Vol. 20 (2) 2026: 580-598
Jurnal Penelitian Kehutanan
https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila
Jurnal MAKILA

Analisis Efisiensi Waktu Operasional dan Estimasi Kebutuhan Armada Spot Cultivator dalam Penyiapan Lubang Tanam pada Hutan Tanaman Industri

(Analysis of Operational Time Efficiency and Estimation of Spot Cultivator Fleet Requirements for Planting Hole Preparation in Industrial Forest Plantations)

Zuhdi Yahya[1*], M. Taufan Tirkaamiana[1], Legowo Kamarubayana[1], Riky Fahmaputra[1]

[1]Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian Universitas 17 Agustus 1945 Samarinda, Jln Ir. H. Juanda Nomor 80 Samarinda, Kalimantan Timur 75124, Indonesia

Informasi Artikel:

Submitted	:	31 Juni 2026
Revised	:	18 September 2026
Accepted	:	22 Oktober 2026
Published	:	05 November 2026

***Penulis Korespondensi:**

Zuhdi Yahya
Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian Universitas 17 Agustus 1945 Samarinda, Jln Ir. H. Juanda Nomor 80 Samarinda, Kalimantan Timur 75124, Indonesia
e-mail: ZYahya@untag-smd.co.id
Telp: +62 821-4914-8778

Makila 20 (2) 2026: 580-598

DOI:
https://doi.org/10.30598/makila.v20i2.28229

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

Copyright ©2026 Author(s): Zuhdi Yahya, M. Taufan Tirkaamiana, Legowo Kamarubayana, Riky Fahmaputra

Journal homepage:
https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila
Journal e-mail: makilajournal@gmail.com
Research Article** · **Open Access

ABSTRACT

Mechanised planting-hole preparation can improve operational planning in industrial forest plantations, but fleet allocation requires reliable estimates of working time and field productivity. This study assessed the daily time structure, productivity, and fleet requirements of excavator-mounted spot cultivators in Kutai Kartanegara, East Kalimantan. A continuous time study was conducted over 30 working days on mineral soils at a planting spacing of 3.0 × 2.5 m (1,333 holes ha⁻¹). During an eight-hour shift, mean productive time was 372.20 min day⁻¹ (77.54%), while allowances accounted for 107.80 min day⁻¹ (22.46%). These allowances comprised machine repositioning and maintenance (8.98%), operator fatigue and personal needs (6.75%), and site-related delays associated with roots and wet ground conditions (6.73%). Reported productivity averaged 264.00 ± 12.20 holes h⁻¹ and 2,006.00 ± 97.60 holes day⁻¹, corresponding to 1.50 ± 0.11 ha day⁻¹. At this daily coverage rate, a target of 288 ha over 25 working days requires 7.68 machines, rounded up to eight. The resulting nominal capacity is 300 ha month⁻¹, exceeding the target by 12 ha (4.17%). These findings provide a quantitative basis for fleet planning, although productivity denominators and operational variability require verification before implementation.

KEYWORDS**: **Fleet requirements; Forest mechanisation; Industrial forest plantations; Operational productivity; Spot cultivator

INTISARI

Penyiapan lubang tanam secara mekanis berpotensi meningkatkan efisiensi operasional hutan tanaman industri, tetapi penentuan jumlah alat memerlukan informasi waktu kerja dan produktivitas yang andal. Penelitian ini bertujuan menganalisis struktur waktu kerja harian, produktivitas, dan kebutuhan armada spot cultivator yang dipasang pada ekskavator di Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Pengamatan dilakukan menggunakan metode studi waktu secara kontinu selama 30 hari kerja pada tanah mineral dengan jarak tanam 3,0 × 2,5 m (1.333 lubang/ha). Dari delapan jam kerja harian, rerata waktu produktif mencapai 372,20 menit (77,54%), sedangkan waktu kelonggaran sebesar 107,80 menit (22,46%).

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Waktu kelonggaran mencakup perpindahan dan pemeliharaan alat (8,98%), kelelahan serta kebutuhan pribadi operator (6,75%), dan hambatan lapangan akibat akar serta kondisi tanah basah (6,73%). Produktivitas yang dilaporkan mencapai 264,00 ± 12,20 lubang/jam dan 2.006,00 ± 97,60 lubang/hari, setara dengan 1,50 ± 0,11 ha/hari. Berdasarkan produktivitas harian tersebut, penyelesaian target 288 ha dalam 25 hari kerja membutuhkan 7,68 unit atau dibulatkan menjadi delapan unit. Kapasitas nominal delapan unit mencapai 300 ha/bulan, melampaui target sebesar 12 ha (4,17%). Hasil ini menyediakan dasar kuantitatif bagi perencanaan armada, dengan catatan bahwa penyebut produktivitas per jam dan variasi kondisi operasional perlu diverifikasi sebelum penerapan.

KATA KUNCI: Hutan tanaman industri; Kebutuhan armada; Mekanisasi kehutanan; Produktivitas operasional; Spot cultivator

PENDAHULUAN

Hutan Tanaman Industri (HTI) memiliki peran strategis dalam penyediaan bahan baku kayu secara berkelanjutan dan peningkatan efisiensi rantai produksi kehutanan. Keberhasilan pengelolaan HTI tidak hanya ditentukan oleh pertumbuhan dan produktivitas tegakan, tetapi juga oleh efektivitas pelaksanaan tahapan operasional, mulai dari penataan areal kerja, penyiapan lahan, pembuatan lubang tanam, penanaman, hingga pemeliharaan tanaman (Bahtiar, 2024; Ebissa *et al*., 2023). Dalam sistem produksi berskala luas, keterlambatan penyiapan lahan dapat mengganggu jadwal penanaman dan mengurangi pemanfaatan periode tanam optimal (*planting window*). Oleh karena itu, pengendalian waktu kerja, peningkatan produktivitas alat, dan ketepatan perencanaan kapasitas operasional merupakan aspek penting dalam mendukung pencapaian target penanaman HTI. Perkembangan mekanisasi kehutanan semakin memperkuat kebutuhan terhadap evaluasi kinerja mesin berbasis data operasional. (Byakagaba & Muhiirwe, 2017; Nobre *et al*., 2021) menunjukkan relevansi pemanfaatan data sistem manajemen armada (*fleet management system*) untuk mengevaluasi waktu kerja, produktivitas, tingkat pemanfaatan mesin, dan efisiensi operasional.

Pembuatan lubang tanam merupakan salah satu tahapan penting dalam penyiapan lahan karena berkaitan dengan penyediaan ruang tumbuh awal dan kesiapan areal untuk kegiatan penanaman. Pada areal HTI dengan kondisi tapak yang beragam, termasuk variasi topografi, sisa perakaran, tunggak, material permukaan, dan karakteristik tanah, metode manual maupun penggunaan peralatan konvensional dapat menghadapi keterbatasan produktivitas dan fleksibilitas operasional. Penggunaan *excavator-mounted spot cultivator* menjadi salah satu alternatif mekanisasi yang memungkinkan pengolahan tanah secara setempat (*localised soil preparation*) dengan memanfaatkan kemampuan manuver ekskavator pada kondisi lapangan yang bervariasi (Fahlevi *et*

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

al., 2025; Hidayat *et al*., 2025). Meskipun demikian, kapasitas aktual alat tidak hanya ditentukan oleh spesifikasi teknis mesin, tetapi juga oleh karakteristik tapak, keterampilan operator, dan hambatan selama pelaksanaan pekerjaan. Penelitian mengenai mesin pembuat lubang tanam (*pitting machine*) di Afrika Selatan menunjukkan adanya variasi produktivitas dan kualitas pekerjaan menurut kondisi lokasi serta karakteristik operator (Thembinkosi, 2024). Temuan tersebut menegaskan pentingnya pengukuran kinerja aktual sebagai dasar evaluasi produktivitas mekanisasi penyiapan lahan (Barua *et al*., 2014; Bottaro *et al*., 2018).

