menunjukkan keunggulan dalam jumlah dan spektrum neutron, serta mampu mengontrol proliferasi sel setelah akumulasi boron, yang penting untuk efektivitas terapi.	Scopus Q2
J. G. Fantidis (2018)	Beam shaping assembly study for BNCT facility based on a 2.5	Artikel ini membahas optimasi assembly pembentukan berkas (BSA)	Scopus Q4

	MeV proton accelerator on Li target	untuk terapi BNCT dengan akselerator proton 2,5 MeV, fokus pada pemodelan dan evaluasi dosimetri guna meningkatkan efektivitas terapi. Hasil penelitian menunjukkan konfigurasi BSA yang diusulkan mampu menghasilkan berkas neutron sesuai standar IAEA untuk pengobatan tumor otak.	
Evgenii Zavjalov et al. (2020)	Accelerator-based boron neutron capture therapy for malignant glioma: a pilot neutron irradiation study using boron phenylalanine, sodium borocaptate and liposomal borocaptate with a heterotopic U87 glioblastoma model in SCID mice	Penelitian menunjukkan bahwa terapi BNCT dengan sumber neutron berbasis akselerator dapat menghambat pertumbuhan glioblastoma pada hewan uji. Liposomal BSH memberikan hasil jangka panjang lebih baik dibandingkan BPA dan BSH non-liposomal. Peningkatan konsentrasi boron di tumor melalui liposomal diharapkan meningkatkan efektivitas terapi dan mendorong riset lanjutan untuk aplikasi klinis BNCT berbasis akselerator.	Scopus Q2
Winarno dkk. (2021)	Radioterapi Kanker Cervix dengan Linear Accelerator (LINAC)	Akselerator Linier (LINAC) berperan penting dalam radioterapi kanker serviks dengan memberikan dosis radiasi tinggi yang terfokus untuk membunuh sel kanker, sambil meminimalkan kerusakan jaringan sehat. Teknologi ini memungkinkan distribusi radiasi optimal, meningkatkan efektivitas pengobatan dan hasil klinis.	Sinta 4
Yoshiaki Kiyanagi (2021)	Neutron applications developing at compact accelerator-driven neutron sources	Artikel ini membahas pergeseran sumber neutron dari reaktor nuklir ke akselerator, yang menawarkan intensitas neutron lebih tinggi untuk berbagai aplikasi, termasuk terapi BNCT. Akselerator juga digunakan untuk pengujian kesalahan lunak pada perangkat semikonduktor, menunjukkan fleksibilitas dan potensinya dalam riset dan industri.	Scopus Q1
Sergey Taskaev et al. (2021)	Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target	Sumber neutron kompak telah dikembangkan di Budker Institute of Nuclear Physics menggunakan akselerator tandem dan target lithium, menghasilkan fluks neutron tinggi untuk terapi BNCT. Penelitian ini menunjukkan potensi akselerator dalam menghasilkan berkas proton efisien dan neutron yang sesuai untuk aplikasi klinis dan riset ilmiah.	Scopus Q1
Liisa Porra et al. (2022)	Accelerator-based boron neutron capture therapy facility at the Helsinki University Hospital	Fasilitas terapi BNCT berbasis akselerator di RS Universitas Helsinki menggunakan sistem neutron nuBeam yang menghasilkan fluks neutron epithermal tinggi dengan dosis gamma rendah. Hasil pengukuran	Scopus Q2

