

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Infertilitas didefinisikan sebagai ketidakmampuan pasangan untuk mencapai kehamilan setelah 12 bulan atau lebih dengan melakukan hubungan seksual secara teratur tanpa kontrasepsi. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada aspek medis, tetapi juga mempengaruhi psikologis, sosial, dan kualitas hidup pasangan yang mengalaminya. Secara global, infertilitas merupakan isu kesehatan reproduksi yang signifikan. Laporan terkini WHO menunjukkan bahwa sekitar satu dari enam orang usia reproduktif di dunia mengalami infertilitas sepanjang hidupnya atau setara dengan 17,5% populasi dewasa [1]. Kontribusi faktor jenis kelamin menunjukkan bahwa faktor pria memberikan kontribusi yang signifikan. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa faktor pria berkontribusi sekitar 50% dari seluruh kasus infertilitas. Pada sistem reproduksi pria, penyebab yang paling sering ditemukan meliputi kelainan konsentrasi, morfologi, dan motilitas spermatozoa [2].

Kondisi infertilitas di Indonesia juga menjadi perhatian serius. Berdasarkan data Kementerian Kesehatan, sekitar 10–15% pasangan usia subur mengalami kesulitan untuk memiliki keturunan, yang berarti terdapat 4–6 juta pasangan menghadapi masalah infertilitas [3]. Hasil penelitian di Klinik Yasmin IVF menunjukkan beberapa kelainan kualitas sperma yang berperan dalam infertilitas. Abnormalitas yang paling sering muncul adalah *asthenozoospermia* atau penurunan motilitas, disusul *teratozoospermia* yaitu kelainan bentuk sperma. Sebagian pasien bahkan mengalami kombinasi keduanya, yang dikenal sebagai *asthenoteratozoospermia*. Temuan ini menegaskan bahwa motilitas dan morfologi sperma menjadi faktor penting dalam menilai kontribusi pria terhadap infertilitas [4].

Menurut WHO, motilitas sperma mengacu pada kemampuan sperma untuk bergerak secara aktif menuju sel telur, dan merupakan faktor penting dalam keberhasilan proses fertilisasi. WHO membagi motilitas menjadi tiga kategori,

yaitu: *progressive motility* (PR) yang menunjukkan pergerakan aktif ke depan secara cepat maupun lambat, *non-progressive motility* (NP) yang bergerak tetapi tidak mampu bergerak maju secara efisien untuk membuahi sel telur, serta *immotility* (IM) yaitu sperma yang tidak bergerak sama sekali. WHO menetapkan bahwa batas bawah nilai referensi untuk total motilitas (PR + NP) adalah 40%, sementara untuk motilitas progresif (PR) adalah 32% [5]. Dalam penelitian di RSUP Sanglah, klasifikasi motilitas berdasarkan kecepatan terbagi menjadi gerak cepat, gerak lambat, gerak di tempat, dan tidak bergerak. Sperma dianggap normal jika laju progresif mencapai minimal 25% atau total motilitas (gerak cepat + gerak lambat) minimal 50% [6].

Sedangkan morfologi sperma menurut WHO merujuk pada penilaian bentuk sperma, mencakup kepala, bagian tengah, dan ekor. Sperma dikategorikan normal apabila memiliki kepala oval dengan ukuran proporsional, bagian tengah yang ramping dan lurus, serta ekor tunggal yang panjang dan tidak melengkung. Sebaliknya, sperma dengan bentuk abnormal dapat berupa kepala terlalu besar atau kecil, ekor ganda, melingkar, atau kelainan pada bagian tengah. WHO menggunakan kriteria ketat (*strict criteria/ Kruger's criteria*), dengan nilai referensi bawah untuk sperma berbentuk normal sebesar $\geq 4\%$ [5]. Penelitian lain menunjukkan kriteria abnormalitas melalui model klasifikasi tiga kategori yakni *fertil*, *indeterminate*, dan *subfertil*. Penelitian tersebut menyarankan bahwa nilai morfologi normal di atas 12% menandakan fertilitas yang baik, sedangkan di bawah 9% menunjukkan risiko subfertil, dengan rentang 9–12% berada di zona ambang yang perlu evaluasi lebih lanjut [7].

