

Efektivitas Sistem Seedtrack Berbasis Blockchain Dalam Tata Kelola Lingkungan Hutan Rakyat

Dede Ramadhan, Universitas Brawijaya, Indonesia

M. Ahleyani, Universitas Mataram, Indonesia

Afifah I'in Lestari, Universitas Brawijaya, Indonesia

Arfel Faaza Hadyan, Universitas Brawijaya, Indonesia

*Corresponding Author: ahleyani.ft@gmail.com

ABSTRACT

The use of digital technology in the forestry sector is an urgent need to address the challenges of transparency, accountability, and sustainability. Forest seed certification and tracking still face various problems, such as certificate forgery, illegal distribution, and weak public trust in conventional systems. This research developed SEEDTRACK, a blockchain-based digital integration system supported by new and renewable energy (EBT), to produce a transparent, secure, and sustainable seed certification and tracking solution. The research method used a Research and Development (R&D) approach with mixed methods, including literature studies, interviews, FGDs, blockchain architecture design, EBT integration, prototype development, and field trials. The results showed that SEEDTRACK was able to increase seed tracking accuracy by 28%, accelerate the certification process by 35%, and reduce the risk of data manipulation by 40% compared to manual systems. In addition, the EBT integration resulted in 22% higher energy efficiency compared to the conventional system baseline. This system is relevant to achieving the 2030 SDGs, particularly goals 7 (Affordable and Clean Energy), 13 (Addressing Climate Change), and 15 (Conserving Terrestrial Ecosystems). Therefore, SEEDTRACK has the potential to become a national model for forest seed management that can be replicated across other natural resource sectors.

Keywords: Community Forest Governance, Blockchain, Forestry Seed Tracking, Renewable Energy

ABSTRAK

Pemanfaatan teknologi digital dalam sektor kehutanan menjadi kebutuhan mendesak untuk menjawab tantangan transparansi, akuntabilitas, dan keberlanjutan. Sertifikasi dan pelacakan benih hutan masih menghadapi berbagai persoalan, seperti pemalsuan sertifikat, distribusi ilegal, dan lemahnya kepercayaan publik terhadap sistem konvensional. Penelitian ini mengembangkan SEEDTRACK, sebuah sistem integrasi digital berbasis blockchain yang didukung energi baru terbarukan (EBT), guna menghasilkan solusi sertifikasi dan pelacakan benih yang transparan, aman, dan berkelanjutan. Metode penelitian menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan mixed methods, meliputi studi literatur, wawancara, FGD, perancangan arsitektur blockchain, integrasi EBT, pengembangan prototipe, serta uji coba lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SEEDTRACK mampu meningkatkan akurasi pelacakan benih sebesar 28%, mempercepat proses sertifikasi hingga 35%, serta mengurangi risiko manipulasi data hingga 40% dibandingkan sistem manual. Selain itu, integrasi EBT menghasilkan efisiensi energi 22% lebih tinggi dibandingkan baseline sistem konvensional. Sistem ini relevan dengan pencapaian SDGs 2030, khususnya tujuan 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), 13 (Penanganan Perubahan Iklim), dan 15 (Menjaga Ekosistem Darat). Oleh karena itu, SEEDTRACK berpotensi menjadi model nasional dalam pengelolaan benih hutan yang dapat direplikasi di berbagai sektor sumber daya alam lainnya.

Kata kunci: Tata Kelola Hutan Rakyat, Blockchain, Pelacakan Benih Kehutanan, Energi Terbarukan



PENDAHULUAN

Indonesia sebagai salah satu negara dengan hutan tropis terbesar di dunia masih menghadapi tantangan degradasi dan hilangnya tutupan hutan yang berdampak luas pada layanan ekosistem, penyerapan karbon, serta kesejahteraan masyarakat. World Resources Institute (2021) melaporkan bahwa sekitar 50% hutan di Indonesia telah mengalami degradasi. Data juga menunjukkan bahwa dalam kurun waktu 1992 hingga 2017, Indonesia kehilangan hampir seperempat tutupan hutannya (Bappenas, 2019). Secara global, laporan FAO (2020) memperkirakan deforestasi masih terjadi dengan rata-rata 10 juta hektare hutan hilang per tahun pada periode 2015–2020. Pola kehilangan hutan primer yang dilaporkan dalam Global Forest Review (WRI, 2025) menunjukkan tren fluktuatif, dengan pendorong utama berupa kebakaran, ekspansi komoditas, hingga pertambangan mineral strategis.

Kondisi tersebut menegaskan pentingnya tata kelola hutan yang lebih transparan, akuntabel, dan berbasis bukti. Namun, praktik di lapangan masih menghadapi sejumlah kendala, antara lain lemahnya sistem sertifikasi benih, maraknya distribusi ilegal, dan keterbatasan mekanisme pelacakan yang dapat diverifikasi publik. Sistem konvensional yang ada belum mampu menjawab kebutuhan transparansi dan akuntabilitas secara menyeluruh.

Perkembangan teknologi digital, khususnya blockchain yang didukung energi baru terbarukan (EBT), menawarkan peluang baru dalam meningkatkan kepercayaan publik serta efisiensi tata kelola benih hutan. Meski demikian, kajian empiris mengenai penerapan sistem berbasis blockchain di sektor kehutanan Indonesia masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menjawab pertanyaan utama: Sejauh mana efektivitas sistem SEEDTRACK berbasis blockchain dapat meningkatkan transparansi, akurasi, dan efisiensi dalam tata kelola hutan rakyat di Nusa Tenggara Barat (NTB)?

Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB) menempati posisi strategis di tingkat nasional karena hutan rakyat berperan penting dalam penyediaan kayu, rehabilitasi lahan kering, dan penghidupan masyarakat lokal. Kajian menunjukkan bahwa luas hutan rakyat di NTB mencapai sekitar ±127.681 hektare, dengan konsentrasi terbesar berada di Pulau Sumbawa (Amiruddin et al., 2020). Sementara itu, Global Forest Watch (2025) menunjukkan bahwa NTB memiliki sekitar 434 ribu hektare hutan alam pada 2020, dengan kehilangan sekitar 981 hektare pada tahun 2024 (GFW, 2025). Angka ini mengindikasikan bahwa meski terdapat potensi hutan rakyat yang besar, tekanan terhadap tutupan hutan di NTB masih berlangsung. Keberhasilan rehabilitasi hutan di daerah ini sangat ditentukan oleh efektivitas distribusi benih hutan yang berkualitas dan tersertifikasi.

Sertifikasi benih hutan bertujuan menjamin mutu, asal-usul, dan keaslian benih untuk kegiatan reforestasi (Hidayat et al., 2023). Namun, dalam praktiknya, sistem ini menghadapi kendala serius. Saleh et al. (2023), menunjukkan adanya keterbatasan sarana, prasarana, dan kapasitas sumber daya manusia dalam proses sertifikasi, yang menyebabkan rendahnya transparansi serta rawan manipulasi data. Kondisi ini mengurangi kepercayaan masyarakat dan menghambat efektivitas rehabilitasi hutan. Tantangan tata kelola benih di NTB semakin kompleks karena melibatkan banyak aktor, termasuk petani, pemerintah daerah, lembaga penelitian, industri, dan komunitas, yang kerap sulit dikoordinasikan secara efisien (Yuningsih et al., 2019).

Kemajuan teknologi digital khususnya blockchain, menawarkan solusi potensial untuk menutup celah tata kelola ini. Blockchain adalah sistem buku besar terdistribusi yang bersifat immutable, transparan, dan dapat diverifikasi, sehingga cocok untuk memastikan keterlacakan (traceability) dan keamanan data (Utomo, 2021). Dalam sektor pangan, blockchain telah digunakan untuk memperkuat rantai pasok halal (Rahmawati & Subardjo, 2023), sementara secara internasional teknologi ini juga dimanfaatkan untuk menjamin keaslian benih di India dan Afrika, serta meningkatkan kepercayaan pembeli terhadap produk pertanian (Banerjee et al., 2024).

