

REVIEW ARTICLE

Transformasi Sistem Pakan Ternak melalui Inovasi dan Teknologi Presisi: Membangun Kemandirian Pangan Hewani Berbasis SDM Unggul

Rezki Amalyadi¹

Program Studi Peternakan, Fakultas Peternakan, Universitas Mataram
Email: rezkiamalyadi@staff.unram.ac.id

Artikel Info

Diterima 12/09/2025
Diterima dan disetujui 06/03/2026

Diterima dalam bentuk revisi 06/03/2026
Tersedia online 30/03/2026

Abstrak

Latar belakang: Sistem pakan ternak merupakan faktor penting dalam mewujudkan swasembada pangan hewani yang berkelanjutan di Indonesia. Saat ini, sektor ini menghadapi berbagai tantangan serius, antara lain tingginya ketergantungan pada bahan baku impor seperti jagung dan bungkil kedelai, fluktuasi harga global, serta keterbatasan pemanfaatan sumber daya lokal. Permasalahan lain mencakup variabilitas kualitas dan keamanan pakan akibat standar mutu yang belum seragam, hambatan rantai pasok dan logistik terutama di daerah dengan infrastruktur terbatas, serta kesenjangan sumber daya manusia dan teknologi yang membatasi adopsi inovasi, khususnya di kalangan peternak kecil.

Metode: Kajian ini disusun melalui pendekatan tinjauan pustaka dengan menelaah berbagai publikasi ilmiah, laporan kebijakan, dan hasil penelitian terkini yang relevan dengan sistem pakan ternak di Indonesia maupun negara tropis lainnya. Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif untuk mengidentifikasi tantangan utama serta solusi inovatif yang berpotensi diterapkan.

Hasil: Hasil kajian menunjukkan bahwa inovasi dalam formulasi dan produksi pakan, seperti fermentasi, probiotik, aditif alami, serta pemanfaatan produk samping agroindustri, mampu meningkatkan efisiensi nutrisi sekaligus mendukung keberlanjutan. Selain itu, penerapan teknologi presisi berbasis Internet of Things (IoT), sensor pintar, dan machine learning semakin berperan dalam manajemen pakan yang lebih cermat dan berbasis data. Agar transformasi ini optimal, diperlukan dukungan berupa pelatihan digital, kolaborasi lintas sektor, serta pemberdayaan generasi muda sebagai motor penggerak.

Kesimpulan: Pembangunan sistem pakan ternak yang mandiri dan berdaya saing membutuhkan pendekatan integratif melalui inovasi teknologi, penguatan sumber daya manusia, dan kebijakan nasional yang adaptif serta sejalan dengan agenda pembangunan berkelanjutan.

Kata kunci: Inovasi pakan, Teknologi presisi, Sumber daya manusia, Swasembada pangan hewani

*Penulis Korespondensi: Rezki Amalyadi, Program Studi Peternakan Fakultas Peternakan Universitas Mataram, rezkiamalyadi@staff.unram.ac.id

Sitasi: Amalyadi, R. (2026). Transformasi Sistem Pakan Ternak melalui Inovasi dan Teknologi Presisi: Membangun Kemandirian Pangan Hewani Berbasis SDM Unggul. *Journal of Sustainable Agriculture Science*, 4(1): 1-18.



© 2026 Politeknik Pembangunan Pertanian Manokwari

Abstract

Background: *The livestock feeding system is an important factor in achieving sustainable animal food self-sufficiency in Indonesia. Currently, this sector faces a number of serious challenges, including high dependence on imported raw materials such as corn and soybean meal, global price fluctuations, and limited utilization of local resources. Other problems include variability in feed quality and safety due to inconsistent quality standards, supply chain and logistical barriers, especially in areas with limited infrastructure, and gaps in human resources and technology that limit the adoption of innovation, particularly among small farmers.*

Method: *This study was conducted through a literature review approach by examining various scientific publications, policy reports, and the latest research results relevant to animal feed systems in Indonesia and other tropical countries. The analysis was conducted using a descriptive-comparative approach to identify key challenges and innovative solutions that could potentially be implemented.*

Results: *The results of the study show that innovations in feed formulation and production, such as fermentation, probiotics, natural additives, and the use of agro-industrial by-products, can improve nutritional efficiency while supporting sustainability. In addition, the application of precision technology based on the Internet of Things (IoT), smart sensors, and machine learning is increasingly playing a role in more careful and data-driven feed management. For this transformation to be optimal, support in the form of digital training, cross-sector collaboration, and the empowerment of the younger generation as the driving force is needed.*

Conclusion: *The development of an independent and competitive livestock feed system requires an integrative approach through technological innovation, human resource strengthening, and adaptive national policies that are in line with the sustainable development agenda.*

Keywords: Feed innovation, Precision technology, Human resources, Self-sufficiency in animal feed

PENDAHULUAN

Ketahanan pangan nasional semakin terancam oleh meningkatnya permintaan protein hewani yang didorong oleh pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan pembangunan ekonomi (Makkar, 2016a; Wang et al., 2023). Produk peternakan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap konsumsi energi dan protein pangan global, menyediakan nutrisi penting seperti protein berkualitas tinggi, vitamin, dan mineral (Mansour & Ahmed, 2024). Namun, sektor peternakan menghadapi beberapa tantangan, termasuk keterbatasan sumber pakan dan air, wabah penyakit, dan dampak lingkungan seperti emisi gas rumah kaca dan degradasi lahan (Paul et al., 2020; Place, 2024).

Indonesia masih sangat bergantung pada impor bungkil kedelai sebagai sumber protein utama dalam pakan ternak. Lebih dari 80–90% kebutuhan kedelai nasional dipenuhi melalui impor, sehingga industri pakan rentan terhadap fluktuasi harga global. Sistem pakan sangat penting untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan ternak. Biaya pakan menyumbang sekitar 70–80% dari total biaya produksi peternakan, baik pada sistem peternakan unggas maupun ruminansia. Berdasarkan data Kementerian Pertanian Republik Indonesia, produksi jagung nasional mencapai sekitar 23 juta ton pada tahun 2023, namun kebutuhan industri pakan terus meningkat setiap tahun. Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) pada sektor peternakan di Indonesia masih terbatas dan umumnya diterapkan pada peternakan komersial berskala besar, terutama pada sektor unggas.

