

Transformasi Hijau Sistem Peternakan Melalui Pendekatan Nexus Air-Pangan-Energi : Tinjauan Sistematis Tentang Perubahan Iklim dan Pengelolaan Sumberdaya Alam Di Kawasan Asia

Green Livestock Transformation Through The Water-Food-Energy Nexus: A Systematic Review Of Climate and Resource Management In Asia

^{1,2,*}Prima Yustitia Nurul Islami, ¹Andi Alamsyah Rivai ¹Win Ariga Mansur Malonga, ¹Erisa Ayu Waspadi Putri, ¹Sasi Gendo Sari, ¹Wikan Jaya Prihantarto

¹Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Program Pascasarjana, IPB University, Kota Bogor, 16144, Indonesia

²Program Studi Pendidikan Sosiologi, Fakultas Ilmu Sosial dan Hukum, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta, 13220, Indonesia

*E-mail korespondensi: primayustitia@apps.ipb.ac.id

ABSTRAK

Transformasi hijau sistem peternakan merupakan salah satu strategi utama dalam mewujudkan produksi pangan hewani yang efisien, tangguh terhadap perubahan iklim, dan berkelanjutan. Dalam konteks tersebut, pendekatan Nexus Air–Pangan–Energi (Water–Food–Energy/WFE Nexus) menyediakan kerangka terpadu untuk memahami keterkaitan penggunaan air, energi, pangan, serta pengelolaan sumber daya lingkungan dalam sistem peternakan. Penelitian ini bertujuan menganalisis perkembangan kajian WFE Nexus pada sistem peternakan di Asia serta mengidentifikasi implikasinya terhadap transformasi hijau melalui tinjauan sistematis terhadap 87 publikasi ilmiah yang diterbitkan selama periode 2000–2024. Kajian dilakukan dengan mengintegrasikan aspek efisiensi penggunaan air dan energi, produktivitas sistem peternakan, perubahan iklim, serta pengelolaan sumber daya lingkungan. Hasil sintesis menunjukkan bahwa produksi pakan merupakan titik kritis yang paling menentukan efisiensi penggunaan sumber daya dalam sistem peternakan. Variasi karakteristik agroekologi, tipe sistem produksi, dan tingkat kerentanan iklim memengaruhi kinerja nexus air–pangan–energi, terutama terhadap penggunaan air, kebutuhan energi, dan efisiensi konversi pakan. Selain itu, perubahan iklim meningkatkan tekanan terhadap keberlanjutan sistem peternakan melalui peningkatan kebutuhan air, konsumsi energi, dan risiko penurunan produktivitas akibat cekaman panas. Oleh karena itu, transformasi hijau sistem peternakan memerlukan pendekatan terpadu yang mengintegrasikan efisiensi sumber daya, adaptasi terhadap perubahan iklim, penerapan ekonomi sirkular, serta pengelolaan lingkungan sebagai dasar penyusunan kebijakan pembangunan peternakan berkelanjutan di Asia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi

referensi bagi pengembangan teknologi hijau dan perumusan kebijakan menuju sistem peternakan yang lebih tangguh, efisien, dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Nexus Air–Pangan–Energi; Transformasi Hijau; Sistem Peternakan Berkelanjutan; Perubahan Iklim; Pengelolaan Sumber Daya.*

ABSTRACT

Green transformation of livestock systems has become a key strategy for achieving efficient, climate-resilient, and sustainable animal food production. In this context, the Water–Food–Energy (WFE) Nexus provides an integrated framework for understanding the interconnections among water, energy, food, and environmental resource management within livestock production systems. This study aims to examine the development of WFE Nexus research in Asian livestock systems and identify its implications for green transformation through a systematic review of 87 scientific publications published between 2000 and 2024. The review integrates evidence on water and energy use efficiency, livestock productivity, climate change impacts, and environmental resource management. The synthesis indicates that feed production remains the primary hotspot influencing resource-use efficiency across livestock systems. Differences in agroecological conditions, production systems, and climate vulnerability substantially affect water use, energy demand, and feed conversion efficiency. Furthermore, climate change intensifies pressures on livestock sustainability by increasing water requirements, energy consumption, and productivity losses associated with heat stress. These findings highlight that green livestock transformation requires an integrated approach combining resource-use efficiency, climate change adaptation, circular economy practices, and environmental resource management to support sustainable livestock development in Asia. This study provides scientific evidence to support the advancement of green technologies and policy development for resilient, resource-efficient, and sustainable livestock systems.

Kata kunci: *Water–Food–Energy Nexus; Green Transformation; Sustainable Livestock Systems; Climate Change; Resource Management.*

PENDAHULUAN

Kondisi dunia saat ini berada di persimpangan tiga krisis sumber daya yang saling terkait, yaitu krisis air, krisis pangan, dan krisis energi, yang semakin diperparah oleh perubahan iklim global. Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dan *World Meteorological Organization* (WMO) menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem telah menyebabkan gangguan pada sistem produksi pangan, ketersediaan air, serta pasokan energi di berbagai kawasan dunia. Dalam kondisi tersebut, sektor peternakan memiliki posisi yang unik sebagai penyedia pangan hewani sekaligus pengguna sumber daya alam yang intensif, sehingga menghadapi tantangan besar dalam menjaga produktivitas dan keberlanjutan lingkungan.

Transformasi hijau (*green transformation*) dalam sektor peternakan merupakan pendekatan strategis yang mendorong peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya, pengurangan emisi gas rumah kaca, pemanfaatan energi

terbarukan, serta penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam seluruh rantai produksi peternakan. Transformasi ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas, tetapi juga bertujuan menciptakan sistem peternakan yang tangguh terhadap perubahan iklim, rendah emisi, dan berkelanjutan. Di Asia, kebutuhan transformasi hijau menjadi semakin mendesak seiring meningkatnya permintaan pangan hewani akibat pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan perubahan pola konsumsi, yang pada saat yang sama dihadapkan pada tekanan perubahan iklim, keterbatasan sumber daya air, degradasi lingkungan, serta meningkatnya kebutuhan energi.

Dalam konteks tersebut, pendekatan Nexus Air–Pangan–Energi (Water–Food–Energy/WFE Nexus) menjadi kerangka analitis yang relevan untuk memahami keterkaitan antara penggunaan air, produksi pangan, konsumsi energi, dan pengelolaan sumber daya lingkungan secara terpadu. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi sinergi maupun trade-off antarsumber daya sehingga dapat mendukung perumusan strategi transformasi hijau yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Oleh karena itu, kajian mengenai WFE Nexus pada sistem peternakan menjadi semakin penting sebagai dasar ilmiah dalam merancang kebijakan pembangunan peternakan yang mampu menjawab tantangan ketahanan pangan, perubahan iklim, dan keberlanjutan lingkungan secara bersamaan. menciptakan lingkaran setan tekanan sumber daya yang semakin sulit dikendalikan.

Kawasan Asia merupakan lokus kritis bagi studi WFE Nexus karena dominasi demografis dan peran sentralnya dalam produksi pangan global. Asia menampung sebagian besar populasi dunia dan menyumbang pangsa besar produksi daging serta produk susu dunia (FAO, 2023). Pertumbuhan ekonomi, urbanisasi, dan perubahan pola konsumsi mendorong intensifikasi peternakan yang cepat di berbagai negara Asia, sehingga menempatkan sektor peternakan, terutama peternakan sapi, sebagai kontributor utama terhadap defisit sumber daya (Delgado, 2003; Thornton, 2010; FAO, 2020). Intensifikasi ini memperbesar permintaan langsung untuk air (hidrasi ternak dan sanitasi) serta kebutuhan tidak langsung yang lebih besar untuk produksi pakan (irigasi tanaman pakan), sehingga memperdalam tekanan pada sistem air regional (Mekonnen & Hoekstra, 2012).

Dampak intensifikasi peternakan terhadap ketahanan air dan ketergantungan energi menjadi semakin nyata di banyak DAS strategis Asia. Penelitian menunjukkan korelasi kuat antara ekspansi tanaman pakan dan deplesi akuifer di wilayah-wilayah produktif seperti Dataran Indo-Gangga dan Dataran Utara Tiongkok (Chen et al., 2020; Chakraborti et al., 2023; Shah et al., 2018). Selain itu, perubahan iklim memperburuk kondisi tersebut melalui peningkatan frekuensi kekeringan, pergeseran pola presipitasi, dan gelombang panas yang menurunkan produktivitas ternak melalui heat stress, fenomena yang menambah kebutuhan energi untuk pendinginan dan konsumsi air untuk termoregulasi (IPCC, 2022; WEF, 2025). Proyeksi makroekonomi menunjukkan potensi kerugian besar jika tata kelola air dan adaptasi pertanian tidak dirombak (WEF, 2025; World Bank, 2026). Oleh karena itu, hubungan timbal balik antara peternakan sapi, pengelolaan air, dan penyediaan energi bukan semata persoalan teknis agronomi melainkan isu strategis yang menyentuh keamanan pangan, ketahanan iklim, dan stabilitas sosial-ekonomi regional.

Meskipun literatur mengenai dampak lingkungan peternakan di Asia berkembang, terdapat beberapa kesenjangan penting yang membatasi pemahaman komprehensif tentang WFE Nexus pada sektor ini. Pertama, banyak studi bersifat

reduksionis: fokusnya terfragmentasi pada satu indikator saja, misalnya emisi gas rumah kaca, jejak air, atau analisis energi siklus hidup, tanpa mengkaji interaksi dan trade-off antardimensi secara simultan (Llonch et al., 2017; Mekonnen & Hoekstra, 2012; Pelletier et al., 2011). Kedua, terdapat bias geografis dan metodologis dalam literatur yang ada, karena kontribusi riset dari kawasan Asia Selatan dan Asia Tenggara masih relatif kecil dan kerap berupa studi kasus negara-spesifik, sehingga daya generalisasi lintas negara menjadi terbatas (Liu et al., 2018; MDPI Sustainability, 2025). Ketiga, tipologi sistem produksi yang banyak diteliti cenderung terpusat pada peternakan industri skala besar, sementara mixed crop-livestock systems dan sistem pastoral tradisional—yang justru menjadi penopang ekonomi pedesaan di banyak negara berkembang—masih kurang terwakili dalam analisis kuantitatif (FAO, 2020; MDPI Water, 2024). Selain itu, dimensi keadilan distribusi beban lingkungan (equity) dan pertanyaan tentang siapa yang menanggung trade-off juga masih jarang dianalisis secara eksplisit dalam kajian-kajian tersebut (Rasul & Sharma, 2016; Liu et al., 2018).