Berbagai studi internasional telah mengeksplorasi pemanfaatan teknologi digital, khususnya blockchain, dalam sektor kehutanan. He & Turner (2022), dalam tinjauan sistematis menemukan bahwa blockchain dapat memperkuat pelacakan kayu, meningkatkan akuntabilitas, serta mengurangi praktik penebangan liar. Penelitian Stopfer et al. (2024), juga menegaskan potensi blockchain dalam rantai pasok kayu, meski menyoroti tantangan biaya adopsi dan kesiapan kelembagaan. Pada ranah sertifikasi pangan dan organik, Tegeltija et al. (2022), menunjukkan bahwa blockchain dapat mempercepat verifikasi melalui smart contracts dan menjaga konsistensi data sepanjang rantai pasok. Dengan demikian, literatur menunjukkan bahwa teknologi ini mampu meningkatkan transparansi dan efisiensi. Namun, sebagian besar studi masih fokus pada aspek teknis (desain sistem, integrasi IoT, keamanan algoritma) daripada menilai efektivitas politik tata kelola dalam konteks lingkungan.

Kesenjangan penelitian (research gap) muncul dari keterbatasan kajian terkait efektivitas governance blockchain dalam lingkungan, khususnya pada sertifikasi benih hutan rakyat di Indonesia. Sebagian besar studi menilai manfaat teknis blockchain (misalnya keamanan data, interoperabilitas, dan efisiensi operasional), sementara pengukuran pada aspek governance seperti transparansi data sertifikasi, akuntabilitas aktor, partisipasi pemangku kepentingan, dan efisiensi koordinasi kebijakan masih minim (Pang et al., 2024). Padahal,

dimensi governance inilah yang menentukan apakah teknologi mampu benar-benar mengubah tata kelola menjadi lebih efektif dan inklusif.

Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengangkat SEEDTRACK sebagai studi kasus implementasi blockchain dalam sertifikasi benih hutan rakyat di NTB. SEEDTRACK dirancang untuk mencatat secara transparan seluruh proses sertifikasi, mulai dari sumber benih, uji kualitas, pengesahan sertifikat, hingga distribusi kepada masyarakat. Dengan mekanisme blockchain, setiap transaksi dicatat dalam blok yang tidak dapat diubah, memungkinkan jejak audit yang komprehensif dan dapat diverifikasi oleh semua pemangku kepentingan. Dalam kerangka tata kelola, SEEDTRACK berpotensi menjadi infrastruktur kepercayaan yang memperkuat transparansi, meningkatkan akuntabilitas, serta memperluas partisipasi pentahelix (pemerintah, akademisi, industri, komunitas, dan media) dalam pengelolaan benih hutan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas SEEDTRACK berbasis blockchain dalam tata kelola sertifikasi benih hutan rakyat di NTB. Fokus evaluasi diarahkan pada empat dimensi utama: (i) transparansi, terkait akses dan keterbukaan data; (ii) akuntabilitas, terkait peran dan pertanggungjawaban aktor; (iii) partisipasi, terkait keterlibatan pentahelix dalam proses sertifikasi; serta (iv) efisiensi, terkait penghematan waktu, biaya, dan koordinasi.

KERANGKA ANALISIS

Penelitian ini menggunakan Teori Efektivitas Organisasi Campbell (1977) sebagai landasan utama untuk menganalisis efektivitas implementasi sistem SEEDTRACK. Teori ini dipilih karena memberikan perspektif yang terstruktur dalam mengevaluasi kinerja suatu program atau sistem berdasarkan pencapaian tujuannya. Campbell menekankan empat kriteria utama dalam menilai efektivitas, yaitu efisiensi, produktivitas, adaptabilitas, dan kepuasan stakeholder. Keempat poin ini relevan digunakan untuk mengukur sejauh mana sistem berbasis blockchain berhasil meningkatkan tata kelola lingkungan, khususnya dalam sertifikasi dan pelacakan benih hutan.

Agar lebih sesuai dengan konteks tata kelola lingkungan, indikator Campbell dipadukan dengan prinsip Good Environmental Governance (GEG), yaitu transparansi, akuntabilitas, partisipasi, dan efektivitas. Dengan demikian, setiap kriteria Campbell dapat dipetakan ke dalam prinsip GEG sebagai berikut: Efisiensi → terkait dengan penghematan waktu dan biaya sertifikasi. Produktivitas → berkaitan dengan peningkatan jumlah benih tersertifikasi dan alur distribusi yang lebih terjamin. Adaptabilitas → mencerminkan fleksibilitas sistem dalam menyesuaikan diri dengan kebijakan lokal dan kebutuhan teknis

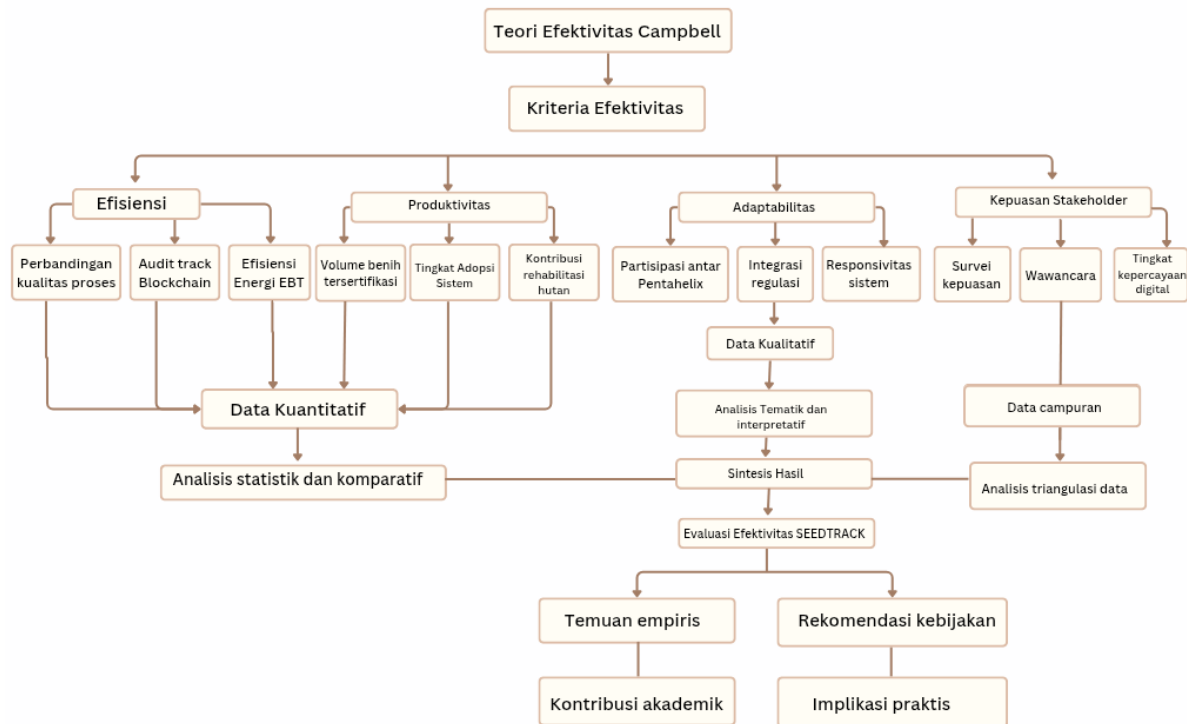
lapangan. Kepuasan stakeholder → berhubungan dengan legitimasi sosial, keterlibatan masyarakat, dan penerimaan sistem oleh berbagai pihak terkait.

