



IPB University
— Bogor Indonesia —

MODEL STRATEGI HILIRISASI

ROBOT ANTRAC 1.0

**PROGRAM HILIRISASI RISET
IPB UNIVERSITY**

**PENGUATAN KETAHANAN PANGAN DAN
PERTANIAN PRESISI MELALUI ROBOT
DETEKSI ANTRAKNOSA BERBASIS
KECERDASAN BUATAN (AI)**

Disusun Oleh:

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

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

Dr. Undang, S.P., M.Si.

Wuliddah Tamsil Barokah

Alyssa Daniswara

Susan Anis Rahmawati



**KECERDASAN
BUATAN**



**PERTANIAN
PRESISI**



**KETAHANAN
PANGAN**

ANTRAC 1.0
Anthracnose Robot Detection



INSTITUT PERTANIAN BOGOR

**MODEL STRATEGI HILIRISASI ROBOT ANTRAC 1.0 PROGRAM
HILIRISASI RISET IPB UNIVERSITY**

**PENGUATAN KETAHANAN PANGAN DAN PERTANIAN PRESISI
MELALUI ROBOT DETEKSI ANTRAKNOSA BERBASIS
KECERDASAN BUATAN (AI)**

Disusun Oleh:

Dr. Ridwan Siskandar S.Si, M.Si

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

Dr. Undang, S.P., M.Si

Wuliddah Tamsil Barokah

Alyssa Daniswara

Susan Anis Rahmawati

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	2
DAFTAR GAMBAR.....	4
DAFTAR TABEL	4
KATA PENGANTAR.....	5
BAB I	
PENDAHULUAN.....	2
1.1 Latar Belakang dan Urgensi Komoditas	2
1.2 Dekonstruksi Matriks Proporsi Nilai (Value Proposition Canvas)	3
1.3 Relevansi Strategis Agenda Pembangunan Nasional	3
1.3.1 Sinergi dengan Asta Cita Presiden Republik Indonesia (2024-2029).....	4
1.3.2. Hubungan dengan Rumusan Masalah KSTI Pangan (Kemdiktisaintek)	4
1.3.3 Substitusi Impor dan Potensi Ekspor	4
BAB II	
GAMBARAN UMUM PRODUK DAN KESIAPAN TEKNOLOGI.....	5
2.1 Deskripsi Produk dan Arsitektur Sistem.....	5
2.2 Komponen Utama Produk.....	6
2.3 Keunggulan dan Inovasi Produk	7
2.4 Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT / TRL)	7
BAB III.....	9
VALIDASI PASAR DAN REKAM JEJAK MARKETING.....	9
3.1 Analisis Permintaan dan Pain Point	9
3.2 Rekam Jejak Pilot Project Komersial.....	10
3.3 Edukasi, Diseminasi, dan Instalasi Awal	10
BAB IV	12
KERANGKA STRATEGI HILIRISASI	12
4.1 Kerangka Model Strategi Hilirisasi Produk	12
4.1.1 Validasi Implementasi.....	13
4.1.2 Adopsi Institusional	14
4.1.3 Integrasi dalam Program Pemerintah	15
4.1.4 Replikasi dan Difusi Inovasi	15
4.1.5 Institusionalisasi dan Keberlanjutan	15
4.2 Tahap Validasi Implementasi Berbasis Kebutuhan Dinas	15
4.2.1 Validasi Akurasi Deteksi Penyakit dan Keandalan Sistem Sensor:.....	16
4.2.2 Validasi Kinerja Operasional di Lingkungan Pertanian:	16
4.2.3 Validasi Kesesuaian Integrasi Birokrasi (Pilar Kebijakan).....	17
BAB V	18
VALIDASI KELAYAKAN FINANSIAL DAN EKONOMI	18

5.1 Estimasi Investasi Awal (CAPEX)	18
5.2 Estimasi Biaya Operasional (OPEX) Tahun Pertama	19
5.3 Analisis Titik Impas (Break Even Point)	21
5.4 Sintesis Kelayakan dan Rekomendasi Strategis	22
BAB VI	23
STRATEGI HILIRISASI DAN REPLIKASI BISNIS	23
6.1 Validasi Kesesuaian dengan Sistem Kerja Dinas dan Pengguna Akhir:	23
6.2 Strategi Adopsi Institusional	23
6.2.1 Pengenaan dan Sosialisasi	24
6.2.2 Pelatihan dan Penguatan Kapasitas	25
6.2.3 Pendampingan dan Implementasi Aktif	25
6.2.4 Penguatan Kelembagaan dan Keberlanjutan	25
6.3 Integrasi Inovasi dalam Program dan Kegiatan Dinas	26
6.3.1 Pemetaan ke dalam Nomenklatur Program dan Kegiatan	26
6.3.2 Sinkronisasi dengan Indikator Kinerja Utama (IKU)	26
6.3.3 Skenario Penganggaran dan Eksekusi DPA	27
6.3.4 Integrasi dengan Kemitraan Strategis Non-Pemerintah	27
6.3.5 Pilot Project Percontohan Nasional	27
6.4 Strategi Replikasi dan Difusi Inovasi	28
6.5 Institusionalisasi dan Keberlanjutan Program	29
6.5.1 Penguatan Aspek Legal dan Kelembagaan	29
6.5.2 Sistem Pemeliharaan dan Dukungan Operasional	30
6.5.3 Integrasi ke dalam Sistem Perencanaan Pemerintah	30
6.5.4 Sistem Operasional dan Penguatan Kapasitas Pengguna	30
6.5.5 Dukungan Kebijakan sebagai Penguat Implementasi	31
6.6 Indikator Keberhasilan Hilirisasi	31
6.6.1 Adopsi Teknologi	31
6.6.2 Keterlibatan Kelembagaan	31
6.6.3 Dampak Lapangan	32
6.6.4 Replikasi dan Skalabilitas	32
6.6.5 Keberlanjutan Program	32

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Robot ANTRAC 1.0	5
Gambar 2 Roadmap ANTRAC 1.0	8
Gambar 3 Dokumentasi Kegiatan Penandatanganan LoI Kemitraan ANTRAC 1.0 dengan DISKATAN Kabupaten Kuningan	11
Gambar 4 Dokumen Letter of Intent (LoI) Kemitraan ANTRAC 1.0 dengan DISKATAN Kabupaten Kuningan, ditandatangani pada 4 Juni 2026.....	12
Gambar 5 Dokumentasi Lapang.....	13
Gambar 6 Diseminasi Publik ANTRAC 1.0 pada Hari Krida Pertanian ke-54 Kabupaten Kuningan.....	13
Gambar 7 Kerangka Penyusunan Model Strategi Hilirisasi ANTRAC 1.0	16
Gambar 8 Labeling Penyakit Antraknosa Dengan Ai	16
Gambar 9 Pengujian Robot ANTRAC.....	17
Gambar 10 Pengujian Robot ANTRAC di Gapoktan Kecamatan Pamijahan, Bogor .	18
Gambar 11 Pengujian Robot ANTRAC di CV Benih Dramaga	18
Gambar 12 Kegiatan serah terima robot ANTRAC 1.0 oleh tim pengembang kepada ATP IPB University sebagai bagian dari validasi institusional dan penguatan hilirisasi teknologi.....	21
Gambar 13 Hasil deteksi penyakit (bounding box / labeling).....	21
Gambar 14 Komposisi Estimasi Investasi Awal (CAPEX)	24
Gambar 15 Komposisi Biaya Operasional (OPEX) Tahun Pertama.....	26
Gambar 16 Analisis Titik Impas (BEP) — Model RaaS Tahun 1	27
Gambar 17 Desain Antarmuka Web Interface ANTRAC.....	29
Gambar 18 Skema Hilirisasi ANTRAC 1.0	34

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Dekonstruksi Matriks Proporsi Nilai	2
Tabel 2 Estimasi Investasi Awal (CAPEX)	18
Tabel 3 Estimasi Biaya Operasional (OPEX) Tahun Pertama	19
Tabel 4 Dekomposisi Struktur Investasi	20
Tabel 5 Perhitungan Break Even Point (BEP) Tahun 1	21
Tabel 6. Strategi Adopsi Institusional	24

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas terselesaikannya penyusunan dokumen Strategic Hilirisasi Canvas-KajianPra-Studi Kelayakan Tingkat Lanjut untuk produk inovasi ANTRAC 1.0. Di tengah pusaran dinamika perubahan iklim global dan ancaman krisis pangan struktural, sektor agroindustri nasional dituntut untuk melakukan lompatan transformatif. Komoditas cabai rawit (*Capsicum frutescens*), sebagai salah satu instrumen penggerak perekonomian dan stabilitas inflasi nasional, secara historis terus dihantui oleh kerentanan patogenesis, khususnya epidemi penyakit antraknosa (patek). Ketergantungan pada metode mitigasi konvensional yang reaktif tidak lagi memadai untuk menjawab tantangan skala makro ini.

ANTRAC 1.0 hadir bukan sekadar sebagai purwarupa kecerdasan buatan dari ruang laboratorium, melainkan sebagai manifestasi nyata transisi menuju *Agriculture 4.0*. Dengan mengintegrasikan rekayasa robotika, *Internet of Things* (IoT), dan *Edge-to-Cloud AI Inference*, teknologi ini menawarkan presisi, efisiensi, dan keberlanjutan ekosistem. Dokumen SHC ini disusun secara komprehensif sebagai cetak biru (*blueprint*) strategis untuk menjembatani "lembah kematian" (*valley of death*) komersialisasi - mengawal transisi inovasi dari Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) 6 menuju adopsi industri massal (TKT 9).

Kajian di dalam dokumen ini membedah ekosistem hilirisasi secara holistik; mulai dari dekonstruksi nilai tambah produk, rekayasa arsitektur komputasi, kalkulasi ekonometrika dan proyeksi finansial berbasis *Robot-as-a-Service* (RaaS), hingga mitigasi kepatuhan regulasi dan Hak Kekayaan Intelektual (HKI). Seluruh analisis diselaraskan dengan visi pembangunan nasional "Asta Cita", khususnya terkait kemandirian pangan, kemajuan sains berdikari, dan penguatan ekonomi pedesaan berbasis ESG (*Environmental, Social, and Governance*).

Kami menyadari bahwa keberhasilan komersialisasi teknologi mutakhir ini membutuhkan orkestrasi dan sinergi dari ekosistem *pentahelix*. Oleh karena itu, apresiasi setinggi-tingginya kami sampaikan kepada tim peneliti Institut Pertanian Bogor (IPB), jajaran kementerian terkait, mitra koperasi/Gapoktan, serta para calon investor strategis yang menaruh visi yang sama terhadap masa depan pertanian Indonesia.

