



Efisiensi Agronomis dan Ekonomis Pemupukan NPK pada Tanaman Kopi: *Systematic Literature Review*

Ajeng Syadiar Junaedi

Politeknik Siber Cerdika Internasional, Indonesia

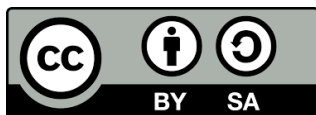
Email: ajengsyadiar@polteksci.ac.id

Keywords:

Agronomic Efficiency;
Coffee; Economic Efficiency;
NPK; Nutrient Use Efficiency

Abstract

Coffee productivity and bean quality depend substantially on balanced nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization. Nevertheless, excessive fertilizer application may increase production costs and nutrient losses without proportionally improving yield. This study aimed to synthesize evidence regarding the agronomic and economic efficiency of NPK fertilization in Arabica and Robusta coffee and identify suitable fertilization strategies. A systematic literature review was conducted using 25 journal articles published between 2017 and 2026 and retrieved from Google Scholar and scientific publisher databases. Literature selection followed PRISMA 2020 principles, while data were analyzed descriptively, comparatively, and thematically. The findings demonstrated that fertilization efficiency was determined by interactions among fertilizer rate, nutrient source, application timing and method, soil nutrient status, water availability, radiation, genotype, plant age, and agroecosystem conditions. Increasing fertilizer rates did not consistently improve nutrient-use efficiency or economic returns. Fertigation and split application improved nutrient synchronization and potentially reduced fertilizer requirements, whereas stabilized fertilizers and inhibitors decreased nitrogen losses. Integrated organic–inorganic fertilization improved soil conditions, nutrient availability, yield, and selected bean-quality attributes. However, their economic feasibility depended on fertilizer prices, application costs, and local conditions. Therefore, coffee fertilization should employ site-specific strategies based on soil analysis, crop nutrient status, yield targets, and integrated agronomic and economic assessments.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author. Published by
Green Publisher Indonesia

Kata Kunci:

Efisiensi Agronomis; Efisiensi
Ekonomis; Kopi; NPK;
Nutrient Use Efficiency

Abstrak

Produktivitas dan kualitas biji kopi sangat dipengaruhi oleh pemupukan nitrogen, fosfor, dan kalium yang seimbang. Namun, pemberian pupuk secara berlebihan dapat meningkatkan biaya produksi dan kehilangan hara tanpa menghasilkan peningkatan produktivitas yang sebanding. Penelitian ini bertujuan menyintesis bukti mengenai efisiensi agronomis dan ekonomis pemupukan NPK pada kopi Arabika dan Robusta serta mengidentifikasi strategi pemupukan yang sesuai. Penelitian menggunakan metode systematic literature review terhadap 25 artikel jurnal yang diterbitkan pada periode 2017–2026 dan diperoleh melalui Google Scholar serta pangkalan data penerbit ilmiah. Seleksi literatur mengikuti prinsip PRISMA 2020, sedangkan data dianalisis secara deskriptif-komparatif dan tematik. Hasil kajian menunjukkan bahwa efisiensi pemupukan ditentukan oleh interaksi dosis, sumber hara, waktu dan metode aplikasi, status hara tanah, ketersediaan air, radiasi, genotipe, umur tanaman, dan kondisi agroekosistem. Peningkatan dosis pupuk tidak

selalu meningkatkan efisiensi penggunaan hara maupun keuntungan ekonomi. Fertigasi dan pemupukan terbagi meningkatkan sinkronisasi hara dan berpotensi mengurangi kebutuhan pupuk, sedangkan pupuk terstabilisasi dan inhibitor menekan kehilangan nitrogen. Integrasi pupuk organik–anorganik juga memperbaiki kondisi tanah, ketersediaan hara, produktivitas, dan beberapa atribut kualitas biji. Dengan demikian, pemupukan kopi perlu menerapkan strategi spesifik lokasi berdasarkan analisis tanah, status hara tanaman, target hasil, serta penilaian agronomis dan ekonomis secara terpadu.

PENDAHULUAN

Tanaman kopi (*Coffea arabica* L. dan *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) merupakan komoditas perkebunan yang produktivitasnya dipengaruhi oleh interaksi antara genotipe, lingkungan, tanah, air, radiasi, dan pengelolaan tanaman. Dalam sistem produksi intensif, pemupukan menjadi input penting karena kebutuhan hara berlangsung sepanjang fase vegetatif, pembungaan, pembentukan buah, pengisian biji, dan pemulihan tanaman setelah panen. Nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) mempunyai fungsi yang saling melengkapi sehingga pengelolaannya perlu mempertimbangkan keseimbangan hara, bukan hanya jumlah pupuk yang diberikan.

Masalah utama pemupukan kopi tidak berhenti pada kecukupan hara, tetapi juga menyangkut seberapa besar pupuk yang diberikan benar-benar dimanfaatkan tanaman dan seberapa besar manfaat ekonominya. Salamanca-Jimenez et al., (2017) menunjukkan bahwa pada fase vegetatif awal, N yang berasal dari pupuk hanya menyumbang sekitar 20–29% N tanaman pada akhir pengamatan, sedangkan *recovery* dari total N yang diaplikasikan rata-rata sekitar 5%. Rendahnya *recovery* tersebut memperlihatkan bahwa sebagian besar N yang diberikan belum langsung masuk ke jaringan tanaman dan berpotensi mengalami transformasi atau kehilangan dari sistem tanah–tanaman. Respons tersebut juga berbeda antar lokasi, sehingga efisiensi pemupukan tidak dapat dilepaskan dari kondisi tanah dan lingkungan.