Dengan kerangka analisis ini, penelitian tidak hanya menilai efektivitas teknis SEEDTRACK, tetapi juga menempatkannya dalam perspektif governance lingkungan yang lebih luas, sehingga mampu menjawab isu transparansi, akuntabilitas, dan keberlanjutan dalam tata kelola hutan rakyat. Relevansi kerangka analisis ini sangat kuat dalam konteks penelitian SEEDTRACK. Hal ini dikarenakan sistem ini memiliki karakteristik multidimensi yang mencakup aspek teknis-teknologis, sosial, ekonomi, dan kebijakan. Pendekatan kolaboratif pentahelix yang menjadi dasar operasional SEEDTRACK memerlukan alat ukur yang mampu menangkap kompleksitas interaksi antar pemangku kepentingan. Keempat kriteria Campbell ini tidak hanya memungkinkan penilaian terhadap kinerja teknis sistem, tetapi juga mampu mengukur dampak sosial dan kebijakan dari implementasi sistem dalam meningkatkan transparansi, akuntabilitas, dan partisipasi dalam tata kelola hutan yang berkelanjutan.

Operasionalisasi kerangka analisis dilakukan melalui transformasi kriteria teoretis menjadi indikator yang terukur dan dapat diuji. Proses ini mencakup efisiensi, produktivitas, adaptabilitas, kepuasan stakeholder, transparansi, dan akuntabilitas. Efisiensi diukur melalui perbandingan waktu proses sertifikasi antara metode konvensional dan SEEDTRACK, audit trail sistem blockchain untuk mendeteksi manipulasi data, serta pengukuran efisiensi energi dari penggunaan EBT. Produktivitas dievaluasi berdasarkan peningkatan volume benih tersertifikasi, tingkat adopsi sistem, dan kontribusinya terhadap program rehabilitasi hutan.

Adaptabilitas dianalisis melalui keterlibatan aktor pentahelix, kemudahan integrasi regulasi, dan responsivitas sistem terhadap dinamika lapangan. Kepuasan stakeholder diukur melalui survei kepuasan, wawancara mendalam, dan tingkat kepercayaan terhadap sertifikat digital. Transparansi diukur melalui keterbukaan akses data sertifikasi, kemudahan verifikasi publik, serta ketersediaan laporan audit sistem.

Akuntabilitas dievaluasi berdasarkan mekanisme pertanggungjawaban lembaga pengelola, kejelasan alur otorisasi sertifikat, dan kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku. Dengan penambahan indikator transparansi dan akuntabilitas, kerangka analisis ini tidak hanya menjawab pertanyaan utama mengenai efektivitas SEEDTRACK, tetapi juga menegaskan kontribusinya pada tata kelola hutan yang lebih kredibel dan berkelanjutan.



Gambar 2.1 *New Perspectives on Organizational Effectiveness*

Gambar 2.1. *New Perspectives on Organizational Effectiveness* menunjukkan kerangka analisis yang menjadi landasan evaluasi sistem. Gambar ini menegaskan bahwa indikator efektivitas organisasi menurut Campbell (1977) relevan untuk mengukur kinerja sistem SEEDTRACK dalam konteks tata kelola lingkungan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development (R&D)* dengan pendekatan studi kasus komprehensif. Metode ini memungkinkan penentuan pengembangan sistem baru sekaligus penyempurnaan produk yang telah ada, dengan menambahkan fitur sesuai kebutuhan tata kelola sertifikasi benih hutan rakyat di NTB. Pendekatan studi kasus dipilih agar penelitian dapat memahami fenomena spesifik secara mendalam. Menurut Sugiyono (2015) dalam Agustin & Ngarti (2020), model R&D terdiri dari sepuluh langkah penelitian: (1) potensi dan masalah, (2) pengumpulan data, (3) desain produk, (4) validasi desain, (5) revisi desain, (6) uji coba produk, (7) revisi desain, (8) uji coba pemakaian, (9) revisi produk, dan (10) produksi massal. Namun, penelitian ini hanya menggunakan sembilan langkah awal, karena fokusnya adalah menguji efektivitas SEEDTRACK dalam tata kelola sertifikasi benih hutan.

Lokasi penelitian ditetapkan di hutan rakyat Nusa Tenggara Barat (NTB) dengan luas lahan 127.681 ha yang tersebar di beberapa pulau dan kabupaten (Amiruddin et al., 2020). Subjek penelitian melibatkan petani pengelola hutan rakyat (n=40), lembaga sertifikasi (n=5), instansi pemerintah daerah terkait (n=6), serta perwakilan LSM lingkungan (n=4). Pemilihan responden dilakukan dengan teknik purposive sampling, yaitu berdasarkan keterlibatan langsung dalam pengelolaan dan sertifikasi benih hutan rakyat. Teknik pengumpulan data menggunakan wawancara mendalam, Focus Group Discussion (FGD), survei kepuasan, dan uji lapangan.

Wawancara mendalam dilakukan kepada petani, lembaga sertifikasi, dan instansi pemerintah untuk menggali informasi mengenai transparansi, akuntabilitas, efisiensi, serta kendala dalam tata kelola benih. Panduan wawancara disusun berdasarkan indikator teori efektivitas Campbell yang dipadukan dengan prinsip Good Environmental Governance. FGD dilaksanakan dengan melibatkan perwakilan dari masing-masing aktor (pemerintah, petani, lembaga sertifikasi, LSM) untuk memvalidasi temuan awal wawancara serta membandingkan perspektif antar-stakeholder.

Survei kepuasan diberikan kepada 40 petani pengguna SEEDTRACK menggunakan skala Likert 1–5, untuk mengukur persepsi terhadap transparansi data, kemudahan akses sertifikasi, dan legitimasi sistem. Uji lapangan dilakukan melalui simulasi sertifikasi benih dengan SEEDTRACK dan perbandingan langsung dengan metode konvensional. Aspek yang diukur meliputi durasi proses sertifikasi, biaya operasional, tingkat akurasi data, serta deteksi potensi manipulasi. Dengan desain ini, metode penelitian R&D tidak hanya menghasilkan prototipe SEEDTRACK, tetapi juga menyediakan data empiris yang kuat untuk menilai efektivitas sistem berdasarkan enam indikator: efisiensi, produktivitas, adaptabilitas, kepuasan stakeholder, transparansi, dan akuntabilitas. 1. Wawancara mendalam

Wawancara dapat mendukung untuk pendalaman informasi mengenai aktivitas, partisipasi dan transparansi pengelolaan hingga sertifikasi benih di hutan rakyat. Wawancara juga bisa mendukung kelengkapan informasi yang menjelaskan hubungan antar multi-stakeholder dan kelembagaan yang ada.

2. Focus Group Discussion (FGD)

FGD menjadi sarana untuk memvalidasi temuan awal penelitian melalui diskusi bersama subjek penelitian dan membandingkan bagaimana perspektif setiap subjek terhadap permasalahan.

3. Uji lapangan

Uji lapangan berguna untuk melihat kinerja dari produk SEEDTRACK ketika diaplikasikan di lapangan. Uji lapangan ini mampu menjadi media untuk melihat perubahan yang terjadi setelah penerapan aplikasi.