Untuk menutup celah-celah ini, kajian ini menawarkan tiga kontribusi orisinal. Pertama, penelitian ini menyajikan sintesis kuantitatif multidimensi simultan berupa meta-analisis yang mengintegrasikan konsumsi air, intensitas energi, dan output pangan pada sistem peternakan sapi di Asia, dengan rentang data 2000–2024. Kedua, studi ini mengembangkan Indeks Tekanan Nexus (Nexus Stress Index - NSI) komposit pada skala negara untuk 18 negara Asia produsen ternak utama, sebagai alat standarisasi perbandingan kerentanan ekologis dan efisiensi pemanfaatan sumber daya lintas-nasional. Ketiga, penelitian menguji hipotesis Paradoks Jevons dalam konteks peternakan sapi: apakah peningkatan efisiensi teknis pakan/air berkorelasi dengan ekspansi populasi ternak yang berujung pada peningkatan konsumsi agregat sumber daya (Jevons, dikaji ulang dalam literatur kontemporer; Haruna et al., 2019).

Berdasarkan urgensi empiris dan kesenjangan teori tersebut, masalah utama penelitian ini dirumuskan sebagai: belum adanya pemahaman kuantitatif terstandarisasi mengenai sejauh mana intensifikasi peternakan sapi di Asia berdampak pada pilar keberlanjutan lingkungan dalam kerangka WFE Nexus. Pertanyaan penelitian spesifik yang diangkat adalah: (1) Berapa besar water footprint, intensitas energi, dan efisiensi konversi pangan pada sistem peternakan sapi di Asia berdasarkan data empiris 2000–2024. Secara umum, tulisan ini bertujuan untuk menyediakan sintesis kuantitatif komprehensif, rigor, dan berbasis bukti mengenai dinamika interaksi WFE Nexus pada peternakan sapi di Asia sebagai dasar rekomendasi transformasi tata kelola lingkungan. Secara operasional, tujuan penelitian adalah: (1) mensintesis bukti empiris terkait penggunaan air, alokasi energi siklus hidup, dan produktivitas pangan pada sistem peternakan sapi di Asia (2000–2024); (2) mengkuantifikasi efek, elastisitas, dan signifikansi interlinkages WFE antar-subsektor peternakan sapi; (3) mengidentifikasi dan menguji peran faktor-faktor moderator utama pada heterogenitas intensitas nexus; (4) mengembangkan dan memvalidasi NSI komposit untuk memetakan performa lingkungan 18 negara Asia; serta (5) merumuskan rekomendasi kebijakan strategis berbasis bukti yang mempertimbangkan efisiensi, kesetaraan, dan ketahanan iklim.

Untuk menjaga fokus kajian, penelitian ini menetapkan batasan operasional sebagai berikut. Secara temporal, studi membatasi literatur dan data antara Januari 2000 dan Desember 2024 untuk menangkap evolusi penelitian pasca-Konferensi Bonn 2011 dan dinamika modernisasi peternakan abad ke-21. Secara geografis, analisis difokuskan pada 18 negara Asia dengan produksi ternak signifikan:

Tiongkok, India, Indonesia, Thailand, Vietnam, Bangladesh, Pakistan, Myanmar, Filipina, Malaysia, Korea Selatan, Jepang, Sri Lanka, Kamboja, Laos, Nepal, Mongolia, dan Taiwan. Secara subsektoral, fokus diarahkan pada sistem peternakan sapi, sapi potong dan sapi perah meliputi skala industri intensif, sistem campuran pedesaan, dan sistem pastoral ekstensif; data sekunder untuk kerbau akan dimasukkan bila relevan dan terintegrasi dalam hierarki komoditas. Dari segi bahasa dan sumber, penelusuran mencakup publikasi dalam bahasa Inggris dan bahasa regional utama (dengan abstrak/metadana berbahasa Inggris) dari basis data internasional bereputasi (Scopus, Web of Science, PubMed) serta laporan institusi internasional dan nasional. Penelitian yang berfokus pada manajemen kesehatan hewan tanpa kaitan dengan konsumsi input material atau yang membahas komoditas non-sapi tanpa relevansi langsung terhadap tujuan studi dikecualikan.

MATERI DAN METODE

Evolusi Konsep WFE Nexus: Dari Bonn 2011 ke Agenda 2030

Konsep WFE Nexus berakar pada pengakuan yang berkembang pada awal 2000-an bahwa pengelolaan sektoral sumber daya air oleh kementerian air, energi oleh kementerian energi, pangan oleh kementerian pertanian dapat menciptakan silo kebijakan yang kontraproduktif. Fondasi awal diletakkan oleh Ringler et al. (2013) dalam kerangka WELF (Water-Energy-Land-Food) yang mengintegrasikan dimensi lahan, dan kemudian disempurnakan oleh Bazilian et al. (2011) yang mengembangkan pendekatan pemodelan terpadu untuk nexus. Konferensi Nexus Bonn 2011 menjadi momen kritis yang memformalkan WFE Nexus sebagai kerangka kebijakan global, menghasilkan dokumen 'Understanding the Nexus' (Hoff, 2011) yang menjadi referensi yayasan bagi ribuan studi selanjutnya. Pasca-Bonn, Agenda Pembangunan Berkelanjutan 2030 (SDGs) menginkorporasikan prinsip-prinsip nexus ke dalam target-target yang saling berkaitan: SDG 2 (tanpa kelaparan), SDG 6 (air bersih dan sanitasi), dan SDG 7 (energi bersih). Secara spesifik.

Berdasarkan kajian terbaru Holmatov et al. (2023) dalam Natural Resources Forum memetakan evolusi literatur nexus dari fase fondasi konseptual (2011–2014), fase kuantifikasi dan pemodelan (2015–2019), menuju fase integrasi kebijakan dan tata kelola (2020–kini). Studi bibliometrik 929 artikel (2000–2024) mengonfirmasi bahwa transisi ini dimulai dari konsep dasar menuju pendekatan machine learning, optimasi multi-tujuan, dan strategi ekonomi sirkular yang semakin mendominasi frontier penelitian nexus (MDPI Sustainability, 2025). Dalam konteks Asia, kajian WFE Nexus di Basin Mekong menghadapi banjir, kekeringan, dan tekanan pembangunan menjadi studi kasus paradigmatik yang mengintegrasikan manajemen risiko dini, definisi peran pemangku kepentingan, dan manajemen sumber daya efektif (Min et al., 2024/UNDESA).

Kerangka Analitis WFE Nexus: Tinjauan Metodologis

Beberapa kerangka analitis telah dikembangkan untuk operasionalisasi WFE Nexus dalam konteks pertanian dan peternakan. Kerangka CLEWS (Climate, Land, Energy, and Water Strategies) yang dikembangkan FAO menawarkan pendekatan pemodelan terpadu yang menghubungkan dinamika iklim, penggunaan lahan, kebutuhan energi, dan ketersediaan air dalam satu platform (Laspidou et al., 2020).

WEF Nexus Tool IUCN berfokus pada aspek operasional dan pengambilan keputusan di tingkat proyek, sementara kerangka WEAP-MODFLOW (Wiley, 2024) menawarkan analisis kuantitatif nexus di skala daerah aliran sungai dengan mempertimbangkan manajemen konjungtif air permukaan dan air tanah.

Pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) tetap menjadi metodologi utama dalam kajian jejak lingkungan peternakan karena mampu menilai dampak secara menyeluruh sepanjang daur hidup produk, termasuk jejak air dan penggunaan energi per satuan produk. Dalam konteks peternakan, FAO LEAP merekomendasikan kerangka penilaian yang mengintegrasikan water productivity dan water scarcity footprint agar evaluasi dampak lingkungan lebih komprehensif dan tidak terbatas pada satu indikator saja (FAO, 2016; Mekonnen & Hoekstra, 2012; Pelletier et al., 2011). Inovasi terkini mengintegrasikan indeks kelangkaan air berbasis daerah aliran sungai (Boulay et al., 2018) yang mempertimbangkan variabilitas ketersediaan air, memungkinkan perbandingan dampak nexus yang lebih kontekstual dibandingkan dengan metrik volumetrik sederhana. Penggunaan meta-analisis multi-studi yang menggabungkan metrik LCA dengan indikator nexus tingkat sistem, mengikuti pendekatan yang diusulkan Hoff (2011) dan disempurnakan Rasul & Sharma (2016), memberikan landasan metodologis yang kokoh, sambil menjaga komparabilitas lintas-studi melalui standardisasi ukuran efek.

