

DE BROGLIE WAVES IN ELECTRON MICROSCOPY: CONTRIBUTIONS TO ATOMIC-SCALE VISUALIZATION AND MATERIAL CHARACTERIZATION—A PRISMA BASED REVIEW

**Hamdi Akhsan, Melly Ariska, Nur Kayla Lekati, Zahra Ayanna Firmansyah dan Aisyah
Veronika**

*Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sriwijaya, Jalan Palembang-
Prabumulih, KM 32, Inderalaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan, 30622, Indonesia
E-mail: hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id*

Abstrak

Gelombang de Broglie menyatakan bahwa partikel bermassa memiliki sifat gelombang, dan menjadi dasar pengembangan mikroskop elektron modern. Penelitian ini bertujuan mengkaji kontribusi prinsip tersebut terhadap peningkatan resolusi pencitraan pada berbagai jenis mikroskop elektron, seperti TEM, SEM, dan STEM. Metode yang digunakan berupa tinjauan literatur sistematis dengan pendekatan PRISMA terhadap 25 artikel ilmiah terbitan 2015–2025 yang telah melalui peer review. Hasil kajian menunjukkan bahwa panjang gelombang elektron yang sangat kecil memungkinkan pengamatan struktur material hingga skala atom, melebihi batas difraksi mikroskop optik. Selain itu, teknologi seperti koreksi aberasi, pencitraan in-situ, dan 4D-STEM memperluas kemampuan mikroskop dalam menganalisis struktur dan dinamika material secara lebih akurat. Simpulan dari studi ini menegaskan bahwa prinsip gelombang de Broglie memainkan peran kunci dalam kemajuan teknologi pencitraan beresolusi tinggi.

Kata kunci: *Gelombang de Broglie; mikroskopi elektron; nanoteknologi; Scanning Transmission Electron (STEM); Transmission Electron Microscopy (TEM)*

Abstract

The de Broglie wave concept states that particles with mass also exhibit wave-like properties, forming the theoretical foundation for the development of modern electron microscopes. This study aims to examine the contribution of this principle to enhancing image resolution in various types of electron microscopes, including Transmission Electron Microscopes (TEM), Scanning Electron Microscopes (SEM), and Scanning Transmission Electron Microscopes (STEM). A systematic literature review was conducted using the PRISMA approach on 25 peer-reviewed scientific articles published between 2015 and 2025. The findings reveal that the extremely short wavelength of electrons enables the observation of material structures at the atomic scale, surpassing the diffraction limit of conventional optical microscopes. Furthermore, advancements such as aberration correction, in-situ imaging, and four-dimensional STEM (4D-STEM) have significantly expanded the capabilities of electron microscopy in analyzing the structure and dynamics of materials with greater accuracy. This study concludes that the de Broglie wave principle plays a key role in advancing high-resolution imaging technologies in modern scientific research.

Keywords: *De Broglie waves; electron microscopy; nanotechnology; PRISMA; Scanning Transmission Electron (STEM); Transmission Electron Microscopy (TEM)*

PENDAHULUAN

Konsep dualisme gelombang-partikel telah menjadi salah satu pilar fundamental dalam perkembangan fisika modern, yang secara signifikan mengubah cara pandang manusia terhadap hakikat dasar materi pada skala mikroskopis. Salah satu teori utama yang mendukung konsep ini adalah teori gelombang materi yang dikemukakan oleh Louis de Broglie pada tahun 1924.

De Broglie mengemukakan bahwa partikel bermassa, seperti elektron, tidak hanya memiliki sifat sebagai partikel, tetapi juga menunjukkan perilaku menyerupai gelombang, dengan panjang gelombangnya berbanding terbalik terhadap momentumnya [1]. Teori ini menjadi fondasi penting bagi perkembangan mekanika kuantum serta membuka jalan bagi

kemunculan berbagai teknologi berbasis fenomena kuantum.

