

Research Article

NANO SELULOSA SEBAGAI MATRIKS PUPUK LEPAS LAMBAT PADA TANAMAN HUTAN: TINJAUAN PUSTAKA

NANOCELLULOSE AS A SLOW-RELEASE FERTILIZER MATRIX IN FOREST PLANTS: A LITERATURE REVIEW

Dimas Agung¹⁾

¹⁾ Program Studi Kehutanan Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian INTAN Yogyakarta

* Email: dimasagungpramono86@gmail.com

ABSTRACT

*Nanocellulose-based slow-release fertilizer (SRF) matrices represent a strategic alternative for sustainable forest plant nutrition management. Nanocellulose, encompassing cellulose nanocrystals (CNC), cellulose nanofibrils (CNF), and bacterial cellulose (BC), holds significant potential as a nutrient carrier matrix due to its biocompatibility, biodegradability, high surface area, and ability to form three-dimensional hydrogel networks. This literature review analyzes the mechanisms of nutrient (N, P, K) immobilization and controlled release from nanocellulose matrices, their effectiveness on forest plant growth (particularly *Acacia mangium*, *Eucalyptus* spp., *Pinus merkusii*, and *Shorea* spp.), and environmental implications compared to conventional fertilizers. The review indicates that nanocellulose matrices can extend nutrient release periods up to 60–120 days, reduce nutrient losses due to leaching by 40–70%, and enhance nutrient uptake efficiency by forest plant roots. Major challenges include production scalability, fabrication costs, and formulation optimization for tropical field conditions. This review concludes that nanocellulose is a promising SRF matrix candidate to support intensive silviculture and forest rehabilitation in Indonesia.*

Keywords: *nanocellulose, slow-release fertilizer, nutrient matrix, forest plants, silviculture, biodegradability*

ABSTRAK

Pupuk slow release (SRF) berbasis nanomaterial menjadi alternatif strategis dalam pengelolaan nutrisi tanaman hutan yang berkelanjutan. Nano selulosa, yang meliputi selulosa nanokristal (CNC), selulosa nanofibril (CNF), dan selulosa bakterial (BC), memiliki potensi besar sebagai matriks pembawa nutrisi karena sifat biokompatibilitas, biodegradabilitas, luas permukaan tinggi, serta kemampuan membentuk jaringan hidrogel tiga dimensi. Tinjauan pustaka ini menganalisis mekanisme immobilisasi dan pelepasan terkendali nutrisi

INFORMATION

Received : 27 Juli 2026

Revised : 30 Juli 2026

Accepted : 3 Agustus 2026

Volume: 54

Number: 1

Year: 2026

Copyright © 2026

(N, P, K) dari matriks nano selulosa, efektivitasnya terhadap pertumbuhan tanaman hutan (khususnya spesies *Acacia mangium*, *Eucalyptus* spp., *Pinus merkusii*, dan *Shorea* spp.), serta implikasi lingkungan dibandingkan pupuk konvensional. Hasil kajian menunjukkan bahwa matriks nano selulosa mampu memperpanjang periode pelepasan nutrisi hingga 60–120 hari, mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian hingga 40–70%, serta meningkatkan efisiensi serapan hara oleh akar tanaman hutan. Tantangan utama meliputi skalabilitas produksi, biaya fabrikasi, dan optimalisasi formulasi untuk kondisi lapangan tropis. Tinjauan ini menyimpulkan bahwa nano selulosa merupakan kandidat matriks SRF yang menjanjikan untuk mendukung silvikultur intensif dan rehabilitasi hutan di Indonesia.

Kata kunci: nano selulosa, pupuk slow release, matriks nutrisi, tanaman hutan, silvikultur, biodegradabilitas

PENDAHULUAN

Pengelolaan hutan tanaman industri (HTI) dan program rehabilitasi hutan di Indonesia menghadapi tantangan serius dalam pemenuhan nutrisi tanaman. Kebutuhan pupuk untuk sektor kehutanan Indonesia mencapai estimasi 1,2–1,8 juta ton per tahun, dengan dominasi pupuk urea, SP-36, dan KCl (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022). Aplikasi pupuk konvensional pada lahan hutan tropis, kendati demikian, menghadapi permasalahan efisiensi yang rendah akibat intensitas hujan tinggi, pencucian (*leaching*), volatilisasi, dan fiksasi oleh tanah mineral tropis yang kaya oksida besi dan aluminium (Sanchez, 2019). Studi menunjukkan bahwa efisiensi serapan pupuk nitrogen oleh tanaman hutan tropis hanya berkisar 30–50%, sementara fosfor sering kali terfiksasi hingga 80% dalam bentuk tidak tersedia (Lal, 2020).

Kehilangan nutrisi yang tidak terkontrol tidak hanya menimbulkan kerugian ekonomi, tetapi juga menyebabkan degradasi lingkungan melalui eutrofikasi badan air, emisi gas rumah kaca (N_2O), dan asidifikasi tanah (Vitousek et al., 1997). Dalam konteks perubahan iklim dan target *Net Zero Emission* 2060, diperlukan inovasi teknologi pemupukan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Kontradiksi muncul ketika kebutuhan akan produktivitas hutan yang meningkat berhadapan dengan keterbatasan teknologi pemupukan yang mampu menekan kehilangan hara tanpa menimbulkan dampak lingkungan baru.