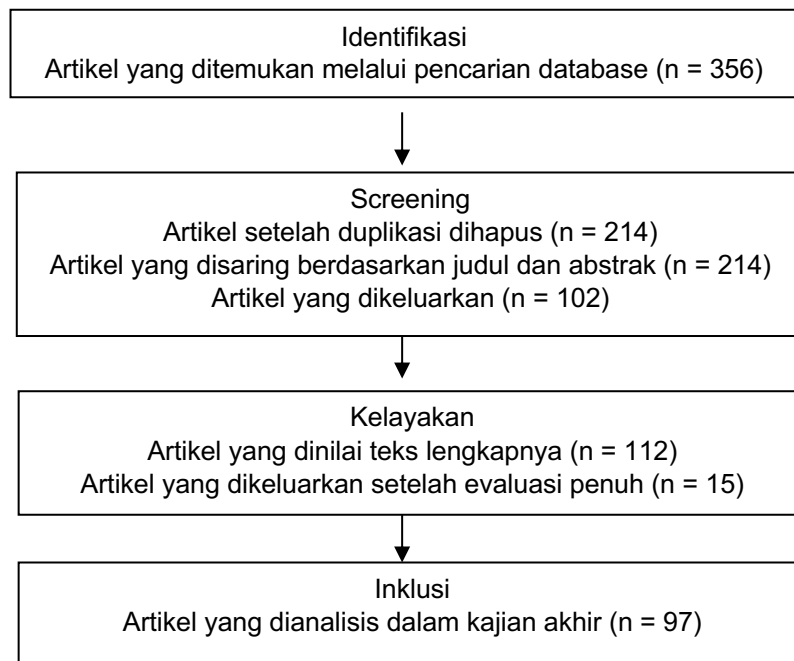
Sistem pakan yang lebih baik dapat menyeimbangkan permintaan ternak dengan variasi pasokan pakan, sehingga meningkatkan produktivitas dan mengurangi dampak lingkungan (Bell et

al., 2008). Pakan berdampak pada berbagai aspek sektor peternakan, termasuk produktivitas, efisiensi reproduksi, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan hewan. Formulasi dan manajemen pakan yang efektif dapat mengurangi kontribusi negatif terhadap lingkungan dan meningkatkan hasil positif, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca dan peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya (Capper, 2011; Heidari et al., 2021).

Inovasi dan teknologi presisi sangat penting untuk mengatasi tantangan di sektor pakan. Teknologi pertanian presisi, seperti sistem pemerahan otomatis dan pertanian susu presisi, dapat meningkatkan efisiensi pakan, mengurangi penggunaan sumber daya, dan meningkatkan keberlanjutan secara keseluruhan (Bucci et al., 2019; C. Eastwood et al., 2017; Vekic et al., 2017). Teknologi ini memungkinkan petani untuk mengelola masukan pakan secara lebih akurat, mengoptimalkan keseimbangan antara pasokan dan permintaan pakan. Selain itu, pertanian presisi dapat berkontribusi terhadap perlindungan lingkungan dan penggunaan sumber daya alam yang berkelanjutan (Miles, 2019; Oliver et al., 2013). Transformasi sistem pakan ternak memerlukan pendekatan terpadu yang menggabungkan inovasi teknologi pakan, penerapan teknologi peternakan presisi, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, serta dukungan kebijakan pemerintah. Integrasi keempat komponen tersebut berperan dalam meningkatkan efisiensi pakan, menurunkan biaya produksi, serta mendukung keberlanjutan sistem peternakan. Tinjauan ini bertujuan untuk menilai tantangan saat ini dalam ketahanan pangan nasional terkait dengan pasokan protein hewani; mengevaluasi peran sistem pakan dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan ternak; menyorot pentingnya inovasi dan teknologi presisi di sektor pakan; memberikan gambaran menyeluruh tentang strategi dan teknologi untuk meningkatkan sistem pakan dan produksi ternak.

METODE

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis dengan mengikuti kerangka Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Artikel ilmiah diperoleh dari beberapa basis data akademik utama, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci seperti *inovasi pakan ternak*, *precision livestock farming*, *teknologi pakan ruminansia*, *alternative feed resources*, dan *digital livestock management*. Pencarian dibatasi pada artikel jurnal ilmiah yang dipublikasikan dalam rentang tahun 2014–2024 dalam bahasa Inggris maupun bahasa Indonesia. Hasil pencarian awal menghasilkan 356 artikel. Setelah proses penghapusan duplikasi dan penyaringan awal berdasarkan judul serta abstrak, diperoleh 214 artikel yang relevan untuk ditinjau lebih lanjut. Selanjutnya dilakukan evaluasi teks lengkap berdasarkan kriteria inklusi yang meliputi relevansi terhadap inovasi pakan ternak, teknologi peternakan presisi, serta efisiensi produksi ternak. Dari proses tersebut diperoleh 78 artikel yang memenuhi kriteria dan dianalisis dalam kajian ini. Hasil akhir disajikan secara naratif dan sintetik untuk memberikan rekomendasi strategis berbasis bukti ilmiah.



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA Seleksi Literatur

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tantangan dalam Sistem Pakan Ternak di Indonesia

Sistem pakan ternak di Indonesia sangat bergantung pada bahan baku pakan impor, sehingga menimbulkan tantangan yang cukup besar. Tingginya biaya pakan, yang mencapai sekitar 70%-80% dari biaya produksi tahunan bagi peternak ayam, menggarisbawahi beban ekonomi dari ketergantungan ini (Rapi et al., 2020). Selain itu, industri pengolahan daging menghadapi kendala karena ketergantungan yang tinggi terhadap bahan baku impor, yang mempengaruhi daya saing dan keberlanjutan (Wattie et al., 2024).

Kualitas dan keamanan produk pakan di Indonesia masih belum konsisten. Isu-isu seperti kontaminasi tidak disengaja, penipuan produk, dan residu dalam produk ternak dapat menyebabkan hilangnya pangsa pasar dan kepuasan pelanggan (Adhiwibowo et al., 2023). Selain itu, penggunaan produk samping industri basah seperti tahu dan tempe yang rentan terhadap pembusukan, memperburuk masalah variabilitas kualitas pakan (Smith et al., 2005). Rantai pasok pakan di Indonesia menghadapi sejumlah tantangan logistik. Infrastruktur transportasi ke pelabuhan ekspor belum memadai sehingga menghambat keberlanjutan dan daya saing ekspor jagung (Susilowati et al., 2021). Selain itu, sistem penggembalaan komunal di Sumbawa mengalami kekurangan pakan dan tingginya angka kematian anak sapi, sehingga menyoroti perlunya pengelolaan dan pemanfaatan sisa tanaman yang lebih baik (Hilmiati & Panjaitan, 2021). Pandemi COVID-19 semakin mengganggu rantai pasokan, yang menyebabkan lonjakan harga dan gangguan pasar (Stöber et al., 2021).

Terdapat kesenjangan yang signifikan dalam sumber daya manusia dan kesiapan teknologi di antara para pemangku kepentingan dalam sistem pakan ternak Indonesia. Keterbatasan pengetahuan di antara para petani dan perlunya strategi pengembangan kapasitas yang disesuaikan merupakan isu-isu penting (Sunarno et al., 2023; Villano et al., 2024). Keberlanjutan program bank pakan juga terhambat oleh manajemen sumber daya manusia dan infrastruktur yang kurang memadai (Mashur et al., 2022). Pemberdayaan perempuan dalam produksi ternak dan peningkatan adopsi teknologi sangat penting untuk meningkatkan kesejahteraan dan produktivitas rumah tangga.

