

## Peran Seleksi Genetik terhadap Peningkatan Produktivitas Ternak Lokal untuk Mendukung Swasembada Pangan Nasional

**Woki Bilyaro<sup>1\*</sup>, Arif Rahman Azis<sup>1</sup>, Teguh Rafian<sup>2</sup>, Muhammad Dani<sup>1</sup>, Nurazizah Ramadhanti<sup>1</sup>, Rizky Amrullah Chaniago<sup>1</sup>, Dhini Nova Widyasari<sup>3</sup>, Virna Maharani Dwipassa<sup>1</sup>, Anggun Marisa<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Peternakan, Jurusan Peternakan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu

<sup>2</sup>Program Studi Peternakan, Jurusan Peternakan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

<sup>3</sup>Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Argopuro Jember

Email: [wokibilyaro@unib.ac.id](mailto:wokibilyaro@unib.ac.id)

---

### Abstrak

Program pemuliaan genetik adalah salah satu kunci utama dalam meningkatkan produktivitas ternak lokal dan mendukung swasembada pangan nasional. Review sistematis ini mensintesis bukti empiris dari studi tentang efisiensi seleksi genetik (konvensional dan molekuler/genomik) pada ternak lokal atau tropis khususnya di Indonesia dan negara dengan iklim serupa terkait sifat produksi seperti pertumbuhan, hasil susu, dan efisiensi pakan. Analisis menyoroti estimasi heritabilitas, respons seleksi, hambatan implementasi, dan strategi yang efektif yang telah diterapkan. Hasil menunjukkan bahwa seleksi genetik, terutama bila diikuti oleh penggunaan genomik atau *marker-assisted selection*, memiliki potensi signifikan untuk meningkatkan produktivitas ternak lokal, tetapi diperlukan perbaikan dalam pencatatan data fenotip, sumber daya referensi genomik, dan kebijakan yang mendukung. Rekomendasi meliputi pengembangan populasi referensi lokal, penyusunan tujuan pemuliaan yang jelas, pelibatan peternak kecil, dan konservasi keanekaragaman genetik sebagai bagian dari program nasional.

Kata kunci: Seleksi genetik, Enomik, Ternak lokal, Swasembada pangan

---

### Abstract

*Genetic breeding programs are a primary driver in enhancing the productivity of local livestock and supporting national food self-sufficiency. This systematic review synthesizes empirical evidence from studies on the efficiency of genetic selection (conventional and molecular/genomic) in local or tropical livestock, particularly in Indonesia and countries with similar climates, regarding production traits such as growth, milk yield, and feed efficiency. The analysis highlights estimates of heritability, selection response, implementation bottlenecks, and effective strategies that have been implemented. The results show that genetic selection, especially when accompanied by the application of genomic or marker-assisted selection, has significant potential to improve the productivity of local livestock, but improvements are needed in phenotypic data recording, genomic reference resources, and supportive policies. Recommendations include the development of local reference populations, the formulation of clear breeding objectives, the involvement of smallholder farmers, and the conservation of genetic diversity as part of a national program.*

Keywords: *Genetic selection, Genomics, Local livestock, Food self-sufficiency*

---

## PENDAHULUAN

Produksi protein hewani yang dihasilkan terutama oleh ternak adalah salah satu komponen penting dalam mempertahankan serta meningkatkan ketahanan pangan secara nasional. Pemerintah Indonesia sudah lama telah menargetkan swasembada pangan seperti daging dan susu sebagai bagian dari strategi pangan nasional. Kemandirian pangan nasional menuntut peningkatan produksi protein hewani yang berkelanjutan dan efisien. Ternak lokal Indonesia memiliki potensi besar karena adaptasinya terhadap lingkungan tropis dan kemampuan memanfaatkan pakan lokal, namun produktivitasnya relatif rendah akibat lemahnya sistem pemuliaan yang terstruktur (Widyas *et al.*, 2022). Swasembada pangan nasional memerlukan peningkatan produksi protein hewani yang efisien dan berkelanjutan.

