



IPB University
— Bogor Indonesia —

MODEL STRATEGI HILIRISASI

AI-Trac

*Module Device 2-Mode pada Traktor Tangan
Berbasis Artificial Intelligence dan Geospatial
Information untuk Meningkatkan Produktivitas
Operasional Pertanian Berkelanjutan*

**PROGRAM HILIRISASI RISET
IPB UNIVERSITY**

Disusun Oleh:

Dr. Ridwan Siskandar, S.Si., M.Si.

Dr. Inna Novianti, S.Si., M.Si.

Billi Rifa Kusumah, S.I.K., M.Si.

Roma Juliana Arios

Annisa Raihanah Maimun



**KECERDASAN
BUATAN**



**PERTANIAN
PRESISI**



**KETAHANAN
PANGAN**



AI-TRAC



INSTITUT PERTANIAN BOGOR

**MODEL STRATEGI HILIRISASI AI-TRAC
PROGRAM HILIRISASI RISET
IPB UNIVERSITY**

AI-Trac:

***MODULE DEVICE 2-MODE PADA TRAKTOR TANGAN BERBASIS
ARTIFICIAL INTELLIGENCE DAN GEOSPATIAL INFORMATION
UNTUK MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS OPERASIONAL
PERTANIAN BERKELANJUTAN***

Disusun Oleh:

Dr. Ridwan Siskandar, S.Si., M.Si.

Dr. Inna Novianti, S.Si., M.Si.

Billi Rifa Kusumah, S.I.K., M.Si.

Roma Juliana Arios

Annisa Raihanah Maimun

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penyusunan dokumen "Strategi Hilirisasi dan Model Bisnis AI-TRAC: *Module Device 2-Mode* pada Traktor Tangan Berbasis *Artificial Intelligence* dan *Geospatial Information* untuk Meningkatkan Produktivitas Operasional Pertanian Berkelanjutan" ini dapat diselesaikan dengan baik.

Dokumen ini disusun sebagai *blueprint* komprehensif untuk memandu fase transisi teknologi AI-TRAC dari tahap prototipe riset menuju implementasi massal di lapangan. Fokus utama dari rancangan ini adalah menjabarkan kelayakan teknis, landasan hukum kepemilikan intelektual oleh IPB University, serta skema bisnis antar-pemerintah (G2G) yang berfokus pada pemerataan teknologi cerdas bagi kelompok tani (Gapoktan).

Keberhasilan pengembangan AI-TRAC dan perumusan strategi hilirisasi ini tidak lepas dari dukungan, bimbingan, serta kolaborasi berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini kami menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. **IPB University**, selaku institusi penangung dan pemegang hak desain industri AI-TRAC, yang terus mendorong ekosistem inovasi dan riset teknologi terapan yang berdampak luas bagi masyarakat.
2. **Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Kuningan**, selaku mitra strategis utama dan pusat hubungan hilirisasi perdana, yang telah memfasilitasi langkah awal penetrasi teknologi ini kepada para petani.
3. **Seluruh Tim Pengembang AI-TRAC**, yang telah bekerja keras merancang infrastruktur *local cloud server*, algoritma navigasi cerdas, dan integrasi operasional traktor tangan.
4. **Para Kelompok Tani (Gapoktan) terlibat**, yang menjadi inspirasi sekaligus tujuan akhir dari inovasi ini, dengan harapan teknologi ini dapat meringankan beban kerja dan menunjang kesejahteraan petani.
5. **Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, Program Hibah Skema Hilirisasi Riset**, atas pendanaan program yang diberikan.

Kami menyadari bahwa dokumen strategi dan model bisnis ini masih memiliki ruang untuk penyempurnaan seiring dengan dinamika adopsi teknologi di lapangan lintas regional. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif dari seluruh pemangku kepentingan sangat kami harapkan guna penyempurnaan langkah hilirisasi di masa mendatang.

Semoga dokumen ini dapat menjadi landasan yang kuat dalam mewujudkan sistem pertanian Indonesia yang lebih presisi, efisien, mandiri, dan berkelanjutan.

Bogor, Agustus 2026
Tim Pengembang AI-TRAC

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR LAMPIRAN	iv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.1.1 Kesesuaian dengan Prioritas Nasional	3
1.1.2 Posisi Proyek dalam Konteks Nasional/Industri	3
1.1.3 Potensi Substitusi Impor / Peningkatan Ekspor Bernilai Tambah.....	4
1.2 Visi, Misi, dan Tujuan Dokumen	5
BAB II Profil Inovasi dan Pembuktian Ketangguhan Teknologi	8
2.1 Deskripsi Modul 2-Mode & Standardisasi Manufaktur	8
2.2 Ketangguhan Teknologi	8
2.1.1 Standardisasi Manufaktur.....	9
2.1.2 Keselamatan Operasional Berbasis AI (Fail-Safe System)	9
2.1.3 Ketahanan Termal dan Lingkungan	10
BAB III Validasi Pasar dan Rekam Jejak Marketing	12
3.1 Analisis Permintaan dan Pain Point	12
3.2 Rekam Jejak Pilot Project Komersial.....	14
3.3 Edukasi, Diseminasi, dan Instalasi Awal.....	16
BAB IV Tata Kelola Legalitas dan Kekayaan Intelektual.....	18
4.1 Konsolidasi HKI Institusional	18
4.2 Kepatuhan Regulasi dan Sertifikasi	19
BAB V Validasi Kelayakan Finansial dan Ekonomi	21
5.1 Struktur Biaya Produksi (HPP)	21
5.2 Strategi Penetapan Harga	22
5.3 Analisis Sensitivitas dan Mitigasi Risiko.....	22
BAB VI Strategi Hilirisasi dan Replikasi Model Bisnis	24
6.1 Skema I: Hilirisasi Terpusat (Top-Down)	25
6.2 Skema II: Model <i>Hub</i> Inovasi Lintas Daerah.....	26

6.3	Komersialisasi Sektor Privat (B2B).....	28
6.4	Analisis Komparatif Tiga Skema Hilirisasi.....	29
6.5	Tahapan Waktu dan Kerangka Replikasi Nasional	31
BAB VII KESIMPULAN DAN PETA JALAN EKSEKUSI		33
7.1	Kesimpulan Eksekutif	33
7.2	Peta Jalan Eksekusi (Rencana Tindak Lanjut)	34
REFERENSI		36
LAMPIRAN		37

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Konsep Retrofit AI-Trac	8
Gambar 2 Temuan Survei dan Profil Segmen Pengguna	12
Gambar 3 Focus Group Discussion.....	13
Gambar 4 Peresmian DISKATAN Kab.Kuningan Sebagai Mitra Pilot Project AI-Trac ..	15
Gambar 5 Pengujian Lahan Dramaga	15
Gambar 6 Diseminasi Publik (HUT Krida Ke-54 Kab. Kuningan)	16
Gambar 7 Struktur HPP	21
Gambar 8 Model Strategi Hilirisasi	24
Gambar 9 Lab2Market	28

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Kuantifikasi Ukuran Pasar (TAM, SAM, SOM) untuk Skema Investasi Anggaran Pemerintah.....	14
Tabel 2 Status Mutakhir Klasifikasi Kepemilikan Kekayaan Intelektual AI-TRAC	18
Tabel 3 Konsolidasi Harga Pokok Produksi (HPP) per Unit AI-TRAC.....	21
Tabel 4 Peran dan Fungsi Setiap Aktor Utama dalam Skema I (Hilirisasi Terpusat).....	25
Tabel 5 Peran dan Fungsi Setiap Aktor Utama dalam Skema I (Hilirisasi Terpusat).....	27
Tabel 6 Analisis Komparatif Karakteristik Tiga Skema Hilirisasi AI-TRAC	30
Tabel 7 Kerangka Waktu Aktivasi Skema Hilirisasi dan Target Replikasi	31
Tabel 8 Kepemilikan HKI AI-Trac.....	37
Tabel 9 Rincian Bill of Materials (BOM)	38
Tabel 10 Biaya Konversi dan Overhead per Unit	38
Tabel 11 Komparasi Harga Pasar dan Strategi Penetapan Harga AI-TRAC.....	38

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Kepemilikan HKI AI-TRAC	37
Lampiran 2. Rincian <i>Bill of Materials</i> (BOM) Komponen Hardware.....	38

Lampiran 3.	Rincian Biaya Konversi dan <i>Overhead</i> per Unit.....	38
Lampiran 4.	Komparasi Harga Pasar dan Strategi Penetapan Harga AI-TRAC.....	38

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor pertanian memegang peranan krusial sebagai penopang utama ketahanan pangan nasional, meskipun mayoritas petani di Indonesia masih bertumpu pada mekanisasi konvensional yang mengandalkan tenaga manusia. Di tingkat global, mekanisasi pertanian telah menjadi pendorong utama peningkatan produktivitas dan efisiensi sektor pertanian. Pasar traktor pertanian dunia mencapai nilai sekitar USD 60,08 miliar pada tahun 2024 dan diproyeksikan meningkat menjadi USD 88,95 miliar pada tahun 2030 dengan laju pertumbuhan tahunan (Compound Annual Growth Rate/CAGR) sebesar 6,5%. Pertumbuhan tersebut didorong oleh meningkatnya kebutuhan akan efisiensi tenaga kerja pertanian, dukungan kebijakan pemerintah melalui berbagai program mekanisasi, serta semakin luasnya adopsi teknologi pertanian presisi di berbagai negara (Fortune Business Insights, 2025).

Sejalan dengan itu, Perserikatan Bangsa-Bangsa memproyeksikan bahwa populasi dunia akan mencapai 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050, sehingga produksi pangan global perlu meningkat sekitar 69% dibandingkan tahun 2010. Kondisi tersebut menjadikan investasi pada alat dan mesin pertanian (alsintan) sebagai salah satu kebutuhan strategis untuk menjamin ketahanan pangan dunia (Statistics Market Research Consulting, 2024). Di kawasan Asia-Pasifik, pasar mekanisasi pertanian bernilai USD 25,12 miliar pada tahun 2023 dan diperkirakan mencapai USD 39,84 miliar pada tahun 2032 dengan CAGR sebesar 5,25%, menjadikan kawasan ini sebagai penyumbang sekitar 45,81% pasar traktor global (Market Data Forecast, n.d.). Sementara itu, tingkat mekanisasi di berbagai negara masih menunjukkan kesenjangan yang cukup besar. Vietnam, misalnya, telah mencapai tingkat mekanisasi sekitar 3,8 hp/ha dengan kepadatan 202 unit traktor per 1.000 hektar, sedangkan beberapa negara Afrika seperti Nigeria dan Ethiopia masih memiliki kepadatan di bawah 20 unit per 1.000 hektar (Yadav et al., 2025).

Dalam konteks Indonesia, industri alat dan mesin pertanian (alsintan) domestik kini telah mampu memproduksi berbagai sarana pra-panen maupun pasca-panen. Contoh alsintan pra-panen yang banyak digunakan antara lain traktor roda dua (*walking tractor*) dan traktor roda empat. Merujuk pada data Statistik Sarana Pertanian Indonesia tahun 2024, akumulasi bantuan traktor yang disalurkan pemerintah selama periode 2020–2024 mencapai 29.176 unit, dengan Jawa Barat menjadi provinsi penerima bantuan terbesar

kedua setelah Sulawesi, yaitu sebanyak 3.150 unit (Jenderal -Kementerian Pertanian, 2024). Survei lapangan juga menunjukkan bahwa sekitar 65% petani Indonesia menggunakan traktor sebagai alsintan utama, diikuti penggunaan mesin perontok (*thresher*) sebesar 53% dan *Rice Milling Unit* (RMU) bergerak sebesar 48%, sedangkan penggunaan *combine harvester* masih relatif terbatas akibat ukuran lahan yang sempit serta belum meratanya pemanfaatan teknologi tersebut (Subagiyo & Budi Setyono, 2016). Meskipun demikian, tingkat mekanisasi pertanian nasional masih berada pada kisaran 39–40% dan penyebarannya belum merata antarwilayah maupun subsektor pertanian (Pusat Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian, 2021).