Penyebab infertilitas pria bersifat *multifaktorial*, meliputi kelainan anatomi, infeksi, gangguan genetik, gangguan hormonal, paparan toksin, serta faktor gaya hidup. Salah satu penyebab anatomi yang paling sering dicatat adalah *varikokel* atau pelebaran *vena plexus pampiniformis* pada *skrotum* yang dapat menurunkan fungsi *testis* dan merusak *spermatogenesis*. Tinjauan klinis di Indonesia menyatakan *varikokel* sebagai penyebab penting yang dapat menurunkan jumlah dan kualitas sperma serta memperbaiki parameter semen setelah penanganan bedah yang tepat [8]. Infertilitas pada pria dapat dipicu oleh faktor internal, seperti kelainan genetik

yang mengganggu *spermatogenesis* atau kelainan anatomi pada saluran reproduksi. Faktor eksternal meliputi paparan zat berbahaya, kebiasaan merokok, alkohol, serta polusi yang dapat merusak kualitas sperma. Selain itu, faktor lain seperti usia, durasi upaya memperoleh keturunan, dan pola olahraga juga berpengaruh terhadap kualitas semen dan fungsi reproduksi [9].

Infertilitas pada pasangan bukan hanya isu medis, tetapi juga menimbulkan beban psikososial dan ekonomi yang signifikan. Penelitian di Indonesia mencatat bahwa pasangan infertil khususnya suami rentan mengalami tingkat stres yang lebih tinggi dibanding pada istri, terutama di ranah personal, pernikahan, dan sosial. Rasa gagal atau tidak utuh sebagai pria dapat muncul akibat tekanan budaya dan harapan masyarakat [10]. Di samping itu, stigma sosial juga kerap menimpa pasangan infertil. Penelitian di RSPAD Gatot Soebroto menemukan bahwa banyak pasien infertil merasa ditarik secara sosial dan digambarkan secara negatif oleh lingkungan keluarga, yang berpotensi memperburuk kondisi psikologis dan hubungan antar keluarga [11].

Evaluasi abnormalitas sperma di Indonesia umumnya dilakukan melalui analisis semen sesuai pedoman WHO pada tahun 2010 maupun edisi tahun 2021. Evaluasi kualitas sperma di Indonesia hingga kini masih banyak mengandalkan analisis manual dengan mikroskop. Proses ini melibatkan pengamatan langsung oleh analis untuk menilai motilitas dan morfologi sperma menggunakan pewarnaan tertentu. Namun, metode konvensional ini memiliki keterbatasan serius karena sangat subjektif, memakan waktu lama, dan hasilnya sangat dipengaruhi oleh pengalaman serta keahlian pemeriksa, sehingga dapat menyebabkan ketidakakuratan hasil dan variabilitas yang tinggi antar pemeriksa, menjadikan hasil evaluasi menjadi subjektif [12].

Selain metode konvensional tersebut, saat ini juga berkembang teknologi *Computer-Aided Sperm Analysis* (CASA), yaitu sistem otomatis berbasis kamera dan perangkat lunak yang mampu menganalisis data mikroskopis lebih cepat dan objektif [13]. CASA menawarkan keunggulan dalam menilai motilitas maupun morfologi sperma dengan akurasi yang lebih konsisten dibandingkan metode manual. Namun, penerapan CASA di laboratorium Indonesia masih menghadapi

kendala, di antaranya harga perangkat yang sangat mahal serta keterbatasan akses karena sebagian besar produk komersialnya bersifat tertutup dan tidak *open-source* [14]. Oleh karena itu, beberapa penelitian di Indonesia mulai mengembangkan *prototype* CASA dengan sistem yang dirancang secara mandiri agar lebih murah, mudah digunakan, dan bisa disesuaikan dengan kebutuhan laboratorium.