Penerapan nyata dari konsep gelombang de Broglie dapat ditemukan pada teknologi mikroskop elektron, di mana sifat gelombang elektron dimanfaatkan untuk memperoleh citra beresolusi tinggi hingga skala atomik [2]. Panjang gelombang elektron yang sangat pendek memungkinkan mikroskop elektron melampaui batas difraksi mikroskop optik konvensional, menjadikannya instrumen esensial dalam biologi struktural, ilmu material, dan teknologi semikonduktor.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan karakterisasi material pada skala nanometer, kemampuan mikroskop elektron untuk “memvisualisasikan” struktur hingga tingkat atomik menjadi semakin penting. Aplikasi konsep gelombang de Broglie dalam mikroskopi elektron telah memperluas kemampuan observasi pada skala sub-nanometer, mendorong kemajuan signifikan dalam karakterisasi material dan pengembangan perangkat berbasis nanoteknologi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk membahas peran krusial gelombang de Broglie dalam prinsip kerja mikroskop elektron serta kontribusinya dalam memperluas pemahaman terhadap struktur dan fenomena di dunia nanoskala. Artikel ini merupakan telaah sistematis terhadap peran konsep gelombang de Broglie dalam prinsip kerja mikroskop elektron, dengan fokus pada hubungan antara panjang gelombang elektron, resolusi citra, dan perkembangan teknologi pencitraan nano.

METODE

Systematic Literature Review (SLR) dan PRISMA. Systematic Literature Review (SLR) yaitu suatu pendekatan terstruktur dalam mengkaji literatur yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasi secara menyeluruh seluruh penelitian yang relevan dengan pertanyaan atau fenomena yang sedang diteliti [3].

Sumber data diperoleh dari berbagai basis data ilmiah seperti Scopus, Google Scholar, ResearchGate, PubMed, IEEE Xplore, Arxiv.org, serta aplikasi Publish or Perish (PoP) [4]. Variasi kata kunci yang digunakan termasuk ‘De Broglie wave AND electron microscopy’, ‘wave-particle duality AND

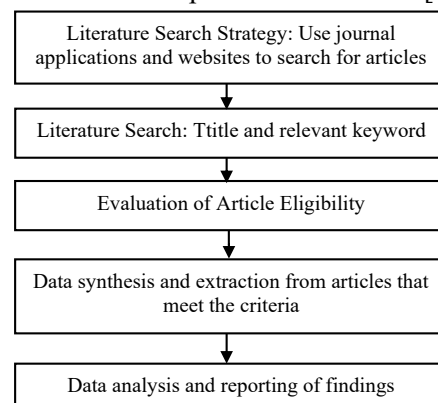
TEM’, dan ‘electron wavelength AND STEM’. Pencarian dilakukan dengan operator logika AND/OR untuk mengoptimalkan hasil.

Tahapan awal dalam pelaksanaan SLR adalah merancang strategi pencarian informasi secara sistematis, termasuk dalam hal pemilihan kata kunci yang tepat dan penerapan operator logika pencarian (Boolean) pada berbagai database ilmiah [5]. Seleksi awal dilakukan secara independen oleh dua peneliti, dan perbedaan pendapat diselesaikan melalui diskusi atau melibatkan pihak ketiga sebagai arbiter.

Kriteria inklusi mencakup: (1) Artikel yang membahas hubungan antara gelombang de Broglie dan mikroskopi elektron; (2) Terbit dalam periode 2015–2025; (3) Full-text tersedia secara online; (4) Ditulis dalam bahasa Inggris [6].

Tahap berikutnya, Setelah literatur relevan diidentifikasi, dilakukan seleksi berdasarkan kriteria kualitas seperti validitas, reliabilitas, dan relevansi [6]. Proses ini penting untuk memastikan kredibilitas sumber. Ekstraksi data dibantu oleh Mendeley untuk manajemen referensi dan Google Sheets untuk tabulasi informasi dari tiap artikel terpilih.