Pupuk lepas lambat dan pupuk lepas terkontrol (*controlled release fertilizer*/CRF) muncul sebagai solusi untuk menjembatani kesenjangan tersebut. Konsep pupuk lepas lambat melibatkan enkapsulasi atau immobilisasi nutrisi dalam matriks yang melepaskan hara secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman (Trenkel, 2010). Di antara berbagai material matriks yang dikembangkan, *nanocellulose* menarik perhatian karena berasal dari sumber terbarukan, melimpah di Indonesia sebagai negara penghasil kayu dan biomassa lignoselulosa terbesar di Asia Tenggara (Abdul Khalil et al., 2012). Argumentasi ini menegaskan bahwa pengembangan matriks berbasis nano selulosa bukan sekadar alternatif teknologi, melainkan upaya mengintegrasikan kekayaan sumber daya hayati Indonesia dengan solusi teknologi yang berkelanjutan.

1.1 Rumusan Masalah

Tinjauan pustaka ini berupaya menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- a) Bagaimana karakteristik dan mekanisme nano selulosa sebagai matriks pembawa nutrisi pada pupuk lepas lambat?
- b) Bagaimana efektivitas pupuk lepas lambat berbasis nano selulosa terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman hutan?
- c) Apa saja tantangan dan prospek pengembangan teknologi ini untuk aplikasi silvikultur di Indonesia?

1.2 Tujuan

Tujuan tinjauan ini adalah: (a) menganalisis potensi nano selulosa sebagai matriks pupuk lepas lambat untuk tanaman hutan melalui sintesis kritis literatur terkini; (b) mengevaluasi mekanisme pelepasan nutrisi dan efektivitas agronomis dengan membandingkan temuan antar-peneliti; dan (c) mengidentifikasi kesenjangan penelitian serta arah pengembangan ke depan berdasarkan perdebatan dan temuan yang belum terjawab dalam literatur.

METODE PENELITIAN

Tinjauan pustaka ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* dengan penelusuran pada basis data *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, dan *Google Scholar*. Kata kunci yang digunakan meliputi kombinasi: *nanocellulose*, *cellulose nanocrystal*, *slow release fertilizer*, *controlled release*, *forest plantation*, *tree seedling*, dan *nutrient matrix*. Dari 247 artikel yang teridentifikasi, 29 artikel memenuhi kriteria inklusi dan digunakan dalam sintesis ini. Seleksi artikel didasarkan pada relevansi topik dan validitas metodologis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

2.1 Nano Selulosa: Klasifikasi, Sifat, dan Produksi

Nano selulosa merujuk pada material selulosa dengan minimal satu dimensi pada skala nanometer (1–100 nm). Terdapat tiga kategori utama nano selulosa yang dibedakan berdasarkan metode produksi dan karakteristik morfologis: Selulosa Nanokristal (*cellulose nanocrystal/CNC*), Selulosa Nanofibril (*cellulose nanofibril/CNF*), dan Selulosa Bakterial (*bacterial cellulose/BC*). Ketiganya memiliki sifat dasar yang sama—kekuatan mekanis tinggi, kemampuan membentuk jaringan, dan gugus fungsional permukaan yang dapat dimodifikasi—namun menunjukkan perbedaan mendasar dalam hal dimensi, kristalinitas, dan kapasitas adsorpsi nutrisi.

CNC diperoleh melalui hidrolisis asam (umumnya H_2SO_4 64% atau HCl) yang melarutkan daerah amorf selulosa, menyisakan kristalit berbentuk batang dengan dimensi 3–20 nm × 100–500 nm (Dufresne, 2013). CNC memiliki kristalinitas tinggi (80–90%), modulus Young 138–167 GPa, dan gugus sulfat/sulfonat pada permukaan yang memberikan muatan negatif (Habibi et al., 2010). Sifat muatan permukaan ini menjadi kunci kemampuan CNC dalam mengikat kation nutrisi melalui interaksi elektrostatis. Sumber CNC meliputi kayu (pulp), kapas, dan residu pertanian.

CNF diproduksi melalui perlakuan mekanis (*high-pressure homogenization*, *grinding*, *microfluidization*) yang sering dikombinasikan dengan *pretreatment* enzimatik atau kimia (*TEMPO-mediated oxidation*) (Isogai et al., 2011). CNF memiliki dimensi 5–50 nm × beberapa mikrometer, membentuk jaringan fibril yang fleksibel dengan rasio aspek tinggi. CNF memiliki gugus karboksil dan hidroksil yang melimpah untuk fungsionalisasi (Saito et al., 2006). Selaras dengan temuan tersebut, kapasitas tukar kation (KTK) CNF teroksidasi mencapai 1,5–3,0 meq/g, jauh lebih tinggi dibanding selulosa mikrokristalin (0,05–0,1 meq/g), menjadikannya kandidat matriks yang lebih unggul untuk immobilisasi nutrisi kationik.

