
REVIEW**Development and Innovation of Livestock Reproductive Technologies for Accelerating Genetic Improvement****Perkembangan dan Inovasi Teknologi Reproduksi Ternak untuk Percepatan Peningkatan Genetik**

Aminurrahman^{1*}, Enny Yuliani¹, Lukman HY¹, Rezki Amalyadi¹, Ine Karni¹, Luluk Lailatun Nurjanah¹, Khairil Anwar¹, Ryan Aryadin Putra¹, Sadarman²

¹*Program Studi S1 Peternakan Fakultas Peternakan Universitas Mataram, Mataram-Nusa Tenggara Barat, 83125, Indonesia*

²*Program Studi Peternakan Fakultas Pertanian dan Peternakan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Pekanbaru-Riau, 28293, Indonesia.*

**Corresponding E-mail : aminurrahman@staff.unram.ac.id*

ABSTRAK

Teknologi reproduksi ternak berkembang dari metode konvensional menuju sistem terpadu yang menggabungkan teknologi reproduksi berbantuan, seleksi genomik, produksi embrio *in vitro*, kriopreservasi, serta teknologi digital dan kecerdasan buatan. Integrasi tersebut berpotensi mempercepat peningkatan mutu genetik melalui peningkatan intensitas seleksi, perbanyak keturunan dari individu unggul, dan pemendekan interval generasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis perkembangan teknologi reproduksi ternak periode 2020–2025, mengidentifikasi kontribusinya terhadap efisiensi genetik, serta mengevaluasi peluang integrasinya dengan pemuliaan modern. Kajian dilakukan menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) berdasarkan pedoman PRISMA 2020. Literatur diperoleh dari Scopus (56 artikel), Google Scholar (95 artikel), dan PubMed (38 artikel) dari 189 artikel yang teridentifikasi, 43 artikel duplikat dihapus, 146 artikel disaring, dan 32 artikel memenuhi kriteria inklusi untuk dianalisis secara tematik. Hasil sintesis menunjukkan lima tema utama, yaitu optimalisasi kualitas gamet dan embrio, integrasi seleksi genomik, multiplikasi genetik melalui inseminasi buatan, transfer embrio dan produksi embrio *in vitro*, kriopreservasi dan keamanan hayati, serta digitalisasi dan kecerdasan buatan. Integrasi teknologi reproduksi dan seleksi genomik memungkinkan identifikasi individu unggul lebih awal dan peningkatan jumlah keturunan dari sumber genetik bernilai tinggi. Namun, penerapannya masih menghadapi kendala biologis, teknis, biaya, infrastruktur, sumber daya manusia, biosafety, regulasi, dan kondisi lingkungan. Integrasi teknologi reproduksi, genomik, dan pengelolaan data menjadi strategi potensial untuk mempercepat peningkatan genetik ternak secara lebih akurat, efisien, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Genetic Gain, Inseminasi Buatan (IB), Seleksi Genomik, Teknologi Reproduksi Ternak, Transfer Embrio (TE).

ABSTRACT

Livestock reproductive technologies have evolved from conventional methods toward integrated systems combining assisted reproductive technologies, genomic selection, *in vitro* embryo production, cryopreservation, digital technologies, and artificial intelligence. This integration offers substantial potential to accelerate genetic improvement by increasing selection intensity, multiplying offspring from genetically superior individuals, and shortening generation intervals. This study aimed to review the development of livestock reproductive technologies during 2020–2025, identify their contributions to genetic efficiency, and evaluate opportunities for integration with modern breeding strategies. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PRISMA 2020 guidelines. Literature was retrieved from Scopus (56 article), Google Scholar (95 article), and PubMed (38 article) of 189 initially identified records, 43 duplicates were removed, 146 records were screened, and 32 studies met the inclusion criteria for thematic synthesis. Five major themes were identified: optimization of gamete and embryo quality, integration of genomic selection, genetic multiplication through artificial insemination, embryo transfer and *in vitro* embryo production, cryopreservation and biosafety, and digitalization and artificial intelligence. The findings indicate that integrating reproductive technologies with genomic selection enables earlier identification of genetically superior individuals and increases the number of offspring produced from high-value genetic resources. However, implementation remains constrained by biological and technical challenges, costs, infrastructure, human resources, biosafety, regulatory requirements, and environmental conditions. Integrating reproductive technologies, genomics, and data-driven management represents a promising strategy to accelerate livestock genetic improvement in a more accurate, efficient, adaptive, and sustainable manner.

Keywords: Artificial Insemination (IB), Embryo Transfer (TE), Genetic Gain, Genomic Selection, Livestock Reproductive Technology.

PENDAHULUAN

Peningkatan efisiensi genetik merupakan komponen penting dalam pengembangan sistem produksi ternak yang produktif, adaptif, dan berkelanjutan. Perkembangan teknologi pemuliaan telah menggeser seleksi dari pendekatan berbasis fenotipe menuju integrasi *genomic selection* dan teknologi reproduksi berbantuan (*assisted reproductive technologies/ART*), seperti inseminasi buatan (IB), *multiple ovulation and*

embryo transfer (MOET), *ovum pick-up/in vitro embryo production* (OPU/IVEP), *sexed semen*, dan transfer embrio. Integrasi tersebut memungkinkan pemanfaatan individu unggul secara lebih intensif. Mueller & Van Eenennaam (2022) menyatakan bahwa kombinasi *genomic selection*, ART, dan *gene editing* berpotensi mempercepat peningkatan genetik melalui peningkatan jumlah keturunan dari individu superior dan akurasi seleksi pada usia dini. Sejalan dengan itu, Van Eenennaam

(2025) menyebutkan bahwa teknologi reproduksi dan genomik dapat meningkatkan *genetic gain* melalui peningkatan intensitas seleksi dan pemendekan interval generasi.

