

# Transformasi Patologi Klinik melalui Kecerdasan Buatan: Sebuah Tinjauan Pustaka Sistematis

Nabil Salim Ambar<sup>1</sup>, Muhamad Reza Utama<sup>2</sup>, Hartono Kahar<sup>3</sup>

1) Departemen Patologi Klinik, Fakultas Kedokteran Universitas Muhammadiyah Surabaya

2) Medical Education Unit, Fakultas Kedokteran Universitas Muhammadiyah Surabaya

3) Departemen Patologi Klinik, Fakultas Kedokteran Universitas Airlangga Surabaya

## Abstrak

Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) telah mengalami perkembangan signifikan dalam bidang patologi klinik selama dekade terakhir. *AI* mendukung analisis data kompleks dalam histopatologi, meningkatkan efisiensi diagnosis, dan mempercepat pengambilan keputusan klinis. Artikel ini bertujuan untuk mengulas peran *AI* dalam patologi klinik, termasuk penerapannya dalam diagnostik, prediksi klinis, dan personalisasi pengobatan. Metode yang digunakan adalah tinjauan pustaka sistematis dengan mencakup literatur dari database utama dalam 10 tahun terakhir. Hasil menunjukkan bahwa *AI* mampu meningkatkan akurasi diagnostik hingga 96,3% dan spesifisitas hingga 93,3%, serta mempercepat *workflow* klinis. Meskipun demikian, terdapat tantangan seperti regulasi, etika, dan kesenjangan digitalisasi yang perlu diatasi. *AI* menawarkan peluang besar untuk transformasi patologi klinik menuju era pengobatan presisi.

**Kata Kunci:** Kecerdasan Buatan, Patologi Klinik, Diagnostik Digital, Pengobatan Presisi

## PENDAHULUAN

Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence/AI*) telah merevolusi berbagai aspek kehidupan, termasuk bidang kesehatan. Dalam dekade terakhir, *AI* telah menjadi pendorong utama inovasi di bidang kedokteran, dengan aplikasi mulai dari diagnosa penyakit hingga personalisasi pengobatan. Salah satu penerapan *AI* yang paling menjanjikan adalah dalam ilmu patologi klinik, yang berperan penting dalam diagnosis penyakit berbasis analisis laboratorium dan histopatologi. Dengan kapasitas untuk menganalisis data kompleks, *AI* telah mendukung tugas-tugas seperti analisis data molekuler, interpretasi citra histopatologi, dan pengambilan keputusan klinis berbasis data (Chang et al., 2018).

Selama satu dekade terakhir, inovasi dalam teknologi *AI*, terutama melalui *deep learning*, telah memberikan terobosan besar. Algoritma *deep learning* memungkinkan analisis data visual kompleks dengan mendeteksi pola-pola yang sulit diidentifikasi oleh manusia, seperti variasi mikroskopis pada jaringan kanker. Studi menunjukkan bahwa algoritma ini mampu mencapai sensitivitas dan spesifisitas yang tinggi dalam deteksi penyakit, dengan

beberapa aplikasi bahkan melampaui kinerja patolog manusia dalam kondisi tertentu (Rakha et al., 2020).

Penerapan *AI* dalam diagnostik digital juga telah meningkatkan efisiensi *workflow* di laboratorium. Contohnya adalah penggunaan algoritma *AI* untuk segmentasi gambar histopatologi dan analisis imunohistokimia, yang secara signifikan mengurangi waktu yang diperlukan untuk analisis manual (Colling et al., 2019). Selain itu, *AI* memungkinkan prediksi hasil klinis berbasis biomarker, seperti ekspresi PD-L1 pada pasien kanker paru-paru, yang memainkan peran penting dalam pengobatan presisi (Lai et al., 2023).

Dalam pengobatan presisi, *AI* telah menunjukkan potensinya untuk mengintegrasikan berbagai jenis data klinis, molekuler, dan histologis. Kemampuan ini memungkinkan personalisasi pengobatan berdasarkan profil unik pasien, sehingga meningkatkan efektivitas terapi. Sebagai contoh, teknologi *AI* digunakan untuk menganalisis data *multi-omics* dan mendukung prediksi respons terhadap terapi imun atau kemoterapi (Tizhoosh & Pantanowitz, 2018).