Respons N juga dipengaruhi oleh lingkungan cahaya. Bote et al., (2018) menunjukkan adanya interaksi antara suplai N dan tingkat radiasi, sehingga peningkatan N dapat memberikan manfaat yang berbeda bergantung pada kondisi radiasi dan pengelolaan tanaman. Pada tanah berpasir, (Abranches et al., 2019) menemukan bahwa peningkatan dosis N meningkatkan sejumlah indikator pertumbuhan dan hasil, tetapi urea berlapis tidak memberikan keunggulan yang konsisten terhadap urea konvensional. Temuan tersebut menunjukkan bahwa teknologi pupuk tidak otomatis lebih efisien apabila kondisi tanah, iklim, dan metode aplikasi tidak mendukung.

Fosfor dan kalium juga menunjukkan respons yang sangat bergantung pada konteks. Almeida et al., (2019) melaporkan bahwa pada tanah dengan status P tinggi, peningkatan konsentrasi P pada kopi fertigasi dapat menjadi tidak layak secara ekonomi. Pada sisi lain, genotipe kopi menunjukkan perbedaan dalam efisiensi dan respons terhadap P (Vilela et al., 2021). Untuk K, sumber pupuk dapat memengaruhi mutu dan karakteristik biji. (Moreira et al., 2021) menunjukkan bahwa pengelolaan KCl dan K₂SO₄ dapat memengaruhi karakteristik fisik dan kimia biji, sedangkan penelitian di Brazilian Cerrado menunjukkan bahwa respons terhadap sumber K dapat berbeda menurut kultivar dan pertimbangan biaya dapat menjadikan KCl lebih menarik pada kondisi tertentu (Nascimento et al., 2024).

Perkembangan teknologi pemupukan memberikan peluang untuk meningkatkan efisiensi tanpa sekadar menaikkan dosis. Teknologi pupuk N dan inhibitor dapat menekan kehilangan N melalui volatilasi amonia (Freitas et al., 2022; Sarkis et al., 2023), sedangkan fertigasi memungkinkan pupuk diberikan bersama air dengan frekuensi dan jumlah yang lebih terkontrol. (Mote et al., 2024) melaporkan bahwa pada kopi Robusta, fertigasi 75% dosis rekomendasi menghasilkan kombinasi produktivitas, efisiensi nutrisi, dan keuntungan yang menarik. Penelitian lain menunjukkan bahwa pemupukan terbagi melalui drip fertigation dapat meningkatkan hasil dan beberapa atribut mutu biji (Li et al., 2023; Chen et al., 2024). Integrasi pupuk organik dan anorganik juga berpotensi memperbaiki lingkungan tanah sekaligus mempertahankan produktivitas (Mota et al., 2023; Huang et al., 2025).

Dalam konteks perkebunan kopi Indonesia, persoalan tersebut menjadi semakin penting karena kebun berbeda dalam jenis tanah, ketinggian, curah hujan, varietas, umur tanaman, naungan, ketersediaan air, dan sistem budidaya. Bukti ilmiah mengenai pemupukan kopi telah berkembang, tetapi masih tersebar antara studi N, P, K, fertigasi, pemupukan terbagi, pupuk organomineral, pupuk efisiensi meningkat, dinamika hara tanah, produktivitas, mutu, dan aspek ekonomi. Research gap kajian ini terletak pada belum terintegrasinya bukti tersebut dalam satu sintesis yang secara eksplisit menghubungkan strategi pemupukan NPK dengan efisiensi penggunaan hara, produktivitas, kualitas hasil, biaya input, dan keuntungan ekonomi. Artikel ini tidak dimaksudkan untuk menetapkan satu dosis NPK universal, melainkan mengidentifikasi pola kondisi yang membuat pemupukan lebih efisien.

Penelitian terkini mulai mengarahkan pengelolaan pemupukan kopi pada peningkatan ketepatan waktu, metode, dan distribusi hara. Freitas et al., (2022) serta Sarkis et al., (2023) menunjukkan bahwa penggunaan pupuk terstabilisasi dan inhibitor berpotensi mengurangi kehilangan N melalui volatilasi amonia, meskipun manfaatnya tetap dipengaruhi oleh kondisi tanah dan lingkungan. Pada kopi Robusta, (Mote et al., 2024) menemukan bahwa fertigasi dengan 75% dosis rekomendasi mampu menghasilkan kombinasi produktivitas, efisiensi nutrisi, dan keuntungan ekonomi yang menjanjikan. (Li et al., 2023) menunjukkan bahwa pengaturan waktu drip fertigation dapat meningkatkan hasil, komponen volatil, dan kualitas cita rasa kopi Arabika. Temuan tersebut diperkuat oleh (Chen et al., 2024), yang melaporkan bahwa skema split-reduced drip fertigation tertentu meningkatkan rata-rata hasil dua tahun sebesar 20,52% dibandingkan perlakuan kontrol, sekaligus memperbaiki sejumlah komponen kimia biji. Bukti ini memperlihatkan bahwa efisiensi pemupukan tidak hanya ditentukan oleh total dosis tahunan, tetapi juga oleh sinkronisasi pasokan hara dengan kebutuhan fisiologis tanaman.