Produktivitas alat kehutanan merupakan hasil interaksi antara kapasitas teknis mesin, waktu siklus kerja, karakteristik operator, kondisi tapak, dan berbagai komponen waktu tidak produktif. Oleh karena itu, evaluasi produktivitas memerlukan pendekatan studi waktu (*time study*) yang mampu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan penggunaan waktu selama proses operasional. Pengukuran tersebut mencakup waktu kerja produktif, waktu kegiatan pendukung, waktu keterlambatan (*delay*), serta waktu kelonggaran (*allowance*) sesuai definisi operasional yang digunakan dalam penelitian. Pemisahan komponen waktu tersebut diperlukan untuk membedakan kapasitas teknis mesin dari produktivitas aktual yang dapat dicapai pada kondisi lapangan (Briliyanti *et al*., 2025; SEUN *et al*., 2023). (Tolentino, 2026) menunjukkan bahwa karakteristik pekerjaan dan hambatan lapangan dapat memengaruhi konsumsi waktu pada operasi mekanisasi penanaman berbasis ekskavator. Sementara itu, (Febrianto *et al*., 2025; Nisa *et al*., 2025) menjadi salah satu rujukan dalam kajian produktivitas dan efisiensi kegiatan mekanisasi kehutanan. Dengan demikian, analisis struktur waktu kerja memberikan dasar empiris untuk mengidentifikasi sumber kehilangan waktu dan memperkirakan kapasitas produksi alat secara lebih realistis.

Permasalahan operasional menjadi lebih kompleks ketika produktivitas aktual digunakan untuk menentukan jumlah unit alat yang diperlukan guna memenuhi target penanaman. Estimasi kebutuhan armada berdasarkan kapasitas teoritis atau nilai produktivitas rata-rata tanpa mempertimbangkan variasi operasional berpotensi menghasilkan perencanaan yang kurang sesuai dengan kondisi lapangan. Curah hujan, penurunan daya dukung tanah, hambatan mikrositus, perpindahan posisi mesin, pemeliharaan, serta keterlambatan mekanis dapat memengaruhi waktu kerja efektif dan kapasitas produksi harian (Guerra-Zubiaga *et al*., 2025; Maziotis & Molinos-Senante, 2023). (Diaz-Balteiro *et al*., 2016; Pichler & Ingalls, 2021) menyoroti relevansi integrasi informasi kondisi tanah, topografi, dan iklim dalam evaluasi kinerja mesin kehutanan. Selain itu, kajian (Di Fulvio *et al*., 2024) mengenai mekanisasi penanaman berbasis ekskavator memperlihatkan pentingnya hubungan antara produktivitas, kondisi tapak, dan efisiensi operasional maupun biaya. Literatur tersebut mengindikasikan bahwa perencanaan armada perlu mempertimbangkan hubungan antara struktur waktu kerja, produktivitas aktual, dan kapasitas penyelesaian pekerjaan dalam periode tertentu.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah memberikan kontribusi terhadap pemahaman produktivitas mekanisasi penyiapan lahan. Namun, berdasarkan literatur yang ditelaah, kajian yang

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

secara khusus menghubungkan struktur waktu operasional, produktivitas aktual, dan estimasi kebutuhan armada *excavator-mounted spot cultivator* untuk mencapai target luasan penanaman bulanan pada areal tanah mineral HTI di Indonesia masih terbatas. Penelitian (Bull *et al*., 2006) mengenai prestasi kerja *spot cultivator* di Kalimantan Timur melaporkan produktivitas sekitar 1,607 ha/hari pada kelas lereng 8–15% dan 1,430 ha/hari pada kelas lereng 15–25%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kondisi tapak berpotensi memengaruhi kapasitas kerja alat. Meskipun demikian, informasi produktivitas menurut kelas lereng belum secara langsung menjelaskan bagaimana komponen waktu kerja dan kapasitas harian dapat diterjemahkan menjadi kebutuhan jumlah unit alat untuk memenuhi target operasional bulanan. Keterbatasan inilah yang menjadi dasar pengembangan pendekatan analitis dalam penelitian ini (Barua *et al*., 2014; Primahardani *et al*., 2022).

Penelitian ini mengintegrasikan tiga komponen analisis, yaitu studi waktu (*time study*), analisis produktivitas (*productivity analysis*), dan estimasi kebutuhan armada (*fleet requirement estimation*). Studi waktu digunakan untuk mengidentifikasi distribusi waktu produktif dan tidak produktif serta faktor-faktor yang berkaitan dengan kehilangan waktu operasional. Selanjutnya, produktivitas aktual dihitung berdasarkan jumlah lubang tanam yang dihasilkan dan luasan pekerjaan yang diselesaikan dalam satuan waktu tertentu. Hasil pengukuran produktivitas tersebut digunakan untuk memperkirakan kebutuhan unit alat berdasarkan target luasan penanaman dan jumlah hari kerja yang tersedia. Integrasi ketiga komponen ini memberikan kerangka kuantitatif yang menghubungkan pengamatan operasional pada tingkat mesin dengan perencanaan kapasitas pekerjaan pada tingkat pengelolaan HTI. Kontribusi pendekatan ini terletak pada penggunaan data produktivitas lapangan sebagai dasar estimasi kebutuhan armada, bukan semata-mata pada kapasitas teoritis alat (Barua *et al*., 2014; Bull *et al*., 2006).

Penelitian dilaksanakan pada areal tanah mineral HTI di Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur, menggunakan satu unit ekskavator hidraulis yang dilengkapi *spot cultivator*. Pengamatan dilakukan selama 30 hari kerja untuk memperoleh data empiris mengenai struktur waktu operasional, produktivitas pembuatan lubang tanam, dan variasi kinerja alat pada kondisi pekerjaan aktual. Pengamatan juga memperhatikan hambatan operasional yang berkaitan dengan kondisi tapak, termasuk keberadaan akar, perubahan kondisi permukaan tanah setelah hujan, perpindahan posisi mesin, dan kegiatan pemeliharaan. Penggunaan satu unit alat memungkinkan evaluasi terperinci terhadap kinerja unit yang diamati, sedangkan penerapan hasilnya untuk perencanaan armada yang lebih besar memerlukan asumsi mengenai kesetaraan kapasitas mesin, karakteristik operator, dan kondisi operasional antarunit.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis struktur waktu kerja *excavator-mounted spot cultivator* dalam kegiatan pembuatan lubang tanam pada HTI; (2) mengevaluasi produktivitas aktual alat berdasarkan waktu kerja, jumlah lubang tanam, dan luasan pekerjaan yang diselesaikan; serta (3) mengestimasi kebutuhan armada berdasarkan kapasitas

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

produktif alat, target luasan penanaman bulanan, dan jumlah hari kerja yang tersedia. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi empiris terhadap evaluasi kinerja mekanisasi penyiapan lahan dan menyediakan dasar kuantitatif bagi perencanaan kebutuhan alat yang lebih terukur. Secara praktis, hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam penyusunan jadwal operasional, pengalokasian kapasitas mesin, dan evaluasi kecukupan armada untuk mendukung pencapaian target penanaman HTI.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Januari–Juli 2025 di areal Hutan Tanaman Industri (HTI) PT Sumalindo Hutani Jaya II, Distrik Sei Mao, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Lokasi pengamatan berada pada petak J450020B00 seluas 15,7 ha, dengan koordinat geografis 0°01′32,6″ LU dan 117°11′52,5″ BT serta elevasi sekitar 140–150 m di atas permukaan laut. Areal penelitian memiliki kelas kemiringan lereng 8–15%, yang secara operasional mencerminkan kondisi medan landai hingga bergelombang.