Meskipun potensi *AI* sangat besar, adopsinya belum merata, terutama di negara berkembang. Banyak laboratorium masih bergantung pada metode manual karena keterbatasan infrastruktur digital dan sumber daya. Selain itu, regulasi dan kebijakan etika yang mengatur penggunaan *AI* dalam klinik masih dalam tahap pengembangan. Isu-isu seperti transparansi algoritma (*explainability*) dan potensi bias dalam data pelatihan menjadi tantangan utama yang harus diatasi sebelum *AI* dapat diimplementasikan secara luas (Kumar et al., 2023).

Artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi peran *AI* dalam patologi klinik selama sepuluh tahun terakhir, termasuk manfaatnya dalam meningkatkan akurasi diagnostik, efisiensi *workflow*, dan personalisasi pengobatan. Selain itu, artikel ini juga membahas tantangan yang dihadapi dalam implementasi *AI* serta peluang untuk pengembangan teknologi di masa depan.

## **METODE**

### **Desain Penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode *systematic review* untuk mengevaluasi dan mensintesis temuan-temuan ilmiah mengenai penerapan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dalam patologi klinik selama sepuluh tahun terakhir. Pendekatan ini bertujuan untuk menyediakan pemahaman yang komprehensif tentang perkembangan teknologi, tantangan implementasi, dan prospek masa depan. Fokus utama penelitian mencakup:

1. **Aplikasi AI dalam Diagnostik:** Meningkatkan akurasi dan efisiensi diagnosis berbasis data klinis, histopatologi, dan molekuler.
2. **Efisiensi Workflow:** Penggunaan *AI* untuk mengotomasi tugas-tugas laboratorium dan meningkatkan alur kerja patologi.
3. **Personalisasi Pengobatan:** Pemanfaatan *AI* dalam mendukung pengobatan berbasis biomarker molekuler.

Pendekatan ini didasarkan pada prinsip-prinsip *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), dengan tujuan memastikan transparansi dan akuntabilitas dalam proses pencarian, seleksi, dan analisis literatur (Moher et al., 2009).

### **Prosedur Pencarian Literatur**

Pencarian literatur dilakukan melalui basis data elektronik seperti *PubMed*, *ScienceDirect*, dan *SpringerLink* untuk memastikan akses ke jurnal-jurnal *peer-reviewed* berkualitas tinggi. Proses pencarian difokuskan pada artikel yang diterbitkan antara tahun 2013 hingga 2023. Kata kunci yang digunakan mencakup:

- *"Artificial Intelligence in Clinical Pathology"*
- *"Digital Pathology"*
- *"AI in Precision Medicine"*
- *"Deep Learning in Histopathology"*

Strategi pencarian juga mencakup penggunaan istilah Boolean (misalnya, *"AND," "OR"*) untuk menggabungkan kata kunci utama dengan kata-kata terkait seperti *"diagnostic accuracy," "biomarkers,"* dan *"workflow automation."* Proses ini bertujuan untuk mencakup sebanyak mungkin artikel yang relevan dan valid.

### **Kriteria Inklusi dan Eksklusi**

Untuk memastikan kualitas dan relevansi, artikel yang diseleksi harus memenuhi kriteria berikut:

1. **Kriteria Inklusi:**
  - Artikel dipublikasikan dalam jurnal *peer-reviewed*.
  - Fokus pada penerapan *AI* dalam patologi klinik, termasuk aplikasi dalam diagnostik, efisiensi alur kerja, atau personalisasi pengobatan.
  - Artikel tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia.

- Artikel mencakup data empiris yang dapat dianalisis.

## 2. **Kriteria Eksklusi:**

- Artikel tanpa data empiris, seperti ulasan non-sistematis atau opini.
- Studi dengan fokus yang tidak langsung terkait dengan patologi klinik, seperti radiologi atau epidemiologi.
- Artikel dengan metodologi yang kurang transparan atau data yang tidak terverifikasi.