Nexus dalam Sistem Peternakan Asia

Dalam sistem peternakan, WFE Nexus termanifestasi melalui tiga jalur utama yang saling berinteraksi (Herrero et al., 2013; Naylor et al., 2005):

1. Jalur Pakan (*Feed Pathway*)

Jalur pakan adalah jalur nexus yang paling signifikan secara kuantitatif. Produksi tanaman untuk pakan ternak mendorong sebagian besar permintaan air dan energi pertanian. Studi global terbaru yang mengevaluasi jejak air dari 140 produk pakan hewan di 262 negara menggunakan model WATNEEDS (Scientific Data, 2024) mengonfirmasi bahwa produksi pakan adalah tahap produksi yang paling bertanggung jawab atas tingginya penggunaan air dalam rantai pangan asal ternak. Di Asia, ketergantungan pada biji-bijian irigasi (padi, jagung, kedelai) sebagai bahan pakan utama menciptakan tekanan air biru yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sistem berbasis pakan hijauan tadah hujan. Perdagangan internasional komoditas pakan juga menciptakan aliran 'air virtual' lintas negara: pada tahun 2022, Tiongkok menyumbang 40% dari total impor air virtual global untuk kedelai dan 16% untuk produk ternak (Chatham House, 2025), menjadikan keamanan pasokan pakan sebagai isu geopolitik sekaligus isu nexus.

2. Jalur Produksi (*Production Pathway*)

Jalur produksi mencakup interaksi antara penggunaan air di peternakan — untuk minum, kebersihan kandang, pendinginan, dan manajemen limbah — dengan penggunaan energi untuk perkandangan berpendingin, ventilasi, pencahayaan, dan pemompaan air. Intensifikasi sistem produksi meningkatkan kompleksitas jalur ini: sistem broiler industri membutuhkan pengendalian iklim yang intensif energi, sementara sistem sapi perah komersial memerlukan infrastruktur pendinginan susu yang berenergi tinggi. Konektivitas ke jaringan listrik yang semakin meningkat di peternakan Asia meningkatkan total intensitas energi di tingkat peternakan, namun juga membuka peluang untuk efisiensi melalui adopsi energi terbarukan.

3. Jalur Limbah-Energi (*Waste-Energy Pathway*)

Jalur ini merepresentasikan pemborosan energi (untuk penanganan kotoran ternak konvensional) atau sumber energi (melalui produksi biogas) dan nutrisi

(melalui daur ulang nutrisi ke lahan pertanian). Sistem biogas kotoran ternak menunjukkan rasio pengembalian energi atas investasi (EROI) tertimbang 3,2 dalam sistem babi intensif Asia, dengan ko-manfaat berupa pengurangan limpasan nitrogen rata-rata 34% (Studi ini, bagian 4.4). Pengelolaan laguna terbuka yang masih dominan di banyak negara Asia Tenggara, sebaliknya, menghasilkan emisi metana dan dinitrogen oksida yang tidak ditangkap, serta kontaminasi air tanah dari limpasan nutrisi.

Transformasi Hijau Sistem Peternakan (*Green Livestock Transformation*)

Green Livestock Transformation merupakan paradigma pembangunan peternakan yang menekankan peningkatan produktivitas secara berkelanjutan melalui efisiensi penggunaan sumber daya, pengurangan dampak lingkungan, serta penguatan ketahanan terhadap perubahan iklim. Pendekatan ini berkembang sebagai respons terhadap meningkatnya kebutuhan pangan hewani yang harus dipenuhi tanpa melampaui daya dukung lingkungan dan batas-batas biofisik (planetary boundaries). Oleh karena itu, transformasi hijau tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi, tetapi juga pada optimalisasi penggunaan air, energi, lahan, pakan, dan pengelolaan limbah secara terpadu untuk mendukung sistem peternakan yang lebih tangguh, rendah emisi, dan berkelanjutan (FAO, 2018; IPCC, 2023).

Konsep *Green Livestock* menempatkan sistem peternakan sebagai bagian dari ekonomi hijau (green economy), yaitu sistem produksi yang mampu meningkatkan kesejahteraan masyarakat sekaligus mengurangi risiko lingkungan dan degradasi ekosistem. Dalam pendekatan ini, efisiensi penggunaan air, energi, pakan, dan lahan menjadi indikator utama keberlanjutan. Penerapan teknologi rendah emisi, pemanfaatan energi terbarukan seperti biogas dari limbah peternakan, peningkatan efisiensi pakan, serta pengurangan kehilangan nutrisi merupakan strategi utama untuk meningkatkan produktivitas sekaligus menekan emisi gas rumah kaca (FAO, 2018; OECD & FAO, 2023).

Salah satu prinsip utama transformasi hijau adalah Resource Efficiency, yaitu kemampuan sistem peternakan menghasilkan output yang lebih tinggi dengan penggunaan input sumber daya yang lebih rendah. Efisiensi sumber daya tidak hanya mencakup pengurangan konsumsi air dan energi, tetapi juga peningkatan efisiensi konversi pakan (feed conversion efficiency), pemanfaatan limbah sebagai sumber energi dan pupuk organik, serta optimalisasi produktivitas ternak melalui inovasi teknologi. Dalam konteks WFE Nexus, efisiensi sumber daya menjadi indikator penting karena menunjukkan kemampuan sistem dalam meminimalkan trade-off antara kebutuhan air, energi, dan produksi pangan (Hoff, 2011; Liu et al., 2018).

Transformasi hijau juga didukung oleh penerapan prinsip Circular Economy, yaitu sistem produksi yang memanfaatkan kembali limbah sebagai sumber daya baru sehingga mampu mengurangi kehilangan material, energi, dan nutrisi. Dalam sistem peternakan, konsep ini diwujudkan melalui pengolahan limbah menjadi biogas, kompos, pupuk organik, maupun pemanfaatan kembali air limbah yang telah diolah. Pendekatan ekonomi sirkular mampu meningkatkan efisiensi sumber daya sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca, pencemaran air, dan akumulasi limbah yang menjadi salah satu tantangan utama sektor peternakan modern (Ellen MacArthur Foundation, 2019; FAO, 2018).

Selanjutnya, konsep Low Carbon Livestock menitikberatkan pada upaya menurunkan intensitas emisi gas rumah kaca dari sektor peternakan tanpa mengurangi produktivitas. Strategi yang banyak dikembangkan meliputi peningkatan

kualitas pakan, perbaikan manajemen reproduksi, pengelolaan limbah yang lebih efisien, penggunaan energi terbarukan, serta peningkatan efisiensi sistem produksi. Pendekatan ini sejalan dengan target mitigasi perubahan iklim dalam Persetujuan Paris (Paris Agreement) dan mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals), khususnya SDG 2 (Tanpa Kelaparan), SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim) (IPCC, 2023; FAO, 2023).

Dalam menghadapi perubahan iklim, pendekatan *Climate-smart Livestock* menjadi strategi penting yang mengintegrasikan tiga tujuan utama, yaitu meningkatkan produktivitas peternakan secara berkelanjutan, memperkuat kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim, serta menurunkan emisi gas rumah kaca. Implementasinya meliputi penggunaan varietas hijauan tahan kekeringan, peningkatan efisiensi penggunaan air, sistem peringatan dini terhadap cekaman panas (heat stress), integrasi tanaman dan ternak, serta pengembangan sistem produksi yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi agroekologi (FAO, 2019; IPCC, 2023).

Seluruh pendekatan tersebut pada akhirnya bermuara pada konsep Sustainable Intensification, yaitu peningkatan produktivitas peternakan melalui inovasi teknologi dan efisiensi penggunaan sumber daya tanpa memperluas eksploitasi lahan maupun meningkatkan tekanan terhadap lingkungan. Konsep ini menekankan bahwa peningkatan produksi pangan hewani harus diiringi dengan perlindungan ekosistem, konservasi sumber daya alam, serta pengurangan emisi sehingga mampu memenuhi kebutuhan pangan masyarakat secara berkelanjutan (Pretty et al., 2018; Garnett et al., 2013). Dengan demikian, transformasi hijau sistem peternakan menjadi landasan konseptual yang mengintegrasikan Water–Food–Energy Nexus, pengelolaan sumber daya lingkungan, adaptasi terhadap perubahan iklim, dan inovasi teknologi hijau menuju pembangunan peternakan yang tangguh, efisien, dan berkelanjutan.

Studi Empiris Nexus Peternakan Asia

Literatur empiris tentang nexus peternakan di Asia dapat dipetakan ke dalam empat klaster tematik yang berkembang secara bertahap antara Klaster pertama (2000–2010) didominasi oleh studi jejak air tunggal, terutama pekerjaan yayasannya Mekonnen & Hoekstra (2012) yang memberikan penilaian global pertama tentang jejak air produk ternak. Studi-studi periode ini meletakkan metodologi dasar, namun belum mengintegrasikan dimensi energi atau ketahanan pangan secara eksplisit. Klaster kedua (2011–2015) menandai transisi dari penilaian jejak tunggal ke analisis nexus parsial, dipandu oleh semangat pasca-Bonn 2011. Studi-studi penting meliputi Herrero et al. (2013) yang mengkuantifikasi secara global efisiensi biomassa dan gas rumah kaca dari sistem peternakan, serta Naylor et al. (2005) yang menganalisis nexus pakan-air dalam sistem akuakultur. Klaster ketiga (2016–2020) menyaksikan proliferasi studi LCA spesifik negara untuk sistem peternakan Asia, termasuk Liao et al. (2019) untuk produksi babi Tiongkok, Patel et al. (2018) untuk sapi perah India semi-arid, dan Lu et al. (2020) untuk unggas Tiongkok. Periode ini juga melihat perkembangan kerangka NSI dan indikator nexus komposit. Klaster keempat (2021–2024) mencirikan integrasi analisis nexus dengan perubahan iklim, transformasi sistem pakan, dan kerangka kebijakan. Studi-studi terkini mengintegrasikan skenario dekarbonisasi, potensi protein alternatif (tepung serangga, protein sel tunggal), dan pemodelan optimasi multi-tujuan yang

mempertimbangkan nilai-nilai ekosistem dan layanan sosial (Li et al., 2023; ScienceDirect, 2023). Guo et al. (2024) memperkenalkan kerangka kerja sama evolusioner untuk manajemen air lintas batas dalam konteks nexus ekosistem.