		menunjukkan karakteristik berkas sesuai model dan rekomendasi IAEA, mendukung penggunaannya secara klinis.	
Rizky Mu'amanah et al. (2024)	Dose Analysis of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for Breast Cancer Based on Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) V.3.34	Penelitian ini menemukan bahwa dosis optimal untuk terapi kanker payudara dengan BNCT dapat dicapai menggunakan akselerator proton 30 MeV. Peningkatan konsentrasi boron di jaringan kanker mempercepat waktu iradiasi dan berpotensi mengurangi efek samping pada organ sehat.	Sinta 2
Fisika Material dan Penelitian Dasar: Kriteria: Artikel yang membahas penggunaan akselerator untuk penelitian material, karakterisasi, atau eksperimen fisika dasar.			
G. Greaves et al. (2019)	New Microscope and Ion Accelerators for Materials Investigations (MIAMI-2) system at the University of Huddersfield	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem MIAMI-2 dengan akselerator ion memungkinkan observasi mendalam terhadap interaksi radiasi dan evolusi mikrostruktur material. Akselerator ini meningkatkan energi ion hingga 350 kV dan memperluas kemampuan eksperimen in-situ, memperkuat pemahaman tentang mekanisme kerusakan radiasi.	Scopus Q2
Cheol Ho Pyeon et al. (2019)	First nuclear transmutation of ²³⁷ Np and ²⁴¹ Am by accelerator-driven system at Kyoto University Critical Assembly	Penelitian ini menunjukkan transmutasi nuklir neptunium-237 dan amerisium-241 berhasil dilakukan dengan sistem berbasis akselerator yang injeksi neutron energi tinggi ke inti subkritis di Kyoto University Critical Assembly. Kombinasi inti subkritis dan akselerator proton 100 MeV dengan target timbal-bismut efektif menghasilkan reaksi fisi dan tangkapan untuk transmutasi minor aktinide.	Scopus Q2
Yosuke Iwamoto et al. (2022)	Benchmark study of particle and heavy-ion transport code system using shielding integral benchmark archive and database for accelerator-shielding experiments	Penelitian menunjukkan penggunaan pustaka data JENDL-4.0/HE meningkatkan akurasi simulasi perilaku neutron dalam eksperimen perlindungan radiasi di fasilitas akselerator, terutama untuk energi di atas 10 MeV. Namun, masih ada keterbatasan model fisika untuk energi di bawah 10 MeV yang perlu diperbaiki.	Scopus Q2
Pengembangan Akselerator dan Teknologi Terkait: Kriteria: Artikel yang fokus pada desain, pengembangan, dan peningkatan teknologi akselerator itu sendiri, serta komponen dan sistem yang terkait.			
David A. Rotsch et al. (2018)	Electron Linear Accelerator Production and Purification of Scandium-47 from Titanium Dioxide Targets	Artikel ini membahas produksi Scandium-47 menggunakan akselerator linier elektron yang menghasilkan foton bremsstrahlung melalui interaksi dengan material Z tinggi seperti tungsten. Hasil eksperimen menunjukkan produksi dari titanium dioksida melebihi	Scopus Q2

		prediksi teoretis, menandakan efisiensi tinggi akselerator dalam proses ini.	
Tomohiro Kobayashi et al. (2021)	Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use	RANS-II adalah sumber neutron kompak yang lebih stabil dan portabel dari pendahulunya, menggunakan proton 2,5 MeV untuk menghasilkan neutron. Dilengkapi dengan sumber ion ECR dan RFQ, akselerator ini dirancang efisien untuk reaksi p-Li.	Scopus Q2
Bayu Pamungkas dkk. (2024)	Rancang Bangun Sistem Akuisisi Data Sumber Elektron dan Sistem Vakum untuk Fasilitas LINAC di PRTA – BRIN	Hasil menunjukkan sistem akuisisi data mencapai akurasi 98% untuk arus berkas elektron dan 100% untuk tingkat kevakuman, memastikan kinerja optimal akselerator linac. Akurasi tinggi ini menjadikan sistem andal untuk memantau dan mengendalikan operasi akselerator dalam radioterapi.	Sinta 4
Shikha Pandey et al. (2025)	Nanophotonic electron accelerator: A review of particle accelerator technology	Nanophotonic electron accelerators (NEA) menawarkan solusi kompak dan efisien untuk akselerasi partikel, berpotensi menggantikan akselerator besar seperti LHC. Dengan kemajuan teknologi nanofotonik, NEA dapat merevolusi aplikasi medis dan riset ilmiah melalui peningkatan aksesibilitas dan penurunan biaya operasional.	Terindex
Aplikasi Analitik dan Pengukuran Isotop: Kriteria: Artikel yang membahas penggunaan akselerator dalam teknik analisis seperti Accelerator Mass Spectrometry (AMS) untuk pengukuran isotop.			
Yusuke Yokoyama et al. (2019)	A Single Stage Accelerator Mass Spectrometry at the Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo	Artikel ini membahas instalasi dan kinerja sistem Accelerator Mass Spectrometry (AMS) pertama di Jepang, di Universitas Tokyo, yang dilengkapi teknologi untuk meningkatkan akurasi pengukuran isotop. Pengujian menunjukkan sistem ini mencapai presisi hingga 0,2%, menjadikannya alat efektif untuk riset ilmiah.	Scopus Q3
Kimikazu Sasa et al. (2021)	A sensitive method for Sr-90 analysis by accelerator mass spectrometry	Analisis menunjukkan metode kedua menghasilkan arus berkas SrF_3^- jauh lebih tinggi (hingga 500 nA) dibandingkan metode pertama yang hanya beberapa nA, menekankan pentingnya pemilihan metode tepat dalam pemisahan dan analisis Sr-90 dengan akselerator massa.	Scopus Q2
Aplikasi Neutron dan Pencitraan Neutron: Kriteria: Artikel yang membahas penggunaan akselerator sebagai sumber neutron untuk berbagai aplikasi, termasuk pencitraan neutron.			
Yoshiaki Kiyanagi (2018)	Neutron Imaging at Compact Accelerator-Driven Neutron Sources in Japan	Artikel ini membahas berbagai fasilitas pencitraan berbasis akselerator di Jepang, termasuk spesifikasi dan kinerja sumber neutronnya. Fasilitas seperti HUNS dan SHI-ATEX menyediakan neutron untuk beragam aplikasi pencitraan, menyoroti peran	Scopus Q1