Sebagai respons terhadap keterbatasan analisis sperma secara manual serta tingginya biaya sistem analisis komersial, penelitian berjudul “Deteksi Abnormalitas *Motility* dan Morfologi Spermatozoa Menggunakan 3D-*Convolutional Neural Network*” dirancang untuk membangun sistem analisis video mikroskopis sperma secara *end-to-end*. Sistem yang dikembangkan menggunakan satu alur pra-pemrosesan terpadu pada data video mikroskopis, yang kemudian bercabang secara paralel ke dua jalur pemodelan sesuai karakteristik tugas analisis. Jalur pertama memanfaatkan 3D-*Convolutional Neural Network* (3D-CNN) untuk menangkap informasi temporal pada video guna mengidentifikasi abnormalitas motilitas sperma, sedangkan jalur kedua menggunakan EfficientNet-V2 untuk mengekstraksi fitur spasial secara mendalam dalam mendeteksi abnormalitas morfologi sperma. Pendekatan paralel ini memungkinkan sistem menganalisis gerakan dan struktur sperma secara independen namun konsisten, sehingga menghasilkan keluaran analisis *motilitas* dan morfologi yang lebih komprehensif dalam satu kerangka sistem terpadu.

Pelacakan sperma dalam video mikroskopis merupakan langkah penting dalam analisis motilitas untuk melihat dinamika pergerakan sel sperma secara kuantitatif dan objektif. Dalam penelitian ini, *trackpy* dipilih sebagai alat deteksi dan pelacakan partikel (sperma) dalam urutan *frame* video. *Trackpy* adalah paket *Python* yang dirancang khusus untuk *particle tracking*, mampu mengidentifikasi objek-objek berbasis fitur visual dan kemudian menghubungkan lokasi objek tersebut dari satu *frame* ke *frame* berikutnya sehingga membentuk lintasan gerak tiap partikel selama durasi video [15]. Paket ini telah secara luas digunakan dalam konteks analisis partikel mikroskopis untuk merekonstruksi lintasan (*trajectory*) objek dari data video [16]. Meskipun metode pelacakan berbasis partikel seperti *trackpy* mampu membangun lintasan pergerakan sperma secara otomatis,

pendekatan ini masih termasuk dalam metode pelacakan klasik. Secara umum, metode pelacakan klasik seperti *particle tracking* dan Kalman Filter berfokus pada estimasi posisi dan dinamika dasar objek, tanpa secara eksplisit memodelkan kompleksitas pola gerak non-linier yang sering muncul [17].

Setelah lintasan sperma diperoleh melalui metode pelacakan klasik, penentuan kategori motilitas tidak dilakukan secara langsung dari lintasan, melainkan masih memerlukan aturan berbasis parameter kinematik seperti *curvilinear velocity (VCL)*, *straight-line velocity (VSL)*, dan *linearity (LIN)*. Penelitian berbasis *Computer-Assisted Sperm Analysis (CASA)* menunjukkan bahwa penilaian motilitas dilakukan dengan membandingkan parameter gerak seperti kecepatan dan linearitas terhadap nilai ambang batas tertentu [18]. Dengan demikian, proses klasifikasi motilitas ditentukan oleh aturan yang telah ditetapkan sebelumnya, bukan oleh mekanisme pembelajaran otomatis yang mempelajari pola gerak langsung dari data video.

Sebagai alternatif dari pendekatan berbasis aturan tersebut, 3D-*Convolutional Neural Network (3D-CNN)* digunakan untuk mempelajari pola motilitas secara langsung dari urutan frame video dengan memanfaatkan informasi spasial dan temporal secara simultan [19]. Berbeda dengan metode klasik yang merepresentasikan motilitas melalui parameter kinematik terpisah, 3D-CNN mengekstraksi representasi fitur spasial dan temporal secara *end-to-end*, sehingga pola gerak sperma dapat dikenali sebagai satu kesatuan dinamika tanpa memerlukan perumusan aturan atau nilai ambang secara eksplisit. Pendekatan ini telah banyak digunakan pada tugas klasifikasi berbasis video dan pengenalan pola gerak, karena kemampuannya menangkap perubahan visual dan temporal antar-*frame* secara otomatis.

