# Tinjauan Literatur Sistematis Analisis Sperma Manusia Berbasis Kecerdasan Buatan melalui Taksonomi dan Kerangka Konseptual Kecerdasan Reproduksi Multimodal

**Tri Aristi Saputri[1], Aristoteles[*2], Sutyarso[3], Khairun Nisa Berawi[4]**

[1]Program Studi Doktor Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung,

[1]Program Studi Teknik Informatika, Universitas Dharma Wacana.

[2*]Program Studi Ilmu Komputer, Universitas Lampung.

[3]Program Studi Biologi, Universitas Lampung.

[4]Program Studi Pendidikan Dokter, Universitas Lampung.

E-mail: aristy@dharmawacana.ac.id[1], aristoteles.1981@fmipa.unila.ac.id[2], sutyarso.1955@fmipa.unila.ac.id[3],khairun.nisa@fk.unila.ac.id[4]

**Abstrak.** Infertilitas merupakan masalah kesehatan reproduksi global, dengan faktor pria berkontribusi hampir setengah kasus. Analisis sperma manual masih memiliki keterbatasan berupa subjektivitas, variasi antar-pengamat, dan rendahnya reproduksibilitas. Perkembangan *artificial intelligence* (AI) mendorong transformasi analisis sperma melalui pendekatan deteksi, *tracking*, dan prediksi fertilitas, namun sebagian besar penelitian masih bersifat *task-specific* dengan integrasi lintas modalitas terbatas. Penelitian ini menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR), sintesis tematik, dan *proposed taxonomy* untuk memetakan perkembangan *AI-based human sperm analysis* dari *Computer-Assisted Semen Analysis* (CASA) menuju kerangka konseptual kecerdasan reproduksi multimodal. Berdasarkan seleksi PRISMA, diperoleh 95 studi yang memenuhi kriteria seleksi dan *quality assessment*. Studi tersebut dikelompokkan ke dalam tujuh domain, yaitu *Detection Intelligence* (50; 52,6%), *Tracking Intelligence* (12; 12,6%), *Trajectory Intelligence* (10; 10,5%), *Biological Intelligence* (7; 7,4%), *Clinical Intelligence* (8; 8,4%), *Explainable and Trustworthy Intelligence* (3; 3,2%), dan *Multimodal Reproductive Intelligence* (5; 5,3%). Hasil sintesis menunjukkan dominasi pendekatan visual serta kebutuhan integrasi lintas modalitas. Berdasarkan hal tersebut, MRI diusulkan sebagai kerangka konseptual yang mengintegrasikan informasi visual, *trajectory*, biologis, klinis, dan *explainability* untuk mendukung pengembangan analisis fertilitas pria berbasis AI.

**Kata kunci:** Analisis Sperma Manusia; Kecerdasan Buatan; Tinjauan Literatur Sistematis; Taksonomi; Kecerdasan Reproduksi Multimodal;

**Abstract.** Infertility is a global reproductive health problem, with male factors contributing to nearly half of all cases. Manual sperm analysis remains limited by subjectivity, inter-observer variability, and low reproducibility. The advancement of *artificial intelligence* (AI) has transformed sperm analysis through approaches involving detection, *tracking*, and fertility prediction; however, most studies remain *task-specific* with limited cross-modal integration. This study employs a *Systematic Literature Review* (SLR), thematic synthesis, and a *proposed*

*taxonomy* to map the development of *AI-based human sperm analysis* from *Computer-Assisted Semen Analysis* (CASA) toward a conceptual framework of multimodal reproductive intelligence. Based on the PRISMA selection process, 95 studies met the selection criteria and *quality assessment*. The selected studies were classified into seven domains: *Detection Intelligence* (50; 52.6%), *Tracking Intelligence* (12; 12.6%), *Trajectory Intelligence* (10; 10.5%), *Biological Intelligence* (7; 7.4%), *Clinical Intelligence* (8; 8.4%), *Explainable and Trustworthy Intelligence* (3; 3.2%), and *Multimodal Reproductive Intelligence* (5; 5.3%). The synthesis reveals the dominance of visual-based approaches and highlights the need for cross-modal integration. Based on these findings, MRI is proposed as a conceptual framework that integrates visual, *trajectory*, biological, clinical, and *explainability* information to support the future development of AI-based male fertility analysis.

**Keywords:** Human Sperm Analysis, Artificial Intelligence, Systematic Literature Review, Taxonomy, Multimodal Reproductive Intelligence;

## Pendahuluan

Infertilitas merupakan masalah kesehatan reproduksi global yang mempengaruhi jutaan pasangan usia reproduktif, dengan faktor pria berkontribusi hampir setengah kasus [1]. Analisis sperma menjadi komponen utama evaluasi fertilitas melalui pengukuran konsentrasi, motilitas, morfologi, dan viabilitas spermatozoa, namun evaluasi mikroskopis manual masih terbatas oleh subjektivitas, variasi antar-pengamat, rendahnya reproduksibilitas, dan waktu analisis [1].