Berdasarkan informasi biofisik lokasi, satuan tanah pada areal penelitian didominasi oleh asosiasi Gleisol Distrik dan Podzol Ortik. Curah hujan regional selama periode penelitian dilaporkan memiliki rata-rata sebesar 194,5 mm/bulan dengan frekuensi sekitar 24 hari hujan per bulan. Karakteristik tersebut memberikan konteks terhadap kondisi operasional alat, terutama berkaitan dengan kelembapan tanah, keberadaan hambatan mikrositus, dan kemungkinan penurunan daya dukung tanah setelah kejadian hujan.

Lokasi penelitian ditentukan secara sengaja (*purposive sampling*) berdasarkan tiga pertimbangan utama, yaitu: (1) areal termasuk dalam petak siap tanam yang tercantum dalam Rencana Kerja Tahunan (RKT) perusahaan; (2) lokasi memiliki karakteristik biofisik dan hambatan mikrositus, seperti sisa perakaran dan tunggak pascapemanenan, yang relevan dengan kegiatan penyiapan lahan HTI; serta (3) kegiatan pembuatan lubang tanam dilaksanakan menggunakan ekskavator yang dilengkapi *spot cultivator*. Pemilihan lokasi tersebut bertujuan memperoleh gambaran empiris mengenai kinerja operasional alat pada kondisi kerja aktual. Oleh karena itu, hasil penelitian terutama merepresentasikan karakteristik unit mesin, operator, dan kondisi tapak yang diamati.

Desain Penelitian dan Unit Pengamatan

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain observasional lapangan berbasis studi waktu kerja (time study). Pendekatan ini digunakan untuk mengukur distribusi waktu operasional, menghitung produktivitas aktual, serta mengestimasi kebutuhan armada berdasarkan target luasan pekerjaan.

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Objek penelitian adalah satu unit ekskavator hidraulis Sumitomo SH210 dengan bobot operasi sekitar 20 ton yang dilengkapi alat pengolah tanah setempat (spot cultivator) berupa three-tooth ripper. Pengoperasian mesin dilakukan oleh satu operator yang memiliki Surat Izin Alat (SIA) Kelas II dan pengalaman kerja lebih dari lima tahun dalam kegiatan penyiapan lahan HTI.

Penggunaan satu unit mesin dan satu operator dimaksudkan untuk mengurangi variasi antaroperator dan antarmesin selama pengamatan. Namun, desain tersebut tidak memungkinkan pemisahan secara statistik antara pengaruh karakteristik operator, kondisi mesin, dan kondisi tapak terhadap produktivitas. Dengan demikian, hasil penelitian diperlakukan sebagai estimasi kinerja operasional unit yang diamati, sedangkan penerapannya untuk kebutuhan armada yang lebih besar didasarkan pada asumsi kesetaraan kapasitas dan kondisi kerja antarunit.

Unit pengamatan primer berupa siklus pembuatan lubang tanam, sedangkan hari kerja digunakan sebagai unit agregasi untuk menghitung struktur waktu, produktivitas, dan variasi kinerja harian. Pengamatan direncanakan mencakup 30 hari kerja dengan pencatatan waktu kegiatan dan jumlah lubang tanam yang dihasilkan. Analisis difokuskan pada efisiensi waktu operasional dan kapasitas kerja mesin. Kedalaman olah tanah sebesar 40–50 cm digunakan sebagai informasi karakteristik pekerjaan apabila didukung catatan pengukuran lapangan. Penelitian ini tidak dirancang untuk mengevaluasi secara langsung respons pertumbuhan tanaman atau perubahan sifat fisik tanah setelah pengolahan.

Pola Tanam dan Konversi Produktivitas Luasan

Pola penanaman yang diterapkan pada areal penelitian menggunakan jarak antarbaris sebesar 3,0 m dan jarak antartanaman dalam barisan sebesar 2,5 m. Berdasarkan jarak tanam tersebut, kebutuhan teoritis lubang tanam per hektar dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$N_h = \frac{10.000}{J_x \times J_y} = \frac{10.000}{3{,}0 \times 2{,}5} = 1.333 \text{ lubang/ha} \qquad (1)$$

di mana N_h adalah kebutuhan lubang tanam per hektar, sedangkan J_x dan J_y masing-masing adalah jarak tanam antar-baris dan di dalam barisan (m). Nilai 1.333 lubang/ha digunakan sebagai faktor konversi konstan antara capaian output fisik (lubang) terhadap luasan penyiapan lahan (hektar).

Nilai tersebut digunakan sebagai faktor konversi teoritis dari jumlah lubang tanam menjadi luasan ekuivalen yang telah disiapkan. Dalam pelaporan operasional, kerapatan dapat dibulatkan menjadi sekitar 1.333 lubang/ha, sedangkan perhitungan numerik sebaiknya menggunakan nilai sebelum pembulatan untuk menghindari akumulasi kesalahan.

Konversi tersebut mengasumsikan bahwa seluruh luasan dapat ditanami dengan pola yang seragam. Oleh karena itu, luasan yang dihitung merupakan luasan ekuivalen berdasarkan jumlah lubang tanam, bukan hasil pengukuran langsung luas areal yang telah diselesaikan. Apabila terdapat jalan operasional, sempadan, areal tidak produktif, atau bagian petak yang tidak dapat ditanami, kebutuhan lubang aktual harus disesuaikan dengan luas efektif penanaman.

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data primer dilakukan melalui observasi langsung menggunakan metode pengukuran waktu kontinu (continuous timing method). Pengamatan menggunakan stopwatch digital Casio HS-3V dan lembar pencatatan operasional terstruktur. Metode ini diterapkan untuk mencatat waktu berlangsungnya aktivitas mesin serta waktu mulai dan berakhirnya setiap komponen pekerjaan.

Siklus pembuatan lubang tanam didefinisikan sebagai rangkaian kegiatan yang dimulai ketika alat memasuki posisi kerja pada satu titik tanam hingga alat siap melakukan pengolahan pada titik berikutnya. Satu siklus mencakup: (1) penetrasi dan penggemburan tanah menggunakan ripper; (2) pengangkatan alat dan perapian lubang tanam; serta (3) pergerakan boom dan arm menuju titik tanam berikutnya. Perpindahan keseluruhan unit ekskavator antarjalur atau antarzona kerja dicatat secara terpisah apabila kegiatan tersebut tidak termasuk dalam siklus pembuatan lubang.

Data primer meliputi durasi setiap siklus, jumlah lubang tanam yang diselesaikan, waktu produktif, waktu kegiatan pendukung, dan waktu keterlambatan operasional. Pencatatan dilakukan menurut kategori aktivitas agar setiap interval waktu hanya dimasukkan ke dalam satu kategori. Jumlah lubang yang dihasilkan dicatat sebagai keluaran fisik pekerjaan, sedangkan durasi aktivitas digunakan untuk menghitung produktivitas dan proporsi pemanfaatan waktu kerja.

Data sekunder meliputi informasi curah hujan, peta kontur dan kelas lereng, peta tanah, spesifikasi alat, serta dokumen target penanaman perusahaan. Target operasional yang digunakan dalam pemodelan kebutuhan armada adalah 288 ha/bulan dengan alokasi 25 hari kerja per bulan. Data sekunder tersebut digunakan sebagai konteks operasional dan parameter perencanaan, bukan sebagai hasil pengukuran produktivitas langsung.