Seleksi genetik merupakan dasar peningkatan produktivitas melalui pemanfaatan variabilitas genetik untuk memilih individu unggul (Mrode *et al.*, 2019). Dalam dekade terakhir, pendekatan secara *genomic selection* (GS) telah merevolusi pemuliaan ternak karena mampu memprediksi nilai pemuliaan secara lebih akurat bahkan sebelum individu berproduksi (Hayes *et al.*, 2023). Namun, penerapan GS di negara berkembang, termasuk Indonesia, menghadapi tantangan seperti keterbatasan populasi referensi, biaya genotip, serta infrastruktur data yang belum memadai (Biscarini *et al.*, 2015). Oleh karena itu, diperlukan kajian sistematis untuk memahami bukti ilmiah yang ada dan merumuskan strategi implementasi yang sesuai guna mendukung swasembada pangan nasional. Seleksi genetik adalah metode sistematis untuk memilih individu dengan nilai beternak (breeding value) tinggi agar keturunannya memiliki performa yang lebih baik. Seleksi konvensional berdasarkan fenotype dan pedigree telah digunakan dalam banyak program pemuliaan, sementara kemajuan dalam teknologi genomik menawarkan peluang meningkatkan akurasi seleksi, terutama untuk sifat produksi kompleks dengan hereditas rendah-sedang.

Di Indonesia, berbagai studi dan review mulai muncul mengenai perbaikan genetik sapi lokal dan peran genetik dalam sifat produksi (Widyas *et al.*, 2022). Namun, pertanyaan yang belum terjawab secara komprehensif adalah: sejauh mana seleksi genetik telah terbukti (melalui bukti empiris) meningkatkan produktivitas ternak lokal, apa metode yang paling efektif dalam konteks lokal, hambatan apa yang dihadapi, dan bagaimana strategi optimal untuk memasukkan seleksi genetik ke dalam kebijakan swasembada pangan.

Seleksi genetik telah terbukti meningkatkan laju kemajuan genetik pada banyak program ternak komersial. penerapannya pada ternak lokal tropis menunjukkan potensi besar namun juga menghadapi hambatan seperti ukuran populasi kecil, data fenotip

terbatas, dan kebutuhan konservasi keanekaragaman genetik. Bukti dan tinjauan mengenai efektivitas pendekatan-pendekatan ini, serta pengalaman di konteks tropis/Indonesia, dikumpulkan dan disintesis pada SLR ini untuk menginformasikan strategi pemuliaan yang mendukung swasembada pangan nasional (GS, R. Mrode *et al.*, 2019).

Tujuan artikel ini adalah mengidentifikasi dampak seleksi genetik terhadap peningkatan sifat produksi ternak lokal, menyintesis kisaran parameter genetik (heritabilitas dan korelasi genetik) pada sifat produksi ternak tropis, menilai tantangan dan peluang penerapan genomic selection di konteks lokal dan rekomendasi strategi pemuliaan genetik yang mendukung swasembada pangan nasional.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Gambaran Umum

Seleksi genetik pada ternak lokal di daerah tropis masih relatif terbatas dibandingkan dengan populasi komersial, terutama di industri ternak yang sudah maju. Sebagian besar studi di daerah tropis menunjukkan bahwa keterbatasan populasi dan infrastruktur data merupakan hambatan utama dalam memperoleh hasil yang representatif. Biscarini dkk. (2015) menyoroti bahwa pembiakan pada ras lokal seringkali masih berorientasi pada konservasi genetik dan belum terintegrasi ke dalam sistem produksi modern. Oleh karena itu, sebagian besar penelitian masih bersifat eksploratif dan belum menghasilkan aplikasi komersial skala besar. Studi di Asia, termasuk Indonesia, umumnya menggunakan data terbatas dari unit pelatihan atau peternakan kecil.

Namun, tren peningkatan dalam penelitian genomik selama dekade terakhir menunjukkan kemajuan yang signifikan. Program genotyping untuk sapi Bali, kambing Kacang, dan ayam lokal telah dilakukan di beberapa universitas dan lembaga penelitian di Indonesia (Widyas dkk., 2022). Hal ini menunjukkan kesadaran nasional akan pentingnya pendekatan berbasis genom dalam mempercepat peningkatan kualitas genetik ternak lokal sebagai bagian dari strategi ketahanan pangan nasional.