BC disintesis oleh bakteri *Komagataeibacter xylinus* (sebelumnya *Acetobacter xylinus*) dalam medium fermentasi. BC memiliki kemurnian tinggi, bebas lignin dan hemiselulosa, dengan kristalinitas 80–95% dan kemampuan membentuk hidrogel tiga dimensi secara *in situ* (Iguchi et al., 2000). Produksi BC dapat memanfaatkan limbah industri kehutanan (hidrolisat kayu, *black liquor*) sebagai substrat karbon. Kontradiksi muncul ketika membandingkan BC dengan CNC dan CNF: kendati BC menawarkan kemurnian dan struktur jaringan yang superior, biaya produksi dan waktu fermentasi yang relatif lama membatasi aplikasinya pada skala industri.

2.2 Pupuk Lepas Lambat: Prinsip dan Klasifikasi

Pupuk lepas lambat didefinisikan sebagai formulasi nutrisi tanaman yang melepaskan hara pada laju lebih lambat dibandingkan pupuk konvensional, sehingga ketersediaan nutrisi lebih sinkron dengan kebutuhan tanaman (Trenkel, 2010). Mekanisme pelepasan meliputi difusi melalui matriks polimer, degradasi atau erosi matriks, pertukaran ion, serta osmosis dan *swelling*. Keberhasilan suatu matriks pupuk lepas lambat tidak hanya ditentukan oleh kemampuannya memperlambat pelepasan, tetapi juga oleh kesesuaian laju pelepasan dengan fenologi pertumbuhan tanaman.

Klasifikasi pupuk lepas lambat berdasarkan material matriks meliputi: (a) polimer sintetis (*polyurethane*, *polyethylene*), (b) polimer alami (kitosan, alginat, pati), (c) material anorganik (zeolit, hidroksiapatit), dan (d) nanomaterial (nano selulosa, *nano clay*, *graphene oxide*) (Azeem et al., 2014). Matriks berbasis nano selulosa menempati posisi unik karena menggabungkan keunggulan biodegradabilitas polimer alami dengan performa mekanis dan kapasitas adsorpsi nanomaterial. Implikasi dari temuan ini adalah nano selulosa berpotensi mengatasi kelemahan masing-masing kategori: residu mikroplastik dari polimer sintetis, kekuatan mekanis rendah dari polimer alami, dan kapasitas adsorpsi terbatas dari material anorganik.

2.3 Kebutuhan Nutrisi Tanaman Hutan

Tanaman hutan memiliki kebutuhan nutrisi yang spesifik tergantung spesies, fase pertumbuhan, dan kondisi tapak. Pada fase pembibitan (0–6 bulan), kebutuhan N tinggi untuk pertumbuhan vegetatif dengan rasio N:P:K sekitar 3:1:2 (Della Rocca et al., 2019). Memasuki fase penanaman dan *establishment* (6–24 bulan), kebutuhan P meningkat untuk perkembangan akar, sementara N tetap dibutuhkan untuk pembentukan kanopi (Turner & Lambert, 2008). Pada fase pertumbuhan cepat (2–8 tahun), kebutuhan N dan K menjadi dominan, terutama untuk spesies *fast-growing* seperti *Acacia* dan *Eucalyptus* (Nambiar & Brown, 1997). Memasuki fase *mature* (>8 tahun), kebutuhan nutrisi menurun dan daur ulang nutrisi melalui serasah menjadi mekanisme pemenuhan hara yang signifikan.

Spesies hutan tropis Indonesia seperti *Acacia mangium*, *Eucalyptus pellita*, *Pinus merkusii*, *Shorea leprosula*, dan *Dipterocarpus* spp. menunjukkan respons berbeda terhadap pemupukan. *Acacia mangium* sebagai legum memiliki kemampuan fiksasi N₂, namun tetap responsif terhadap P dan K (Binkley et al., 2003). Sebaliknya, *Eucalyptus* spp. sangat responsif terhadap N dan P pada tanah-tanah tropis yang miskin hara (Gonçalves et al., 2013). Perbedaan strategi nutrisi antar-spesies ini menuntut formulasi pupuk lepas lambat yang tidak generik, melainkan disesuaikan dengan kebutuhan spesifik spesies dan fase pertumbuhannya.

2.4 Mekanisme Immobilisasi Nutrisi pada Matriks Nano Selulosa

Nano selulosa mengikat nutrisi melalui beberapa mekanisme yang dapat beroperasi secara simultan atau dominan tergantung jenis nano selulosa dan modifikasi permukaannya. Gugus sulfat pada CNC dan karboksil pada CNF teroksidasi TEMPO bermuatan negatif mengikat kation nutrisi seperti NH₄⁺ dan K⁺ melalui interaksi elektrostatik (Filpponen & Argyropoulos, 2010). Mekanisme ini sangat efektif untuk nutrisi kationik namun kurang optimal untuk anion seperti fosfat dan nitrat.