Selain 3D-CNN untuk motilitas, tugas klasifikasi morfologi sperma lebih banyak bergantung pada kemampuan model untuk mengekstraksi fitur spasial yang detail dari setiap citra sperma. Untuk itu, arsitektur CNN seperti EfficientNet-V2 digunakan sebagai *backbone* klasifikasi morfologi karena kemampuannya menangkap representasi fitur secara dalam dan efektif, termasuk tekstur, bentuk, dan struktur visual objek dalam gambar. EfficientNet-V2 merupakan arsitektur

CNN yang dioptimalkan untuk mendapatkan akurasi tinggi dengan efisiensi parameter serta kemampuan generalisasi yang baik dalam tugas klasifikasi citra, termasuk domain medis dan citra kompleks lainnya. Pendekatan ini memungkinkan model mengenali pola morfologi pada ROI sperma tanpa memerlukan aturan manual, melainkan melalui proses pembelajaran fitur tingkat tinggi secara otomatis dari data pelatihan [20]. Sistem menghasilkan dashboard interaktif yang menyajikan ringkasan klinis otomatis berupa indikasi kategori sesuai standar WHO yakni *Asthenozoospermia* atau *Teratozoospermia*. Luaran ini mengintegrasikan persentase motilitas (PR, NP, IM) dan morfologi (Normal/Abnormal) dalam satu panel laporan terpadu yang dilengkapi fitur reset analisis.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengotomatisasi analisis kualitas sperma, baik pada aspek motilitas maupun morfologi. Salah satu penelitian utama mengimplementasikan model *multimodal convolutional neural networks* yang mana dalam penelitian ini, digunakan kombinasi 3D-CNN untuk mengekstraksi fitur temporal dari video sperma dan ResNet18 untuk fitur spasial dari citra tunggal. Pendekatan ini disebut sebagai multimodal karena memanfaatkan dua jenis representasi data yang berbeda, yaitu data video untuk menangkap pola gerak dan data citra statis untuk menangkap karakteristik visual, sehingga menghasilkan fitur yang lebih komprehensif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pendekatan multimodal ini mencapai nilai *mean absolute error* (MAE) sebesar 8,25 untuk prediksi motilitas dan 8,33 untuk konsentrasi sehingga menawarkan solusi yang lebih objektif dan akurat [19].

Melanjutkan fokus pada motilitas, terdapat penelitian yang memanfaatkan arsitektur *deep convolutional neural network* (DCNN) berbasis ResNet-50 untuk menilai kualitas sperma sesuai klasifikasi WHO. Dengan menggunakan 4.075 video sperma hasil uji klinis, model ini mampu mengklasifikasikan sperma ke dalam kategori *progressive*, *non-progressive*, dan *immotile* dengan akurasi rata-rata 95%, sensitivitas 92%, dan spesifisitas 96%. Temuan ini menegaskan bahwa metode berbasis DCNN dapat menjadi alternatif yang lebih praktis dibanding analisis manual maupun sistem CASA komersial yang mahal [21].

Sementara itu, penelitian komparatif terhadap arsitektur *deep learning* ringan juga telah dilakukan melalui studi berjudul *Comparative Analysis of Lightweight Deep Learning Models for Memory-Constrained Devices*. Penelitian tersebut membandingkan beberapa model *lightweight* seperti MobileNetV3 Small, ResNet18, SqueezeNet, ShuffleNetV2, dan EfficientNetV2-S pada dataset *benchmark* umum (CIFAR-10, CIFAR-100, dan Tiny ImageNet). Hasil penelitian menunjukkan bahwa EfficientNetV2-S mampu mencapai akurasi tertinggi dengan efisiensi parameter dan komputasi yang tetap kompetitif. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih berfokus pada dataset citra umum dan belum menguji performa model pada domain spesifik seperti citra biomedis atau morfologi objek mikroskopis [22].

Menindaklanjuti keterbatasan penelitian sebelumnya yang belum mengeksplorasi kompleksitas citra biomedis secara mendalam, diperlukan pendekatan tambahan yang mampu mempertegas karakteristik struktural objek dengan pengintegrasian atribut morfologi matematika dalam tahap persiapan data. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian bertajuk *Multi-scale Morphology-aided Deep Medical Image Segmentation* membuktikan bahwa penggabungan operasi morfologi ke dalam kerangka kerja *deep learning* secara signifikan mampu meningkatkan presisi pada objek biologis dengan bentuk tidak beraturan. Dengan memanfaatkan modul morfologi yang adaptif, sistem terbukti lebih efektif dalam mengekstraksi atribut tekstur dan membedakan *Region of Interest* (ROI) dari latar belakang yang rumit, yang mana sering kali gagal ditangkap oleh arsitektur CNN standar. Pada tugas segmentasi sel, pendekatan ini berhasil meningkatkan performa *F1-score* karena mampu memperjelas batas sel yang memiliki kemiripan visual tinggi dengan lingkungan sekitarnya [23].