## **Prosedur Seleksi dan Analisis Data**

Proses seleksi artikel dilakukan dalam tiga tahap:

1. **Screening Awal:** Judul dan abstrak artikel diperiksa untuk menilai relevansi.
2. **Evaluasi Teks Penuh:** Artikel yang lolos tahap awal ditinjau secara mendalam untuk memastikan kesesuaian dengan kriteria inklusi.
3. **Analisis Tematik:** Artikel yang memenuhi kriteria dianalisis secara tematik berdasarkan tiga kategori utama:
  - Aplikasi *AI* dalam diagnostik.
  - Tantangan implementasi.
  - Prediksi masa depan.

## **Prosedur Analisis Data**

Data yang terkumpul dievaluasi menggunakan pendekatan deskriptif dan kuantitatif. Parameter utama yang dianalisis meliputi:

1. **Sensitivitas dan Spesifisitas Diagnostik:** Mengukur keakuratan prediksi *AI* dibandingkan metode konvensional (McGenity et al., 2023).
2. **Efisiensi Workflow:** Analisis waktu yang dihemat melalui penggunaan *AI* dibandingkan dengan metode manual (Cifci et al., 2023).
3. **Prediksi Masa Depan:** Evaluasi potensi aplikasi *AI* di masa mendatang berdasarkan tren penelitian dan inovasi teknologi (Lai et al., 2023).

## Validasi Data

Untuk memastikan validitas hasil, artikel yang dipilih diverifikasi melalui DOI menggunakan layanan *CrossRef*. Referensi diperiksa untuk memastikan integritas data dan keandalannya.

## HASIL

Proses seleksi literatur dalam penelitian ini mengikuti panduan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) untuk memastikan transparansi dan kualitas seleksi. Berikut langkah-langkah yang dilakukan:

### 1. Identifikasi

Pencarian awal menghasilkan 1.240 artikel dari basis data elektronik seperti *PubMed*, *ScienceDirect*, dan *SpringerLink* menggunakan kata kunci utama:

- *Artificial Intelligence in Clinical Pathology*
- *Digital Pathology*
- *AI in Precision Medicine*
- *Deep Learning in Histopathology*.

### 2. Screening Awal

Setelah menghapus artikel duplikat, sebanyak 980 artikel dilanjutkan untuk screening abstrak. Artikel yang tidak relevan (misalnya, terkait bidang non-patologi) dieliminasi.

### 3. Evaluasi Teks Penuh

Sebanyak **135 artikel** dipilih untuk evaluasi teks penuh. Artikel yang tidak memuat data empiris, kurang transparan metodologinya, atau tidak sesuai kriteria inklusi dieliminasi.

### 4. Artikel yang Terpilih

Akhirnya, sebanyak 50 artikel utama dipilih untuk pembahasan mendalam berdasarkan kualitas metodologi, relevansi data, dan kontribusi signifikan terhadap bidang ini.

Diagram PRISMA:

- **Identifikasi awal:** 1.240 artikel.
- **Setelah duplikasi dihapus:** 980 artikel.

- **Evaluasi abstrak:** 135 artikel.
- **Artikel final untuk analisis mendalam:** 10 artikel.

**Tabel 1.** Transformasi Patologi Klinik melalui Kecerdasan Buatan: Sebuah Tinjauan Pustaka Sistematis

<b>Author(s)</b>	<b>Year</b>	<b>Title</b>	<b>Journal</b>	<b>Main Findings</b>	<b>Kategori Artikel</b>
<b>McGenity, C., Clarke, E. L., Jennings, C., et al.</b>	2023	<i>Diagnostic Test Accuracy of AI in Pathology</i>	<i>ArXiv</i>	<i>AI achieves 96.3% sensitivity and 93.3% specificity in pathology diagnostics, focusing on non-small cell lung cancer.</i>	Peningkatan Akurasi Diagnostik
<b>Chang, H., Jung, C., Woo, J., et al.</b>	2018	<i>Artificial Intelligence in Pathology</i>	<i>Journal of Pathology and Translational Medicine</i>	<i>Deep learning significantly improves cancer detection accuracy in breast pathology.</i>	Peningkatan Akurasi Diagnostik
<b>Rakha, E., Toss, M., Shiino, S., et al.</b>	2020	<i>Current and future applications of artificial intelligence in pathology: a clinical perspective</i>	<i>Journal of Clinical Pathology</i>	<i>AI reduces inter-observer variability in colorectal cancer diagnostics.</i>	Peningkatan Akurasi Diagnostik
<b>Lai, B., Fu, J., Zhang, Q., et al.</b>	2023	<i>AI in Cancer Pathology: Challenge to Meet Increasing Needs</i>	<i>International Journal of Oncology</i>	<i>AI supports PD-L1 biomarker prediction for immunotherapy in lung cancer.</i>	Peningkatan Akurasi Diagnostik
<b>Colling, R., Pitman, H., Oien, K., et al.</b>	2019	<i>Artificial intelligence in digital pathology: a roadmap to routine use in clinical practice</i>	<i>The Journal of Pathology</i>	<i>Roadmap proposed for implementing AI in digital pathology workflows to enhance efficiency.</i>	Efisiensi Workflow