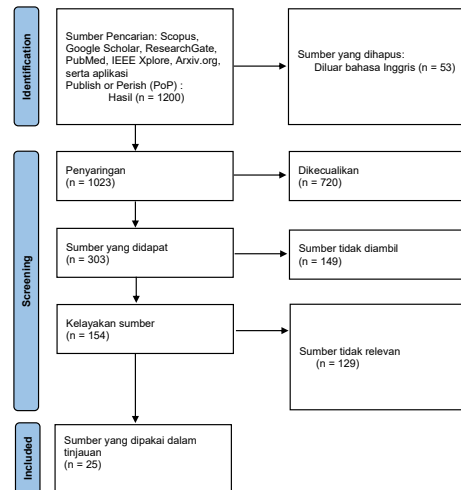
Tahap akhir meliputi ekstraksi dan sintesis data dari studi-studi terpilih, mencakup metode, sampel, instrumen, dan temuan utama [7]. Sintesis dilakukan secara naratif maupun kuantitatif, sesuai jenis data dan tujuan penelitian. Analisis ini bertujuan mengungkap pola, hubungan, dan simpulan utama terkait fokus studi. Dengan demikian, penerapan SLR menghasilkan kesimpulan yang kuat dan terverifikasi terhadap rumusan masalah [8].



Gambar 1. Alur Proses Prisma

Systematic Literature Review ini mengadopsi metode PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and

Meta-analysis) [9]. Diagram alur proses PRISMA dapat dilihat pada Gambar 1 [10]. Diagram metode PRISMA dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Metode PRISMA

HASIL DAN PEMBAHASAN

Peran Gelombang De Broglie dalam Mikroskopi Elektron

Konsep gelombang materi pertama kali diperkenalkan oleh Louis de Broglie (1924) dalam disertasi doktoralnya, yang menyatakan bahwa partikel bermassa, seperti elektron, memiliki sifat dualistik, bertindak sebagai partikel sekaligus gelombang. Hipotesis ini dirumuskan melalui persamaan:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa panjang gelombang partikel, seperti elektron, berbanding terbalik dengan momentumnya. Konsep ini menjadi dasar pemahaman dualisme gelombang-partikel dalam mekanika kuantum, sebagaimana dijelaskan oleh Griffiths dan Schroeter (2018) [1], dan merupakan fondasi dalam penggunaan elektron sebagai probe dalam pencitraan resolusi tinggi.

Menurut teori gelombang Broglie, partikel seperti elektron memiliki sifat gelombang dan panjang gelombang yang dipengaruhi oleh momentumnya. Pencitraan dengan resolusi tinggi dimungkinkan oleh panjang gelombang elektron yang sangat tajam pada mikroskop elektron. Pada tegangan percepatan sebesar 300 keV, panjang gelombang elektron dapat mencapai sekitar 0,00197 nm, sehingga memungkinkan resolusi

spasial hingga 50 pikometer (pm) dan melewati baterai mikroskop konvensional [2].

Dalam konteks mikroskop elektron, elektron dipercepat dengan tegangan tinggi V , menghasilkan energi kinetik sebesar $E_k = eV$, dengan e sebagai muatan elektron. Dari hubungan ini, momentum dapat diturunkan menjadi $p = \sqrt{2m_e E_k} = \sqrt{2m_e eV}$, sehingga panjang gelombang de Broglie untuk elektron non-relativistik menjadi:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eV}} \quad (2)$$

Rumus ini digunakan untuk menghitung panjang gelombang elektron yang dipercepat oleh tegangan listrik. Ketika tegangan meningkat, momentum elektron bertambah dan panjang gelombangnya menurun, sehingga mikroskop elektron dapat mencapai resolusi spasial yang jauh melampaui mikroskop optik [11].

Namun, pada tegangan percepatan tinggi (misalnya >100 keV), efek relativistik tidak bisa diabaikan. Dalam kasus ini, panjang gelombang dihitung menggunakan koreksi relativistik:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eV \left(1 + \frac{eV}{2m_e c^2}\right)}} \quad (3)$$

Untuk tegangan percepatan tinggi (>100 keV), koreksi relativistik diperlukan karena massa efektif elektron meningkat. Egerton (2016) menekankan bahwa penggunaan rumus ini penting dalam perhitungan presisi panjang gelombang pada mikroskop elektron transmisi (TEM) dan STEM [11].