Pada periode 2020–2025, penelitian menunjukkan semakin kuatnya integrasi teknologi reproduksi dan genomik. Seleksi genomik memungkinkan pemilihan calon ternak unggul berdasarkan informasi DNA sebelum data performans lengkap tersedia, sedangkan OPU/IVF memungkinkan produksi lebih banyak embrio dari donor dengan potensi genetik tinggi. Mueller & Van Eenennaam (2022) menegaskan adanya efek sinergis antara seleksi genomik dan ART, sementara Pasquariello dkk. (2024) menunjukkan bahwa ART berpotensi memperpendek interval generasi pada ruminansia, meskipun keberhasilannya dipengaruhi umur donor, kualitas oosit, protokol kultur embrio, dan kondisi reproduksi. Dengan demikian, efisiensi genetik dipengaruhi oleh interaksi akurasi dan intensitas seleksi, interval generasi, serta kapasitas reproduksi individu terpilih.

Penelitian periode 2020–2025 menunjukkan munculnya berbagai inovasi yang mengintegrasikan teknologi reproduksi dengan seleksi genetik dan teknologi digital, meliputi biopsi embrio untuk seleksi genomik sebelum transfer, optimalisasi produksi embrio *in vitro*, kriopreservasi, integrasi data reproduksi dan genomik, serta pemanfaatan kecerdasan buatan. Fujii dkk. (2021)

menunjukkan bahwa biopsi embrio hasil fertilisasi *in vitro* berpotensi mendukung seleksi genomik sebelum transfer, yang juga relevan pada sapi perah di lingkungan tropis (Oliveira dkk., 2023). Integrasi teknologi reproduksi berbantuan dan seleksi genomik memungkinkan identifikasi individu unggul lebih awal dan perbanyakannya melalui teknologi embrio sehingga berpotensi mempercepat *genetic gain* (Mueller & Van Eenennaam, 2022). Optimalisasi kompetensi oosit, media kultur, dan kondisi embrio turut diarahkan untuk meningkatkan kualitas produksi embrio (Aguila dkk., 2020; Amaral dkk., 2022; Hansen, 2024), sedangkan integrasi teknologi reproduksi dengan transfer embrio dan sinkronisasi reproduksi semakin dikembangkan (Pugliesi dkk., 2024). Pemanfaatan kecerdasan buatan juga mulai mendukung optimalisasi fertilitas dan seleksi genetik (Mansour, 2025).

Perkembangan teknologi juga mencakup *gene editing*, khususnya CRISPR/Cas, yang menawarkan peluang menghasilkan ternak dengan ketahanan penyakit, produktivitas, dan adaptasi lingkungan yang lebih baik (Ammar dkk., 2026). Namun, penerapannya masih menghadapi kendala efisiensi *editing*, *off-target effects*, *mosaicism*, regulasi, bioetika, dan penerimaan masyarakat (Fischer & Schnieke, 2023). Selain itu, Silva Neto dkk. (2024) menunjukkan bahwa interaksi genotipe $\times$ lingkungan (G $\times$ E) berperan penting karena

genotipe unggul pada suatu lingkungan belum tentu optimal pada lingkungan lain. Oleh karena itu, percepatan *genetic gain* perlu mempertimbangkan kemampuan ternak beradaptasi terhadap kondisi lingkungan produksi.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas teknologi reproduksi dan pemuliaan modern, bukti ilmiahnya masih terfragmentasi berdasarkan jenis teknologi, spesies, sifat produksi, dan sistem produksi. Mueller & Van Eenennaam (2022) menekankan bahwa integrasi seleksi genomik, ART, dan *gene editing*, sedangkan Pasquariello dkk. (2024) berfokus pada ART dan pemendekan interval generasi. Menchon dkk. (2024) menunjukkan keterbatasan bukti mengenai adopsi teknologi genetika, sementara Van Eenennaam (2025) mengidentifikasi kendala biaya, infrastruktur, sumber daya manusia, pencatatan, dan kapasitas kelembagaan di negara berkembang. Kondisi tersebut menunjukkan adanya *research gap* terkait belum terintegrasinya bukti mengenai kontribusi IB, transfer embrio, OPU/IVF, *sexed semen*, seleksi genomik, dan *gene editing* terhadap *genetic gain* pada berbagai spesies, lingkungan, dan sistem peternakan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, *Systematic Literature Review* (SLR) diperlukan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai perkembangan teknologi reproduksi dan kontribusinya terhadap efisiensi genetika. SLR ini bertujuan menganalisis perkembangan

teknologi reproduksi ternak periode 2020–2025, mengidentifikasi kontribusinya terhadap efisiensi genetika, membandingkan temuan dan keterbatasan penelitian terdahulu, serta merumuskan pola integrasi teknologi reproduksi dan pemuliaan modern. Dalam konteks pengelolaan sumber daya genetika, FAO menekankan pentingnya pemanfaatan teknologi genomik dan reproduksi yang sejalan dengan konservasi dan pemanfaatan berkelanjutan sumber daya genetika ternak (Food and Agriculture Organization (FAO), 2018). Hasil kajian diharapkan memberikan dasar konseptual dan praktis bagi peneliti, pemulia, industri peternakan, dan pembuat kebijakan dalam mengembangkan strategi pemuliaan yang lebih cepat, presisi, adaptif, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian mengenai perkembangan teknologi reproduksi ternak dan kontribusinya terhadap peningkatan efisiensi genetika. Proses review dilakukan secara sistematis dan transparan dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020, yang mencakup tahapan identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi artikel dalam sintesis akhir (Page dkk., 2021).

Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data akademik, yaitu Scopus (56 artikel), Google Scholar (95 artikel), PubMed (38 artikel). Literatur dibatasi pada publikasi tahun 2020–2025 untuk memperoleh bukti ilmiah yang relatif mutakhir. Kata kunci yang digunakan meliputi “*livestock reproductive technology*”, “*assisted reproductive technology*”, “*artificial insemination*”, “*embryo transfer*”, “*in vitro embryo production*”, “*genomic selection*”, “*genetic gain*”, dan “*livestock breeding*”. Kata kunci dikombinasikan menggunakan operator Boolean AND dan OR, misalnya “*assisted reproductive technology*” AND “*genetic gain*” atau “*embryo transfer*” OR “*in vitro embryo production*” AND *livestock*. Proses pencarian dan pelaporannya dilakukan secara terdokumentasi untuk meningkatkan transparansi dan memungkinkan proses review direplikasi (Page dkk., 2021).

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

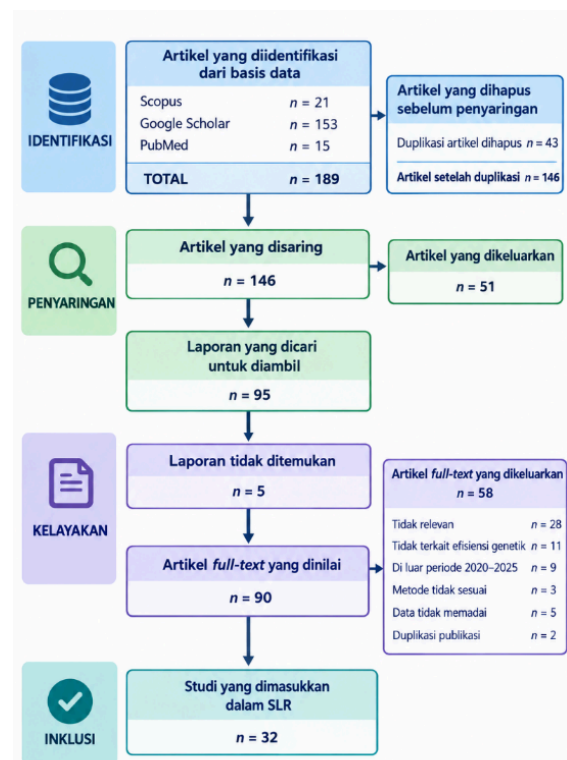
Artikel yang dimasukkan dalam review harus memenuhi kriteria: (1) diterbitkan pada periode 2020–2025; (2) berupa artikel penelitian atau review ilmiah yang telah melalui *peer review*; (3) membahas teknologi reproduksi ternak, seleksi genetik/genomik, atau hubungan teknologi reproduksi dengan peningkatan efisiensi genetik; (4) tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia; dan (5) memiliki teks lengkap yang dapat diakses. Artikel dikeluarkan apabila berupa duplikasi, prosiding atau editorial yang tidak memiliki

informasi ilmiah yang memadai, abstrak tanpa teks lengkap, serta publikasi yang tidak relevan dengan fokus kajian. Penetapan kriteria tersebut dilakukan sebelum proses seleksi untuk mengurangi subjektivitas dan menjaga konsistensi pemilihan artikel.

Seleksi Literatur dan Analisis Data

Seleksi artikel dilakukan secara bertahap berdasarkan judul, abstrak, dan teks lengkap. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi kemudian diekstraksi berdasarkan penulis, tahun publikasi, negara/lokasi penelitian, spesies ternak, teknologi reproduksi yang digunakan, metode penelitian, tujuan penelitian, serta temuan utama (Gambar 1).

Gambar 1. Diagram Alir Proses Seleksi Studi dalam Systematic Literature Review



Selanjutnya, data dianalisis menggunakan sintesis tematik, yaitu mengelompokkan hasil penelitian berdasarkan

tema utama, meliputi IB dan manajemen reproduksi, TE, produksi embrio *in vitro*, seleksi genomik, kriopreservasi, serta integrasi teknologi reproduksi dan pemuliaan genetik. Hasil sintesis disajikan secara deskriptif melalui tabel dan narasi untuk mengidentifikasi perkembangan teknologi, pola temuan, perbedaan hasil penelitian, serta peluang pengembangan teknologi reproduksi dalam mempercepat peningkatan mutu genetik ternak. Pendekatan ini sesuai dengan tujuan systematic review untuk menghasilkan sintesis pengetahuan dan mengidentifikasi prioritas penelitian selanjutnya (Page dkk., 2021).

Validitas dan Konsistensi Review

Kualitas dan konsistensi proses review dijaga melalui penerapan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, pencatatan proses pencarian, serta dokumentasi setiap keputusan pada tahap seleksi. Alur seleksi artikel dilaporkan menggunakan PRISMA 2020 flow diagram, sedangkan data artikel yang memenuhi kriteria disusun dalam matriks ekstraksi untuk memudahkan perbandingan antarpublikasi. PRISMA 2020 menyediakan checklist 27 item dan diagram alur yang dirancang untuk meningkatkan transparansi pelaporan systematic review (Page dkk., 2021).