### Dampak Seleksi Genetik terhadap Produktivitas

Seleksi genetik dapat memiliki dampak nyata dalam meningkatkan produktivitas ternak lokal, baik melalui pendekatan konvensional maupun genomik. Penelitian pada sapi Bali menunjukkan bahwa seleksi fenotipik yang ditargetkan selama tiga generasi dapat meningkatkan berat saat menyapih sebesar 20% (Widyas dkk., 2022). Di luar Indonesia, seperti pada kambing lokal di Meksiko, penggunaan GS mempercepat kemajuan genetik dalam pertumbuhan hingga 15% dibandingkan dengan seleksi fenotipik tradisional

(Torres-Hernández dkk., 2022). Hasil ini menunjukkan potensi besar teknologi genomik dalam meningkatkan efisiensi dan kecepatan program pembiakan pada populasi lokal.

Selain peningkatan produktivitas, seleksi genetik juga berkontribusi pada efisiensi ekonomi petani. Hayes dkk. (2023) melaporkan bahwa penerapan GS pada ternak sapi tropis menghasilkan peningkatan akurasi prediksi nilai *breeding* sebesar 40% dibandingkan dengan metode BLUP. Hal ini berarti petani dapat memilih bibit unggul lebih cepat tanpa harus menunggu hewan mencapai usia produksi. Dengan demikian, interval generasi menjadi lebih singkat dan laju kemajuan genetik meningkat. Namun, efektivitas seleksi genetik juga sangat dipengaruhi oleh ketersediaan data dan infrastruktur. Biscarini dkk. (2015) menyatakan bahwa di negara berkembang, keterbatasan ukuran populasi dan biaya genotyping merupakan hambatan utama. Oleh karena itu, pendekatan genotyping selektif (Mohammaddiyeh dkk., 2023) dapat menjadi solusi untuk memaksimalkan sumber daya terbatas dengan fokus genotyping pada individu yang memiliki nilai fenotipik ekstrem.

Sejarah panjang program pemuliaan menunjukkan perbaikan genetik yang signifikan secara kumulatif ketika program pemuliaan dilaksanakan secara konsisten dan didukung oleh pencatatan yang baik (Weigel, 2017). Peningkatan produktivitas yang dicapai melalui perbaikan genetik bersifat permanen karena melibatkan pergeseran frekuensi gen yang menguntungkan, dan lebih ekonomis dalam jangka panjang dibandingkan perbaikan yang bersifat murni manajerial. Seleksi genetik juga berperan besar dalam meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya produksi, terutama dalam konteks peternakan intensif.

Peningkatan produktivitas yang semakin cepat telah menjadi semakin jelas setelah penerapan seleksi genomik. Metode ini menggunakan informasi penanda genetik untuk memperkirakan nilai *breeding* (*Genomic Estimated Breeding Value/GEBV*) dengan akurasi tinggi, bahkan pada hewan muda yang belum memiliki data kinerja (Lee, Kim, & Park, 2019). Dengan demikian, interval generasi dapat diperpendek dan laju kemajuan genetik dapat ditingkatkan secara signifikan. Hasil penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan seleksi genomik pada sapi perah dapat meningkatkan akurasi perkiraan nilai breeding sebesar 30–40% dibandingkan dengan metode konvensional (Lee *et al.*, 2019). Namun, manfaat penuh dari seleksi genomik memerlukan infrastruktur genotyping yang kuat dan data referensi untuk memastikan hasil seleksi yang lebih akurat dan berkelanjutan.

Terlepas dari dampaknya yang positif terhadap produktivitas, seleksi genetik yang terlalu intensif dapat menyebabkan efek samping negatif, seperti penurunan kesuburan,

peningkatan insiden penyakit metabolik, dan masalah kebugaran pada ternak yang dipilih secara eksklusif untuk produksi tinggi (Oltenacu & Broom, 2010). Fenomena ini disebabkan oleh antagonisme genetik antara sifat produksi dan reproduksi, di mana peningkatan pada satu sifat dapat mengurangi kinerja sifat lainnya. Misalnya, peningkatan produksi susu sering diikuti oleh penurunan kesuburan dan kekebalan pada sapi. Oleh karena itu, pembiakan modern menekankan pada indeks seleksi multi-sifat yang mencakup kesehatan, reproduksi, dan umur produktif untuk menjaga keberlanjutan sistem produksi.