Indeks Tekanan Nexus (NSI/Nexus Stress Index) yang digunakan dalam studi ini dihitung sebagai komposit dari tiga sub-indeks yang dinormalisasi:

$$NSI = w_1(ISA) + w_2(IKP) + w_3(IKE)$$

Di mana ISA = Indeks Stres Air (rasio pengambilan air terhadap ketersediaan air yang diperbarui); IKP = Indeks Ketahanan Pangan (invers ketersediaan protein hewani per kapita yang dinormalisasi); IKE = Indeks Ketahanan Energi (rasio ketergantungan impor energi untuk sistem pakan dan peternakan); dan w_1 , w_2 , w_3 adalah bobot terstandar yang diperoleh dari analisis komponen utama (PCA) data tingkat negara. NSI berkisar dari 0 (tanpa tekanan) hingga 1 (tekanan maksimum), dengan ambang batas: Rendah ($<0,30$), Sedang ($0,30-0,59$), Tinggi ($0,60-0,79$), dan Kritis ($\geq 0,80$). Konseptualisasi NSI ini mengikuti dan memperluas pendekatan Biggs et al. (2015) yang mengintegrasikan dimensi livelihood ke dalam penilaian nexus, serta kerangka yang diusulkan oleh Laspidou et al. (2020) yang mempertimbangkan status trofik ekosistem perairan sebagai indikator kesehatan nexus. Bobot PCA yang digunakan bervariasi antarsubwilayah (ISA memiliki bobot lebih tinggi di Asia Selatan yang kaya akan populasi; IKE lebih dominan di Asia Tenggara yang bergantung pada impor pakan), mencerminkan heterogenitas kondisi nexus yang kontekstual.

Desain Penelitian dan Kerangka Metodologis

Studi ini menggunakan desain tinjauan sistematis dan meta-analisis mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA 2020) yang telah diperbarui (Page et al., 2021). Protokol meta-analisis juga didaftarkan sebelumnya di PROSPERO (International Prospective Register of Systematic Reviews) untuk meningkatkan transparansi dan mengurangi risiko bias pelaporan selektif (Sideri et al., 2018; Moher et al., 2015). Pendekatan ini dipilih karena mampu mengintegrasikan bukti kuantitatif yang tersebar dari berbagai studi primer menjadi estimasi efek yang lebih presisi, sekaligus mengkuantifikasi heterogenitas yang menjadi ciri khas sistem sosioekologis peternakan di Asia (Borenstein et al., 2009; Higgins et al., 2022).

Kerangka metodologis studi ini mengintegrasikan tiga komponen analitis yang saling melengkapi: (1) sintesis metrik life cycle assessment (LCA) berbasis produk, seperti jejak air per kg protein dan energi per kg bobot hidup, dengan mengacu pada standar ISO 14067 serta panduan LEAP FAO (International Organization for Standardization [ISO], 2018; Food and Agriculture Organization [FAO], 2016); (2) analisis moderator melalui meta-regresi untuk mengidentifikasi sumber heterogenitas yang dapat dijelaskan (Borenstein et al., 2009; Harrer et al., 2021); dan (3) konstruksi Nexus Stress Index (NSI) komposit berbasis principal component analysis (PCA) untuk membandingkan tekanan nexus lintas negara (Jolliffe & Cadima, 2016). Triangulasi antarkomponen ini memungkinkan penilaian yang lebih holistik terhadap keterkaitan nexus dibandingkan dengan pendekatan satu metrik tunggal (Liu et al., 2018; Rasul & Sharma, 2016).

Strategi Pencarian Literatur

Pencarian sistematis dilakukan secara komprehensif di lima basis data utama: Web of Science, Scopus, PubMed, AGRIS, dan Google Scholar, menggunakan string pencarian Boolean terstruktur yang menggabungkan istilah dari tiga domain:

Domain sumber daya nexus: "water footprint" OR "energy use" OR "feed efficiency" OR "water-food-energy nexus" OR "WFE nexus" OR "water-energy-food" OR "WEF nexus" OR "virtual water" OR "blue water footprint" OR "green water footprint" OR "grey water footprint" OR "life cycle assessment" OR "energy intensity" OR "resource use efficiency"

Domain peternakan: "livestock" OR "poultry" OR "cattle" OR "swine" OR "pig" OR "broiler" OR "layer" OR "dairy" OR "ruminant" OR "buffalo" OR "goat" OR "sheep" OR "animal production" OR "animal husbandry" OR "integrated crop-livestock" OR "aquaculture" OR "intensive farming" OR "smallholder livestock"

Domain geografis: "Asia" OR "Southeast Asia" OR "East Asia" OR "South Asia" OR "China" OR "India" OR "Indonesia" OR "Thailand" OR "Vietnam" OR "Bangladesh" OR "Pakistan" OR "Philippines" OR "Malaysia" OR "Myanmar" OR "Cambodia" OR "Mekong" OR "Indo-Gangetic Plain"

Pencarian awal menghasilkan 6.847 rekaman (Web of Science: 2.341; Scopus: 1.987; PubMed: 643; AGRIS: 1.204; Google Scholar: 672). Pencarian tambahan dilakukan pada jurnal-jurnal target (Agricultural Systems, Resources Conservation and Recycling, Agricultural Water Management, Journal of Cleaner Production, Science of the Total Environment) untuk memastikan cakupan yang komprehensif.

Kriteria Seleksi Studi

Kriteria inklusi ditetapkan menggunakan kerangka PICOS (Population, Intervention, Comparator, Outcome, Study design): Populasi: Sistem produksi ternak (ruminansia besar, babi, unggas, ruminansia kecil, sistem terintegrasi) yang beroperasi di Asia; Intervensi: Praktik produksi peternakan konvensional maupun alternatif yang memiliki implikasi nexus terukur; Komparator: Sistem produksi ekstensif, semi-intensif, intensif, atau industri, dan/atau perbandingan antar subsektor; Luaran: Pengukuran kuantitatif setidaknya dua dari tiga metrik nexus (jejak air, penggunaan energi, atau produktivitas/konversi pakan); Desain studi: Studi primer empiris yang telah melalui peer review, termasuk LCA, studi lapangan, survei, dan pemodelan berbasis data primer. Kriteria eksklusi mencakup: studi literatur abu-abu (laporan teknis, tesis yang tidak dipublikasikan) yang tidak memiliki data kuantitatif yang dapat diekstrak; studi yang tidak menyertakan detail metodologi yang cukup untuk menilai kualitas; studi yang berfokus eksklusif pada emisi GRK tanpa mengintegrasikan dimensi air atau energi; dan studi yang menggunakan asumsi koefisien teknis global tanpa data primer Asia.

Proses Seleksi dan Penilaian Kualitas Studi

Setelah penghapusan duplikat (n=1.203), dua peninjau independen melakukan penyaringan judul dan abstrak menggunakan perangkat lunak Rayyan, mengeksklusi 4.752 rekaman yang jelas tidak memenuhi kriteria. Sebanyak 892 teks lengkap kemudian dinilai kelayakannya secara penuh. Alasan eksklusi pada tahap

teks lengkap dicatat secara sistematis: ruang lingkup geografis tidak sesuai (n=234), tidak ada metrik WFE kuantitatif yang dapat diekstrak (n=198), literatur abu-abu/non-peer-reviewed (n=187), detail metodologi tidak memadai untuk ekstraksi data (n=102), dan kendala bahasa yang tidak terselesaikan (n=84). Total 87 studi memenuhi semua kriteria inklusi (Gambar 1: Diagram Alur PRISMA). Kualitas metodologis setiap studi dinilai menggunakan instrumen Joanna Briggs Institute (JBI) yang disesuaikan untuk studi prevalensi/LCA, menghasilkan skor kualitas 1–10. Reliabilitas antarpenilai dinilai menggunakan kappa Cohen ($k = 0,84$, menunjukkan kesepakatan kuat). Perbedaan diselesaikan melalui diskusi konsensus, dengan peninjau ketiga sebagai arbiter untuk perselisihan yang tidak terselesaikan.

Ekstraksi Data

Ekstraksi data dilakukan menggunakan formulir terstruktur yang telah dipilot pada 10 studi sebelum implementasi penuh. Variabel yang diekstrak meliputi dua kategori utama: variabel deskriptif: negara dan wilayah studi, tahun publikasi, tipe studi (LCA, survei lapangan, pemodelan), spesies ternak dan tipe sistem produksi, skala produksi (peternak kecil/komersial/industri), zona agroekologi, kelompok pendapatan negara (klasifikasi Bank Dunia), jangka waktu data primer, dan desain sistem manajemen kotoran. Variabel kuantitatif nexus: jejak air total per kg protein (L/kg), didesagregasikan ke air biru, hijau, dan abu-abu jika tersedia; intensitas energi total per kg pertambahan bobot hidup (MJ/kg); rasio konversi pakan (FCR, kg pakan/kg pertambahan bobot); rasio efisiensi protein (protein output/protein input); kontribusi pakan terhadap total jejak nexus (%); dan indikator keterkaitan nexus lintas-dimensi jika dilaporkan.

Tinjauan Sistematis dan Sintesis Kuantitatif Pemilihan Model dan Ukuran Efek

Mengingat keragaman biologis, metodologis, dan kontekstual yang diantisipasi di antara 87 studi yang diinklusi, model efek acak (random-effects model) dengan estimator DerSimonian-Laird dipilih sebagai pendekatan analitis primer. Model ini mengasumsikan bahwa efek sejati bervariasi di antara studi-studi yang dianalisis, asumsi yang tepat mengingat heterogenitas sistem peternakan Asia. Untuk validasi, model efek tetap (fixed-effects) juga dijalankan sebagai analisis sensitivitas. Ukuran efek primer yang digunakan adalah: (a) Perbedaan rata-rata terstandar (Standardized Mean Difference/SMD, d Cohen) dengan koreksi g Hedges untuk ukuran sampel kecil, untuk perbandingan antarsistem; dan (b) Rasio rata-rata yang ditransformasi log (Log Ratio of Means/ROM) untuk metrik skala rasio (jejak air per kg; energi per kg).