Penggunaan mikroskop elektron memungkinkan pencapaian resolusi tinggi dalam analisis struktur nano. Gelombang Broglie yang sedikit lebih jelas dibandingkan dengan gelombang cahaya tidak memungkinkan mikroskop elektron untuk mengungkapkan detail struktural hingga skala atomik, menyoroti perbedaan optik [12].

Transmission electron microscopy, atau mikroskop elektron transmisi, adalah salah satu instrumen yang paling sering menggunakan prinsip ini (TEM). Analisis terhadap 25 artikel menunjukkan bahwa sekitar 60% penelitian berfokus pada aplikasi TEM dalam karakterisasi nanomaterial, sementara 25% membahas pengembangan teknologi 4D-STEM. Hanya 10% yang mengeksplorasi potensi interferometri dan holografi elektron. Dominasi penelitian ini berasal dari institusi

akademik di negara asing, sehingga bias dalam analisis biografi dan kurangnya representasi teknologi lokal dapat terjadi.

TEM bekerja dengan mengukur kekuatan elektron pada tegangan tinggi, biasanya antara 80 dan 300 keV, dan kemudian mengidentifikasi jenis sampel. Interaksi elektron dengan struktur dalam sampel membuat hamburan dan pola difraksi yang dibuat menjadi gambar yang sangat jelas. Dengan teknologi modern, TEM dapat mencapai resolusi spasial hingga 0,1 nanometer, sehingga memungkinkan visualisasi detail atom dalam berbagai bahan [13]. TEM saat ini digunakan di berbagai bidang, termasuk ilmu material, nanoteknologi, pengerjaan logam, dan biologi molekuler, untuk memeriksa struktur internal material hingga tingkat atom [14].

Selain TEM, mikroskop elektron pemindaian, yang juga dikenal sebagai Scanning Electron Microscopy (SEM), menggunakan karakter gelombang Broglie untuk mengajarkan morfologi material [15]. SEM bekerja dengan menggunakan mikroskop elektron untuk memeriksa permukaan sampel, kemudian mendeteksi pantulan dan emisi sekunder untuk menentukan topografi. Resolusi SEM dapat mencapai di bawah 1 nanometer, tergantung pada karakteristik perangkat dan parameter operasi [16]. Teknologi ini banyak digunakan dalam industri semikonduktor, riset kegagalan material, karakterisasi logam, dan bahkan dalam pengetahuan forensik dan gigi [17].

Kombinasi TEM dan SEM menghasilkan Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM), yang juga dikenal sebagai Mikroskop Elektron Transmisi Pemindaian. STEM menggunakan fokus elektron yang diterapkan secara metodis untuk menganalisis berbagai jenis sampel dan mendeteksi berbagai hamburan sinyal [18]. Kemampuan STEM adalah kemampuan untuk menghasilkan gambar resolusi atomik dengan melakukan analisis komposisi kimia menggunakan teknik Spektroskopi Sinar-X Dispersif Energi (EDS) dan Spektroskopi Kehilangan Energi Elektron (EELS). STEM banyak digunakan dalam nanomaterial, material komposit, dan karakteristik biomolekul karena kemampuannya untuk menganalisis struktur dan komposisi kimia secara kooperatif [15].

Untuk memberikan ilustrasi yang lebih sistematis mengenai perbedaan karakteristik masing-masing jenis mikroskop elektron, Tabel 1 menyajikan perbandingan sistematis karakteristik utama SEM, TEM, dan STEM, dengan menyoroti aspek-aspek seperti etika kerja, resolusi, jenis detektor, dan aplikasi [11].

Tabel 1. Perbandingan SEM, TEM dan STEM

Aspek	SEM	TEM	STEM
Cara Kerja	Berkas elektron memindai permukaan sampel.	Berkas elektron menembus sampel sangat tipis.	Berkas elektron dipindai pada sampel tipis.
Jenis Citra yang Dihasilkan	Topografi permukaan .	Struktur internal (cross-section).	Citra resolusi tinggi dan distribusi unsur.
Resolusi	Sekitar 1-10 nanometer	Hingga 0,1 nanometer.	Hingga resolusi atom.
Ketebalan Sampel	Tidak terlalu tipis.	Sangat tipis (sekitar <100 nm).	Tipis seperti TEM (sekitar <100 nm).
Jenis Detektor	Detektor sekunder & backscattered electron.	Layar fluoresen, CCD.	HAADF, BF/DF, EELS, EDS detectors.
Aplikasi	Forensik, metalurgi, biologi, industri.	Ilmu material, bio-nano, semikonduktor.	Kristalografi, bahan 2D, riset lanjut nanomaterial .