Untuk meningkatkan objektivitas dan konsistensi, *Computer-Assisted Semen Analysis* (CASA) dikembangkan sebagai sistem analisis sperma berbasis komputer [2], [3]. Perkembangan AI, *machine learning*, *deep learning*, dan *computer vision* mendorong transformasi analisis sperma menuju pendekatan otomatis berbasis deteksi, *tracking*, dan prediksi fertilitas [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Penelitian selanjutnya berkembang menuju integrasi aspek biologis dan klinis [10], [11], [12], serta menekankan kebutuhan model AI yang transparan, dapat dijelaskan, dan dipercaya pada domain klinis [13], [14]. Perkembangan tersebut menjadi dasar penyusunan *proposed taxonomy* yang mencakup *Detection Intelligence*, *Tracking Intelligence*, *Trajectory Intelligence*, *Biological Intelligence*, *Clinical Intelligence*, *Explainable and Trustworthy Intelligence*, dan *Multimodal Reproductive Intelligence*.

Namun, integrasi lintas domain yang menggabungkan informasi visual, *trajectory*, biologis, dan klinis masih terbatas, sehingga karakteristik morfologi, perilaku gerak, biomarker, dan informasi klinis masih banyak dianalisis secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR), sintesis tematik, dan pengembangan taksonomi untuk memetakan evolusi *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis*, mengidentifikasi kesenjangan integrasi antar-domain, serta mengusulkan *Multimodal Reproductive Intelligence* (MRI) sebagai kerangka konseptual.

## Gap Penelitian

Hasil seleksi dan sintesis studi menunjukkan bahwa penelitian *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis* masih didominasi oleh *Detection Intelligence*, sementara penelitian yang mengintegrasikan informasi *trajectory*, biologis, klinis, *explainability*, dan multimodal masih relatif terbatas [2], [15], [16], [17].

**Tabel 1.** *Research Gaps* Analisis Sperma Manusia Berbasis AI

| Gap | Description |
|---|---|
| G1 | Dominasi penelitian yang berfokus pada tugas spesifik seperti deteksi, morfologi, tracking, dan prediksi fertilitas. |
| G2 | Keterbatasan integrasi antara Detection Intelligence, Tracking Intelligence, dan Trajectory Intelligence. |
| G3 | Rendahnya integrasi fitur berbasis trajectory, biomarker biologis, dan data klinis |
| G4 | Masih terbatasnya kerangka yang mengintegrasikan informasi visual, trajectory, biologis, dan klinis secara multimodal dalam satu pendekatan analisis |
| G5 | Keterbatasan dataset multimodal, generalisasi model lintas populasi dan perangkat, serta integrasi explainability dalam pengembangan pendekatan reproduksi berbasis AI. |

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan MRI sebagai kerangka konseptual untuk mengintegrasikan informasi visual, *trajectory*, biologis, klinis, dan *explainability*. Kerangka ini merupakan hasil sintesis literatur dan belum dimaksudkan sebagai sistem klinis yang telah tervalidasi secara empiris. Selanjutnya, penelitian ini memetakan evolusi *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis* berdasarkan studi yang diseleksi melalui proses PRISMA dan diklasifikasikan berdasarkan domain kecerdasan reproduksi yang diusulkan [15], [16].

Metodologi Penelitian

1.1. Kerangka Penelitian

Penelitian ini menggunakan SLR, sintesis tematik, dan pengembangan taksonomi berdasarkan pedoman PRISMA untuk memetakan perkembangan AI-Based Human Sperm Analysis, mengidentifikasi research gaps, dan merumuskan arah pengembangan MRI [15], [16], [17].

**Tabel 2.** *Research Questions*

| ID | Research Question |
|---|---|
| RQ1 | Bagaimana perkembangan penelitian *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis* dari waktu ke waktu? |
| RQ2 | Metode, algoritma, dan arsitektur *Artificial Intelligence* apa yang paling banyak digunakan dalam analisis sperma manusia? |
| RQ3 | Bagaimana evolusi *Detection Intelligence*, *Tracking Intelligence*, dan *Trajectory Intelligence* dalam analisis sperma berbasis AI? |
| RQ4 | Bagaimana peran *Biological Intelligence*, *Clinical Intelligence*, dan *Explainable Intelligence* dalam mendukung evaluasi fertilitas dan pengambilan keputusan reproduksi? |
| RQ5 | Apa saja *research gap*, tantangan, dan arah penelitian masa depan menuju pengembangan kerangka kecerdasan reproduksi multimodal berbasis integrasi informasi visual, *trajectory*, biologis, dan klinis? |

*Research questions* tersebut digunakan sebagai dasar sintesis literatur, pengembangan taksonomi, dan identifikasi research gaps.

