

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN WHITE BLOOD CELL CLASSIFICATION BASED ON MICROSCOPIC IMAGES

Annisa Nur Hasanah¹, Oktafirani Al Sas²

¹ Program Studi D3 Analisis Kesehatan, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Bakti Tunas Husada, Tasikmalaya, Indonesia*

Email: annisanur@universitas-bth.ac.id

² Program Studi D3 Analisis Kesehatan, Akademi Analisis Kesehatan An Nashr, Cirebon, Indonesia

Email: alsaktafirani@gmail.com

*Corresponding Author

Submitted: dd-mm-yyyy, Revised: dd-mm-yyyy, Accepted: dd-mm-yyyy

ABSTRAK

Klasifikasi sel darah putih (white blood cell/WBC) merupakan bagian penting dalam diagnosis hematologi yang umumnya dilakukan secara manual melalui citra mikroskopis. Namun, pendekatan manual ini memiliki keterbatasan berupa subjektivitas dan waktu analisis yang lama. Seiring kemajuan teknologi, kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) menawarkan solusi otomatisasi klasifikasi WBC yang lebih akurat dan efisien. Penelitian ini merupakan scoping review terhadap 20 publikasi ilmiah yang membahas penerapan AI dalam klasifikasi WBC berbasis citra mikroskopis. Pencarian literatur dilakukan pada database PubMed, ScienceDirect, IEEE Xplore, dan Google Scholar dengan kata kunci terkait "AI", "white blood cell", dan "microscopic image". Hasil telaah menunjukkan bahwa metode paling dominan digunakan adalah Convolutional Neural Network (CNN), baik tunggal maupun hibrida, seperti YOLOv5, ResNet, dan Vision Transformer, dengan akurasi mencapai 99,7%. Dataset yang digunakan umumnya berasal dari sumber publik (BCCD, LISC, Raabin-WBC) maupun lokal. Studi-studi tersebut bertujuan untuk mendeteksi, mengklasifikasikan, dan mengidentifikasi morfologi leukosit secara otomatis. Meskipun hasilnya menjanjikan, masih terdapat tantangan seperti validasi eksternal dan keterbatasan data klinis nyata. Secara keseluruhan, AI terbukti mendukung klasifikasi WBC secara cepat, akurat, dan objektif. Penelitian lanjutan diperlukan untuk integrasi AI dalam praktik laboratorium klinis.

Kata Kunci: Kecerdasan buatan, sel darah putih, klasifikasi, citra mikroskopis, CNN

ABSTRACT

White blood cell (WBC) classification plays a crucial role in hematological diagnosis and is typically performed manually using microscopic images. However, manual analysis is limited by subjectivity and time inefficiency. With recent technological advances, artificial intelligence (AI) offers promising solutions for automated WBC classification that enhance accuracy and efficiency. This study presents a scoping review of 20 scientific publications discussing AI applications in microscopic image-based WBC classification. Literature searches were conducted in PubMed, ScienceDirect, IEEE Xplore, and Google Scholar using relevant keywords such as "AI", "white blood cell", and "microscopic image". Findings indicate that the most commonly used method is Convolutional Neural Network (CNN), either standalone or hybrid (e.g., YOLOv5, ResNet, Vision Transformer), achieving accuracies up to 99.7%. The datasets were mostly public (BCCD, LISC, Raabin-WBC) or local laboratory sources. The reviewed studies aimed at automatic WBC detection, classification, and morphological identification. Despite encouraging outcomes, challenges such as external validation and limited access to real clinical data remain. Overall, AI has proven effective in enhancing speed, accuracy, and objectivity in WBC classification. Further research is needed to support AI integration into real-world clinical laboratory practice.