Semoga dokumen kajian ini dapat menjadi landasan pengambilan keputusan yang solid, terukur, dan berdampak luas bagi modernisasi agroindustri hortikultura di tanah air.

Bogor, Agustus 2026

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Urgensi Komoditas

Kajian Pra-Studi Kelayakan (*Pre-Feasibility Study*) ini diinisiasi sebagai langkah strategis untuk mengevaluasi kelayakan hilirisasi dan komersialisasi produk teknologi dalam negeri, yaitu Robot Pertanian Otonom ANTRAC 1.0 (*Anthraco Nose Detection and Control System*). Produk ini dikembangkan oleh akademisi dan peneliti di Institut Pertanian Bogor (IPB) sebagai solusi atas tantangan struktural yang dihadapi oleh sektor pertanian hortikultura di Indonesia.

Sektor pertanian hortikultura merupakan penyumbang signifikan terhadap PDB nasional, namun komoditas cabai rawit (*Capsicum frutescens*) di dalamnya bukan sekadar kebutuhan kuliner sekunder-ia adalah instrumen penggerak inflasi (*volatile food*) yang sangat sensitif dan berkontribusi langsung pada fluktuasi *Consumer Price Index* (CPI) nasional (Theresia *et al.* 2025). Stabilitas produksi komoditas ini secara historis terus dihantui oleh ancaman kegagalan panen struktural akibat epidemiologi penyakit Antraknosa (patek).

Patogenesis dan Skala Kerusakan Ekonomi. Penyakit ini disebabkan oleh jamur *Colletotrichum* spp. yang sangat virulen pada iklim tropis lembap. Pada kelembapan tinggi (RH > 80%) dan musim hujan, infeksi berkembang cepat sehingga dapat menyebabkan kerusakan 50–90% tanaman jika tidak dikendalikan (de Silva *et al.* 2019). Dampaknya adalah penurunan hasil panen, kerugian ekonomi petani, dan terganggunya rantai pasok hortikultura.

Keterbatasan Resolusi Optik dan Intervensi Konvensional. Pengendalian konvensional bergantung pada inspeksi visual manual yang tidak mampu mendeteksi lesi mikro secara konsisten. Saat gejala terlihat jelas, konidia umumnya telah menyebar ke area sehat melalui angin dan percikan hujan. Akibatnya, deteksi manual bersifat reaktif, terlambat, dan memerlukan tenaga kerja yang besar karena inspeksi harus dilakukan berulang di seluruh lahan.

Paradoks *Blanket Spraying* dan Degradasi Ekosistem. Sebagai respons atas kepanikan gagal panen, petani umumnya menerapkan protokol *blanket spraying*-penyemprotan fungisida kimia spektrum luas secara membabi buta, terjadwal, tanpa mempertimbangkan titik koordinat infeksi presisi. Praktik ini memicu tiga kerugian fatal secara serentak:

1. Pemborosan biaya input bahan kimia (OPEX) hingga 40%-60% (Nasir *et al.* 2023);
2. Peningkatan resistensi patogen (*super-strain fungi*)
3. Tingginya residu kimia yang menyebabkan degradasi mikrobioma tanah dan berisiko menyebabkan penolakan produk panen di pasar ekspor akibat tidak lolos standar batas maksimum residu (Kariyanna *et al.* 2024).

ANTRAC 1.0 menjawab kebuntuan metodologi konvensional tersebut dengan menawarkan otomatisasi berbasis *Artificial Intelligence* (AI) untuk diagnosis dini dan intervensi presisi-mengubah paradigma pengelolaan lahan dari "reaktif-intuitif" menjadi "preventif-presisi-berbasis data", sebuah lompatan yang mampu mengubah wajah agro-industri nasional (Rana dan Vaidya 2026).

1.2 Dekonstruksi Matriks Proporsi Nilai (Value Proposition Canvas)

Untuk memastikan solusi teknologi selaras secara presisi dengan penderitaan riil di lapangan, berikut matriks yang membedah keselarasan antara profil konsumen (petani/Gapoktan) dengan arsitektur solusi yang ditawarkan ANTRAC 1.0:

Tabel 1 Dekonstruksi Matriks Proporsi Nilai

Profil Konsumen (Petani/GAPOKTAN)	Nilai Tambah Produk (ANTRAC 1.0)
Customer Jobs (Tugas Utama):	Products & Services (Produk & Layanan):
Memantau puluhan ribu individu tanaman di lahan berhektar-hektar	Sistem robotik otonom berbasis roda (on-ground) yang bermanuver di sela bedengan
Mendiagnosis gejala penyakit	Analisis citra AI (YOLO) multi-sudut berbasis Cloud Server
Melakukan penyemprotan obat/fungisida	Dashboard agrikultur & pemetaan titik infeksi presisi
Customer Pains (Masalah Utama):	Pain Relievers (Solusi yang Diberikan):
Kehilangan hasil panen drastis ($\geq 50\%$)	Deteksi dini dengan akurasi 97,2% sehingga kerugian dapat ditekan hingga $\leq 15\%$
Kelelahan fisik akibat pemeriksaan manual harian	Sistem otonom menggantikan tenaga kerja manual melalui patroli lahan terjadwal
Biaya pestisida mahal dan sering tidak efisien	Integrasi Auto-Dose Spraying yang menghemat penggunaan obat 40% - 60%
Customer Gains (Harapan/Keuntungan):	Indeks Harga Konsumen (IHK):
Menghasilkan panen Grade A secara konsisten	Meningkatkan rendemen buah berkualitas premium
Mengurangi biaya operasional per musim tanam	Skema Robot-as-a-Service (RaaS) tanpa investasi awal (Zero CAPEX)
	Menyediakan traceability data untuk standardisasi ekspor & kebutuhan industri

1.3 Relevansi Strategis Agenda Pembangunan Nasional

Hilirisasi ANTRAC 1.0 bukan sekadar proyek komersialisasi hasil laboratorium, melainkan instrumen strategis yang beresonansi langsung dengan agenda pembangunan nasional.

1.3.1 Sinergi dengan Asta Cita Presiden Republik Indonesia (2024-2029)

- **Asta Cita 2 → Kemandirian Bangsa & Swasembada Pangan.** ANTRAC 1.0 bertindak sebagai perisai mitigasi risiko untuk menjamin stabilitas pasokan komoditas pangan strategis (cabai) di pasar domestik, memitigasi risiko gagal panen, mengamankan rantai pasok hortikultura secara berkelanjutan, dan menekan volatilitas inflasi nasional yang kerap dipicu oleh krisis pasokan cabai di musim penghujan.
- **Asta Cita 4 → Sains, Teknologi, dan Inovasi Berdikari.** ANTRAC 1.0 merepresentasikan lompatan menuju *Agriculture 4.0* yang lahir dari talenta riset dalam negeri (IPB). Penguasaan hulu ke hilir atas teknologi *deep learning*, komputasi tepi (*edge computing*), dan robotika otonom memperkuat pembangunan sains-teknologi nasional sekaligus mengurangi ketergantungan agro-industri nasional terhadap paten dan algoritma asing.
- **Asta Cita 5 → Hilirisasi dan Transformasi Industri.** Kajian ini mendukung transisi teknologi dari prototipe fungsional (TKT 6) menuju produk komersial siap industri (TKT 9) melalui hilirisasi menjadi Alat dan Mesin Pertanian (Alsintan) modern yang kompetitif, sehingga berpotensi mengurangi ketergantungan pada teknologi impor.
- **Asta Cita 6 → Membangun dari Desa untuk Pemerataan Ekonomi.** Guna meningkatkan pendapatan dan kesejahteraan petani kecil melalui akses teknologi yang terjangkau dan merata.

1.3.2. Hubungan dengan Rumusan Masalah KSTI Pangan (Kemdiktisaintek)

- **Masalah 1.1 → Ketergantungan Impor dan Krisis Produksi Domestik:** KSTI menyoroti rendahnya mekanisasi dan produktivitas pertanian. ANTRAC 1.0 hadir meningkatkan efisiensi kerja melalui otomatisasi deteksi penyakit, menjaga produktivitas lahan tanpa ketergantungan pada teknologi impor yang mahal.
- **Masalah 1.2 → Lambatnya Adopsi Teknologi dan Transformasi Digital:** KSTI menekankan hambatan biaya investasi awal yang tinggi bagi petani. ANTRAC 1.0 dirancang dengan skema *Smart Farming* modular berbasis layanan (RaaS) yang terjangkau bagi petani kecil dan kelompok tani (Gapoktan).

1.3.3 Substitusi Impor dan Potensi Ekspor

- **Substitusi Impor:** Mensubstitusi ketergantungan terhadap teknologi *precision agriculture* asing (seperti drone *sprayer* mewah atau sensor multiseluler impor) dengan solusi lokal yang memiliki *Total Cost of Ownership* (TCO) jauh lebih rendah.
- **Potensi Ekspor:** Sebagai produk berteknologi tinggi yang dilindungi HKI, ANTRAC 1.0 ditargetkan untuk melakukan penetrasi pasar ke negara-negara regional ASEAN yang memiliki karakteristik agroekologi dan tantangan penyakit hortikultura serupa.

BAB II

GAMBARAN UMUM PRODUK DAN KESIAPAN TEKNOLOGI

2.1 Deskripsi Produk dan Arsitektur Sistem

Robot ANTRAC 1.0 (*Anthravnose Detection Robot*) merupakan sebuah inovasi mutakhir berbentuk sistem sibernetika-fisik (*cyber-physical system*) otonom yang dikembangkan secara spesifik untuk memitigasi penyebaran penyakit patogen antraknosa (*patek*) pada tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens*). Dirancang oleh Dr. Ridwan Siskandar dan tim peneliti Sekolah Vokasi IPB University, teknologi ini mengintegrasikan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), rangkaian sensor optik-spasial, dan modul mikrokontroler berkecepatan tinggi dalam satu kesatuan sasis mekanis yang kokoh. Sebagai tanggapan atas inefisiensi pengawasan manual konvensional yang memakan waktu dan berbiaya tinggi, robot ini hadir sebagai solusi pengawasan otonom yang bergerak menyusuri bedengan lahan pertanian hortikultura secara terjadwal.



Gambar 1 Robot ANTRAC 1.0

Arsitektur fisik ANTRAC 1.0 didominasi oleh sasis tahan cuaca ekstrem berpelindung korosi tinggi yang ditopang oleh sistem penggerak kinematika *skid steering* empat roda mandiri (*four-wheel drive*) (Agelli *et al.* 2024). Sistem mekanis ini dikalibrasi secara spesifik agar mampu bermanuver lincah di sela-sela bedengan tanah pertanian tropis Indonesia yang cenderung basah, berlumpur, tidak rata, serta memiliki sudut kemiringan bervariasi. Robot ini mengusung modul komputasi tepi (*edge computing*) berperforma tinggi yang terhubung dengan kamera bersensor resolusi tinggi, sehingga pemrosesan citra dedaunan dan buah cabai dapat dilakukan secara lokal tanpa ketergantungan mutlak pada jaringan internet nirkabel di lapangan. Dengan kapasitas baterai litium-ion yang telah dioptimalkan, robot ini dapat beroperasi secara kontinu selama 4-6 jam dalam satu siklus

pengisian daya tunggal, mencakup wilayah pengawasan seluas kurang lebih 0,5 hektar per hari operasional dengan kecepatan menyusuri bedengan rata-rata 50-75 meter per jam.