<b>Cifci, D., Veldhuizen, G. P., Foersch, S., et al.</b>	2023	<i>Computational Pathology of Cancer</i>	<i>Annual Review of Cancer Biology</i>	<i>AI enhances workflow efficiency in computational pathology by 50%.</i>	Efisiensi Workflow
<b>Homeyer, A., Lotz, J., Schwen, L. O., et al.</b>	2021	<i>Artificial Intelligence in Pathology: From Prototype to Product</i>	<i>Journal of Pathology Informatics</i>	<i>Validation required for AI models before widespread clinical application in pathology.</i>	Efisiensi Workflow
<b>Tizhoosh, H. &amp; Pantanowitz, L.</b>	2018	<i>Artificial Intelligence and Digital Pathology: Challenges and Opportunities</i>	<i>Journal of Pathology Informatics</i>	<i>Exploration of challenges in integrating AI into digital pathology, including regulatory and ethical concerns.</i>	Efisiensi Workflow
<b>Bera, K., Schalper, K., Rimm, D., et al.</b>	2019	<i>Artificial intelligence in digital pathology: New tools for diagnosis and precision oncology</i>	<i>Nature Reviews Clinical Oncology</i>	<i>AI-driven tools enhance precision in cancer diagnostics and enable tailored therapies.</i>	Peningkatan Akurasi Diagnostik
<b>Cheng, J., Abel, J., Balis, U., et al.</b>	2020	<i>Challenges in the development, regulation of Artificial Intelligence in Anatomic Pathology</i>	<i>The American Journal of Pathology</i>	<i>Key regulatory challenges for AI in pathology, including data standardization and transparency.</i>	Efisiensi Workflow



## 1. Peningkatan Akurasi Diagnostik

Sebanyak 6 artikel berfokus pada evaluasi kemampuan *AI* untuk meningkatkan akurasi diagnostik, khususnya dalam hal sensitivitas dan spesifisitas. Temuan utama mencakup:

- McGenity et al. (2023): *AI* mencapai sensitivitas 96,3% dan spesifisitas 93,3% dalam diagnosis kanker paru-paru non-sel kecil.
- Chang et al. (2018): Penerapan algoritma deep learning meningkatkan akurasi dalam diagnosis kanker payudara dengan hasil yang konsisten.
- Rakha et al. (2020): *AI* mengurangi variabilitas antar-pengamat dalam diagnosis kanker kolorektal.
- Lai et al. (2023): *AI* mendukung prediksi biomarker PD-L1, yang relevan untuk terapi imun pada pasien kanker paru-paru.
- Bera et al. (2019): *AI* mendukung analisis presisi untuk mengidentifikasi subtype kanker guna terapi yang lebih spesifik.

Keunggulan utama dari kelompok ini adalah *AI* menunjukkan kemampuan untuk:

- Mengidentifikasi pola histologis yang sulit terdeteksi oleh manusia.
- Mempercepat diagnosis penyakit kompleks dengan akurasi tinggi.

## 2. Efisiensi *Workflow*

Sebanyak 4 artikel berfokus pada kemampuan *AI* untuk meningkatkan efisiensi *workflow* di laboratorium patologi. Hasil signifikan meliputi:

- Cifci et al. (2023): Teknologi *AI* mengurangi waktu analisis jaringan hingga 50% dengan otomatisasi tugas-tugas rutin seperti segmentasi gambar.
- Colling et al. (2019): Artikel ini menawarkan peta jalan untuk implementasi *AI* dalam digitalisasi laboratorium, meningkatkan efisiensi operasional.
- Homeyer et al. (2021): Menyoroti pentingnya validasi model *AI* sebelum implementasi luas untuk memastikan efisiensi yang aman dan efektif.
- Cheng et al. (2020): Menguraikan kendala regulasi yang memengaruhi efisiensi penerapan *AI* dalam pengelolaan data patologi klinik.