Gugus hidroksil pada nano selulosa dapat membentuk kompleks koordinasi dengan ion fosfat dan logam mikro (Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+}) (Lin & Dufresne, 2014). Kemampuan ini melengkapi mekanisme adsorpsi elektrostatis, memungkinkan matriks nano selulosa membawa berbagai jenis nutrisi makro dan mikro. CNF dan BC membentuk jaringan hidrogel tiga dimensi yang mampu mengenkapsulasi partikel pupuk (urea, KNO_3 , KH_2PO_4) dalam matriksnya. Nutrisi terperangkap secara fisik dan dilepaskan secara bertahap melalui mekanisme difusi dan *swelling* (Spagnol et al., 2012).

Nano selulosa dapat di-*cross-link* menggunakan agen seperti *epichlorohydrin*, *glutaraldehyde*, atau asam sitrat untuk membentuk jaringan yang lebih stabil. *Grafting* dengan polimer lain (PVA, PAA, kitosan) memungkinkan pengaturan laju pelepasan yang lebih presisi (Kassem et al., 2021). Perdebatan dalam literatur berkisar pada pilihan antara *cross-linking* yang kuat untuk durasi pelepasan lebih lama dengan risiko penurunan biodegradabilitas, atau *cross-linking* yang lemah untuk mempertahankan sifat ramah lingkungan namun dengan durasi pelepasan yang terbatas.

2.5 Mekanisme Pelepasan Nutrisi (Kinetika Pelepasan)

Pelepasan nutrisi dari matriks nano selulosa mengikuti beberapa model kinetik. Model *Higuchi* ($M_t/M_\infty = kH \cdot t^{1/2}$) menggambarkan pelepasan yang dikontrol difusi *Fickian*. Model *Korsmeyer-Peppas* ($M_t/M_\infty = k \cdot t^n$) memberikan informasi lebih lanjut tentang mekanisme transportasi: nilai $n < 0,5$ menunjukkan difusi *Fickian*, $0,5 < n < 1$ menunjukkan *anomalous transport*, dan $n > 1$ menunjukkan pelepasan yang dikontrol relaksasi matriks. Model *First-order* ($M_t/M_\infty = 1 - e^{-kt}$) menggambarkan pelepasan yang proporsional dengan konsentrasi nutrisi tersisa.

Studi oleh Kassem et al. (2021) menunjukkan bahwa pelepasan nutrisi dari komposit CNC-PVA mengikuti model *Korsmeyer-Peppas* dengan $n = 0,43\text{--}0,68$, mengindikasikan mekanisme *anomalous transport* yang melibatkan kombinasi difusi dan relaksasi matriks. Temuan ini konsisten dengan karakteristik hidrogel nano selulosa yang mengalami *swelling* saat menyerap air, di mana difusi nutrisi dan relaksasi rantai polimer terjadi secara bersamaan. Kesenjangan muncul ketika membandingkan data kinetik dari kondisi laboratorium dengan kondisi lapangan: faktor lingkungan seperti suhu, pH tanah, dan aktivitas mikroba dapat mengubah profil pelepasan secara signifikan.

2.6 Aplikasi pada Tanaman: Bukti Eksperimental

Sebagian besar bukti eksperimental mengenai efektivitas pupuk lepas lambat berbasis nano selulosa berasal dari studi pada tanaman pertanian, dengan aplikasi spesifik pada tanaman hutan yang masih terbatas. Sharma et al. (2024) melaporkan bahwa pupuk nitrogen berbasis CNF secara signifikan meningkatkan pertumbuhan *Vigna radiata* dengan efisiensi penggunaan N yang lebih tinggi dibandingkan pupuk konvensional. Channab et al. (2024), dalam tinjauan komprehensif, mengkonfirmasi bahwa nano selulosa mampu meningkatkan retensi nutrisi dalam tanah dan mengurangi pencucian hingga 70% pada berbagai sistem tanam.

Studi yang mensimulasikan kondisi hutan tropis menunjukkan bahwa penambahan nano selulosa ke dalam sistem pupuk dapat memperpanjang durasi ketersediaan N dari beberapa hari menjadi 45–90 hari (Pratama & Nisa, 2025). Temuan ini memiliki implikasi penting untuk konteks kehutanan Indonesia, di mana curah hujan tinggi mempercepat kehilangan nutrisi. Meskipun demikian, data empiris langsung pada spesies hutan tropis Indonesia seperti *Shorea leprosula*, *Dipterocarpus* spp., atau *Eucalyptus pellita* masih sangat langka. Kesenjangan ini menjadi tantangan utama dalam menggeneralisasi temuan dari sistem pertanian ke sistem kehutanan yang memiliki karakteristik tanah, iklim, dan fisiologi tanaman yang berbeda.

2.7 Keunggulan Nano Selulosa sebagai Matriks Pupuk Lepas Lambat untuk Tanaman Hutan

Berdasarkan sintesis literatur, nano selulosa menawarkan beberapa keunggulan spesifik untuk aplikasi kehutanan yang membedakannya dari material matriks lain. Tidak seperti matriks polimer

sintetis (*polyurethane*, *polyethylene*) yang meninggalkan residu mikroplastik di tanah hutan, nano selulosa terdegradasi sepenuhnya oleh mikroorganisme selulolitik dalam 6–18 bulan (Klemm et al., 2005). Produk degradasi (glukosa, CO₂, H₂O) tidak toksik dan bahkan dapat menjadi substrat karbon bagi mikroba tanah, menciptakan siklus nutrisi yang tertutup.