*1.2. Pencarian Literatur dan Pemilihan Studi*

Pencarian literatur dilakukan pada periode 12 Juni 2025 hingga 25 Maret 2026 menggunakan lima basis data utama, yaitu Scopus, Web of Science (WoS), IEEE Xplore, PubMed, dan ScienceDirect. Studi yang dipertimbangkan merupakan publikasi tahun 2010–2025 dengan kata kunci terkait *human sperm analysis*, *artificial intelligence*, *computer vision*, *tracking*, *trajectory analysis*, *fertility prediction*, *biomarker*, dan *explainable AI*. Seleksi studi mengikuti pedoman PRISMA melalui deduplikasi, *screening* judul dan abstrak, evaluasi *full-text*, kriteria inklusi–eksklusi, dan *quality assessment*. Proses *screening* dilakukan oleh satu peneliti berdasarkan kesesuaian topik, pendekatan AI, jenis data, metode evaluasi, dan kontribusi penelitian terhadap analisis sperma berbasis AI. Karena proses seleksi dilakukan oleh satu peneliti, konsistensi seleksi dijaga melalui penerapan kriteria inklusi–eksklusi dan quality assessment yang sama pada seluruh studi. Setiap studi kemudian diklasifikasikan berdasarkan kontribusi utama menggunakan pendekatan *single-label classification*. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai analisis sperma berbasis AI, seleksi sperma berbantuan AI, dan evaluasi kualitas semen berbasis video mikroskopik [15], [16], [17].

**Tabel 3.** *Literature Search Strategy*

| Component | Description |
|---|---|
| Databases | Scopus, Web of Science (WoS), IEEE Xplore, PubMed, ScienceDirect |
| Search Scope | Title, Abstract, Keywords |
| Publication Year Range | 2010–2025 |
| Search Period | 12 June 2025 – 25 March 2026 |
| Main Topics | Human Sperm Analysis, Artificial Intelligence, Computer Vision, Sperm Tracking, Trajectory Analysis, Fertility Prediction |
| Search Terms | Sperm analysis, sperm motility, sperm morphology, sperm tracking, trajectory |

| Component | Description |
|---|---|
| | analysis, fertility prediction, artificial intelligence, machine learning, deep learning, computer vision, object detection, multi-object tracking, explainable AI |

**Tabel 4.** Search String Adaptation pada Setiap Database

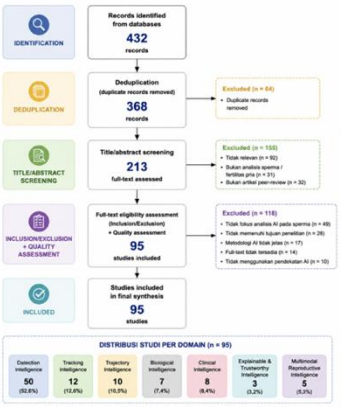
| Database | Search String |
|---|---|
| Scopus | TITLE-ABS-KEY(("sperm analysis" OR "sperm motility" OR "sperm morphology" OR "sperm tracking" OR "trajectory analysis" OR "fertility assessment") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "computer vision") AND ("object detection" OR "tracking" OR "video analysis" OR "fertility prediction" OR "biomarker" OR "clinical decision support" OR "explainable AI")) |
| Web of Science (WoS) | TS=(("sperm analysis" OR "sperm motility" OR "sperm morphology" OR "sperm tracking" OR "trajectory analysis" OR "fertility assessment") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "computer vision") AND ("object detection" OR "tracking" OR "video analysis" OR "fertility prediction" OR "biomarker" OR "clinical decision support" OR "explainable AI")) |
| IEEE Xplore | ("sperm analysis" OR "sperm tracking" OR "sperm motility") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "computer vision") AND ("tracking" OR "detection" OR "prediction" OR "video analysis") |
| PubMed | ("human sperm analysis" OR "sperm motility" OR "sperm morphology" OR "sperm tracking") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "computer vision") AND ("fertility prediction" OR "reproductive outcome" OR "clinical decision support") |
| ScienceDirect | TITLE-ABSTRACT-KEY(("sperm analysis" OR "sperm motility" OR "sperm morphology" OR "sperm tracking") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "computer vision") AND ("tracking" OR "trajectory analysis" OR "fertility prediction")) |

Artikel yang diperoleh dideduplikasi dan diseleksi menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi (Tabel 4) untuk memastikan relevansi terhadap deteksi spermatozoa, analisis morfologi, pelacakan, trajectory, dan prediksi fertilitas berbasis AI [5], [18], [19].

**Tabel 5.** Kriteria Seleksi Artikel (Inclusion and Exclusion Criteria)

| Code | Criteria |
|---|---|
| IC1 | Fokus pada analisis sperma manusia, fertilitas pria, atau sistem reproduksi pria berbasis AI |
| IC2 | Menggunakan *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Deep Learning*, *Computer Vision*, atau teknik komputasional terkait |
| IC3 | Artikel jurnal atau prosiding konferensi yang telah melalui proses *peer-review* |
| IC4 | Ditulis dalam bahasa Inggris |
| IC5 | Dipublikasikan pada periode 2010–2025 |
| IC6 | Membahas deteksi, morfologi, motilitas, *tracking*, *trajectory analysis*, prediksi fertilitas, biomarker reproduksi, *explainable* AI, atau aplikasi klinis berbasis AI |
| EC1 | Tidak relevan dengan analisis sperma manusia, fertilitas pria, atau reproduksi berbasis AI |
| EC2 | Tidak melalui proses *peer-review* |
| EC3 | Tidak menggunakan pendekatan AI atau metode komputasional terkait |
| EC4 | *Full-text* tidak tersedia |
| EC5 | Membahas aspek biologis atau klinis tanpa keterkaitan dengan analisis sperma berbasis AI |
| EC6 | Editorial, poster, abstrak singkat, atau publikasi non-ilmiah |