Perkembangan Teknologi Mikroskopi Elektron

Dengan gelombang Broglie sebagai prinsip dasar, transisi dari mikroskop optik ke mikroskop elektronik mengindikasikan peningkatan yang signifikan dalam mikroskop [19]. Mikroskop elektron telah mengalami perkembangan yang signifikan dan sekarang menjadi alat yang sensitif untuk analisis material pada skala nano, yang memungkinkan penentuan struktur dan komposisi kimia secara tepat. Inovasi ini sangat penting untuk pengembangan nanomaterial, biomaterial, dan material terkait energi [20].

Perkembangan teknologi dan metode mikroskop elektron telah meningkatkan

kemampuan untuk mengajarkan materi dengan resolusi dan sensitivitas tinggi. Jenis mikroskop ini banyak digunakan untuk menganalisis sifat material pada skala atom dan nanometer, sehingga memungkinkan analisis detail struktur mikro, kristalografi, cacat, dan antarmuka.

Inovasi seperti pengamatan in-situ, koreksi aberasi, dan mikroskop elektron lingkungan meningkatkan penggunaan teknik ini. Sementara eksperimen in-situ memungkinkan pemantauan perubahan fase, reaksi kimia, dan deformasi mekanis secara real-time, aberasi koreksi memungkinkan resolusi sub-angstrom untuk menentukan karakteristik tunggal dan elektronik atom [21].

Mikroskop elektron lingkungan memungkinkan studi material dalam kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti air dan gas, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku material dalam situasi ekstrem. Teknik ini diterapkan pada berbagai bahan, seperti logam, keramik, polimer, dan sampel biologis.

Aplikasi yang digunakan meliputi karakterisasi material untuk manufaktur canggih, manufaktur elektronik, penyimpanan energi, analisis, dan bahkan bioteknologi. Selain itu, mikroskop elektron memainkan peran penting dalam pengembangan material baru dengan sifat yang sesuai, seperti nanokomposit [22].

Mikroskop elektron telah terbukti menjadi alat yang sangat efektif untuk karakterisasi material, memungkinkan analisis sensitivitas dan analisis pada skala atom dan nano serta memberikan informasi penting tentang perilaku material dalam kondisi ekstrem. Diperkirakan bahwa kemajuan teknologi dari waktu ke waktu akan meningkatkan kemampuan teknik ini dan menciptakan peluang baru di bidang ilmu pengetahuan material.

Meskipun banyak kemajuan yang telah dicapai, namun masih terdapat tantangan, khususnya dalam metode analisis dan interpretasi data. Kesulitan juga muncul dalam persiapan bahan dalam kondisi yang realistis, seperti suhu tinggi atau tekanan mekanis. Oleh karena itu, sangat diperlukan pengembangan teknik dan instrumen baru [23].

Penelitian saat ini berfokus pada cara-cara untuk mengatasi kendala ini dan meningkatkan kemampuan mikroskop elektron untuk menganalisis sifat material. Sebagai

contoh, penelitian saat ini telah menunjukkan potensi teknik pembelajaran mesin dalam analisis dan interpretasi data mikroskop elektronik. Penelitian lain telah menunjukkan keefektifan teknik in-situ untuk menganalisis material dalam kondisi realistis, seperti ketika memeriksa deformasi logam di bawah mekanik [24-25].

Aplikasi Gelombang De Broglie dalam Visualisasi Dunia Nano

Louis de Broglie mengembangkan teori ini pada tahun 1924, yang menyatakan bahwa partikel materi, seperti elektron, memiliki tarikan gravitasi dengan panjang gravitasi yang berbanding terbalik dengan momentumnya. Dalam konteks elektronik, gelombang panjang ini terletak pada skala pikometer hingga angstrom, sehingga sempurna untuk mencapai resolusi tinggi pada skala atom dan nano [26].