Hidrogel CNF dan BC mampu menyerap air 50–500 kali berat keringnya. Pada lahan hutan dengan musim kering yang terdefinisi, matriks ini berfungsi ganda sebagai reservoir air dan pembawa nutrisi, mengurangi stres kekeringan pada bibit pada fase kritis *establishment* (Channab et al., 2024). Kemampuan ini sangat relevan untuk konteks Indonesia yang memiliki pola curah hujan musiman dengan periode kemarau yang dapat berlangsung 3–6 bulan.

Indonesia menghasilkan jutaan ton limbah kayu, serbuk gergaji, pulp, dan *black liquor* per tahun dari industri HTI dan pengolahan kayu. Material ini merupakan sumber selulosa melimpah untuk produksi CNC dan CNF, menciptakan ekonomi sirkular dalam sektor kehutanan (Abdul Khalil et al., 2012). Argumentasi ini menegaskan bahwa pengembangan teknologi nano selulosa di Indonesia tidak hanya didorong oleh keunggulan teknologis semata, tetapi juga oleh ketersediaan bahan baku yang melimpah dan berkelanjutan.

Matriks nano selulosa bersifat *stimuli-responsive*: laju pelepasan nutrisi meningkat pada kondisi basah (musim hujan, irigasi) dan menurun pada kondisi kering, menyerupai pola kebutuhan nutrisi tanaman hutan tropis (Galdino et al., 2021). Sifat ini menghindarkan tanaman dari kelaparan nutrisi pada musim kering sekaligus mencegah pemborosan hara pada musim hujan. Berbeda dengan *coating* polimer sintetis yang cenderung menghambat interaksi biologi tanah, nano selulosa pada konsentrasi tertentu tidak menghambat kolonisasi mikoriza arbuskular pada akar tanaman—interaksi simbiotik yang krusial untuk penyerapan P pada tanah tropis yang miskin hara.

2.8 Formulasi dan Strategi Fabrikasi

Beberapa strategi formulasi yang dilaporkan dalam literatur menunjukkan *trade-off* antara kemudahan aplikasi dan kinerja pelepasan. Hidrogel CNF atau BC yang dibentuk melalui *cross-linking* (asam sitrat, Ca²⁺, atau *irradiasi gamma*) kemudian direndam dalam larutan pupuk menawarkan kapasitas muat nutrisi yang tinggi namun memerlukan penanganan khusus karena teksturnya yang lunak. Formulasi ini lebih cocok untuk aplikasi di pembibitan di mana kontrol lingkungan dapat dilakukan secara ketat.

Granul komposit nano selulosa-pupuk yang dipadatkan menjadi pelet melalui *spray drying* atau *freeze drying* menawarkan kemudahan aplikasi lapangan namun dengan kapasitas muat nutrisi yang lebih terbatas. Suspensi CNC atau CNF yang diaplikasikan sebagai lapisan (*coating*) pada butiran pupuk konvensional melalui *fluidized bed coating* atau *dip coating* menawarkan pendekatan yang lebih pragmatis—ketebalan lapisan 5–50 µm cukup untuk memodifikasi laju pelepasan tanpa mengubah sistem aplikasi pupuk yang sudah ada (Kassem et al., 2021).

Penambahan *nano clay* (montmorillonit, halloysit) atau hidroksiapatit pada matriks nano selulosa meningkatkan kapasitas adsorpsi P dan K, serta memperkuat struktur matriks (Liang et al., 2020). Pendekatan komposit ini menjanjikan solusi untuk kelemahan nano selulosa dalam mengikat anion nutrisi, namun menambah kompleksitas proses produksi dan biaya bahan baku. Pemilihan strategi formulasi pada akhirnya harus didasarkan pada spesies target, fase pertumbuhan, kondisi tapak, dan skala ekonomi yang diharapkan.

2.9 Efektivitas Agronomis

Sintesis data dari studi yang tersedia menunjukkan bahwa aplikasi pupuk lepas lambat berbasis nano selulosa menghasilkan peningkatan pertumbuhan tinggi 15–35% dibanding pupuk

konvensional pada fase pembibitan. Biomassa kering total meningkat 20–40%, dengan rasio akar-tunas yang lebih tinggi—indikasi perkembangan akar yang lebih baik dan kemampuan eksplorasi tanah yang lebih luas. Efisiensi penggunaan nutrisi meningkat dari rentang 30–50% pada pupuk konvensional menjadi 60–80% pada formulasi nano selulosa (Channab et al., 2024; Sharma et al., 2024).

Frekuensi pemupukan dapat dikurangi dari 3–4 kali per tahun menjadi 1–2 kali per tahun. Pengurangan ini memiliki implikasi ekonomi yang signifikan untuk area hutan yang luas dan sulit dijangkau, di mana biaya tenaga kerja dan transportasi menjadi komponen biaya terbesar. *Survival rate* bibit pada fase transplantasi ke lapangan juga meningkat 10–20% karena ketersediaan nutrisi yang lebih stabil selama periode adaptasi kritis.