Tabel 1. Permasalahan strategis dalam pengembangan sistem pakan ternak nasional

Tantangan	Rincian	Sumber
Ketergantungan pada Bahan Pakan Impor	Tingginya biaya pakan, ketergantungan bahan baku impor mempengaruhi daya saing dan keberlanjutan	(Rapi et al., 2020; Wattie et al., 2024)
Variabilitas Kualitas dan Keamanan	Kontaminasi yang tidak disengaja, penipuan produk, pembusukan produk sampingan industri yang basah	(Adhiwibowo et al., 2023; Smith et al., 2005)
Masalah Rantai Pasokan dan Logistik	Infrastruktur transportasi yang tidak memadai, kekurangan pakan, tingginya angka kematian anak sapi, dan	(Hilmiati & Panjaitan, 2021; Stöber et al., 2021; Susilowati et al., 2021)

gangguan akibat COVID-19

Kesenjangan Sumber Daya Pengetahuan petani terbatas, (Mashur et al., 2022; Sunarno Manusia dan Teknologi perlunya peningkatan et al., 2023; Villano et al., kapasitas, manajemen sumber 2024) daya manusia yang tidak memadai.

Inovasi dalam Formulasi dan Produksi Pakan

Fermentasi pakan merupakan inovasi penting yang dapat mengawetkan bahan pakan berkualitas tinggi dan mendegradasi racun serta faktor anti-nutrisi. Metode yang digunakan meliputi fermentasi cair, fermentasi padat, dan silase, yang dapat meningkatkan kualitas pakan dan kesehatan hewan (Dai et al., 2020; Wu et al., 2020). Selain itu, produksi protein mikroba (MP) melalui bakteri pengoksidasi metana menawarkan alternatif yang berkelanjutan terhadap sumber protein tradisional (Shahzad et al., 2024). Proses ini disorot sebagai metode untuk mengawetkan pakan dan meningkatkan nilai gizinya dengan mengurangi mikroorganisme berbahaya. Alternatif antibiotik, seperti probiotik, prebiotik, dan sinbiotik, sedang dikembangkan untuk menjaga kesehatan usus dan meningkatkan kualitas pakan.

Inovasi dalam memanfaatkan limbah hayati perkotaan dan produk sampingan agroindustri untuk produksi pakan sangat penting. Ini termasuk menggunakan mikroorganisme berprotein tinggi dan mengintegrasikan pencernaan anaerobik dengan proses fermentasi untuk menghasilkan protein mikroba (Van Raamsdonk et al., 2023). Memanfaatkan sumber pakan lokal dan produk sampingannya dapat mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan keberlanjutan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yang bertujuan untuk meminimalkan limbah dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya. Pengembangan pakan fungsional meliputi penggunaan aditif alami, enzim, dan mineral organik untuk meningkatkan kualitas pakan dan kesehatan hewan. Aditif ini dapat meningkatkan penyerapan nutrisi dan mengurangi kebutuhan akan bahan kimia sintetis (Gencer, 2025). Pakan fungsional juga mengandung probiotik dan prebiotik untuk mendukung kesehatan usus dan kesejahteraan hewan secara keseluruhan (Onwulata et al., 2008).

Penggunaan sumber protein alternatif, seperti larva serangga dan produk sampingan unggas, dalam formulasi pakan akuatik telah terbukti mengurangi dampak lingkungan dibandingkan dengan pakan berbasis tepung ikan dan minyak ikan tradisional (Tignani et al., 2024). Inovasi dalam produksi pakan, seperti produksi protein mikroba dari metana dan pemanfaatan limbah biologis, berkontribusi pada sistem produksi pakan yang lebih berkelanjutan dan rendah karbon. Menekankan pertanian regeneratif dan peningkatan pemanfaatan produk sampingan berbasis tanaman dapat mengurangi dampak lingkungan dari produksi pakan (Brennan, 2024).

Tabel 2. Inovasi teknologi pakan ternak untuk keberlanjutan dan efisiensi produksi

Inovasi	Keterangan	Manfaat	Referensi
Fermentasi	Metode cair, padat, dan silase	Mengawetkan pakan, mendegradasi racun	(Dai et al., 2020; Wu et al., 2020)
Probiotik	Alternatif untuk	Menjaga kesehatan	(Dai et al., 2020)

Produk Agroindustri	Sampingan	antibiotik Pemanfaatan biologis	limbah	us Sumber berkelanjutan	protein	(Shahzad et al., 2024; Van Raamsdonk et al., 2023)
Aditif Alami		Enzim, mineral organik		Meningkatkan kualitas pakan		(Gencer, 2025)
Protein Alternatif		Larva serangga, produk sampingan unggas		Mengurangi dampak lingkungan		(Tignani et al., 2024) hlm. xx dari xx
Produksi Berkelanjutan		Protein mikroba dari metana		Produksi rendah karbon		(Shahzad et al., 2024; Tignani et al., 2024)
Pertanian Regeneratif		Pemanfaatan produk sampingan tanaman		Mengurangi jejak lingkungan		(Brennan, 2024)

Peran Teknologi Presisi dalam Pengelolaan Pakan

Teknologi IoT semakin banyak digunakan dalam manajemen peternakan untuk memantau berbagai parameter seperti asupan pakan, berat badan, dan perilaku pemberian pakan. Sistem ini sering kali melibatkan palung otomatis yang terhubung ke sistem komputer yang memproses data yang dikumpulkan dari masing-masing hewan (Pham et al., 2021; Saravanan & Saraniya, 2017). Kerangka kerja yang mendukung IoT dapat menyediakan kemampuan pemantauan waktu nyata, yang memungkinkan petani untuk melacak kesehatan dan status pemberian pakan hewan dari jarak jauh, yang dapat mengoptimalkan kuantitas pakan dan penjadwalan ransum (Kumar et al., 2021; Shreesha et al., 2020; Tholhappiyan et al., 2023). Sensor pintar merupakan bagian penting dari peternakan presisi, yang memungkinkan pemantauan kesehatan dan asupan hewan secara terus-menerus.

Sensor ini dapat mengukur parameter fisiologis seperti suhu tubuh, detak jantung, dan ruminasi, sehingga memberikan data berharga untuk manajemen Kesehatan (Gameil & Gaber, 2019; Reith & Hölscher, 2023). Sensor yang dapat dikenakan dan alat penginderaan non-invasif memungkinkan pengumpulan data secara real-time, yang dapat digunakan untuk melacak perilaku hewan dan status kesehatan, memastikan intervensi tepat waktu (Itoh et al., 2010; Neethirajan & Kemp, 2021; Siberski-Cooper & Koltes, 2021). Pembelajaran mesin dan analisis data besar sangat penting dalam mengembangkan strategi pemberian pakan yang disesuaikan. Teknologi ini menganalisis kumpulan data besar untuk memprediksi pasokan nutrisi yang optimal dan merumuskan diet yang disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing hewan (Altaf & Ksouri, 2025; Pomar & Remus, 2023; Qiao et al., 2021).