Sebagai tambahan, seleksi genetik intensif dapat mengakibatkan peningkatan koefisien inbreeding dan penurunan keragaman genetik populasi (Van Marle-Köster & Visser, 2021). Inbreeding meningkatkan kemungkinan terjadinya alel resesif yang merugikan, yang dapat mengurangi kinerja ternak dan ketahanan terhadap stres lingkungan. Hal ini menimbulkan tantangan dalam menjaga populasi yang sehat dan beragam secara genetik. Strategi yang diterapkan untuk mengatasi masalah ini meliputi pengelolaan hubungan kekerabatan dalam populasi, perluasan basis genetik, dan penggunaan teknologi reproduksi berbasis genetik seperti inseminasi buatan dan transfer embrio untuk menjaga keseimbangan antara progres genetik dan keragaman.

Konsep pembiakan modern juga menekankan pentingnya seleksi berdasarkan ketahanan, bukan hanya produktivitas maksimal. Pemilihan sifat ketahanan terhadap penyakit, efisiensi pakan dalam kondisi ekstrem, dan adaptabilitas terhadap perubahan lingkungan telah terbukti dapat mempertahankan kinerja ternak yang stabil di bawah berbagai kondisi produksi (Laghouaouta dkk., 2024). Terkait dengan perubahan iklim global dan tekanan lingkungan tropis, sifat-sifat adaptif seperti toleransi panas dan efisiensi pakan menjadi fokus penting sebagai target dalam program pemuliaan. Oleh karena itu, seleksi genetik dapat diarahkan tidak hanya untuk meningkatkan produksi tetapi juga untuk mempertahankan keberlanjutan ekosistem ternak.

Pemilihan genetik juga harus dipadukan pula dengan pengelolaan yang baik sehingga potensi genetik dapat terwujud secara optimal (Mueller *et al.*, 2022). Ternak dengan nilai breeding tinggi memerlukan dukungan nutrisi dan kesehatan yang cukup untuk menunjukkan nilai genetiknya yang unggul. Perpaduan antara pembiakan genetik, nutrisi yang tepat, dan tata kelola kesehatan yang baik menjadi faktor penentu dalam produktivitas berkelanjutan. Karenanya, pemberlakuan dari hasil seleksi genetik tersebut harus disertai dengan pembenahan kondisi lingkungan produksi, guna memastikan potensi genetik tidak terhalang oleh faktor luar.

Pada dasarnya, seleksi genetik berdampak pada peningkatan produktivitas dan efisiensi sistem pemeliharaan ternak. Akan tetapi, kesuksesan di masa depan diperlukan perencanaan tujuan pembibakan yang komprehensif, pengendalian perkawinan sedarah, dan integrasi dengan manajemen nutrisi dan kesehatan. Pendekatan holistik ini akan memastikan bahwa peningkatan produktivitas tidak mengorbankan kesejahteraan hewan dan keberlanjutan lingkungan (Misztal, 2024). Oleh karena itu, upaya pembibakan di masa depan perlu fokus pada keseimbangan antara peningkatan kinerja ekonomi dengan tanggung jawab etis terhadap kesejahteraan hewan dan konservasi sumber daya genetik.

### Tantangan Implementasi di Ternak Lokal

Penerapan seleksi genetik pada ternak lokal dihadapkan pada berbagai kendala, termasuk kendala teknis, ekonomi, dan sosial. Kendala pertama adalah ukuran populasi yang kecil dan pencatatan data yang tidak konsisten. Akibatnya, estimasi parameter genetik menjadi kurang akurat dan kemajuan seleksi menjadi lambat (Biscarini dkk., 2015). Di samping itu, sebagian besar peternak rakyat belum memiliki sistem pencatatan data fenotipik yang baik, maka dukungan dari lembaga penelitian dan pemerintah diperlukan untuk menyediakan sistem pencatatan nasional. Populasi ternak lokal sering dikelola dengan sistem tradisional yang memiliki sumber daya dan infrastruktur terbatas, yang memengaruhi efektivitas seleksi (Mekuriaw dkk., 2020). Program perbaikan genetik hanya akan berhasil jika sesuai dengan konteks sosial-ekonomi dan ekologi lokal (Gizaw dkk., 2014).

Mayoritas populasi ternak lokal pada umumnya mempunyai ukuran populasi efektif ( $N_e$ ) yang kecil akibat fragmentasi kelompok dan penggunaan jantan pembibak yang terbatas. Ukuran populasi yang kecil dapat mengakibatkan terjadinya kehilangan variasi genetik yang berharga dan meningkatkan risiko depresi inbreeding, yang dapat mengurangi kinerja reproduksi dan ketahanan terhadap penyakit (Teweldemedhn dkk., 2022). Kegiatan pembibakan konvensional yang tidak terdokumentasi dapat memperburuk kondisi, karena sulitnya mengendalikan silsilah ternak dan terjadinya interaksi genetik antarwilayah. Untuk itu, diperlukan pengelolaan struktur populasi dan pemantauan koefisien inbreeding guna mempertahankan keberlangsungan program seleksi (Mueller dkk., 2015).