Kendati demikian, sebagian besar studi masih pada skala laboratorium dan rumah kaca. Data lapangan jangka panjang (>2 tahun) pada tanaman hutan, terutama pada kondisi tanah tropis Indonesia, masih sangat terbatas. Keterbatasan ini menimbulkan pertanyaan kritis: apakah performa yang dicapai pada kondisi terkontrol dapat dipertahankan pada kompleksitas ekosistem hutan yang sesungguhnya? Jawaban atas pertanyaan ini menentukan apakah teknologi ini akan sekadar menjanjikan pada level laboratorium atau benar-benar memberikan dampak pada praktik silvikultur.

2.10 Implikasi Lingkungan

Dibanding pupuk konvensional dan pupuk lepas lambat berbasis polimer sintetis, matriks nano selulosa memberikan keuntungan lingkungan yang substansial. Retensi N hingga 70% lebih tinggi mengurangi kontaminasi nitrat pada air tanah dan sungai di sekitar area hutan, mencegah fenomena eutrofikasi yang merusak ekosistem perairan (RSC, 2024). Pelepasan N bertahap mengurangi surplus $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ di tanah yang menjadi substrat nitrifikasi-denitrifikasi, menurunkan emisi N_2O —gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global 298 kali lipat CO_2 —hingga 30–50%.

Tidak adanya akumulasi polimer sintetis di tanah hutan menghindarkan ekosistem dari ancaman mikroplastik yang semakin menjadi perhatian global dalam beberapa tahun terakhir. Nano selulosa berasal dari biomassa yang menyerap CO_2 selama pertumbuhan pohon, menciptakan siklus karbon yang netral atau bahkan negatif jika diproduksi dari limbah industri. Lebih jauh, material ini tidak toksik terhadap fauna tanah dan mikroorganisme, sehingga tidak mengganggu fungsi ekosistem tanah yang esensial untuk kesuburan jangka panjang.

2.11 Tantangan dan Keterbatasan

Meskipun menjanjikan, beberapa tantangan perlu diatasi sebelum teknologi ini dapat diadopsi secara luas dalam praktik kehutanan. Produksi CNC dan CNF dalam skala industri masih menghadapi kendala konsumsi energi tinggi—terutama untuk CNF melalui *high-pressure homogenization*—dan penggunaan bahan kimia (asam kuat untuk CNC). Produksi BC memerlukan waktu fermentasi 7–14 hari dengan *yield* yang terbatas, membuatnya kurang kompetitif secara ekonomi dibandingkan material lain.

Harga nano selulosa saat ini berkisar USD 10–100/kg tergantung jenis dan kemurnian, masih lebih tinggi dibanding polimer sintetis untuk *coating* pupuk (USD 2–5/kg). Tren biaya diproyeksikan menurun seiring berkembangnya teknologi produksi dan skala ekonomi (Nechyporchuk et al., 2016), namun kurva penurunan biaya ini belum dapat diprediksi dengan pasti.

Kondisi tropis menyajikan tantangan unik. Suhu tinggi (30–40°C), kelembaban ekstrem, dan aktivitas mikroba tanah tropis yang intensif dapat mempercepat degradasi matriks, memperpendek durasi pelepasan dibandingkan kondisi *temperate*. Formulasi dengan *cross-linking* yang lebih kuat atau komposit dengan *nano clay* diperlukan untuk mengkompensasi percepatan degradasi ini. Tanah

Ultisol dan Oxisol tropis yang dominan di area hutan Indonesia memiliki pH rendah (4–5,5) dan kandungan Al^{3+} serta Fe^{3+} yang tinggi. Pengaruh kondisi ini terhadap stabilitas dan kinerja matriks nano selulosa—khususnya interaksi antara ion Al^{3+} dan Fe^{3+} dengan gugus fungsional permukaan nano selulosa—masih perlu diteliti lebih lanjut.

Belum ada regulasi spesifik di Indonesia mengenai penggunaan nanomaterial dalam pupuk. Ketiadaan SNI dan protokol keamanan lingkungan untuk nano selulosa dalam aplikasi pertanian atau kehutanan menciptakan ketidakpastian hukum bagi produsen dan pengguna. Kekosongan regulasi ini perlu segera diisi mengingat potensi adopsi teknologi yang semakin nyata.

2.12 Arah Penelitian Masa Depan

Kesenjangan literatur yang paling mencolok adalah belum adanya formulasi pupuk lepas lambat nano selulosa yang spesifik dikembangkan dan diuji untuk spesies hutan tropis Indonesia. Sebagian besar data yang ada berasal dari spesies *temperate* atau tanaman pertanian. Penelitian mendatang perlu memprioritaskan pengembangan formulasi yang disesuaikan dengan karakteristik fisiologis spesies kunci seperti *Dipterocarpus*, *Acacia*, *Eucalyptus*, dan *Pinus*, serta menguji kinerjanya pada berbagai tipe tanah hutan tropis.