Kapasitas kerja mesin pertanian merujuk pada efektivitas alat dalam menyelesaikan proses pengolahan lahan berdasarkan fungsi dan kegunaannya. Nilai kapasitas ini ditentukan oleh beberapa elemen, antara lain lebar kerja efektif, kecepatan operasional, serta waktu yang terbuang karena manuver pembelokan atau pemeliharaan mesin. Di samping faktor mekanis dan karakteristik lahan, tingkat kelelahan operator khususnya pada traktor tangan memiliki pengaruh yang signifikan. Durasi kerja yang panjang cenderung menurunkan performa manusia sehingga memperlambat produktivitas kerja. Ketergantungan pada kendali manual ini memicu berbagai permasalahan, seperti kelelahan fisik, tingginya risiko kecelakaan di area berlumpur atau curam, hingga pemborosan waktu dan bahan bakar.

Kondisi vegetasi atau sisa komoditas terdahulu di area kerja juga dapat menghambat laju traktor, berbeda dengan lahan bersih yang mendukung hasil kerja lebih maksimal. Studi membuktikan bahwa efisiensi traktor beroperasi lebih tinggi di area yang bersih dibandingkan lahan bersemak. Pada tanah lunak atau tergenang, pengolahan umumnya langsung memanfaatkan gelebeg. Setiap model traktor memiliki kapasitas kerja yang berbeda sesuai spesifikasi mesin yang digunakan. Sebagai ilustrasi, DonFeng K75A (7,5 HP) dan Kubota RD 65 (6,5 HP) memiliki kapasitas kerja masing-masing sebesar 20 jam/ha dan 15 jam/ha, sedangkan Quick G1000 dan Yanmar TF85 yang menggunakan mesin 8,5 HP mampu mencapai 9,59 jam/ha dan 10,61 jam/ha (Kiki Suheiti, 2016).

Perkembangan teknologi *Smart Farming* 4.0 turut mendorong transformasi mekanisasi menuju sistem pertanian cerdas melalui digitalisasi alat dan mesin pertanian. Salah satu implementasinya adalah modifikasi traktor konvensional menjadi traktor semi-otonom maupun otonom (*autonomous tractor*) yang mampu meningkatkan efisiensi operasional, produktivitas, serta keselamatan kerja operator (Rachmawati, 2021). Guna merespons tantangan tersebut, Dr. Ridwan Siskandar beserta tim dari Sekolah Vokasi IPB

mengembangkan riset berjudul "Rekayasa *Module Device* 2-Mode pada Traktor Tangan Berbasis *Artificial Intelligence* dan *Geospatial Information* untuk Meningkatkan Produktivitas Operasional Pertanian Berkelanjutan." Inovasi ini berfokus pada pengembangan sistem kendali jarak jauh (*remote control*) berbasis kecerdasan buatan dan informasi *geospasial* sehingga operator tidak lagi harus mengendalikan traktor secara langsung di lapangan.

1.1.1 Kesesuaian dengan Prioritas Nasional

Selaras dengan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2025–2029 dan Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2025–2045, pemerintah menitikberatkan pada urgensi transformasi ekonomi. Langkah ini ditempuh dengan memacu produktivitas agraria yang berkelanjutan melalui adopsi teknologi modern (seperti *smart farming*, teknologi sensor, modifikasi cuaca, dan instrumen lainnya) di sektor kehutanan, perkebunan, perikanan, serta pertanian. Dalam sasaran jangka menengah, kebijakan negara difokuskan pada penguatan kapasitas sumber daya manusia (SDM), sains, teknologi, sekaligus konsistensi hilirisasi serta ekspansi industri berbasis sumber daya alam (Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2025). Manifestasi konkret dari sistem *smart farming* ini terlihat dari implementasi teknologi otomatis (*autonomous*) pada alat bajak. Kendati pemanfaatannya masih terbatas di Indonesia, inovasi traktor otonom ini diproyeksikan mampu mengoptimalkan efisiensi proses pengolahan lahan pertanian.

1.1.2 Posisi Proyek dalam Konteks Nasional/Industri

AI-Trac memiliki posisi strategis di ekosistem mekanisasi pertanian Indonesia karena mengisi celah teknologi yang selama ini belum tersentuh oleh pelaku industri alat dan mesin pertanian (alsintan). Kondisi saat ini:

1. Bantuan traktor tangan konvensional dari pemerintah masih cukup tinggi. Berdasarkan data statistik sarana pertanian Indonesia tahun 2024, total bantuan traktor tahun 2020 hingga 2024 mencapai 29176 unit (Revolusi Mekanisasi Pertanian Indonesia, n.d.).
2. Industri alsintan lokal seperti Quick, John Deere, dan Yanmar Indonesia lebih fokus pada produksi *chassis* dan mekanik, dan belum terlihat pada integrasi sistem kontrol yang dapat dikendalikan dari jarak jauh.
3. Teknologi *autonomous tractor* yang diproduksi perusahaan global saat ini masih tergolong mahal dan baru diperuntukkan untuk jenis traktor besar. Sebagai

contoh *autonomous John Deere 8R tractor* dijual dengan harga USD 500,000 dan USD 600,000 atau sekitar Rp 8.284.500.000,- dan Rp 9.941.400.000,-.

Dalam konteks ini, AI-Trac menempati posisi unik sebagai teknologi antara (*bridging technology*) di tengah mahalnnya *autonomous tractor* saat ini karena beberapa alasan:

1. AI-Trac bukan mengusulkan traktor baru, tetapi modul *retrofit* sehingga lebih ekonomis dan mudah diakses atau digunakan.
2. Dapat diproduksi oleh industri lokal tanpa perlu membangun pabrik besar karena hanya beberapa komponen tambahan yang digunakan.
3. Berpotensi menjadi standar baru untuk “*AI-Enabled Hand Tractor*” di Indonesia. Peluang kerjasama dengan pabrik traktor yang ada di Indonesia sangat dimungkinkan karena potensi dan peluang pasar yang bisa dipenetrasi.

Dengan demikian, AI-Trac bukan sekadar produk riset, tetapi calon komponen industri alsintan nasional yang dapat dikomersialisasi sebagai *Original Equipment Manufacturer (OEM) part*, dipasang pada unit baru oleh pabrik lokal atau dijual sebagai kit *retrofit* oleh bengkel mekanisasi di desa.

1.1.3 Potensi Substitusi Impor / Peningkatan Ekspor Bernilai Tambah

Produk AI-Trac: *Module Device 2-Mode* pada Traktor Tangan berbasis *Artificial Intelligence* dan *Geospatial Information* untuk Meningkatkan Produktivitas Operasional Pertanian Berkelanjutan memiliki potensi strategis dalam mendukung kemandirian nasional di bidang alat dan mesin pertanian (Alsintan).

Produk AI-Track merupakan salah satu contoh modernisasi alat pertanian dalam bentuk modul *retrofit* yang dapat dibongkar-pasang untuk meningkatkan produktivitas dari traktor tangan. Keberadaan traktor otomatis atau *autonomous tractor* masih sangat jarang dan belum dimanfaatkan. Saat ini, pasar alsintan di Indonesia masih didominasi oleh produk konvensional yang diproduksi oleh Quick, Kubota, Yanmar, dan John Deere. Harga traktor otonom atau otomatis masih impor dengan harga relatif tinggi, yaitu berkisar antara Rp500 juta hingga Rp1 miliar per unit.

Kondisi tersebut menyebabkan teknologi pertanian berbasis kecerdasan buatan sulit diakses oleh petani kecil dan menengah yang mendominasi sektor pertanian nasional. Sebagai inovasi hasil riset dalam negeri dari kampus IPB, AI-Trac dikembangkan dengan pendekatan *retrofit modular*, yang memungkinkan sistem ini dipasang pada traktor tangan konvensional tanpa memerlukan penggantian mesin utama. Dengan estimasi Harga Pokok Penjualan (HPP) sebesar Rp 20.800.000 dan

harga jual sekitar Rp30.000.000 per unit, AI-Trac dapat memberikan solusi otomasi pertanian dengan biaya jauh lebih rendah dibandingkan produk impor dengan fungsi sejenis. Pendekatan ini menjadikan AI-Trac memiliki potensi substitusi impor yang dibutuhkan untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi tenaga kerja.

Dari sisi kemandirian teknologi, AI-Trac dirancang menggunakan komponen yang sebagian besar dapat diperoleh dari pemasok lokal, seperti sensor, mikrokontroler atau mini PC, modul komunikasi nirkabel, dan komponen mekanik pendukung. Penerapan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) yang tinggi diharapkan dapat memperkuat posisi Indonesia dalam rantai pasok industri alsintan, sekaligus mendukung kebijakan pemerintah dalam program substitusi impor dan penguatan industri nasional alat pertanian. Pengembangan AI-Trac secara berkelanjutan juga dapat mendorong tumbuhnya ekosistem inovasi manufaktur lain seperti industri elektronik, otomasi, dan kecerdasan buatan dalam negeri, yang selaras dengan arah pembangunan industri 4.0 di sektor pertanian. Keberhasilan komersialisasi AI-Trac akan mendukung tercapainya otomatisasi alsintan nasional guna mensukseskan program pemerintah dalam mendukung modernisasi alat pertanian khususnya dalam bidang pengolahan lahan (*Laporan_Penyelesaian Hambatan_Klaster Tipe 3_RS*, n.d.).

1.2 Visi, Misi, dan Tujuan Dokumen

Kehadiran AI-TRAC lahir dari sebuah kesadaran strategis untuk menjembatani kesenjangan antara kebutuhan mekanisasi cerdas dan keterbatasan aksesibilitas teknologi di sektor pertanian domestik. Secara fundamental, inovasi ini digerakkan oleh visi besar untuk menjadikan AI-TRAC sebagai solusi modul *retrofit* berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang menjadi rujukan utama dalam modernisasi alat dan mesin pertanian (alsintan) nasional. Visi ini diproyeksikan untuk mewujudkan sistem pengolahan lahan pertanian Indonesia yang jauh lebih produktif, efisien, dan berkelanjutan, tanpa harus bergantung pada teknologi *autonomous tractor* impor yang menuntut nilai investasi infrastruktur yang sangat tinggi.

Guna memanifestasikan visi pelopor tersebut ke dalam realitas operasional dan komersial, tim pengembang merumuskan serangkaian misi strategis yang saling berkesinambungan. Langkah-langkah implementatif tersebut dijalankan melalui komitmen untuk:

1. **Validasi Ketangguhan Teknis:** Mengembangkan dan memvalidasi teknologi modul retrofit AI-TRAC hingga mencapai tingkat kesiapan teknologi yang teruji

andal pada kondisi lapangan ekstrem lahan sawah di Indonesia, secara khusus mencakup aspek navigasi presisi, keselamatan operasional, dan ketahanan lingkungan.

2. **Pembuktian Penerimaan Pasar:** Membuktikan validitas permintaan pasar dan manfaat nilai ekonomi AI-TRAC melalui pelaksanaan *pilot project* partisipatif bersama instansi pemerintah daerah, yang berfungsi sebagai basis empiris dalam pengambilan keputusan adopsi kelembagaan secara nyata.
3. **Konsolidasi Kepastian Hukum:** Memastikan kepastian hukum dan tata kelola kekayaan intelektual (HKI) yang kokoh di bawah kepemilikan mutlak institusi IPB University, guna melindungi nilai pelopor inovasi sekaligus mendukung tahapan hilirisasi yang berlandaskan legalitas yang bersih (*clean and clear*).
4. **Optimalisasi Kelayakan Keekonomian:** Merumuskan struktur biaya produksi (HPP) dan strategi penetapan harga jual yang rasional, sehingga adopsi AI-TRAC menjadi instrumen efisiensi yang sangat terjangkau bagi instansi pengguna tanpa mengorbankan parameter keberlanjutan model bisnis.
5. **Ekspansi dan Replikasi Bisnis:** Membangun arsitektur hilirisasi berlapis melalui kemitraan strategis dengan instansi pemerintah daerah (*Business-to-Government/B2G*) serta pematangan postur komersial ke sektor swasta (*Business-to-Business/B2B*), guna mengakselerasi replikasi dan skala pertumbuhan AI-TRAC secara nasional hingga membuka gerbang ekspansi pasar ASEAN.