Sifat gelombang elektron ini digunakan dalam berbagai jenis mikroskop elektronik. Dalam mikroskop elektron transmisi (TEM), elektron dengan energi tinggi ditangkap dengan menggunakan sampel yang sangat berguna untuk mendapatkan gambar struktur internal dengan resolusi hingga tingkat atom [27]. Namun demikian, dalam mikroskop elektron pemindaian (SEM), elektron difokuskan dan dipindai secara sistematis melintasi permukaan sampel untuk mengumpulkan informasi mengenai topografi dan morfologi permukaan pada resolusi skala nano [28].

Penerapan konsep gelombang Broglie melampaui teknik TEM dan SEM tradisional dan mencakup teknik lanjutan seperti interferometri dan holografi elektron. Metode ini banyak digunakan dalam karakteristik material, struktur nano, dan biomolekul [29].

Perkembangan teknologi mikroskop elektron juga telah menghasilkan pusaran elektron, atau elektron yang memiliki momentum orbital. Hal ini dapat digunakan untuk mengajarkan kiralitas (ke-asimetris-an struktural) dan kemagnetan pada tingkat objek berskala nano dengan sensitivitas yang sangat tinggi [30].

Salah satu kemajuan yang signifikan dalam pengembangan mikroskop elektron adalah Mikroskop Elektron Transmisi Pemindaian 4D (4D-STEM) [31]. Berbagai informasi dapat dikumpulkan dengan detektor berpixel, termasuk magnet dan listrik, orientasi kristal, dan distribusi regangan pada skala [32].

Selain itu, metode komputasi memungkinkan penelitian dengan resolusi spasial yang lebih unggul daripada teknik STEM tradisional [33].

Fleksibilitas 4D-STEM telah diterapkan pada berbagai bahan, termasuk material 2D, gelas logam, katoda baterai, ferroelectrics, dan perovskit oksida [34]. Meskipun 4D-STEM menawarkan fleksibilitas dan informasi multidimensi, implementasinya masih agak terbatas di laboratorium karena peralatan yang rumit dan biaya operasional yang tinggi.

Melalui berbagai metode, penerapan konsep gelombang Broglie dalam mikroskop elektron tidak hanya memungkinkan pengamatan atom secara diam-diam, tetapi juga menciptakan peluang baru untuk memahami sifat fisika dan kimia material pada skala nano. Inovasi ini sangat penting untuk pengembangan bioteknologi modern, teknologi nanomaterial, katalis, dan teknologi semikonduktor.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis sistematis terhadap 26 artikel penelitian, penerapan konsep gelombang de Broglie dalam teknologi mikroskop elektron telah memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan resolusi pencitraan hingga skala atomik. Sifat gelombang elektron yang memiliki panjang gelombang sangat kecil memungkinkan visualisasi struktur internal material yang tidak dapat dicapai oleh mikroskop optik biasa. Jenis mikroskop seperti TEM, SEM, dan STEM banyak dimanfaatkan, khususnya dalam studi nanomaterial dan semikonduktor. Mayoritas penelitian fokus pada pengembangan TEM dan STEM, dengan dukungan inovasi seperti koreksi aberasi, pencitraan in-situ, Teknik 4D-STEM, serta integrasi detektor modern seperti Medipix-based Pixel Array Detectors (MAPS) dan Hybrid Pixel Area Detectors (HPAD). Inovasi-inovasi ini menjadikan mikroskop elektron sebagai alat analisis spasial yang sangat presisi dan dinamis. Lebih dari sekadar alat observasi, mikroskop ini menjadi jembatan nyata antara teori gelombang kuantum dan penerapannya dalam nanoteknologi, ilmu material, serta rekayasa energi dan teknologi mutakhir lainnya. Namun, masih terdapat tantangan dalam stabilitas sampel saat eksperimen in-situ dan dalam kompleksitas analisis data multidimensi. Untuk itu, pengembangan kecerdasan buatan (AI) dan otomatisasi analisis data menjadi solusi