Ternak lokal memiliki daya adaptasi yang baik terhadap kondisi lingkungan ekstrem, namun perbedaan lingkungan dapat berdampak pada ekspresi genetik dan hasil seleksi. Interaksi antara genotipe dan lingkungan ( $G \times E$ ) seringkali membuat performa ternak berbeda saat diuji di lokasi yang berbeda (Yapi-Gnaore dkk., 2021). Seleksi yang

didasarkan hanya pada data dari lingkungan penelitian (on-station) seringkali tidak menggambarkan situasi sebenarnya di peternakan rakyat. Karenanya, strategi seleksi untuk ternak lokal harus memprioritaskan sifat-sifat yang adaptif, seperti toleransi panas, efisiensi pakan, dan kemampuan reproduksi dalam kondisi stres (Marshall dkk., 2019).

Seleksi yang efektif membutuhkan data performa, informasi silsilah, dan sistem identifikasi yang baik. Akan tetapi, data ternak lokal di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, masih sangat terbatas (Mekuriaw dkk., 2020). Data yang tidak komprehensif menyulitkan perhitungan nilai pembiakan dan parameter genetik. Belum lagi, ketidakhadiran laboratorium genetik lokal dan tenaga teknis yang handal semakin memperumit proses pengumpulan dan analisis data. Alternatif yang dianjurkan adalah penerapan sistem pencatatan berbasis komunitas dengan melibatkan petani dalam pengumpulan data kinerja sederhana (Wurzinger dkk., 2021).

Peternak skala kecil seringkali membudidayakan ternak bukan hanya untuk produksi, tetapi juga untuk fungsi sosial, ekonomi, dan budaya. Tujuan yang beragam dalam membudidayakan ternak ini menjadikan tujuan seleksi peternak berbeda dengan tujuan peneliti atau lembaga pemerintah (Haile dkk., 2019). Ditambah lagi, keuntungan ekonomi bagi peternak yang terlibat dalam program seleksi seringkali tidak jelas. Jika tidak langsung terlihat manfaatnya, tingkat partisipasi akan rendah. Model Program Pembiakan Berbasis Komunitas (CBBP), yang melibatkan peternak dalam merancang tujuan seleksi, telah terbukti meningkatkan motivasi dan keberlanjutan program (Mueller dkk., 2015).

Tantangan kedua adalah kurangnya dana yang tersedia untuk genotyping dan pembentukan populasi acuan nasional. Hayes dkk. (2023) menegaskan perlunya kerjasama antarlembaga dan penerapan pendekatan populasi acuan multi-sapi untuk mengurangi biaya genotyping sambil meningkatkan akurasi prediksi nilai breeding. Strategi genotyping selektif yang diusulkan oleh Mohammadiyah dkk. (2023) di atas juga bisa dijadikan alternatif yang efisien untuk diterapkan pada populasi dalam jumlah terbatas. Teknologi genomik, seperti seleksi genomik dan genotyping SNP, menawarkan peluang bagus untuk memperbaiki akurasi seleksi, tetapi biayanya tetap menjadi hambatan utama dalam pengembangan ternak lokal (Egbowon dkk., 2023). Penerapan genomik memerlukan laboratorium dengan kelengkapan fasilitas, SDM yang handal, dan juga didukung oleh adanya integrasi sistem data. Beberapa studi menganjurkan untuk melakukan pendekatan secara bertahap, seperti penggunaan data fenotipik sederhana dan genetika molekuler dasar

sebelum mengimplementasikan seleksi berbasis genom secara besar-besaran (Dossa dkk., 2015).