Seluruh penjabaran visi dan misi di atas pada akhirnya dikristalisasi ke dalam dokumen strategi ini. Dokumen ini disusun untuk menjadi pedoman dan rujukan strategis yang komprehensif bagi seluruh pemangku kepentingan dalam ekosistem AI-TRAC, mulai dari tim peneliti dan pengembang di lingkungan IPB University, mitra pemerintah daerah yang menjadi pengadopsi awal seperti Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian (DISKATAN) Kabupaten Kuningan, hingga calon mitra replikasi dari dinas daerah lain serta jaringan investor swasta.

Secara spesifik, strategi ini bertujuan untuk memaparkan bukti ketangguhan teknis yang telah tervalidasi pada lingkungan operasional nyata, mendokumentasikan rekam jejak validasi pasar dan adopsi kelembagaan awal, serta memberikan jaminan kepastian hukum atas aset kekayaan intelektual. Lebih jauh, dokumen ini menyajikan analisis kelayakan finansial yang tajam beserta perumusan strategi replikasi model bisnis melalui skema B2G

dan B2B. Keseluruhan kerangka pemikiran tersebut kemudian bermuara pada satu kesimpulan utuh dan peta jalan eksekusi jangka pendek yang dapat segera ditindaklanjuti secara taktis oleh seluruh pihak terkait.

BAB II

PROFIL INOVASI DAN PEMBUKTIAN KETANGGUHAN TEKNOLOGI

2.1 Deskripsi Modul 2-Mode & Standardisasi Manufaktur



Gambar 1 Konsep Retrofit AI-Trac

AI-Trac merupakan sebuah modul retrofit yang dirancang untuk dipasangkan pada traktor tangan (hand tractor) roda dua konvensional yang sudah ada di pasaran. Nama lengkap produk ini adalah "AI-Trac: Module Device 2-Mode pada Traktor Tangan Berbasis Artificial Intelligence dan Geospatial Information untuk Meningkatkan Produktivitas Operasional Pertanian Berkelanjutan". Produk ini dikembangkan oleh tim peneliti dari Institut Pertanian Bogor (IPB) melalui Program Hilirisasi Riset Dorongan Teknologi 2025.

Sebagai modul tambahan yang bersifat plug-and-play, AI-Trac memungkinkan traktor tangan konvensional yang selama ini dioperasikan secara manual untuk ditingkatkan kemampuannya menjadi alat pertanian yang cerdas dan semi-otonom. Produk ini tidak menggantikan traktor yang sudah ada, melainkan memperluas kapabilitasnya melalui serangkaian komponen elektronik dan mekanis yang terintegrasi.

2.2 Ketangguhan Teknologi

Rangkaian pengujian rekayasa yang telah dilaksanakan terhadap purwarupa AI-TRAC menandai titik balik krusial dalam perjalanan hilirisasi teknologi ini. Melalui pendekatan investigasi berbasis Root Cause Analysis (RCA) yang dipadukan dengan metode Fishbone Diagram (Ishikawa) dan teknik 5 Why, seluruh kelemahan struktural yang teridentifikasi pada purwarupa versi awal (V1.0) telah berhasil dijembatani secara sistematis melalui iterasi rekayasa menuju versi V1.2. Rangkaian uji lapangan ekstrem, yang mencakup pengujian pada lahan seluas 1 hektare dengan karakteristik tanah liat

berkemiringan 5–15° serta pengujian ketahanan termal selama 8 jam operasi nonstop, telah dilaksanakan secara menyeluruh dan tuntas. Berdasarkan pemenuhan seluruh parameter kritis pada aspek keselamatan operasional, presisi navigasi, kapabilitas kecerdasan buatan, ketahanan lingkungan, dan kesiapan standardisasi manufaktur, AI-TRAC dinyatakan telah tervalidasi mencapai Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) 7, yaitu tahapan di mana sistem telah teruji dan dibuktikan keandalannya dalam lingkungan operasional nyata. Pencapaian ini menjadi fondasi teknis yang kokoh untuk mendukung proses hilirisasi lebih lanjut.

2.1.1 Standardisasi Manufaktur

Dari sisi kesiapan manufaktur, perubahan paling mendasar terjadi pada metode perakitan. Jika sebelumnya proses perakitan dilakukan secara manual oleh masing-masing perakit tanpa standar kerja yang terdokumentasi, kini seluruh proses telah distandardisasi. Standardisasi tersebut mencakup dimensi *bracket*, jenis sekrup, hingga penggunaan *quick connector* pada seluruh titik sambungan kritis sebagai pengganti metode penyambungan kabel secara manual. Selain itu, proses manufaktur juga didukung oleh penerapan penuh kerangka kerja MOKA/PPO (*Modular Component Architecture/Product, Process, Organization*) untuk mendokumentasikan *Bill of Materials* (BOM), prosedur perakitan, serta riwayat perubahan desain, sehingga setiap perubahan dapat ditelusuri secara sistematis.

2.1.2 Keselamatan Operasional Berbasis AI (Fail-Safe System)

Aspek keselamatan operasional menjadi pilar krusial dalam validasi kesiapan AI-TRAC untuk beroperasi pada lingkungan nyata. Sistem kini ditopang oleh engine AI onboard berbasis NVIDIA Jetson Orin Nano dengan kapasitas komputasi 40 TOPS dan daya operasional dinamis di bawah 15 W, yang menjalankan kerangka kerja ROS2 Humble sebagai middleware komunikasi antarmodul, terintegrasi dengan jalur komunikasi CAN-FD berkecepatan 1 Mbps. Arsitektur keselamatan berlapis (*redundant fail-safe*) dibangun melalui kombinasi Fail-Safe Relay pada hardware dan Signal Watchdog pada firmware, dilengkapi redundansi Dual-IMU (Bosch BMI088) sebagai sensor orientasi cadangan. Pada lapisan deteksi objek, model YOLOv8 diintegrasikan untuk klasifikasi hambatan (manusia, pohon, tepi lahan) secara real-time, sementara perencanaan lintasan otonom ditopang oleh algoritma path planning A* yang mengoptimalkan radius putaran headland hingga di bawah 2 meter.

Sebelumnya, sistem tidak memiliki mekanisme Emergency Stop (E-Stop) otomatis yang robust, sehingga apabila sinyal Remote Control terputus, perilaku

sistem tidak terdefinisi secara pasti. Kondisi ini kini telah diatasi sepenuhnya: mekanisme fail-safe otomatis melalui kombinasi relay dan watchdog kini mampu menghentikan sistem secara aman dalam waktu kurang dari 1 detik apabila sinyal hilang. Latensi end-to-end sistem, yang sebelumnya mencapai 150 ms akibat bottleneck komunikasi, berhasil ditekan menjadi kurang dari 30 ms. Tingkat deteksi hambatan (detection rate) tercatat mencapai 98%, dengan hasil pengujian pada 50 kali pengulangan uji lapangan menunjukkan pencapaian zero collision atau nihil insiden tabrakan. Pada aspek kendali kemudi, osilasi steering yang sebelumnya berada pada rentang $5\text{--}10^\circ$ kini tereduksi menjadi tracking error di bawah 1° melalui penerapan Model Predictive Control (MPC) dengan gain scheduling. Rangkaian pembuktian keselamatan ini menjadi modal utama yang menjamin bahwa unit AI-TRAC dapat dioperasikan secara aman di area kerja yang berdekatan dengan aktivitas dan aset milik institusi maupun masyarakat.

2.1.3 Ketahanan Termal dan Lingkungan

Ancaman terhadap keandalan perangkat keras AI-TRAC pada kondisi lapangan riil turut menjadi fokus penyelesaian rekayasa. Pengujian awal mengungkap bahwa unit kontrol mengalami thermal runaway (suhu melebihi 80°C) hanya dalam 2 jam operasional, jauh di bawah target operasi kontinu 6–8 jam yang menjadi tolok ukur produktivitas. Persoalan ini bersumber dari dua akar masalah utama: pertama, enclosure perangkat elektronik yang hanya memenuhi rating IP54 (tahan debu terbatas dan percikan air ringan), sementara lingkungan sawah yang basah dan berlumpur mensyaratkan standar yang jauh lebih tinggi; kedua, sistem pendinginan yang masih bersifat pasif tanpa mekanisme active cooling yang memadai untuk mengimbangi beban komputasi unit AI onboard.

Solusi yang diimplementasikan mencakup peningkatan enclosure menuju rating IP67 (tahan debu penuh dan tahan perendaman sementara), disertai penambahan conformal coating pada Printed Circuit Board (PCB) dan penggantian seluruh konektor kabel dengan tipe aviation waterproof yang lebih tahan korosi. Pada aspek manajemen daya dan termal, sistem pendinginan pasif digantikan dengan active cooling yang dipadukan dengan graphene pad sebagai media transfer panas berkonduktivitas tinggi, dilengkapi heatsink aktif dan dynamic power gating yang menurunkan konsumsi daya unit Jetson hingga di bawah 10 W pada kondisi idle.

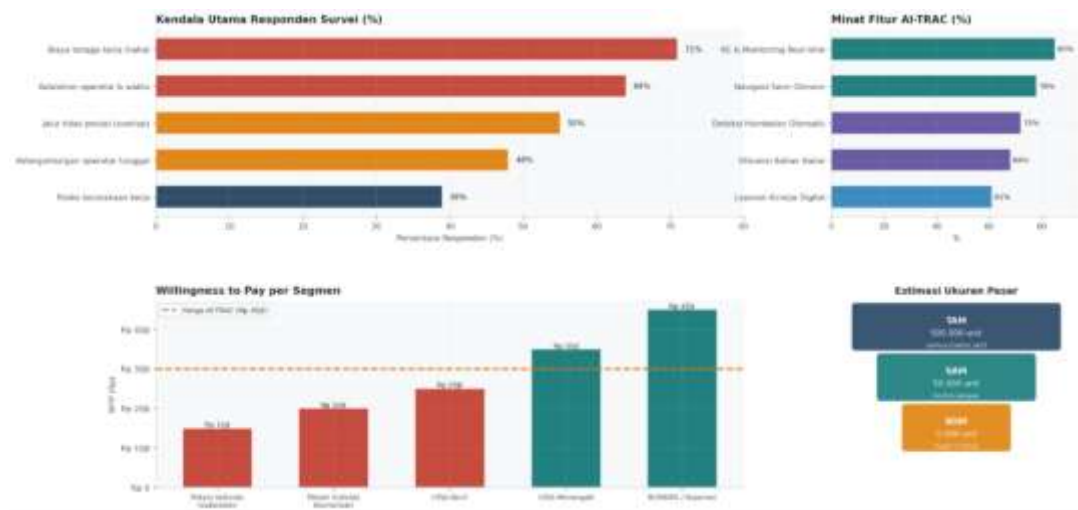
Hasil pengujian menunjukkan perbaikan signifikan pada dua parameter kunci. Failure rate hardware, yang sebelumnya mencapai 15% setelah 3 jam operasi, kini secara signifikan menurun dengan capaian MTBF di atas 100 jam. Stabilitas suhu operasional turut terbukti kokoh: sistem V1.2 yang dilengkapi active cooling dan graphene pad mampu menjaga suhu operasional stabil di bawah 70°C selama 8 jam operasi nonstop, mencegah terjadinya thermal throttling yang sebelumnya membatasi durasi kerja efektif unit. Ketahanan termal dan lingkungan yang telah terbukti ini menjadikan AI-TRAC layak untuk dioperasikan secara berkelanjutan.

BAB III

VALIDASI PASAR DAN REKAM JEJAK MARKETING

3.1 Analisis Permintaan dan Pain Point

Proses validasi permintaan pasar AI-TRAC dilakukan melalui kombinasi survei kuantitatif dan *Focus Group Discussion* (FGD) yang melibatkan kelompok tani, pengelola lahan, serta jajaran teknis di lingkungan DISKATAN Kabupaten Kuningan. Pendekatan *mixed-method* ini dipilih untuk memastikan bahwa data permintaan yang dihasilkan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga mampu menjustifikasi keputusan strategis terkait segmentasi pasar, struktur harga, dan prioritas pengembangan fitur produk.