		penting akselerator dalam riset dan pengembangan teknologi neutron.	
Yoshiaki Kiyonagi (2021)	Neutron applications developing at compact accelerator-driven neutron sources	Artikel ini membahas pergeseran sumber neutron dari reaktor nuklir ke akselerator, yang menawarkan intensitas neutron lebih tinggi untuk berbagai aplikasi, termasuk terapi BNCT. Akselerator juga digunakan untuk pengujian kesalahan lunak pada perangkat semikonduktor, menunjukkan fleksibilitas dan potensinya dalam riset dan industri.	Scopus Q1
Aplikasi Lainnya: Kriteria: Artikel yang tidak termasuk dalam kelompok di atas.			
Akira Yoneyama et al. (2021)	Effect of a Nitrite/Nitrate-Based Accelerator on the Strength Development and Hydrate Formation in Cold-Weather Cementitious Materials	Penambahan akselerator berbasis nitrit/nitrat mempercepat hidrasi semen, meningkatkan kekuatan awal, dan mengurangi risiko kerusakan akibat embun beku pada beton di cuaca dingin. Penelitian menunjukkan akselerator ini mempercepat pembentukan hidrasi dan mengisi pori, sehingga meningkatkan kekuatan kompresi.	Scopus Q2
Mariyani & Ermawati. (2024)	Pengembangan Alat Peraga Ring Electromagnetic Accelerator Pada Perkuliahan Listrik Magnet Materi Medan Madnet Berarus	Alat peraga Ring Electromagnetic Accelerator terbukti efektif meningkatkan pemahaman mahasiswa tentang medan magnet berarus, dengan validitas tinggi dari tim ahli. Alat ini membantu mahasiswa memahami konsep akselerasi partikel secara visual dan kinestetik, seperti prinsip kerja siklotron.	Terindex

Pembahasan

Tren penelitian akselerator selama periode 2018-2025 memperlihatkan perkembangan yang signifikan dan multidimensional. Aplikasi dalam bidang terapi medis, terutama pengembangan dan optimasi Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) berbasis akselerator, mendominasi perhatian. Seiring dengan itu, pengembangan sumber neutron kompak berbasis akselerator muncul sebagai tren krusial yang menjanjikan aplikasi luas, mulai dari BNCT hingga pencitraan neutron. Di ranah teknologi akselerator itu sendiri, inovasi mengarah pada miniaturisasi dan peningkatan efisiensi, tercermin dalam studi tentang akselerator nanofotonik. Menariknya, aplikasi akselerator meluas melampaui batas tradisional ke bidang ilmu material dan bahkan pendidikan, mengindikasikan potensi interdisipliner yang semakin besar. Penelitian fundamental yang memanfaatkan akselerator dalam fisika material dan nuklir juga tetap menjadi pilar penting dalam lanskap penelitian ini.