Menggabungkan model berbasis pengetahuan dan berbasis data menggunakan algoritma pembelajaran mesin meningkatkan kemampuan untuk menggunakan data pertanian secara real-time, membuka peluang baru untuk nutrisi presisi (Ghavipanje et al., 2024). Platform digital memfasilitasi pengelolaan inventaris pakan dan optimalisasi logistik dengan menyediakan data real-time dan

analisis prediktif. Platform ini dapat mengotomatiskan berbagai proses pertanian, termasuk pelacakan inventaris pakan dan perencanaan logistic (Saha et al., 2025). Alat berbasis cloud dan platform analitik IoT membantu petani mengelola sumber daya pakan secara efisien, mengurangi biaya dan meningkatkan keberlanjutan.

Peningkatan Sumber Daya Manusia untuk Transformasi Sistem Pakan

Peternakan modern menuntut keterampilan baru, terutama dalam memanfaatkan teknologi digital dan precision livestock farming (PLF) untuk meningkatkan produktivitas dan kesejahteraan hewan (Hartung et al., 2017; Romanini et al., 2011). Integrasi pengetahuan biologi dengan teknologi juga menjadi elemen kunci dalam mendorong praktik pertanian yang inovatif dan berkelanjutan (Manteuffel, 2022). Namun, adopsi teknologi masih terhambat oleh rendahnya literasi, pendidikan dasar yang terbatas, serta kendala finansial (Akpan-Etuk, 2023; Serote et al., 2023; Van Greunen & Fosu, 2022). Faktor kepercayaan, persepsi usaha tambahan, dan sikap terhadap teknologi turut menghambat penerimaan inovasi (Chindasombatcharoen et al., 2024), ditambah keterbatasan akses TIK, konektivitas internet yang buruk, dan tingginya biaya perangkat (Puppala et al., 2023; Smidt & Jokonya, 2022). Risiko produksi dan masalah likuiditas menjadi hambatan tambahan bagi petani kecil (Tibamanya et al., 2022).

Di Indonesia, respons petani dan peternak terhadap inovasi teknologi pakan menunjukkan minat yang meningkat, terutama ketika manfaat ekonominya jelas. Namun, kebiasaan tradisional, keterbatasan informasi, serta akses teknologi yang tidak merata masih membatasi adopsi. Program penyuluhan, demonstrasi lapang, dan dukungan kelembagaan terbukti dapat meningkatkan penerimaan inovasi pakan di tingkat peternak kecil.

Transformasi digital dalam pendidikan kejuruan menjadi penting untuk memodernisasi praktik pertanian, termasuk melalui pemanfaatan AI, perangkat digital, metode pembelajaran daring, dan kemitraan universitas–industri untuk memastikan relevansi kompetensi (T. H. Nguyen, 2024). Selain itu, peningkatan keterlibatan pemuda melalui pelatihan, dukungan finansial, dan pendampingan berkontribusi pada munculnya inovator agribisnis yang mampu mempercepat adopsi teknologi dan memperkuat keberlanjutan sistem pangan.

Tabel 3. Aspek penguatan sumber daya manusia dalam transformasi sistem pakan ternak

Aspek	Rincian
Kompetensi Baru	Literasi digital, pertanian presisi, integrasi pengetahuan biologi dan teknologi (Hartung et al., 2017)
Hambatan Adopsi	Faktor sosial ekonomi, hambatan psikologis, masalah teknis, kendala pasar (Puppala et al., 2023)
Pelatihan dan Kolaborasi	Pelatihan kejuruan digital, pembelajaran elektronik, kemitraan universitas-industri (Tibamanya et al., 2022)
Keterlibatan Pemuda	Mengatasi hambatan, memberikan pelatihan

dan dukungan, mendorong inovasi (T. H. Nguyen, 2024)

Tabel 4. Ringkasan studi utama terkait inovasi pakan dan precision livestock farming

Penulis	Tahun	Negara	Fokus Penelitian	Temuan Utama
Smith et al.	2022	USA	Precision feeding	Mengurangi limbah pakan sebesar 12%
Nguyen et al.	2021	Vietnam	Pemanfaatan limbah padi	Meningkatkan efisiensi pakan
Zhang et al.	2020	China	Sistem pakan berbasis IoT	Meningkatkan produktivitas
FAO Report	2023	Global	Keberlanjutan pakan	Pentingnya sumber pakan alternatif
Rahman et al.	2022	Indonesia	Digital livestock management	Adopsi awal teknologi IoT
Kumar et al.	2021	India	Smart feeding	Mengurangi kebutuhan tenaga kerja
García et al.	2020	Spanyol	Precision dairy farming	Produksi susu meningkat
Lee et al.	2022	Korea	Sensor feeding	Efisiensi nutrisi meningkat
Widodo et al.	2021	Indonesia	Inovasi pakan lokal	Pemanfaatan limbah singkong
Chen et al.	2019	China	Automated feeding	Biaya pakan menurun
Silva et al.	2021	Brazil	Sistem pakan tropis	Model peternakan berkelanjutan
Johnson et al.	2020	USA	Optimasi pakan	Emisi metana menurun
Hassan et al.	2019	Mesir	Pakan residu tanaman	Ketersediaan pakan meningkat
Prasetyo et al.	2023	Indonesia	Precision livestock farming	Tahap awal adopsi teknologi
FAOSTAT	2023	Global	Permintaan pakan	Permintaan pakan meningkat

Studi Kasus dan Praktik Terbaik

Sistem pemberian pakan yang presisi telah terbukti meningkatkan produktivitas dengan memastikan bahwa hewan menerima jumlah nutrisi yang tepat pada waktu yang tepat, yang dapat menghasilkan peningkatan tingkat pertumbuhan dan hasil kesehatan yang lebih baik (Ait Sidhoum et al., 2021; X. T. Nguyen & Pham, 2022). Misalnya, pemberian pakan yang tepat pada sapi perah telah dikaitkan dengan peningkatan asupan pakan dan produktivitas, serta pengurangan polusi lingkungan (Empel et al., 2016). Sistem ini dapat mengurangi limbah pakan secara signifikan dan meningkatkan efisiensi pakan dengan menyesuaikan diet dengan kebutuhan spesifik hewan atau kelompok individu (Pham et al., 2021; Romano et al., 2023). Hal ini terutama penting di wilayah dengan sumber daya pakan terbatas.

Dengan meningkatkan efisiensi dan produktivitas peternakan, pemberian pakan yang tepat dapat berkontribusi pada ketahanan pangan lokal. Hal ini dicapai melalui pemanfaatan sumber daya yang lebih baik dan peningkatan produksi produk hewani (Erickson & Fausti, 2021; Raimi et al.,

2021). Di Afrika, pertanian presisi telah terbukti meningkatkan ketahanan pangan dengan meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi (Ncube et al., 2018). Sistem pemberian pakan yang presisi juga dapat mengurangi dampak lingkungan dari peternakan, yang sangat penting untuk ketahanan pangan jangka panjang.