Gambar 2 Temuan Survei dan Profil Segmen Pengguna

Hasil survei mengonfirmasi bahwa tekanan operasional pada pengolahan lahan berbasis traktor tangan konvensional bersumber dari empat kendala dominan yang saling mempengaruhi. Beban biaya tenaga kerja operasional tercatat sebagai kendala paling signifikan, dikeluhkan oleh 71% responden, mencerminkan tekanan fiskal yang secara langsung dirasakan oleh instansi pengelola armada alat mesin pertanian dalam menjaga keberlanjutan operasional lahan garapan yang luas. Kelelahan fisik operator akibat paparan getaran dan durasi kerja yang panjang menempati posisi kedua dengan 64% responden mengeluhkan hal tersebut, menegaskan bahwa dimensi ergonomi bukan sekadar isu kesejahteraan pekerja, melainkan juga faktor penentu konsistensi kualitas pengolahan lahan dan produktivitas kerja harian. Persoalan jalur kerja yang tumpang tindih (*overlap*) turut disorot oleh 55% responden sebagai sumber pemborosan bahan bakar dan waktu operasional yang signifikan, sementara ketergantungan pada operator tunggal

berpengalaman diidentifikasi oleh 48% responden sebagai risiko struktural yang dapat menghentikan seluruh siklus operasional apabila operator tersebut berhalangan.



Gambar 3 Focus Group Discussion

Pada sisi minat terhadap solusi teknologi, temuan survei menunjukkan validasi permintaan yang kuat terhadap fitur inti AI-TRAC. Sebanyak 85% responden menyatakan ketertarikan tinggi terhadap fitur *Remote Control* (RC) dan sistem monitoring armada, sementara 78% responden menunjukkan minat terhadap kapabilitas semi-otonom yang memungkinkan pengolahan lahan berjalan dengan intervensi operator yang minimal. Tingginya angka minat ini, jika dibaca berdampingan dengan empat *pain point* di atas, menegaskan bahwa permintaan terhadap AI-TRAC bersifat terbukti (*demand-proven*) dan bukan sekadar spekulasi teknologi semata, karena secara langsung merespons keluhan operasional yang telah teridentifikasi secara kuantitatif.

Justifikasi harga menjadi elemen penting dalam memvalidasi permintaan terhadap AI-TRAC. Apabila AI-TRAC diposisikan sebagai produk bagi konsumen individual, harga sebesar Rp30.000.000 per unit akan menghadapi keterbatasan daya beli petani perorangan. Sebaliknya, ketika AI-TRAC ditujukan kepada DISKATAN Kabupaten Kuningan sebagai pengelola anggaran sekaligus operator armada, penilaian terhadap kelayakan investasinya menjadi lebih rasional. Instansi pemerintah daerah mengevaluasi investasi berdasarkan manfaat jangka panjang, sehingga harga Rp30.000.000 per unit dapat dipertanggungjawabkan apabila mampu menghasilkan efisiensi anggaran operasional minimal 20% per tahun pada lahan binaan yang dikelola. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pengelolaan keuangan daerah yang menekankan *value for money*, yaitu setiap belanja modal harus memberikan manfaat yang terukur. Dengan demikian, AI-TRAC tidak hanya dipandang sebagai produk yang dibeli, tetapi sebagai instrumen untuk meningkatkan efisiensi penggunaan anggaran.

Kuantifikasi ukuran pasar disusun secara berjenjang menggunakan pendekatan *Total Addressable Market* (TAM), *Serviceable Available Market* (SAM), dan *Serviceable Obtainable Market* (SOM), guna memastikan bahwa target penetrasi yang ditetapkan memiliki dasar estimasi yang realistis dan dapat dipertanggungjawabkan.

Tabel 1 Kuantifikasi Ukuran Pasar (TAM, SAM, SOM) untuk Skema Investasi Anggaran Pemerintah

Level Pasar	Definisi dan Dasar Estimasi	Estimasi Unit
TAM (<i>Total Addressable Market</i>)	Seluruh populasi traktor tangan aktif di Indonesia yang berpotensi menjadi sasaran retrofit mekanisasi cerdas berbasis data Kementerian Pertanian	± 500.000 unit
SAM (<i>Serviceable Available Market</i>)	Unit yang terkonsentrasi pada sentra produksi padi dengan akses distribusi realistis dan kesiapan kelembagaan dinas daerah	± 50.000 unit
SOM (<i>Serviceable Obtainable Market</i>)	Target penetrasi 5 tahun pertama melalui skema investasi anggaran DISKATAN dan replikasi ke dinas daerah mitra	1.000 unit

Target SOM sebesar 1.000 unit selama lima tahun setara dengan rata-rata penjualan 200 unit per tahun pada fase kematangan operasional, sebuah angka yang secara konservatif berada di bawah kapasitas produksi *workshop* yang diproyeksikan. Temuan ini menunjukkan bahwa tantangan utama dalam hilirisasi AI-TRAC bukan berasal dari rendahnya permintaan pasar, melainkan dari kemampuan memperluas implementasi di berbagai pemerintah daerah serta efektivitas mekanisme distribusi antarinstansi pemerintah.

3.2 Rekam Jejak Pilot Project Komersial

Validasi teknologi di lapangan tidak dapat semata-mata mengandalkan data laboratorium atau simulasi. Oleh karena itu, tim peneliti melaksanakan Pilot Project komersial partisipatif selama enam bulan, terhitung sejak Januari hingga Juni 2026, yang berlangsung di dua lokasi strategis: lahan operasional di Kabupaten Kuningan yang berada di bawah pembinaan DISKATAN, serta lahan percobaan IPB Dramaga, Bogor, sebagai lingkungan kendali untuk pengujian teknis terstandardisasi.



Gambar 4 Peresmian DISKATAN Kab.Kuningan Sebagai Mitra Pilot Project AI-Trac



Gambar 5 Pengujian Lahan Dramaga

Pemilihan skema pelaksanaan bertahap di dua lokasi ini dirancang untuk memisahkan pengujian aspek teknis dari pengujian di lapangan riil. Lahan percobaan IPB Dramaga difungsikan sebagai *baseline* untuk memvalidasi kinerja sistem navigasi dan kendali dalam kondisi yang terkontrol, sedangkan lahan operasional di Kabupaten Kuningan menjadi lokasi utama untuk membuktikan keandalan sistem pada lapangan riil yang memiliki variasi tekstur tanah, topografi, serta pola kerja harian operator lapangan DISKATAN Kabupaten Kuningan.

Pendekatan edukasi partisipatif menjadi metodologi inti dalam pelaksanaan Pilot Project ini. Alih-alih menempatkan operator lapangan sebagai objek pasif penerima teknologi, tim peneliti melibatkan mereka secara langsung dalam siklus pengoperasian, pemantauan performa harian, dan penyusunan *Standard Operating Procedure* (SOP) perawatan yang mudah dipahami. Pendekatan ini terbukti efektif mengikis resistensi

budaya kerja terhadap otomasi, sekaligus membangun rasa kepemilikan kolektif atas keberhasilan program di tingkat operasional.

3.3 Edukasi, Diseminasi, dan Instalasi Awal

Fase konversi dari pembuktian teknis menuju adopsi kelembagaan secara nyata diwujudkan pada bulan Juni 2026, beriringan dengan momentum pelaksanaan *pilot project*. Pada fase ini, DISKATAN Kabupaten Kuningan secara resmi melakukan pemesanan pengadaan 2 unit AI-TRAC perdana. Keputusan pengadaan ini menjadi tonggak penting yang menandai transisi status DISKATAN Kuningan dari sekadar mitra fasilitas uji lapangan menjadi *anchor client* resmi yang mengadopsi teknologi AI-TRAC secara kelembagaan untuk meningkatkan efisiensi operasional mekanisasi di lahan binaannya. Kedua unit pesanan tersebut diproduksi dengan protokol *quality control* penuh, mencakup uji presisi sistem navigasi, uji ketahanan *enclosure*, dan verifikasi fungsionalitas *fail-safe* komprehensif sebelum diserahkan dan diinstalasi untuk operasional lapangan.



Gambar 6 Diseminasi Publik (HUT Krida Ke-54 Kab. Kuningan)

Momentum diseminasi publik tertinggi dicapai pada penyelenggaraan pameran Hari Krida Pertanian (HKP) ke-54, yang berlangsung pada tanggal 9–10 Juni 2026 di Lapangan Sepak Bola Gunungkeling, Kabupaten Kuningan, Jawa Barat. Ajang ini merupakan panggung strategis bagi diseminasi teknologi AI-TRAC kepada khalayak yang lebih luas, mencakup jajaran pimpinan dinas, penyuluh pertanian, kelompok tani binaan, serta perwakilan instansi dari wilayah sekitar. Pemasangan dan demonstrasi langsung unit AI-TRAC pada arena pameran, yang dilaksanakan bersama jajaran Kepala Dinas dan tim

penyuluh, memberikan validasi publik atas kesiapan operasional teknologi ini di hadapan pemangku kepentingan sektor pertanian daerah.

Dampak nyata dari momentum diseminasi publik tersebut segera terkonfirmasi di lapangan. Pasca-demonstrasi pada pameran HKP ke-54, ketertarikan konkret muncul dari Gabungan Kelompok Tani (Gapoktan) Putra Walahir III, yang menindaklanjuti eksposur langsung terhadap kinerja AI-TRAC dengan keputusan pembelian unit secara mandiri. Transaksi ini menjadikan Gapoktan Putra Walahir III sebagai pembeli komersial pertama AI-TRAC di luar skema instalasi awal DISKATAN Kabupaten Kuningan, sekaligus menjadi bukti empiris pertama bahwa validasi publik pada ajang diseminasi mampu berkonversi langsung menjadi transaksi komersial riil, bukan sekadar ketertarikan seremonial semata.

Signifikansi transaksi dengan Gapoktan Putra Walahir III ini bersifat ganda. Pada level pembuktian pasar, kejadian ini menegaskan validitas struktur permintaan berlapis, di mana Gapoktan berperan sebagai penerima manfaat akhir dalam alur hilirisasi, namun sekaligus dapat bertransformasi menjadi entitas pembeli aktif tatkala telah terpapar bukti kinerja lapangan yang meyakinkan. Pada level strategi pemasaran, transaksi ini menjadi studi kasus konkret pertama yang memperlihatkan bahwa jalur diseminasi publik B2G, yang semula dirancang untuk membangun kepercayaan institusional antar-dinas, ternyata turut menghasilkan efek pengganda (*multiplier effect*) berupa minat komersial organik dari kelompok tani binaan itu sendiri, sebuah sinyal awal yang memperkuat kelayakan jalur komersialisasi B2B jangka panjang.

Rangkaian kegiatan edukasi dan diseminasi ini tidak berhenti pada aspek seremonial, melainkan dirancang sebagai instrumen strategis untuk membangun kepercayaan institusional (*institutional trust*) yang menjadi prasyarat bagi replikasi model bisnis ke dinas-dinas daerah lain. Dengan DISKATAN Kabupaten Kuningan yang telah tervalidasi sebagai *anchor client* dengan rekam jejak operasional dan hasil produktivitas terukur, serta diperkuat oleh bukti transaksi komersial dari Gapoktan Putra Walahir III, posisi tawar AI-TRAC dalam negosiasi kerja sama dengan instansi pemerintah daerah lain menjadi jauh lebih kuat, karena didukung oleh bukti implementasi nyata dan bukan sekadar proposal teoretis.

BAB IV

TATA KELOLA LEGALITAS DAN KEKAYAAN INTELEKTUAL

4.1 Konsolidasi HKI Institusional

Pada fase awal pengembangan, seluruh dokumen kepemilikan kekayaan intelektual AI-TRAC, baik terkait invensi paten, merek dagang, maupun hak cipta materi publikasi tercatat atas nama peneliti secara perorangan. Kondisi ini, meskipun merupakan refleksi wajar dari inisiatif mandiri peneliti dalam mengamankan hasil inovasi pada fase prototipe, menciptakan sekat hukum antara aset teknologi dengan institusi induk. Sekat hukum ini berpotensi memicu ketidakpastian dalam tata kelola hilirisasi, menghambat akses pendanaan dari investor maupun instansi pembiayaan institusional yang mensyaratkan kejelasan status kepemilikan, serta melemahkan posisi tawar dalam negosiasi kerja sama dengan mitra pemerintah daerah.