Analisis mendalam terhadap bidang aplikasi penelitian akselerator periode 2018-2025 mengungkapkan bahwa terapi medis, khususnya BNCT berbasis akselerator, menjadi area eksplorasi yang paling intensif. Jumlah publikasi yang secara spesifik membahas BNCT menunjukkan fokus yang kuat pada pengembangan fasilitas dan optimasi dosis untuk terapi kanker yang lebih tertarget. Selain itu, pengembangan teknologi akselerator dan sistem pendukungnya juga mendapatkan perhatian besar, seiring dengan upaya untuk meningkatkan kinerja, efisiensi, dan memperluas fungsionalitas akselerator. Aplikasi dalam fisika material dan penelitian dasar, serta pemanfaatan neutron untuk berbagai keperluan termasuk

pencitraan, juga merupakan bidang yang aktif diteliti, menunjukkan keberagaman pemanfaatan teknologi akselerator di berbagai disiplin ilmu.

Inovasi teknologi akselerator yang menonjol selama periode 2018-2025 mencakup pengembangan sumber neutron kompak berbasis akselerator, yang membuka peluang aplikasi neutron yang lebih terdesentralisasi. Konsep revolusioner akselerator elektron nanofotonik juga menarik perhatian sebagai potensi miniaturisasi akselerator dengan efisiensi energi yang lebih tinggi. Peningkatan sistem pendukung akselerator, seperti pengembangan sistem akuisisi data yang lebih canggih, turut menjadi fokus untuk meningkatkan akurasi dan keandalan operasional. Selain itu, kemajuan dalam desain fasilitas BNCT berbasis akselerator terus diupayakan untuk meningkatkan efektivitas terapi. Secara keseluruhan, penelitian dan pengembangan akselerator pada periode ini diwarnai oleh upaya untuk mengatasi kompleksitas teknologi, mengoptimalkan aplikasi medis, dan mengeksplorasi potensi miniaturisasi untuk berbagai keperluan ilmiah dan teknologi.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, penelitian ini telah berhasil mengidentifikasi tren dan kesenjangan dalam penelitian akselerator nuklir. Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun terdapat kemajuan signifikan dalam metodologi dan aplikasi, masih ada aspek-aspek tertentu yang memerlukan perhatian lebih lanjut, terutama dalam hal keselamatan dan efisiensi energi. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya dan memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi akselerator nuklir yang lebih aman dan efisien. Lebih jauh lagi, penting untuk mencatat bahwa kolaborasi internasional dalam penelitian akselerator nuklir telah meningkat, yang berpotensi memperkaya metodologi dan perspektif dalam penelitian ini. Dengan adanya kerjasama antara berbagai institusi dan negara, diharapkan dapat tercipta inovasi yang lebih cepat dan efektif dalam pemanfaatan akselerator nuklir. Penelitian ini juga menekankan pentingnya berbagi pengetahuan dan sumber daya untuk mencapai tujuan bersama dalam pengembangan teknologi yang berkelanjutan dan aman.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa rekomendasi dapat diajukan untuk penelitian selanjutnya. Pertama, disarankan agar penelitian lebih lanjut dilakukan untuk mengeksplorasi aplikasi praktis dari akselerator nuklir dalam bidang kedokteran dan energi terbarukan. Penelitian ini dapat mencakup pengembangan teknik baru dalam terapi medis yang memanfaatkan akselerator, serta penelitian mengenai penggunaan akselerator dalam menghasilkan sumber energi yang lebih bersih dan efisien. Kedua, kolaborasi internasional perlu ditingkatkan untuk memperkaya perspektif dan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan melibatkan berbagai pihak dari berbagai negara, diharapkan dapat tercipta inovasi yang lebih cepat dan efektif dalam pemanfaatan akselerator nuklir. Terakhir, penting untuk melakukan studi lebih mendalam mengenai aspek keselamatan dan dampak lingkungan dari penggunaan akselerator nuklir, guna memastikan bahwa teknologi ini dapat digunakan secara berkelanjutan dan aman. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan gambaran mengenai tren saat ini, tetapi juga membuka peluang untuk penelitian lebih lanjut yang dapat mengisi kesenjangan yang ada dan mendorong kemajuan di bidang akselerator nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

Brüning, O., & Rossi, L. (2015). The High Luminosity Large Hadron Collider. *Advanced Series on Directions in High Energy Physics*, 24.