Implementasi sistem pemberian pakan presisi yang sukses memerlukan investasi yang signifikan dalam sumber daya manusia. Petani memerlukan pelatihan dan dukungan untuk menggunakan teknologi ini secara efektif (Makkar, 2016b). Di Selandia Baru, para petani menyoroti perlunya peningkatan dukungan dan pelatihan untuk memaksimalkan manfaat teknologi peternakan sapi perah presisi (C. R. Eastwood et al., 2015). Biaya awal yang tinggi dan kebutuhan akan infrastruktur yang kuat dapat menjadi hambatan adopsi, terutama bagi petani kecil. Namun, penggunaan sumber daya pakan lokal yang strategis dan teknologi yang lebih sederhana dapat membuat pemberian pakan yang tepat lebih mudah dilakukan. Kebijakan dan subsidi pemerintah dapat memainkan peran penting dalam mendorong penerapan sistem pemberian pakan presisi. Subsidi publik sangat penting dalam mendorong petani untuk mengadopsi teknologi digital modern.

Di negara-negara berkembang, konsep pemberian pakan seimbang, yang melibatkan penggunaan sumber pakan lokal untuk memenuhi kebutuhan nutrisi hewan, dapat menjadi alternatif praktis untuk sistem pemberian pakan presisi berteknologi tinggi. Melibatkan pengguna akhir selama proses penelitian dan implementasi memastikan bahwa teknologi kompatibel dengan praktik pertanian lokal dan sistem sosial-ekologis (Shilomboleni & De Plaen, 2019). Memanfaatkan sistem dan infrastruktur pertanian yang ada dapat memfasilitasi penerapan teknologi pemberian pakan presisi (Frongillo, 2020).

Implikasi Kebijakan dan Strategi Nasional

Kebijakan harus memberikan insentif bagi penerapan metode produksi inovatif melalui subsidi daripada pajak, karena subsidi terbukti dapat meningkatkan kesejahteraan sosial dan tingkat eksperimen (Akkaya et al., 2021). Meningkatkan dukungan finansial untuk penelitian dan pengembangan pertanian sangat penting, mengingat tingginya pengembalian investasi dan kebutuhan untuk mengatasi meningkatnya permintaan pangan dan tantangan iklim (Beachy, 2014). Mekanisme transfer teknologi yang efektif, seperti kemitraan publik-swasta, dapat menjembatani kesenjangan antara penelitian dan aplikasi praktis, memastikan petani memiliki akses terhadap teknologi mutakhir (Cortés-Muñoz & Pérez, 2024; Mangeni, 2019).

Membangun platform inovasi dapat mendorong kolaborasi antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk LSM, pemerintah daerah, asosiasi, dan petani, untuk menerapkan pertanian cerdas iklim dan praktik inovatif lainnya (Odera et al., 2025; Osorio-García et al., 2020). Penerapan kebijakan klaster dapat meningkatkan kerjasama antara petani dan pelaku usaha pertanian, sehingga meningkatkan efisiensi, daya saing, dan inovasi (Zysk, 2023). Kemitraan kolaboratif antara akademisi, pemerintah, dan industri sangat penting untuk berbagi sumber daya, risiko, dan menghasilkan inovasi di sektor pertanian (Bertolo et al., 2018). Kebijakan pertanian harus selaras dengan Agenda Pembangunan Berkelanjutan 2030, dengan fokus pada makanan bergizi, produksi berkelanjutan, ketahanan iklim, dan pembangunan pedesaan (Caron et al., 2018; Kanter et al., 2016).

Negara-negara harus mengembangkan jalur sistem pangan dan tata guna lahan nasional yang menyelaraskan target global dengan prioritas lokal, memastikan koherensi kebijakan dan ambisi yang lebih besar untuk mencapai SDGs (Mosnier et al., 2023). Memperkuat ekosistem inkubasi bagi perusahaan petani-produsen (FPC) sangatlah penting, beralih dari pendekatan yang seragam ke dukungan yang disesuaikan berdasarkan kebutuhan spesifik (Govil & Neti, 2024). Membangun kapasitas bagi akselerator dan inkubator bisnis agritech dapat mendukung pengembangan teknologi yang berkontribusi pada sistem pangan yang berkelanjutan dan Tangguh (Newell et al., 2021). Peningkatan kapasitas pada tingkat sosial-teknologi dan tata kelola dapat mendorong peralihan menuju sistem pangan berkelanjutan, memanfaatkan kebijakan cerdas dan inovasi (Kugelberg & Bartolini, 2024). Pemanfaatan bahan pakan lokal yang tersedia di sekitar wilayah peternakan, dikombinasikan dengan penggunaan teknologi monitoring sederhana, dapat membantu peternak kecil menurunkan biaya pakan serta meningkatkan produktivitas ternak.

KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem pakan ternak di Indonesia menghadapi tantangan kompleks yang mencakup ketergantungan pada bahan baku impor, variabilitas kualitas dan keamanan pakan, kendala logistik, serta kesenjangan sumber daya manusia dan teknologi. Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai inovasi telah dikembangkan, seperti fermentasi, probiotik, aditif alami, protein alternatif, dan pemanfaatan produk sampingan agroindustri yang mendukung efisiensi dan keberlanjutan pakan. Teknologi presisi seperti Internet of Things (IoT), sensor pintar, machine learning, dan platform digital turut berperan dalam meningkatkan akurasi pemberian pakan dan pemantauan kesehatan ternak secara real-time. Namun, keberhasilan transformasi ini sangat bergantung pada kesiapan sumber daya manusia, sehingga penguatan kapasitas melalui pelatihan digital, kolaborasi pendidikan-industri, dan pemberdayaan generasi muda menjadi sangat krusial. Selain itu, dukungan kebijakan pemerintah perlu mendorong pengembangan sumber pakan alternatif berbasis limbah pertanian untuk mengurangi ketergantungan pada bahan pakan impor. Investasi dalam teknologi precision livestock farming perlu ditingkatkan untuk meningkatkan efisiensi produksi peternakan. Kerja sama antara lembaga penelitian, industri pakan, dan peternak perlu diperkuat untuk mempercepat adopsi inovasi teknologi pakan. Pengembangan teknologi precision feeding berbiaya rendah yang sesuai untuk peternakan rakyat. Penelitian jangka panjang mengenai dampak lingkungan dan efisiensi produksi dari sistem pakan berbasis teknologi digital.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kepada semua pihak yang telah membantu hingga diterbitkannya artikel ini.