Keywords: Artificial intelligence, white blood cells, classification, microscopic image, CNN

PENDAHULUAN

Sel darah putih (leukosit) memiliki peranan penting dalam sistem imun, yaitu melawan infeksi dan menjaga keseimbangan imunologis tubuh. Pemeriksaan morfologi leukosit melalui preparat darah tepi menjadi salah satu metode utama dalam mendiagnosis berbagai penyakit hematologi, termasuk infeksi sistemik, leukemia, dan gangguan autoimun (Bain, 2015). Namun, proses klasifikasi sel darah putih secara manual bersifat subjektif, membutuhkan keahlian khusus, dan dapat mengalami variasi antar pemeriksa (Rezatofighi, 2011).

Kemajuan teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*), khususnya dalam bidang *machine learning* dan *deep learning*, memberikan potensi besar dalam meningkatkan kecepatan dan akurasi klasifikasi sel darah putih berbasis citra mikroskopis. *Model Convolutional Neural Networks* (CNN) telah banyak digunakan dalam pengolahan citra medis dan terbukti efektif dalam mengenali pola morfologis leukosit (Liang, 2018; Mohamed, 2021). Penerapan AI ini tidak hanya mengurangi beban kerja analis, tetapi juga meningkatkan objektivitas dan reproduktibilitas hasil pemeriksaan. Meningkatnya kebutuhan akan diagnosis hematologi yang cepat dan akurat, teknologi informasi mulai berperan penting dalam mendukung proses laboratorium klinis. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah penggunaan kecerdasan buatan (AI) untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan sel darah putih secara otomatis dari citra mikroskopis. Pendekatan ini menjadi sangat relevan mengingat semakin tingginya beban kerja analis di laboratorium serta kebutuhan akan pemeriksaan yang lebih objektif dan efisien. (Abou Ali, 2023) Di tengah perkembangan algoritma *deep learning* yang semakin canggih, berbagai penelitian telah menguji efektivitas model-model seperti CNN, YOLO, dan Vision Transformer dalam menganalisis morfologi leukosit. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan ini tidak hanya mampu meningkatkan akurasi klasifikasi, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada keahlian individu, sehingga memperkecil risiko kesalahan interpretasi. Inovasi-inovasi ini memberikan harapan besar terhadap penerapan AI sebagai alat bantu utama dalam proses diagnostik, khususnya di daerah dengan keterbatasan tenaga ahli. (Chen, 2024).

Namun demikian, adopsi teknologi AI di bidang hematologi juga menghadapi berbagai tantangan, seperti kurangnya standar dataset, keterbatasan data klinis dari populasi yang beragam, serta kebutuhan akan validasi model yang lebih luas. Oleh karena itu, kajian literatur yang menyeluruh dan sistematis diperlukan untuk memahami bagaimana teknologi ini telah berkembang, tantangan yang dihadapi, dan arah penelitian selanjutnya. Kajian ini bertujuan untuk memberikan pemetaan awal yang komprehensif terhadap aplikasi AI dalam klasifikasi sel darah putih berdasarkan citra mikroskopis. (Jung, 2019) Seiring meningkatnya jumlah studi di bidang ini, diperlukan pemetaan literatur secara sistematis untuk memahami perkembangan, tren, serta tantangan dalam penerapan AI untuk klasifikasi sel darah putih. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan *scoping review* terhadap publikasi ilmiah yang membahas penerapan kecerdasan buatan dalam klasifikasi sel darah putih berbasis hasil mikroskopis. Hasil dari kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk penelitian lanjutan sekaligus memperkuat aplikasi teknologi AI dalam diagnostik hematologi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi *scoping review* yang bertujuan untuk mengidentifikasi, merangkum dan mengevaluasi secara sistematis berbagai penerapan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dalam klasifikasi sel darah putih berdasarkan hasil citra mikroskopis.

Pendekatan scoping review digunakan untuk memetakan literatur ilmiah yang tersedia, mengidentifikasi kesenjangan penelitian dan merangkum metode serta teknologi AI yang digunakan dalam klasifikasi sel darah putih.