Berdasarkan proses pencarian literatur, diperoleh sebanyak 189 artikel dari enam database akademik. Setelah dilakukan penghapusan sebanyak 43 artikel duplikat, diperoleh 146 artikel yang selanjutnya

dilakukan *screening* berdasarkan judul dan abstrak. Pada tahap tersebut, sebanyak 51 artikel dikeluarkan karena tidak sesuai dengan fokus kajian. Sebanyak 95 artikel kemudian ditelusuri untuk memperoleh teks lengkap, tetapi 5 artikel tidak dapat diperoleh dalam bentuk *full text*. Dengan demikian, sebanyak 90 artikel dinilai berdasarkan kriteria kelayakan. Hasil penilaian *full text* menunjukkan bahwa 58 artikel tidak memenuhi kriteria inklusi, terdiri atas artikel yang tidak berfokus pada teknologi reproduksi ternak (n=28), tidak berkaitan dengan peningkatan efisiensi genetik (n=11), berada di luar periode publikasi 2020–2025 (n=9), memiliki metode yang tidak sesuai (n=3), tidak menyediakan informasi yang memadai (n=5), dan merupakan duplikasi publikasi (n=2). Selanjutnya, sebanyak 32 artikel memenuhi seluruh kriteria inklusi dan digunakan dalam sintesis Systematic Literature Review.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Literatur yang Direview

Hasil penelusuran literatur (Tabel 1) menunjukkan bahwa penelitian mengenai teknologi reproduksi ternak pada periode 2020–2025 mengalami perkembangan yang cukup luas, terutama pada integrasi artificial reproductive technologies (ART), *in vitro* embryo production (IVEP), embryo transfer (ET), seleksi genomik, dan teknologi reproduksi berbasis data. Literatur yang dianalisis memperlihatkan bahwa perkembangan teknologi reproduksi tidak lagi

hanya diarahkan untuk meningkatkan keberhasilan reproduksi, tetapi juga untuk mempercepat proses seleksi dan peningkatan mutu genetik ternak. Crowe dkk. (2021) menunjukkan bahwa penerapan teknologi reproduksi dapat digunakan untuk mempercepat *genetic gain* melalui peningkatan jumlah keturunan dari individu dengan nilai genetik tinggi. Perspektif yang sama dikemukakan oleh (Mueller & Van Eenennaam, 2022), yang menempatkan seleksi genomik, ART, dan *gene editing* sebagai teknologi yang berpotensi saling memperkuat dalam program peningkatan genetik sapi.

Berdasarkan karakteristik literatur, penelitian yang dominan berasal dari bidang reproduksi ternak, genetika dan pemuliaan, embriologi, serta bioteknologi reproduksi. Sebagian besar penelitian menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif untuk mengevaluasi keberhasilan produksi embrio, kualitas oosit dan embrio, tingkat kebuntingan, kualitas semen, atau akurasi seleksi genomik. Di sisi lain, beberapa penelitian menggunakan pendekatan review dan evaluasi sosial untuk memahami penerimaan teknologi oleh pengguna. Kondrup, 2021 menunjukkan bahwa penerimaan peternak terhadap penggunaan semen dari pejantan yang dihasilkan melalui IVEP dan seleksi genomik menjadi salah satu faktor penting dalam implementasi teknologi reproduksi. Hal tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan teknologi tidak hanya ditentukan oleh

performa biologis, tetapi juga oleh penerimaan dan kesiapan pengguna.

Tabel 1. Sintesis temuan utama literatur

Peneliti	Fokus	Metode/Pendekatan	Temuan Utama
(Aguila <i>et al.</i> , 2020)	Kompetensi i oosit	Review	Seleksi oosit menjadi faktor penting dalam keberhasilan IVEP
(Cole <i>et al.</i> , 2021)	Program pemuliaan	Review	Seleksi genetik perlu mempertimbangkan tujuan pemuliaan dan karakter yang diinginkan
(Crowe <i>et al.</i> , 2021)	ART dan <i>genetic gain</i>	Review	ART berpotensi mempercepat <i>genetic gain</i> melalui peningkatan jumlah keturunan unggul
(Fujii <i>et al.</i> , 2021)	Seleksi genomik embrio	Eksperimental	Biopsi embrio berpotensi digunakan untuk seleksi genomik sebelum transfer
(Gebreyesus <i>et al.</i> , 2024)	Penerimaan teknologi	Survei	Penerimaan peternak menjadi faktor penting dalam adopsi teknologi
(Gore <i>et al.</i> , 2021)	Genetik kambing tropis	Program pemuliaan	Teknologi reproduksi dan genomik dapat meningkatkan respons seleksi di wilayah tropis
(Giordano <i>et al.</i> , 2022)	Manajemen reproduksi	Review	Integrasi berbagai data biologis dan manajemen dapat meningkatkan ketepatan keputusan reproduksi
Madureira <i>et al.</i> (2022)	Genomik dan fertilitas	Analisis empiris	Informasi genomik dapat dikaitkan dengan

Peneliti	Fokus	Metode/Pendekatan	Temuan Utama
Miller (2022)	Genomik dan embrio	Review	parameter reproduksi Seleksi genomik membuka peluang pemanfaatan teknologi embrio secara lebih luas
Mueller & Van Eenennaam, (2022)	Integrasi teknologi	Review	Genomik, ART, dan <i>gene editing</i> berpotensi menghasilkan sinergi peningkatan genetika
Júnior <i>et al.</i> (2022)	Seleksi genomik	Review	Seleksi genomik memiliki prospek penting pada sapi <i>Bos indicus</i>
González-Rodríguez <i>et al.</i> (2022)	Kriopreservasi embrio	Eksperimental	Vitrifikasi dan <i>in-straw warming</i> tidak menurunkan tingkat kebuntingan embrio biopsi
Idrissi <i>et al.</i> (2022)	Kualitas embrio	Eksperimental	DHA dapat memengaruhi kualitas embrio yang diproduksi secara <i>in vitro</i>
Amaral <i>et al.</i> (2022)	Kultur embrio	Eksperimental	Komposisi media kultur memengaruhi respons embrio dan hasil kebuntingan
Oliveira <i>et al.</i> (2023)	Biopsi embrio	Eksperimental	Biopsi embrio berpotensi mendukung seleksi genomik pada sapi perah tropis
(Hansen, 2023)	IVEP	Review	IVEP memiliki peluang besar tetapi masih menghadapi berbagai kendala