PERNYATAAN KONTRIBUSI

Penulis merupakan satu-satunya kontributor yang bertanggung jawab atas perancangan, pengumpulan data, analisis, serta penulisan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhiwibowo, W., Widayat, W., & Syafei, W. A. (2023). Dual Blockchain Framework for Halal Food Safety and Traceability Concern with Internet of Things. *2023 International Conference on Technology, Engineering, and Computing Applications (ICTECA)*, 1–6.
- Ait Sidhoum, A., Guesmi, B., Monje, J. C., & Roig, J. M. G. (2021). The impact of alternative feeding strategies on total factor productivity growth of pig farming: Empirical evidence from EU countries. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19(2), 4.
- Akkaya, D., Bimpikis, K., & Lee, H. (2021). Government interventions to promote agricultural innovation. *Manufacturing & Service Operations Management*, 23(2), 437–452.
- Akpan-Etuk, E. (2023). Technology Use by Nigerian Smallholder Farmers and the Significant Mediating Factors. *World Conference on Information Systems and Technologies*, 51–64.
- Altaf, Q. S., & Ksouri, R. (2025). Application of Machine Learning in the Food Industry. In *Artificial Intelligence in the Food Industry* (pp. 23–55). CRC Press.
- Beachy, R. N. (2014). Building political and financial support for science and technology for agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1639), 20120274.
- Bell, L. W., Robertson, M. J., Revell, D. K., Lilley, J. M., & Moore, A. D. (2008). Approaches for assessing some attributes of feed-base systems in mixed farming enterprises. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(7), 789–798.
- Bertolo, R. F., Hentges, E., Makarchuk, M.-J., Wiggins, A. K. A., Steele, H., Levin, J., Grantham, A., Gramlich, L., & Ma, D. W. L. (2018). Key attributes of global partnerships in food and nutrition to align research agendas and improve public health. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 43(7), 755–758.
- Brennan, C. S. (2024). Regenerative food innovation: the role of agro-food chain by-products and plant origin food to obtain high-value-added foods. *Foods*, 13(3), 427.
- Bucci, G., Bentivoglio, D., & Finco, A. (2019). Factors affecting ICT adoption in agriculture: A case study in Italy. *Calitatea*, 20(S2), 122–129.
- Capper, J. L. (2011). Replacing rose-tinted spectacles with a high-powered microscope: The historical versus modern carbon footprint of animal agriculture. *Animal Frontiers*, 1(1), 26–32.
- Caron, P., Ferrero y de Loma-Osorio, G., Nabarro, D., Hainzelin, E., Guillou, M., Andersen, I., Arnold, T., Astralaga, M., Beukeboom, M., & Bickersteth, S. (2018). Food systems for sustainable development: proposals for a profound four-part transformation. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 1–12.
- Chen, X., Li, Y., Zhang, H., & Wang, J. (2019). Automated feeding systems and their effects on feed efficiency and production performance in livestock farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 438–446. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.017>
- Chindasombatcharoen, N., Tsolakis, N., Kumar, M., & O'Sullivan, E. (2024). Navigating psychological barriers in agricultural innovation adoption: A multi-stakeholder perspective. *Journal of Cleaner Production*, 475, 143695.

- Cortés-Muñoz, M., & Pérez, A. M. (2024). National Center for Food Science and Technology linkage with the agri-food sector. *Agronomía Mesoamericana*, 35(SPE1).
- Dai, Z., Cui, L., Li, J., Wang, B., Guo, L., Wu, Z., Zhu, W., & Wu, G. (2020). Fermentation techniques in feed production. In *Animal agriculture* (pp. 407–429). Elsevier.
- Eastwood, C. R., Jago, J. G., Edwards, J. P., & Burke, J. K. (2015). Getting the most out of advanced farm management technologies: roles of technology suppliers and dairy industry organisations in supporting precision dairy farmers. *Animal Production Science*, 56(10), 1752–1760.
- Eastwood, C., Klerkx, L., & Nettle, R. (2017). Dynamics and distribution of public and private research and extension roles for technological innovation and diffusion: Case studies of the implementation and adaptation of precision farming technologies. *Journal of Rural Studies*, 49, 1–12.
- Empel, M. J. van, Makkar, H. P. S., Dijkstra, J., & Lund, P. (2016). Nutritional, technological and managerial parameters for precision feeding to enhance feed nutrient utilization and productivity in different dairy cattle production systems. *CABI Reviews*, 2016, 1–27.
- Erickson, B., & Fausti, S. W. (2021). The role of precision agriculture in food security. *Agronomy Journal*, 113(6), 4455–4462.
- FAO. (2023). *The future of livestock feed systems: Sustainability, innovation and resilience*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAOSTAT. (2023). *Feed demand and livestock production statistics*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/>
- Frongillo, E. A. (2020). Designing and implementing at-scale programs to improve complementary feeding. *Nutrition Reviews*, 78(Supplement_2), 62–70.
- Gameil, M., & Gaber, T. (2019). Wireless sensor networks-based solutions for cattle health monitoring: a survey. *International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics*, 779–788.
- García, S. C., Fulkerson, W. J., & Brookes, S. U. (2020). Precision dairy farming technologies and their potential to improve milk production efficiency. *Animal Production Science*, 60(1), 1–13. <https://doi.org/10.1071/AN18510>
- Gencer, Ö. (2025). Dietary innovation in blue crab aquaculture: effects on performance and product quality. *Aquaculture International*, 33(3), 1–12.
- Ghavipanjan, N., Nasri, M. H. F., & Vargas-Bello-Perez, E. (2024). Trends and future directions of artificial intelligence applications in Iranian livestock production systems. *ANNALS OF ANIMAL SCIENCE*.
- Govil, R., & Neti, A. (2024). Incubating Farmer Producer Companies: The Missing Middle. *Vikalpa*, 49(4), 277–289.
- Hartung, J., Banhazi, T., Vranken, E., & Guarino, M. (2017). European farmers' experiences with precision livestock farming systems. *Animal Frontiers*, 7(1), 38–44.
- Hassan, A. A., Mohamed, A. H., & El-Naggar, S. M. (2019). Utilization of crop residues as alternative feed resources for ruminants in arid regions. *Tropical Animal Health and Production*, 51(5), 1127–1135. <https://doi.org/10.1007/s11250-018-1765-4>