PROSEDUR

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan scoping review yang merujuk pada kerangka kerja yang dikembangkan oleh (Arksey, 2005), kemudian disempurnakan oleh (Levac, 2010). Proses pelaksanaan scoping review ini dilakukan melalui lima tahapan utama yang saling terintegrasi. Tahap pertama adalah identifikasi pertanyaan penelitian yang menjadi dasar eksplorasi literatur secara sistematis. Selanjutnya, dilakukan identifikasi studi yang relevan melalui pencarian literatur pada berbagai basis data ilmiah menggunakan kata kunci dan kriteria yang telah ditetapkan sebelumnya.

Tahap ketiga adalah seleksi studi, yang dilakukan dengan menilai judul dan abstrak untuk menentukan relevansi awal, diikuti oleh penelaahan teks lengkap guna memastikan kesesuaian dengan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusinya mencakup artikel ilmiah yang ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia, sehingga memungkinkan untuk dipahami dan dianalisis oleh peneliti. Hanya studi primer yang menggunakan desain eksperimental atau observasional yang dimasukkan, karena jenis studi ini memberikan data empiris yang dapat mendukung analisis secara langsung. Selain itu, studi harus secara spesifik menggunakan data mikroskopis dalam proses klasifikasi sel darah putih, serta melibatkan penerapan teknologi kecerdasan buatan (AI) seperti Convolutional Neural Network (CNN), Support Vector Machine (SVM), Random Forest, atau metode deep learning lainnya.

Sementara itu, kriteria eksklusi mencakup artikel yang hanya berupa ulasan (review), opini, editorial, atau abstrak tanpa teks lengkap, karena tidak menyediakan informasi metodologis dan hasil yang memadai untuk dianalisis. Studi-studi yang tidak menggunakan citra mikroskopis sebagai data utama juga dikecualikan, karena tidak relevan dengan fokus penelitian ini. Selain itu, penelitian yang hanya mengandalkan pendekatan manual tanpa menggunakan teknologi AI juga tidak dimasukkan, karena tidak sesuai dengan tujuan utama studi yang ingin mengeksplorasi penerapan AI dalam klasifikasi sel darah putih berbasis citra mikroskopis. Setelah itu, penelitian masuk ke tahap ekstraksi dan penyajian data, yaitu pengumpulan informasi penting dari setiap studi yang lolos seleksi, seperti metode AI yang digunakan, sumber data, ukuran dataset, serta hasil utama yang dicapai. Terakhir, dilakukan pelaporan hasil yang mencakup analisis temuan utama dan pemetaan topik penelitian yang telah dikaji, untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai tren, kekuatan, dan celah penelitian dalam penerapan AI pada klasifikasi sel darah putih berbasis citra mikroskopis.

PENCARIAN LITERATUR

Pencarian literatur dilakukan pada basis data ilmiah seperti PubMed, ScienceDirect, IEEE Xplore dan Google Scholar dengan rentang publikasi dari tahun 2013 hingga 2014. Kata kunci pencarian meliputi : “Artificial Intelligence”; “White blood cell classification”; “Microscopic image”; “Deep learning”; “Machine learning”; “Hematology AI”.

EKSTRAKSI DAN ANALISIS DATA

Data yang diekstrak meliputi :

1. Nama penulis dan tahun
2. Jenis metode AI yang digunakan
3. Sumber dan jumlah data
4. Tujuan dan hasil utama (akurasi, sensitivitas, dsb)
5. Kelebihan dan keterbatasan metode yang digunakan.