Menanggapi risiko tersebut, tim peneliti bersama Lembaga Kawasan Sains dan Teknologi (LKST) IPB dan Direktorat Riset dan Inovasi (DRI) IPB menjalankan mekanisme konsolidasi menyeluruh melalui proses pengalihan hak, dengan tujuan menyatukan seluruh komponen perlindungan hukum AI-TRAC di bawah kepemilikan tunggal IPB University (Lampiran 1). Langkah ini menempatkan IPB University sebagai satu-satunya subjek hukum yang berwenang dalam setiap perjanjian lisensi, kerja sama industri, maupun transaksi bisnis terkait AI-TRAC ke depan, sekaligus memberikan kepastian hukum yang dibutuhkan oleh mitra pemerintah daerah dalam skema kerja sama G2G.

Tabel 2 Status Mutakhir Klasifikasi Kepemilikan Kekayaan Intelektual AI-TRAC

Jenis HKI	Objek Inovasi	Kepemilikan Diajukan	Status Mutakhir
Paten	Aktuator Penggerak Tuas Traktor Roda Dua	IPB University	Sudah Dialihkan
Merek	AI-TRAC	IPB University	Sudah Dialihkan
Hak Cipta	Poster Publikasi	IPB University	Sudah Dialihkan
Desain Industri	Clutch Handle	IPB University	Diterima

Berdasarkan Tabel 4.1, status Desain Industri untuk komponen *Clutch Handle* telah diterima secara resmi atas nama IPB University, sehingga menjadi aset HKI pertama yang telah terkonsolidasi secara penuh. Sementara itu, tiga klasifikasi HKI lainnya, yaitu paten atas invensi aktuator penggerak tuas traktor roda dua, merek dagang AI-TRAC, dan hak

cipta atas materi poster publikasi, telah dialihkan kepada IPB University. Hal ini menandai selesainya proses pengalihan hak dari kepemilikan individu menjadi kepemilikan institusional. Progres tersebut merupakan hasil koordinasi dengan Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual yang didampingi secara teknis oleh LKST IPB sesuai dengan ketentuan pada masing-masing jenis HKI.

Kejelasan status kepemilikan HKI ini bukan sekadar pembenahan administratif, melainkan langkah preventif strategis yang memitigasi risiko sengketa kepemilikan di masa depan sekaligus memperkuat posisi tawar AI-TRAC sebagai aset intelektual institusi yang siap didayagunakan secara komersial dalam skala luas. Dalam konteks skema G2G yang menjadikan DISKATAN Kabupaten Kuningan sebagai *anchor client* dan operator armada, kepemilikan HKI atas nama IPB University memberikan kepastian hukum bagi DISKATAN dalam menjalin kerja sama jangka panjang tanpa risiko kompleksitas administratif yang dapat timbul apabila kepemilikan HKI masih bersifat personal.

4.2 Kepatuhan Regulasi dan Sertifikasi

Selain kepastian kepemilikan intelektual, perluasan distribusi AI-TRAC melalui mekanisme pengadaan pemerintah juga memerlukan pemenuhan regulasi sertifikasi alat dan mesin pertanian (alsintan) yang berlaku secara nasional. Meskipun AI-TRAC telah menunjukkan kelayakan teknis dan operasional melalui Pilot Project serta implementasi awal bersama DISKATAN Kabupaten Kuningan, sertifikasi resmi sesuai Peraturan Menteri Pertanian (Permentan) No. 05/2007 tetap menjadi tahapan penting untuk memperluas jangkauan hilirisasi. Sertifikasi ini membuka akses terhadap jalur pengadaan melalui e-katalog pemerintah, memperkuat kepercayaan mitra distribusi dalam skala yang lebih luas, serta mendukung proses adopsi oleh instansi pemerintah daerah lainnya.

Menyadari urgensi ini, tim peneliti secara aktif menjalin koordinasi dengan Balai Besar Pengujian Mekanisasi Pertanian (BBP Mektan) untuk memetakan jalur sertifikasi Uji Alsintan resmi yang wajib ditempuh AI-TRAC. Koordinasi ini mencakup konsultasi pemetaan persyaratan teknis, jadwal pengujian, dan dokumen pendukung yang diperlukan agar proses sertifikasi dapat berjalan efisien tanpa menghambat momentum hilirisasi yang telah dibangun melalui rekam jejak Pilot Project dan instalasi LRIP.

Sertifikasi BBP Mektan berfungsi sebagai tiket masuk (*gateway*) bagi AI-TRAC untuk terdaftar secara resmi dalam katalog elektronik pengadaan barang dan jasa pemerintah (*e-katalog*). Status terdaftar dalam *e-katalog* memberikan sejumlah keunggulan strategis: pertama, memungkinkan instansi pemerintah daerah seperti DISKATAN

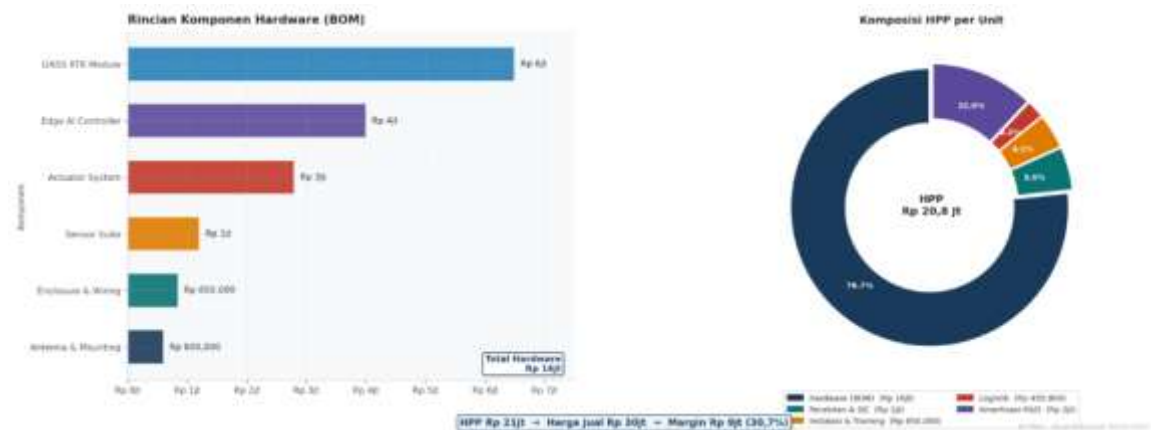
melakukan pengadaan melalui mekanisme *e-purchasing* yang lebih efisien dan akuntabel dibandingkan skema pengadaan konvensional; kedua, membuka akses terhadap skema subsidi dan pembiayaan alat mesin pertanian bersubsidi yang disalurkan melalui program Kementerian Pertanian; dan ketiga, memperkuat legitimasi AI-TRAC di hadapan dinas-dinas daerah lain yang berminat melakukan replikasi model investasi serupa.

BAB V

VALIDASI KELAYAKAN FINANSIAL DAN EKONOMI

5.1 Struktur Biaya Produksi (HPP)

Penetapan Harga Pokok Produksi (HPP) AI-TRAC per unit disusun mengikuti pendekatan *Full Cost Accounting*, yang mengakumulasikan biaya bahan langsung (*direct material*) dengan biaya konversi dan amortisasi riset dan pengembangan (R&D). Pendekatan ini dipilih untuk memastikan bahwa harga jual yang ditetapkan kelak benar-benar mencerminkan seluruh komponen biaya riil, bukan sekadar estimasi biaya material semata, sehingga margin keuntungan yang dihasilkan bersifat berkelanjutan secara finansial.



Gambar 7 Struktur HPP

Komponen pertama, Subtotal Hardware atau *Bill of Materials* (BOM), mencakup seluruh perangkat keras inti sistem AI-TRAC, yaitu modul navigasi GNSS-RTK, edge AI controller, sistem aktuator, rangkaian sensor, enclosure, dan sistem antena, dengan total akumulasi sebesar Rp 15.950.000 per unit (Lampiran 2)(Dokumen Validasi Ai-Trac, n.d.). Komponen kedua, Biaya Konversi dan Amortisasi R&D, mencakup biaya perakitan dan quality control, instalasi serta pelatihan lapangan, logistik dan distribusi, ditambah alokasi amortisasi biaya riset dan pengembangan, dengan total akumulasi sebesar Rp 4.850.000 per unit (Lampiran 3)(Dokumen Validasi Ai-Trac, n.d.).

Tabel 3 Konsolidasi Harga Pokok Produksi (HPP) per Unit AI-TRAC

Komponen HPP	Nilai (Rp)
Subtotal Hardware (<i>Bill of Materials</i>)	15.950.000
Subtotal Biaya Konversi & Amortisasi R&D	4.850.000
TOTAL HPP PER UNIT	20.800.000

Total HPP sebesar Rp 20.800.000 per unit ini menjadi titik acuan (*floor price*) dalam strategi penetapan harga jual, sekaligus menjadi basis kalkulasi margin kontribusi yang menentukan kelayakan titik impas (*Break-Even Point*) bisnis secara keseluruhan, sebagaimana akan diuraikan lebih lanjut pada sub-bab berikutnya.

5.2 Strategi Penetapan Harga

Penetapan harga jual AI-TRAC menggunakan pendekatan *hybrid*, menempatkan *Value-Based Pricing* sebagai batas atas (*ceiling*) yang merepresentasikan nilai ekonomi yang diterima pengguna, dan *Cost-Plus Pricing* berbasis HPP sebagai batas bawah (*floor*) yang menjamin keberlanjutan finansial produsen. Berdasarkan analisis kedua pendekatan tersebut, *Target Price* atau *Manufacturer Suggested Retail Price* (MSRP) ditetapkan pada Rp 30.000.000 per unit.

Penetapan harga pada titik ini menghasilkan margin kotor sebesar 30,7%, atau setara Rp 9.200.000 per unit, sebuah margin yang berada di atas ambang minimum kelayakan bisnis *hardware* sebesar 25%, sehingga cukup untuk menutup biaya tetap operasional bisnis sekaligus memberikan ruang negosiasi untuk skema pembiayaan alternatif. Dari perspektif komparasi pasar (Lampiran 4), posisi harga Rp 30.000.000 ini jauh lebih terjangkau dibandingkan traktor otonom 4-roda impor yang dibanderol pada kisaran Rp 300.000.000 hingga Rp 800.000.000, merepresentasikan efisiensi biaya hingga 90% untuk fungsi yang secara esensial ekuivalen pada segmen traktor roda dua.

Struktur harga ini dirancang secara deliberatif untuk memberi ruang negosiasi bagi instansi pemerintah daerah, baik melalui skema pembayaran bertahap sesuai siklus anggaran tahunan, maupun melalui potensi subsidi program mekanisasi pertanian dari Kementerian Pertanian, tanpa harus menekan margin ke bawah titik keberlanjutan bisnis.

5.3 Analisis Sensitivitas dan Mitigasi Risiko

Ketahanan finansial proyek AI-TRAC turut diuji melalui analisis sensitivitas terhadap variabel rantai pasok, khususnya risiko fluktuasi pasokan dan harga komponen elektronik presisi tinggi yang sebagian besar masih bersumber dari distributor komponen impor. Analisis *lead time* menunjukkan bahwa keterlambatan komponen kritis dapat berkisar antara 3 hingga 6 minggu, sebuah rentang yang berpotensi mengganggu kontinuitas jadwal produksi apabila tidak dimitigasi secara proaktif.