Pada ranah operasional perangkat lunak, sistem visi komputer (*computer vision*) ANTRAC 1.0 ditenagai oleh arsitektur *deep learning* yang telah dikustomisasi secara khusus menggunakan basis data ribuan citra gejala klinis penyakit antraknosa lokal pada berbagai tingkat keparahan infeksi (Alhwaiti *et al.* 2025). Proses deteksi klinis ini melibatkan pemindaian tekstur, perubahan warna (lesi melingkar hitam kecokelatan), dan morfologi buah maupun daun tanaman secara mikro-spasial di bawah pancaran intensitas cahaya matahari yang bervariasi. Data citra hasil tangkapan sensor kemudian diproses dalam waktu milidetik oleh algoritma klasifikasi lokal untuk menghasilkan keluaran indeks keparahan penyakit (*disease severity index*). Kinerja ANTRAC 1.0 dievaluasi menggunakan pendekatan *confusion matrix* untuk mengukur ketepatan dan keakuratan sistem dalam mendeteksi objek. Hasil pengujian multisite menunjukkan bahwa sistem ini mampu mencapai akurasi sebesar 97,2% dan presisi 97,8%, yang menandakan performa deteksi yang sangat tinggi dan konsisten, bahkan dalam kondisi lahan tropis yang dinamis

2.2 Komponen Utama Produk

ANTRAC 1.0 tersusun atas beberapa komponen utama yang terintegrasi dalam suatu sistem robotika cerdas. Komponen-komponen tersebut meliputi:

1. Unit Pemrosesan (Processing Unit)

Unit pemrosesan berfungsi sebagai pusat kendali utama sistem. Pada pengembangan ANTRAC 1.0, unit ini menggunakan *embedded system* berbasis komputasi GPU seperti Jetson Nano, yang mampu menjalankan algoritma *deep learning* secara efisien untuk kebutuhan pemrosesan citra secara *real-time* (Madiwal *et al.* 2025). Perangkat ini memungkinkan sistem melakukan inferensi model kecerdasan buatan langsung di lapangan tanpa ketergantungan pada komputasi awan (*cloud computing*).

2. Sistem Sensor dan Akuisisi Data

Sistem ini terdiri atas kamera sebagai sensor utama untuk menangkap citra tanaman, serta sensor pendukung lainnya (jika diperlukan) untuk membaca kondisi lingkungan. Data visual yang diperoleh menjadi input utama dalam proses deteksi penyakit.

3. Sistem Aktuator dan Mobilitas

Komponen ini mencakup motor penggerak, roda, serta rangka robot yang memungkinkan ANTRAC 1.0 bergerak secara stabil di antara bedengan tanaman. Sistem mobilitas dirancang agar mampu beradaptasi dengan kondisi lahan pertanian yang tidak rata dan dinamis.

4. Sistem Kendali Jarak Jauh (Remote Control System)

Dalam pengoperasiannya, ANTRAC 1.0 dapat dikendalikan secara manual menggunakan *remote control* berbasis radio, seperti Flysky, khususnya pada tahap navigasi awal atau pengujian lapangan. Sistem ini memberikan fleksibilitas bagi operator dalam mengarahkan pergerakan robot sesuai kebutuhan.

5. Perangkat Lunak dan Algoritma Kecerdasan Buatan

Komponen perangkat lunak mencakup model *deep learning* untuk klasifikasi penyakit, sistem pemrosesan citra, serta antarmuka pengguna. Algoritma ini memungkinkan sistem melakukan deteksi secara cepat, akurat, dan konsisten pada berbagai kondisi lingkungan pertanian.

6. Sistem Daya (Power Supply)

Sistem daya menggunakan baterai sebagai sumber energi utama yang memungkinkan robot beroperasi selama beberapa jam dalam satu siklus penggunaan. Berdasarkan hasil pengujian, ANTRAC 1.0 mampu beroperasi selama 4-6 jam dalam sekali penggunaan di lapangan.

2.3 Keunggulan dan Inovasi Produk

ANTRAC 1.0 memiliki sejumlah keunggulan dan nilai inovasi dibandingkan metode konvensional dalam pemantauan penyakit tanaman, antara lain:

1. Deteksi Dini Berbasis Kecerdasan Buatan

Pemanfaatan teknologi *deep learning* memungkinkan sistem mendeteksi gejala penyakit secara lebih cepat dan akurat dibandingkan pengamatan manual, sehingga dapat meminimalkan keterlambatan penanganan.

2. Pemantauan Real-Time di Lapangan

Sistem mampu melakukan monitoring secara langsung di lahan pertanian dengan kecepatan pemantauan sekitar 50-75 meter jalur bedengan per jam, sehingga efisien untuk skala lahan yang luas.

3. Efisiensi Penggunaan Pestisida

Dengan adanya informasi tingkat serangan penyakit yang lebih akurat, penggunaan pestisida dapat dilakukan secara lebih tepat sasaran, sehingga mengurangi pemborosan dan dampak negatif terhadap lingkungan.

4. Kemudahan Penggunaan (User-Friendly)

ANTRAC 1.0 dirancang dengan pendekatan *human-centered technology*, sehingga dapat dioperasikan oleh penyuluh maupun petani dengan pelatihan yang relatif singkat.

5. Potensi Integrasi dengan Sistem Nasional

Data yang dihasilkan memiliki kompatibilitas dengan sistem informasi pertanian nasional, sehingga berpotensi mendukung pengambilan kebijakan berbasis data oleh pemerintah.

2.4 Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT / TRL)

Berdasarkan hasil pengujian dan validasi yang telah dilakukan, ANTRAC 1.0 berada pada kisaran Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) level 6-7, yaitu tahap di mana prototipe sistem telah diuji dalam lingkungan yang relevan dan mendekati kondisi operasional sebenarnya. Hal ini ditunjukkan melalui beberapa indikator, antara lain:



Gambar 2 Roadmap ANTRAC 1.0

1. Validasi Kinerja Teknis

Sistem telah diuji dalam mendeteksi penyakit dengan tingkat akurasi tinggi serta performa yang konsisten pada berbagai kondisi lingkungan.

2. Uji Operasional di Lingkungan Nyata

ANTRAC 1.0 telah diuji langsung di lahan pertanian dengan kemampuan operasional selama 4-6 jam dan cakupan hingga $\pm 0,5$ hektar per hari.

3. Validasi Kesesuaian Pengguna

Sistem telah dievaluasi dari sisi kemudahan penggunaan dan kesesuaian dengan kebutuhan penyuluh serta petani sebagai pengguna akhir.

4. Kelayakan Ekonomi dan Hilirisasi

Hasil analisis menunjukkan bahwa produk memiliki nilai *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 21,51%, yang menunjukkan potensi kelayakan ekonomi serta kesiapan untuk masuk ke tahap hilirisasi dan adopsi lebih luas.

Dengan demikian, ANTRAC 1.0 dapat dikategorikan sebagai teknologi yang telah matang pada tahap prototipe lanjut dan siap untuk dikembangkan menuju tahap produksi terbatas serta implementasi di lapangan secara lebih luas.

BAB III

VALIDASI PASAR DAN REKAM JEJAK MARKETING

3.1 Analisis Permintaan dan *Pain Point*

Permasalahan utama dalam budidaya cabai di Indonesia tidak terletak pada aspek produksi semata, melainkan pada ketidakmampuan sistem budidaya dalam merespons serangan penyakit secara cepat dan tepat. Penyakit antraknosa, sebagai salah satu penyebab utama kerugian pada tanaman cabai, sering kali terdeteksi dalam kondisi yang sudah parah akibat keterbatasan metode identifikasi berbasis observasi manual. Pendekatan konvensional yang selama ini digunakan petani bersifat subjektif, tidak terstandarisasi, serta sangat bergantung pada pengalaman individu, sehingga berpotensi menghasilkan kesalahan diagnosis yang berujung pada keputusan pengendalian yang tidak efektif (Liu & Wang, 2021)

Lebih lanjut, keterlambatan deteksi penyakit tidak hanya berdampak pada penurunan produktivitas, tetapi juga memicu penggunaan pestisida secara berlebihan sebagai respons reaktif. Praktik ini secara langsung meningkatkan biaya produksi dan secara tidak langsung menimbulkan tekanan terhadap keberlanjutan lingkungan pertanian. Dalam konteks ini, dapat disimpulkan bahwa akar permasalahan bukan semata pada penyakit itu sendiri, melainkan pada ketiadaan sistem deteksi dini yang akurat, cepat, dan berbasis data.

ANTRAC 1.0 hadir untuk mengisi celah kritis tersebut dengan menawarkan pendekatan berbasis teknologi kecerdasan buatan yang mampu melakukan deteksi penyakit secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang tinggi. Keunggulan ini secara fundamental menggeser paradigma dari *reactive farming* menuju *predictive and data-driven farming*, di mana keputusan pengendalian penyakit tidak lagi didasarkan pada asumsi, melainkan pada hasil analisis sistematis (Benos *et al.* 2021)

Dari perspektif pasar, kebutuhan terhadap solusi seperti ANTRAC 1.0 menunjukkan tren yang semakin meningkat seiring dengan dorongan transformasi digital di sektor pertanian. Hal ini diperkuat oleh adanya kebutuhan institusional dari pemerintah, khususnya dalam meningkatkan efektivitas program penyuluhan dan monitoring pertanian berbasis data. Selain itu, hasil validasi menunjukkan bahwa teknologi ini mampu memberikan nilai ekonomi yang nyata bagi pengguna, baik melalui pengurangan potensi kerugian akibat penyakit maupun efisiensi penggunaan input pertanian.

Dengan model layanan yang dirancang lebih inklusif, yaitu tanpa menuntut investasi awal yang besar dari petani, ANTRAC 1.0 memiliki keunggulan kompetitif dalam menembus pasar. Skema biaya tahunan yang relatif terjangkau menjadi faktor kunci dalam menurunkan hambatan adopsi, sekaligus mempercepat difusi inovasi di tingkat pengguna akhir (Rejeb *et al.* 2022). Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa ANTRAC 1.0 tidak hanya menjawab kebutuhan teknis, tetapi juga selaras dengan realitas ekonomi dan perilaku pengguna di sektor pertanian.