Peneliti	Fokus	Metode/Pendekatan	Temuan Utama
(Pugliesi <i>et al.</i> , 2024)	ART pada sapi	Review	biologis dan teknis ART berkembang pesat dan semakin terintegrasi dengan program transfer embrio
(Hansen, 2024)	Produksi embrio	Review	Optimalisasi produksi embrio menjadi kebutuhan penting dalam pengembangan IVEP
(Krisher & Herrick, 2024)	Media kultur	Review	Perkembangan media kultur menjadi komponen penting dalam peningkatan produksi embrio
(Mogas <i>et al.</i> , 2024)	Vitrifikasi	Review	Optimalisasi vitrifikasi diperlukan untuk mempertahankan viabilitas oosit dan embrio
(Funnell <i>et al.</i> , 2024)	Keamanan embrio	Review	Risiko penyakit perlu diperhatikan dalam produksi dan perdagangan embrio
(Van Eenennaam, 2025)	Teknologi peningkatan genetika	Review	Teknologi genetika modern semakin terintegrasi dalam program pemuliaan
(Mansour, 2025)	AI dan reproduksi	Review	AI berpotensi membantu optimalisasi fertilitas dan seleksi genetika
(Bangert & Wheeler, 2025)	ART di wilayah tropis	Review	ART berpotensi mendukung peningkatan produksi dan keamanan pangan di wilayah tropis

Secara temporal, literatur 2020–2025 menunjukkan pergeseran fokus dari optimalisasi teknik reproduksi menuju integrasi berbagai teknologi untuk mempercepat kemajuan genetik. Pada tahap awal, perhatian banyak diberikan pada peningkatan kompetensi oosit dan keberhasilan produksi embrio secara *in vitro* (Aguila dkk., 2020). Selanjutnya, penelitian berkembang menuju penggunaan biopsi embrio untuk seleksi genomik (Fujii dkk., 2021; Oliveira dkk., 2023), integrasi ART dengan seleksi genomik (Crowe dkk., 2021; Mueller & Van Eenennaam, 2022), serta pemanfaatan kecerdasan buatan dalam pengambilan keputusan reproduksi dan seleksi genetik (Mansour, 2025). Dengan demikian, profil literatur memperlihatkan adanya perubahan paradigma dari teknologi reproduksi sebagai alat peningkatan reproduksi menuju teknologi reproduksi sebagai instrumen percepatan peningkatan mutu genetik ternak (Tabel 1).

Sintesis Temuan Utama

Sintesis literatur menunjukkan bahwa perkembangan teknologi reproduksi ternak dapat dikelompokkan menjadi beberapa kelompok utama, yaitu (1) optimalisasi produksi embrio, (2) integrasi teknologi reproduksi dengan seleksi genomik, (3) peningkatan efisiensi reproduksi melalui manajemen berbasis data, (4) kriopreservasi dan keberlanjutan embrio, serta (5) integrasi teknologi digital dan kecerdasan buatan.

Kelima kelompok tersebut memiliki keterkaitan yang kuat dalam membentuk sistem pemuliaan ternak modern.

Tabel 2. Tema hasil sintesis literatur

Tema	Konsep utama	Referensi pendukung	Implikasi
Kualitas gamet dan embrio	Seleksi oosit, kultur embrio, nutrisi, biomarker	Aguila <i>et al.</i> (2020); Idrissi <i>et al.</i> (2022); Amaral <i>et al.</i> (2022)	Meningkatkan keberhasilan IVEP
Seleksi genomik	Biopsi embrio, genomic selection	Fujii <i>et al.</i> (2021); Fernandes Júnior <i>et al.</i> (2022); de Oliveira <i>et al.</i> (2023)	Seleksi individu unggul lebih awal
Multiplikasi genetik	AI, ET, IVEP	Crowe <i>et al.</i> (2021); Miller (2022); Pugliesi <i>et al.</i> (2024)	Mempercepat <i>genetic gain</i>
Kriopreservasi dan keamanan	Vitrifikasi, penyimpanan, biosecurity	González-Rodríguez <i>et al.</i> (2022); Mogas (2024); Funnell <i>et al.</i> (2024)	Memperluas penggunaan embrio
Digitalisasi	Integrasi data dan AI	Giordano <i>et al.</i> (2022); Mansour (2025)	Mendukung reproduksi presisi

Teknologi Reproduksi sebagai Pengungkit *Genetic Gain*

Salah satu temuan paling konsisten dari literatur adalah bahwa teknologi reproduksi dapat berfungsi sebagai pengungkit percepatan kemajuan genetik. Dalam pemuliaan konvensional, jumlah keturunan dari pejantan atau induk unggul relatif terbatas sehingga proses peningkatan frekuensi gen yang diinginkan berlangsung lebih lambat.