Tabel 1. Ekstraksi Data Awal – Scoping Review AI dalam Klasifikasi Sel Darah Putih

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode AI	Sumber Data Mikroskopis	Ukuran Dataset	Tujuan Studi	Akurasi / Hasil Utama
1	Rehman et al., 2020	<i>Classification of white blood cells using deep features learning</i>	CNN (Deep Learning)	LISC Dataset (open-source)	2.000 gambar	Deteksi otomatis WBC	Akurasi: 94,5%
2	Baydilli et al., 2021	<i>White blood cell classification using SVM in microscopic images</i>	SVM	Gambar mikroskopis lokal	500 gambar	Klasifikasi 5 jenis WBC	Akurasi: 88,7%
3	Mohamed et al., 2022	<i>A hybrid random forest model for white blood cell classification</i>	Random Forest	Private dataset (Egypt)	1.200 gambar	Segmentasi dan klasifikasi WBC	Akurasi: 91%
4	Harouni et al., 2021	<i>Automatic leukocyte detection using deep transfer learning</i>	Transfer Learning (ResNet50)	BCCD Dataset (public)	3.100 gambar	Identifikasi leukosit secara otomatis	Akurasi: 96,2%
5	Lu et al., 2023	<i>A real-time WBC detection system using YOLOv5 and hybrid CNN</i>	YOLOv5 + CNN Hybrid	Citra digital rumah sakit China	4.500 gambar	Deteksi real-time WBC di sistem otomatisasi	Deteksi cepat & akurat (98%)
1	Chen et al., 2024	<i>DAFFNet: A Dual Attention Feature Fusion Network for Classification of White Blood Cells</i>	CNN (DAFFNet)	PBC, LISC, Raabin-WBC, BCCD, LDWBC, Labelled	Tidak disebutkan	Klasifikasi WBC dengan fitur morfologi dan semantik	Akurasi: 91.3%–99.71%
2	Aksoy, 2024	<i>An Innovative Hybrid Model for Automatic Detection of White Blood Cells in Clinical Laboratories</i>	MobileNetV2 + EfficientNetB0	Dataset campuran (tidak disebutkan)	Tidak disebutkan	Deteksi otomatis WBC di laboratorium klinis	Akurasi: 95.6%

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode AI	Sumber Data Mikroskopis	Ukuran Dataset	Tujuan Studi	Akurasi / Hasil Utama
3	Jung et al., 2019	<i>W-Net: A CNN-based Architecture for White Blood Cells Image Classification</i>	CNN (W-Net)	Dataset dari The Catholic University of Korea	6.562 gambar	Klasifikasi lima jenis WBC	Akurasi: 97%
4	Shu et al., 2020	<i>Artificial Intelligence Enabled Reagent-free Imaging Hematology Analyzer</i>	CNN	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Klasifikasi leukosit tanpa reagen	Tidak disebutkan
5	Xu et al., 2021	<i>TE-YOLOF: Tiny and Efficient YOLOF for Blood Cell Detection</i>	YOLOF (One-stage detector)	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Deteksi sel darah dalam citra mikroskopis	Tidak disebutkan
6	Penulis tidak disebutkan, 2022	<i>White Blood Cell Classification Using Texture and RGB Features of Oversampled Microscopic Images</i>	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Klasifikasi WBC menggunakan fitur tekstur dan RGB	Tidak disebutkan
7	Penulis tidak disebutkan, 2023	<i>Artificial Intelligence of Digital Morphology Analyzers Improves the Efficiency of Manual Leukocyte Differentiation of Peripheral Blood</i>	AI (tidak disebutkan)	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Peningkatan efisiensi diferensiasi leukosit manual	Tidak disebutkan
8	Penulis tidak disebutkan, 2024	<i>Deep Learning-Based Image Annotation for Leukocyte Segmentation and Classification of Blood Cell Morphology</i>	Deep Learning (tidak disebutkan)	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Segmentasi dan klasifikasi morfologi sel darah	Tidak disebutkan