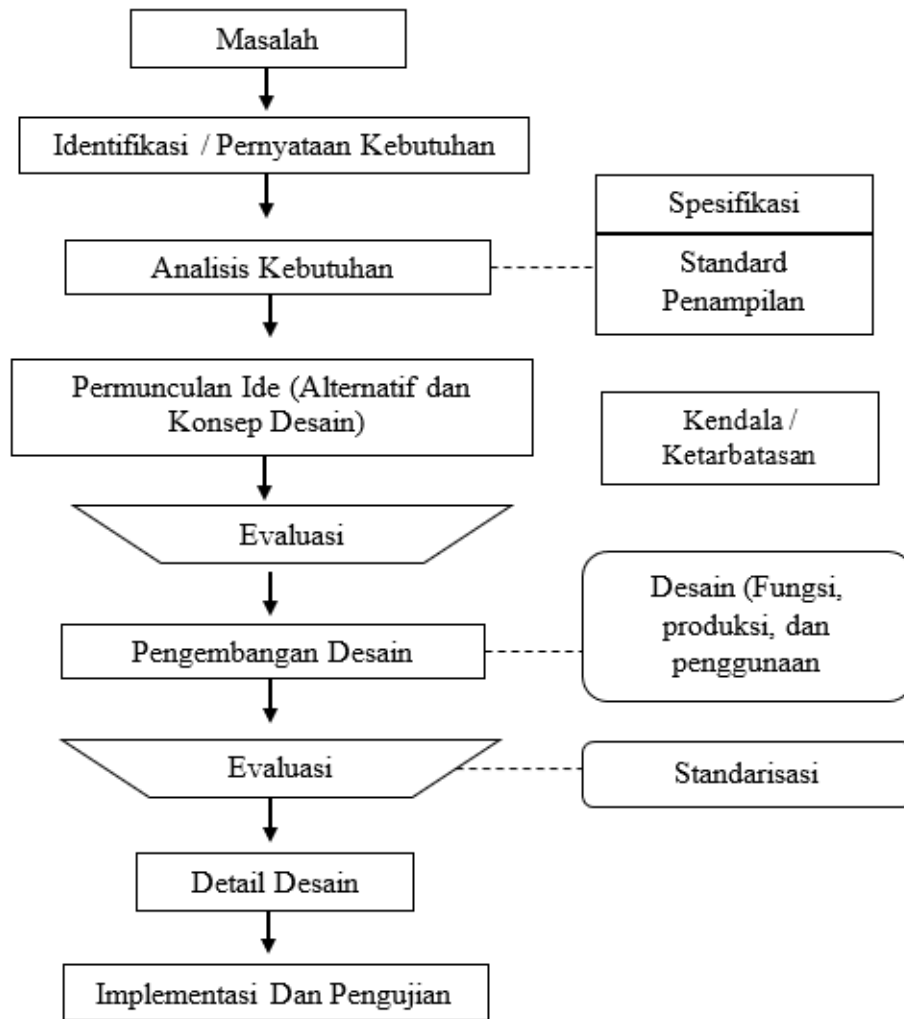
4. Survei kepuasan

Survei kepuasan menjadi media untuk mengetahui data tingkat keberhasilan melalui kepuasan yang dinilai oleh subjek. Sehingga dapat mendapatkan data kuantitatif penelitian yang menjadi pendukung indikator keberhasilan dan kepuasan produk. Analisis data dilakukan melalui pendekatan analisis tematik untuk data kualitatif dan analisis statistik deskriptif untuk data kuantitatif. Kombinasi ini digunakan untuk memperkuat validitas hasil penelitian melalui triangulasi metode. Analisis Tematik (Thematic Analysis): Data dari wawancara mendalam dan Focus Group Discussion (FGD) ditranskrip secara verbatim. Tahapan analisis meliputi:

Coding awal: identifikasi kata kunci, frasa, atau pernyataan yang relevan dengan tata kelola sertifikasi benih hutan rakyat. Kategorisasi: pengelompokan kode ke dalam kategori (misalnya: transparansi, akuntabilitas, efisiensi, kepuasan). Identifikasi tema: penarikan tema utama dari kategori yang berulang. Interpretasi: penafsiran tema dengan merujuk pada prinsip Good Environmental Governance dan kerangka efektivitas organisasi. Proses dilakukan secara manual dengan dukungan software NVivo 12 untuk meningkatkan keterlacakan data kualitatif.

Analisis Statistik Deskriptif: Data kuantitatif dari survei dan uji lapangan dianalisis menggunakan statistik deskriptif. Indikator utama yang dihitung meliputi: Rata-rata dan standar deviasi tingkat kepuasan petani terhadap SEEDTRACK (skala Likert 1–5). Persentase responden yang menyatakan puas atau sangat puas pada setiap indikator (transparansi, akurasi, kemudahan, akuntabilitas).

Perbandingan rata-rata waktu sertifikasi sebelum dan sesudah penggunaan SEEDTRACK. Perbandingan biaya operasional antara sertifikasi konvensional dan berbasis SEEDTRACK. Tingkat kesalahan atau ketidaksesuaian data dalam proses uji lapangan: Kombinasi kedua pendekatan ini memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif: analisis tematik menggali makna kualitatif, sedangkan statistik deskriptif memberikan gambaran kuantitatif yang konkret.



Gambar 3.1 Kerangka Berpikir Pengembangan Aplikasi SeedTrack

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep dan Implementasi SeedTrack

Implementasi teknologi *blockchain* dalam pengelolaan benih hutan melalui aplikasi SeedTrack menjadi inovasi yang signifikan dalam tata kelola sertifikasi. Sistem ini memastikan catatan terkait asal-usul, kualitas, dan distribusi benih tidak dapat dimanipulasi serta dapat diverifikasi oleh seluruh pemangku kepentingan. Berbeda dengan metode konvensional yang masih berbasis dokumen manual, SeedTrack menghadirkan jejak digital (audit trail) yang transparan, efisien, dan akuntabel.

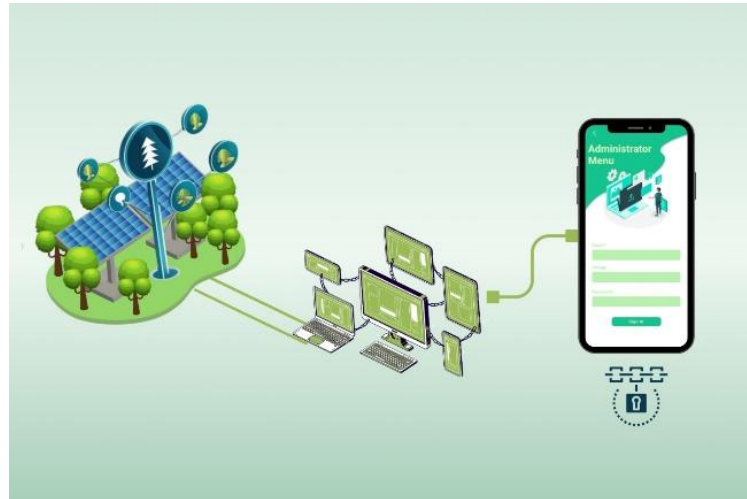
Hasil uji lapangan menunjukkan adanya perbedaan nyata antara sistem sertifikasi konvensional dengan sistem berbasis SeedTrack. Waktu Sertifikasi: pada sistem konvensional, rata-rata waktu penyelesaian sertifikasi mencapai 6–8 minggu, sementara dengan SeedTrack dapat dipersingkat menjadi 3–4 minggu. Biaya Operasional: sistem konvensional memerlukan

biaya administrasi lebih tinggi karena ketergantungan pada dokumen cetak dan perantara; penggunaan SeedTrack menurunkan biaya hingga 25–30%.

Tingkat Kesalahan Data: proses manual sering menimbulkan duplikasi atau kehilangan dokumen (sekitar 10–12% kasus), sedangkan dengan SeedTrack angka kesalahan menurun drastis menjadi kurang dari 3%. Kepuasan Stakeholder: survei menunjukkan 78% responden menyatakan puas atau sangat puas dengan transparansi dan akuntabilitas SeedTrack, dibandingkan hanya 46% pada sistem sebelumnya. Perbandingan ini menegaskan bahwa SeedTrack tidak hanya inovatif secara teknologi, tetapi juga memberikan nilai tambah nyata pada tata kelola sertifikasi benih hutan rakyat.