Uji lapangan jangka panjang (3–10 tahun) menjadi keniscayaan. Pertumbuhan tanaman hutan berlangsung dalam dekade, sehingga data jangka pendek dari rumah kaca tidak cukup untuk memprediksi kinerja sepanjang daur tanam. Studi tersebut harus mencakup pengukuran parameter ekosistem yang lebih luas, termasuk dinamika mikroba tanah, komunitas fauna tanah, dan siklus hara secara keseluruhan.

Pemanfaatan limbah industri kehutanan Indonesia—*black liquor*, serbuk gergaji, *pulp reject*—sebagai sumber nano selulosa berbiaya rendah membuka peluang untuk menekan biaya produksi secara signifikan. Pengembangan matriks nano selulosa *multi-responsive* yang peka terhadap pH, suhu, dan aktivitas enzim tanah dapat meningkatkan presisi pelepasan nutrisi. Integrasi dengan mikoriza dan bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (*plant growth promoting rhizobacteria*/PGPR) dalam satu formulasi menawarkan pendekatan holistik yang menggabungkan aspek fisik, kimia, dan biologi dalam manajemen nutrisi hutan.

Analisis siklus hidup (*Life Cycle Assessment*/LCA) dan analisis ekonomi yang komprehensif diperlukan untuk memberikan justifikasi objektif bagi adopsi teknologi ini. Studi toksikologi dan dampak jangka panjang nano selulosa terhadap ekosistem tanah hutan harus dilakukan secara paralel dengan pengembangan teknologi, bukan setelahnya. Pengembangan metode produksi nano selulosa berbasis *green chemistry*—melalui jalur enzimatis atau penggunaan *deep eutectic solvents*—dapat lebih jauh mengurangi jejak lingkungan dari teknologi ini sendiri.

KESIMPULAN DAN SARAN

Nano selulosa dalam tiga bentuk utamanya—CNC, CNF, dan BC—menawarkan kombinasi sifat yang menjadikannya kandidat matriks pupuk lepas lambat yang menjanjikan untuk konteks kehutanan: biokompatibilitas penuh, biodegradabilitas, kapasitas adsorpsi nutrisi melalui multiple mekanisme, kemampuan membentuk hidrogel dengan retensi air tinggi, dan responsivitas terhadap kondisi lingkungan. Mekanisme immobilisasi nutrisi beroperasi melalui adsorpsi elektrostatis, enkapsulasi fisik dalam jaringan hidrogel, pembentukan kompleks koordinasi, dan ikatan kimia melalui *cross-linking*, dengan kinetika pelepasan yang umumnya mengikuti model difusi anomali (*Korsmeyer-Peppas*) pada durasi efektif 45–120 hari.

Bukti eksperimental menunjukkan peningkatan pertumbuhan bibit 15–35%, efisiensi penggunaan nutrisi 60–80%, dan pengurangan kehilangan nutrisi akibat pencucian 40–70%

dibanding pupuk konvensional. Aplikasi pada sistem kehutanan memberikan keuntungan tambahan berupa pengurangan frekuensi pemupukan—yang krusial untuk area hutan luas dan terisolasi—serta peningkatan *survival rate* bibit pada fase transplantasi. Kompatibilitas dengan mikoriza dan mikroba tanah membedakan nano selulosa dari matriks polimer sintetis yang cenderung mengganggu interaksi biologi tanah.

Tantangan utama meliputi skalabilitas produksi yang masih terbatas, biaya yang belum kompetitif, ketidakpastian kinerja pada kondisi tanah dan iklim tropis Indonesia, serta ketiadaan kerangka regulasi. Potensi pemanfaatan limbah industri kehutanan sebagai bahan baku memberikan keunggulan komparatif bagi Indonesia untuk mengembangkan teknologi ini, namun keunggulan tersebut belum diimbangi dengan kapasitas penelitian dan pengembangan yang memadai.

Jalan menuju adopsi teknologi nano selulosa dalam praktik kehutanan Indonesia tidak terletak pada pembuktian lebih lanjut mengenai potensi teknologis—yang sudah cukup didukung oleh literatur—melainkan pada pengisian kesenjangan empiris yang spesifik untuk konteks lokal. Tanpa uji lapangan jangka panjang pada spesies dan kondisi tanah Indonesia, teknologi ini akan tetap berada pada ranah potensi yang belum terealisasi.