Strategi mitigasi utama terhadap risiko ini adalah penerapan *safety stock*, yaitu penyediaan cadangan komponen kritis minimal setara tiga unit produksi, dikombinasikan

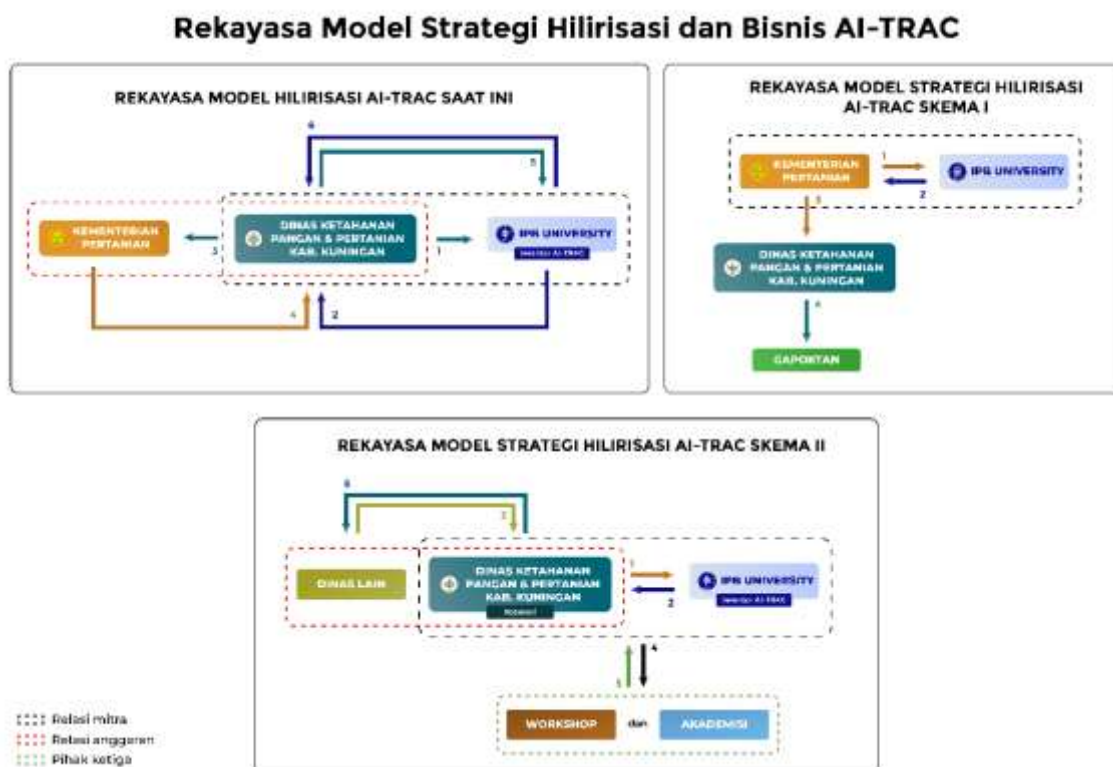
dengan kontrak tahunan bersama distributor resmi guna menjamin kepastian pasokan serta membuka opsi eksplorasi komponen substitusi lokal bersertifikasi setara. Pendekatan ini secara langsung merespons temuan bahwa fluktuasi harga komponen elektronik tergolong risiko dengan probabilitas sedang namun berdampak sedang terhadap struktur HPP, sehingga memerlukan mekanisme *hedging* melalui pembelian dalam jumlah besar (*bulk purchase*) serta revisi HPP berkala setiap kuartal.

Sebagai strategi tambahan untuk memitigasi risiko finansial jangka panjang, tim peneliti mengembangkan model layanan *Smart Farming as a Service* (SFaaS) sebagai alternatif selain skema penjualan langsung (*outright sale*). Melalui model ini, instansi pemerintah daerah yang memiliki keterbatasan anggaran belanja modal pada tahun berjalan tetap dapat memanfaatkan teknologi AI-TRAC melalui skema *leasing* atau penyewaan berbasis luas lahan per hektar. Dengan demikian, adopsi AI-TRAC dapat menjangkau lebih banyak instansi pemerintah daerah tanpa terhambat oleh siklus penganggaran belanja modal (*capital expenditure*) yang relatif kaku. Selain penjualan langsung, AI-TRAC juga memiliki potensi sumber pendapatan dari layanan SFaaS serta pemanfaatan data geospasial hasil operasional untuk kebutuhan pihak ketiga, seperti asuransi pertanian. Keberagaman sumber pendapatan tersebut memperkuat ketahanan model bisnis AI-TRAC dalam menghadapi dinamika pasar maupun perubahan kondisi fiskal pemerintah daerah.

BAB VI

STRATEGI HILIRISASI DAN REPLIKASI MODEL BISNIS

Berbeda dengan model komersialisasi konvensional yang bertumpu pada distribusi pasar bebas, strategi hilirisasi AI-TRAC dibangun di atas fondasi kemitraan Business-to-Government (B2G), yaitu sebuah pola hubungan bisnis yang sederhana namun kuat, di mana IPB University bertindak selaku entitas bisnis penyedia inovasi dan teknologi, sementara instansi pemerintah daerah, dengan DISKATAN Kabupaten Kuningan sebagai contoh utamanya, berperan sebagai klien atau mitra institusional yang mengadopsi teknologi tersebut untuk kebutuhan operasionalnya. Pendekatan ini dipilih karena tiga pertimbangan strategis: pertama, sifat produk AI-TRAC sebagai instrumen efisiensi anggaran publik lebih selaras dengan mekanisme pengadaan dan pembiayaan pemerintah daerah dibandingkan skema business-to-consumer; kedua, keterlibatan pemerintah sebagai klien institusional memberikan legitimasi dan akuntabilitas yang memperkuat kepercayaan publik terhadap teknologi baru; dan ketiga, pola kemitraan B2G ini memungkinkan replikasi model bisnis secara sistemik melalui jaringan antar-dinas, alih-alih bergantung pada akuisisi pelanggan individual yang lambat dan mahal.



Gambar 8 Model Strategi Hilirisasi

6.1 Skema I: Hilirisasi Terpusat (Top-Down)

Skema I merepresentasikan arsitektur model bisnis dasar yang telah diimplementasikan pada fase Pilot Project. Skema ini bersifat linier dan bertahap dari pusat ke daerah (*top-down*), melibatkan empat pihak utama yang saling terhubung dalam satu alur relasi anggaran dan operasional yang jelas dan mudah dipahami.

Alur kerja pada Skema I menggambarkan proses hilirisasi yang sederhana dan terstruktur. Kementerian Pertanian Republik Indonesia menyalurkan anggaran program mekanisasi pertanian nasional kepada IPB University sebagai penyedia teknologi sekaligus pemegang hak kekayaan intelektual AI-TRAC. Melalui LKST, IPB University kemudian menyalurkan teknologi beserta pendampingan teknis kepada DISKATAN Kabupaten Kuningan sebagai mitra pelaksana di tingkat daerah. Selanjutnya, DISKATAN Kabupaten Kuningan mengoperasikan armada AI-TRAC untuk memberikan layanan pengolahan lahan kepada kelompok tani atau Gabungan Kelompok Tani (Gapoktan) yang berada di wilayah binaannya.

Tabel 4 Peran dan Fungsi Setiap Aktor Utama dalam Skema I (Hilirisasi Terpusat)

Aktor Utama	Entitas	Peran dalam Alur Hilirisasi
Penyandang Dana	Kementerian Pertanian	Penyalur anggaran program mekanisasi pertanian nasional sebagai sumber pembiayaan awal skema hilirisasi
Penyedia Teknologi	IPB University	Entitas bisnis pemegang HKI dan inventor teknologi; penyedia alokasi teknis dan pendampingan implementasi ke daerah
Klien Institusional	DISKATAN Kabupaten Kuningan	Anchor client dan operator armada operasional; pelaksana teknis di tingkat lapangan
Penerima Manfaat	Gapoktan	Penerima manfaat layanan mekanisasi lahan yang dioperasikan oleh armada DISKATAN

Karakteristik utama Skema I adalah sentralisasi kendali pada satu instansi daerah, yaitu DISKATAN Kabupaten Kuningan, yang bertindak sebagai satu-satunya klien institusional sekaligus operator armada dalam wilayah kerjanya. Model ini memiliki keunggulan signifikan pada fase awal hilirisasi: kesederhanaan struktur relasi memudahkan koordinasi, akuntabilitas anggaran, dan pengendalian kualitas layanan, karena seluruh keputusan operasional terpusat pada satu instansi yang telah memiliki rekam jejak validasi lapangan yang kuat.

6.2 Skema II: Model *Hub* Inovasi Lintas Daerah

Skema II merupakan evolusi strategis dari Skema I yang dirancang khusus untuk menjawab tantangan skalabilitas replikasi model bisnis ke wilayah-wilayah baru di luar Kabupaten Kuningan. Inovasi arsitektur pada skema ini terletak pada perluasan peran DISKATAN Kabupaten Kuningan, dari sekadar operator armada tunggal pada Skema I, menjadi pusat (*hub*) inovasi dan koordinasi replikasi lintas daerah yang memfasilitasi masuknya dinas-dinas daerah lain ke dalam ekosistem AI-TRAC.

Cara kerja Skema II terdiri atas tiga tahapan yang saling terhubung. Pertama, dinas daerah yang berminat mengadopsi teknologi AI-TRAC (selanjutnya disebut Dinas Lain) mengajukan permohonan pengadaan melalui DISKATAN Kabupaten Kuningan. Mekanisme ini memanfaatkan pengalaman operasional DISKATAN Kuningan yang telah teruji serta dukungan teknis dari IPB University. Kedua, sebagai *hub* inovasi, DISKATAN Kabupaten Kuningan berkoordinasi dengan IPB University untuk memastikan kesesuaian aspek teknis dan legalitas HKI pada setiap unit yang akan direplikasi ke wilayah baru. Tahap ini sekaligus menegaskan peran IPB University sebagai penyedia teknologi utama dalam setiap proses replikasi. Ketiga, proses produksi dan perakitan unit dilaksanakan bersama Pihak Ketiga, yaitu *workshop* lokal dan akademisi setempat, yang berperan sebagai mitra pelaksana teknis di masing-masing wilayah.

Elemen kunci yang membedakan Skema II dari Skema I adalah pelibatan Pihak Ketiga dalam rantai produksi tersebut. Pelibatan ini merupakan langkah strategis untuk mendesentralisasikan kapasitas produksi dan perakitan unit AI-TRAC, sehingga replikasi ke wilayah baru tidak sepenuhnya bergantung pada kapasitas produksi terpusat di satu lokasi, melainkan dapat memanfaatkan jaringan *workshop* lokal yang telah mendapatkan transfer pengetahuan teknis dan pendampingan dari akademisi setempat.

Tabel 5 Peran dan Fungsi Setiap Aktor Utama dalam Skema I (Hilirisasi Terpusat)

Tahapan	Pihak Terlibat	Fungsi dalam Alur Replikasi
Pengajuan Kerja Sama	Dinas Lain → DISKATAN Kuningan	Pengajuan permohonan pengadaan/replikasi oleh dinas daerah baru melalui hub DISKATAN Kuningan
Validasi Teknis & Legalitas	DISKATAN Kuningan ↔ IPB University	Relasi bisnis dan validasi teknis/legalitas HKI untuk setiap unit yang direplikasi ke wilayah baru
Produksi Terdesentralisasi	DISKATAN Kuningan ↔ Workshop & Akademisi Lokal	Desentralisasi produksi dan perakitan melalui kemitraan dengan workshop dan akademisi di wilayah replikasi

Signifikansi strategis Skema II terletak pada kemampuannya mengubah DISKATAN Kabupaten Kuningan dari sekadar penerima manfaat teknologi menjadi mitra strategis yang bernilai tinggi dalam ekosistem hilirisasi AI-TRAC secara nasional. Posisi sebagai *hub* ini memberikan tiga manfaat institusional bagi DISKATAN Kuningan: pertama, penguatan peran kelembagaan sebagai pusat rujukan mekanisasi pertanian cerdas di tingkat regional; kedua, potensi kontribusi pendapatan atau efisiensi tambahan dari peran fasilitasi replikasi ke dinas daerah lain; dan ketiga, akselerasi pembelajaran organisasi melalui interaksi dengan jaringan workshop dan akademisi lokal yang lebih luas di berbagai wilayah replikasi.

Dari perspektif kelayakan skalabilitas pasar sebagaimana telah diuraikan pada Bab 3.1, target Serviceable Obtainable Market (SOM) sebesar 1.000 unit dalam horizon lima tahun secara struktural hanya dapat dicapai melalui mekanisme replikasi seperti Skema II ini. Model relasi linier tunggal pada Skema I, betapapun berhasilnya pada tingkat satu kabupaten, tidak memiliki daya jangkauan yang memadai untuk mencapai target penetrasi pasar berjenjang tersebut tanpa mekanisme *hub* yang memungkinkan replikasi paralel ke banyak wilayah sekaligus.

Selain itu, pelibatan *workshop* dan akademisi lokal pada setiap wilayah replikasi turut berfungsi sebagai mekanisme kontrol kualitas yang tersebar namun tetap terstandarisasi, karena seluruh proses produksi dan perakitan tetap berada dalam kerangka validasi teknis dan legalitas HKI yang dikoordinasikan oleh IPB University selaku mitra bisnis penyedia

teknologi tunggal. Dengan demikian, ekspansi skala tidak mengorbankan konsistensi kualitas produk maupun kepatuhan terhadap standar teknis yang telah divalidasi melalui Pilot Project di Kuningan dan Dramaga.