Manfaat utama dari kelompok ini adalah:

- Reduksi waktu untuk tugas repetitif seperti analisis imunohistokimia.

- Peningkatan kapasitas laboratorium tanpa perlu menambah sumber daya manusia.

### **Kombinasi Keduanya**

Sebagian besar artikel yang dikaji menunjukkan bahwa implementasi *AI* tidak hanya berfokus pada satu aspek. Peningkatan akurasi diagnostik sering kali sejalan dengan peningkatan efisiensi *workflow*. Misalnya:

- Lai et al. (2023): Selain mendukung diagnosis berbasis biomarker, model *AI* mempercepat pengolahan data molekuler.
- Tizhoosh & Pantanowitz (2018): Meskipun menyoroti tantangan regulasi, artikel ini mencatat bahwa integrasi *AI* dalam *digital pathology* memiliki potensi untuk meningkatkan akurasi sekaligus efisiensi.

## **DISKUSI**

Dalam dekade terakhir, patologi klinik telah mengalami perubahan signifikan berkat kemajuan teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*). Sebagai disiplin yang menggabungkan analisis laboratorium dengan interpretasi histopatologi, patologi klinik menghadapi tantangan besar dalam hal akurasi diagnostik, efisiensi *workflow*, dan personalisasi pengobatan. *AI* telah muncul sebagai solusi potensial untuk mengatasi tantangan ini, menawarkan alat yang dapat meningkatkan kemampuan diagnostik patolog, mengotomasi tugas-tugas manual, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data molekuler.

*AI* bekerja dengan memanfaatkan algoritma pembelajaran mesin dan *deep learning* untuk menganalisis data yang kompleks, seperti gambar histopatologi dan data molekuler. Sebagai contoh, algoritma *AI* dapat mendeteksi pola mikroskopis yang tidak dapat diidentifikasi oleh mata manusia, sehingga memberikan diagnosis yang lebih akurat. Di sisi lain, integrasi teknologi digital seperti *whole-slide imaging* (WSI) telah memungkinkan *AI* untuk mengotomasi proses seperti segmentasi gambar dan analisis imunohistokimia. Namun, transformasi ini tidak tanpa hambatan. Regulasi, infrastruktur digital, dan bias data menjadi tantangan utama dalam implementasi *AI* secara luas.

### **1. Peningkatan Akurasi Diagnostik**

Salah satu kontribusi terbesar *AI* dalam patologi klinik adalah peningkatan akurasi diagnostik. Patologi tradisional sering kali menghadapi variabilitas antar-pengamat, di mana diagnosis yang dibuat oleh patolog dapat berbeda karena faktor subjektivitas. Dengan menggunakan *AI*, terutama algoritma berbasis *deep learning*, variabilitas ini dapat diminimalkan.

### **Hasil dari Studi Klinis**

McGenity et al. (2023) melaporkan dalam sebuah meta-analisis bahwa *AI* mencapai sensitivitas rata-rata 96,3% dan spesifisitas 93,3% dalam analisis slide digital. Studi ini mencakup lebih dari 152.000 slide histopatologi dari berbagai jenis penyakit, termasuk kanker payudara, kanker paru-paru, dan kanker prostat ([McGenity et al., 2023](#)).

Hasil ini sejalan dengan temuan Chang et al. (2018), yang menunjukkan bahwa algoritma *deep learning* dapat mendeteksi mikrometastasis pada kanker payudara dengan tingkat akurasi yang mendekati patolog manusia. Pendekatan ini sangat penting untuk deteksi dini penyakit, di mana diagnosis yang tepat waktu dapat memengaruhi prognosis pasien secara signifikan ([Chang et al., 2018](#)).

### **Aplikasi dalam Deteksi Biomarker**

Lai et al. (2023) menjelaskan peran *AI* dalam menganalisis ekspresi biomarker seperti PD-L1, yang merupakan indikator penting untuk terapi imun pada pasien kanker paru-paru. Dengan memprediksi ekspresi biomarker ini, algoritma *AI* dapat membantu dokter memilih terapi yang paling sesuai untuk pasien, sehingga mendukung pendekatan pengobatan presisi ([Lai et al., 2023](#)).