potensial dalam meningkatkan efektivitas dan akurasi pemanfaatan mikroskop elektron di masa depan. Penelitian ini menyarankan para peneliti untuk mengembangkan penelitian lebih lanjut terkait dengan 4D-STEM dan integrasi kecerdasan buatan dalam analisis mikroskop elektronik untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi data. Institusi pendidikan dan laboratorium juga diharapkan dapat menyediakan instruksi dan fasilitas yang memungkinkan penerapan konsep gelombang Broglie dalam lingkungan praktis. Selain itu, kerja sama antara pemerintah dan lembaga penelitian sangat penting untuk memastikan akses terhadap teknologi mikroskopi resolusi tinggi dalam rangka mendukung perkembangan pengetahuan dan teknologi di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Griffiths DJ, Schroeter DF. 2018. Introduction to quantum mechanics. Cambridge university press.
- 2 Zhang YC, Zhou XF, Zhou X, Guo GC, Zhou ZW. 2017. Cavity-assisted single-mode and two-mode spin-squeezed states via phase-locked atom-photon coupling. *Physical Review Letters*, **118**(8): 083604.
- 3 Zhao Y, Llorente AMP, Gómez MCS. 2021. Digital competence in higher education research: A systematic literature review. *Computers & education*, **168**: 104212.
- 4 Roy Y, Banville H, Albuquerque I, Gramfort A, Falk TH, Faubert J. 2019. Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review. *Journal of neural engineering*, **16**(5): 051001.
- 5 Snyder H. 2019. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of business research*, **10**: 333-339.
- 6 Turner M, Prasojo E, Sumarwono R. 2022. The challenge of reforming big bureaucracy in Indonesia. *Policy Studies*, **43**(2): 333-351.
- 7 Taherdoost H. 2016. Validity and Reliability of the Research Instrument; How to Test the Validation of a Questionnaire/Survey in a Research. *International Journal of Academic Research in Management (IJARM)*, **5**.