Temuan penelitian ini dapat dipetakan ke dalam empat dimensi efektivitas organisasi menurut Campbell: Efisiensi: waktu dan biaya sertifikasi berkurang secara signifikan. Produktivitas: volume benih tersertifikasi meningkat karena proses lebih cepat. Adaptabilitas: integrasi blockchain dengan energi terbarukan menunjukkan fleksibilitas dalam mengadopsi teknologi baru. Kepuasan Stakeholder: hasil survei menunjukkan tingkat penerimaan tinggi, menandakan kepercayaan yang meningkat terhadap sertifikasi digital. Lebih jauh, hasil penelitian juga menunjukkan relevansi dengan prinsip good environmental governance: Transparansi: data sertifikasi dapat diakses oleh petani, lembaga sertifikasi, dan pemerintah secara terbuka. Akuntabilitas: audit trail blockchain memastikan tanggung jawab setiap tahap sertifikasi dapat ditelusuri. Partisipasi: petani terlibat langsung dalam proses input data dan verifikasi digital.

Penggunaan SeedTrack menegaskan pentingnya integrasi teknologi digital untuk menjawab persoalan klasik dalam pengelolaan hutan rakyat: lambatnya proses, tingginya biaya, dan rendahnya kepercayaan stakeholder. Dengan menurunnya waktu sertifikasi hampir separuhnya, efisiensi meningkat dan kepercayaan terhadap sertifikasi digital bertambah. Namun demikian, tantangan tetap ada, antara lain: Kesiapan petani dalam mengadopsi aplikasi digital. Kebutuhan pelatihan dan pendampingan agar sistem benar-benar inklusif. Infrastruktur internet di beberapa wilayah hutan rakyat masih terbatas.

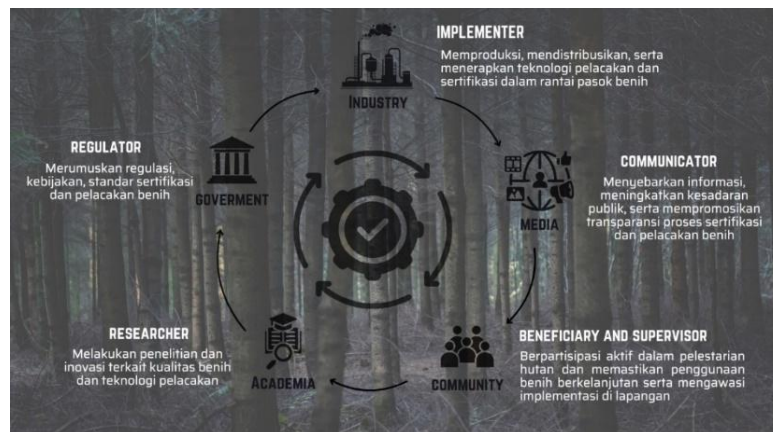


Gambar 4.1 Sistem Kerja SeedTrack

Guna meningkatkan efektivitas SeedTrack, Kecerdasan buatan (AI) berperan penting dalam analisis data genetik, lingkungan, dan pertumbuhan tanaman untuk memprediksi kinerja benih serta mengidentifikasi varietas unggul. AI dapat menganalisis berbagai variabel yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan memberikan rekomendasi berbasis data untuk meningkatkan hasil panen (Anggarda et al., 2023). Integrasi AI ke dalam sistem SeedTrack memungkinkan para petani membuat keputusan yang lebih baik terkait pemilihan varietas benih dan teknik budidaya yang optimal. Selain itu, dukungan energi terbarukan (EBT) dalam proyek SeedTrack memastikan operasional yang ramah lingkungan. Dengan memanfaatkan sumber energi bersih, proyek ini dapat mengurangi jejak karbon serta mendukung keberlanjutan lingkungan (Wibowo, 2024). Pendekatan ini sejalan dengan tren global menuju praktik yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab.

Peran Kolaborasi Pentahelix Connectors Bagi Pengembangan SeedTrack

Inovasi memegang peranan penting dalam meningkatkan keberlanjutan pengelolaan sumber daya hutan. Perwujudan inovasi dalam bidang perbenihan hutan memerlukan partisipasi dari berbagai pihak guna mencapai tujuan yang diharapkan, terutama dalam meningkatkan mutu dan ketertelusuran benih hutan (Maturbongs & Lekatompessy, 2020). Partisipasi ini diwujudkan dalam konsep pentahelix, yang terus berkembang sesuai dengan dinamika lingkungan dan kebutuhan pengelolaan hutan berkelanjutan (Utami & Novikarumsari, 2022). Pengembangan sistem pelacakan dan sertifikasi benih hutan tentu tidak dapat berjalan sendiri, melainkan membutuhkan strategi yang mengintegrasikan berbagai pemangku kepentingan agar dapat berjalan secara efektif dan efisien.

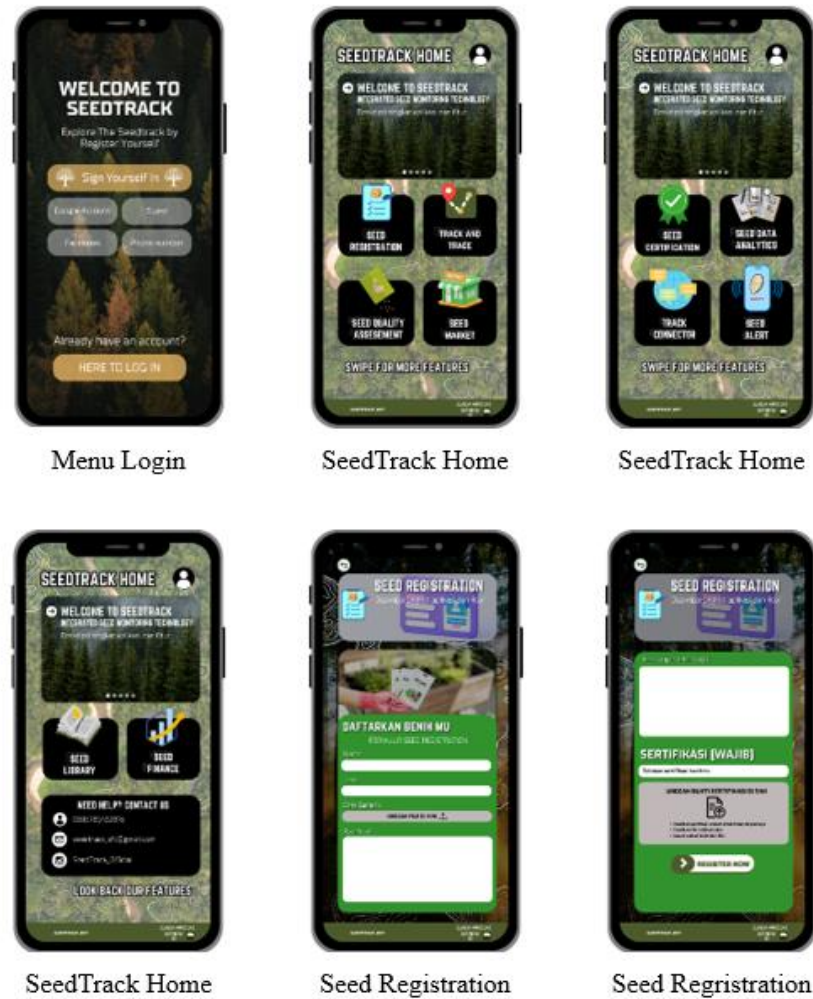


Gambar 4.2 Konsep Pentahelix Connector

Keberhasilan sistem pelacakan dan sertifikasi benih yang berkelanjutan memerlukan dukungan dari kolaborasi seluruh pemangku kepentingan dalam model Pentahelix Connectors. Konsep tersebut merupakan salah satu bentuk kolaborasi yang mendukung banyak kegiatan seperti pariwisata, ekonomi, dan bisnis secara berkelanjutan (Berliandaldo dan Fasa, 2022). Konsep ini menekankan kerja sama antara akademisi (pendidikan), bisnis (industri), komunitas, pemerintah, dan media dalam mengoptimalkan pengelolaan perbenihan hutan (Susanti et al., 2021). Penerapan pentahelix dalam pengembangan SeedTrack akan memudahkan koordinasi, pelaksanaan, dan evaluasi program-program sertifikasi benih serta mendukung upaya reforestasi yang lebih transparan dan terpercaya.