Kriteria inklusi dan eksklusi diterapkan secara berurutan pada tahap screening dan evaluasi full-text untuk memastikan hanya studi yang relevan dengan analisis sperma manusia berbasis AI yang masuk ke sintesis akhir. Pencarian literatur menghasilkan 432 artikel dari lima basis data. Setelah deduplikasi, tersisa 368 artikel untuk screening judul dan abstrak. Sebanyak 213 artikel memenuhi kriteria awal dan dilanjutkan ke evaluasi full-text. Setelah penerapan kriteria inklusi, eksklusi, dan quality assessment, sebanyak 95 studi memenuhi seluruh persyaratan dan digunakan dalam sintesis akhir sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.




Gambar 1. Diagram alir PRISMA proses identifikasi, screening, evaluasi *full-text*, dan *quality assessment* hingga diperoleh 95 studi untuk sintesis akhir

Tahapan seleksi studi mengikuti pedoman PRISMA yang mencakup *identification*, *screening*, *eligibility*, dan *inclusion*. *Quality assessment* kemudian dilakukan terhadap studi yang lolos evaluasi full-text untuk memastikan kualitas metodologi, kecukupan dataset, metode AI, serta validitas hasil penelitian [5], [17], [20].

**Tabel 6.** Kriteria Penilaian Kualitas

| Kode | Kriteria Penilaian |
|---|---|
| QA1 | Tujuan penelitian didefinisikan dengan jelas |
| QA2 | Metodologi AI dijelaskan dengan jelas |
| QA3 | Dataset dan desain eksperimen dijelaskan secara memadai |
| QA4 | Metrik evaluasi dilaporkan dengan jelas |
| QA5 | Hasil dan kesimpulan valid serta didukung oleh bukti |
| QA6 | Studi berkontribusi terhadap tujuan tinjauan ini |

*Quality assessment* dilakukan terhadap studi yang lolos evaluasi *full-text* menggunakan enam kriteria, yaitu kejelasan tujuan penelitian, kejelasan metodologi AI, kecukupan deskripsi dataset dan desain eksperimen, pelaporan metrik evaluasi, validitas hasil dan kesimpulan, serta relevansi studi terhadap tujuan review. Hanya studi yang memenuhi kriteria kualitas dan relevansi yang dipertahankan dalam sintesis akhir.

*1.3. Pengembangan Taksonomi dan Sintesis Data*

Pengembangan *proposed taxonomy* dilakukan melalui *thematic coding* terhadap 95 studi yang memenuhi kriteria seleksi dan kualitas. Setiap studi diekstraksi berdasarkan tujuan penelitian, jenis data, metode AI, tugas analisis, keluaran utama, serta relevansi biologis atau klinis. Kode awal kemudian dikelompokkan berdasarkan kesamaan fungsi dan disintesis menjadi domain konseptual yang merepresentasikan perkembangan kecerdasan dalam analisis sperma manusia. Setiap studi diklasifikasikan ke dalam satu domain berdasarkan kontribusi utama (*single-label classification*), sedangkan studi dengan lebih dari satu fungsi ditentukan berdasarkan tujuan dan keluaran utama penelitian. Proses ini menghasilkan tujuh *proposed domains*, yaitu *Detection Intelligence*, *Tracking Intelligence*, *Trajectory Intelligence*, *Biological Intelligence*, *Clinical Intelligence*, *Explainable and Trustworthy Intelligence*, dan *Multimodal Reproductive Intelligence*. Analisis tersebut menjadi dasar sintesis literatur, pemetaan perkembangan penelitian [15], [16], [17], serta perumusan *research gaps* dan kerangka konseptual *Multimodal Reproductive Intelligence* (MRI) sebagai arah integrasi penelitian masa depan.

**Tabel 7.** *Definition of Reproductive Intelligence Domains*

| Proposed Domain | Kriteria klasifikasi |
|---|---|
| Detection Intelligence | Studi yang kontribusi utamanya mendeteksi, melokalisasi, mengklasifikasi, |

| Proposed Domain | Kriteria klasifikasi |
|---|---|
| | atau melakukan segmentasi spermatozoa/morfologi pada citra atau video. |
| Tracking Intelligence | Studi yang kontribusi utamanya mempertahankan identitas dan posisi spermatozoa antar-frame melalui single/multi-object tracking. |
| Trajectory Intelligence | Studi yang kontribusi utamanya menganalisis lintasan, pola gerak, parameter kinematik, atau representasi spatiotemporal spermatozoa. |
| Biological Intelligence | Studi yang kontribusi utamanya menggunakan informasi biologis/molekuler seperti DNA integrity, oxidative stress, capacitation, proteomic, metabolomic, atau biomarker reproduksi. |
| Clinical Intelligence | Studi yang kontribusi utamanya menghubungkan informasi sperma dengan data/parameter klinis, fertility prediction, sperm selection, IVF/ICSI, atau clinical decision support. |
| Explainable and Trustworthy Intelligence | Studi yang berfokus pada interpretabilitas, *explainability*, *reliability*, *uncertainty*, *robustness*, *fairness*, atau *trustworthiness* model AI. |
| Multimodal Reproductive Intelligence | Studi yang kontribusi utamanya mengintegrasikan dua atau lebih modalitas informasi, misalnya visual, trajectory, biologis, dan/atau klinis—dalam satu model atau kerangka analisis. |