- Heidari, M. D., Gandasmita, S., Li, E., & Pelletier, N. (2021). Proposing a framework for sustainable feed formulation for laying hens: A systematic review of recent developments and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125585.
- Hilmiati, N., & Panjaitan, T. (2021). Communal grazing area is as a potential source of calves in dry Sumbawa Island, Indonesia: the improvement of opportunities and challenges. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 788(1), 12175.
- Itoh, T., Masuda, T., & Tsukamoto, K. (2010). Development of a sensor system for animal watching to keep human health and food safety-A health monitoring system for chickens by using wireless sensors. *Synthesiology English Edition*, 3(3), 224–233.
- Johnson, K. A., Hristov, A. N., & Kebreab, E. (2020). Strategies for reducing methane emissions in ruminant livestock systems through feed optimization. *Journal of Animal Science*, 98(6), skaa145. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa145>
- Kanter, D. R., Schwoob, M.-H., Baethgen, W. E., Bervejillo, J. E., Carriquiry, M., Dobermann, A., Ferraro, B., Lanfranco, B., Mondelli, M., & Penengo, C. (2016). Translating the sustainable development goals into action: a participatory backcasting approach for developing national agricultural transformation pathways. *Global Food Security*, 10, 71–79.
- Kugelberg, S., & Bartolini, F. (2024). Smart Food Policy as a Response to a New Sustainable Food System Agenda. In *Smart Food Industry: The Blockchain for Sustainable Engineering* (pp. 211–217). CRC Press.
- Kumar, S., Kumar, S., Mishra, P., & Chaube, M. K. (2021). Internet of animal health things (IoAT): A new frontier in animal biometrics and data analytics research. *IoT-Based Data Analytics for the Healthcare Industry*, 261–275.
- Kumar, S., Singh, P., & Sharma, R. K. (2021). Smart feeding technologies and their role in improving livestock productivity. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126400. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126400>
- Lee, J. H., Kim, D. H., & Park, S. H. (2022). Sensor-based precision feeding systems for improving nutrient efficiency in livestock production. *Animals*, 12(5), 621. <https://doi.org/10.3390/ani12050621>
- Makkar, H. P. S. (2016a). Animal nutrition in a 360-degree view and a framework for future R&D work: towards sustainable livestock production. *Animal Production Science*, 56(10), 1561–1568.
- Makkar, H. P. S. (2016b). Smart livestock feeding strategies for harvesting triple gain—the desired outcomes in planet, people and profit dimensions: a developing country perspective. *Animal Production Science*, 56(3), 519–534.
- Mangeni, B. (2019). The role of public-private partnerships (PPPs) in ensuring technology access for farmers in sub-Saharan Africa. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 19(1), 14137–14155.
- Mansour, A. T., & Ahmed, A. E. (2024). Role of livestock on food security in Saudi Arabia. In *Food and Nutrition Security in the Kingdom of Saudi Arabia, Vol. 1: National Analysis of Agricultural and Food Security* (pp. 141–157). Springer.

- Manteuffel, C. (2022). Cooperative livestock farming: A chance for a breakthrough for PLF. *10th European Conference on Precision Livestock Farming*, 584–591.
- Mashur, M., Bilad, M. R., Kholik, K., Munawaroh, M., Cheok, Q., Huda, N., & Kobun, R. (2022). The sustainability and development strategy of a cattle feed bank: a case study. *Sustainability*, *14*(13), 7989.
- Miles, C. (2019). The combine will tell the truth: On precision agriculture and algorithmic rationality. *Big Data & Society*, *6*(1), 2053951719849444.
- Mosnier, A., Schmidt-Traub, G., Obersteiner, M., Jones, S., Javalera-Rincon, V., DeClerck, F., Thomson, M., Sperling, F., Harrison, P., & Pérez-Guzmán, K. (2023). How can diverse national food and land-use priorities be reconciled with global sustainability targets? Lessons from the FABLE initiative. *Sustainability Science*, *18*(1), 335–345.
- Ncube, B., Mupangwa, W., & French, A. (2018). Precision agriculture and food security in Africa. *Systems Analysis Approach for Complex Global Challenges*, 159–178.
- Neethirajan, S., & Kemp, B. (2021). Digital phenotyping in livestock farming. *Animals*, *11*(7), 2009.
- Newell, R., Newman, L., & Mendly-Zambo, Z. (2021). The role of incubators and accelerators in the fourth agricultural revolution: a case study of Canada. *Agriculture*, *11*(11), 1066.
- Nguyen, T. H. (2024). Cooperation between universities and businesses in developing human resources to participate in the digital economy. *Journal of the Knowledge Economy*, *15*(2), 5230–5249.
- Nguyen, T. T., Nguyen, H. V., & Pham, T. H. (2021). Utilization of rice by-products as alternative feed resources in small ruminant production systems in Southeast Asia. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *34*(7), 1045–1053. <https://doi.org/10.5713/ajas.20.0520>
- Nguyen, X. T., & Pham, L. M. (2022). Detecting Multiple Perturbations on Swine using Data from Simulation of Precision Feeding Systems. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, *12*(12), 136–145.
- Odera, E., Galindo, S., Hendrickx, S., Adesogan, A., Eilitta, M., & Pflugger, B. A. (2025). Innovation platforms in practice: a conceptual framework. *Development in Practice*, *35*(1), 152–166.
- Oliver, M. A., Bishop, T. F. A., & Marchant, B. P. (2013). *Precision agriculture for sustainability and environmental protection* (Vol. 39). Routledge Abingdon, UK.
- Onwulata, C., Flora, F. L., & Kramer, W. (2008). *Global opportunities in agri-food science & technology*.
- Osorio-García, A. M., Paz, L., Howland, F., Ortega, L. A., Acosta-Alba, I., Arenas, L., Chirinda, N., Martínez-Barón, D., Bonilla Findji, O., & Loboguerrero, A. M. (2020). Can an innovation platform support a local process of climate-smart agriculture implementation? A case study in Cauca, Colombia. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, *44*(3), 378–411.
- Paul, B. K., Groot, J. C. J., Maass, B. L., Notenbaert, A. M. O., Herrero, M., & Tiftonell, P. A. (2020). Improved feeding and forages at a crossroads: Farming systems approaches for sustainable livestock development in East Africa. *Outlook on Agriculture*, *49*(1), 13–20.

- Pham, L. M., Nguyen-Ba, H., Nguyen, H. S., & Le, H.-H. (2021). Simulation of precision feeding systems for swine. *2021 13th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE)*, 1–6.
- Place, S. E. (2024). Environmental Sustainability of Livestock Systems. *Meat and Muscle Biology*, 8(1).
- Pomar, C., & Remus, A. (2023). Fundamentals, limitations and pitfalls on the development and application of precision nutrition techniques for precision livestock farming. *Animal*, 17, 100763.
- Prasetyo, B., Santoso, B., & Wibowo, A. (2023). Adoption of precision livestock farming technologies in Indonesian livestock systems: Opportunities and challenges. *Tropical Animal Science Journal*, 46(2), 156–165. <https://doi.org/10.5398/tasj.2023.46.2.156>
- Puppala, H., Peddinti, P. R. T., Tamvada, J. P., Ahuja, J., & Kim, B. (2023). Barriers to the adoption of new technologies in rural areas: The case of unmanned aerial vehicles for precision agriculture in India. *Technology in Society*, 74, 102335.
- Qiao, Y., Kong, H., Clark, C., Lomax, S., Su, D., Eiffert, S., & Sukkarieh, S. (2021). Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: A review. *Animals*, 11(11), 3033.
- Rahman, M. A., Hidayat, R., & Nugroho, T. (2022). Digital livestock management and IoT adoption in Southeast Asian farming systems. *Information Processing in Agriculture*, 9(4), 568–577. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.09.004>
- Raimi, L., Panait, M., & Sule, R. (2021). Leveraging precision agriculture for sustainable food security in sub-Saharan Africa: A theoretical discourse. *Shifting Patterns of Agricultural Trade: The Protectionism Outbreak and Food Security*, 491–509.
- Rapi, A., Arifin, A. N., & Lando, A. T. (2020). The manufacture of automatic chicken feed making machines as an economical solution for chicken farmers in Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 885(1), 12044.
- Reith, S., & Hölscher, P. (2023). Automatically collected data in cattle, pig and poultry farming. *LANDTECHNIK*, 78(3), 185–197.
- Romanini, C. E. B., Bahr, C., Birk, U., Demmers, T., Eterradossi, N., Garain, P., Guarino, M., Halachmi, I., Hartung, J., & Lokhorst, C. (2011). BioBusiness project: research training program on Precision Livestock Farming (PLF). In *Precision Livestock Farming'11* (pp. 501–505). Czech Centre for Science and Society.
- Romano, E., Brambilla, M., Cutini, M., Giovinazzo, S., Lazzari, A., Calcante, A., Tangorra, F. M., Rossi, P., Motta, A., & Bisaglia, C. (2023). Increased cattle feeding precision from automatic feeding systems: considerations on technology spread and farm level perceived advantages in Italy. *Animals*, 13(21), 3382.
- Saha, D., Padhiary, M., & Chandrakar, N. (2025). AI Vision and Machine Learning for Enhanced Automation in Food Industry: A Systematic Review. *Food and Humanity*, 100587.
- Saravanan, K., & Saraniya, S. (2017). Cloud IOT based novel livestock monitoring and identification system using UID. *Sensor Review*, 38(1), 21–33.