Klasifikasi dan Struktur Waktu Operasional

Waktu kerja harian diklasifikasikan berdasarkan sifat kegiatan menjadi waktu produktif, waktu pendukung, dan waktu tidak produktif. Pemisahan tersebut diperlukan untuk mengidentifikasi distribusi penggunaan waktu serta memastikan bahwa penghitungan produktivitas tidak mencampurkan waktu kerja efektif dengan waktu keterlambatan.

Waktu produktif

Waktu produktif ((T_p)) merupakan waktu aktual yang digunakan untuk menyelesaikan siklus pembuatan lubang tanam, termasuk penetrasi tanah, pengangkatan alat, perapian lubang, dan pergerakan attachment menuju titik tanam berikutnya sesuai batasan siklus kerja.

Waktu produktif harian diperoleh dari penjumlahan durasi seluruh siklus produktif:

$$T_p = \sum_{i=1}^{n} t_i \qquad (2)$$

dengan T_p merupakan waktu produktif total (menit); t_i merupakan durasi siklus ke- i dan n adalah jumlah siklus yang diamati.

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Waktu pendukung dan keterlambatan

Waktu pendukung mencakup kegiatan yang diperlukan untuk mempertahankan kelangsungan operasi, seperti pemeriksaan alat, pengisian bahan bakar, pembersihan material yang melekat pada *ripper*, serta perpindahan unit antarjalur kerja. Waktu keterlambatan mencakup penghentian pekerjaan akibat hambatan teknis, kondisi lingkungan, atau kebutuhan operator. Untuk kepentingan analisis, waktu keterlambatan dapat dipisahkan menjadi keterlambatan personal, keterlambatan teknis, dan keterlambatan akibat kondisi tapak. Kategori tersebut harus diterapkan secara konsisten berdasarkan catatan kejadian lapangan. Tidak seluruh waktu keterlambatan otomatis dikategorikan sebagai *allowance* yang dapat diterima dalam penetapan waktu standar.

Struktur waktu kerja harian

Total waktu giliran kerja yang diamati T_s dihitung sebagai jumlah seluruh komponen waktu:

$$T_s = T_p + T_{sup} + T_d \qquad (3)$$

dengan T_{sup} merupakan waktu pendukung dan T_d merupakan waktu keterlambatan.

Keterangan: T_s adalah total waktu giliran kerja; T_p adalah waktu produktif; T_{sup} adalah waktu pendukung; dan T_d adalah waktu keterlambatan. Seluruh variabel dinyatakan dalam menit.

Persentase waktu produktif terhadap waktu giliran kerja dihitung menggunakan Persamaan (4):

$$E_t = \frac{T_p}{T_s} x100\% \qquad (4)$$

Nilai E_t menunjukkan tingkat pemanfaatan waktu giliran kerja untuk kegiatan produktif, bukan efisiensi teknis mesin secara menyeluruh.

Penyesuaian Waktu Normal dan Waktu Standar

Penyesuaian waktu kerja dilakukan menggunakan pendekatan Westinghouse performance rating, dengan mempertimbangkan empat dimensi penilaian operator, yaitu keterampilan, usaha, kondisi kerja, dan konsistensi. Faktor penilaian kinerja (*rating factor*, RF) dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$RF = 1 + \sum_{j=1}^{4} rj \qquad (5)$$

Keterangan: RF merupakan faktor penilaian kinerja tanpa satuan, sedangkan rj adalah nilai penyesuaian pada komponen penilaian ke- j

Berdasarkan nilai penyesuaian yang dilaporkan, diperoleh:

$$RF = 1 + (0{,}06 + 0{,}05 - 0{,}04 + 0{,}03) = 1{,}10 \qquad (6)$$

Dengan demikian, faktor penilaian sebesar 1,10 menunjukkan bahwa waktu observasi disesuaikan sebesar 10% untuk memperoleh waktu normal berdasarkan sistem penilaian yang digunakan.

Waktu normal per siklus dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$t_N = t_0 = xRF \qquad (6)$$

Keterangan: t_N adalah waktu normal per siklus (menit/siklus), sedangkan t_0 merupakan waktu siklus observasi (menit/siklus).

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Selanjutnya, waktu standar dihitung dengan mempertimbangkan kelonggaran yang relevan terhadap waktu normal.

$$t_{St} = t_N\,(1 + \alpha) \qquad (7)$$

Keterangan: t_{St} adalah waktu standar per siklus (menit/siklus), dan α adalah rasio kelonggaran terhadap waktu normal dalam bentuk desimal. Persamaan (8) berlaku apabila kelonggaran didefinisikan sebagai proporsi waktu normal. Apabila kelonggaran ditentukan sebagai proporsi waktu standar, formulasi yang digunakan menjadi $t_{St} = t_N\,/(1 + \alpha)$. Kedua pendekatan tidak boleh dipertukarkan tanpa penyesuaian definisi.

Analisis Produktivitas Alat

Produktivitas dianalisis berdasarkan jumlah lubang tanam yang diselesaikan selama waktu produktif dan selama keseluruhan giliran kerja.

Produktivitas per jam produktif

Produktivitas per jam produktif P_e dihitung dengan:

$$P_e = \frac{60Q}{T_p} \qquad (9)$$

dengan T_p adalah produktivitas per jam produktif (lubang/jam produktif), Q adalah jumlah lubang yang dihasilkan dan T_p adalah waktu produktif dalam menit. Produktivitas ini menggambarkan kapasitas alat ketika menjalankan aktivitas pembuatan lubang tanam.

Produktivitas per jam giliran kerja

Produktivitas per jam giliran kerja P_s dihitung menggunakan:

$$P_s = \frac{60Q}{T_s} \qquad (10)$$

Indikator ini memasukkan seluruh waktu operasional yang tercatat, termasuk waktu pendukung dan keterlambatan. Oleh karena itu, produktivitas per jam giliran kerja lebih relevan untuk mengevaluasi kapasitas penyelesaian pekerjaan dalam jadwal operasional aktual.

Produktivitas harian dan luasan ekuivalen

Produktivitas harian berdasarkan jumlah lubang yang diselesaikan Q_d dikonversi menjadi luasan ekuivalen menggunakan:

$$P_{ha,d} = \frac{Q_d}{N_h} \qquad (11)$$

dengan $P_{ha,d}$ dinyatakan dalam ha/hari dan N_h merupakan kebutuhan teoritis lubang tanam per hektar.

Apabila digunakan waktu giliran kerja standar delapan jam, kapasitas harian yang diproyeksikan dihitung dengan:

$$\widehat{Q_d} = P_s x 8 \qquad (12)$$

Persamaan (11) hanya digunakan apabila produktivitas per jam dihitung terhadap keseluruhan waktu giliran kerja. Produktivitas per jam produktif tidak dikalikan langsung dengan delapan jam tanpa mempertimbangkan proporsi waktu produktif aktual.

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Analisis Statistik Deskriptif dan Variabilitas Produktivitas

Variasi produktivitas harian dianalisis menggunakan statistik deskriptif yang meliputi nilai rata-rata, simpangan baku, nilai minimum, nilai maksimum, dan koefisien variasi (*coefficient of variation*, CV).

Rata-rata produktivitas dihitung menggunakan:

$$\bar{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i \qquad (13)$$

Simpangan baku sampel dihitung menggunakan:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}{n-1}} \qquad (14)$$

Koefisien variasi dihitung menggunakan:

$$CV = \frac{SD}{\bar{P}} x100\% \qquad (15)$$

dengan (P_i) merupakan produktivitas pada hari ke- i, P adalah rata-rata produktivitas, dan (n) adalah jumlah hari pengamatan.

Nilai CV digunakan untuk menggambarkan variasi relatif produktivitas harian selama periode observasi. Interpretasinya dilakukan secara deskriptif tanpa menetapkan kategori stabilitas tertentu yang tidak didukung oleh kriteria rujukan. Statistik tersebut juga tidak digunakan sebagai dasar untuk menyimpulkan hubungan kausal antara kondisi tapak dan produktivitas apabila variabel tapak tidak diukur serta dianalisis secara khusus.