3.2 Rekam Jejak Pilot Project Komersial

Validasi terhadap kelayakan ANTRAC 1.0 tidak hanya dilakukan pada aspek teknis, tetapi juga melalui implementasi langsung di lingkungan pertanian sebagai bentuk *pilot project* operasional. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem tidak hanya bekerja secara optimal dalam kondisi laboratorium, tetapi juga mampu beradaptasi dengan dinamika lapangan yang kompleks dan tidak terkontrol.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa ANTRAC 1.0 mampu beroperasi secara stabil di lahan pertanian dengan durasi operasional mencapai 4 hingga 6 jam dalam satu siklus penggunaan, serta cakupan area monitoring sekitar $\pm 0,5$ hektar per hari. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kapasitas operasional yang memadai untuk mendukung kebutuhan monitoring pada skala lahan petani.

Selain itu, kemampuan sistem dalam mempertahankan performa di berbagai kondisi lingkungan—seperti variasi intensitas cahaya, kelembaban, dan kondisi tanah—menunjukkan tingkat robustness yang tinggi. Teknologi ini juga terbukti mampu melakukan deteksi secara konsisten dalam kondisi lapangan yang dinamis, sehingga memperkuat validitasnya sebagai solusi yang siap diimplementasikan secara nyata.

Dari sisi kelayakan ekonomi, hasil analisis menunjukkan bahwa ANTRAC 1.0 memiliki nilai *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 21,51%, yang berada di atas tingkat diskonto sebesar 12%. Temuan ini mengindikasikan bahwa produk tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memiliki prospek komersial yang menguntungkan, sehingga berpotensi untuk diadopsi dalam skala yang lebih luas, termasuk dalam program bantuan alat pertanian oleh pemerintah.

Dengan demikian, rekam jejak *pilot project* ini menjadi bukti empiris bahwa ANTRAC 1.0 telah melampaui tahap konseptual dan prototipe, serta telah memasuki fase validasi operasional yang kuat menuju komersialisasi.

Selain capaian pada aspek teknis dan kelayakan ekonomi, rekam jejak ANTRAC 1.0 turut diperkuat melalui peninjauan kemitraan strategis dengan instansi pemerintah daerah. Pada tanggal 4 Juni 2026, dilakukan penandatanganan Letter of Intent (LoI) sebagai bentuk persetujuan awal kemitraan antara tim pengembang ANTRAC 1.0 dengan Dinas Ketahanan Pangan (DISKATAN) Kabupaten Kuningan. Berikut merupakan dokumentasi kegiatan penandatanganan beserta dokumen Letter of Intent (LoI) yang menjadi bukti formal kesepakatan awal kemitraan tersebut.



Gambar 3 Dokumentasi Kegiatan Penandatanganan LoI Kemitraan ANTRAC 1.0 dengan DISKATAN Kabupaten Kuningan




**LETTER OF INTENT (LoI) KERJA SAMA ANTARA
DINAS KETAHANAN PANGAN DAN PERTANIAN KABUPATEN
KUNINGAN
DAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR**

Dua belah pihak mengemukakan kerja sama yang saling memberikan manfaat bagi kedua belah pihak, Dr. Wahyu Hidayah, M.Si., selaku Kepala Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Kuningan, bertindak untuk dan atas nama Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Kuningan, berkedudukan di Jl. Syeh Manglayang, Windujanten, Kuningan dan Dr. Inna Novianty, S.Si., M.Si., selaku Ketua Peneliti, bertindak untuk dan atas nama Institut Pertanian Bogor, berkedudukan di Kampus IPB Ciliwende, Bogor, sepakat untuk menjalin kerja sama sebagai landasan awal pelaksanaan program hilirisasi hasil skema dorongan teknologi tahun 2026:

**KERJA SAMA INI DILAKSANAKAN DALAM BIDANG IMPLEMENTASI PRODUK
HILIRISASI RISET SKEMA DORONGAN TEKNOLOGI TAHUN 2026.**

Ruang Lingkup Kerja Sama meliputi:

- Pengembangan model bisnis/ model strategi hilirisasi berkelanjutan dari produk pertanian Antrac 1.0
- Penyusunan strategi adopsi teknologi tepat guna secara ekstensif berdasarkan hasil evaluasi inovasi di lapangan bagi ekosistem pertanian Kabupaten Kuningan
- Pelaksanaan Pilot Project Akselerasi TKT 6 -- TKT 7 di lokasi yang telah disepakati bersama di wilayah Kabupaten Kuningan

Kedua belah pihak memahami bahwa pelaksanaan setiap kegiatan kerja sama akan disesuaikan dengan kebutuhan, prioritas, dan ketersediaan sumber daya masing-masing institusi.

Ketentuan teknis serta tanggung jawab pelaksanaan dari setiap kegiatan akan dibahas dan disepakati lebih lanjut oleh kedua belah pihak.

Ditandatangani oleh:
**Dinas Ketahanan Pangan
dan Pertanian Kabupaten Kuningan**



Dr. Wahyu Hidayah, M.Si
Kepala Dinas Ketahanan
Pangan dan Pertanian Kab.
Kuningan

Tanggal: 4 Juni 2026

Ditandatangani oleh:
Institut Pertanian Bogor



Dr. Inna Novianty, S.Si, M.Si
Ketua Peneliti

Tanggal: 4 Juni 2026

Gambar 4 Dokumen Letter of Intent (LoI) Kemitraan ANTRAC 1.0 dengan DISKATAN Kabupaten Kuningan, ditandatangani pada 4 Juni 2026

Penandatanganan LoI ini menandai langkah awal formal dalam membangun kepercayaan institusional antara ANTRAC 1.0 dengan pemerintah daerah, sekaligus menjadi indikasi konkret bahwa validasi teknis dan operasional yang telah dibuktikan sebelumnya mendapatkan respons positif dari sisi kelembagaan. Meskipun kesepakatan ini masih berada pada tahap persetujuan awal dan belum sampai pada fase pengadaan atau implementasi penuh, keberadaan LoI ini memiliki nilai strategis tersendiri, yaitu membuka jalur komunikasi resmi antara tim pengembang dengan DISKATAN Kabupaten Kuningan untuk merumuskan skema kerja sama lanjutan, termasuk kemungkinan uji coba lapangan yang lebih terstruktur di wilayah binaan dinas tersebut.

Dengan tercapainya kesepakatan awal ini, ANTRAC 1.0 tidak hanya memperoleh validasi dari sisi teknis dan pilot project mandiri, tetapi juga mulai membangun fondasi kelembagaan yang menjadi prasyarat penting bagi keberlanjutan hilirisasi teknologi ke tingkat pemerintah daerah yang lebih luas.

3.3 Edukasi, Diseminasi, dan Instalasi Awal

Keberhasilan hilirisasi teknologi tidak hanya ditentukan oleh keunggulan teknis, tetapi juga oleh efektivitas strategi edukasi dan diseminasi kepada pengguna akhir. Dalam konteks ini, ANTRAC 1.0 dikembangkan dengan pendekatan *human-centered technology*, yang menempatkan kemudahan penggunaan dan pemahaman sebagai prioritas utama. Pendekatan demonstratif terbukti efektif dalam menurunkan resistensi awal terhadap teknologi baru, karena pengguna dapat secara langsung melihat manfaat nyata yang dihasilkan oleh sistem.



Gambar 5 Dokumentasi Lapang

Demonstrasi langsung dilakukan melalui kunjungan tim pakar dari Politeknik Negeri Batam (Polibatam) ke greenhouse Institut Pertanian Bogor (IPB) untuk menguji kinerja robot ANTRAC 1.0 pada tanaman cabai. Pengujian dilakukan dalam lingkungan terkontrol dengan variasi tingkat pertumbuhan dan kesehatan tanaman guna mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi gejala penyakit, serta menilai performa navigasi dan monitoring robot. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ANTRAC 1.0 mampu beroperasi secara stabil dan menghasilkan deteksi yang konsisten pada berbagai kondisi tanaman.

Selain sebagai validasi teknis, kegiatan ini juga menjadi media diseminasi teknologi kepada akademisi dan praktisi pertanian melalui transfer pengetahuan secara langsung. Implementasi disertai pendampingan sehingga pengguna dapat memahami operasional sistem tanpa memerlukan pelatihan yang kompleks, didukung antarmuka yang sederhana dan mudah dioperasikan. Melalui pengujian dan demonstrasi di greenhouse IPB, ANTRAC 1.0 tidak hanya memperoleh validasi teknis, tetapi juga memperkuat legitimasi akademik dan praktis sebagai teknologi yang siap diadopsi secara lebih luas.

Momentum diseminasi tidak berhenti pada lingkup akademik semata, melainkan berlanjut ke ranah diseminasi publik yang lebih luas melalui keikutsertaan ANTRAC 1.0 pada penyelenggaraan pameran Hari Krida Pertanian (HKP) ke-54 di Kabupaten Kuningan. Ajang tahunan ini merupakan panggung strategis yang mempertemukan jajaran pimpinan dinas, penyuluh pertanian, serta kelompok tani binaan dalam satu forum, sehingga menjadi kesempatan yang tepat untuk memperkenalkan ANTRAC 1.0 kepada khalayak pengambil kebijakan di tingkat daerah.



Gambar 6 Diseminasi Publik ANTRAC 1.0 pada Hari Krida Pertanian ke-54 Kabupaten Kuningan

Pada kegiatan tersebut, tim pengembang melakukan demonstrasi langsung kinerja ANTRAC 1.0 di hadapan jajaran pejabat dinas, alih-alih sekadar memamerkan produk secara statis. Pendekatan demonstratif ini dipilih agar pihak dinas dapat menyaksikan secara langsung

proses deteksi penyakit antraknosa berbasis kecerdasan buatan yang dilakukan sistem, sehingga validasi kinerja produk tidak lagi bersifat klaim teoretis, melainkan dapat diamati dan dinilai secara objektif oleh pemangku kepentingan.

Respons yang diperoleh pasca-demonstrasi menunjukkan hasil yang positif. Pihak dinas menyatakan ketertarikan konkret terhadap teknologi ANTRAC 1.0 dan membuka ruang diskusi lebih lanjut mengenai kemungkinan kerja sama ujicoba di lapangan. Sinyal awal ini menjadi indikasi penting bahwa jalur diseminasi publik berbasis demonstrasi langsung mampu mengonversi ketertarikan institusional menjadi langkah konkret menuju kolaborasi, sekaligus membuka peluang bagi ANTRAC 1.0 untuk memperluas jejaring adopsi di luar lingkup akademik menuju ranah kelembagaan pemerintah daerah.