6.3 Komersialisasi Sektor Privat (B2B)

Sebagai jalur pertumbuhan progresif yang melengkapi fondasi B2G pada Skema I dan Skema II, strategi hilirisasi AI-TRAC turut merumuskan lintasan komersialisasi menuju sektor privat melalui skema *business-to-business* (B2B). Jalur ini dirancang bukan untuk menggantikan fondasi B2G yang telah terbukti efektif membangun legitimasi dan validasi pasar awal, melainkan sebagai perluasan cakrawala pertumbuhan bisnis jangka panjang setelah kemitraan dengan pemerintah daerah mencapai kematangan operasional dan replikasi yang memadai.

Langkah strategis utama pada jalur ini adalah pematangan unit bisnis AI-TRAC menjadi entitas *spin-off* berbentuk *startup* AgriTech/ClimateTech yang *investor-ready*, yakni memiliki kesiapan model bisnis, tata kelola korporasi, dan dokumentasi finansial yang memenuhi standar kelayakan investasi dari pemodal ventura maupun instrumen pembiayaan swasta lainnya. Transformasi kelembagaan ini penting karena kemitraan B2G dengan pemerintah daerah, meskipun efektif membangun legitimasi dan validasi pasar, memiliki keterbatasan struktural dalam mengakses modal pertumbuhan berskala besar yang diperlukan untuk ekspansi nasional maupun regional.



Gambar 9 Lab2Market

Dalam rangka mempercepat pematangan *spin-off* AI-TRAC, tim peneliti berpartisipasi dalam program akselerator bisnis global Lab2Market yang memperoleh dukungan dari UK-Indonesia *Tech Hub* dan jaringan Endeavor. Keikutsertaan dalam program tersebut memberikan sejumlah manfaat strategis, antara lain akses kepada mentor dan jaringan investor global di sektor AgriTech dan ClimateTech, penguatan kapasitas dalam menyusun proposisi nilai bisnis sesuai standar investasi internasional, serta pemahaman mengenai praktik terbaik model bisnis teknologi pertanian dari ekosistem inovasi global yang dapat diadaptasi ke konteks pasar domestik.

Strategi komersialisasi B2B ini melengkapi model bisnis AI-TRAC yang sebelumnya telah memiliki tiga sumber pendapatan (*revenue streams*), yaitu penjualan langsung retrofit kit, langganan pembaruan perangkat lunak dan algoritma, serta kontrak pemeliharaan purna jual. Melalui strategi ini, AI-TRAC juga membuka peluang sumber pendapatan baru berupa investasi ekuitas dari mitra swasta serta kemitraan *Original Equipment Manufacturer* (OEM) dengan produsen traktor tangan nasional pada fase ekspansi jangka panjang. Dengan demikian, kombinasi fondasi B2G yang kuat dan jalur pertumbuhan B2B menempatkan AI-TRAC pada model hilirisasi yang tidak hanya berkelanjutan dari sisi pendanaan publik, tetapi juga memiliki potensi pertumbuhan komersial yang lebih luas di masa depan.

6.4 Analisis Komparatif Tiga Skema Hilirisasi

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai penerapan setiap skema hilirisasi, diperlukan analisis komparatif yang membandingkan karakteristik, keunggulan, dan kondisi yang paling sesuai untuk penerapan Skema I, Skema II, dan jalur komersialisasi B2B. Ketiga skema tersebut tidak saling menggantikan, melainkan saling melengkapi dan dijalankan pada tahapan waktu yang berbeda. Skema I menjadi dasar implementasi yang dimulai sejak Tahun 1 dan tetap berjalan ketika Skema II mulai diterapkan di wilayah baru. Berbeda dengan kedua skema tersebut, persiapan jalur komersialisasi B2B, termasuk pendaftaran dan partisipasi dalam program akselerator bisnis global Lab2Market, juga dimulai sejak Tahun 1 dan berlangsung secara paralel dengan pelaksanaan Skema I. Dengan pendekatan ini, ketika implementasi B2G melalui Skema I dan Skema II telah mencapai kematangan operasional, AI-TRAC juga telah menyelesaikan sebagian besar tahapan menuju kesiapan untuk menerima investasi (*investor-ready*). Kondisi tersebut memungkinkan transisi dari pendanaan publik menuju investasi swasta berlangsung dengan jeda waktu yang lebih singkat.

Tabel 6 Analisis Komparatif Karakteristik Tiga Skema Hilirisasi AI-TRAC

Dimensi Perbandingan	Skema I (Terpusat)	Skema II (Hub Lintas Daerah)	B2B (Komersialisasi Privat)
Cakupan Wilayah	Satu kabupaten (Kuningan)	Multi-kabupaten/lintas daerah	Nasional dan potensi ekspor ASEAN
Sumber Pembiayaan	Anggaran Kementerian Pertanian	Anggaran daerah masing-masing dinas mitra	Ekuitas investor/modal ventura
Peran DISKATAN Kuningan	<i>Anchor client & operator tunggal</i>	Hub fasilitasi & rujukan replikasi	Referensi studi kasus komersial
Pelaksana Produksi	Workshop pusat IPB University	Workshop & akademisi lokal terdesentralisasi	Fasilitas produksi startup <i>spin-off</i> /mitra OEM
Fase Kematangan	Tahun 1–2 (LRIP & <i>seeding</i>)	Tahun 3–5 (penetrasi regional)	Tahun 1–2: persiapan & Lab2Market (paralel dengan Skema I); Tahun 6–10: ekspansi nasional penuh
Indikator Keberhasilan	2 unit LRIP terinstalasi, produktivitas +30%	150–250 unit/tahun, jaringan dinas mitra bertambah	Partisipasi Lab2Market sejak Tahun 1; status investor-ready tercapai

Analisis komparatif ini menunjukkan satu prinsip strategis yang penting, yaitu bahwa keberhasilan pada suatu skema menjadi dasar bagi penerapan skema berikutnya. Hubungan tersebut terutama terlihat antara Skema I dan Skema II, di mana Skema II hanya dapat diterapkan setelah Skema I memiliki rekam jejak operasional yang teruji. Berbeda dengan hubungan tersebut, jalur komersialisasi B2B tidak menunggu Skema I dan Skema II mencapai kematangan penuh. Sejak Tahun 1, penyusunan basis data operasional dan finansial yang akan digunakan sebagai bahan *due diligence* bagi calon investor telah dilakukan secara paralel dengan pelaksanaan Skema I. Dengan demikian, ketika implementasi B2G melalui Skema I dan Skema II telah mencapai kematangan yang memadai, dokumentasi serta kesiapan kelembagaan AI-TRAC untuk mengikuti proses akselerasi bisnis dan menjalin kerja sama dengan investor telah tersedia, sehingga proses tersebut tidak perlu dimulai dari awal.

6.5 Tahapan Waktu dan Kerangka Replikasi Nasional

Implementasi strategi hilirisasi tiga lapis ini disusun dalam kerangka waktu bertahap yang selaras dengan tahapan penetrasi pasar yang telah divalidasi pada Bab 3.1, yaitu fase LRIP dan *seeding*, fase penetrasi regional, dan fase ekspansi nasional. Berbeda dari kesan bahwa setiap fase hanya berfokus pada satu jalur aktivasi, kerangka waktu ini secara sengaja merancang jalur B2G dan B2B untuk berjalan beriringan sejak fase paling awal: sementara Skema I membangun fondasi B2G di Kabupaten Kuningan, tim peneliti secara paralel merintis persiapan komersialisasi B2B, termasuk partisipasi dalam program akselerator Lab2Market. Pola tumpang-tindih yang terencana ini dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 7 Kerangka Waktu Aktivasi Skema Hilirisasi dan Target Replikasi

Fase	Periode	Fokus Aktivasi Skema	Target Kunci
Fondasi B2G & Persiapan B2B (Paralel)	Tahun 1–2	Skema I beroperasi penuh di Kabupaten Kuningan; penyusunan dokumentasi standar replikasi (<i>playbook</i>) untuk Skema II. Secara simultan, tim peneliti memulai persiapan komersialisasi B2B melalui pendaftaran dan partisipasi dalam akselerator global Lab2Market serta penyusunan dokumen <i>investor-ready</i> tahap awal	2 unit LRIP; 1 <i>anchor client</i> teruji; partisipasi aktif dalam program Lab2Market
Aktivasi Hub	Tahun 2–3	DISKATAN Kuningan mulai berperan sebagai <i>hub</i> ; <i>onboarding</i> 2–3 dinas daerah mitra pertama melalui Skema II; penyempurnaan dokumen <i>investor-ready</i> terus berjalan paralel	2–3 dinas mitra baru; 60–100 unit/tahun
Penetrasi Regional & Kesiapan Investor	Tahun 3–5	Perluasan jaringan <i>workshop</i> dan akademisi lokal di setiap wilayah replikasi Skema II; integrasi katalog pengadaan ALSINTAN daerah; penyelesaian tata kelola korporasi dan dokumentasi finansial B2B hingga memenuhi standar <i>investor-ready</i>	150–250 unit/tahun; jaringan servis multi-daerah; status <i>investor-ready</i> tercapai

Ekspansi Nasional & B2B	Tahun 6–10	Skema I & II berjalan matang secara paralel di berbagai daerah; aktivasi penuh jalur B2B, investasi ekuitas, kemitraan OEM, serta eksplorasi ekspansi pasar ASEAN	300–500 unit/tahun; ekspansi ekspor ASEAN
-------------------------	------------	---	---

Kerangka waktu ini tetap dirancang secara konservatif dengan mempertimbangkan realitas siklus penganggaran pemerintah daerah yang umumnya bersifat tahunan, sehingga *onboarding* dinas daerah mitra baru pada Skema II tidak dapat dipercepat secara sepihak tanpa mempertimbangkan jadwal perencanaan anggaran (*Musrenbang*) di masing-masing wilayah. Karena jalur persiapan B2B dijalankan oleh tim dan sumber daya yang berbeda dari tim pendampingan Skema I dan Skema II, aktivasinya sejak Tahun 1 tidak membebani maupun mempercepat secara sepihak tahapan replikasi B2G, keduanya berjalan pada jalurnya masing-masing, namun saling menguatkan pada muara yang sama: mempercepat kesiapan AI-TRAC untuk tumbuh secara berkelanjutan, baik melalui jalur anggaran publik maupun jalur investasi swasta. Pendekatan bertahap ini juga memberikan ruang bagi tim peneliti dan LKST IPB untuk memastikan kapasitas pendampingan teknis dan legalitas HKI tetap terjaga kualitasnya seiring penambahan jumlah wilayah replikasi, sehingga pertumbuhan skala tidak mengorbankan standar mutu yang telah dibangun melalui *Pilot Project* awal di Kuningan dan Dramaga.

BAB VII

KESIMPULAN DAN PETA JALAN EKSEKUSI

7.1 Kesimpulan Eksekutif

Rangkaian kajian yang disusun sepanjang dokumen strategi ini menegaskan satu kesimpulan mendasar: AI-TRAC telah menuntaskan transformasi dari purwarupa riset laboratorium menjadi inovasi siap terap yang tervalidasi pada Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) 7, yaitu tahapan di mana keandalan sistem telah teruji dan dibuktikan dalam lingkungan operasional nyata yang keras dan ekstrem seperti lahan sawah berlumpur dan berkemiringan. Persoalan kelelahan operator akibat paparan getaran dan durasi kerja panjang, yang semula menjadi keluhan dominan di lapangan, kini dimitigasi melalui kapabilitas kendali jarak jauh (Remote Control) dan operasi semi-otonom yang menjauhkan operator dari eksposur langsung terhadap guncangan mekanis unit selama pengolahan lahan berlangsung. Ketahanan termal dan lingkungan turut terbukti kokoh melalui peningkatan proteksi enclosure menuju rating IP67 dan penerapan active cooling, sehingga sistem mampu menjaga suhu operasional stabil di bawah 70°C sepanjang 8 jam operasi nonstop — menuntaskan persoalan thermal runaway yang sebelumnya membatasi durasi kerja efektif unit. Presisi navigasi berbasis GNSS-RTK dan algoritma perencanaan lintasan turut terbukti andal dengan radius putaran headland di bawah 2 meter, sementara arsitektur keselamatan berlapis (fail-safe AI), yang mengombinasikan Fail-Safe Relay, Signal Watchdog, dan redundansi sensor Dual-IMU, memastikan unit dapat dioperasikan secara aman berdampingan dengan aktivitas manusia maupun aset milik institusi dan masyarakat sekitar.