2.9. Estimasi Kebutuhan Armada

Estimasi kebutuhan armada dilakukan berdasarkan produktivitas luasan harian dan target pekerjaan bulanan. Target operasional perusahaan ditetapkan sebesar 288 ha/bulan dengan alokasi 25 hari kerja per bulan.

Kapasitas bulanan satu unit alat K_μ dihitung menggunakan:

$$K_\mu = \bar{P}_{ha,d} x H \qquad (16)$$

dengan K_u adalah kapasitas bulanan satu unit alat (ha/bulan), $\bar{P}_{ha,d}$ adalah rata-rata produktivitas luasan harian (ha/hari), dan H adalah jumlah hari kerja yang direncanakan per bulan.

Kebutuhan armada teoretis N_t dihitung menggunakan:

$$N_t = \frac{T}{K_\mu} \qquad (17)$$

Jumlah unit yang direkomendasikan N_r diperoleh melalui pembulatan ke atas:

$$N_r = \lceil N_t \rceil \qquad (18)$$

Keterangan: N_t merupakan kebutuhan armada teoretis, N_r adalah jumlah unit yang direkomendasikan, dan T adalah target pekerjaan bulanan (ha/bulan).

Kapasitas total armada dihitung sebagai berikut.

$$K_f = N_r \, x \, K_u \qquad (19)$$

Selisih kapasitas armada terhadap target pekerjaan dihitung menggunakan:

$$CM = K_f - T \qquad (20)$$

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Persentase margin kapasitas dihitung menggunakan:

$$CM_{\%} = \frac{CM}{T}\ x\ 100\% \qquad (21)$$

Keterangan: K_f adalah kapasitas total armada (ha/bulan), CM merupakan selisih kapasitas terhadap target (ha/bulan), dan $CM_{\%}$ adalah margin kapasitas relatif (%).

Margin kapasitas positif menunjukkan bahwa kapasitas nominal armada melampaui target pekerjaan berdasarkan asumsi produktivitas yang digunakan. Namun, nilai tersebut tidak secara langsung membuktikan ketahanan operasional terhadap gangguan mesin, keterbatasan mobilisasi, maupun perubahan kondisi tapak.

Analisis Sensitivitas Kebutuhan Armada

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi respons kebutuhan armada terhadap perubahan produktivitas harian melalui skenario optimistis, moderat, dan konservatif.

Untuk menghindari ambiguitas dengan simbol produktivitas per jam giliran kerja P pada Persamaan (9), produktivitas luasan harian berdasarkan skenario dinotasikan sebagai $P_{ha,S}$

Kebutuhan armada pada skenario ke- S dihitung menggunakan:

$$N_S = \left\lceil \frac{T}{P_{ha,S}\ x\ H} \right\rceil \qquad (21)$$

Keterangan: N_S adalah jumlah unit armada pada skenario ke- S, sedangkan $P_{ha,S}$ merupakan produktivitas luasan harian yang diasumsikan pada skenario tersebut (ha/hari).

Untuk mensimulasikan penurunan produktivitas relatif, digunakan:

$$P_\delta = \bar{P}_{ha,d}(1 - \delta) \qquad (22)$$

Kebutuhan armada setelah penurunan produktivitas dihitung menggunakan:

$$N_\delta = \left\lceil \frac{T}{P_\delta\ x\ H} \right\rceil \qquad (23)$$

Keterangan: P_δ merupakan produktivitas luasan harian setelah penurunan (ha/hari), δ adalah proporsi penurunan produktivitas dengan $0 \leq \delta < 1$, dan N_δ merupakan jumlah unit armada yang dibutuhkan setelah penyesuaian.

Analisis sensitivitas ini bersifat deterministik dan digunakan untuk mengevaluasi konsekuensi matematis perubahan produktivitas terhadap kebutuhan armada. Hasilnya tidak ditafsirkan sebagai prediksi probabilistik terhadap kejadian cuaca ekstrem maupun gangguan operasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan operasional *excavator-mounted spot cultivator* selama 30 hari kerja memberikan informasi mengenai struktur penggunaan waktu, produktivitas pembuatan lubang tanam, dan implikasinya terhadap perencanaan kebutuhan armada pada Hutan Tanaman Industri (HTI). Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan distribusi waktu kerja harian, keluaran fisik alat, produktivitas luasan ekuivalen, serta simulasi kebutuhan unit berdasarkan target operasional

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

bulanan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kapasitas kerja alat tidak hanya berdasarkan produktivitas rata-rata, tetapi juga dengan mempertimbangkan variasi produktivitas yang teramati selama penelitian.

Struktur Waktu Operasional dan Efisiensi Pemanfaatan Waktu Kerja

Distribusi waktu operasional merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kemampuan mesin memanfaatkan alokasi waktu kerja untuk menghasilkan keluaran fisik. Berdasarkan pengamatan dengan durasi giliran kerja standar delapan jam atau 480 menit per hari, struktur waktu operasional *spot cultivator* terdiri atas waktu produktif dan waktu nonproduktif yang mencakup kebutuhan operator, hambatan teknis, serta kendala kondisi tapak. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Struktur waktu operasional harian dan produktivitas *spot cultivator* pada giliran kerja delapan jam

Komponen waktu/parameter	Rata-rata	Simpangan baku	Proporsi (%)	Satuan
Waktu produktif teramati	372,20	24,50	77,54	menit/hari
Waktu nonproduktif	107,80	12,60	22,46	menit/hari
Kebutuhan personal dan kelelahan	32,40	4,20	6,75	menit/hari
Hambatan operasional dan mekanis	43,10	5,80	8,98	menit/hari
Hambatan tapak dan cuaca	32,30	6,10	6,73	menit/hari
Durasi giliran kerja	480,00	—	100,00	menit/hari
Rasio waktu nonproduktif terhadap waktu produktif	28,96	3,85*	—	%
Produktivitas per jam yang dilaporkan	264,00	12,20	—	lubang/jam

Sumber: analisis data primer, 2026

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata waktu produktif mencapai 372,20 menit/hari atau 77,54% dari total giliran kerja, sedangkan waktu nonproduktif mencapai 107,80 menit/hari atau 22,46%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sekitar tiga perempat alokasi waktu kerja digunakan untuk kegiatan produktif pembuatan lubang tanam, sementara sisanya terserap oleh aktivitas pendukung dan berbagai bentuk keterlambatan. Rasio waktu nonproduktif terhadap waktu produktif sebesar 28,96% mengindikasikan bahwa setiap 100 menit kegiatan produktif disertai sekitar 29 menit waktu nonproduktif pada tingkat agregat (Pichler & Ingalls, 2021).

Proporsi waktu produktif sebesar 77,54% mencerminkan tingkat pemanfaatan waktu giliran kerja untuk kegiatan inti. Indikator ini perlu dibedakan dari efisiensi teknis mesin karena tidak mengukur secara langsung konsumsi bahan bakar, efisiensi sistem hidrolik, maupun keluaran energi mekanis. Dengan demikian, interpretasi yang lebih tepat adalah bahwa operasional alat memiliki tingkat pemanfaatan waktu produktif sebesar 77,54% dalam kondisi pengamatan.

Kontribusi Hambatan Operasional, Operator, dan Kondisi Tapak

Waktu nonproduktif sebesar 107,80 menit/hari terdistribusi ke dalam tiga kelompok hambatan utama, yaitu hambatan operasional dan mekanis sebesar 43,10 menit/hari, kebutuhan

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

personal dan kelelahan operator sebesar 32,40 menit/hari, serta hambatan tapak dan cuaca sebesar 32,30 menit/hari.