Dengan rangkaian kegiatan edukasi dan diseminasi yang mencakup validasi teknis di lingkungan akademik hingga eksposur publik pada forum kelembagaan pemerintah, ANTRAC 1.0 menunjukkan lintasan hilirisasi yang progresif dari pembuktian konsep di lingkungan terkontrol menuju penjajakan kerja sama nyata dengan instansi pemerintah daerah, sebagai langkah awal menuju komersialisasi yang lebih luas.

BAB IV

KERANGKA STRATEGI HILIRISASI

4.1 Kerangka Model Strategi Hilirisasi Produk

Model strategi hilirisasi ANTRAC 1.0 disusun sebagai tahapan lanjutan dari proses pengembangan inovasi yang telah melalui serangkaian kegiatan evaluasi, pengujian, dan penyempurnaan produk. Strategi ini tidak dibangun secara terpisah dari proses penelitian, melainkan merupakan hasil dari studi kelayakan (*feasibility study*), tinjauan pakar, identifikasi hambatan implementasi (*bottleneck*), serta riset perbaikan yang dilakukan untuk meningkatkan kesiapan teknologi sebelum diterapkan secara lebih luas.

Pendekatan tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa ANTRAC 1.0 tidak hanya layak dari sisi teknologi, tetapi juga memiliki kesiapan implementasi, peluang adopsi yang tinggi, serta kesesuaian dengan kebutuhan pengguna dan program pembangunan pertanian. Dengan demikian, model hilirisasi yang disusun tidak hanya berfokus pada penyebaran produk, tetapi juga pada upaya membangun sistem implementasi yang berkelanjutan dan mampu memberikan manfaat nyata bagi sektor pertanian

Model hilirisasi ANTRAC 1.0 disusun sejalan dengan arah pembangunan pertanian nasional yang menekankan modernisasi sektor pertanian, pemanfaatan teknologi digital, penguatan smart farming, serta peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan. Oleh karena itu, implementasi ANTRAC 1.0 tidak diposisikan sebagai program yang berdiri sendiri, melainkan sebagai bagian dari upaya transformasi pertanian berbasis teknologi yang dapat mendukung efektivitas pengendalian penyakit tanaman, efisiensi budidaya, dan pengambilan keputusan berbasis data di tingkat lapangan.



Gambar 7 Kerangka Penyusunan Model Strategi Hilirisasi ANTRAC 1.0

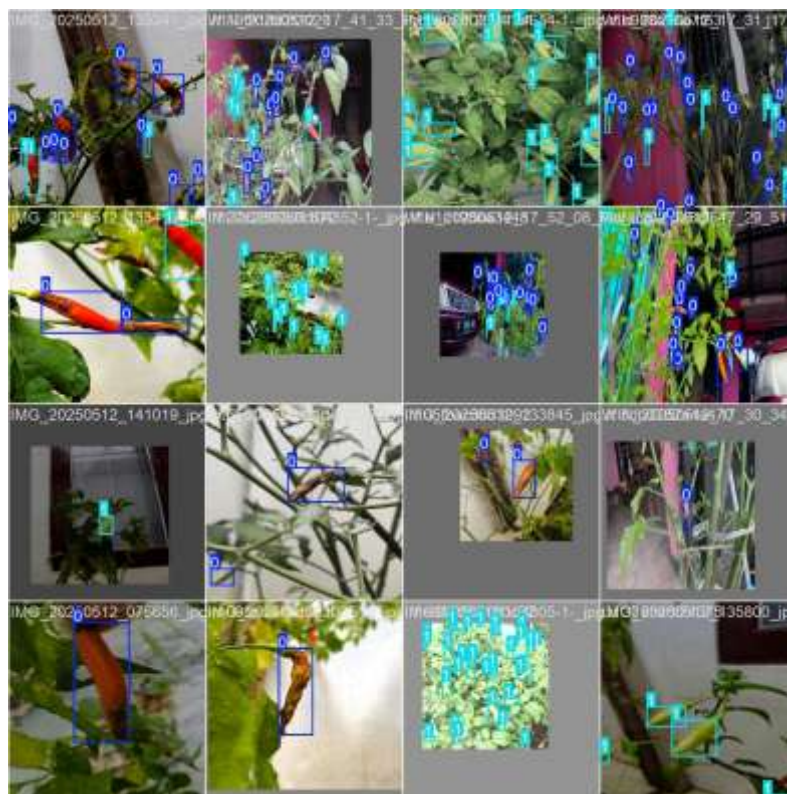
Berdasarkan hasil kajian dan penyempurnaan yang telah dilakukan, model strategi hilirisasi ANTRAC 1.0 dirancang dalam lima tahapan utama yang saling terintegrasi, yaitu

validasi implementasi, adopsi institusional, integrasi dalam program pemerintah, replikasi dan difusi inovasi, serta institusionalisasi dan keberlanjutan. Kelima tahapan tersebut membentuk alur hilirisasi yang sistematis mulai dari pembuktian kelayakan teknologi hingga penguatan keberlanjutan implementasi dalam ekosistem pertanian.

4.1.1 Validasi Implementasi

Tahap ini menjadi fondasi awal untuk membuktikan bahwa ANTRAC 1.0 layak diterapkan secara teknis maupun operasional di lingkungan pertanian nyata. Fokus utamanya adalah pengujian akurasi sistem *Artificial Intelligence* dalam mendeteksi penyakit antraknosa pada cabai rawit, kestabilan sensor dan mikrokontroler, serta kemampuan robot dalam melakukan monitoring tanaman secara *real-time* di lahan.

1. Validasi Pengujian pada Kondisi Lahan Nyata



Gambar 8 Labeling Penyakit Antraknosa Dengan Ai

Berdasarkan hasil pengujian lapangan terbatas, sistem deteksi ANTRAC 1.0 menunjukkan tingkat akurasi sebesar 97,2% dan presisi 97,8% dalam mengidentifikasi penyakit antraknosa pada tanaman cabai rawit. Sistem bekerja secara *real-time* dengan kemampuan klasifikasi tingkat serangan penyakit ke dalam kategori ringan, sedang, dan berat.

Selain itu, dalam skenario pemrosesan berbasis *cloud*, sistem mampu menghasilkan hasil deteksi dalam waktu 3-8 menit, sedangkan dalam mode operasional langsung di lapangan, robot mampu melakukan pemantauan secara kontinu dengan kecepatan cakupan 50-75 meter jalur bedeng per jam.



Gambar 9 Pengujian Robot ANTRAC

Keberhasilan tahap validasi implementasi diukur melalui indikator teknis dan operasional yang terukur, antara lain tingkat akurasi sistem *Artificial Intelligence* dalam mendeteksi gejala penyakit antraknosa, kecepatan sistem dalam menghasilkan identifikasi, kestabilan perangkat saat beroperasi pada lahan pertanian, serta kemampuan sistem dalam menghasilkan data yang relevan untuk kebutuhan pengambilan keputusan. Pendekatan berbasis indikator ini penting untuk memastikan bahwa ANTRAC 1.0 memenuhi standar kelayakan sebelum direplikasi pada skala yang lebih luas.

4.1.2 Adopsi Institusional

Tahap ini merupakan strategi terstruktur untuk mendorong penerimaan teknologi oleh aktor kunci di daerah, mulai dari aparat dinas pertanian, Penyuluh Pertanian Lapangan (PPL), hingga Gabungan Kelompok Tani (Gapoktan). Keberhasilan tahap ini dianalisis menggunakan pendekatan *Technology Acceptance Model* (TAM), yang berfokus pada dua variabel utama: *Perceived Usefulness* (persepsi kemanfaatan) dan *Perceived Ease of Use* (persepsi kemudahan penggunaan). Teknologi robotika sering kali menghadapi penolakan awal karena dianggap rumit oleh komunitas petani tradisional; oleh karena itu, adopsi institusional berperan penting dalam menjembatani kesenjangan literasi digital tersebut (Kakani *et al.* 2020).

Untuk mengoptimalkan adopsi, strategi difokuskan pada pembuktian efisiensi kerja ANTRAC 1.0 yang lebih cepat, akurat, dan responsif dibandingkan metode konvensional (inspeksi visual mata manusia yang rentan lelah dan subjektif). Melalui kolaborasi aktif dengan PPL, robot didemonstrasikan sebagai "asisten digital" yang membantu meringankan beban kerja pemantauan lahan yang luas. Dinas Pertanian setempat dilibatkan sebagai fasilitator regulasi dan penyedia infrastruktur awal, sementara pengurus Gapoktan dilatih untuk mengoperasikan antarmuka layar sentuh robot secara mandiri. Dengan pembuktian bahwa teknologi ini mampu mereduksi

kegagalan panen akibat patek secara signifikan, hambatan psikologis adopsi teknologi dapat ditekan seminimal mungkin.

Sebagai langkah konkret dalam membuktikan penerimaan teknologi di tingkat pengguna institusional, ANTRAC 1.0 telah menjalani pengujian langsung pada dua lokasi dengan karakteristik pengguna yang berbeda, guna memperkaya validasi TAM dari sisi kelompok tani maupun pelaku usaha agrikultur.



Gambar 10 Pengujian Robot ANTRAC di Gapoktan Kecamatan Pamijahan, Bogor

Pengujian pertama dilaksanakan bersama Gabungan Kelompok Tani (Gapoktan) di Kecamatan Pamijahan, Bogor. Lokasi ini dipilih karena merepresentasikan karakteristik kelompok tani konvensional yang selama ini mengandalkan metode observasi manual dalam mendeteksi gejala penyakit tanaman. Pengujian di lapangan ini bertujuan untuk mengukur persepsi kemudahan penggunaan (Perceived Ease of Use) robot oleh anggota Gapoktan yang belum terpapar teknologi robotika sebelumnya, sekaligus menilai sejauh mana antarmuka layar sentuh dan alur kerja robot dapat dipahami tanpa memerlukan pelatihan teknis yang kompleks.



Gambar 11 Pengujian Robot ANTRAC di CV Benih Dramaga

Pengujian kedua dilakukan di CV Benih Dramaga, sebuah entitas usaha yang bergerak di bidang produksi dan penyediaan benih pertanian. Berbeda dengan konteks Gapoktan yang lebih berorientasi pada kelompok tani binaan, pengujian di lokasi ini memberikan gambaran mengenai penerimaan teknologi dari sisi pelaku usaha agribisnis yang memiliki orientasi produksi dan efisiensi operasional yang lebih terstruktur. Hasil pengujian di CV Benih Dramaga turut memperkuat validasi Perceived Usefulness ANTRAC 1.0, khususnya dalam konteks deteksi dini penyakit pada skala produksi benih yang menuntut standar kualitas tanaman yang lebih ketat.