Hasil Dan Pembahasan

*1.4. Lanskap Penelitian dan Metode Kecerdasan Buatan*

Berdasarkan hasil *Systematic Literature Review* (SLR), penelitian *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis* berkembang dari *Computer-Assisted Semen Analysis* (CASA) menuju pemanfaatan *machine learning*, *deep learning*, *computer vision*, dan analisis video untuk evaluasi fertilitas yang lebih komprehensif [15], [16], [17]. Analisis didasarkan pada 95 studi yang memenuhi seluruh kriteria seleksi dan quality assessment. Studi tersebut diklasifikasikan ke dalam tujuh proposed domains melalui proses thematic coding dan single-label classification. Hasil menunjukkan pergeseran dari analisis berbasis parameter menuju pendekatan berbasis detection, tracking, trajectory, dan multimodal learning [5], [16], [19], [21]. Distribusi studi menunjukkan bahwa Detection Intelligence merupakan domain yang paling dominan dengan 50 studi (52,6%), diikuti Tracking Intelligence sebanyak 12 studi (12,6%) dan Trajectory Intelligence sebanyak 10 studi (10,5%). Sementara itu, Clinical Intelligence mencakup 8 studi (8,4%), Biological Intelligence 7 studi (7,4%), Multimodal Reproductive Intelligence 5 studi (5,3%), dan Explainable and Trustworthy Intelligence 3 studi (3,2%). Distribusi tersebut menunjukkan bahwa penelitian AI pada analisis sperma manusia masih terkonsentrasi pada pengolahan informasi visual dan pergerakan spermatozoa, sedangkan integrasi biologis, klinis, explainability, dan multimodal masih relatif terbatas. Temuan ini menunjukkan bahwa penelitian masih didominasi analisis visual spermatozoa, sementara integrasi biologis, klinis, dan multimodal masih pada tahap awal perkembangan [15], [16], [18].

**Tabel 8**. Distribusi Studi Berdasarkan *Proposed Reproductive Intelligence Taxonomy*

| Domain | n | % |
|---|---|---|
| Detection Intelligence | 50 | 52,6 |
| Tracking Intelligence | 12 | 12,6 |
| Trajectory Intelligence | 10 | 10,5 |
| Biological Intelligence | 7 | 7,4 |
| Clinical Intelligence | 8 | 8,4 |
| Explainable and Trustworthy Intelligence | 3 | 3,2 |
| Multimodal Reproductive Intelligence | 5 | 5,3 |
| **Total** | **95** | **100,0** |

Setiap studi diklasifikasikan ke dalam satu domain berdasarkan kontribusi utama, sehingga seluruh persentase dihitung dari 95 studi. Dominasi *Detection Intelligence* dapat dikaitkan dengan kemudahan memperoleh dan menganotasi data citra/video mikroskopik, serta kematangan metode *computer vision* untuk deteksi, segmentasi, dan klasifikasi morfologi. Sebaliknya, domain biologis, klinis, dan

multimodal membutuhkan integrasi citra atau video sperma dengan biomarker, data pasien, dan *outcome* klinis yang lebih heterogen sehingga lebih kompleks untuk diperoleh secara konsisten. Hal ini menjelaskan mengapa perkembangan penelitian masih lebih cepat pada domain visual dibandingkan integrasi multimodal [5], [7], [18], [19]. Perkembangan tersebut menunjukkan pergeseran dari analisis sperma berbasis parameter menuju pendekatan kecerdasan reproduksi yang lebih multimodal, *biologically informed*, *explainable*, dan *clinically relevant*.