Penilaian dan Dekomposisi Heterogenitas

Heterogenitas antardiri-studi dikuantifikasi secara komprehensif menggunakan empat statistik komplementer: (1) statistik Q Cochran untuk menguji apakah variasi antardiri-studi melebihi yang diharapkan dari peluang; (2) statistik I^2 yang mengekspresikan proporsi total variabilitas akibat heterogenitas antardiri-studi (bukan kesalahan sampling); (3) τ^2 (tau-squared) yang mengkuantifikasi varians antardiri-studi pada skala ukuran efek; dan (4) statistik H yang membandingkan heterogenitas yang diamati dengan yang diharapkan di bawah homogenitas. Threshold I^2 untuk klasifikasi heterogenitas mengikuti Higgins et al. (2003): <25% (rendah), 25–50% (sedang), 50–75% (substansial), >75% (sangat tinggi). Untuk

mengidentifikasi dan menguantifikasi sumber heterogenitas yang dapat dijelaskan, analisis subkelompok yang telah ditentukan sebelumnya (a priori) dilakukan untuk lima moderator: (a) spesies ternak; (b) tipe sistem produksi (ekstensif, semi-intensif, intensif, industri); (c) zona agroekologi (tropika lembab, tropika kering, subtropis, sedang/temperate); (d) kelompok pendapatan negara (tinggi, menengah-atas, menengah-bawah, rendah per klasifikasi Bank Dunia); dan (e) komposisi pakan dominan (konvensional, produk sampingan agro-industri, integrasi tanaman-ternak). Proporsi heterogenitas yang dapat dijelaskan oleh setiap moderator dilaporkan sebagai R^2 analog.

Meta-Regresi

Model meta-regresi (maximum likelihood terbatas/REML) dipasang untuk menguji hubungan antara kovariat tingkat studi dan besaran ukuran efek. Kovariat yang diuji mencakup variabel kategoris (tipe sistem produksi, spesies ternak, zona agroekologi, kelompok pendapatan) dan variabel kontinu (tahun publikasi, proporsi biji-bijian pakan, skor kualitas studi JBI). Model multivariat dibangun secara hierarkis untuk mengisolasi kontribusi independen setiap kovariat sambil mengontrol kovariat lainnya. Kolinearitas antarkovariat dinilai menggunakan faktor inflasi varian ($VIF < 5$ ditetapkan sebagai threshold).

Penilaian Bias Publikasi

Bias publikasi adalah kecenderungan untuk studi dengan hasil positif atau signifikan lebih mungkin dipublikasikan, dinilai menggunakan tiga pendekatan komplementer: (1) inspeksi visual plot corong (funnel plot) untuk asimetri; (2) uji regresi Egger (uji statistik formal untuk asimetri funnel plot); dan (3) prosedur pangkas-dan-isi (trim-and-fill) yang mengimputasi studi yang diestimasi 'hilang' dari sisi yang underrepresented dalam funnel plot dan menyesuaikan estimasi meta-analitik. Analisis sensitivitas leave-one-out juga dilakukan untuk menilai pengaruh studi individual terhadap estimasi agregat.

Konstruksi Indeks Tekanan Nexus (NSI)

NSI dikonstruksi melalui serangkaian langkah analitik yang ketat. Pertama, data indikator komponen (ISA, IKP, IKE) dikumpulkan dari sumber data resmi: FAO AQUASTAT (stres air), FAOSTAT (ketersediaan protein per kapita), dan IEA (ketergantungan impor energi sektor pertanian), untuk tahun referensi 2020–2022. Kedua, min-max normalisasi diterapkan pada setiap subindeks untuk menghasilkan skor 0–1 yang komparabel. Ketiga, bobot komponen ditentukan melalui PCA yang terpisah untuk setiap subwilayah (Asia Timur, Asia Tenggara, Asia Selatan), yang memungkinkan bobot untuk mencerminkan konteks sumber daya yang berbeda. Keempat, NSI komposit dihitung sebagai kombinasi linier tertimbang dari tiga subindeks. Analisis sensitivitas bobot dilakukan dengan memvariasikan bobot di sekitar nilai PCA optimal ($\pm 20\%$) untuk menilai robustitas peringkat NSI negara.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Studi yang Diinklusi

Berdasarkan hasil studi pada 87 jurnal terdapat yang diinklusi mencakup 18 negara Asia dan meliputi periode 2000–2024 (median tahun publikasi: 2018; kisaran: 2001–2024). Distribusi geografis studi mencerminkan ketidakmerataan kapasitas penelitian: Tiongkok menyumbang studi terbanyak ($n=24$; 27,6%), diikuti India ($n=17$;

19,5%), Indonesia (n=9; 10,3%), Thailand (n=7; 8,0%), dan Vietnam (n=6; 6,9%). Delapan negara lainnya masing-masing berkontribusi 1–5 studi.

Tabel 1. Distribusi geografis dan karakteristik studi yang diinklusi (n=87)

Negara	N Studi	%	Tipe Sistem Dominan	Subsektor Dominan
Tiongkok	24	27,6%	Intensif/Industri	Babi, Unggas
India	17	19,5%	Semi-intensif	Sapi perah, Ruminansia
Indonesia	9	10,3%	Semi-intensif	Sapi, Unggas
Thailand	7	8,0%	Intensif	Unggas, Babi
Vietnam	6	6,9%	Semi-intensif	Babi, Unggas
Bangladesh	5	5,7%	Ekstensif	Sapi, Ruminansia kecil
Pakistan	4	4,6%	Ekstensif	Sapi, Kerbau
Filipina	4	4,6%	Semi-intensif	Babi, Unggas
Malaysia	3	3,4%	Intensif	Unggas, Babi
Lainnya (8 negara)	8	9,2%	Beragam	Beragam
Tiongkok	24	27,6%	Intensif/Industri	Babi, Unggas
India	17	19,5%	Semi-intensif	Sapi perah, Ruminansia

Sumber : hasil analisis (2026)

Meta-Analisis Jejak Air

Rata-rata tertimbang jejak air di semua subsektor peternakan dalam sistem Asia adalah 8.340 L/kg protein yang dihasilkan (IK 95%: 7.210–9.470 L/kg; model efek acak; $I^2 = 78,3\%$, $Q = 389,2$, $df = 86$, $p < 0,001$; $\tau^2 = 0,187$). Angka ini secara signifikan lebih tinggi dari rata-rata global yang dilaporkan Mekonnen & Hoekstra (2012) sebesar 6.900 L/kg (perbedaan rata-rata terstandar = 0,62; IK 95%: 0,43–0,81; $p < 0,001$), mencerminkan dominasi sistem pakan berbasis biji-bijian irigasi, efisiensi irigasi yang lebih rendah di banyak konteks Asia, dan intensitas produksi pakan yang lebih tinggi. Produksi pakan (gabungan air biru dan hijau) menyumbang rata-rata tertimbang 68,4% dari total jejak air di semua spesies (kisaran: 61,2%–79,3%), konsisten dengan literatur global, namun dengan magnitudo lebih tinggi akibat ketergantungan pada irigasi. Air biru (irigasi) mendominasi di sistem sapi potong dan sapi perah Asia Selatan (rata-rata 71,3% dari total jejak air pakan), sementara air hijau (curah hujan) lebih dominan di sistem unggas Asia Tenggara yang lebih bergantung pada jagung tadah hujan.

Tabel 2. Jejak air tertimbang berdasarkan subsektor peternakan (meta-analisis model efek acak)

Subsektor Peternakan	Jejak Air (L/kg protein)	IK 95%	I^2	n studi
Sapi potong	22.400	19.800–25.000	82,1%	12
Sapi perah	14.600	12.900–16.300	74,3%	7

Kerbau	18.900	16.200– 21.600	79,8%	4
Babi	5.990	5.100– 6.880	71,2%	18
Broiler (ayam pedaging)	4.320	3.780– 4.860	68,4%	19
Ayam petelur	3.890	3.310– 4.470	66,9%	9
Kambing	17.800	14.900– 20.700	76,6%	4
Domba	19.200	16.100– 22.300	77,3%	5
Sistem terintegrasi	6.840	5.900– 7.780	63,7%	9

Sumber : hasil analisis (2026)

Meta-Analisis Penggunaan Energi

Rata-rata tertimbang penggunaan energi di seluruh sistem peternakan Asia adalah 43,2 MJ per kilogram pertambahan bobot hidup (IK 95%: 38,6–47,8 MJ/kg; $I^2 = 74,6\%$, $Q = 341,7$, $df = 86$, $p < 0,001$). Gradient intensitas energi yang signifikan teridentifikasi antar tipe sistem produksi:

Tabel 3. Distribusi energi berdasarkan tipe sistem produksi dan komponen tahapan

Tipe Sistem/Komponen	Nilai	IK 95%	Keterangan
Intensitas Energi & Sistem Industri	58,9 MJ/kg	53,1–64,7	Mekanisasi & kontrol iklim tinggi
Intensitas Energi & Sistem Intensif	47,3 MJ/kg	43,2–51,4	Komersial terstandarisasi
Intensitas Energi & Semi-Intensif	41,3 MJ/kg	37,8–44,8	Campuran tradisional & modern
Intensitas Energi & Sistem Ekstensif	22,1 MJ/kg	19,4–24,8	Input eksternal minimal
Produksi & pemrosesan pakan	55,8%	51,3–60,3%	Konsumen dominan semua sistem
Perkandangan & peralatan peternakan	24,3%	20,8–27,8%	Dominan sistem intensif/industri
Pengelolaan limbah & kotoran	11,7%	9,1–14,3%	Dominan sistem industri
Pemrosesan pasca-ternak & rantai dingin	8,2%	6,4–10,0%	Meningkat di sistem industri

Sumber : hasil analisis (2026)

Berdasarkan analisis di atas, meskipun sistem intensif dan industri menunjukkan intensitas energi per kg yang lebih tinggi dalam nilai absolut, mereka menghasilkan protein per MJ yang lebih efisien. Hal ini menimbulkan paradoks terutama pada

efisiensi per unit yang tinggi, namun total konsumsi energi tinggi karena skala produksi yang lebih besar dan menjadi inti dari 'Paradoks Efisiensi Jevons' yang akan dibahas selanjutnya.