Kedua pengujian ini secara kolektif menegaskan bahwa ANTRAC 1.0 memiliki fleksibilitas adopsi pada berbagai tipologi pengguna institusional, baik pada kelompok tani konvensional maupun pelaku usaha agribisnis yang lebih formal. Temuan ini menjadi bukti awal yang memperkuat argumen bahwa hambatan psikologis terhadap teknologi robotika dapat direduksi melalui eksposur langsung dan pembuktian manfaat secara empiris di lapangan.

4.1.3 Integrasi dalam Program Pemerintah

Fokus pada tahap ini adalah penyelarasan fungsionalitas dan operasional ANTRAC 1.0 ke dalam program kerja pemerintah yang berkaitan dengan ketahanan pangan, modernisasi pertanian, digitalisasi sektor agrikultur, dan pengendalian inflasi daerah komoditas hortikultura esensial. Integrasi ini krusial agar inovasi ini tidak berakhir sebagai proyek riset yang mati di laci akademis, melainkan dapat diserap secara legal dan masif ke dalam kebijakan strategis nasional maupun daerah.

Proses integrasi ini dilakukan melalui tiga pintu masuk kebijakan utama:

1. **Program Bantuan Sarana Produksi:** Memosisikan ANTRAC 1.0 sebagai bagian dari paket bantuan teknologi pertanian hemat energi untuk kelompok tani berprestasi.
2. **Skema Pengadaan Barang dan Jasa Pemerintah (e-Katalog LKPP):** Memenuhi persyaratan sertifikasi Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) agar unit robot dan stasiun aplikator presisi dapat dibeli langsung oleh dinas terkait menggunakan APBD atau APBN.
3. **Penyelarasan dengan TPID (Tim Pengendali Inflasi Daerah):** Menjadikan data pemetaan penyakit (*disease heatmap*) yang dihasilkan robot sebagai indikator deteksi dini pasokan komoditas cabai guna mencegah lonjakan harga ekstrim di pasar daerah akibat gagal panen masal.

4.1.4 Replikasi dan Difusi Inovasi

Tahap ini merupakan proses perluasan implementasi ANTRAC 1.0 melalui model percontohan, demonstrasi lapangan, dan pelatihan pengguna. Dengan pendekatan ini, teknologi dapat direplikasi pada wilayah lain yang memiliki karakteristik pertanian serupa sehingga manfaat inovasi dapat tersebar secara lebih luas.

4.1.5 Institusionalisasi dan Keberlanjutan

Tahap akhir bertujuan memastikan ANTRAC 1.0 menjadi bagian dari sistem kerja yang berkelanjutan. Hal ini mencakup penguatan aspek legalitas inovasi, dukungan operasional dan pemeliharaan sistem, serta penyusunan kebijakan kelembagaan yang mendukung pemanfaatan teknologi secara jangka panjang dalam upaya peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan.

4.2 Tahap Validasi Implementasi Berbasis Kebutuhan Dinas

Tahap validasi implementasi berbasis kebutuhan dinas merupakan fase transisi fundamental untuk memastikan bahwa inovasi ANTRAC 1.0 tidak sekadar berhenti sebagai purwarupa konseptual di ranah laboratorium, melainkan siap bertransformasi menjadi solusi operasional yang *ready-to-deploy*. Dalam konteks kebijakan publik dan ketahanan pangan,

teknologi baru hanya akan diadopsi oleh pemerintah jika terbukti mampu memitigasi risiko di lapangan sekaligus sejalan dengan indikator kinerja instansi terkait (seperti Dinas Pertanian, Dinas Perindustrian, maupun Dinas Koperasi dan UKM).

Pada tahap ini, proses validasi dilakukan melalui pengujian empiris berskala lapangan yang merepresentasikan kondisi nyata yang dihadapi oleh para petani cabai rawit. Fokus utama validasi difokuskan pada penyelesaian masalah endemik penyakit antraknosa yang merupakan salah satu faktor utama penyebab fluktuasi harga dan inflasi komoditas pangan. Pengujian komprehensif ini dibedah ke dalam tiga pilar validasi utama: keandalan teknis, ketangguhan operasional dan kelayakan investasi, serta kesesuaian integrasi birokrasi.

Selain pengujian teknis dan operasional, validasi implementasi ANTRAC 1.0 juga diperkuat melalui pendekatan institusional berupa kegiatan serah terima teknologi kepada pihak yang memiliki kapasitas akademik dan riset lanjutan. Dalam hal ini, tim pengembang yang dipimpin oleh Ridwan Siskandar, S.Si., M.Si. secara resmi melaksanakan serah terima unit robot ANTRAC 1.0 kepada Agricultural Technology Park (ATP) IPB University, Dramaga, Bogor sebagai mitra strategis dalam pengujian lanjutan, pengembangan teknologi, serta diseminasi inovasi di tingkat nasional.



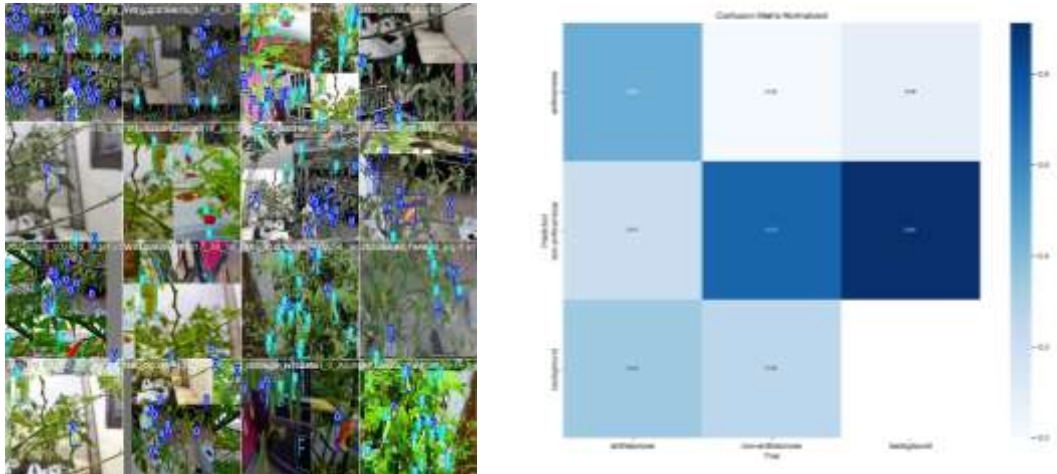
Gambar 12 Kegiatan serah terima robot ANTRAC 1.0 oleh tim pengembang kepada ATP IPB University sebagai bagian dari validasi institusional dan penguatan hilirisasi teknologi.

Kegiatan serah terima ini tidak hanya merepresentasikan alih teknologi secara simbolis, tetapi juga menjadi bagian dari mekanisme validasi eksternal (external validation) yang penting dalam memastikan bahwa ANTRAC 1.0 telah memenuhi standar kesiapan implementasi lintas institusi. Melalui keterlibatan ATP IPB sebagai pusat inovasi pertanian berbasis riset, diharapkan teknologi ini dapat diuji lebih lanjut dalam skala yang lebih luas, mendapatkan umpan balik berbasis keilmuan, serta mempercepat proses integrasi ke dalam ekosistem kebijakan dan program pembangunan pertanian nasional.

Dengan demikian, proses validasi ANTRAC 1.0 tidak hanya berhenti pada aspek teknis di tingkat lapangan, tetapi juga diperkuat melalui legitimasi kelembagaan yang mendukung keberlanjutan, replikasi, dan adopsi teknologi secara lebih sistematis dan masif.

4.2.1 Validasi Akurasi Deteksi Penyakit dan Keandalan Sistem Sensor:

Tahap pertama diarahkan untuk memberikan jaminan teknis kepada dinas bahwa sistem *Artificial Intelligence* (AI) yang tertanam pada arsitektur ANTRAC 1.0 mampu menjalankan fungsi mitigasi secara akurat, konsisten, dan responsif. Pengujian dilakukan dengan pendekatan simulasi bertingkat pada berbagai kondisi fisiologis tanaman, mulai dari fase vegetatif sehat hingga tanaman yang menunjukkan eskalasi serangan patogen antraknosa dari tingkat ringan hingga akut.



Gambar 13 Hasil deteksi penyakit (bounding box / labeling)

1. **Presisi Identifikasi dan Peran Sensorik:** Perangkat keras yang terdiri dari kamera resolusi tinggi, sensor lingkungan, dan mikrokontroler diuji stres (*stress-tested*) untuk memastikan sinkronisasi data. Data visual dan parameter lingkungan yang ditangkap harus memiliki tingkat presisi tinggi karena akan menjadi basis logika algoritma dalam menentukan intervensi lapangan baik berupa peringatan dini maupun rekomendasi penanganan langsung.
2. **Performa Sistem Pemrosesan Citra:** Hasil pengujian empiris membuktikan bahwa mesin *deep learning* pada ANTRAC 1.0 mampu mencapai tingkat akurasi sebesar 97,2% dengan presisi 97,8% dalam mendeteksi anomali gejala antraknosa. Konsistensi performa ini tetap terjaga meskipun alat dihadapkan pada kondisi visual yang dinamis. Kemampuan pemrosesan citra secara *real-time* ini memberikan lompatan efisiensi yang signifikan dibandingkan metode observasi manual (pancaindera) yang selama ini menjadi standar operasional penyuluh lapangan.

4.2.2 Validasi Kinerja Operasional di Lingkungan Pertanian:

Mengingat ANTRAC 1.0 dirancang sebagai robot pertanian otonom, tahap ini berfokus pada kemampuan alat untuk beroperasi secara stabil pada kondisi lahan yang nyata. Validasi mencakup kemampuan mobilitas robot dalam bergerak di antara barisan tanaman cabai, kestabilan sistem saat menghadapi variasi kontur tanah, serta keandalan perangkat dalam melakukan monitoring secara *real-time*. Tujuan utama dari tahap ini adalah memastikan bahwa teknologi dapat berfungsi optimal dalam kondisi lapangan

yang dinamis dan tidak ideal, sebagaimana yang umum terjadi pada lingkungan pertanian.

Pengujian difokuskan pada stabilitas sasis dan mobilitas navigasi robot saat menyusuri lorong antar barisan tanaman cabai. Alat harus mampu mempertahankan keseimbangan saat menghadapi variasi kontur tanah bedengan yang tidak rata. Selain itu, sensor optik dan sistem navigasi diuji di bawah tekanan variasi intensitas cahaya matahari, fluktuasi kelembaban nisbi udara, kepadatan tajuk tanaman, hingga perbedaan gradasi warna berdasarkan tingkat kematangan buah. Pendekatan ini memastikan bahwa ANTRAC 1.0 memiliki tingkat keterterapan (*applicability*) yang universal untuk berbagai tipologi lahan pertanian secara nasional.

1. Validasi Pengukuran Spasial dan Waktu Operasional

Dari segi efisiensi tenaga kerja, metrik operasional ANTRAC 1.0 terbukti mampu menjawab isu kelangkaan tenaga kerja pertanian (*aging farmer*).