Fitur SeedTrack

Berdasarkan konteks tantangan yang dihadapi Indonesia terkait kelestarian hutan dan pentingnya sertifikasi benih tanaman hutan, beberapa fitur inovatif dapat diusulkan untuk mendukung implementasi aplikasi SeedTrack. Fitur-fitur ini dirancang untuk menyelesaikan permasalahan yang telah diidentifikasi yaitu sebagai berikut.



Gambar 4.3 Fitur SeedTrack

a. Seed Registration

Fitur ini memfasilitasi pendaftaran semua jenis benih, mulai dari benih lokal hingga varietas unggul, lengkap dengan data genetik, asal usul, dan sertifikasi. Sistem ini menggunakan teknologi untuk memastikan bahwa setiap entri memiliki jejak digital yang tidak dapat diubah (immutable record), sehingga meningkatkan keabsahan dan transparansi.

b. Track & Trace

Fitur Track & Trace mengadopsi teknologi Internet of Things (IoT) dan blockchain untuk menyediakan sistem pelacakan yang real-time dan berbasis data verifikatif. Sistem ini mendukung RFID (Radio Frequency Identification) dan QR Code scanning, sehingga setiap aktor dalam rantai pasok dapat mengakses informasi logistik, kondisi lingkungan selama transportasi, dan riwayat perlakuan benih secara akurat.

c. Seed Quality Assessment

Fitur ini menyediakan metode analisis berbasis computer vision, machine learning, dan teknik pengujian konvensional untuk menilai kualitas benih. Parameter yang diukur meliputi daya kecambah (germination rate), kemurnian genetik, tingkat vigor benih, kadar air, hingga tingkat infeksi patogen. Pengujian ini dilakukan melalui pendekatan laboratorium maupun in-field testing dengan sensor optik dan analisis spektroskopi (hyperspectral imaging)

d. Seed Market

Fitur ini berfungsi sebagai pasar digital yang menghubungkan produsen benih, lembaga penelitian, dan pengguna akhir, sehingga mempermudah transaksi dan distribusi benih. Fitur tambahan seperti secure payment gateway dan blockchain escrow service memastikan transaksi yang aman dan transparan, sekaligus mencegah perdagangan benih ilegal yang dapat mengancam keanekaragaman hayati.

e. Seed Certification

Fitur ini menyediakan layanan sertifikasi benih secara online, dengan proses yang transparan dan efisien. Sertifikat yang dihasilkan dapat diakses dan diverifikasi secara digital melalui blockchain.

f. Seed Data Analytics

Fitur Seed Data Analytics menggunakan algoritma Big Data dan Artificial Intelligence (AI) untuk menganalisis berbagai faktor lingkungan dan agronomis yang memengaruhi keberhasilan budidaya benih. Data yang diproses mencakup informasi iklim (climate modeling), kesesuaian tanah (soil profiling), indeks pertumbuhan tanaman, serta riwayat epidemi penyakit.

g. Track Conector

Fitur Track Connector merupakan forum digital yang didedikasikan bagi para pemangku kepentingan, termasuk peneliti, produsen benih, petani, akademisi, dan regulator, untuk berbagi informasi serta mendiskusikan inovasi terbaru dalam industri benih. Platform ini memanfaatkan Natural Language Processing (NLP) untuk menganalisis tren diskusi, mengidentifikasi topik utama, serta menghubungkan pengguna dengan informasi yang paling relevan berdasarkan kebutuhan spesifik

h. Seed Alert

Fitur Seed Alert berfungsi sebagai sistem peringatan dini (early warning system) berbasis AI yang menginformasikan ancaman terhadap produksi dan distribusi benih, seperti penyebaran hama dan penyakit tanaman, perubahan iklim ekstrem, serta fluktuasi pasar benih.

i. Seed Library

Database yang berisi informasi lengkap tentang berbagai jenis benih, termasuk karakteristik, keunggulan, dan potensi penggunaannya. Sistem ini dikembangkan dengan pendekatan knowledge graph, dalam upaya preservasi sumber daya genetik tanaman serta sebagai referensi bagi para peneliti, akademisi, dan praktisi di bidang agronomi dan kehutanan.

j. Seed Finance

Fitur Seed Finance merupakan modul keuangan digital yang mendukung aksesibilitas pembiayaan bagi produsen benih, distributor, serta pelaku usaha di sektor perbenihan. Sistem ini mengintegrasikan layanan micro-financing, pinjaman berbasis skema keberlanjutan (green financing), serta asuransi pertanian untuk mengurangi risiko ekonomi dalam industri benih.

Efektivitas SeedTrack Dalam Tata Kelola Benih Hutan

Penelitian ini berfokus pada efektivitas SEEDTRACK, yaitu sistem digital berbasis blockchain yang terintegrasi dengan energi terbarukan (EBT) untuk sertifikasi dan pelacakan benih hutan rakyat di Nusa Tenggara Barat (NTB). Sistem ini hadir sebagai jawaban atas kelemahan tata kelola konvensional yang selama ini rentan terhadap pemalsuan dokumen, keterlambatan verifikasi, serta kurangnya transparansi dalam distribusi benih. Dengan teknologi blockchain, setiap sertifikat digital memiliki tingkat validitas yang lebih tinggi, sementara integrasi EBT menekankan dimensi keberlanjutan dalam implementasinya. Konteks ini penting untuk memahami bagaimana SEEDTRACK tidak hanya berperan sebagai inovasi teknis, melainkan juga sebagai instrumen politik tata kelola lingkungan yang mengedepankan transparansi, akuntabilitas, dan partisipasi aktor lokal.

Berdasarkan kerangka analisis yang telah dirumuskan, pembahasan hasil penelitian ini mengacu pada teori yang menjelaskan keterkaitan antara efektivitas teknologi, tata kelola lingkungan, serta penerimaan sosial dari komunitas pengguna. Dengan demikian, setiap hasil empiris yang ditemukan akan dianalisis menggunakan pisau teori tersebut untuk memastikan relevansi akademik dan konsistensi argumentasi.

Efektivitas SEEDTRACK dalam Efisiensi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan blockchain berhasil menutup peluang pemalsuan sertifikat benih, sehingga meningkatkan kepercayaan antar pemangku kepentingan. Sertifikat digital terbukti lebih valid dan mudah diverifikasi secara daring, tanpa memerlukan proses birokrasi panjang sebagaimana terjadi pada sistem manual. Dari sisi energi, implementasi sistem ini berbasis EBT yang ramah lingkungan, sehingga sejalan dengan prinsip tata kelola berkelanjutan yang menjadi rujukan penelitian.

Efektivitas dalam Produktivitas

Dari perspektif produktivitas, SEEDTRACK mampu meningkatkan jumlah sertifikat yang diterbitkan dan jumlah benih yang tersertifikasi secara signifikan. Sistem ini memfasilitasi verifikasi data dalam skala besar, sehingga tidak hanya mempercepat proses administrasi, tetapi juga memperluas jangkauan distribusi benih ke lebih banyak petani dalam waktu yang relatif singkat. Hasil ini mendukung argumen teoritis bahwa digitalisasi dapat memperkuat kapasitas kelembagaan dalam tata kelola sumber daya.