Berdasarkan temuan tinjauan ini, disarankan agar pemerintah dan sektor swasta mendorong riset kolaboratif antara institusi kehutanan, kimia material, dan nanoteknologi untuk pengembangan pupuk lepas lambat nano selulosa yang aplikatif untuk konteks Indonesia. Pendanaan penelitian harus diarahkan pada uji lapangan jangka panjang di berbagai tipe ekosistem hutan, bukan sekadar pengujian laboratorium yang terisolasi. Pengembangan kebijakan insentif untuk pemanfaatan limbah biomassa kehutanan sebagai bahan baku nano selulosa dapat menciptakan ekosistem industri yang mendukung. Penyusunan standar nasional (SNI) untuk pupuk nano selulosa dan protokol keamanan lingkungan terkait harus menjadi prioritas Badan Standardisasi Nasional dan kementerian terkait. Pada akhirnya, integrasi teknologi pupuk lepas lambat nano selulosa dalam program rehabilitasi hutan dan lahan (RHL) serta pengelolaan HTI nasional memerlukan komitmen lintas sektoral yang menghubungkan penelitian dasar, pengembangan teknologi, regulasi, dan praktik silvikultur di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Khalil, H.P.S., Bhat, A.H., & Ireana Yusra, A.F. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 963–979.
- Azeem, B., Ku Zaini, M.A.A., & Sarwar, N. (2014). Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release*, 181, 11–21.
- Binkley, D., Senock, R., Bird, S., & Cole, T.G. (2003). Twenty years of stand development in pure and mixed stands of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Acacia murrilliana*. *Forest Ecology and Management*, 182(1–3), 93–102.
- Channab, B.-E., El Idrissi, A., Essamlali, Y., Zahouily, M., & Abdellaoui, Y. (2024). Nanocellulose: Structure, modification, biodegradation and applications in agriculture as slow/controlled release fertilizer, superabsorbent, and crop protection: A review. *Journal of Environmental Management*, 347, 119928.
- Della Rocca, G., Barbetti, R., & Mugnozza, G.S. (2019). Nutrient management in forest nursery: A review. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 12(3), 198–207.
- Dufresne, A. (2013). *Nanocellulose: A New Ageless Bionanomaterial*. Wiley-VCH, Weinheim.

- Filpponen, I., & Argyropoulos, D.S. (2010). Regular linking of cellulose nanocrystals via click chemistry. *Biomacromolecules*, 11(4), 1060–1066.
- Galdino, L.S., de Oliveira, T.V., Borsagli, F.G.M., & Pereira, A.G. (2021). Cellulose-based hydrogels for controlled release of agrochemicals: A review. *Carbohydrate Polymers*, 265, 118074.
- Gonçalves, J.L.M., Alvares, C.A., Higa, A.R., et al. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6–27.
- Habibi, Y., Lucia, L.A., & Rojas, O.J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479–3500.
- Iguchi, M., Yamanaka, S., & Budhiono, A. (2000). Bacterial cellulose—a masterpiece of nature's arts. *Journal of Materials Science*, 35(2), 261–270.
- Isogai, A., Saito, T., & Fukuzumi, H. (2011). TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale*, 3(1), 71–85.
- Kassem, I., Kassab, Z., Salama, A., & Sehaqui, H. (2021). Cellulose nanocrystals-filled poly(vinyl alcohol) nanocomposites as waterborne coating materials of NPK fertilizer with slow release and water retention properties. *Industrial Crops and Products*, 168, 113614.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2022). *Statistik Kehutanan Indonesia 2022*. Jakarta: KLHK.
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358–3393.
- Lal, R. (2020). Soil health and productivity of forests. Dalam *Forest Ecology and Management* (Vol. 458, hlm. 117–135). Elsevier.
- Liang, R., Yuan, H., & Xi, G. (2020). Nanocellulose/clay nanocomposite as a matrix for controlled release of potassium fertilizer. *Applied Clay Science*, 195, 105734.
- Lin, N., & Dufresne, A. (2014). Nanocellulose in biomedicine: Current status and future prospect. *European Polymer Journal*, 59, 302–325.
- Nambiar, E.K.S., & Brown, A.G. (Eds.). (1997). *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. ACIAR/CSIRO/CIFOR, Canberra.
- Nechyporchuk, O., Belgacem, M.N., & Bras, J. (2016). Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, 93, 2–25.
- Pratama, A.W., & Nisa, K. (2025). Surface Engineering of Nanocellulose-Based Composites for Smart Slow-Release Fertilizers: A Short Review. *Indonesian Journal of Chemistry and Learning*, 4(2), 45–58.
- Royal Society of Chemistry. (2024). Modifying soluble NPK release with hydrophobized nanocellulose-based hydrogels for sustainable enhanced efficiency fertilizers. *Environmental Science: Nano*, 11(3), 892–905.
- Saito, T., Kimura, S., Nishiyama, Y., & Isogai, A. (2006). Cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules*, 8(8), 2485–2491.
- Sanchez, P.A. (2019). *Properties and Management of Soils in the Tropics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

- Sharma, N., Kochar, M., Singh, R., & Agrawal, R. (2024). Unveiling the potential of cellulose nanofibre based nitrogen fertilizer and its transformative effect on *Vigna radiata* (Mung Bean). *Frontiers in Plant Science*, 15, 1336884.
- Spagnol, C., Rodrigues, F.H.A., Pereira, A.G.B., et al. (2012). Hydrogels based on cellulose and chitin: Fabrication, properties, and applications. *Soft Matter*, 8(15), 4125–4132.
- Trenkel, M.E. (2010). *Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture* (2nd ed.). IFA, Paris.
- Turner, J., & Lambert, M. (2008). Nutrient cycling within a 27-year-old *Eucalyptus grandis* plantation in New South Wales, Australia. *Forest Ecology and Management*, 255(3–4), 655–668.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., & Melillo, J.M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494–499.