- Serote, B., Mokgehle, S., Senyolo, G., du Plooy, C., Hlophe-Ginindza, S., Mpandeli, S., Nhamo, L., & Araya, H. (2023). Exploring the barriers to the adoption of climate-smart irrigation technologies for sustainable crop productivity by smallholder farmers: Evidence from South Africa. *Agriculture*, 13(2), 246.
- Shahzad, H. M. A., Almomani, F., Shahzad, A., Mahmoud, K. A., & Rasool, K. (2024). Challenges and opportunities in biogas conversion to microbial protein: a pathway for sustainable resource recovery from organic waste. *Process Safety and Environmental Protection*.
- Shilomboleni, H., & De Plaen, R. (2019). Scaling up research-for-development innovations in food and agricultural systems. *Development in Practice*, 29(6), 723–734.
- Shreesha, S., MM, M. P., Verma, U., & Pai, R. M. (2020). Computer vision based fish tracking and behaviour detection system. *2020 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER)*, 252–257.
- Siberski-Cooper, C. J., & Koltjes, J. E. (2021). Opportunities to harness high-throughput and novel sensing phenotypes to improve feed efficiency in dairy cattle. *Animals*, 12(1), 15.
- Silva, F. F., Carvalho, G. G. P., & Pereira, L. G. R. (2021). Sustainable tropical livestock feeding systems using alternative forage resources. *Animal Feed Science and Technology*, 273, 114829. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114829>
- Smidt, H. J., & Jokonya, O. (2022). Factors affecting digital technology adoption by small-scale farmers in agriculture value chains (AVCs) in South Africa. *Information Technology for Development*, 28(3), 558–584.
- Smith, D. L., Jones, R. M., & Taylor, P. A. (2022). Precision feeding strategies to reduce feed waste and improve efficiency in ruminant production systems. *Animal*, 16(3), 100457. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100457>
- Smith, T., Jayasuriya, N., Mlambo, V., Lekule, F., Thomas, D., Owen, E., Pearson, A., & Titterton, M. (2005). *Feeds and feeding to improve productivity and survival*.
- Stöber, S., Adinata, K., Ramba, T., Paganini, N., & Sulejmanović, N. (2021). Smallholder farmers' challenges of coping with COVID-19 containments: insights from two food regions in Indonesia. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 21(6), 18223–18244.
- Sunarno, Solikhin, & Budiraharjo, K. (2023). Effects of feed additives nanochitosan on production performance of Tegal duck (*Anas platyrhynchos*) reared intensively and semi-intensively. *11TH INTERNATIONAL SEMINAR ON NEW PARADIGM AND INNOVATION ON NATURAL SCIENCES AND ITS APPLICATION (ISNPINSA): Developing Science and Technology Toward the New Normal Era*, 2738(1), 40010.
- Susilowati, S. H., Ariningsih, E., Saliem, H. P., Roosganda, E., & Adawiyah, C. R. (2021). Opportunities and challenges to increase corn export from Gorontalo province of Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 672(1), 12027.
- Tholhappiyan, T., Sankar, S., Selvakumar, V., & Robert, P. de. (2023). Agriculture Monitoring System with Efficient Resource Management using IoT. *2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*, 1628–1633.

- Tibamanya, F. Y., Henningsen, A., & Milanzi, M. A. (2022). Drivers of and barriers to adoption of improved sunflower varieties amongst smallholder farmers in Singida, Tanzania: A double-hurdle approach. *Q Open*, 2(1), qoac008.
- Tignani, M. V., Santolini, E., Secci, G., Bovo, M., Parisi, G., & Barbaresi, A. (2024). Assessing environmental sustainability of substitute feeding formulas for gilthead seabream (*Sparus aurata*) using Life Cycle Assessment. *Science of the Total Environment*, 954, 176689.
- Van Greunen, D., & Fosu, A. (2022). ICT adoption challenges: Case of rural small-scale farmers in the Amathole district municipality of South Africa. *2022 IST-Africa Conference (IST-Africa)*, 1–9.
- Van Raamsdonk, L. W. D., Meijer, N., Gerrits, E. W. J., & Appel, M. J. (2023). New approaches for safe use of food by-products and biowaste in the feed production chain. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135954.
- Vekic, A., Borocki, J., Stankovski, S., & Ostojic, G. (2017). DEVELOPMENT OF INNOVATION IN FIELD OF PRECISION AGRICULTURE. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 28.
- Villano, R. A., Koomson, I., Thei, S., Taquuddin, M., Prameswari, F., Fachry, A., Fatah, L., Sumantri, I., & Burrow, H. (2024). Women's empowerment in integrated cattle-farming systems in Indonesia. *Applied Economics*, 1–16.
- Wang, G., Lin, Y., Wang, Q., Wu, X., Yin, Y., & Ma, Y. (2023). Microbial protein manufacturing: the developing trend and challenge. *Chinese Science Bulletin*, 21, 2779.
- Wattie, Y., Suparno, O., & Raharja, S. (2024). Enhancing competitiveness in the Indonesian meat processing industry: a literature review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1358(1), 12042.
- Widodo, E., Prabowo, A., & Suryani, N. (2021). Utilization of cassava by-products as alternative feed resources for sustainable livestock production in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 788, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012045>
- Wu, Y., Zhao, J., Xu, C., Ma, N., He, T., Zhao, J., Ma, X., & Thacker, P. A. (2020). Progress towards pig nutrition in the last 27 years. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5102–5110.
- Zhang, Y., Wang, X., & Liu, G. (2020). Internet of Things-based intelligent feeding system for improving efficiency in livestock farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105566. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105566>
- Zysk, E. (2023). Perceived Benefits and Barriers to Cooperation Between Small Farms and Clusters—A Case Study of Poland. In *Sustainable Development Goals in Europe: A Geographical Approach* (pp. 171–192). Springer.