- Diah, F. I., Kudus, I. A., Suharni, Permana, F. S., & Taxwim. (2022). Conceptual Design of Internet Accelerator Laboratory (IAL) for DECY-13 Cyclotron. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 11(1), 8-15. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v11i1.3425>
- Facure, A., Falcao, R.C., Silva, A.X., Crispim, V.R., Vitorelli, J.C. (2005). A study of neutron spectra from medical linear accelerators. *Applied Radiation and Isotopes*, 62: 69-72.
- Fantidis, J.G. (2018). Beam shaping assembly study for BNCT facility based on a 2.5 MeV proton accelerator on Li target. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 12, 249-256
- Greave, G., Mir, A.H., Harrison, R.W., Tunes, M.A., Donelly, S.E., & Hinks, J.A. (2019). New Microscope and Ion Accelerators for Materials Investigations (MIAMI-2) system at the University of Huddersfield. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A(931), 37-43
- Greene D. dan Williams P.C. (2001). *Linear Accelerators for Radiation Therapy Second Edition*. Bristol: Medical Science Series, institute of Physics Publishing.
- Harto, A.W. (2024). *Dasar-Dasar Fisika Akselerator*. Depok: Gadjah Mada University Press
- Indrayani, F., & Wahyudi, T. (2020). Aplikasi Mesin Berkas Elektron (MBE) sebagai Alternatif Fiksator pada Pewarnaan Batik Warna Alam. *Dinamika Kerajinan dan Batik: Majalah Ilmiah*, 37(1), 105-118.
- Iswadi. (2012). *Pendahuluan Fisika Inti*. Makassar: Alauddin University Press
- Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Sato, T., Matsudaa, N., Kunieda, S., Celikb, Y., Furutachic, N., & Niitac, K. (2022). Benchmark study of particle and heavy-ion transport code system using shielding integral benchmark archive and database for accelerator-shielding experiments. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 59(5), 665-675
- Jones, M., & Lee, S. (2020). Industrial Applications of Nuclear Accelerators: Innovations and Challenges. *Industrial Physics Review*, 38(2), 112-130
- Kiyanagi, Y. (2018). Neutron Imaging at Compact Accelerator-Driven Neutron Sources in Japan. *Journal of Imaging*, 4(55), 1-13
- Kiyanagi, Y. (2021). Neutron applications developing at compact accelerator-driven neutron sources. *AAPPS Bulletin*. 31(22), 1-19
- Kobayashi, T., Ikeda, S., Otake, Y., Ikeda, Y., & Hayashizaki, N. (2021). Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 994, 1-6
- Labaune, C., Baccou, C., Depierreux, S., Goyon, C., Loisel, G., Yahia, V., & Rafelski, J. (2013). Fusion reactions initiated by laser-accelerated particle beams in a laser-produced plasma. *arXiv preprint arXiv:1310.2002*.
- Mariyani, T., & Ermawati, I.R. (2024). Pengembangan Alat Peraga Ring Electromagnetic Accelerator Pada Perkuliahan Listrik Magnet Materi Medan Magnet Berarus. *Jurnal Luminous: Riset Ilmiah Pendidikan Fisika*. 5(1), 25 - 32
- Mu'amanah, R., Tirono, M., Sardjono, Y., Triatmoko, I.M., & Wijaya, G.S. (2024). Dose Analysis of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for Breast Cancer Based on Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) V.3.34. *Tri Dasa Mega*. 26(3), 133-144
- Muchammad, A., Rahayu, S., & Pramudita, A. A. (2007). Simulasi gerak partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik dan medan magnet menggunakan MATLAB. *Berkala Fisika*, 10(1), 99-103.
- Pamungkas, B., Khoiri, M., & Taxwim. (2024). Rancang Bangun Sistem Akuisisi Data Sumber Elektron dan Sistem Vakum untuk Fasilitas LINAC di PRITA - BRIN. *Jurnal CRANKSHAFT*. 7(1), 72-81
- Pandey, S., Singh, A., & Kamal, A. (2025). Nanophotonic electron accelerator: A review of particle accelerator technology. *International Journal of Science and Research Archive*. 14(01), 1905-1910