Hambatan operasional dan mekanis merupakan komponen terbesar, dengan kontribusi sebesar 8,98% terhadap total giliran kerja atau sekitar 39,98% dari keseluruhan waktu nonproduktif. Aktivitas yang termasuk dalam kelompok ini meliputi perpindahan unit antarjalur kerja, pembersihan material tanah dan serasah yang melekat pada *ripper*, pemeriksaan komponen hidrolik, serta pengisian bahan bakar. Besarnya kontribusi komponen tersebut menunjukkan bahwa pengaturan jalur operasi, kesiapan alat, dan pengelolaan kegiatan pendukung merupakan aspek yang relevan untuk dievaluasi dalam upaya mengurangi kehilangan waktu (Fahlevi *et al*., 2025; Gaveau *et al*., 2019).

Kebutuhan personal dan kelelahan operator menyumbang rata-rata 32,40 menit/hari atau 6,75% dari total waktu kerja. Komponen ini berkaitan dengan kebutuhan fisiologis dan pemulihan kondisi operator selama pengoperasian mesin. Dalam pengelolaan operasional, waktu istirahat yang memadai tetap diperlukan untuk mempertahankan keselamatan, konsentrasi, dan keberlanjutan kinerja. Oleh karena itu, pengurangan waktu nonproduktif tidak dapat dilakukan dengan menghilangkan waktu pemulihan operator secara tidak proporsional.

Hambatan tapak dan cuaca mencapai 32,30 menit/hari atau 6,73% dari total giliran kerja. Berdasarkan deskripsi kondisi lapangan, hambatan yang relevan meliputi keberadaan sisa perakaran, tunggak, tanah basah, dan kesulitan pergerakan alat pada mikrositus tertentu. Kondisi tanah yang mengalami peningkatan kadar air setelah hujan secara mekanis berpotensi mengurangi kemampuan dukung permukaan serta memengaruhi pergerakan ekskavator. Akan tetapi, pengaruh kuantitatif curah hujan dan daya dukung tanah terhadap produktivitas belum dapat ditentukan tanpa pengukuran variabel tersebut pada tingkat pengamatan yang sebanding.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa waktu nonproduktif tidak berasal dari satu faktor dominan tunggal, melainkan dari kombinasi aktivitas pendukung, kebutuhan operator, dan hambatan kondisi tapak. Implikasi operasionalnya adalah perlunya perbaikan penjadwalan pemeliharaan, pengaturan jalur kerja, dan identifikasi hambatan mikrositus sebelum kegiatan pembuatan lubang tanam dilaksanakan (Muhdi *et al*., 2024; Wu *et al*., 2024).

Produktivitas Fisik dan Kapasitas Penyiapan Lubang Tanam

Produktivitas alat dianalisis berdasarkan jumlah lubang tanam yang diselesaikan selama satu hari kerja. Keluaran fisik selanjutnya dikonversi menjadi luasan ekuivalen menggunakan jarak tanam 3,0 × 2,5 m, yang menghasilkan kebutuhan teoritis sekitar 1.333,33 lubang/ha. Ringkasan produktivitas harian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter produktivitas harian *spot cultivator*

Parameter kinerja	Rata-rata	Rentang minimum–maksimum	Simpangan baku	CV
Output fisik (lubang/hari)	2.006,00	1.867–2.147	97,60	4,87%

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Kerapatan teoritis (lubang/ha)	1.333,33	–	–	–
Produktivitas luasan ekuivalen (ha/hari)	1,5045	1,4003–1,6103	0,0732*	4,87%*

Keterangan: Nilai produktivitas luasan dan simpangan baku bertanda () merupakan hasil konversi matematis dari output fisik dengan kerapatan tanam konstan.

Berdasarkan Tabel 2, rata-rata keluaran fisik alat mencapai 2.006 lubang/hari dengan simpangan baku 97,60 lubang/hari. Rentang keluaran harian berada antara 1.867 dan 2.147 lubang, menunjukkan adanya variasi produktivitas selama periode pengamatan. Koefisien variasi sebesar 4,87% menggambarkan variasi relatif yang terbatas terhadap nilai rata-rata pada kondisi mesin, operator, dan tapak yang diamati. Dengan kerapatan teoritis sebesar 1.333,33 lubang/ha, rata-rata keluaran fisik tersebut setara dengan luasan ekuivalen sekitar 1,50 ha/hari. Produktivitas minimum dan maksimum masing-masing setara dengan sekitar 1,40 dan 1,61 ha/hari. Nilai luasan ini merupakan konversi dari jumlah lubang yang diselesaikan, sehingga tidak dapat ditafsirkan sebagai hasil pengukuran langsung luas permukaan tanah yang diolah.

Secara matematis, penggunaan faktor konversi konstan menyebabkan koefisien variasi produktivitas luasan sama dengan koefisien variasi keluaran fisik. Dengan demikian, nilai CV sebesar 7,33% pada tabel awal memerlukan peninjauan kembali apabila seluruh nilai luasan dihitung semata-mata berdasarkan jumlah lubang dan jarak tanam yang sama. Produktivitas harian yang relatif konsisten menunjukkan potensi penggunaan data pengamatan sebagai dasar perencanaan kapasitas operasional pada kondisi sebanding. Namun, variasi produktivitas belum dapat diatribusikan secara kuantitatif kepada tunggak, kemiringan lereng, atau kebasahan tanah tanpa analisis hubungan antara variabel tapak dan keluaran harian (Di Fulvio *et al*., 2024).

Implikasi Mekanisasi terhadap Kegiatan Silvikultur

Penggunaan *spot cultivator* yang dipasang pada ekskavator memungkinkan penyiapan tanah secara lokal pada titik tanam yang telah ditentukan. Berbeda dengan pengolahan tanah menyeluruh, pendekatan ini memusatkan gangguan mekanis pada area yang direncanakan sebagai tempat pertumbuhan awal tanaman. Berdasarkan deskripsi teknis pekerjaan, alat menggunakan *three-tooth ripper* dengan kedalaman pengolahan yang dilaporkan berkisar antara 40 dan 50 cm. Kedalaman tersebut menggambarkan karakteristik operasional pengolahan tanah, tetapi belum dapat digunakan sebagai bukti peningkatan kualitas tanah tanpa pengukuran sebelum dan sesudah pengolahan.

Secara teoritis, penggemburan tanah setempat berpotensi mengurangi hambatan mekanis terhadap penetrasi akar dan meningkatkan kondisi fisik ruang tumbuh awal. Meskipun demikian, pengaruh terhadap porositas, infiltrasi, kepadatan isi tanah, erosi, dan pertumbuhan tanaman memerlukan pengukuran silvikultur dan sifat tanah secara khusus. Dengan demikian, kontribusi empiris penelitian ini terletak pada evaluasi produktivitas kegiatan penyiapan lubang tanam, bukan pada pembuktian peningkatan pertumbuhan tanaman atau perbaikan sifat fisik tanah. Evaluasi

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

lanjutan mengenai respons pertumbuhan tanaman dan perubahan kondisi tanah diperlukan untuk menentukan manfaat silvikultur secara lebih komprehensif (Wu *et al*., 2024).

Estimasi Kebutuhan Armada Berdasarkan Produktivitas Aktual

Estimasi kebutuhan armada dilakukan untuk memenuhi target penyiapan lahan sebesar 288 ha/bulan dengan alokasi 25 hari kerja. Perhitungan didasarkan pada tiga skenario produktivitas, yaitu konservatif sebesar 1,40 ha/hari, moderat sebesar 1,50 ha/hari, dan optimistis sebesar 1,61 ha/hari.