Pendekatan integrasi pupuk organik dan anorganik turut menawarkan peluang untuk meningkatkan efisiensi sistem produksi kopi. Mota et al., (2023) menemukan bahwa pupuk organomineral dan pembagian waktu aplikasi dapat meningkatkan hasil, efisiensi penggunaan K, serta ketersediaan P dan K tanah pada kopi Arabika. (Jiang et al., 2023) menunjukkan bahwa kombinasi kompos kulit kopi dan pupuk anorganik dapat memperbaiki lingkungan ekologis tanah dan karakteristik fotosintesis tanaman. (Kurniawan et al., 2024) selanjutnya melaporkan bahwa kombinasi pupuk organik–anorganik dan tingkat dosis memengaruhi dinamika nitrat, amonium, biomassa mikroba N, dan bobot buah pada agroforestri kopi. Penelitian yang lebih mutakhir oleh (Huang et al., 2025) memperlihatkan bahwa substitusi sebagian pupuk anorganik dengan bahan organik berbasis limbah kulit kopi dapat memperbaiki lingkungan mikro tanah,

hasil biji, kualitas nutrisi, dan karakteristik cita rasa. Meskipun demikian, manfaat tersebut perlu dievaluasi bersama biaya pengolahan, transportasi, ketersediaan bahan, dan konsistensi kualitas pupuk organik.

Walaupun penelitian mengenai pemupukan kopi terus berkembang, bukti ilmiah yang tersedia masih terfragmentasi berdasarkan unsur hara, jenis pupuk, metode aplikasi, indikator agronomis, dan kondisi lokasi penelitian. Sebagian penelitian menitikberatkan pada peningkatan produktivitas, sedangkan penelitian lainnya membahas efisiensi penggunaan hara, pengurangan kehilangan N, kualitas biji, atau keuntungan ekonomi secara terpisah. Akibatnya, belum tersedia sintesis yang secara komprehensif menjelaskan hubungan antara dosis, sumber, waktu, dan metode aplikasi NPK dengan produktivitas, kualitas hasil, efisiensi penggunaan hara, biaya input, dan keuntungan ekonomi. Selain itu, dosis yang menghasilkan produktivitas maksimum tidak selalu identik dengan dosis yang memberikan efisiensi agronomis atau keuntungan tertinggi. Kesenjangan tersebut penting dijawab karena penerapan rekomendasi pemupukan yang bersifat umum pada kebun dengan karakteristik tanah, air, naungan, varietas, dan umur tanaman yang berbeda dapat meningkatkan biaya produksi serta risiko kehilangan hara. Oleh sebab itu, diperlukan suatu *systematic literature review* yang mengintegrasikan bukti agronomis dan ekonomis untuk mendukung penyusunan strategi pemupukan kopi yang lebih spesifik lokasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka integratif efisiensi agronomis–ekonomis yang menghubungkan lima komponen keputusan pemupukan, yaitu dosis, sumber, waktu, metode aplikasi, dan kondisi agroekosistem, dengan produktivitas, kualitas biji, pemanfaatan dan kehilangan hara, serta keuntungan usaha tani. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pengaruh pemberian N, P, K, dan NPK terhadap produktivitas kopi; menganalisis faktor-faktor yang menentukan efisiensi penggunaan pupuk; membandingkan pemupukan konvensional, fertigasi, pemupukan terbagi, pupuk organomineral, dan pupuk dengan efisiensi yang ditingkatkan; serta mengidentifikasi strategi yang memberikan keseimbangan terbaik antara produktivitas, efisiensi input, dan keuntungan ekonomi. Secara teoretis, penelitian ini diharapkan memperluas pemahaman mengenai hubungan antara pengelolaan hara dan respons tanaman kopi dalam kondisi agroekosistem yang beragam. Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi dasar bagi petani, penyuluh, pengelola perkebunan, dan pembuat kebijakan dalam menyusun rekomendasi pemupukan berbasis analisis tanah, status tanaman, target hasil, dan evaluasi ekonomi, sekaligus menjadi pijakan bagi penelitian lanjutan mengenai pemupukan kopi presisi dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, membandingkan, dan mensintesis hasil penelitian mengenai efisiensi agronomis dan ekonomis pemupukan N, P, K, dan NPK pada tanaman kopi (*Coffea arabica* L. dan *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner). Pelaporan mengikuti prinsip transparansi PRISMA 2020, terutama dalam penetapan kriteria, penyaringan, dan pelaporan sumber yang digunakan. Penelusuran literatur dilakukan terhadap artikel jurnal yang diterbitkan pada periode 2017–2026 melalui Google Scholar dan laman penerbit jurnal ilmiah, termasuk ScienceDirect, SpringerLink, Frontiers, Wiley Online Library, MDPI, Taylor & Francis, *Coffee Science*, *Scientific Reports/Nature*, dan PubMed/PMC. Kata kunci merupakan