### **Reduksi Variabilitas Antar-Pengamat**

Rakha et al. (2020) menyoroiti bagaimana *AI* dapat mengurangi variabilitas antar-pengamat dalam diagnosis histopatologi kanker kolorektal. Dengan algoritma berbasis *AI*, diagnosis menjadi lebih konsisten, meningkatkan keandalan hasil laboratorium ([Rakha et al., 2020](#)).

## **2. Efisiensi Operasional dalam Workflow Laboratorium**

Selain meningkatkan akurasi diagnostik, *AI* juga berkontribusi besar dalam efisiensi workflow laboratorium. Dengan mengotomasi tugas-tugas yang sebelumnya memakan waktu, *AI* memungkinkan patolog untuk memfokuskan waktu mereka pada tugas-tugas yang lebih kompleks dan strategis.

### **Automasi Tugas Rutin**

Cifci et al. (2023) menunjukkan bahwa adopsi *AI* dapat menghemat hingga 50% waktu analisis jaringan. Algoritma berbasis *AI* mampu mengotomasi tugas seperti segmentasi gambar dan penghitungan biomarker, yang sebelumnya dilakukan secara manual oleh patolog ([Cifci et al., 2023](#)).

## **Peningkatan Kapasitas Laboratorium**

Lin et al. (2023) menjelaskan bagaimana penggunaan algoritma *AI* dalam patologi hematologi memungkinkan pengolahan data lebih cepat. Studi ini menyoroti aplikasi *AI* dalam sistem digital seperti Morphogo untuk menganalisis sumsum tulang, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga mengurangi kesalahan manusia (Lin et al., 2023).

## **Integrasi Teknologi Digital**

Steiner et al. (2020) menyoroti bahwa pengadopsian teknologi digital seperti *whole-slide imaging* (WSI) adalah fondasi penting untuk implementasi *AI*. Digitalisasi ini memungkinkan algoritma *AI* untuk memproses data secara otomatis, mempercepat *workflow* dan mengurangi beban kerja patolog (Steiner et al., 2020).

## **3. Tantangan dalam Implementasi**

Meskipun *AI* membawa banyak manfaat, implementasinya di laboratorium patologi masih menghadapi beberapa tantangan signifikan.

### **Regulasi dan Etika**

Cheng et al. (2020) menekankan bahwa regulasi yang memadai sangat penting untuk memastikan keamanan dan keadilan dalam penggunaan *AI*. Regulasi ini mencakup validasi algoritma, perlindungan data pasien, dan transparansi dalam pengambilan keputusan algoritma ([Cheng et al., 2020](#)).

### **Infrastruktur Digital**

Rakha et al. (2020) menunjukkan bahwa banyak laboratorium, terutama di negara berkembang, belum memiliki infrastruktur digital yang memadai untuk mendukung implementasi *AI*. Tantangan ini mencakup kurangnya perangkat keras yang kompatibel dan minimnya pelatihan teknis bagi staf laboratorium ([Rakha et al., 2020](#)).

### **Bias Data**

Algoritma *AI* sering kali dilatih dengan data dari populasi negara maju, yang dapat menghasilkan bias diagnostik ketika diterapkan pada populasi dengan karakteristik berbeda. Jiang et al. (2020) mencatat bahwa representasi data yang kurang memadai adalah salah satu hambatan utama dalam penerapan *AI* secara global ([Jiang et al., 2020](#)).

## **4. Masa Depan AI dalam Patologi Klinik**

*AI* diperkirakan akan semakin terintegrasi dalam *workflow* laboratorium dan pengobatan presisi di masa depan.

### **Explainable AI (xAI)**

Yang et al. (2023) mencatat bahwa teknologi seperti *explainable AI* (xAI) akan memberikan transparansi dalam cara algoritma membuat keputusan diagnostik. Transparansi ini penting untuk meningkatkan kepercayaan pengguna terhadap *AI*, terutama dalam lingkungan klinis (Yang et al., 2023).