Tabel 3. Analisis sensitivitas kebutuhan armada *spot cultivator* untuk target 288 ha/bulan

Parameter	Konservatif	Moderat	Optimistis
Produktivitas (ha/unit/hari)	1,40	1,50	1,61
Hari kerja per bulan	25	25	25
Kapasitas per unit (ha/bulan)	35,00	37,50	40,25
Target (ha/bulan)	288,00	288,00	288,00
Kebutuhan teoretis (unit)	8,23	7,68	7,16
Alokasi armada (unit)	9	8	8
Kapasitas total (ha/bulan)	315,00	300,00	322,00
Margin kapasitas (ha)	+27,00	+12,00	+34,00
Margin terhadap target (%)	9,38	4,17	11,81

Sumber: Perhitungan berdasarkan parameter produktivitas dan target operasional penelitian. Nilai produktivitas skenario menggunakan angka yang telah dibulatkan.

Pada skenario moderat, kapasitas satu unit mencapai 37,50 ha/bulan, sehingga kebutuhan armada teoretis sebesar 7,68 unit. Karena jumlah mesin harus dinyatakan dalam bilangan bulat, kebutuhan tersebut dibulatkan menjadi delapan unit. Alokasi ini menghasilkan kapasitas nominal 300 ha/bulan atau kelebihan kapasitas sebesar 12 ha dibandingkan target.

Margin kapasitas sebesar 4,17% menunjukkan bahwa alokasi delapan unit masih memiliki cadangan produksi pada tingkat produktivitas rata-rata yang diasumsikan. Akan tetapi, margin tersebut relatif terbatas apabila produktivitas mengalami penurunan. Dengan demikian, delapan unit merupakan kebutuhan minimum pada skenario moderat, bukan jumlah yang menjamin pencapaian target pada seluruh kondisi operasional (Bottaro *et al*., 2018).

Pada skenario konservatif, produktivitas menurun menjadi 1,40 ha/unit/hari sehingga kapasitas bulanan satu unit hanya mencapai 35 ha. Kebutuhan armada meningkat menjadi 8,23 unit atau sembilan unit setelah pembulatan. Sementara itu, pada skenario optimistis, produktivitas meningkat menjadi 1,61 ha/unit/hari dan kebutuhan teoretis menurun menjadi 7,16 unit, tetapi tetap memerlukan delapan unit untuk memenuhi target.

Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi produktivitas harian memiliki implikasi langsung terhadap kebutuhan jumlah mesin. Oleh karena itu, perencanaan armada perlu mempertimbangkan tingkat produktivitas yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dan toleransi pengelola terhadap risiko keterlambatan pekerjaan (Gaveau *et al*., 2019).

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Analisis Ambang Kapasitas dan Risiko Kekurangan Armada

Untuk mengevaluasi kecukupan alokasi delapan unit, dilakukan analisis ambang produktivitas minimum yang diperlukan agar target 288 ha/bulan dapat dicapai dalam 25 hari kerja. Dengan delapan unit mesin, produktivitas minimum yang harus dipertahankan adalah: $P_{min} = \frac{288}{8\ x\ 25} = 1{,}44\ \frac{ha}{(unit.hari)}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa armada delapan unit dapat memenuhi target apabila produktivitas rata-rata setiap unit tidak lebih rendah dari 1,44 ha/hari, dengan asumsi seluruh unit tersedia selama 25 hari kerja. Pada skenario moderat sebesar 1,50 ha/hari, penurunan produktivitas yang masih dapat ditoleransi adalah sekitar 4,00% dari produktivitas dasar. Apabila produktivitas menurun menjadi 1,40 ha/hari, kapasitas delapan unit hanya mencapai 280 ha/bulan, sehingga terjadi kekurangan sebesar 8 ha atau 2,78% dari target.

Secara matematis, kekurangan tersebut setara dengan sekitar 5,71 hari kerja-unit tambahan pada produktivitas 1,40 ha/hari. Apabila kapasitas kerja dapat ditingkatkan secara proporsional melalui penambahan waktu operasional, kebutuhan tambahan tersebut setara dengan sekitar 0,23 jam per unit per hari selama 25 hari kerja. Perhitungan ini merupakan ilustrasi kapasitas, bukan bukti bahwa penambahan jam kerja akan menghasilkan peningkatan produksi yang proporsional. Alternatif mitigasi yang dapat dipertimbangkan mencakup peningkatan kesiapan mekanis alat, pengaturan jalur kerja, pengurangan waktu tunggu yang dapat dikendalikan, penyesuaian jadwal pekerjaan, atau penyediaan unit tambahan. Pemilihan alternatif memerlukan evaluasi biaya, keselamatan kerja, dan ketersediaan sumber daya operasional (Hardiansyah *et al*., 2025).

Sintesis Temuan dan Kontribusi terhadap Perencanaan Mekanisasi HTI

Hasil penelitian memperlihatkan keterkaitan antara struktur waktu operasional, produktivitas harian, dan estimasi kebutuhan armada. Waktu produktif sebesar 77,54% dari giliran kerja menunjukkan bahwa kehilangan waktu merupakan komponen penting dalam evaluasi kapasitas mesin. Pada saat yang sama, rata-rata keluaran fisik sebesar 2.006 lubang/hari memberikan dasar kuantitatif untuk memperkirakan luasan ekuivalen yang dapat disiapkan oleh satu unit alat. Integrasi kedua komponen tersebut dengan target pekerjaan bulanan menghasilkan estimasi kebutuhan armada yang dapat digunakan sebagai dasar perencanaan. Pada produktivitas moderat, delapan unit merupakan alokasi minimum yang memenuhi target 288 ha/bulan. Namun, penurunan produktivitas hingga skenario konservatif menyebabkan kebutuhan meningkat menjadi sembilan unit.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menyediakan pendekatan operasional yang menghubungkan pengamatan waktu kerja dan produktivitas aktual dengan keputusan alokasi armada. Pendekatan tersebut memiliki relevansi praktis karena kebutuhan alat ditentukan berdasarkan kapasitas kerja teramati, bukan hanya berdasarkan spesifikasi teknis mesin. Meskipun demikian, estimasi kebutuhan armada merupakan hasil proyeksi dari satu unit mesin dan satu operator pada kondisi tapak tertentu. Oleh karena itu, penerapannya pada skala konsesi yang lebih

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

luas perlu mempertimbangkan variasi antarunit, keterampilan operator, kondisi tanah, ketersediaan alat, serta perbedaan karakteristik petak kerja. Validasi menggunakan beberapa unit mesin dan lokasi pengamatan yang lebih beragam diperlukan untuk meningkatkan ketepatan estimasi dan memperluas penerapan hasil penelitian (Primahardani *et al*., 2022).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengoperasian excavator-mounted spot cultivator pada lahan mineral Hutan Tanaman Industri (HTI) memiliki tingkat pemanfaatan waktu produktif sebesar 77,54%, dengan rata-rata waktu produktif 372,20 menit/hari dari total giliran kerja 480 menit. Waktu nonproduktif mencapai 107,80 menit/hari (22,46%), yang terdiri atas hambatan operasional dan mekanis (8,98%), kebutuhan personal serta kelelahan operator (6,75%), dan hambatan tapak serta cuaca (6,73%). Produktivitas aktual mencapai rata-rata 2.006 ± 97,60 lubang/hari, setara dengan sekitar 1,50 ha/hari pada jarak tanam 3,0 × 2,5 m, dengan koefisien variasi keluaran fisik sebesar 4,87%. Berdasarkan produktivitas moderat sebesar 1,50 ha/unit/hari dan alokasi 25 hari kerja, pemenuhan target penyiapan lahan 288 ha/bulan membutuhkan delapan unit spot cultivator, dengan kapasitas nominal 300 ha/bulan dan margin kapasitas 12 ha (4,17%). Namun, pada skenario konservatif dengan produktivitas 1,40 ha/unit/hari, kebutuhan meningkat menjadi sembilan unit; penggunaan delapan unit hanya menghasilkan kapasitas 280 ha/bulan atau defisit 8 ha. Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi pengukuran waktu kerja, produktivitas aktual, dan analisis sensitivitas dalam perencanaan kebutuhan armada yang adaptif terhadap variasi operasional. Mengingat pengamatan terbatas pada satu unit mesin dan satu operator, penerapan hasil pada skala konsesi memerlukan validasi lebih lanjut. Penelitian berikutnya disarankan mengevaluasi kinerja beberapa unit dan operator, biaya operasional per hektar, perubahan sifat fisik tanah, serta respons pertumbuhan awal tanaman untuk memperkuat dasar pengambilan keputusan dalam mekanisasi penyiapan lahan HTI.