Teknologi seperti inseminasi buatan, transfer embrio, dan IVEP memungkinkan peningkatan jumlah keturunan yang berasal dari individu dengan potensi genetik tinggi. (Crowe dkk., 2021) menegaskan bahwa ART dapat digunakan untuk mempercepat *genetic gain*, terutama ketika dikombinasikan dengan seleksi terhadap individu dengan nilai genetik tinggi.

Temuan tersebut diperkuat oleh Miller (2022), yang menjelaskan bahwa penggunaan seleksi genomik pada sapi potong menciptakan peluang baru untuk mengintegrasikan teknologi embrio dalam program pemuliaan. Mueller & Van Eenennaam (2022) menunjukkan bahwa seleksi genomik dan ART memiliki efek yang bersifat sinergis karena seleksi genomik dapat menentukan individu unggul lebih awal, sedangkan teknologi reproduksi memungkinkan individu tersebut menghasilkan lebih banyak keturunan.

Dengan demikian, hasil SLR menunjukkan bahwa efisiensi genetik tidak hanya ditentukan oleh akurasi seleksi, tetapi juga oleh kemampuan sistem reproduksi untuk memperbanyak individu terpilih. Konsep ini menjadi penting karena menunjukkan adanya hubungan antara *selection intensity*, *generation interval*, dan jumlah keturunan yang dapat dihasilkan dari individu unggul.

Integrasi Seleksi Genomik dan Produksi Embrio

Seleksi genomik memungkinkan identifikasi calon ternak unggul berdasarkan

informasi DNA pada usia yang jauh lebih muda dibandingkan seleksi berdasarkan performa fenotipik. Cole dkk. (2021) menekankan bahwa perkembangan teknologi genomik telah mengubah cara keputusan seleksi dilakukan dalam program pemuliaan modern. Fujii dkk. (2021) menunjukkan potensi penggunaan biopsi embrio untuk melakukan seleksi genomik pada embrio sapi hasil fertilisasi *in vitro*. Pendekatan tersebut memungkinkan embrio dievaluasi secara genetik sebelum ditransfer ke induk resipien. Teknologi ini kemudian semakin relevan pada ternak tropis, sebagaimana ditunjukkan oleh Oliveira dkk. (2023), yang membahas penerapan biopsi embrio untuk seleksi genomik pada sapi perah di lingkungan tropis.

Dari perspektif efisiensi genetik, integrasi tersebut memiliki implikasi penting karena seleksi dapat dilakukan sebelum embrio dilahirkan. Dengan demikian, embrio yang memiliki potensi genetik lebih rendah dapat dieliminasi, sementara embrio dengan nilai genetik tinggi diprioritaskan untuk transfer. Miller (2022) menyebut perkembangan ini sebagai salah satu peluang penting dalam pemanfaatan teknologi embrio pada program peningkatan genetik sapi.

Optimalisasi IVEP dan Kualitas Embrio

Aguila dkk. (2020) menunjukkan bahwa kompetensi oosit merupakan salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan produksi embrio secara *in vitro*. Artinya, peningkatan jumlah embrio tanpa

memperhatikan kualitas oosit belum tentu menghasilkan peningkatan efisiensi reproduksi dan genetik. Hasil kajian juga menunjukkan bahwa efektivitas teknologi reproduksi sangat bergantung pada kualitas oosit, fertilisasi, kultur embrio, dan kemampuan embrio untuk berkembang secara normal. Penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa kualitas embrio dipengaruhi oleh berbagai faktor selama proses kultur. Idrissi dkk. (2022) menunjukkan adanya pengaruh DHA terhadap kualitas embrio yang diproduksi secara *in vitro*. Amaral dkk. (2022) juga menunjukkan bahwa respons embrio dan hasil kebuntingan dapat dipengaruhi oleh komposisi media kultur. Temuan tersebut menunjukkan bahwa optimalisasi IVEP merupakan proses multidimensional yang tidak hanya bergantung pada kualitas gamet, tetapi juga pada lingkungan kultur.

Hansen (2023) menekankan bahwa meskipun IVEP telah mengalami kemajuan besar, masih terdapat berbagai tantangan yang menghambat penggunaan secara lebih luas. Dengan demikian, perkembangan teknologi reproduksi perlu diarahkan tidak hanya pada peningkatan kuantitas embrio, tetapi juga pada peningkatan kualitas, viabilitas, dan kemampuan embrio menghasilkan kebuntingan normal.

Kriopreservasi dan Transfer Embrio

Kriopreservasi merupakan komponen penting dalam sistem reproduksi berbasis embrio karena memungkinkan embrio unggul

disimpan, di transportasikan, dan digunakan pada waktu yang sesuai. González-Rodríguez dkk. (2022) menunjukkan bahwa vitrifikasi dan proses *in-straw warming* tidak memberikan pengaruh negatif terhadap tingkat kebuntingan embrio sapi yang telah menjalani biopsi. Temuan ini memperkuat peluang penggunaan kriopreservasi dalam sistem seleksi genomik berbasis embrio.

Mogas dkk. (2024) menekankan bahwa pengembangan metode vitrifikasi terus diperlukan untuk meningkatkan viabilitas oosit dan embrio yang diproduksi secara *in vitro*. Sementara itu, Funnell dkk. (2024) menunjukkan bahwa perkembangan perdagangan dan penggunaan embrio secara internasional juga perlu disertai perhatian terhadap risiko penyakit dan keamanan biologis.

Pugliesi dkk. (2024) menunjukkan bahwa perkembangan ART pada sapi, khususnya dalam konteks Brasil, memperlihatkan semakin luasnya penerapan transfer embrio dan program reproduksi yang disinkronisasi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa teknologi reproduksi modern telah bergerak dari teknologi laboratorium menuju sistem produksi yang semakin terintegrasi dengan manajemen peternakan.