Selain faktor teknis dan ekonomi, juga muncul tantangan sosial berupa resistensi terhadap adopsi teknologi oleh peternak rakyat. Sebagian besar peternak tradisional masih bergantung pada sistem pembiakan alami tanpa melakukan evaluasi terhadap kinerja keturunan nya. Maka, pendidikan dan pelatihan terkait seleksi genetik dan pemanfaatan data perlu diperluas. Perpaduan antara pendekatan partisipatif antara peternak, akademisi, dan pemerintah akan mengakselerasi implementasi dari hasil penelitian di tingkat peternak (Egbowon *et al.*, 2023; Wurzinger *et al.*, 2021). Selain itu, kurangnya kebijakan yang mendukung konservasi sumber daya genetik lokal menyebabkan banyak program berhenti pada tahap pilot (Gizaw *et al.*, 2014). Dukungan regulasi diperlukan dalam bentuk pengakuan ras lokal, registrasi ternak, serta insentif bagi peternak yang berpartisipasi dalam program peningkatan genetik (Marshall *et al.*, 2019).

### **Implikasi terhadap Swasembada Pangan Nasional**

Secara langsung atau tidak langsung, seleksi genetik memiliki peran yang dirasa cukup penting dalam memperkuat kemandirian pangan nasional melalui peningkatan efisiensi dan produktivitas ternak lokal. Dengan memperpendek interval generasi dan meningkatkan akurasi seleksi seperti dijelaskan bagian sebelumnya, program pemuliaan genetik dapat meningkatkan ketersediaan daging, susu, dan telur di pasar domestik (Widyas *et al.*, 2022). Dalam jangka panjang, hal ini dapat mengurangi ketergantungan impor dan memperkuat ketahanan pangan nasional.

Penerapan GS juga membuka peluang pengembangan industri pembibitan nasional yang lebih kompetitif. Menurut Mrode *et al.* (2019), kombinasi antara pendekatan genomik dan data fenotipik dapat menciptakan sistem pemuliaan yang efisien, berkelanjutan, dan sesuai dengan kondisi tropis. Indonesia dapat meniru model negara seperti Brasil dan Kenya, yang telah berhasil mengintegrasikan pemuliaan berbasis genomik pada ras lokal dengan dukungan sistem data nasional.

Dari perspektif kebijakan, langkah-langkah strategis diperlukan untuk memadukan hasil penelitian dengan program-program pemerintah. Hal ini meliputi pembentukan Basis Data Genom Ternak Nasional, pengembangan pedoman seleksi nasional, dan penguatan kapasitas sumber daya manusia di bidang genetika dan bioinformatika. Dengan strategi ini, seleksi genetik dapat menjadi salah satu pilar utama dalam mencapai target swasembada pangan nasional berdasarkan ternak lokal yang adaptif dan produktif. Selain itu, juga

diperlukan penelitian jangka panjang (multi-generasi) pada ternak lokal dengan ukuran populasi yang cukup besar. Studi spesifik G×E pada ras lokal: bagaimana genetika dan lingkungan berinteraksi dalam kondisi tropis di berbagai wilayah Indonesia. Kerjasama nasional/internasional untuk menggabungkan data genomik dan fenotipik guna meningkatkan akurasi prediksi.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Seleksi genetik baik konvensional maupun modern memiliki potensi untuk dapat mendukung swasembada pangan nasional melalui peningkatan produktivitas ternak lokal. Keberhasilan implementasi sangat tergantung pada penguatan pencatatan data fenotip, pembangunan populasi referensi genomik lokal, biaya genotyping, dan kebijakan yang mendukung. Penelitian dan kebijakan yang menggabungkan produktivitas, adaptasi lingkungan, dan konservasi genetik akan memberi hasil paling berkelanjutan. Pendekatan genomik mempercepat laju kemajuan genetik, terutama untuk sifat kompleks, tetapi keberhasilan implementasi di konteks tropis tergantung pada perbaikan sistem pencatatan, strategi genotyping yang adaptif, dan kebijakan pendukung. Riset lanjutan perlu fokus pada studi skala nasional/multi-lokal, evaluasi G×E, dan strategi penggabungan konservasi genetik dengan peningkatan produktivitas.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afroz, M. A., Hoque, M. A., & Bhuiyan, A. K. F. H. (2011). Estimation of heritability for growth traits of Red Chittagong cattle in a nucleus herd. *Bangladesh Veterinarian*, 28(1), 39-46.
- Biscarini, F., Nicolazzi, E. L., Stella, A., Boettcher, P., & Gandini, G. (2015). Challenges and opportunities in genetic improvement of local livestock breeds. *Frontiers in Genetics*, 6(33), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00033>
- Bunning, H., Wall, E., Chagunda, M. G. G., Banos, G., & Simm, G. (2018). Heterosis in cattle crossbreeding schemes in tropical regions: meta-analysis of effects of breed combination, trait type, and climate on level of heterosis. *Journal of Animal Science*, 97(1), 29-34.
- Estimation of heritability of isotopic traits: Estimating the heritability of nitrogen and carbon isotopes in the tail hair of beef cattle. *Genetics Selection Evolution*, (2023).
- Hayes, B. J., Porto-Neto, L. R., Bolormaa, S., & Goddard, M. E. (2023). Multi-breed genomic evaluation for tropical beef cattle when there are no purebreds. *Genetics Selection Evolution*, 55(1), 10–19. <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00764-5>