- a. Dalam satu siklus baterai/daya, robot mampu beroperasi secara kontinu selama 4-6 jam.
- b. Daya jelajah alat mencapai cakupan lahan seluas $\pm 0,5$ hektar per hari.
- c. Kecepatan pemantauan stabil pada kisaran 50-75 meter jalur bedeng per jam.
- d. Seluruh data yang dikumpulkan selama pergerakan langsung diproses secara *real-time*, memangkas birokrasi pelaporan dari tingkat lahan ke tingkat manajerial dinas menjadi dalam hitungan detik.

4.2.3 Validasi Kesesuaian Integrasi Birokrasi (Pilar Kebijakan)

Pilar ketiga adalah memastikan bahwa operasional ANTRAC 1.0 sejalan dengan tata laksana birokrasi, sistem pelaporan, dan mekanisme pengadaan barang/jasa instansi pemerintah daerah. Validasi pada tahap ini dititikberatkan pada kemampuan *dashboard* sistem pelaporan robot untuk berintegrasi dengan pangkalan data pertanian daerah. Laporan sebaran penyakit (*heatmap*) yang dihasilkan secara otomatis oleh robot harus dapat dikonversi ke dalam format dokumen laporan standar yang dibutuhkan oleh Penyuluh Pertanian Lapangan (PPL) dan Dinas Pertanian untuk dikoordinasikan ke Kementerian Pertanian RI.

Selain itu, model skema pembiayaannya divalidasi agar memenuhi syarat spesifikasi teknis untuk dapat dimasukkan ke dalam mekanisme pengadaan barang dan jasa pemerintah daerah (e-Katalog LKPP). Ini meliputi:

1. **Sertifikasi TKDN (Tingkat Komponen Dalam Negeri):** Menghitung persentase komponen lokal sasis, motor, dan perakitan kustom PCB yang ditargetkan melampaui batas minimum 40% agar menjadi produk prioritas belanja pemerintah.
2. **Kesesuaian Kode Rekening Belanja APBD:** Memetakan pengadaan jasa sewa monitoring robot ini ke dalam nomenklatur belanja jasa pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) dinas daerah yang sah secara hukum keuangan negara.
3. **Penyusunan Kontrak Berbasis Performa (Performance-Based Contract):** Merumuskan indikator keberhasilan layanan (seperti jaminan respon servis kerusakan

mekanis 24 jam dan tingkat kegagalan deteksi 5% yang tertuang dalam dokumen pengadaan resmi guna melindungi akuntabilitas anggaran dinas terkait.

BAB V

VALIDASI KELAYAKAN FINANSIAL DAN EKONOMI

5.1 Estimasi Investasi Awal (CAPEX)

Sebuah teknologi hanya dapat diadopsi menjadi program pemerintah bersubsidi apabila memiliki justifikasi ekonomi yang rasional. Analisis kelayakan finansial dilakukan secara ketat dengan memproyeksikan struktur biaya modal (*Capital Expenditure* / CapEx) dan biaya operasional (*Operational Expenditure*/OpEx).

Kebutuhan investasi awal (*Capital Expenditure*/CAPEX) ANTRAC 1.0 terdiri atas tiga komponen utama: biaya riset dan pengembangan, biaya perizinan dan legalitas produk, serta biaya pengadaan mesin dan peralatan produksi. Pendekatan pengelompokan investasi awal ke dalam komponen CAPEX juga digunakan dalam evaluasi teknologi pertanian digital, di mana biaya perangkat keras, instalasi, integrasi, dan pengembangan sistem menjadi bagian penting dalam menentukan kebutuhan investasi awal (Vargas *et al.* 2024). Rincian setiap komponen disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 2 Estimasi Investasi Awal (CAPEX)

Komponen CAPEX	Rincian Utama	Jumlah Biaya (Rp)
Riset dan Pengembangan	Pengembangan desain & fitur (2026)	150.000.000
Perizinan dan Legalitas	Paten, merek, desain industri, hak cipta, NIB/KBLI, standar SNI IEC, e-Katalog, dll.	154.912.500
Peralatan Produksi	Milling & drilling, CNC plasma cutting, lemari & filing cabinet	106.000.000
TOTAL CAPEX		410.912.500

Komposisi Estimasi Investasi Awal (CAPEX)



Gambar 14 Komposisi Estimasi Investasi Awal (CAPEX)

Komponen perizinan dan legalitas menjadi porsi terbesar (37,7% dari total CAPEX), didorong terutama oleh kebutuhan pengujian laboratorium terakreditasi untuk empat standar SNI/IEC (keamanan elektrik IEC 62368-1, baterai IEC 62133-2, serta standar sistem kecerdasan buatan ISO/IEC 23053 dan tata kelola AI ISO/IEC 38507) yang secara kumulatif membutuhkan dana sekitar Rp120,7 juta. Struktur ini mencerminkan karakteristik ANTRAC 1.0 sebagai produk hibrida robotika-AI yang harus memenuhi standar kepatuhan lintas domain (keamanan elektronik, keselamatan baterai, dan tata kelola kecerdasan buatan) sebelum layak dipasarkan secara komersial maupun diajukan ke e-Katalog pemerintah.

5.2 Estimasi Biaya Operasional (OPEX) Tahun Pertama

Biaya operasional (*Operating Expenditure/OPEX*) tahun pertama terdiri atas empat komponen: biaya sumber daya manusia (SDM), biaya bahan baku dan utilitas produksi, biaya fasilitas dan peralatan penunjang, serta biaya program go-to-market (Vahdanjoo *et al.* 2023) . Rincian keempat komponen disajikan pada Tabel .

Tabel 3 Estimasi Biaya Operasional (OPEX) Tahun Pertama

Komponen OPEX	Rincian Utama	Jumlah Biaya (Rp)
Biaya SDM	11 posisi struktural (Dewan Pengawas s.d. Accounting & Administration)	902.850.000
Bahan Baku & Utilitas	Komponen mekanik, elektronik, dan AI (8× siklus pembelian minimum)	85.535.040
Fasilitas & Peralatan Penunjang	Sewa laboratorium/workshop/gudang/kantor (24×6m) + ekspansi workshop	140.000.000
Biaya Go to Market	Pilot 5 provinsi, awareness, distribusi, partnership ASEAN, digital marketing, ANTRAC Academy, after-sales, dashboard cloud	790.000.000
TOTAL OPEX TAHUN 1		1.918.385.040



Gambar 15 Komposisi Biaya Operasional (OPEX) Tahun Pertama

Struktur OPEX tahun pertama didominasi oleh biaya SDM (47,1%) dan biaya go-to-market (41,2%), yang secara kumulatif mencapai 88,3% dari total OPEX. Dominasi ini merupakan konsekuensi logis dari model bisnis RaaS yang bertumpu pada tim operasional penuh (bukan sekadar produksi unit) serta kebutuhan investasi pemasaran dan validasi lapangan di lima provinsi pada tahun peluncuran, sebuah pola pengeluaran yang lazim pada fase go-to-market startup teknologi tahap awal, namun berimplikasi pada tingginya biaya tetap yang harus ditutup pendapatan.

Tabel 4 Dekomposisi Struktur Investasi

Komponen Anggaran	Nilai Nominal (Rp)	Persentase	Peruntukan Utama
CapEx (<i>Capital Expenditure</i>)	410.912.500	17,6%	Pengadaan perangkat keras robot, sensor, dan infrastruktur komputasi awal.
OpEx (<i>Operational Expenditure</i>)	1.918.385.040	82,4%	Estimasi biaya tahun pertama untuk pemeliharaan, server, dan operasional lapangan.

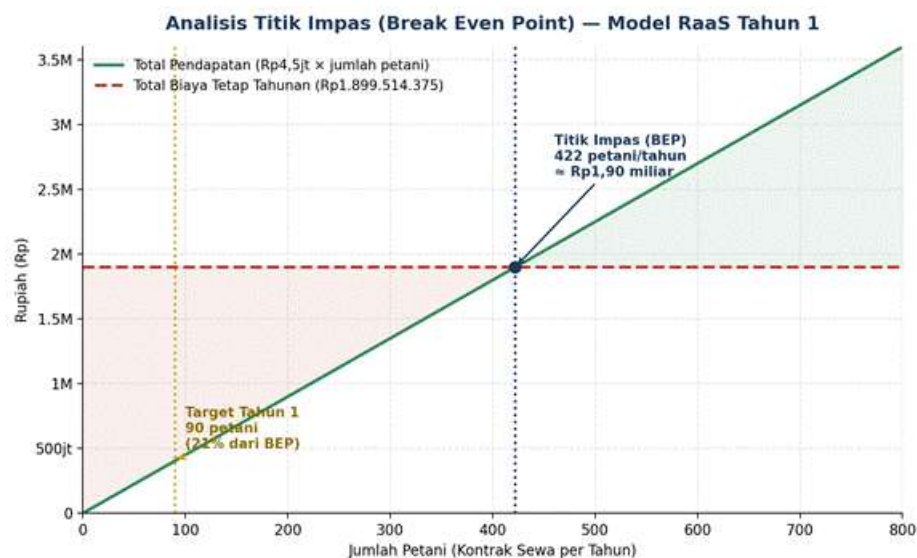
Total kebutuhan investasi untuk adopsi teknologi ini berada di angka Rp 2.329.297.540. Nilai ini merupakan akumulasi dari CapEx sebesar Rp 410.912.500 (untuk pengadaan perangkat keras robot, sensor, dan infrastruktur komputasi awal) serta estimasi OpEx tahun pertama sebesar Rp 1.918.385.040 (mencakup biaya pemeliharaan, server, dan operasional lapangan).

5.3 Analisis Titik Impas (Break Even Point)

Analisis Break Even Point (BEP) menghitung jumlah petani minimum yang harus terlayani agar total pendapatan tahunan setara dengan total biaya tetap tahunan (kondisi impas), dengan formula $BEP \text{ (jumlah petani)} = \text{Total Biaya Tetap} \div \text{Pendapatan per Petani per Tahun}$. *Break Even Point* merupakan salah satu indikator yang umum digunakan dalam analisis kelayakan finansial bersama NPV, IRR, *Payback Period*, dan *Profitability Index* untuk mengevaluasi kelayakan suatu usaha atau investasi (Mushaf Al Ramadhani *et al.* 2024). Perhitungan didasarkan pada struktur biaya Tahun 1, sebagaimana disajikan pada tabel 5.