Manajemen Reproduksi Berbasis Data dan Teknologi Digital

Perkembangan teknologi reproduksi juga menunjukkan kecenderungan menuju pengambilan keputusan berbasis data.

Giordano dkk. (2022) menekankan pentingnya integrasi data biologis, performa, dan manajemen dalam merancang strategi reproduksi yang lebih spesifik terhadap kondisi individu ternak. Pendekatan tersebut menunjukkan perubahan dari sistem reproduksi yang bersifat seragam menuju sistem yang lebih presisi.

Madureira dkk. (2022) memperlihatkan bahwa informasi genomik dapat dikaitkan dengan parameter reproduksi, sehingga informasi genetik tidak hanya digunakan untuk sifat produksi tetapi juga dapat membantu pengambilan keputusan terkait fertilitas. Perkembangan ini semakin diperluas melalui penggunaan kecerdasan buatan. Mansour (2025) menunjukkan bahwa integrasi ART dan AI memiliki potensi untuk meningkatkan optimasi fertilitas dan seleksi genetik pada sistem produksi ternak.

Dengan demikian, teknologi reproduksi masa depan berpotensi membentuk suatu precision livestock reproduction system, yaitu sistem yang menggabungkan data fenotipik, genetik, reproduksi, dan lingkungan untuk menentukan ternak yang dipertahankan, dikawinkan, atau digunakan sebagai sumber embrio.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil *Systematic Literature Review* periode 2020–2025, teknologi reproduksi ternak mengalami perkembangan dari metode konvensional menuju pendekatan yang lebih terintegrasi dengan seleksi genomik

dan teknologi digital. Perkembangan tersebut mencakup Inseminasi Buatan (IB), transfer embrio (TE), produksi embrio *in vitro* (IVEP), seleksi genomik, kriopreservasi, serta manajemen reproduksi berbasis data. Inovasi yang teridentifikasi meliputi biopsi embrio untuk seleksi genomik sebelum transfer, optimalisasi kualitas oosit dan embrio, pengembangan teknik kriopreservasi, integrasi data reproduksi dan genomik, serta pemanfaatan kecerdasan buatan dalam pengambilan keputusan reproduksi. Keterkaitan antara teknologi memungkinkan identifikasi ternak unggul secara lebih awal, peningkatan jumlah keturunan dari individu berpotensi genetik tinggi, dan pemendekan interval generasi. Dengan demikian, integrasi teknologi reproduksi, seleksi genomik, dan teknologi berbasis data berpotensi mempercepat peningkatan genetik ternak secara lebih akurat dan efisien. Namun, penerapannya masih dipengaruhi oleh kualitas gamet dan embrio, biaya, infrastruktur, sumber daya manusia, biosafety, regulasi, serta kondisi lingkungan dan sistem produksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah mendukung proses pencarian, pengumpulan, pengolahan, dan analisis literatur sehingga kajian mengenai perkembangan dan inovasi teknologi reproduksi ternak untuk percepatan peningkatan genetik ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENCES

- Aguila, L., Treulen, F., Therrien, J., Felmer, R., Valdivia, M., & Smith, L. C. 2020. Oocyte selection for in vitro embryo production in bovine species: noninvasive approaches for new challenges of oocyte competence. *Animals*, 10(12), 2196.
- Amaral, T. F., de Grazia, J. G. V., Martinhao, L. A. G., De Col, F., Siqueira, L. G. B., Viana, J. H. M., & Hansen, P. J. 2022. Actions of CSF2 and DKK1 on bovine embryo development and pregnancy outcomes are affected by composition of embryo culture medium. *Scientific Reports*, 12(1), 7503.
- Ammar, M., Nazir, F., Zhou, R., Xiong, H., Liang, Q., Huang, A., Majeed, A., Zhou, G., & Yu, G. 2026. Comparative Biochemistry and Physiology - Part D : Genomics and Proteomics Multi-omics analysis reveals molecular disruption in mouse testes following cumulative heat stress. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part D: Genomics and Proteomics*, 59(February), 101799.
- Bangert, E. A., & Wheeler, M. B. 2025. Assisted reproductive technologies and genetic improvement strategies for enhancing livestock production and food security in Tropical East Africa: A review. 9, 189–203.
- Cole, J. B., Dürr, J. W., & Nicolazzi, E. L. 2021. Invited review: The future of selection decisions and breeding programs: What are we breeding for, and who decides? *Journal of Dairy Science*, 104(5), 5111–5124.
- Crowe, A. D., Lonergan, P., & Butler, S. T. 2021. Invited review: Use of assisted reproduction techniques to accelerate genetic gain and increase value of beef production in dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 104(12), 12189–12206.
- Fao, F. 2018. Food and agriculture organization of the United Nations. Rome, URL: [Http://Faostat. Fao. Org](http://Faostat.Fao.Org), 403.
- Fischer, K., & Schnieke, A. 2023. How genome editing changed the world of large animal research. *Frontiers in Genome Editing*, 5, 1272687.
- Fujii, T., Naito, A., Moriyasu, S., & Kageyama, S. 2021. Potential of preimplantation genomic selection using the blastomere separation technique in bovine in vitro fertilized embryos. *Journal of Reproduction and Development*, 67(2), 155–159.
- Funnell, B., Briand-Amirat, L., Viana, J. H. M., & Perry, G. 2024. Disease risk of in vitro produced embryos: A review of current commercial practices in the context of international trade with emphasis on bovine embryos. *Theriogenology*, 230, 212–219.
- Gebreyesus, G., Secher, J. B., Lund, M. S., Kupisiewicz, K., Ivask, M., Hallap, T., Pärn, P., & Su, G. 2024. Genetic