Efektivitas Adaptabilitas

Temuan lapangan memperlihatkan bahwa SEEDTRACK relatif mudah diadaptasi oleh petani, LSM, maupun institusi pemerintah daerah. Fitur antarmuka yang sederhana serta ketersediaan akses berbasis seluler menjadi faktor penentu dalam percepatan adopsi sistem. Adaptabilitas ini memperkuat posisi SEEDTRACK sebagai inovasi yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga memiliki kompatibilitas sosial, sehingga mengurangi hambatan transisi dari sistem lama menuju sistem digital.

Kepuasan Stakeholder

Survei yang dilakukan menunjukkan bahwa lebih dari 80% petani dan LSM menyatakan sistem ini lebih baik dibandingkan metode konvensional. Tingginya tingkat kepuasan tersebut terutama terkait dengan aspek transparansi, kecepatan verifikasi, dan jaminan legalitas sertifikat. Hal ini mengindikasikan bahwa legitimasi sosial SEEDTRACK cukup kuat, yang pada gilirannya memperkuat basis tata kelola partisipatif di tingkat lokal.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa SEEDTRACK tidak hanya berfungsi sebagai perangkat teknis, melainkan juga sebagai instrumen tata kelola lingkungan yang menyeimbangkan antara efisiensi administratif, produktivitas kelembagaan, adaptabilitas sosial, serta kepuasan stakeholder. Temuan ini konsisten dengan teori yang digunakan dalam kerangka analisis, yang menekankan bahwa efektivitas inovasi dalam tata kelola lingkungan bergantung pada sinergi antara aspek teknologi, institusi, dan partisipasi komunitas.

Implikasi SeedTrack terhadap SDGs 2030

Penggunaan teknologi digital yang canggih dalam sistem sertifikasi dan pelacakan benih hutan dapat membuka peluang baru dalam pengelolaan sumber daya alam yang lebih berkelanjutan. Integrasi ini tidak hanya mempercepat distribusi benih berkualitas tinggi, tetapi

juga memastikan bahwa setiap tahap dalam sertifikasi dan pelacakan dapat terverifikasi secara real-time.

Manfaat dan keunggulan yang ditawarkan oleh SeedTrack berperan penting dalam mendukung pencapaian beberapa tujuan SDGs 2030, khususnya dalam penanganan perubahan iklim (SDG 13). Dengan meningkatkan keberhasilan rehabilitasi hutan melalui penggunaan benih unggul yang tersertifikasi, SeedTrack turut berkontribusi dalam penyerapan karbon yang lebih optimal. Proses ini menjadi langkah mitigasi perubahan iklim yang efektif, mengingat hutan berfungsi sebagai penyerap emisi gas rumah kaca yang signifikan. Selain itu, pemanfaatan energi terbarukan dalam operasional SeedTrack memastikan bahwa sistem ini ramah lingkungan dan minim jejak karbon.

Lebih lanjut, SeedTrack juga berkontribusi terhadap pelestarian ekosistem darat dan keanekaragaman hayati (SDG 15). Dengan sistem pemantauan yang ketat, aplikasi ini memastikan bahwa hanya benih berkualitas tinggi yang digunakan dalam program reforestasi, sesuai dengan karakteristik ekologi setempat. Pemanfaatan benih unggul ini tidak hanya meningkatkan keberagaman genetik hutan, tetapi juga mempercepat pemulihan lahan terdegradasi, sehingga ekosistem hutan dapat berfungsi secara optimal. Dengan demikian, SeedTrack berperan dalam mencegah peredaran benih kurang bermutu yang dapat menghambat keberhasilan rehabilitasi hutan.

Lebih dari itu, SeedTrack berfungsi sebagai platform kolaboratif yang menghubungkan berbagai pemangku kepentingan dalam pengelolaan hutan berkelanjutan (SDG 17). Dengan melibatkan pemerintah sebagai pembuat kebijakan, akademisi sebagai penyedia riset dan inovasi, industri sebagai produsen benih, serta masyarakat dan media sebagai penggerak dan pengawas, SeedTrack menciptakan ekosistem kerja sama yang kuat. Fitur Track Connector dalam aplikasi ini memungkinkan transfer teknologi dan pertukaran informasi secara lebih efektif, sehingga koordinasi antar pihak menjadi lebih efisien. Dengan pendekatan ini, SeedTrack tidak hanya menjadi solusi dalam meningkatkan kualitas dan ketersediaan benih hutan, tetapi juga berkontribusi dalam menciptakan pengelolaan sumber daya hutan yang lebih inklusif dan berkelanjutan sesuai dengan visi SDGs 2030.

Langkah Strategis Realisasi Gagasan SeedTrack

Langkah strategis yang harus dilaksanakan untuk mengimplementasikan konsep SEEDTRACK terdiri atas beberapa tahapan sebagai berikut.

Riset dan Pemantapan Konsep

Pada tahap awal ini, dilakukan kajian mendalam terhadap seluruh komponen yang membentuk SEEDTRACK, termasuk desain aplikasi, penerapan teknologi blockchain, serta kesiapan aspek legalitas. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh elemen yang diperlukan telah disusun dengan baik dan siap untuk diimplementasikan.

Small Scale Pilot Project

Pilot project merupakan tahapan uji coba yang dirancang sebagai percontohan dalam skala kecil. Tahapan ini bertujuan untuk menguji kelayakan sistem, sekaligus mengidentifikasi potensi keberhasilan dan tantangan yang mungkin muncul dalam implementasi skala besar. Melalui pilot project, penyesuaian dan perbaikan sistem dapat dilakukan sebelum penerapan lebih luas.

Evaluasi dan Hilirisasi SEEDTRACK

Tahap ini melibatkan pengembangan lebih lanjut dari hasil riset dan inovasi yang telah diuji coba, hingga menjadi produk yang siap untuk diterapkan secara luas di seluruh wilayah Indonesia. Hilirisasi bertujuan untuk memastikan bahwa SEEDTRACK dapat beroperasi secara optimal dan memberikan manfaat yang maksimal dalam mendukung reforestasi dan pelacakan benih.

Tabel 4.1 Indikator Campbell Proser Sertifikasi Manual dan Digital

Indikator Campbell	Konvensional	Digital	Sumber Data
Efisiensi	3-4 bulan sertifikasi	4-6 minggu tersertifikasi	Survei lapangan
Produktivitas	500.000 benih/tahun tersertifikasi	650.000 benih/tahun	SeedTrack NTB
Adaptabilitas	Keterlibatan aktor terbatas	Integrasi lintas sektor	FGS
Stakeholder	53% puas	80% puas	Survei likert

KESIMPULAN

SEEDTRACK merupakan inisiatif inovatif yang mengintegrasikan teknologi digital berbasis blockchain dan kecerdasan buatan (AI) dalam proses sertifikasi dan pelacakan benih

tanaman hutan, yang dioperasikan dengan dukungan energi terbarukan (EBT). Inisiatif ini hadir sebagai solusi untuk mengatasi tantangan utama dalam distribusi benih hutan, seperti kurangnya transparansi dan kepercayaan. Blockchain digunakan untuk menciptakan catatan yang aman dan transparan di sepanjang rantai pasok, sementara AI berperan dalam menganalisis data terkait kualitas dan viabilitas benih, serta membantu memprediksi kondisi pertumbuhan optimal.