*1.5. Evolusi Domain Kecerdasan Reproduksi*

Hasil sintesis menunjukkan evolusi *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis* melalui beberapa domain kecerdasan reproduksi yang saling berkaitan. Perkembangan awal didominasi *Detection Intelligence* melalui pengolahan citra dan *machine learning* yang berkembang menuju *deep learning*, *object detection*, dan *segmentation networks* untuk deteksi, lokalisasi, serta analisis morfologi spermatozoa. Selanjutnya, *Tracking Intelligence* berkembang melalui pendekatan *multi-object tracking* untuk mempertahankan identitas spermatozoa antar-frame, yang mendukung pembentukan *Trajectory Intelligence* dalam merepresentasikan pola lintasan, stabilitas arah, dan potensi fertilitas [5], [18], [19], [21], [22]. Perkembangan berikutnya menunjukkan peningkatan integrasi informasi biologis dan klinis. *Biological Intelligence* mencakup biomarker reproduksi seperti DNA *integrity*, *capacitation*, *oxidative stress*, apoptosis, proteomics, dan metabolomics, sedangkan *Clinical Intelligence* memanfaatkan informasi multimodal untuk *fertility prediction*, *sperm selection*, dukungan IVF/ICSI, dan sistem *point-of-care*. Seiring meningkatnya kompleksitas AI, *Explainable and Trustworthy Intelligence* menjadi penting untuk meningkatkan transparansi, interpretabilitas, reliabilitas, dan kepercayaan terhadap AI dalam domain reproduksi [13], [14], [15], [16], [23], [24]. Secara keseluruhan, perkembangan tersebut menunjukkan pergeseran dari *object-centric analysis* menuju pendekatan yang lebih *behavior-centric*, *biologically informed*, *clinically relevant*, dan *explainable reproductive intelligence*. Fragmentasi antar-domain menjadi dasar pengusulan integrasi multimodal sebagai arah penelitian berikutnya, bukan sebagai sistem yang telah tervalidasi [15], [24].

*1.6. Research Gaps, Future Directions, and Proposed MRI Framework*

Meskipun *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis* telah berkembang pada deteksi, klasifikasi, *tracking*, *trajectory analysis*, dan *fertility prediction*, sebagian besar penelitian masih bersifat *task-specific* dan terisolasi [15], [17], [24]. Beberapa penelitian telah mengembangkan deteksi dan *tracking* sperma secara *real-time* menggunakan YOLOv8 dan ByteTrack, namun masih terbatas pada dataset tertentu serta belum mengintegrasikan informasi biologis dan klinis. Hasil sintesis mengidentifikasi lima *research gaps*, yaitu dominasi pendekatan *task-specific*, keterbatasan integrasi Detection Intelligence, Tracking Intelligence, dan Trajectory Intelligence, rendahnya keterhubungan fitur *trajectory* dengan informasi biologis dan klinis, belum tersedianya kerangka multimodal terpadu, serta keterbatasan dataset, generalisasi model, *explainability*, dan validasi eksternal [15], [19], [21], [24], [22]. Temuan tersebut menunjukkan perlunya kerangka yang mengintegrasikan berbagai sumber informasi reproduksi untuk menghasilkan representasi fertilitas yang lebih komprehensif.

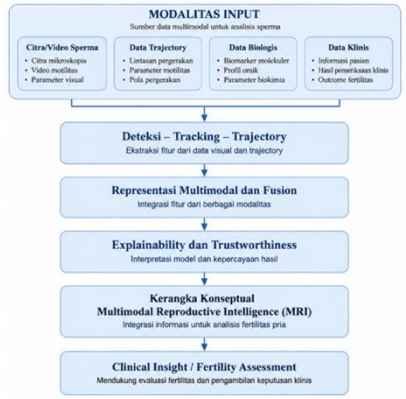
**Tabel 9.** Major Research Gaps Toward Multimodal Reproductive Intelligence Systems

| Gap ID | Research Gap |
|---|---|
| G1 | Dominance of task-specific AI research in human sperm analysis |
| G2 | Limited integration between Detection Intelligence, Tracking Intelligence, and Trajectory Intelligence |
| G3 | Limited integration of trajectory-derived features with biological and clinical information |
| G4 | Lack of unified multimodal framework integrating visual, trajectory, biological, and clinical information |
| G5 | Dataset scarcity, generalization challenges, explainability, and external validation limitations |

*1.7. Challenges of Multimodal Reproductive Intelligence*

Integrasi multimodal pada analisis fertilitas pria memiliki tantangan lebih kompleks dibandingkan pendekatan satu modalitas. Data citra/video spermatozoa bersifat spasial-temporal, sedangkan data semen, hormon, biomarker, riwayat pasien, dan outcome klinis memiliki karakteristik tabular dengan

skala dan kelengkapan berbeda. Integrasi antar-modalitas memerlukan keterhubungan data tingkat pasien, harmonisasi representasi, penanganan *missing data*, dan mekanisme *fusion* yang mampu mempertahankan kontribusi setiap modalitas. Selain keterbatasan dataset multimodal dan variasi protokol, perangkat, serta populasi, pengembangan MRI memerlukan standardisasi data, validasi eksternal, *robustness*, dan interpretabilitas sebelum diarahkan pada *clinical decision support*. Berdasarkan *research gaps*, penelitian masa depan diarahkan pada integrasi informasi visual, *trajectory*, biologis, dan klinis untuk menghasilkan representasi fertilitas yang lebih komprehensif [15], [18], [19], [24], [7], [18], [20]. Penelitian ini mengusulkan MRI sebagai kerangka konseptual integrasi multimodal domain kecerdasan reproduksi [15], [24].
Gambar dibawah menyajikan MRI sebagai *proposed conceptual framework* yang mengintegrasikan berbagai sumber informasi reproduksi, bukan sebagai urutan linear antar-domain. Modalitas visual, biologis, dan klinis direpresentasikan secara multimodal sebelum dilakukan fusion. Selanjutnya, seluruh representasi tersebut diintegrasikan melalui *multimodal fusion* untuk menghasilkan representasi fertilitas yang lebih komprehensif. Komponen *explainability* dan *trustworthiness* berperan dalam mendukung interpretasi hasil sebelum digunakan sebagai *clinical insight* atau *decision support*. Framework ini masih bersifat konseptual dan memerlukan validasi empiris pada dataset multimodal [15], [24].