- parameters for bull effects on in vitro embryo production (IVP) and relationship between semen quality traits and IVP performance. *Animal Reproduction Science*, 263, 107436.
- Giordano, J. O., Sitko, E. M., Rial, C., Pérez, M. M., & Granados, G. E. 2022. Symposium review: Use of multiple biological, management, and performance data for the design of targeted reproductive management strategies for dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(5), 4669–4678.
- González-Rodríguez, N., Martínez-Rodero, I., Scherzer, J., Jung, S., Reichenbach, M., Zablotski, Y., Otzdorff, C., Zerbe, H., & Mogas, T. 2022. Vitrification and in-straw warming do not affect pregnancy rates of biopsied bovine embryos. *Theriogenology*, 191, 221–230.
- Gore, D. L. M., Okeno, T. O., Muasya, T. K., & Mburu, J. N. 2021. Improved response to selection in dairy goat breeding programme through reproductive technology and genomic selection in the tropics. *Small Ruminant Research*, 200, 106397.
- Hansen, P. J. 2023. Some challenges and unrealized opportunities toward widespread use of the in vitro-produced embryo in cattle production. *Animal*, 17, 100745.
- Hansen, P. J. 2024. Pressing needs and recent advances to enhance production of embryos in vitro in cattle. *Animal Reproduction*, 21(3), e20240036.
- Idrissi, S. J., Slezec-Frick, V., Le Bourhis, D., Le Berre, L., Joly, T., Buff, S., Desmarchais, A., Schibler, L., Salvetti, P., & Elis, S. 2022. Effect of DHA on the quality of In vitro produced bovine embryos. *Theriogenology*, 187, 102–111.
- Júnior, G. A. F., Peripolli, E., Schmidt, P. I., Campos, G. S., Mota, L. F. M., Mercadante, M. E. Z., Baldi, F., Carnevalheiro, R., & de Albuquerque, L. G. 2022. Current applications and perspectives of genomic selection in *Bos indicus* (Nellore) cattle. *Livestock Science*, 263, 105001.
- Kondrup, S. 2021. Research results. *Journal of Dairy Science*, 104(7), 8023–8038.
- Krisher, R. L., & Herrick, J. R. 2024. Bovine embryo production in vitro: evolution of culture media and commercial perspectives. *Animal Reproduction*, 21(3), e20240051.
- Madureira, A. M. L., Denis-Robichaud, J., Guida, T. G., Cerri, R. L. A., & Vasconcelos, J. L. M. 2022. Association between genomic daughter pregnancy rates and reproductive parameters in Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 105(6), 5534–5543.
- Mansour, H. A. E.-H. 2025. Integration of assisted reproductive technologies and artificial intelligence for optimizing fertility and genetic selection in livestock

- production. *Discover Applied Sciences*, 7(10), 1143.
- Menchon, P., Manning, J. K., Swain, D. L., & Cosby, A. 2024. Exploration of extension research to promote genetic improvement in cattle production: systematic review. *Animals*, 14(2), 231.
- Miller, S. 2022. Genomic selection in beef cattle creates additional opportunities for embryo technologies to meet industry needs. *Reproduction, Fertility and Development*, 35(2), 98–105.
- Mogas, T., García-Martínez, T., & Martínez-Rodero, I. 2024. Methodological approaches in vitrification: enhancing viability of bovine oocytes and in vitro-produced embryos. *Reproduction in Domestic Animals*, 59, e14623.
- Mueller, M. L., & Van Eenennaam, A. L. 2022. Synergistic power of genomic selection, assisted reproductive technologies, and gene editing to drive genetic improvement of cattle. *CABI Agriculture and Bioscience*, 3(1), 13.
- Oliveira, C. S., Camargo, L. S. A., Silva, M. V. G. B. da, Saraiva, N. Z., Quintão, C. C., & Machado, M. A. 2023. Embryo biopsies for genomic selection in tropical dairy cattle. *Animal Reproduction*, 20(2), e20230064.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., & Brennan, S. E. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Bmj*, 372.
- Pasquariello, R., Bogliolo, L., Di Filippo, F., Leoni, G. G., Nieddu, S., Podda, A., Brevini, T. A. L., & Gandolfi, F. 2024. Use of assisted reproductive technologies (ARTs) to shorten the generational interval in ruminants: current status and perspectives. *Theriogenology*, 225, 16–32.
- Pugliesi, G., Feltrin, I. R., Mattos, A. C. D., Silva, A. G., Morelli, K. G., Nishmura, T. K., & Sales, J. N. de S. 2024. Evolution over the last 40 years of the assisted reproductive technologies in cattle-the Brazilian perspective for embryo transfer and resynchronization programs (part II). *Animal Reproduction*, 21(3), e20240058.
- Silva Neto, J. B., Mota, L. F. M., Londoño-Gil, M., Schmidt, P. I., Rodrigues, G. R. D., Ligor, V. A., Arikawa, L. M., Magnabosco, C. U., Brito, L. F., & Baldi, F. 2024. Genotype-by-environment interactions in beef and dairy cattle populations: A review of methodologies and perspectives on research and applications. *Animal Genetics*, 55(6), 871–892.
- Van Eenennaam, A. L. 2025. Current and future uses of genetic improvement technologies in livestock breeding programs. *Animal Frontiers*, 15(1), 80–90.