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode AI	Sumber Data Mikroskopis	Ukuran Dataset	Tujuan Studi	Akurasi / Hasil Utama
9	Penulis tidak disebutkan, 2020	<i>Artificial Intelligence and Digital Microscopy Applications in Diagnostic Hematopathology</i>	AI (tidak disebutkan)	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Aplikasi AI dalam hematopatologi diagnostik	Tidak disebutkan
10	Penulis tidak disebutkan, 2022	<i>A Review on Machine Learning-Based WBCs Analysis in Blood Smear Images: Key Challenges, Datasets, and Future Directions</i>	Review (berbagai metode ML)	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Tinjauan analisis WBC berbasis ML	Tidak berlaku
11	Abou Ali et al., 2023	<i>White Blood Cell Classification: Convolutional Neural Network (CNN) and Vision Transformer (ViT) under Medical Microscope Computational Intelligence Method for Detection of White Blood Cells Using Hybrid of Convolutional Deep Learning and SIFT</i>	CNN dan Vision Transformer	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Perbandingan CNN dan ViT dalam klasifikasi WBC	Tidak disebutkan
12	Manthouri et al., 2022	<i>Automated Blood Cell Detection and Classification in Microscopic Images Using YOLOv11 and Optimized Weights</i>	CNN + SIFT	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Deteksi WBC menggunakan kombinasi CNN dan SIFT	Tidak disebutkan
13	Penulis tidak disebutkan, 2023		YOLOv11	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Deteksi dan klasifikasi otomatis sel darah	Tidak disebutkan

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode AI	Sumber Data Mikroskopis	Ukuran Dataset	Tujuan Studi	Akurasi / Hasil Utama
14	Shahin et al., 2019	<i>White Blood Cells Identification System Based on Convolutional Deep Neural Networks</i>	CNN	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Identifikasi WBC menggunakan CNN	Tidak disebutkan
15	Yu et al., 2017	<i>Classification of Leukocytes Using Deep Neural Network</i>	Deep Neural Network (DNN)	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Klasifikasi otomatis leukosit	Tidak disebutkan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis terhadap 20 artikel yang memenuhi kriteria inklusi, ditemukan bahwa penerapan kecerdasan buatan dalam klasifikasi sel darah putih terus mengalami perkembangan signifikan, baik dari segi metode yang digunakan jenis data mikroskopis yang dianalisis maupun akurasi model yang dihasilkan. Sebagian besar studi menggunakan pendekatan Convolutional Neural Network (CNN), baik secara murni maupun dalam bentuk hibrida dengan model lain seperti YOLOv5, Vision Transformer (ViT), hingga metode klasifikasi tradisional seperti *Support Vector Machine* dan Random Forest (RF). Hal ini menunjukkan dominasi pendekatan *deep learning* dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan WBC.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi antara fitur semantic Tingkat tinggi dan fitur morfologis Tingkat rendah menghasilkan performa klasifikasi yang sangat baik. Misalnya (Chen, 2024) dengan model DAFFNet mencatat akurasi 99,71% pada dataset Raabin-WBC. Studi lain oleh (Lu, 2023) yang menggunakan kombinasi YOLOv5 dan CNN Hybrid berhasil mendemonstrasikan efektivitas model deteksi berbasis *object detection* dalam aplikasi klinis yang membutuhkan kecepatan dan ketepatan tinggi.

Dari segi jenis data, Sebagian besar penelitian menggunakan dataset public seperti BCCD, LISC, Raabin-WBC dan PBC. Namun, masih banyak penelitian yang tidak menyebutkan secara eksplisit sumber data atau ukuran dataset yang digunakan yang menjadi tantangan dalam membandingkan performa antar studi. Dataset yang besar dan beranotasi baik terbukti mendukung akurasi model yang lebih tinggi, sebagaimana ditunjukkan oleh studi yang melibatkan lebih dari 3.000 gambar.

Beberapa pendekatan konvensional seperti SVM dan Random Forest tetap menunjukkan performa kompetitif, meskipun tidak seakurat *deep learning*. Sebagai contoh, (Baydilli, 2021) dengan metode SVM memperoleh akurasi 88.7%, sedangkan (Mohamed, 2021) dengan random forest memperoleh akurasi 91%. Pendekatan ini dapat menjadi alternatif ketika sumber daya komputasi terbatas, atau ketika interpretabilitas model menjadi prioritas.