Gambar 2. Kerangka konseptual *Multimodal Reproductive Intelligence* (MRI) yang diusulkan untuk mengintegrasikan informasi visual, *trajectory*, biologis, dan klinis menuju kecerdasan reproduksi

*1.8. Ethical and Clinical Considerations*
Penggunaan AI pada data reproduksi manusia memerlukan perhatian terhadap privasi, *informed consent*, keamanan data, dan potensi bias berdasarkan usia, populasi, perangkat, serta kondisi klinis. Data fertilitas mencakup citra biologis, biomarker, dan informasi klinis sensitif yang harus dikelola sesuai prinsip perlindungan data. Dalam konteks *clinical decision support*, keluaran AI harus menjadi informasi pendukung, bukan pengganti keputusan klinis, dengan mempertimbangkan transparansi, akuntabilitas, dan evaluasi kesalahan prediksi sebelum diterapkan pada lingkungan klinis.

Kesimpulan Dan Implikasi Penelitian
*1.9. Kesimpulan*
Penelitian ini menyajikan SLR dengan sintesis tematik dan *proposed taxonomy* untuk memetakan perkembangan *Artificial Intelligence-Based Human Sperm Analysis*. Berdasarkan 95 studi, penelitian diklasifikasikan ke dalam tujuh domain dengan *Detection Intelligence* sebagai domain dominan. Hasil sintesis menunjukkan perlunya integrasi informasi visual, *trajectory*, biologis, klinis, dan *explainability*, sehingga menjadi dasar pengusulan MRI sebagai *conceptual framework* multimodal, yang memerlukan validasi empiris sebelum diarahkan pada implementasi klinis.

Implikasi Penelitian
Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pencarian literatur dibatasi pada lima basis data, periode publikasi 2010–2025, ketersediaan *full-text*, dan kriteria seleksi tertentu sehingga masih

terdapat kemungkinan studi relevan yang belum teridentifikasi. Klasifikasi domain berdasarkan *thematic coding* juga masih mengandung unsur interpretasi peneliti, sehingga *proposed taxonomy* perlu divalidasi melalui kajian lintas-disiplin yang melibatkan bidang AI dan reproduksi. Selain itu, MRI yang diusulkan masih bersifat konseptual dan belum diuji pada dataset multimodal maupun lingkungan klinis. Penelitian selanjutnya perlu mengevaluasi *framework* tersebut melalui integrasi data visual, *trajectory*, biologis, dan klinis, serta pengujian interpretabilitas, *robustness*, generalisasi, dan aspek etika sebelum diterapkan sebagai *clinical decision support*.