Pada dimensi pasar, validasi tidak berhenti pada tahap uji laboratorium maupun simulasi, melainkan diperkuat melalui eksekusi Pilot Project partisipatif yang melibatkan operator lapangan secara langsung dalam siklus pengoperasian dan pemantauan performa harian. Pendekatan ini terbukti berhasil menaikkan produktivitas kerja dan mengikis resistensi budaya kerja terhadap otomasi, sekaligus memuncak pada tonggak pencapaian tertinggi hilirisasi teknologi ini: pada bulan Juni 2026, beriringan dengan momentum pelaksanaan Pilot Project, DISKATAN Kabupaten Kuningan secara resmi melakukan pemesanan pengadaan 2 unit AI-TRAC perdana. Keputusan pengadaan ini menjadi bukti adopsi kelembagaan yang nyata, menandai transisi status DISKATAN Kuningan dari sekadar mitra fasilitas uji lapangan menjadi *anchor client* resmi yang mengadopsi

teknologi AI-TRAC secara institusional untuk meningkatkan efisiensi operasional mekanisasi di lahan binaannya.

Dari sisi legalitas, kepastian hukum atas kekayaan intelektual AI-TRAC kini telah mencapai titik aman yang mutlak. Seluruh portofolio HKI yang mencakup Paten atas Aktuator Penggerak Tuas Traktor, Merek AI-TRAC, dan Hak Cipta Poster Publikasi, telah berstatus "Sudah Dialihkan" ke bawah kepemilikan penuh IPB University, sementara Desain Industri atas komponen mekanis pendukung telah berstatus "Diterima". Konsolidasi kepemilikan institusional ini menghapus risiko konflik kepentingan yang sebelumnya melekat pada kepemilikan personal, sekaligus memberikan fondasi hukum yang kokoh untuk mendukung proses hilirisasi dan replikasi lintas daerah tanpa hambatan legalitas.

Dari sisi keekonomian, struktur biaya AI-TRAC terbukti rasional dan kompetitif, dengan Harga Pokok Produksi (HPP) sebesar Rp20.800.000 dan harga jual rekomendasi (MSRP) sebesar Rp30.000.000 per unit, memiliki posisi harga yang jauh lebih terjangkau dibandingkan traktor otonom impor, namun tetap menjamin margin keberlanjutan usaha. Keekonomian ini ditopang oleh arsitektur hilirisasi berlapis yang kokoh: fondasi business-to-government (B2G) melalui Skema I di Kabupaten Kuningan dan Skema II sebagai mekanisme hub replikasi lintas daerah, yang berjalan beriringan sejak Tahun 1 dengan persiapan komersialisasi business-to-business (B2B) melalui partisipasi dalam akselerator global Lab2Market. Kombinasi strategi paralel ini memastikan bahwa kematangan fondasi anggaran publik dan kesiapan menarik investasi swasta dapat dicapai secara bersamaan, bukan secara berurutan, sehingga mempercepat keseluruhan lintasan pertumbuhan AI-TRAC menuju skala nasional.

7.2 Peta Jalan Eksekusi (Rencana Tindak Lanjut)

Momentum hilirisasi yang telah dibangun sepanjang periode pembuktian teknis dan validasi pasar ini perlu segera diterjemahkan menjadi langkah eksekusi konkret agar tidak kehilangan daya dorongnya. Empat agenda prioritas berikut disusun sebagai peta jalan jangka pendek yang harus segera ditindaklanjuti:

1. **Fabrikasi dan Instalasi Unit Perdana:** Menyelesaikan proses produksi 2 unit pesanan DISKATAN Kabupaten Kuningan melalui protokol *quality control* penuh, mencakup uji presisi sistem navigasi, uji ketahanan *enclosure*, dan verifikasi fungsionalitas *fail-safe* secara komprehensif, sebelum kedua unit diserahterimakan dan diinstalasi secara resmi di lahan operasional binaan DISKATAN.

2. **Akselerasi Sertifikasi ALSINTAN:** Menuntaskan uji kelayakan di Balai Besar Pengujian Mekanisasi Pertanian (BBP Mektan) guna memenuhi ketentuan Peraturan Menteri Pertanian (Permentan) No. 05/2007, sebagai syarat mutlak yang membuka akses AI-TRAC ke dalam katalog elektronik (*e-katalog*) pengadaan barang dan jasa pemerintah.
3. **Penyusunan Standardisasi Replikasi (Playbook Skema II):** Mematangkan dokumen Standard Operating Procedure (SOP) kemitraan, mekanisme sertifikasi *workshop*, dan protokol transfer teknologi bagi bengkel dan akademisi lokal, sebagai persiapan menyambut permintaan pengadaan dari dinas-dinas pemerintah daerah lain di luar Kabupaten Kuningan.
4. **Pematangan Postur Investasi (B2B):** Mengintensifkan partisipasi dalam program akselerator global Lab2Market guna merampungkan dokumen kesiapan kelayakan investasi (*investor-ready*), sebagai jembatan strategis menuju transisi kelembagaan AI-TRAC menjadi entitas *spin-off* startup AgriTech yang siap menarik modal pertumbuhan jangka panjang.

Pelaksanaan konsisten atas keempat agenda ini akan memastikan bahwa AI-TRAC tidak hanya bertahan sebagai bukti konsep teknologi, melainkan bertransformasi secara utuh menjadi model hilirisasi inovasi pertanian yang direplikasi secara nasional, bersandar pada efisiensi anggaran pemerintah daerah di satu sisi, dan daya tarik investasi privat melalui Lab2Market di sisi lain, sebagai dua jalur pertumbuhan yang saling memperkuat menuju keberlanjutan jangka panjang.

REFERENSI

- Dokumen Validasi Ai-Trac*. (n.d.).
- Fortune Business Insights. (2025, December). *Agriculture Tractor Market Size, Share & Industry Analysis, By Engine Power, By Type, and Regional Forecast, 2026-2034*.
- Jenderal -Kementerian Pertanian, S. (2024). *Statistik Sarana Pertanian Statistical Yearbook Of Agricultural Facilities Pusat Data Dan Sistem Informasi Pertanian*.
- Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia. (2025, March 7). *RPJMN 2025-2029: Fondasi Awal Wujudkan Visi Indonesia Emas 2045*.
- Kiki Suheiti. (2016). *Peran Traktor Roda Dua dalam Gerakan Percepatan Tanam Padi di Jawa Timur: Sebuah Review*.
- Laporan_Penyelesaian Hambatan_Klaster Tipe 3_RS*. (n.d.).
- Market Data Forecast. (n.d.). *Asia Pacific farm mechanization market*.
- Pusat Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian. (2021). *Strategi peningkatan kandungan tingkat komponen dalam negeri (TKDN) industri alat dan mesin pertanian [Policy Brief]*.
- Rachmawati, R. R. (2021). Smart Farming 4.0 Untuk Mewujudkan Pertanian Indonesia Maju, Mandiri, Dan Modern. *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, 38(2), 137. <https://doi.org/10.21082/fae.v38n2.2020.137-154>
- Revolusi Mekanisasi Pertanian Indonesia*. (n.d.).
- Statistics Market Research Consulting. (2024, June). *Pre-harvest equipment market forecasts to 2030 - Global analysis by type (plant protection equipment, primary tillage equipment and other types), distribution (original equipment manufacturers and after market), application and by geography*.
- Subagiyo, & Budi Setyono. (2016). *Analisis Kebutuhan Alsintan Dalam Usaha Tani Tanaman Pangan (Padi) di Daerah Istimewa Yogyakarta*.
- Yadav, D. K., Singh, J., & Kumar, P. (2025). Farm mechanization in developing countries: A review of challenges and opportunities. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(4), 552–556. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i4g.2831>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Kepemilikan HKI AI-TRAC

Tabel 8 Kepemilikan HKI AI-Trac

Jenis HKI	Dasar Hukum	Inovasi	Kepemilikan Sebelumnya	Kepemilikan yang Diajukan	Status	Bukti Dokumen
Paten	UU No. 13/2016 tentang Paten Jo UU No. 6/2023 tentang Cipta Kerja Jo UU No. 65/2024 tentang Perubahan UU Paten	Aktuator Penggera k Tuas Traktor Roda Dua	Nama individu	IPB University	Sudah Dialihkan	https://drive.google.com/drive/folders/10917sUUXq33Opn2vADpoti1xFuv7WMib?usp=sharing
Merek	UU No. 20/2016 tentang Merek dan IG Jo. UU No. 6/2023 tentang Cipta Kerja	AI-TRAC	Nama individu	IPB University	Sudah Dialihkan	https://drive.google.com/drive/folders/1hSdQxAlAJN0y82y88PXiEkvderUQtsVH?usp=sharing
Hak Cipta	UU No. 28/2014 tentang Hak Cipta	Poster	Nama individu	IPB University	Sudah Dialihkan	https://drive.google.com/drive/folders/1aglnoi76lifoUATngXBKEEXn_t9Ckv?usp=sharing
Desain Industri	UU No. 31/2000 tentang Desain Industri	Belt Adjuster	IPB University	-	Diterima	https://drive.google.com/drive/folders/15tk82AVBQdT2

Jenis HKI	Dasar Hukum	Inovasi	Kepemilikan Sebelumnya	Kepemilikan yang Diajukan	Status	Bukti Dokumen
						NEbZLjhilC2Ffq6SrQJ9?usp=sharing

Lampiran 2. Rincian *Bill of Materials* (BOM) Komponen Hardware

Tabel 9 Rincian *Bill of Materials* (BOM)

Komponen	Spesifikasi Teknis	Harga Satuan (Rp)	Dasar Harga
GNSS RTK Module	Dual-band, Multi-constellation (GPS/GLONASS/BeiDou)	6.500.000	Distributor lokal verified
Edge AI Controller	NVIDIA Jetson Nano / Xavier NX Class	4.000.000	Market survey 2024
Actuator System	High-torque servo motor + steering controller	2.800.000	Komponen industri agri
Sensor Suite	IMU 9-axis, Kamera HD, Ultrasonik array	1.200.000	Bundle component
Enclosure & Wiring	IP67 waterproof housing + custom harness	850.000	Fabricasi lokal
Antenna & Mounting	High-gain GNSS + rugged bracket stainless	600.000	Market survey 2024
SUBTOTAL HARDWARE		15.950.000	

Lampiran 3. Rincian Biaya Konversi dan *Overhead* per Unit

Tabel 10 Biaya Konversi dan *Overhead* per Unit

Komponen Biaya	Rincian & Dasar Estimasi	Nilai (Rp)
Perakitan & <i>Quality Control</i>	8-10 hari kerja teknisi + uji presisi sistem	1.050.000
Instalasi & <i>Training</i>	Biaya teknisi per site + materi pelatihan operator	850.000
Logistik & Distribusi	Pengiriman ke wilayah regional + asuransi kargo	450.000
Amortisasi R&D	Total R&D Rp 750.000.000 ÷ 300 unit target <i>batch</i> awal	2.500.000
SUBTOTAL BIAYA KONVERSI		4.850.000

Lampiran 4. Komparasi Harga Pasar dan Strategi Penetapan Harga AI-TRAC

Tabel 11 Komparasi Harga Pasar dan Strategi Penetapan Harga AI-TRAC

Benchmark Harga	Kategori Produk	Harga Pasar (Rp)
Traktor otonom impor (4-roda)	Kompetitor tidak langsung	300.000.000 – 800.000.000
Traktor mini konvensional baru	Produk substitusi	25.000.000 – 45.000.000

Benchmark Harga	Kategori Produk	Harga Pasar (Rp)
AI-TRAC (HPP)	Floor price	20.800.000
AI-TRAC MSRP Rekomendasi	Target price (value-based)	30.000.000
Nilai ekonomi pengguna/tahun	Ceiling price reference	21.550.000