Selain optimalisasi pada tahap pra-pemrosesan citra, efisiensi dalam fase pelatihan model juga menjadi faktor krusial untuk mengatasi kompleksitas data mikroskopis. Penelitian terbaru oleh [24] yang bertajuk “*Improving Neural Network Training using Dynamic Learning Rate Schedule for PINNs and Image Classification*” memperkenalkan algoritma *Dynamic Learning Rate Schedule* (LRS) yang mampu menyesuaikan laju pembelajaran secara otomatis berdasarkan

fluktuasi nilai *loss*. Dalam pengujian klasifikasi citra pada dataset kompleks, penggunaan LRS terbukti mampu meningkatkan akurasi secara signifikan hingga 74,12% dibandingkan metode statis yang hanya mencapai 69,86%, serta berhasil menekan nilai *loss* hingga titik 0,78. Temuan ini menunjukkan bahwa penyesuaian laju pembelajaran secara dinamis tidak hanya mempercepat konvergensi model, tetapi juga memberikan stabilitas yang lebih baik dalam menavigasi gradien yang bervariasi untuk menghindari *local minima*.

Berdasarkan hasil temuan dari berbagai penelitian, pengembangan model deteksi abnormalitas spermatozoa memerlukan pendekatan yang lebih baik dari sisi pra-pemrosesan citra maupun optimasi pemodelan. Penelitian ini akan mengintegrasikan operasi morfologi Erosion untuk mengatasi kendala *noise* latar belakang dan pemisahan objek yang berhimpit dalam klasifikasi abnormalitas morfologi. Selanjutnya, berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan model tunggal, penelitian ini mengusulkan sistem pemodelan paralel yang menggabungkan arsitektur 3D-CNN untuk mengekstraksi fitur temporal (motilitas) dan EfficientNetV2 untuk fitur spasial (morfologi) secara simultan. Guna menjamin efisiensi dan stabilitas pelatihan pada jaringan yang kompleks tersebut, penelitian ini juga menerapkan skema *Dynamic Learning Rate Schedule* yang terbukti mampu meningkatkan akurasi klasifikasi secara signifikan melalui penyesuaian laju pembelajaran yang adaptif terhadap fluktuasi *loss*. Melalui sinergi beberapa pendekatan, penelitian ini diharapkan mampu memberikan evaluasi kualitas spermatozoa yang lebih akurat, *robust*, dan komprehensif bagi kebutuhan klinis.

Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sampel sperma primer yang dikumpulkan melalui kerjasama peneliti dengan Laboratorium Fakultas Kedokteran UPN “Veteran” Jawa Timur. Data tersebut diperoleh dalam bentuk video mikroskopis sperma yang merekam pergerakan individu spermatozoa. Input utama penelitian berupa video ini kemudian diproses dengan metode berbasis 3D-CNN untuk mengekstraksi pola gerak dan bentuk. . Output yang dihasilkan dirancang dalam bentuk dashboard interaktif yang menyajikan sintesis data klinis secara komprehensif dan terpadu. Fokus utama dari lapisan presentasi ini adalah panel diagnosis otomatis yang mengklasifikasikan sampel ke dalam kategori medis

sesuai standar WHO, seperti *Normozoospermia*, *Asthenozoospermia*, *Teratozoospermia*, atau *Asthenoteratozoospermia*. Klasifikasi ini didasarkan pada evaluasi simultan terhadap parameter *progressive motility* (PR) dengan ambang batas 32% dan morfologi normal dengan ambang batas 4%. Selain diagnosis utama, dashboard ini menyajikan detail perhitungan partikel secara transparan, yang mencakup distribusi kuantitatif sel berdasarkan kategori motilitas (*Progressive*, *Non-Progressive*, *Immotile*) dan integritas morfologi (Normal, Abnormal). Seluruh informasi tersebut disatukan dalam satu kesatuan visual yang ergonomis, lengkap dengan fitur reset sistem untuk memastikan efisiensi alur kerja operasional dalam pemeriksaan klinis infertilitas.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang menjadi fokus utama pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengimplementasikan arsitektur *3D-Convolutional Neural Network* (3D-CNN) untuk analisis motilitas dan *EfficientNet-V2* untuk klasifikasi morfologi dalam mendeteksi abnormalitas spermatozoa berbasis data video mikroskopis?
2. Bagaimana evaluasi kinerja model yang dikembangkan berdasarkan metrik evaluasi seperti *accuracy*, *precision*, dan *recall* untuk memastikan tingkat akurasi dan keandalan sistem?
3. Bagaimana mengintegrasikan model deteksi motilitas dan morfologi ke dalam sistem berbasis web menggunakan *Streamlit* sehingga mampu menyajikan hasil analisis secara interaktif dan terpadu?