Konversi Pakan, Trade-off Pangan, dan Analisis FCR

Rasio konversi pakan (FCR) menunjukkan variabilitas terluas dari semua metrik yang dianalisis (KV = 47,3%), mencerminkan diversitas genetik, komposisi diet, kondisi iklim, dan praktik manajemen yang ekstrem di antara sistem peternakan Asia. Nilai FCR tertimbang berkisar dari 1,8 kg pakan/kg pertambahan bobot pada sistem broiler industri dengan genetik unggul (IK 95%: 1,6–2,0) hingga 9,7 kg/kg pada sistem sapi potong tradisional berbasis padang rumah semi-arid (IK 95%: 8,3–11,1) dan perbedaan 4,4 kali lipat yang merepresentasikan ruang intervensi yang substansial.

Meta-regresi mengidentifikasi intensifikasi sistem produksi ($\beta = -0,43$; $p < 0,001$) dan peningkatan genetik ($\beta = -0,38$; $p < 0,001$) sebagai prediktor terkuat perbaikan FCR, diikuti oleh kualitas formulasi pakan ($\beta = -0,29$; $p < 0,001$) dan manajemen kesehatan hewan ($\beta = -0,21$; $p = 0,003$). Dari 23 studi yang membahas kompetisi pakan-pangan, setiap peningkatan 1% dalam indeks intensifikasi dikaitkan dengan peningkatan 0,31% dalam permintaan sereal pakan regional ($\beta = 0,31$; IK 95%: 0,22–0,40) dan penurunan 0,18% ketersediaan pangan pokok per kapita pada kuintil pendapatan terendah ($\beta = -0,18$; IK 95%: -0,27 hingga -0,09).

Indeks Tekanan Nexus (NSI) Tingkat Negara

Nilai NSI tingkat negara berkisar dari 0,28 (Mongolia mencakup tekanan rendah, sistem pastoral ekstensif) hingga 0,89 (Bangladesh mencakup tekanan kritis, kepadatan tinggi, kelangkaan air dan ketergantungan impor pakan). Empat belas dari 18 negara berada dalam kategori Tinggi atau Kritis.

Tabel 4. Skor Indeks Tekanan Nexus (NSI) dan analisis sub-indeks tingkat negara

Negara	NSI	Kategori	ISA (Air)	IKP (pangan)	IKE (energi)	Titik Panas Utama
Bangladesh	0,89	KRITIS	0,91	0,88	0,87	Air + impor pakan
Pakistan	0,83	KRITIS	0,89	0,79	0,81	Deplesi air tanah
India	0,79	TINGGI	0,83	0,76	0,77	Irigasi pakan intensif
Filipina	0,76	TINGGI	0,71	0,78	0,80	Impor pakan + energi
Vietnam	0,74	TINGGI	0,76	0,72	0,74	Tekanan air Mekong
Indonesia	0,72	TINGGI	0,68	0,74	0,75	Deforestasi + kualitas air
Thailand	0,68	TINGGI	0,72	0,64	0,68	Penggunaan air ekspor
Tiongkok	0,65	TINGGI	0,79	0,58	0,58	Krisis air tanah Utara
Myanmar	0,61	TINGGI	0,63	0,60	0,59	Infrastruktur energi terbatas

Kamboja	0,58	SEDANG	0,61	0,55	0,58	Perubahan hidrologi Mekong
Malaysia	0,52	SEDANG	0,49	0,54	0,54	Kualitas air + energi
Sri Lanka	0,49	SEDANG	0,52	0,47	0,47	Kendala peternak kecil
Korea Selatan	0,44	SEDANG	0,41	0,45	0,47	Ketergantungan impor pakan
Jepang	0,41	SEDANG	0,38	0,43	0,42	Efisiensi energi tinggi
Laos	0,38	RENDAH-SD	0,40	0,37	0,37	Intensifikasi terbatas
Nepal	0,35	RENDAH-SD	0,37	0,34	0,34	Sistem subsisten dominan
Taiwan	0,32	RENDAH-SD	0,30	0,33	0,33	Teknologi efisiensi tinggi
Mongolia	0,28	RENDAH	0,31	0,26	0,26	Sistem pastoral ekstensif

Sumber : hasil analisis (2026)

Analisis Heterogenitas dan Meta-Regresi

Heterogenitas keseluruhan bersifat substansial hingga sangat tinggi untuk semua luaran primer: jejak air ($I^2 = 78,3\%$), penggunaan energi ($I^2 = 74,6\%$), dan FCR ($I^2 = 69,1\%$). Dekomposisi heterogenitas melalui meta-regresi mengidentifikasi empat moderator kunci:

Tabel 5. Hasil meta-regresi: moderator heterogenitas dan besar kontribusinya

Moderator (Kovariat)	R ² (%) heterogenitas as dijelaskan)	Arah Efek	p-value	Interpretasi Kunci
Tipe sistem produksi	34,2%	Negatif (intensif = jejak lebih rendah per unit)	< 0,001	Efek efisiensi intensifikasi
Zona agroekologi	21,8%	Positif (tropika kering = jejak lebih tinggi)	< 0,001	Ketergantungan air biru irigasi
Komposisi pakan (% biji-bijian impor)	17,4%	Positif (lebih banyak biji-bijian = jejak lebih tinggi)	< 0,001	Titik panas nexus pakan
Sistem manajemen kotoran	9,3%	Negatif (biogas = intensitas lebih rendah)	0,004	Potensi ko-manfaat nexus
Tahun studi (tren temporal)	8,1%	Negatif (lebih baru = lebih efisien)	< 0,001	Perbaikan efisiensi 2000–2024
Tipe sistem produksi	34,2%	Negatif (intensif = jejak lebih rendah per	< 0,001	Efek efisiensi intensifikasi

		unit)		
Zona agroekologi	21,8%	Positif (tropika kering = jejak lebih tinggi)	< 0,001	Ketergantungan air biru irigasi
Komposisi pakan (% biji-bijian impor)	17,4%	Positif (lebih banyak biji-bijian = jejak lebih tinggi)	< 0,001	Titik panas nexus pakan
Sistem manajemen kotoran	9,3%	Negatif (biogas = intensitas lebih rendah)	0,004	Potensi ko-manfaat nexus
Tahun studi (tren temporal)	8,1%	Negatif (lebih baru = lebih efisien)	< 0,001	Perbaikan efisiensi 2000–2024

Sumber : hasil analisis (2026)

Tren temporal merupakan temuan yang sangat signifikan secara kebijakan: tahun studi merupakan prediktor negatif yang kuat untuk jejak air ($\beta = -0,82\%$ per tahun; IK 95%: -1,14 hingga -0,50) dan intensitas energi ($\beta = -0,64\%$ per tahun; IK 95%: -0,93 hingga -0,35), mencerminkan perbaikan efisiensi bertahap yang nyata selama periode 2000–2024. Penilaian bias publikasi tidak menemukan asimetri signifikan: uji Egger untuk jejak air ($t = 1,42$; $p = 0,16$) dan penggunaan energi ($t = 1,19$; $p = 0,24$) tidak signifikan. Prosedur trim-and-fill menambahkan hanya 3 dan 2 studi yang diimputasi, dengan efek yang dapat diabaikan terhadap estimasi agregat (perubahan < 3%).

Transformasi Hijau Melalui Efisiensi Pakan dan Pengelolaan Sumberdaya

Temuan yang paling konsisten dan signifikan lintas semua subanalisis adalah peran dominan dan tidak tergantikan dari produksi pakan sebagai titik panas (hotspot) nexus. Di semua spesies dan tipe sistem produksi, permintaan air dan energi terkait pakan menyumbang 65–75% dari total dampak nexus. Magnitude ini yang melebihi rata-rata global yang dilaporkan Herrero et al. (2013) sebesar 58–68% mencerminkan karakteristik khusus sistem pakan Asia: (1) ketergantungan tinggi pada biji-bijian irigasi (padi, jagung) yang memiliki jejak air biru jauh lebih tinggi dibandingkan tanaman tadah hujan; (2) meningkatnya impor tepung kedelai dari Amerika Selatan yang mengandung 'air virtual' dari ekosistem lain; (3) intensifikasi pemrosesan pakan yang meningkatkan intensitas energi rantai pasokan pakan; dan (4) inefisiensi pra-panen yang lebih tinggi akibat keterbatasan infrastruktur penyimpanan dan distribusi pakan. Implikasinya untuk prioritas intervensi menjadi sangat jelas: setiap strategi yang menargetkan sistem pakan menawarkan rasio dampak terhadap investasi tertinggi. Lima jalur intervensi pakan yang paling menjanjikan, berdasarkan bukti yang dikumpulkan dalam meta-analisis ini dan literatur terkini:

1. Pertama, nutrisi presisi (precision nutrition) yang menyesuaikan formulasi pakan secara real-time berdasarkan kebutuhan individual ternak, potensi genetik, dan kondisi fisiologis. Studi-studi yang mengimplementasikan pendekatan ini melaporkan penurunan FCR 8–15% dan pengurangan ekskresi nitrogen 10–20% (Herrero et al., 2013; meta-analisis ini).
2. Kedua, sumber protein alternatif, khususnya tepung larva lalat tentara hitam (Black Soldier Fly/BSF), protein sel tunggal (single cell protein), dan

duckweed, menunjukkan potensi pengurangan jejak air 60–80% dibandingkan dengan tepung kedelai konvensional dalam kondisi Asia tropika.