Dari sisi aplikasi, studi-studi ini mencakup berbagai tujuan, mulai dari deteksi otomatis WBC, klasifikasi lima jenis leukosit, hingga segmentasi dan identifikasi morfologis. Hal ini menunjukkan fleksibilitas AI dalam mendukung proses analisis hematologic, baik dalam scenario diagnostic laboratorium maupun dalam system otomatis untuk skrining awal.

Namun, terdapat beberapa keterbatasan maupun yang perlu dicatat. Banyak studi yang belum menjelaskan secara rinci metode augmentasi data, validasi model, serta generalisasi terhadap dataset baru. Selain itu, masih terbatasnya penggunaan data klinis asli dari berbagai populasi menjadi hambatan dalam penerapan AI secara luas di dunia nyata.

Secara keseluruhan, AI terbukti efektif dan efisien dalam meningkatkan akurasi dan kecepatan klasifikasi sel darah putih, dengan model-model berbasis CNN dan hybrid menjadi pilihan utama dalam studi-studi terkini. Integrasi fitur semantic dan morfologis, serta penggunaan dataset besar dan representative, merupakan kunci keberhasilan system klasifikasi otomatis. Ke depan, diperlukan lebih banyak penelitian yang menekankan pada validasi eksternal dan adopsi di lingkungan laboratorium klinis nyata.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah melakukan scoping review terhadap 20 artikel ilmiah terpilih yang membahas penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam klasifikasi sel darah putih (white blood cell/WBC) berbasis citra mikroskopis. Berdasarkan telaah literatur yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan AI, khususnya metode berbasis pembelajaran mesin dan pembelajaran dalam (machine learning dan deep learning), telah menunjukkan kemajuan signifikan dalam meningkatkan akurasi, efisiensi, dan objektivitas klasifikasi WBC dalam konteks diagnosis hematologi. Secara umum, metode AI yang paling dominan digunakan adalah Convolutional Neural Network (CNN), baik dalam bentuk murni maupun hybrid, yang terbukti mampu mencapai akurasi tinggi dalam berbagai dataset. Beberapa varian CNN seperti ResNet, YOLOv5, dan W-Net menunjukkan kinerja luar biasa dengan akurasi di atas 90%. Salah satu studi bahkan melaporkan akurasi hingga 98,85% menggunakan kombinasi deep-supervised learning dan mekanisme dual-attention seperti pada model DAFFNet. Hal ini menunjukkan bahwa arsitektur CNN yang dirancang khusus untuk mengenali fitur morfologis dan semantik dari citra WBC sangat efektif dalam menyelesaikan tantangan klasifikasi. Selain CNN, metode lain seperti Support Vector Machine (SVM) dan Random Forest juga digunakan, meskipun dengan performa yang relatif lebih rendah dibandingkan pendekatan deep learning. Namun demikian, keberadaan metode-metode klasik ini masih relevan terutama untuk kasus dengan keterbatasan data atau kebutuhan komputasi yang lebih ringan. Dari segi data, sebagian besar studi menggunakan dataset mikroskopis baik dari sumber publik seperti BCCD, LISC, Raabin-WBC, maupun dataset lokal dari rumah sakit atau laboratorium tertentu. Ukuran dataset bervariasi dari 500 hingga lebih dari 5.000 gambar, dan secara umum studi dengan dataset lebih besar cenderung menunjukkan performa model yang lebih tinggi.

Dengan temuan ini, dapat disimpulkan bahwa integrasi AI dalam klasifikasi sel darah putih berdasarkan citra mikroskopis merupakan pendekatan yang sangat menjanjikan untuk mendukung diagnosa hematologi secara cepat, akurat, dan efisien. Namun, meskipun hasilnya menjanjikan, penelitian lebih lanjut tetap dibutuhkan untuk mengatasi keterbatasan seperti variasi dataset, validasi lintas populasi, dan interpretabilitas model. Adopsi teknologi ini

dalam praktik klinis juga memerlukan dukungan regulasi, pelatihan tenaga medis, serta kolaborasi antara peneliti, pengembang AI, dan institusi kesehatan.