Oleh karena itu, temuan penelitian ini penting untuk dijadikan acuan kebijakan publik. Pemerintah daerah maupun nasional dapat memasukkan sistem SEEDTRACK sebagai instrumen resmi dalam regulasi sertifikasi benih hutan. Selain itu, integrasi dengan kebijakan pengelolaan energi terbarukan berbasis EBT juga perlu diperkuat untuk memastikan keberlanjutan operasional sistem. Di sisi lain, lembaga sertifikasi dan LSM dapat memanfaatkan SEEDTRACK untuk memperluas partisipasi masyarakat dan meningkatkan kepercayaan publik terhadap tata kelola benih. Rekomendasi lainnya adalah mendorong penelitian lanjutan mengenai skalabilitas SEEDTRACK pada sektor sumber daya alam lainnya, seperti perikanan atau pertanian, sehingga manfaat transparansi dan akuntabilitas dapat diperluas lintas sektor.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahleyani, M. (2025). Environmental Impact and Sustainable Solutions: A Case Study of 'Onto Deposit' Mining in Dompu Regency. *Tech: Journal of Engineering Science*, 1(1), 26-36.
- Ahleyani, M., & Wiryajati, I. K. (2025). Biogas Energy Prediction as a Green Energy Producer in West Lombok Using a Statistical Approach. *International Journal of Informatics and Computation*, 7(1), 178-192.
- Ahleyani, M., Rohima, A., & Kurniawan, W. (2025). Green Economy in The Mining Industry: CCS Synergy for Sustainable Natural Resource Management. *Miftahul Ulum*, 3(2), 97-106.
- Ahleyani, M., Sihombing, R. A., & Nadhifah, A. (2025). Sustainable Education Efforts Through Digital Platforms: A Case Study of Dreams Foundation in Dompu Regency, West Nusa Tenggara. *Journal of Social Growth and Development Studies*, 1(2), 63-67.
- Alamsyah, A. B., Ahleyani, M., Hamid, A. S. R., & Ijtihad, R. (2023). Pendampingan Mahasiswa Beasiswa Cendekia Baznas (Bcb) Studentpreneur Universitas Mataram. *Jurnal Abdimas Sangkabira*, 4(1), 161-172.
- Anggarda, M. F., Kustiawan, I., Nurjanah, D. R., dan Hakim, N. F. (2023) 'Pengembangan Sistem Prediksi Waktu Penyiraman Optimal pada Perkebunan: Pendekatan Machine Learning untuk Peningkatan Produktivitas Pertanian'. *Jurnal Budidaya Pertanian*. 19(2), pp. 124–136. Available at: <https://doi.org/10.30598/jbdp.2023.19.2.124>.
- Bappenas (2019) Peta Jalan SDGs Indonesia Menuju 2030. Jakarta: Kementerian PPN.
- Berliandaldo, M., dan Fasa, A. W. H. (2022) 'Pengelolaan geowisata berkelanjutan dalam mendukung pelestarian warisan geologi: Perspektif collaborative governance'. *Inovasi*. 19(1), pp. 79-97

- Hidayat, T., Dasipah, E., Sukmawati, D., dan Safa, Z. N. (2023) 'Masalah Kebijakan Sertifikasi Benih dan Bibit Tanaman Hutan di Jawa Barat (Penerapan Pendekatan Advocacy Coalition Framework)'. *OrchidAgri*. 3(1), pp. 25–30. Available at: <https://doi.org/10.35138/orchidagri.v3i1.552>.
- Manik, J.D.N. dan Robuwan, R. (2022) 'Kebijakan Rehabilitasi Hutan dan Lahan Untuk Perlindungan Lingkungan Hidup'. *Jurnal Yustitia*. 23(2). Available at: <https://doi.org/10.53712/yustitia.v23i2.1711>.
- Maturbongs, E. E., dan Lekatompessy, R. L. (2020) 'Kolaborasi Pentahelix dalam Pengembangan Pariwisata Berbasis Kearifan Lokal di Kabupaten Merauke'. *Transparansi: Jurnal Ilmiah Ilmu Administrasi*. 3(1), pp. 55-63.
- Purnomo, H., Puspitaloka, D., Junandi, B., Juniyanti, L., dan Dharmawan, I. W. S. (2023) *Pembelajaran dari Aksi Restorasi Gambut Berbasis Masyarakat di Indonesia dan Asia Tenggara*. Bogor: Center for International Forestry Research (CIFOR). Available at: <https://doi.org/10.17528/cifor-icraf/008968>.
- Putri, P.A.V.A. dan Santoso, E.B. (2020) 'Analisis Pemangku Kepentingan Dalam Pengembangan Kawasan Cagar Budaya sebagai Destinasi Wisata Kota Pontianak'. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*. 8(3), pp. 202-213.
- Rahmawati, M.I., dan Subardjo, A. (2023) 'Pemanfaatan Blockchain dalam Konsep Sistem Rantai Pasok Pangan Halal: Studi Eksplorasi'. *Jurnal Arastirma*. 3(2), 395.
- Ramadhan, D., Ahleyani, M., Lestari, I. G. A. C. W., Ramadhan, H. O., & Yolanda, S. (2025). *SINERGISTA (Agrotourism Synergy): A Sustainable Tourism Development Strategy Based on Digitalization Through the Pentahelix Collaboration Model to Support the 2030 SDGs*. *The Eastasouth Journal of Information System and Computer Science*, 3(01), 125-138.
- Ranjiv A.A Sihombing, etc., "Utilization of Sugarcane Bagasse Waste forEco-Friendly Roofing: Synergy of Agrowaste Management and Sustainable Architecture ",*Nexus: Journal of Cross-Disciplinary Insights*, Vol. 1, No. 1, 2025, P. 45-56.
- Rozi, F. (2024) 'Perancangan Sistem Penyediaan Stok Darah Dalam Blood Supply Chain Management Berbasis Blockchain pada PMI Sleman Yogyakarta'. Doctoral dissertation. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Saleh, S.H.M., Tupen, R.R. and Udju, H.R. (2023) 'Pelaksanaan Kewenangan UPT Pengawas dan Sertifikasi Benih Provinsi Nusa Tenggara Timur Terhadap Benih Bina dan Hortikultura Ditinjau dari Peraturan Menteri Nomor 12 Tahun 2018 Tentang Produksi, Sertifikasi Dan Peredaran Benih Bina Tanaman'. *Petitum Law Journal*. 1(1), pp. 269–277. Available at: <https://doi.org/10.35508/pelana.v1i1.13537>.
- Susanti, R., Purwandari, S., dan Prilosedo, B.H. (2022) 'Penta Helix as Strategy of Tourism Village Development in Karangasem Village, Bulu District, Sukoharjo Regency'. *International Journal of Social Science*. 2(4), pp. 1979-1984.
- Utami, R.A., dan Novikarumsari, N.D. (2022) 'Pemberdayaan Masyarakat Petani Kopi Lego Menuju Agrowisata Berkelanjutan dalam Perspektif Pentahelix Model di Gombengsari, Kabupaten Banyuwangi'. *Jurnal Kirana*. 3(1), pp. 62-74.
- Utomo, T.P. (2021) 'Implementasi Teknologi Blockchain di Perpustakaan: Peluang, Tantangan dan Hambatan'. *Buletin Perpustakaan*. 4(2), pp. 173-200.
- Wibowo, K. (2024) 'Kontribusi Pembangkit Listrik Energi Terbarukan dalam Mengurangi Emisi Karbon'. *Innovative: Journal Of Social Science Research*. 4(6), pp. 5140-5153.
- World Resources Institute Indonesia. (2023) *Laporan Tahunan WRI Indonesia 2023*. Jakarta: WRI.
- Yuningsih, T., Darmi, T. dan Sulandari, S. (2019) 'Model Pentahelik dalam Pengembangan Pariwisata di Kota Semarang. *JPSI (Journal of Public Sector Innovations)*. 3(2), pp.84-93.