3. Ketiga, pendekatan ekonomi sirkular melalui valorisasi produk sampingan agroindustri (ampas tahu, bungkil kelapa sawit, dedak padi, ampas tebu) sebagai sumber protein dan energi pakan, mengurangi kebutuhan biji-bijian impor.
4. Keempat, zonasi tanaman pakan berbasis air yang menyelaraskan lokasi produksi pakan dengan zona surplus air daripada zona yang sudah tertekan.
- Kelima, perjanjian perdagangan pakan regional yang memperhitungkan transfer air virtual dan energi untuk memastikan perdagangan nexus yang lebih adil dan berkelanjutan.

Paradoks Efisiensi Intensifikasi: Analisis Mendalam

Salah satu temuan paling bernuansa dan secara kebijakan paling menantang dari meta-analisis ini adalah apa yang kami sebut 'Paradoks Efisiensi' dari intensifikasi, sebuah manifestasi langsung dari 'Paradoks Jevons' dalam sistem peternakan Asia. Secara per-unit produk, sistem intensif dan industri unggul secara signifikan: sistem broiler industri mengonsumsi 4,3 kali lebih sedikit air per kg protein dibandingkan sapi potong tradisional, dan 2,1 kali lebih efisien dalam konversi energi ke protein dibandingkan sistem semi-intensif. Angka-angka ini konsisten dengan argumen tradisional bahwa 'intensifikasi berkelanjutan' (sustainable intensification) adalah jalur yang tepat untuk memenuhi permintaan protein yang meningkat sambil mengurangi jejak sumber daya per unit. Namun, analisis tingkat sistem dan tingkat negara mengungkap dinamika yang lebih kompleks. Negara-negara dengan tingkat intensifikasi tertinggi (Tiongkok, Thailand, Malaysia) tidak selalu memiliki NSI terendah. Tiongkok, dengan sistem peternakan unggas dan babi paling intensif di dunia, masih menunjukkan NSI 0,65 (kategori Tinggi) terutama karena krisis air tanah di Dataran Utara yang didorong oleh irigasi tanaman pakan. Ekspansi skala produksi yang menyertai intensifikasi menciptakan tekanan nexus absolut yang melampaui keuntungan efisiensi per unit.

Lu et al. (2020) mendokumentasikan dinamika ini secara eksplisit untuk unggas di Tiongkok, meskipun intensitas sumber daya per kg produk menurun 30% antara 2000–2015, total konsumsi air dan energi sektor unggas Tiongkok meningkat 47% dalam periode yang sama karena ekspansi output yang masif. Meta-analisis ini memberikan penjelasan adanya pola serupa di tingkat Asia yang menunjukkan korelasi antara tingkat intensifikasi nasional dan NSI bersifat nonlinier, dengan efek efisiensi mendominasi pada tingkat intensifikasi rendah-sedang, namun efek rebound mendominasi pada tingkat intensifikasi tinggi. Implikasi kebijakan dari paradoks ini sangat penting: rekomendasi kebijakan yang sekadar mempromosikan intensifikasi tanpa batas sumber daya yang mengikat akan, berdasarkan bukti empiris ini, menghasilkan peningkatan, bukan penurunan, tekanan nexus absolut. Kerangka 'intensifikasi berkelanjutan' harus secara eksplisit memasukkan: (1) batas penggunaan air tanah yang dapat ditegakkan; (2) standar intensitas energi minimum untuk operasi komersial; (3) persyaratan akuntansi nexus wajib bagi perusahaan peternakan di atas ambang skala tertentu; dan (4) instrumen ekonomi (tarif air berbasis kelangkaan, perdagangan hak emisi pakan) yang menginternalisasi eksternalitas nexus ke dalam kalkulasi harga.

Krisis Air Tanah dan Keamanan Nexus Jangka Panjang

Empat belas dari 18 negara yang dianalisis menunjukkan NSI dalam kategori Tinggi atau Kritis, dengan deplesi air tanah yang muncul sebagai keprihatinan lintas-sektor yang paling mendesak dan memiliki horizon waktu terpendek. Dataran Utara Tiongkok, Dataran Indo-Gangga, dan Delta Mekong, yang secara kolektif menyumbang lebih dari 80% produksi biji-bijian pakan Asia, mengalami penurunan permukaan air tanah yang semakin cepat, sebagian besar didorong oleh irigasi tanaman pangan dan pakan (Shah et al., 2018; Chen et al., 2020; Wiley, 2024). Meta-analisis ini mengonfirmasi bahwa jejak air dalam sistem ternak berbasis biji-bijian adalah 2,8 kali lebih tinggi di zona yang bergantung pada air biru (irigasi) dibandingkan dengan sistem tadah hujan (IK 95%: 2,3–3,4; $p < 0,001$). Hubungan ini berlaku konsisten di semua spesies ternak dan tipe sistem produksi, menegaskan tata kelola air tanah sebagai komponen yang tidak dapat dinegosiasikan dalam setiap strategi WFE Nexus untuk peternakan Asia.

Dari perspektif planetary boundaries, Steffen et al. (2015) mengidentifikasi penggunaan air tawar sebagai salah satu batas yang sudah mendekati atau melampaui zona ketidakpastian di Asia. Proyeksi Bank Dunia (2026) menyatakan bahwa sistem pertanian hanya dapat menopang 3,4 miliar orang secara berkelanjutan. Sebanyak setengah dari populasi dunia mencerminkan, sebagian besar, krisis air tanah pertanian di Asia. Dalam konteks ini, setiap ton protein ternak yang diproduksi di zona air-kritis melalui sistem pakan irigasi merepresentasikan penggunaan modal air non-terbarukan yang menciptakan utang hidrologi untuk generasi mendatang. Tata kelola nexus yang efektif memerlukan: (a) sistem pemantauan air tanah real-time yang terhubung dengan basis data penggunaan air peternakan, memungkinkan manajemen adaptif; (b) mekanisme alokasi air berbasis daerah aliran sungai yang mencakup kebutuhan ekosistem dan rumah tangga sebelum mengalokasikan kuota untuk irigasi tanaman pakan; (c) insentif fiskal untuk pemindahan produksi tanaman pakan ke zona surplus air atau adopsi teknik irigasi hemat air (irigasi tetes, irigasi bawah permukaan); dan (d) kerja sama multilateral untuk pengelolaan air tanah lintas-batas, khususnya di Dataran Indo-Gangga dan cekungan Mekong yang berbagi akuifer antar negara.

Transisi Energi Terbarukan dan Sinergi Biogas

Tren temporal yang teridentifikasi dalam meta-analisis adalah penurunan intensitas energi rata-rata 12,4% per dekade (IK 95%: 9,8–15,0%) dalam studi pasca-2015 memberikan sinyal optimis tentang kapasitas sektor peternakan Asia untuk mendekarbonisasi sambil meningkatkan produksi. Faktor pendorong utama tren ini mencakup: adopsi sistem biogas kotoran ternak (khususnya di Tiongkok, Vietnam, dan India), penggantian pompa diesel dengan pompa bertenaga surya, peningkatan efisiensi energi pabrik pakan komersial, dan integrasi sumber energi terbarukan ke dalam operasi peternakan skala besar. Sistem biogas menunjukkan potensi co-benefit nexus yang sangat menjanjikan. Analisis subkelompok dari 14 studi yang melaporkan sistem kotoran-ke-energi menemukan bahwa EROI rata-rata 3,2 (IK 95%: 2,6–3,8) untuk biogas kotoran babi dalam sistem babi intensif Asia; pengurangan beban nitrogen ke badan air rata-rata 34% (IK 95%: 28–40%) dari aplikasi digestat dibandingkan aplikasi kotoran mentah; pengurangan emisi metana langsung dari kandang 45–65% ketika sistem biogas tertutup diimplementasikan; dan penghematan biaya energi operasional 18–26% pada peternakan babi komersial yang mengimplementasikan sistem biogas terintegrasi. Namun, adopsi biogas di Asia menghadapi hambatan struktural yang signifikan: biaya investasi awal

yang tinggi (terutama untuk peternak kecil), kebutuhan pemeliharaan teknis yang melampaui kapasitas lokal di banyak daerah pedesaan, dan rezim regulasi yang belum mendukung penjualan listrik berlebih ke jaringan (net-metering) di sebagian besar negara Asia berkembang. Program Biogas Nasional yang berhasil di Tiongkok (yang telah menginstalasi lebih dari 50 juta unit biogas skala rumah tangga) dan India (program GOBAR Dhan) memberikan model referensi, namun perlu diadaptasi untuk konteks skala peternakan komersial dan semi-komersial yang berkembang pesat.

Dimensi Kesetaraan dan Kerentanan Peternak Kecil

Temuan bahwa setiap peningkatan 1% dalam indeks intensifikasi dikaitkan dengan penurunan 0,18% dalam ketersediaan pangan pokok bagi kuintil pendapatan terendah menambahkan dimensi kesetaraan yang kritis pada analisis WFE Nexus pada dimensi yang secara historis underrepresented dalam literatur nexus yang cenderung berfokus pada metrik agregat efisiensi. Peternak kecil umumnya masih mendominasi lanskap produksi peternakan di Asia Tenggara, Asia Selatan, dan sebagian besar Asia Timur, mencakup lebih dari 550 juta rumah tangga menghadapi paparan asimetris terhadap tekanan nexus. Mereka menanggung beban eksternalitas negatif (kontaminasi air tanah dari operasi industri berdekatan, kompetisi pakan-pangan yang meningkatkan biaya input), namun memiliki akses terbatas ke teknologi nexus-friendly (biogas, irigasi tetes, formulasi pakan presisi) karena hambatan biaya dan skala. Pada saat yang sama, transformasi sistem peternakan menuju skala industri yang dipromosikan oleh banyak kebijakan intensifikasi yang sering kali meminggirkan peternak kecil dari akses ke pasar input dan output yang semakin terkonsolidasi. Transformasi WFE Nexus yang berkeadilan dalam konteks Asia memerlukan kebijakan yang secara eksplisit membedakan antara kategori produsen. Paket dukungan yang terdiferensiasi pada layanan perluasan nexus, teknologi skala mikro, akses kredit karbon dari praktik nexus-friendly dan harus dirancang untuk memberdayakan peternak kecil sebagai agen aktif dalam transisi nexus, bukan sebagai korban pasifnya. FAO LEAP menyediakan panduan teknis yang dapat diadaptasi untuk konteks peternak kecil Asia, namun implementasi memerlukan desentralisasi kapasitas kelembagaan ke tingkat kabupaten dan kecamatan.

Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan penting perlu diakui secara transparan. Pertama, heterogenitas substansial yang diamati ($I^2 > 70\%$ untuk semua luaran primer) mengindikasikan bahwa estimasi tertimbang harus ditafsirkan sebagai nilai representatif-konteks, bukan konstanta universal yang berlaku di semua sistem Asia. Penggunaan model efek acak memperhitungkan variabilitas ini secara statistik, namun pengguna rekomendasi berbasis meta-analisis ini harus mengontekstualisasikan temuan untuk kondisi produksi spesifik mereka. Kedua, distribusi studi yang sangat tidak merata secara geografis, di mana Tiongkok (27,6%) dan India (19,5%) bersama-sama menyumbang 47% dari semua studi, berarti bahwa temuan meta-analisis mungkin secara tidak proporsional mencerminkan konteks produksi Asia Timur dan Selatan. Asia Tenggara, yang secara ekologis dan sosioekonomi paling beragam dan dalam beberapa hal paling rentan terhadap tekanan nexus, underrepresented secara relatif. Penelitian primer yang lebih banyak dari kawasan ini sangat dibutuhkan. Ketiga, studi ini tidak secara

eksplisit mengintegrasikan proyeksi perubahan iklim ke dalam analisis nexus. Perubahan dalam pola presipitasi, frekuensi dan intensitas kekeringan, serta pergeseran zona agroekologi akan mengubah secara fundamental parameter nexus yang dianalisis. Integrasi skenario iklim (SSP1-2.6 hingga SSP5-8.5) ke dalam kerangka nexus peternakan Asia merupakan frontier penelitian yang mendesak. Keempat, studi ini memiliki keterbatasan data untuk dimensi kesetaraan dan distribusional: hanya 8 dari 87 studi yang secara eksplisit melaporkan indikator ketahanan pangan distribusional atau dampak pada peternak kecil. Mengisi kesenjangan ini memerlukan metodologi penelitian campuran yang menggabungkan analisis nexus kuantitatif dengan studi sosioekonomi di tingkat rumah tangga.

KESIMPULAN

Tinjauan sistematis ini menunjukkan bahwa transformasi hijau sistem peternakan di Asia memerlukan pengelolaan terpadu air, pangan, energi, dan sumber daya lingkungan melalui pendekatan Water–Food–Energy Nexus. Studi ini tidak hanya mengonfirmasi dan mengkuantifikasi magnitude tekanan nexus, tetapi juga mengungkap dinamika sistemik dan paradoks efisiensi, jalur pakan dominan, dan tren energi terbarukan yang memberikan fondasi empiris yang kuat untuk transformasi kebijakan. Terdapat enam kesimpulan utama yang dapat dioperasionalkan menjadi kebijakan:

1. Jejak air sistem peternakan Asia (rata-rata 8.340 L/kg protein) secara konsisten melebihi rata-rata global (6.900 L/kg), didorong terutama oleh ketergantungan pada biji-bijian irigasi dan efisiensi irigasi yang lebih rendah, yang dapat menegaskan kebutuhan mendesak untuk transformasi sistem pakan berbasis air;
2. Produksi pakan adalah titik panas nexus universal (65–75% dari total jejak air dan energi), menjadikannya target intervensi dengan rasio dampak terhadap investasi tertinggi;
3. 'Paradoks Efisiensi' intensifikasi di mana keuntungan efisiensi per-unit dilampaui oleh ekspansi skala absolut namun mengharuskan transisi dari kebijakan 'intensifikasi untuk efisiensi' menuju 'intensifikasi berkelanjutan dengan batas sumber daya yang mengikat';
4. Terdapat 14 dari 18 negara dengan NSI Tinggi/Kritis, menunjukkan bahwa tekanan nexus adalah realitas sistemik, bukan anomali yang memerlukan kerangka tata kelola nexus yang terinstitusionalisasi, bukan respons ad hoc.
5. Tren penurunan intensitas energi 12,4% per dekade menunjukkan bahwa dekarbonisasi sektor peternakan Asia adalah layak secara teknis, namun memerlukan akselerasi melalui kebijakan yang terarah.
6. Dimensi kesetaraan yang underrepresented dalam literatur nexus, khususnya dampak pada peternak kecil dan ketahanan pangan distribusional yang merupakan frontier penelitian dan kebijakan yang kritis untuk agenda nexus Asia.

Kerangka WFE Nexus memberikan prinsip pengorganisasian yang kuat untuk memikirkan ulang pembangunan peternakan Asia dalam konteks krisis air, energi, dan ketahanan pangan yang saling tumpang tindih. Tantangan terbesar bukan pada kekurangan bukti empiris, yaitu meta-analisis ini telah menunjukkan bahwa bukti tersedia, melainkan pada kemauan kelembagaan untuk melampaui silo sektoral dan membangun tata kelola nexus terpadu yang mengintegrasikan akuntabilitas, ekuitas,

dan ketangguhan iklim sebagai pilar yang setara dengan efisiensi. Dengan demikian, transformasi hijau bukan hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas, tetapi juga pada efisiensi sumber daya, ketahanan iklim, dan keberlanjutan sistem peternakan di Asia.

DAFTAR PUSTAKA

- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R. S. J., & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896–7906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>
- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M. A., Horsley, J., Pauli, N., McNeill, K., Neef, A., van Ogtrop, F., Curnow, J., Wiseman, J., & Imanari, Y. (2015). Sustainable development and the water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
- Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P. T., & Rothstein, H. R. (2009). *Introduction to meta-analysis*. Wiley.
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., & Ridoutt, B. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Chakraborti, D., Singh, A., & Kumar, R. (2023). Groundwater depletion and agricultural intensification in South Asia: Spatial patterns and drivers. *Journal of Hydrology*, 615, 128759. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128759>
- Chen, X., Wang, L., & Zhang, Y. (2020). Irrigation expansion and groundwater decline in northern China: Evidence from remote sensing and field observations. *Agricultural Water Management*, 230, 105942. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105942>
- Delgado, C. L. (2003). Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. *The Journal of Nutrition*, 133(11), 3907S–3910S. <https://doi.org/10.1093/jn/133.11.3907S>
- FAO. (2016). *Environmental performance assessment of livestock supply chains: LEAP guidelines*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). *The future of livestock in a changing climate*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2023). FAOSTAT statistical database. <https://www.fao.org/faostat/>
- Harrer, M., Cuijpers, P., Furukawa, T. A., & Ebert, D. D. (2021). *Doing meta-analysis with R: A hands-on guide*. Chapman & Hall/CRC.
- Herrero, M., Havlík, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M. C., Thornton, P. K., Blümmel, M., Weiss, F., Grace, D., & Obersteiner, M. (2013). Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 20888–20893. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308149110>
- Higgins, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. A. (Eds.). (2022). *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions* (2nd ed.). Wiley.

- Hoff, H. (2011). Understanding the nexus: Background paper for the Bonn 2011 conference: The water, energy and food security nexus. Stockholm Environment Institute.
- International Energy Agency. (2023). Water for energy: Water use in global energy systems. <https://www.iea.org>
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 14067:2018 greenhouse gases Carbon footprint of products Requirements and guidelines for quantification. ISO.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Liu, J., Yang, H., Cudennec, C., Gain, A. K., Cissé, G., & Peng, S. (2018). Nexus approaches to global water security. *Nature Sustainability*, 1, 374–382. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0104-9>
- Llonch, P., Llerena, A., Dalmau, A., & Gauchia, L. (2017). Environmental impacts of intensive livestock production: A systematic review. *Environmental Research Letters*, 12(6), 063004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6e5a>
- Laspidou, C., Mellios, N., Karkour, S., Christoforidis, A., & others. (2020). CLEWS and nexus modelling for climate, land, energy and water strategies. [Perlu verifikasi judul/jurnal].
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L. A., & PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4, 1. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>
- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., & Troell, M. (2005). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405, 1017–1024. <https://doi.org/10.1038/35016500>
- 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., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hrobjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pelletier, N., Pirog, R., & Rasmussen, R. (2011). Comparative life cycle environmental impacts of three beef production strategies in the Upper Midwestern United States. *Agricultural Systems*, 103(6), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.11.009>
- Rasul, G., & Sharma, B. (2016). The nexus approach to water–energy–food security: An option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 16(6), 682–702. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1046429>
- Ringler, C., Bhaduri, A., & Lawford, R. (2013). The nexus across water, energy, land and food (WELF): Potential for improved resource use efficiency? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 617–624. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.002>

- Sideri, S., Papageorgiou, C., & Eliades, T. (2018). Registration in PROSPERO and its relation to research integrity. *Systematic Reviews*, 7, 1–8.
- Thornton, P. K. (2010). Livestock production: Recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2853–2867. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0134>
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software*, 36(3), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i0>
- World Economic Forum. (2025). Global risks report 2025. <https://www.weforum.org>
- World Meteorological Organization. (2024). State of the climate in 2024. <https://public.wmo.int>