1.3. Batasan Masalah

Batasan yang ditetapkan pada masalah yang diamati pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan sebagai input berupa video mikroskopis sperma yang direkam dengan standar perbesaran tertentu. Data lain seperti rekam medis, faktor hormonal, atau genetik tidak dianalisis.

2. Identifikasi posisi dan pelacakan lintasan sperma dilakukan secara otomatis menggunakan pustaka TrackPy berbasis koordinat pusat massa (*centroid*), dengan parameter deteksi yang disesuaikan pada kualitas visual video hasil *preprocessing*.
3. Parameter analisis motilitas mengacu pada klasifikasi WHO edisi 2021, yaitu *progressive motility* (PR), *non-progressive motility* (NP), dan *immotil* (IM).
4. Abnormalitas morfologi yang dianalisis difokuskan pada deteksi bentuk abnormal sperma secara umum (kepala, leher, ekor), tanpa klasifikasi detail subtype abnormalitas tertentu.
5. Output sistem menghasilkan dashboard interaktif yang mengintegrasikan visualisasi parameter motilitas (PR, NP, IM) dan persentase morfologi (Normal/Abnormal) dalam satu kesatuan panel.
6. Sistem memberikan klasifikasi indikasi klinis otomatis seperti *Normozoospermia*, *Asthenozoospermia*, *Teratozoospermia*, atau *Asthenoteratozoospermia* berdasarkan standar WHO sebagai alat bantu klinis, namun tidak mencakup diagnosis medis final maupun rekomendasi terapi.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menjawab rumusan masalah serta memberikan arahan yang lebih jelas bagi penelitian ini. Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengimplementasikan arsitektur *3D-Convolutional Neural Network* (3D-CNN) untuk analisis motilitas dan *EfficientNet-V2* untuk klasifikasi morfologi dalam mendeteksi abnormalitas spermatozoa berbasis data video mikroskopis.
2. Mengevaluasi kinerja model yang dikembangkan menggunakan metrik evaluasi seperti *accuracy*, *precision*, dan *recall* untuk mengukur tingkat akurasi, sensitivitas, dan keandalan sistem.
3. Mengintegrasikan model deteksi motilitas dan morfologi ke dalam sistem berbasis web menggunakan *Streamlit* sehingga mampu menyajikan hasil analisis secara interaktif, terpadu, dan informatif bagi pengguna.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang dapat diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi bidang keilmuan

Hasil penelitian ini nantinya dapat digunakan sebagai bahan kontribusi dalam pengembangan kajian analisis sperma berbasis *computer vision* dan *deep learning*, khususnya dalam penerapan model berbasis video untuk mendeteksi motilitas dan morfologi sperma. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dan bahan pembelajaran bagi penelitian selanjutnya di bidang analisis citra medis dan kecerdasan buatan.

2. Bagi masyarakat

Menyediakan gambaran awal mengenai pemanfaatan teknologi berbasis kecerdasan buatan dalam membantu proses analisis kualitas sperma secara lebih objektif dan terstandarisasi, sehingga berpotensi mendukung peningkatan kualitas layanan pemeriksaan kesehatan reproduksi.

3. Bagi Institusi Kesehatan

Memberikan alternatif pendekatan sistem analisis sperma berbasis video yang dapat digunakan sebagai alat bantu (*decision support*) dalam proses evaluasi motilitas dan morfologi sperma, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi, konsistensi, dan objektivitas pemeriksaan laboratorium.