komposisi “coffee”, “*Coffea arabica*”, “*Coffea canephora*”, “NPK fertilization”, “nitrogen”, “phosphorus”, “potassium”, “nutrient use efficiency”, “agronomic efficiency”, “fertilizer use efficiency”, “economic efficiency”, “fertigation”, “split fertilization”, “controlled-release fertilizer”, “organomineral fertilizer”, dan “yield”. Artikel dimasukkan apabila diterbitkan pada 2017–2026, berupa artikel jurnal ilmiah, membahas tanaman kopi, memiliki keterkaitan langsung dengan pemupukan atau nutrisi N, P, K, NPK, pupuk organomineral, pupuk dengan efisiensi meningkat, atau metode aplikasi pupuk, serta melaporkan sekurang-kurangnya salah satu parameter pertumbuhan, produktivitas, serapan/efisiensi hara, kualitas hasil, biaya, pendapatan, atau keuntungan. Artikel berupa tesis, disertasi, buku, prosiding, laporan nonjurnal, artikel yang tidak berkaitan langsung dengan pemupukan kopi, artikel duplikat, dan artikel dengan informasi yang tidak memadai dikeluarkan dari sintesis utama. Seleksi dilakukan melalui pemeriksaan judul, abstrak, isi artikel, relevansi terhadap pertanyaan kajian, kelengkapan informasi metodologis dan hasil, serta verifikasi DOI atau laman penerbit. Sebanyak 25 artikel jurnal utama yang memenuhi kriteria tersebut digunakan sebagai basis sintesis substantif. Angka 25 merupakan jumlah artikel yang masuk dalam analisis, bukan klaim jumlah seluruh *records* pada tahap identifikasi awal, karena jumlah *records* awal harus didasarkan pada ekspor database dan tanggal pencarian yang terdokumentasi agar dapat direplikasi. Data diekstraksi meliputi penulis dan tahun, lokasi, spesies atau varietas, umur tanaman, jenis dan dosis pupuk, metode dan waktu aplikasi, produktivitas, kualitas hasil, indikator efisiensi hara, biaya pemupukan, dan indikator ekonomi. Efisiensi agronomis dipahami sebagai tambahan hasil akibat pemupukan per unit unsur hara yang diberikan, dengan rumus $AE = (YF - Y0)/F$ apabila data pembandingan tersedia. Selain AE, sintesis mempertimbangkan *partial factor productivity*, *recovery efficiency*, serapan hara, dan indikator nutrient use efficiency yang dilaporkan oleh masing-masing artikel. Efisiensi ekonomi ditelaah berdasarkan hubungan antara tambahan penerimaan dan biaya pemupukan; indikator seperti *net return* dan *benefit-cost ratio* digunakan apabila tersedia dalam sumber asli. Artikel yang tidak melaporkan data ekonomi digunakan untuk sintesis agronomis tetapi tidak dijadikan bukti langsung untuk kesimpulan ekonomi. Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dan tematik karena penelitian yang dikaji heterogen dalam varietas, umur tanaman, tanah, iklim, dosis, sumber pupuk, dan sistem aplikasi, sehingga hasil tidak digabungkan melalui meta-analisis statistik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis 25 artikel utama menunjukkan bahwa efisiensi pemupukan kopi merupakan hasil interaksi antara dosis pupuk, sumber hara, waktu aplikasi, metode aplikasi, kondisi tanah dan air, radiasi, genotipe, serta tujuan produksi. Dengan demikian, hasil tertinggi dan efisiensi tertinggi tidak selalu berada pada perlakuan yang sama. Pola umum yang muncul adalah bahwa ketika suplai hara telah mendekati kebutuhan tanaman, tambahan dosis cenderung menghasilkan tambahan hasil yang semakin kecil. Karena itu, penilaian pemupukan perlu menggabungkan indikator produksi dan efisiensi input.

Tabel 1. Sintesis Kelompok Bukti dan Indikator Efisiensi Pemupukan Kopi

Kelompok bukti	Fokus utama	Indikator yang dominan
Pemupukan N	Dosis, bentuk, kehilangan dan recovery N	NUE, recovery, pertumbuhan, hasil
Pemupukan P	Status P tanah, dosis dan genotipe	Serapan P, efisiensi P, kelayakan ekonomi
Pemupukan K	Sumber K dan keseimbangan C/S	Hasil, mutu biji, efisiensi K
Fertigasi dan split	Konsentrasi, waktu dan pembagian aplikasi	Hasil, NUE, kualitas, B/C
Organik–anorganik	Integrasi sumber hara dan kesehatan tanah	Hasil, kualitas, dinamika N, tanah

Pada aspek nitrogen, Salamanca-Jimenez et al. (2017) memberikan bukti penting bahwa recovery N pupuk pada fase vegetatif awal kopi relatif rendah. Meskipun N yang berasal dari pupuk menyumbang sekitar 20–29% total N tanaman pada akhir pengamatan, rata-rata hanya sekitar 5% N yang diaplikasikan yang ter-recovery oleh tanaman selama periode tersebut. Perbedaan antar lokasi menunjukkan bahwa bahan organik tanah, curah hujan, dan kondisi lingkungan dapat mengubah respons. Implikasinya, peningkatan dosis N tanpa pengaturan waktu dan lokasi aplikasi dapat meningkatkan peluang kehilangan tanpa menghasilkan peningkatan hasil yang sebanding.

Bote et al. (2018) memperkuat pentingnya konteks agroekosistem dengan menunjukkan interaksi suplai N dan radiasi. Peningkatan N dapat meningkatkan efisiensi penggunaan radiasi dan pertumbuhan, tetapi manfaatnya dipengaruhi oleh tingkat radiasi yang diterima tanaman. Pada kondisi tanah berpasir, Abranches et al. (2019) menemukan bahwa dosis N yang lebih tinggi meningkatkan hasil selama beberapa musim, sementara urea berlapis tidak menunjukkan keunggulan konsisten atas urea konvensional. Kedua temuan tersebut mengindikasikan bahwa “pupuk berteknologi tinggi” atau “dosis tinggi” tidak dapat dianggap efisien secara universal; efektivitasnya bergantung pada kesesuaian antara sumber pupuk dan kondisi kebun.

Kehilangan N merupakan dimensi penting dalam efisiensi. Kajian teknologi pupuk pada sistem kopi menunjukkan bahwa inhibitor dan pupuk dengan karakter pelepasan tertentu dapat mengurangi kehilangan N melalui volatilasi amonia dibandingkan urea konvensional (Freitas et al., 2022). Pada penelitian lapangan, Sarkis et al. (2023) juga menunjukkan bahwa pilihan pupuk konvensional versus pupuk stabil dapat memengaruhi volatilasi NH₃ sekaligus atribut agronomis dan mikrobiologis tanah. Oleh sebab itu, efisiensi N sebaiknya dipandang bukan hanya sebagai rasio hasil terhadap N yang diberikan, tetapi juga sebagai kemampuan sistem mempertahankan N dalam zona serapan tanaman.