Referensi

[1] D. E. Morbeck, P. H. Leonard, A. L. Weaver, K. M. Shimek, E. V.A. Bouwsma, dan C. C. Coddington, "Sperm Morphology Classification Drift Over Time and Clinical Implications," *Fertility and Sterility*, vol. 96, no. 6, hlm. 1350–1354, Des 2011, doi: 10.1016/j.fertnstert.2011.08.036.
[2] S. Mortimer, G. D. Horst, dan D. Mortimer, "The Future of Computer Aided Sperm Analysis," *Asian J Androl*, vol. 17, no. 4, hlm. 545, 2015, doi: 10.4103/1008-682X.154312.
[3] M. J. Tomlinson *dkk.*, "Validation of A Novel Computer Assisted Sperm Analysis (CASA) System Using Multitarget Tracking Algorithms," *Fertility and Sterility*, vol. 93, no. 6, hlm. 1911–1920, Apr 2010, doi: 10.1016/j.fertnstert.2008.12.064.
[4] A. Aristoteles, A. Syarif, dan F. R. Lumbanraja, "Systematic Review: Perkembangan Machine Learning Pada Sperma Manusia," *JTI*, vol. 17, no. 1, hlm. 112, Jan 2023, doi: 10.33365/jti.v17i1.2078.
[5] C. Zhang, Y. Zhang, Z. Chang, dan C. Li, "Sperm YOLOv8E-TrackEVD: A Novel Approach for Sperm Detection and Tracking," *Sensors*, vol. 24, no. 11, hlm. 3493, Mei 2024, doi: 10.3390/s24113493.
[6] V. Thambawita *dkk.*, "Medico Multimedia Task at MediaEval 2023: Transparent Tracking of Spermatozoa".
[7] S. Ottl, S. Amiriparian, M. Gerczuk, dan B. W. Schuller, "motilitAI: A machine learning framework for automatic prediction of human sperm motility," *iScience*, vol. 25, no. 8, hlm. 104644, Agu 2022, doi: 10.1016/j.isci.2022.104644.
[8] C. D. Clemente, M. I. Maremonti, D. Dannhauser, A. Netti, dan F. Causa, "Single Cell Three Dimensional Tracking by Means of Neural Networks for Sperm Rolling Classification".
[9] J. Hansen, S. Rassmann, J. Jikeli, dan D. Wachten, "SpermQ A Simple Analysis Software to Comprehensively Study Flagellar Beating and Sperm Steering," *Cells*, vol. 8, no. 1, hlm. 10, Des 2018, doi: 10.3390/cells8010010.
[10] J. Zhou *dkk.*, "The Semen pH Affects Sperm Motility and Capacitation," *PLoS ONE*, vol. 10, no. 7, hlm. e0132974, Jul 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0132974.
[11] Z. Chen *dkk.*, "The Relationship Between Human Semen Characteristics and Sperm Apoptosis: A Pilot Study," *Journal of Andrology*, vol. 27, no. 1, hlm. 112–120, Jan 2006, doi: 10.2164/jandrol.05073.
[12] J. Blaurock, S. Baumann, S. Grunewald, J. Schiller, dan K. M. Engel, "Metabolomics of Human Semen: A Review of Different Analytical Methods to Unravel Biomarkers for Male Fertility Disorders," *IJMS*, vol. 23, no. 16, hlm. 9031, Agu 2022, doi: 10.3390/ijms23169031.
[13] M. A. Zuluaga, I. Išgum, dan M. B. Cuadra, "Trustworthy AI in Medical Image Analysis: A Unified Perspective Built on Robustness and Layers of Trust," *Current Opinion in Biomedical Engineering*, vol. 37, hlm. 100649, Mar 2026, doi: 10.1016/j.cobme.2026.100649.
[14] L. Marconi dan F. Cabitza, "Show and Tell: A Critical Review on Robustness and Uncertainty for A More Responsible Medical AI," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 202, hlm. 105970, Okt 2025, doi: 10.1016/j.ijmedinf.2025.105970.
[15] P. Cherouveim, C. Velmahos, dan C. L. Bormann, "Artificial intelligence for sperm selection—a systematic review," *Fertility and Sterility*, vol. 120, no. 1, hlm. 24–31, Jul 2023, doi: 10.1016/j.fertnstert.2023.05.157.
[16] J. Raimundo dan P. Cabrita, "Artificial Intelligence at Assisted Reproductive Technology," *Procedia Computer Science*, vol. 181, hlm. 442–447, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.189.

[17] W. Zhao *dkk.*, "A Survey of Semen Quality Evaluation in Microscopic Videos Using Computer Assisted Sperm Analysis," 17 Februari 2022, *arXiv*: arXiv:2202.07820. doi: 10.48550/arXiv.2202.07820.
[18] S. Adinugroho dan A. Nakazawa, "Deep learning-based sperm motility and morphology estimation on stacked color-coded MotionFlow," *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 45, hlm. 101459, 2024, doi: 10.1016/j.imu.2024.101459.
[19] A. S. Aktas, G. Serbes, H. Uzun, M. H. Yigit, N. Aydin, dan H. O. Ilhan, "Hi-Lab Sperm Tracking: A Novel and High-Quality Sperm Tracking Dataset with an Advanced Ensemble Detection and Tracking Approach for Real World Clinical Scenarios," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 7, no. 12, hlm. e202500115, Des 2025, doi: 10.1002/aisy.202500115.
[20] A. Aristoteles, R. Sholehurrohman, dan N. N. Wirawan, "Human Sperm Morphology Classification Using YOLOv5 Deep Learning Algorithm," *IJECS*, vol. 4, no. 2, hlm. 99–111, Des 2024, doi: 10.24042/ijecs.v4i2.24419.
[21] D. Hart, K. Cashwell, A. Bhandari, J. Premasinghe, dan C. Schmidt, "A Framework for Evaluating Predicted Sperm Trajectories in Crowded Microscopy Videos," vol. 22, no. 2, hlm. 1–19, Feb 2025, doi: 10.1101/2025.02.20.639342.
[22] Aristoteles, Rahman Taufik, dan Nabillah Aisyah, "Real-time Abnormal Human Sperm Detection Using YOLOv8 and ByteTrack," *IJIES*, vol. 18, no. 10, hlm. 532–545, Nov 2025, doi: 10.22266/ijies2025.1130.34.
[23] M. Handzhiyska *dkk.*, "Cumulus matrix selection leads to isolation of spermatozoa with better motility, morphology, and lower DNA fragmentation," *Reproduction and Fertility*, vol. 5, no. 2, hlm. e230052, Apr 2024, doi: 10.1530/RAF-23-0052.
[24] Y.-C. Wu, E. Chia-Yu Su, J.-H. Hou, C.-J. Lin, K. B. Lin, dan C.-H. Chen, "Artificial intelligence and assisted reproductive technology: A comprehensive systematic review," *Taiwanese Journal of Obstetrics and Gynecology*, vol. 64, no. 1, hlm. 11–26, Jan 2025, doi: 10.1016/j.tjog.2024.10.001.

Ucapan Terima Kasih
Penulis mengucapkan terima kasih kepada para promotor, Universitas Dharma Wacana, Laboratorium Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung, serta seluruh pihak yang telah memberikan dukungan terhadap pelaksanaan penelitian ini.