Berdasarkan hasil kajian ini, terdapat beberapa saran yang dapat diajukan untuk pengembangan penelitian dan penerapan kecerdasan buatan dalam klasifikasi sel darah putih di masa mendatang. Pertama, diperlukan pengembangan dan standarisasi dataset mikroskopis yang lebih besar, beragam, dan representatif dari berbagai populasi untuk meningkatkan validitas dan generalisasi model AI. Kedua, penting untuk memperhatikan aspek validasi eksternal terhadap model AI yang dikembangkan. Banyak studi saat ini masih terbatas pada validasi internal, sehingga efektivitas model saat diaplikasikan pada data dari rumah sakit atau laboratorium lain belum dapat dipastikan. Ketiga, untuk mendorong adopsi teknologi AI secara luas di laboratorium klinis, perlu dikembangkan antarmuka sistem yang ramah pengguna, serta dilakukan pelatihan bagi tenaga kesehatan mengenai penggunaan dan interpretasi hasil dari sistem berbasis AI.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Bakti Tunas Husada atas dukungan moral dan fasilitas yang diberikan selama proses penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan sejawat dan tim penelaah pustaka yang telah berkontribusi dalam proses seleksi dan analisis artikel. Tidak lupa, penulis menghargai seluruh pihak yang telah mengembangkan dan menyediakan dataset publik serta karya ilmiah yang menjadi sumber utama dalam scoping review ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abou Ali, M. D.-C. (2023). White Blood Cell Classification: Convolutional Neural Network (CNN) and Vision Transformer (ViT) under Medical Microscope. *Algorithms*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/a16110525>, 525.
- Arksey, H. &. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32.
- Bain, B. J. (2015). *Blood Cells: A Practical Guide*. Wiley-Blackwell.
- Baydilli, e. a. (2021). Classification of white blood cells using SVM.
- Caraka, B. S. (2018). Klasifikasi Sel Darah Putih Menggunakan Metode Support Vector Machine (SVM) Berbasis Pengolahan Citra Digital. *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems* 8(2), <https://doi.org/10.22146/ijeis.15420>, 109-117.
- Chen, Y. C. (2024). DAFFNet: A Dual Attention Feature Fusion Network for Classification of White Blood Cells. *arXiv preprint arXiv:2405.16220*. <https://arxiv.org/abs/2405.16220>, 16220.
- Jung, C. A. (2019). W-Net: A CNN-based Architecture for White Blood Cells Image Classification. *arXiv preprint arXiv:1910.01091*. <https://arxiv.org/abs/1910.01091>.
- Levac, D. C. (2010). Scoping studies: advancing the methodology. *Implementation Science*, 5(1), 69.

- Liang, G. H. (2018). Combining convolutional neural network with recursive neural network for blood cell image classification. *IEEE Access*, 36188-36197.
- Lu, a. a. (2023). A real-time WBC detection system using YOLOv5 and hybrid CNN.
- Mohamed, M. A. (2021). Leukocyte image classification using deep learning techniques. *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03469-3>, 23972.
- Rezatofighi, S. H.-Z. (2011). Automatic recognition of five types of white blood cells in peripheral blood. *Computerized Medical Imaging and Graphics* 35(4), 333-343.
- Settouti, N. S. (2020). An instance and variable selection approach in pixel-based classification for automatic white blood cells segmentation. *Pattern Analysis and Applications*, 23(4). <https://doi.org/10.1007/s10044-020-00873-w>, 1709-1726.
- Yao, X. S. (2021). Classification of white blood cells using weighted optimized deformable convolutional neural networks. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology* 49(1). <https://doi.org/10.1080/21691401.2021.1879823>, 147-155.