Untuk fosfor, hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan P sangat bergantung pada status awal tanah. Almeida et al. (2019) menunjukkan bahwa pada tanah yang telah memiliki kandungan P tinggi, pemberian P pada tingkat tinggi melalui fertigasi dapat menjadi tidak layak secara ekonomi. Hal ini memperlihatkan bahwa rekomendasi dosis P perlu dimulai dari diagnosis status P tanah. Vilela et al. (2021) menemukan adanya variasi efisiensi P antar genotipe Arabika; beberapa genotipe tergolong efisien dan responsif, sementara lainnya menunjukkan pola berbeda. Dengan demikian, optimasi P idealnya mempertimbangkan status hara tanah dan kemampuan genotipe, bukan hanya target dosis per tanaman.

Pada kalium, sumber pupuk dapat memengaruhi produktivitas maupun mutu. Moreira et al. (2021) menunjukkan bahwa kombinasi atau penggantian KCl dengan K₂SO₄ dapat memperbaiki beberapa karakteristik kimia dan warna biji. Nascimento et al. (2024) menunjukkan respons sumber K yang berbeda menurut kultivar; pada kondisi tertentu K₂SO₄ meningkatkan produktivitas, sementara KCl tetap menarik secara ekonomi karena biaya input lebih rendah. Temuan ini penting bagi konsep efisiensi ekonomis: sumber pupuk yang memberikan mutu atau hasil lebih tinggi belum tentu memberikan keuntungan bersih tertinggi jika tambahan biaya lebih besar daripada tambahan penerimaan.

Keseimbangan hara juga perlu diperhatikan. Ramirez-Builes et al. (2023) menunjukkan bahwa variasi dosis klorida dan sulfur sebagai bagian dari pemupukan K dapat mengubah nitrogen use efficiency. Artinya, efisiensi satu unsur tidak sepenuhnya berdiri sendiri. Interaksi antarunsur dapat mengubah serapan dan penggunaan N sehingga program NPK sebaiknya dievaluasi sebagai sistem, terutama pada kebun dengan produktivitas tinggi.

Fertigasi merupakan salah satu strategi yang paling konsisten menunjukkan potensi peningkatan efisiensi. Mote et al. (2024) pada kopi Robusta melaporkan bahwa fertigasi 75% dan 100% dosis rekomendasi menghasilkan produktivitas tinggi; pada 75% dosis rekomendasi, efisiensi nutrisi dilaporkan sekitar 25–30% lebih tinggi dan cost–benefit ratio mencapai 1:2,48. Temuan ini menunjukkan bahwa pengurangan jumlah pupuk sekitar 25% dapat tetap produktif ketika distribusi hara lebih sinkron dengan kebutuhan tanaman. Studi terkait pada sistem kopi Robusta juga menunjukkan bahwa fertigasi dapat menurunkan kebutuhan hara dibandingkan aplikasi tanah konvensional pada kondisi tertentu, tetapi hasil tersebut tidak boleh digeneralisasi tanpa mempertimbangkan fasilitas irigasi, jenis tanah, iklim, dan desain aplikasi.

Bukti mengenai waktu aplikasi mendukung mekanisme tersebut. Li et al. (2023) menunjukkan bahwa pengaturan waktu drip fertigation pada fase perkembangan tanaman dapat meningkatkan hasil dan komponen volatil serta mutu cangkir. Chen et al. (2024) juga menunjukkan bahwa skema split-reduced drip fertigation tertentu pada kopi Arabika menghasilkan peningkatan rata-rata hasil dua tahun sebesar 20,52% dibandingkan kontrol dan meningkatkan beberapa komponen kimia biji. Hasil ini menegaskan bahwa efisiensi tidak hanya ditentukan oleh total dosis tahunan, tetapi juga oleh distribusi dosis sepanjang fase kebutuhan tanaman.

Pemupukan organik–anorganik memberikan jalur lain untuk meningkatkan efisiensi sistem. Mota et al. (2023) melaporkan bahwa pupuk organomineral pada kopi Arabika dapat meningkatkan hasil pada kondisi penelitian dan meningkatkan efisiensi penggunaan K, dengan pembagian aplikasi yang juga memengaruhi ketersediaan P dan K tanah. Huang et al. (2025) menemukan bahwa penggantian sebagian pupuk anorganik dengan bahan organik berbasis limbah kulit kopi dapat meningkatkan kondisi mikro lingkungan tanah, indikator biologis, hasil biji, dan beberapa atribut mutu. Temuan tersebut mendukung pemanfaatan limbah kopi dalam sistem ekonomi sirkular, meskipun biaya pengolahan, transportasi, kualitas bahan organik, dan ketersediaan lokal perlu dimasukkan dalam evaluasi ekonomi.

Dinamika hara tanah memperlihatkan bahwa efisiensi tidak boleh dinilai hanya dari hasil panen. Kurniawan et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan anorganik serta tingkat dosis memengaruhi dinamika N tanah, termasuk nitrat, amonium, dan biomassa mikroba N, sekaligus memengaruhi bobot buah kopi. Dengan demikian, strategi yang

menghasilkan hasil tinggi tetapi meninggalkan akumulasi hara yang besar atau meningkatkan peluang kehilangan hara belum tentu merupakan strategi yang paling berkelanjutan.