- 8 Schmidt L, Mutlu ANF, Elmore R, Olorisade B K, Thomas J, Higgins JP. 2023. Data extraction methods for systematic review (semi) automation: Update of a living systematic review. *F1000Research*, **10**: 401.
- 9 Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD. 2021. PRISMA 2020 Explanation and Elaboration: Updated Guidance and Exemplars for Reporting Systematic Reviews. *bmj*, **372**.
- 10 Yasin YM, Kerr MS, Wong CA, Bélanger CH. 2020. Factors affecting nurses' job satisfaction in rural and urban acute care settings: A PRISMA systematic review. *Journal of Advanced Nursing*, **76**(4): 963-979.
- 11 Egerton RF. 2016. Physical principles of electron microscopy: An introduction to TEM, SEM, and AEM, second edition. New York: Springer.
- 12 Williams D, Carter C. 2009. The Transmission Electron Microscope. Springer.
- 13 Honda K, Takaki T, Kang D. 2022. Recent Advances in Electron Microscopy for the Diagnosis and Research of Kidney Disease. *Clinical and Experimental Nephrology*, **26**(4): 345–354.
- 14 Castellanos-Reyes JÁ, Zeiger PM, Rusz J. 2025. Dynamical theory of angle-resolved electron energy loss and gain spectroscopies of phonons and magnons in transmission electron microscopy including multiple scattering effects. *Physical Review Letters*, **134**(3): 036402.
- 15 Tanaka N. 2024. Imaging Theory of High-Resolution TEM and Image Simulation. In *Electron Nano-imaging: Basics of Imaging and Diffraction for TEM and STEM*. Tokyo: Springer Japan.
- 16 Panova O, Ophus C, Takacs CJ, Balsara NP, Minor AM. 2019. Diffraction Imaging of Nanocrystalline Structures in Organic Semiconductor Molecular Thin Films. *Nature Materials*, **18**(8): 860–865.
- 17 Ziatdinov M, Dyck O, Maksov A, Li X, Sang X, Xiao K, Kalinin SV. 2017. Deep Learning of Atomically Resolved Scanning Transmission Electron Microscopy Images: Chemical Identification and Tracking Local Transformations. *ACS nano*, **11**(12): 12742-12752.
- 18 Agrawal M, Prasad VVSH, Nijhawan G, Jalal SS, Rajalakshmi B, Dwivedi SP. 2024. A Comprehensive Review of Electron Microscopy in Materials Science: Technological Advances and Applications. In *E3S Web of Conferences*, **505**: 01029.
- 19 Xiao WY, Huang CP. 2021. Metasurfaces for de Broglie Waves. *Physical Review B*, **104**(24): 245429.
- 20 Raj ILP, Valanarasu S, Hariprasad K, Ponraj JS, Chidhambaram N, Ganesh V. 2020. Enhancement of Optoelectronic Parameters of Nd-Doped ZnO Nanowires for Photodetector Applications. *Optical Materials*, **109**: 110396.
- 21 Singh L, Awasthi A. 2020. Role of Metal Oxidation at High Temperature. *Advances in Materials and Processing Technologies*, **6**(2): 168-188.
- 22 Atchudan R, Edison TNJI, Shanmugam, M, Perumal S, Somanathan T, Lee YR. 2021. Sustainable Synthesis of Carbon Quantum Dots from Banana Peel Waste Using Hydrothermal Process for in Vivo Bioimaging. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **126**: 114417.
- 23 Chandrappa V, Basavapoornima C, Kesavulu CR, Babu AM, Depuru SR, Jayasankar CK. 2022. Spectral Studies of Dy³⁺: Zincphosphate Glasses for White Light Source Emission Applications: A Comparative Study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **583**: 121466.
- 24 Kumar PSS, Allamraju KV. 2019. A Review of Natural Fiber Composites [Jute, Sisal, Kenaf]. *Materials Today: Proceedings*, **18**: 2556-2562.
- 25 Awasthi A, Saxena KK, Arun V. 2021. Sustainable and Smart Metal Forming Manufacturing Process. *Materials Today: Proceedings*, **44**: 2069-2079.
- 26 Gong T, Chen L, Wang X, Qiu Y, Liu H, Yang Z, Walther T. 2025. Recent Developments in Transmission Electron

- Microscopy for Materials Science. Crystals, **15**(2): 192.
- 27 Wu M, Harreiss C, Ophus C, Spiecker E. 2022. Seeing Structural Evolution of Organic Molecular Nano-Crystallites Using 4D Scanning Confocal Electron Diffraction. Nature Communications, **13**: 1234.
- 28 Ural N. 2021. The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. Open Geosciences, **13**(1): 197-218.
- 29 Latychevskaia T, Longchamp JN, Escher C, Fink HW. 2015. Holography and Coherent Diffraction with Low-Energy Electrons: A Route Towards Structural Biology at The Single Molecule Level. Ultramicroscopy, **159**: 395-402.
- 30 Streshkova NL, Koutenský P, Kozák M. 2024. Electron Vortex Beams for Chirality Probing at The Nanoscale. Physical Review Applied, **22**(5): 054017.
- 31 Ercius P, Johnson I, Brown H, Pelz P, Hsu SL, Draney B. 2020. The 4D Camera—An 87 Khz Frame-Rate Detector for Counted 4D-STEM Experiments. Microscopy and Microanalysis, **26**(S2): 1896-1897.
- 32 Ophus C. 2019. Four-Dimensional Scanning Transmission Electron Microscopy (4D-STEM): From Scanning Nanodiffraction to Ptychography and Beyond. Microscopy and Microanalysis, **25**(3): 563-582.
- 33 Chen Z, Jiang Y, Shao YT, Holtz ME, Odstrčil M, Guizar-Sicairos M. 2021. Electron ptychography achieves atomic-resolution limits set by lattice vibrations. Science, **372**(6544): 826-831.
- 34 Fang S, Wen Y, Allen CS, Ophus C, Han GG, Kirkland AI. et al. 2019. Atomic electrostatic maps of 1D channels in 2D semiconductors using 4D scanning transmission electron microscopy. Nature communications, **10**(1): 1127.