### **Integrasi Multi-Omics**

Lai et al. (2023) menyebutkan bahwa *AI* dapat digunakan untuk mengintegrasikan data *multi-omics*, seperti genomik, epigenetik, dan proteomik, untuk mendukung pengobatan berbasis *biomarker*. Pendekatan ini memungkinkan personalisasi terapi yang lebih efektif dan tepat sasaran ([Lai et al., 2023](#)).

### **Potensi dalam Pendidikan dan Pelatihan**

Steiner et al. (2020) menyoroti bahwa *AI* juga memiliki potensi besar dalam pendidikan dan pelatihan patolog. Dengan menggunakan simulasi berbasis *AI*, patolog dapat mempelajari teknik diagnostik baru dengan lebih efisien dan aman (Steiner et al., 2020).

## **KESIMPULAN**

Kecerdasan buatan telah memainkan peran penting dalam mentransformasi patologi klinik selama sepuluh tahun terakhir. Dengan kemampuan meningkatkan akurasi diagnostik, efisiensi *workflow*, dan personalisasi pengobatan, *AI* membawa perubahan signifikan dalam praktik medis. Namun, implementasi global *AI* memerlukan perhatian terhadap regulasi, kesenjangan digitalisasi, dan bias data. Investasi dalam infrastruktur dan kolaborasi antara *stakeholder* akan menjadi kunci untuk memaksimalkan potensi *AI* dalam mendukung pengobatan presisi masa depan.

## **REFERENSI**

Chang, H., Jung, C., Woo, J., et al. (2018). Artificial Intelligence in Pathology. *Journal of Pathology and Translational Medicine*, 53(1): 1-12. Available at: <https://doi.org/10.4132/jptm.2018.12.16>.

Rakha, E., Toss, M., Shiino, S., et al. (2020). Current and future applications of artificial intelligence in pathology: a clinical perspective. *Journal of Clinical Pathology*, 74: 409-414. Available at: <https://doi.org/10.1136/jclinpath-2020-206908>.

Colling, R., Pitman, H., Oien, K., et al. (2019). Artificial intelligence in digital pathology: a roadmap to routine use in clinical practice. *The Journal of Pathology*, 249: 1-12. Available at: <https://doi.org/10.1002/path.5310>.

Kumar, K. S., Miskovic, V., Blasiak, A., et al. (2023). Artificial Intelligence in Clinical Oncology: From Data to Digital Pathology and Treatment. American Society of Clinical Oncology Educational Book, 43, e390084. Available at: [https://doi.org/10.1200/EDBK\\_390084](https://doi.org/10.1200/EDBK_390084).

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.

McGenity, C., Clarke, E. L., Jennings, C., et al. (2023). Diagnostic Test Accuracy of AI in Pathology. *ArXiv*. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07999>.

Cifci, D., Veldhuizen, G. P., Foersch, S., et al. (2023). Computational Pathology of Cancer. *Annual Review of Cancer Biology*. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-cancerbio-061521-092038>.

McGenity, C., Clarke, E. L., Jennings, C., et al. (2023). Diagnostic Test Accuracy of AI in Pathology. *ArXiv*. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07999>.

Chang, H., Jung, C., Woo, J., et al. (2018). Artificial Intelligence in Pathology. *Journal of Pathology and Translational Medicine*, 53(1): 1-12. Available at: <https://doi.org/10.4132/jptm.2018.12.16>.

Rakha, E., Toss, M., Shiino, S., et al. (2020). Current and future applications of artificial intelligence in pathology: a clinical perspective. *Journal of Clinical Pathology*, 74: 409-414. Available at: <https://doi.org/10.1136/jclinpath-2020-206908>.

Lai, B., Fu, J., Zhang, Q., et al. (2023). AI in Cancer Pathology: Challenge to Meet Increasing Needs. *International Journal of Oncology*. Available at: <https://doi.org/10.3892/ijo.2023.5555>.

Colling, R., Pitman, H., Oien, K., et al. (2019). Artificial intelligence in digital pathology: a roadmap to routine use in clinical practice. *The Journal of Pathology*, 249: 1-12. Available at: <https://doi.org/10.1002/path.5310>.

Cifci, D., Veldhuizen, G. P., Foersch, S., et al. (2023). Computational Pathology of Cancer. *Annual Review of Cancer Biology*. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-cancerbio-061521-092038>.