Bukti mengenai produktivitas menunjukkan adanya respons non-linear terhadap dosis. Torres et al. (2021), yang menguji dosis 20-00-20 pada kondisi tadah hujan, melaporkan hasil maksimum yang tinggi pada dosis 3.000 kg ha⁻¹ pada beberapa tahun pengamatan, tetapi efisiensi penggunaan pupuk menurun secara eksponensial ketika dosis meningkat. Temuan ini merupakan contoh jelas bahwa dosis yang menghasilkan hasil maksimum tidak identik dengan dosis yang menghasilkan efisiensi input maksimum. Sebaliknya, Khemira et al. (2023) pada kopi Arabika di teras pegunungan Arab Saudi menunjukkan bahwa dosis penuh menghasilkan hasil tahun kedua sekitar $507,6 \pm 63,7$ g biji kering per tanaman, sedangkan dosis 1,5 kali tidak memberikan peningkatan yang sebanding dan justru menurunkan hasil. Nilai hasil yang diperoleh juga dilaporkan lebih besar daripada biaya pemupukan. Dua studi tersebut bersama-sama menunjukkan bahwa kurva respons dosis harus dibaca dari dua sisi: produksi absolut dan tambahan produksi per unit input.

Kondisi tanaman setelah pemangkasan juga mengubah kebutuhan hara. Souza et al. (2024) menunjukkan bahwa kopi fertigasi setelah pemangkasan intensif memerlukan tingkat pemupukan makronutrien yang memadai untuk mempertahankan hasil; pada kondisi penelitian, perlakuan $\geq 100\%$ dari standar menghasilkan hasil lebih tinggi dan hasil maksimum mencapai sekitar 93,05 bag ha⁻¹. Artinya, pengurangan pupuk yang efisien pada satu kondisi tidak otomatis tepat setelah perubahan besar pada arsitektur tanaman. Status fisiologis dan target pemulihan tanaman perlu menjadi bagian dari penentuan dosis.

Aspek ekonomi menjadi pembeda utama antara pemupukan yang sekadar produktif dan pemupukan yang benar-benar optimal. Almeida et al. (2019) menunjukkan bahwa dosis P tinggi dapat tidak layak ketika status P tanah telah tinggi. Mote et al. (2024) menunjukkan kombinasi menarik antara pengurangan dosis dan peningkatan efisiensi pada fertigasi. Khemira et al. (2023) menunjukkan bahwa tambahan nilai hasil dapat menutup biaya pemupukan pada kondisi penelitian. Bukti-bukti tersebut mengarah pada prinsip bahwa keputusan pemupukan harus didasarkan pada marginal return: tambahan penerimaan dari tambahan hasil harus dibandingkan dengan tambahan biaya pupuk dan biaya aplikasi. Harga kopi, harga pupuk, risiko gagal panen, dan stabilitas produktivitas perlu dipertimbangkan dalam keputusan ekonomi.

Perbedaan antar lokasi juga menjadi alasan kuat untuk menghindari rekomendasi NPK yang seragam. Byraredy et al. (2019) menunjukkan variasi pengelolaan pupuk pada kebun Robusta di Vietnam dan Indonesia selama periode pemantauan yang panjang. Penelitian pada berbagai sistem juga menunjukkan bahwa tanah, naungan, air, varietas, dan praktik budidaya dapat mengubah respons hara. Karena itu, efisiensi ekonomi seharusnya tidak dihitung hanya berdasarkan harga pupuk, tetapi juga berdasarkan potensi hasil yang realistis pada kebun tertentu.

Berdasarkan keseluruhan bukti, strategi yang paling menjanjikan bukanlah satu jenis pupuk tertentu, melainkan pengelolaan terpadu yang menempatkan diagnosis tanah dan kebutuhan tanaman sebagai dasar, kemudian mengatur sumber, dosis, waktu, dan metode aplikasi. Ringkasan sintesis dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Strategi Pemupukan Berdasarkan Efisiensi Agronomis dan Ekonomis

Strategi		Efisiensi agronomis	Efisiensi ekonomis	Catatan penerapan
Dosis konvensional	tinggi	Dapat tinggi sampai titik optimum; menurun setelahnya	Tidak selalu tinggi	Hasil maksimum belum tentu return maksimum
Dosis spesifik lokasi		Berpotensi tinggi	Berpotensi tinggi	Memerlukan analisis tanah dan target hasil
Fertigasi		Tinggi pada kondisi sesuai	Berpotensi tinggi	Memerlukan irigasi dan manajemen konsentrasi
Pemupukan terbagi		Berpotensi tinggi	Berpotensi tinggi	Menyelaraskan suplai dengan fase kebutuhan
Organomineral/integrasi organik-anorganik		Sedang-tinggi	Tergantung biaya bahan	Dapat memperbaiki fungsi tanah dan mendaur ulang limbah
Enhanced-efficiency fertilizer		Berpotensi tinggi	Tergantung premium harga	Efektif bila pengurangan kehilangan menutup biaya tambahan
N berlebih		Rendah setelah titik optimum	Cenderung rendah	Meningkatkan biaya dan risiko kehilangan

Kerangka optimasi yang dihasilkan dari sintesis dapat dirumuskan sebagai: analisis tanah dan status tanaman → penetapan target hasil → penentuan kebutuhan N, P, dan K → pemilihan sumber pupuk → penentuan waktu dan pembagian dosis → pemilihan metode aplikasi → monitoring status hara dan pertumbuhan → evaluasi hasil dan kualitas → perhitungan biaya dan penerimaan → evaluasi efisiensi agronomis dan ekonomis → pembaruan rekomendasi spesifik lokasi. Kerangka ini menggeser pemupukan dari kegiatan rutin berbasis dosis menjadi pengambilan keputusan berbasis data.