DAFTAR PUSTAKA

Bahtiar, L. O. (2024). Implementation of the Industrial Plantation Forest Development Policy to Increase the Productivity of Industrial Plantation Forests in North Gorontalo Regency. Jurnal Ekonomi Manajemen, Ilmu Sosial dan Politik, 1(2). https://doi.org/10.69623/j-emspol.v1i2.10

Barua, S. K., Lehtonen, P., & Pahkasalo, T. (2014). Plantation vision: Potentials, challenges and policy options for global industrial forest plantation development. International Forestry Review, 16(2). https://doi.org/10.1505/146554814811724801

Bottaro, G., Roco, L., Pettenella, D., Micheletti, S., & Vanhulst, J. (2018). Forest plantations' externalities: An application of the the analytic hierarchy process to non-industrial forest owners in central chile. Forests, 9(3). https://doi.org/10.3390/f9030141

Briliyanti, R. D., Maulana, I., Jannah, E. M., & Purboseno, S. (2025). The Effectiveness of Drones in Improving Efficiency and Accuracy of Oil Palm Plantation Management in Indonesia: A

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Literature Review. ARRUS Journal of Engineering and Technology, 5(1). https://doi.org/10.35877/jetech4033

Bull, G. Q., Bazett, M., Schwab, O., Nilsson, S., White, A., & Maginnis, S. (2006). Industrial forest plantation subsidies: Impacts and implications. Forest Policy and Economics, 9(1). https://doi.org/10.1016/j.forpol.2005.01.004

Byakagaba, P., & Muhiirwe, R. (2017). Industrial forest plantations in Uganda: Local adjacent community perspectives. Journal of Sustainable Forestry, 36(4). https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1310048

Di Fulvio, F., Acuna, M., Ackerman, P., Ackerman, S., Spinelli, R., Abbas, D., Kaakkurivaara, N., Sánchez-García, S., & Guerra, S. P. S. (2024). Benchmarking operational conditions, productivity, and costs of harvesting from industrial plantations in different global regions. In International Journal of Forest Engineering (Vol. 35, Number 2). https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2296789

Diaz-Balteiro, L., Alfranca, O., González-Pachón, J., & Romero, C. (2016). Ranking of industrial forest plantations in terms of sustainability: A multicriteria approach. Journal of Environmental Management, 180. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.022

Ebissa, G., Fetene, A., & Desta, H. (2023). Comparative analysis of managing plantation forests: The case of keeping plantation forests for carbon credit and industrial profits in Oromia Region, Ethiopia. Heliyon, 9(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15151

Fahlevi, M. F., Mintarti, S., Heksarini, A., & Lestari, D. (2025). Retention and performance in industrial forest plantations: A structural equation modeling approach. International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, 8(6). https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i6.9634

Febrianto, A., Suef, M., Hakim, M. S., Yayat, K. D., & Hardiatama, I. (2025). Operational efficiency and sustainable asset management of heavy equipment in industry: a data-driven framework. Results in Engineering, 27. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106476

Gaveau, D. L. A., Locatelli, B., Salim, M. A., Yaen, H., Pacheco, P., & Sheil, D. (2019). Rise and fall of forest loss and industrial plantations in borneo (2000-2017). Conservation Letters, 12(3). https://doi.org/10.1111/conl.12622

Guerra-Zubiaga, D. A., Aksu, M., Richards, G., & Kuts, V. (2025). Integrating Digital Twin Software Solutions with Collaborative Industrial Systems: A Comprehensive Review for Operational Efficiency. In Applied Sciences (Switzerland) (Vol. 15, Number 13). https://doi.org/10.3390/app15137049

Hardiansyah, G., Mardin Rachmad, H., Rifanjani, S., & Fitriani, A. (2025). Problem Identification and Conflict Resolution Strategies for Industrial Forest Plantation Licensing in Sekadau Forest Management Unit. Jurnal Ilmu Kehutanan, 19(1). https://doi.org/10.22146/jik.v19i1.12221

Hidayat, Y., Baskoro, D. P. T., Purwakusuma, W., Siregar, M. S., & Ramadhi, M. H. A. (2025). Soil Aggregate Stability Index on Agricultural, Plantation, and Forest Lands. Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan, 27(2). https://doi.org/10.29244/jitl.27.2.56-62

Maziotis, A., & Molinos-Senante, M. (2023). A Comprenhesive Eco-Efficiency Analysis Of Wastewater Treatment Plants: Estimation Of Optimal Operational Costs And Greenhouse Gas Emissions. Water Research, 243. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120354

Muhdi, M., Hanafiah, D. S., Sahar, A., & Telaumbanua, A. A. (2024). Effects of noise intensity on concentration levels of chainsaw operators and harvesting workers in industrial forest plantation, North Sumatera, Indonesia. F1000Research, 11. https://doi.org/10.12688/f1000research.114592.3

Nisa, K., Anggraini, T., & Marliyah, M. (2025). Analysis of the Influence of Production Time Management and Quality Control Systems on the Operational Efficiency. Urwatul Wutsqo: Jurnal Studi Kependidikan Dan Keislaman, 14(3). https://doi.org/10.54437/urwatulwutsqo.v14i3.2617

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura

Nobre, S. R., Diaz-Balteiro, L., & Rodriguez, L. C. E. (2021). A compromise programming application to support forest industrial plantation decision-makers. Forests, 12(11). https://doi.org/10.3390/f12111481

Pichler, M., & Ingalls, M. (2021). Negotiating between forest conversion, industrial tree plantations and multifunctional landscapes. Power and politics in forest transitions. Geoforum, 124. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.06.012

Primahardani, I., Mulyadi, A., Syahza, A., & Restuhadi, F. (2022). Sustainability Strategy for Industrial Plantation Forest Management in Riau Province, Indonesia. International Journal of Sustainable Development and Planning, 17(2). https://doi.org/10.18280/ijsdp.170205

Seun, E., Babajide, G., Taye, F., Aderonke, A., & Olabode, B. (2023). Impact of Information Systems on Operational Efficiency: A Comprehensive Analysis. Indian Journal of Computer Science and Engineering, 14(4). https://doi.org/10.21817/indjcse/2023/v14i4/231404013

Tolentino, J. E. G. (2026). Operational Efficiency in Industrial Systems through OEE Analysis. International Journal of Engineering Trends and Technology, 74(2). https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V74I2P103

Wu, M., Goh, K. W., Chaw, K. H., Koh, Y. S., Dares, M., Yeong, C. F., Su, E. L. M., William, H., & Zhang, Y. (2024). An intelligent predictive maintenance system based on random forest for addressing industrial conveyor belt challenges. Frontiers in Mechanical Engineering, 10. https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1383202

e-ISSN : 2746 – 7155
p-ISSN : 1978 – 4996
®2026 Jurusan Kehutanan Universitas Pattimura