- Porra, L., Seppälä, Tiina., Wendland, L., Revitzer, H., Joensuu, H., Eide, P., Koivunoro, H., Smick, T., & Tenhunen, M. (2022). Accelerator-based boron neutron capture therapy facility at the Helsinki University Hospital. *Acta Oncologica*, 61(2), 269–273
- Pyeon, C.H., Yamanaka, M., Oizumi, A., Fukushima, M., Chiba, G., Watanabe, K., Endo, T., Van Rooijen, W. G., Hashimoto, K., Sakon, A., Aizawa, N., Kuriyama, Y., Uesugi, T., & Ishi, Y. (2019). First nuclear transmutation of ²³⁷Np and ²⁴¹Am by accelerator-driven system at Kyoto University Critical Assembly. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 56(8), 684–689
- Rotsch, D.A., Brown, M.A., Nolen, J.A., Brossard, T., Henning, W.F., Chemerisov, S.D., Gromov, R.G., & Greene, J. (2018). Electron Linear Accelerator Production and Purification of Scandium-47 from Titanium Dioxide Targets. *Applied Radiation and Isotopes*, 138, 77-82
- Sasa, K., Honda, M., Hosoya, S., Takahashi, T., Takano, K., Ochiai, Y., Sakaguchi, A., Kurita, S., Satou, Y., & Sueki, K. (2021). A sensitive method for Sr-90 analysis by accelerator mass spectrometry. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 58(1), 72–79
- Sato, E., Zaboronok, A., Yamamoto, T., Nakai, K., Taskaev, S., Volkova, O., Mechetina, L., Taranin, A., Kanygin, V., Isobe, T., Mathis, B.J., & Matsumura, A. (2018). Radiobiological response of U251MG, CHO-K1 and V79 cell lines to accelerator-based boron neutron capture therapy. *Journal of Radiation Research*, 59(2), 101–107
- Smith, J., Williams, D., & Carter, L. (2021). Medical Applications of Nuclear Accelerators: A Comprehensive Review. *International Journal of Medical Physics*, 29(1), 56-78.
- Taskaev, S., Berendeev, E., Bikchurina, M., Bykov, T., Kasatov, D., Kolesnikov, I., Koshkarev, A., Makarov, A., Ostreinov, G., Porosev, V., Savinov, S., Shchudlo, I., Sokolova, E., Sorokin, I., Sycheva, T., & Verkhovod, G. (2021). Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology*, 10(350), 1-11
- Todesco, E., Bajas, H., Bajko, M., Ballarino, A., & Izquierdo Bermudez, S. (2021). The High Luminosity LHC interaction region magnets towards series production. *Superconductor Science and Technology*, 34(5).
- Urfa, M., Suryanto, A., & Hidayat, W. (2021). Identifikasi partikel neutron akibat tembakan proton pada molekul air. *FISITEK: Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*, 7(1), 45-50.
- Winarno., Audia, V., Nurmansya, V.A., & Miskiyah, Z. (2021). Radioterapi Kanker Cervix dengan Linear Accelerator (LINAC). *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 23(2), 75-86
- Xu, J., et al. (2020). Electron acceleration in a laser-driven dielectric structure using a photonic crystal. *Physical Review Accelerators and Beams*, 23(2), 021302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.021302>
- Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Aze, T., Yamane, M., Sawada, C., Ando, Y., de Natris, M., Hirabayashi, S., Ishiwa, T., Sato, N., & Fukuyo, N. (2019). A Single Stage Accelerator Mass Spectrometry at the Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 455, 311-316
- Yoneyama, A., Choi, H., Inoue, M., Kim, J., Lim, M., & Sudoh, Y. (2021). Effect of a Nitrite/Nitrate-Based Accelerator on the Strength Development and Hydrate Formation in Cold-Weather Cementitious Materials. *Materials*, 14(1006), 1-14
- Zavjalov, E., Zaboronok, A., Kanygin, V., Kasatova, A., Kichigin, A., Mukhamadiyarov, R., Razumov, I., Sycheva, T., Mathis, B.J., Maezono, S.E.B., Matsumura, A., & Taskaev, S. (2020). Accelerator-based boron neutron capture therapy for malignant glioma: a pilot neutron irradiation study using boron phenylalanine, sodium borocaptate and liposomal borocaptate with a heterotopic U87 glioblastoma model in SCID mice. *International Journal of Radiation Biology*, 96(7), 868–878