Sintesis juga memperlihatkan beberapa agenda penelitian. Pertama, indikator ekonomi masih lebih jarang dilaporkan secara bersamaan dengan indikator efisiensi nutrisi, sehingga penelitian mendatang perlu melaporkan biaya pupuk, biaya aplikasi, penerimaan, dan return marginal bersama produktivitas dan NUE. Kedua, penelitian perlu menguji kombinasi NPK dengan status tanah, air, naungan, varietas, dan fase tanaman. Ketiga, teknologi fertigasi, controlled-release fertilizer, dan pemupukan presisi perlu dinilai bukan hanya berdasarkan kenaikan hasil, tetapi juga penghematan input dan pengurangan kehilangan hara. Keempat, pemanfaatan data tanah dan jaringan tanaman dapat digunakan untuk membangun rekomendasi dosis yang dinamis. Dengan demikian, novelty sintesis ini terletak pada pengintegrasian dimensi agronomis, ekonomis, dan lingkungan sebagai satu kerangka keputusan pemupukan.

KESIMPULAN

Berdasarkan systematic literature review terhadap 25 artikel jurnal utama periode 2017–2026, efisiensi pemupukan kopi sangat dipengaruhi oleh interaksi dosis, sumber pupuk, waktu dan metode aplikasi, status hara tanah, ketersediaan air, radiasi, varietas, umur tanaman, dan kondisi agroekosistem. Nitrogen merupakan unsur dengan bukti paling kuat mengenai risiko kehilangan dan pentingnya sinkronisasi aplikasi; fosfor menunjukkan ketergantungan yang tinggi terhadap status P tanah dan karakter genotipe; sedangkan kalium berhubungan dengan produktivitas, keseimbangan hara, dan beberapa komponen kualitas biji. Bukti lintas studi

menunjukkan bahwa peningkatan dosis tidak selalu meningkatkan efisiensi atau keuntungan. Fertigasi dan pemupukan terbagi berpotensi meningkatkan efisiensi melalui sinkronisasi suplai hara dengan kebutuhan tanaman, sementara integrasi organik–anorganik dan pupuk dengan efisiensi meningkat dapat memperbaiki pemanfaatan hara dan mengurangi kehilangan pada kondisi yang sesuai. Oleh karena itu, pemupukan NPK kopi sebaiknya tidak diarahkan pada satu dosis universal, tetapi pada kombinasi dosis, sumber, waktu, dan metode aplikasi yang disesuaikan dengan kondisi kebun dan dievaluasi melalui produktivitas, kualitas, biaya, penerimaan, serta risiko kehilangan hara. Pendekatan spesifik lokasi berbasis analisis tanah, status tanaman, target hasil, dan evaluasi ekonomi merupakan arah yang paling rasional untuk meningkatkan efisiensi pemupukan kopi.

Bukti tambahan mengenai sumber K, biointegrasi, dan status fisiologis memperkuat pola yang sama. Dias et al. (2018) menunjukkan bahwa sumber K alternatif dapat menghasilkan produktivitas yang sebanding pada tingkat K₂O lebih rendah dalam kondisi tertentu. Sancho Barrantes et al. (2019) menunjukkan bahwa kombinasi mineral–organik relevan untuk karakter agroproduktif dan kualitas cangkir. Parecido et al. (2022) menunjukkan bahwa aplikasi silikon daun berpotensi meningkatkan hasil dan nitrogen use efficiency pada kopi .

Arabika. Jiang et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi kompos kulit kopi dan pupuk anorganik dapat memperbaiki lingkungan tanah dan karakter fotosintesis. Bukti-bukti ini mendukung kesimpulan bahwa efisiensi pemupukan perlu ditempatkan dalam kerangka pengelolaan sistem tanaman secara utuh, bukan hanya pemilihan dosis NPK.

REFERENSI

- Abranches, J. L., Soratto, R. P., Perdoná, M. J., & Parecido, R. J. (2019). Arabica coffee response to rates of coated and conventional urea in sandy soil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 54, e00767.
- Almeida, R. C., de Deus, F. P., Diotto, A. V., Scalco, M. S., & Colombo, A. (2019). Technical and economic performance of fertirrigated coffee with different phosphorus concentration. *Irriga*, 24(2), 424–443. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n2p424-443>
- Bote, A. D., Ayalew, B., Ocho, F. L., Anten, N. P. R., & Vos, J. (2018). Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 92, 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.007>
- Byraredy, V. M., et al. (2019). Sustainable production of Robusta coffee under a changing climate: A 10-year monitoring of fertilizer management in coffee farms in Vietnam and Indonesia. *Agronomy*, 9(9), 499. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9090499>
- Chen, H., Liu, X., Xiao, Q., Wu, L., Cheng, M., Wang, H., Wang, X., Hu, D., Sun, Z., & Ma, X. (2024). Optimizing split-reduced drip fertigation schemes of Arabica coffee based on soil microcosms, bean yield, quality and flavor in dry-hot region of southwest China. *Scientia Horticulturae*, 336, 113418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113418>
- Dias, K. G. de L., Guimarães, P. T. G., Carmo, D. L. do, Reis, T. H. P., & Lacerda, J. J. de J. (2018). Alternative sources of potassium in coffee plants for better soil fertility, productivity, and beverage quality. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(12), 1355–1362. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2018.v53.25965>
- Freitas, T., Bartelega, L., Santos, C., et al. (2022). Technologies for fertilizers and management strategies of N-fertilization in coffee cropping systems to reduce ammonia losses by