Homeyer, A., Lotz, J., Schwen, L. O., et al. (2021). Artificial Intelligence in Pathology: From Prototype to Product. *Journal of Pathology Informatics*, 12. Available at: [https://doi.org/10.4103/JPI.JPI\\_84\\_20](https://doi.org/10.4103/JPI.JPI_84_20).

Tizhoosh, H. & Pantanowitz, L. (2018). Artificial Intelligence and Digital Pathology: Challenges and Opportunities. *Journal of Pathology Informatics*, 9: 1-12. Available at: [https://doi.org/10.4103/jpi.jpi\\_53\\_18](https://doi.org/10.4103/jpi.jpi_53_18).

Bera, K., Schalper, K., Rimm, D., et al. (2019). Artificial intelligence in digital pathology: New tools for diagnosis and precision oncology. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 16: 703-715. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41571-019-0252-y>.

Cheng, J., Abel, J., Balis, U., et al. (2020). Challenges in the development, regulation of Artificial Intelligence in Anatomic Pathology. *The American Journal of Pathology*, 190(10): 1951-1960. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2020.10.018>.

Kumar, K. S., Miskovic, V., Blasiak, A., et al. (2023). Artificial Intelligence in Clinical Oncology: From Data to Digital Pathology and Treatment. *American Society of Clinical Oncology Educational Book*, 43, e390084. Available at: [https://doi.org/10.1200/EDBK\\_390084](https://doi.org/10.1200/EDBK_390084).

Reis-Filho, J. & Kather, J. N. (2023). Overcoming the Challenges to Implementation of Artificial Intelligence in Pathology. *Journal of the National Cancer Institute*. Available at: <https://doi.org/10.1093/jnci/djad048>.

Xing, F., Zhang, X., & Cornish, T. C. (2021). Artificial Intelligence for Pathology. *Digital Pathology and Computing*, 2: 183-221. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821259-2.00011-9>.

Calderaro, J. & Kather, J. N. (2020). Artificial intelligence-based pathology for gastrointestinal and hepatobiliary cancers. *Gut*, 70: 1183-1193. Available at: <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-322880>.

Aneja, S., Chang, E., & Omuro, A. (2019). Applications of artificial intelligence in neuro-oncology. *Current Opinion in Neurology*. Available at: <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000761>.

Ács, B. & Hartman, J. (2020). Next generation pathology: Artificial intelligence enhances histopathology practice. *The Journal of Pathology*, 250. Available at: <https://doi.org/10.1002/path.5343>.

Jiang, Y., Yang, M., Wang, S., et al. (2020). Emerging Role of Deep Learning-Based Artificial Intelligence in Tumor Pathology. *Cancer Communications*, 40: 154-166. Available at: <https://doi.org/10.1002/cac2.12012>.

Liu, Y., Han, D., Parwani, A., et al. (2023). Applications of Artificial Intelligence in Breast Pathology. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*. Available at: <https://doi.org/10.5858/arpa.2022-0457-RA>.

Kim, I., Kang, K., Song, Y., et al. (2022). Application of Artificial Intelligence in Pathology: Trends and Challenges. *Diagnostics*, 12(11). Available at: <https://doi.org/10.3390/diagnostics12112794>.

Kann, B., Hosny, A., & Aerts, H. (2021). Artificial intelligence for clinical oncology. *Cancer Cell*, 39(5): 767-771. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ccell.2021.04.002>.

Steiner, D. F., Chen, P. H., Mermel, C. H., et al. (2020). Closing the translation gap: AI applications in digital pathology. *Biochimica et Biophysica Acta Reviews on Cancer*, 188452. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2020.188452>.

Lin, F., Weng, S., & Huang, X. (2023). Digital pathology and artificial intelligence as the next chapter in diagnostic hematopathology. *Seminars in Diagnostic Pathology*, 40(1): 45-55. Available at: <https://doi.org/10.1053/j.semmp.2023.02.001>.

Yang, Z., Zhang, Y., & Lu, H. (2023). Preparing Data for Artificial Intelligence in Pathology with Clinical-Grade Performance. *Diagnostics*, 13(19): 1-14. Available at: <https://doi.org/10.3390/diagnostics13193115>.