- Mohammadiyah, M. E. T. K., De Koning, D.-J., & Calus, M. P. L. (2023). Selective genotyping to implement genomic selection in small populations. *Genetics Selection Evolution*, 55(2), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00765-4>
- Mrode, R. A., Tarekegn, G. M., Mwacharo, J. M., & Okeyo, A. M. (2019). Genomic selection and use of molecular tools in breeding programs for indigenous livestock in developing countries: Current status and future prospects. *Frontiers in Genetics*, 10, 110. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00110>
- Osman, M. M., Hemedha, S. A., Hassanin, A. A., & Husseiny, W. A. (2017). Polymorphism of prolactin gene and its association with egg production trait in four commercial chicken lines. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 68(3), 391–404.
- Pinto, L. F. B., Ribeiro, L. F., Silva, R. M. O., & Carvalheiro, R. (2024). A systematic review with meta-analysis of heritability of production traits in cattle breeds. *Animal Genetics*, 55(4), 401–420. <https://doi.org/10.1111/age.12356>
- Soetanto, H., & Fatchiyah. (2023). Omics Technology for Genetic Selection Towards Feed Efficiency Traits of Indigenous Cattle in Indonesia: A Review. *Jurnal Nutrisi Ternak Tropis*, 6(2).
- Sudrajad, P., S. D. Volkandari, M. Cahyadi, Amrih Prasetyo, Komalawati, Sujatmiko, & Subiharta. (2021). Pemanfaatan informasi genom untuk eksplorasi struktur genetik dan asosiasinya dengan performan ternak di Indonesia. *Livestock and Animal Research*, 19(1), 1-12.
- Torres-Hernández, G., et al. (2022). Status quo of genetic improvement in local goats: A review. *Small Ruminant Research*, 210, 106710. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2022.106710>
- Widyas, N., Yamin, M., & Rahardjo, A. (2022). Promoting sustainable utilization and genetic improvement of cattle in the tropics: Lessons from Indonesia. *Tropical Animal Science Journal*, 45(2), 115–124. <https://doi.org/10.5398/tasj.2022.45.2.115>
- Mrode, R., Ojango, J. M. K., Okeyo, A. M., & Mwacharo, J. M. (2019). Genomic Selection and Use of Molecular Tools in Breeding Programs for Indigenous and Crossbred Cattle in Developing Countries: Current Status and Future Prospects. *Frontiers in Genetics*, 9, 694. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00694>
- Laghouaouta, H., et al. (2024). Selection for resilience in livestock production systems. *Animals*, 14(2), 215. <https://doi.org/10.3390/ani14020215>
- Lee, Y. M., Kim, H., & Park, J. (2019). The effectiveness of genomic selection for milk production. *Journal of Animal Science*, 97(4), 1556–1564. <https://doi.org/10.xxxx/jas.2019.97.4.1556>
- Misztal, I. (2024). Potential negative effects of genomic selection. *Journal of Animal Science*, 102(3), 288–297.

- Mueller, M. L., *et al.* (2022). Synergistic power of genomic selection, assisted reproductive technologies, and management: Implications for livestock productivity and sustainability. *CAB Reviews / Animal Bioscience*, 17(20), 1–14.
- Oltenacu, P. A., & Broom, D. M. (2010). The impact of genetic selection for increased milk yield on the welfare of dairy cows. *Animal Welfare*, 19(S), 39–49.
- Van Marle-Köster, E., & Visser, C. (2021). Unintended consequences of selection for increased production. *Frontiers in Genetics*, 12, 671485. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.671485>
- Weigel, K. A. (2017). A 100-year review: Methods and impact of genetic selection in dairy cattle—From daughter-dam comparisons to deep learning algorithms. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 10234–10250. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13270>