- volatilization. *Plants*, 11(23), 3323. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11233323>
- Huang, W., Liu, X., Li, R., Wang, Y., Dong, J., Wang, X., Cui, N., & Chen, Z. (2025). Enhancing soil microenvironment, bean yield, nutritional quality and flavor of *Coffea arabica* through synergistic inorganic-organic fertilization in Southwest China. *Industrial Crops and Products*, 234, 121526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121526>
- Jiang, Z., Lou, Y., Liu, X., & Sun, W. (2023). Combined application of coffee husk compost and inorganic fertilizer to improve the soil ecological environment and photosynthetic characteristics of Arabica coffee. *Agronomy*, 13(5), 1212. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051212>
- Khemira, H., Mehrez, K. H., & Medebesh, A. M. (2023). Effect of fertilization on yield and quality of Arabica coffee grown on mountain terraces in southwestern Saudi Arabia. *Scientia Horticulturae*, 321, 112370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112370>
- Kurniawan, S., Nugroho, R. M. Y. A. P., Ustiatik, R., Nita, I., Nugroho, G. A., Prayogo, C., & Anderson, C. W. N. (2024). Soil nitrogen dynamics affected by coffee (*Coffea arabica*) canopy and fertilizer management in coffee-based agroforestry. *Agroforestry Systems*, 98, 1323–1341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01004-8>
- Li, R., Cheng, J., Liu, X., Wang, Z., Li, H., Guo, J., Wang, H., Cui, N., & Zhao, L. (2023). Optimizing drip fertigation at different periods to improve yield, volatile compounds and cup quality of Arabica coffee. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1148616. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1148616>
- Moreira, D. T., Mellis, E. V., Giomo, G. S., Teixeira, L. A. J., Cavalli, E., & Ramos, L. F. (2021). Determination of physical and chemical quality of coffee beans under improved potassium fertilization managements. *Coffee Science*, 16, e161895. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v16i.1895>
- Mota, R. P. da, Ferraz-Almeida, R., Camargo, R. de, Franco, M. H. R., Delvaux, J. C., & Lana, R. M. Q. (2023). Organomineral fertilizer in coffee plant (*Coffea arabica* L.): Fertilizer levels and application times. *Coffee Science*, 18, e182098. DOI: <https://doi.org/10.25186/.v18i.2098>
- Mote, K. J., Gokavi, N., Babou, C., Mukharib, D. S., Rudragouda, Govindappa, M., Jayakumar, M., Chandrashekar, N., Gopinandhan, T. N., & Niranjana. (2024). Effect of fertigation levels on fertilizer use efficiency, yield, quality and economics of Robusta coffee. *Irrigation and Drainage*, 73(1), 89–101. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.2869>
- Nascimento, M. O., Celestino, S. M. C., Veiga, A. D., Jesus, B. D. A. de, & Oliveira, L. de L. de. (2024). Quality of Arabica coffee grown in Brazilian Savannah and impact of potassium sources. *Food Research International*, 188, 114500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114500>
- Parecido, R. J., Soratto, R. P., Perdoná, M. J., & Gitari, H. I. (2022). Foliar-applied silicon may enhance fruit ripening and increase yield and nitrogen use efficiency of Arabica coffee. *European Journal of Agronomy*, 140, 126602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126602>
- Ramirez-Builes, V. H., Küsters, J., Thiele, E., Leal-Varon, L. A., & Arteta-Vizcaino, J. (2023). Influence of variable chloride/sulfur doses as part of potassium fertilization on nitrogen use efficiency by coffee. *Plants*, 12(10), 2033. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12102033>
- Salamanca-Jimenez, A., Doane, T. A., & Horwath, W. R. (2017). Nitrogen use efficiency of coffee at the vegetative stage as influenced by fertilizer application method. *Frontiers in Plant Science*, 8, 223. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00223>
- Sancho Barrantes, E., Espinoza Ballesteros, D., & Aguirre Rosales, D. (2019). Effects of mineral, organic, and mineral-organic fertilizers on agroproductive characteristics in coffee plants and cup quality. *Revista Universidad en Diálogo*, 9(2), 175–185. DOI:

- <https://doi.org/10.15359/udre.9-2.9>
- Sarkis, L. F., Dutra, M. P., Oliveira, D. P., Fernandes, T. J., de Souza, T. R., Builes, V. R., & Guelfi, D. (2023). Ammonia volatilization from conventional and stabilized fertilizers, agronomic aspects and microbiological attributes in a Brazilian coffee crop system. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1291662. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1291662>
- Souza, V. H. S., Carvalho, A. M., Teramoto, É. T., Silva, M. C. S., & Guimarães, R. J. (2024). Yield after intensive pruning of fertigated coffee plants subjected to different macronutrient rates. *Semina: Ciências Agrárias*, 45(1), 23–36. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2024v45n1p23>
- Torres, J. D., Espindula, M. C., Araújo, L. F. B. de, Marcolan, A. L., & Rocha, R. B. (2021). Grain yield of coffee plants fertilized with different doses of 20-00-20 NPK formulation under rainfed conditions. *Revista Caatinga*, 34(2), 486–493. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n225rc>
- Vilela, D. J. M., Coelho, L. S., Silva, D. R. G., Carvalho, G. R., Botelho, C. E., & Ferreira, A. D. (2021). Nutritional efficiency in phosphorus of arabica coffee genotypes. *Coffee Science*, 16, e161831. DOI: <https://doi.org/10.25186/v16i.1831>