Tabel 5 Perhitungan Break Even Point (BEP) Tahun 1

Komponen	Nilai (Rp)
Biaya SDM	902.850.000
Biaya Fasilitas	140.000.000
Biaya Go to Market	790.000.000
Amortisasi & Depresiasi	66.664.375
Total Biaya Tetap per Tahun	1.899.514.375
Pendapatan per Petani per Tahun	4.500.000
BEP (Jumlah Petani)	422 Petani/tahun
BEP (Rupiah)	1.899.000.000 / tahun
Target Petani Tahun 1	90 Petani ($\approx 21\%$ dari BEP)



Hasil perhitungan $BEP = Rp1.899.514.375 \div Rp4.500.000 = 422,11$, dibulatkan menjadi 422 petani per tahun, setara sekitar Rp1,899 miliar pendapatan per tahun. Target akuisisi Tahun 1 sebesar 90 petani berada jauh di bawah ambang impas-hanya sekitar 21% dari kebutuhan BEP, sehingga pada tahun pertama operasional, pendapatan yang dihasilkan belum memadai untuk menutup biaya tetap tahunan secara penuh. Temuan ini konsisten dengan proyeksi laba rugi pada Subbab 5.6 yang menunjukkan kerugian pada empat tahun pertama, dan menegaskan bahwa keberhasilan ANTRAC 1.0 pada fase awal sangat bergantung pada kecepatan akuisisi pelanggan menuju titik impas, bukan semata pada validitas model bisnis jangka panjang.

5.4 Sintesis Kelayakan dan Rekomendasi Strategis

Secara keseluruhan, ANTRAC 1.0 menunjukkan kelayakan finansial yang kuat dengan NPV sebesar Rp2,63 miliar, IRR 21,51% yang melampaui *hurdle rate* 12%, serta PI sebesar 4,69. Selain itu, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa proyek tetap memiliki NPV positif bahkan dalam skenario pesimis, dengan toleransi penurunan hingga sekitar 52,5% dari asumsi dasar.

Namun, dari sisi operasional, BEP sebesar 422 petani per tahun masih jauh di atas target awal, sehingga proyek diproyeksikan mengalami kerugian pada fase awal hingga mencapai skala ekonomi pada Tahun 5. Hal ini sejalan dengan karakter investasi jangka menengah-panjang, yang tercermin dari *Payback Period* sekitar 7,01 tahun dan *Discounted Payback Period* sekitar 8,20 tahun

Oleh karena itu, diperlukan strategi percepatan akuisisi pengguna, penerapan harga sewa yang adaptif, serta pengendalian biaya pada fase awal. Dengan mempertimbangkan seluruh indikator dan analisis yang dilakukan, ANTRAC 1.0 dinyatakan layak untuk dilanjutkan ke tahap hilirisasi dengan fokus pada percepatan skala operasional dan keberlanjutan finansial.

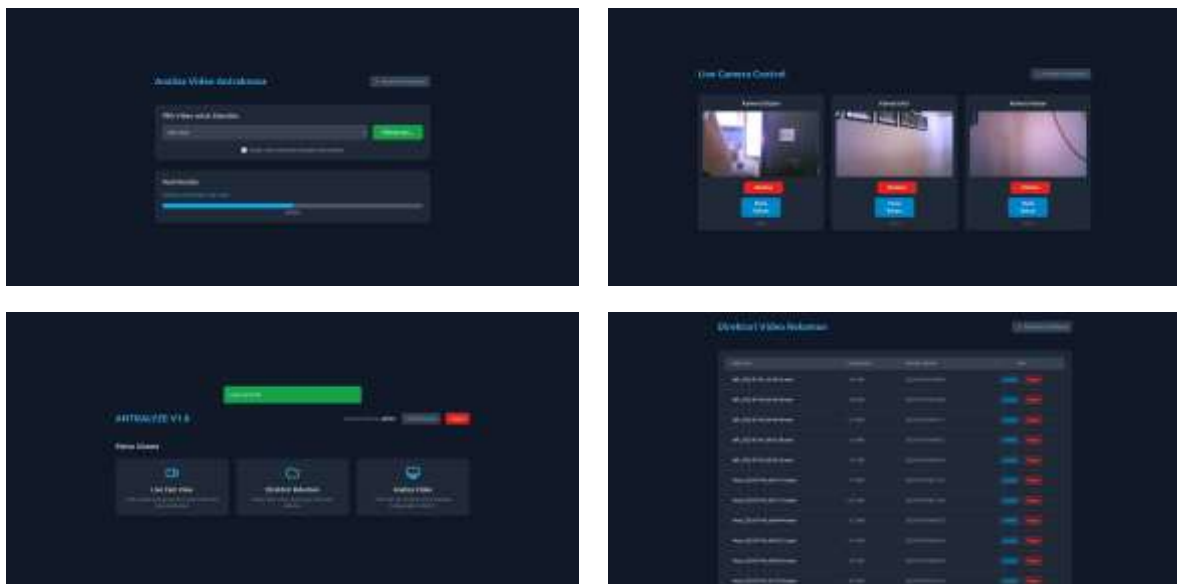
BAB VI

STRATEGI HILIRISASI DAN REPLIKASI BISNIS

6.1 Validasi Kesesuaian dengan Sistem Kerja Dinas dan Pengguna Akhir:

Teknologi tercanggih sekalipun akan gagal diimplementasikan jika terjadi resistensi dari penggunanya. Oleh karena itu, validasi tahap akhir menilai kesesuaian ergonomi perangkat lunak dan harmonisasi sistem dengan struktur birokrasi yang ada.

1. **Pendekatan *Human-Centered Technology*:** Desain antarmuka pengguna (UI/UX) ANTRAC 1.0 dibangun dengan mempertimbangkan literasi digital petani lokal. Pendekatan yang berorientasi pada pengguna menjadi faktor penting dalam pengembangan teknologi pertanian digital karena tingkat kesiapan, literasi teknologi, dan persepsi pengguna dapat menentukan keberhasilan implementasi inovasi (Strong *et al.* 2022). Sistem ini memastikan bahwa Penyuluh Pertanian Lapangan (PPL) dan ketua kelompok tani dapat mengoperasikan unit lunak maupun keras tanpa membutuhkan latar belakang pemrograman. Kurva pembelajaran (*learning curve*) ditekan seminimal mungkin, di mana penguasaan alat hanya memerlukan masa orientasi dan pelatihan selama **1-2 hari**.



Gambar 17 Desain Antarmuka Web Interface ANTRAC

2. **Integrasi Infrastruktur Data Nasional:** Nilai jual strategis dari ANTRAC 1.0 di mata birokrasi adalah arsitektur datanya. Format keluaran data (laporan luasan infeksi, peta sebaran hama, dan status lahan) telah dirancang agar kompatibel penuh dengan **Sistem Informasi Manajemen Tanaman (SIMTAN)** milik Kementerian Pertanian. Kemampuan *Application Programming Interface* (API) ini membuka peluang otomatisasi pengiriman data lapangan ke pusat komando dinas secara nirkabel, memperkuat ekosistem *Big Data* pertanian nasional yang akuntabel dan presisi.

6.2 Strategi Adopsi Institusional

Keberhasilan hilirisasi ANTRAC 1.0 tidak semata ditentukan oleh kecanggihan teknologinya, melainkan oleh sejauh mana teknologi ini dapat diterima, digunakan, dan dipertahankan oleh aktor-aktor kelembagaan yang menjadi tulang punggung sistem pertanian nasional. Penelitian difusi inovasi teknologi di sektor pertanian menunjukkan bahwa resistensi awal pengguna adalah hambatan terbesar adopsi dan bukan keterbatasan teknologi itu sendiri (Gil *et al.* 2023). Strategi adopsi ANTRAC 1.0 dirancang secara eksplisit untuk mengatasi hambatan psikologis dan sosial tersebut. Oleh karena itu, strategi adopsi institusional dirancang secara bertahap, sistematis, dan berkelanjutan melalui empat fase utama sebagai berikut:

Tabel 6. Strategi Adopsi Institusional

Tahap	Kegiatan Utama	Sasaran
Pengenalan dan Sosialisasi	Sosialisasi, demonstrasi lapangan	Dinas Pertanian, PPL, Kelompok Tani
Pelatihan dan Penguatan Kapasitas	Pelatihan operasional dan interpretasi data	Operator dan Penyuluh
Pendampingan Implementasi	Monitoring dan asistensi lapangan	Pengguna awal
Penguatan Kelembagaan	SOP, regulasi, integrasi program	Pemerintah daerah

6.2.1 Pengenaan dan Sosialisasi

Langkah pertama adalah memastikan bahwa para pemangku kepentingan utama memahami esensi dan manfaat ANTRAC 1.0 sebelum teknologi ini diperkenalkan secara luas. Pada tahap ini, diseminasi dilakukan melalui *briefing* resmi kepada aparat dinas pertanian dan satuan kerja perangkat daerah (SKPD) terkait, yang mencakup penjelasan tentang mekanisme kerja robot, potensi efisiensi biaya pestisida, dan peningkatan produktivitas cabai rawit.

Hasil validasi menunjukkan bahwa ANTRAC 1.0 memiliki tingkat akurasi deteksi yang tinggi sehingga berpotensi mendukung proses identifikasi penyakit secara lebih cepat dan konsisten dibandingkan pengamatan manual, yaitu mencapai 97,2%, yang secara signifikan lebih konsisten dibandingkan metode observasi manual yang cenderung subjektif. Dengan kemampuan deteksi *real-time*, teknologi ini memungkinkan intervensi lebih dini terhadap serangan penyakit, sehingga berpotensi menurunkan tingkat kerusakan tanaman dan mengurangi penggunaan pestisida secara berlebihan.

Demonstrasi lapangan dilaksanakan langsung di lahan petani untuk menciptakan pengalaman nyata yang tidak bisa digantikan oleh paparan teoretis semata. Pendekatan ini terbukti efektif dalam menurunkan resistensi awal terhadap teknologi baru. Seluruh materi sosialisasi disusun dalam bahasa yang mudah dipahami,

dilengkapi dengan infografis, video pendek, dan panduan bergambar agar dapat menjangkau petani yang belum terbiasa dengan literasi digital.

Dari sisi ekonomi pengguna, model layanan ANTRAC 1.0 dirancang agar tetap terjangkau, dengan biaya penggunaan sekitar Rp 4.500.000 per tahun per petani. Nilai ini sebanding dengan potensi pengurangan kerugian akibat penyakit antraknosa serta efisiensi penggunaan pestisida.

Pendekatan ini memungkinkan petani memperoleh manfaat teknologi tanpa harus melakukan investasi besar di awal, sehingga mempercepat tingkat adopsi di lapangan.

Dalam rangka mempercepat penerimaan pengguna, strategi adopsi juga perlu memperhatikan faktor psikologis dan kebiasaan kerja petani maupun aparatur lapangan. Sebagian pengguna cenderung lebih percaya pada metode konvensional yang telah lama digunakan. Oleh karena itu, pendekatan demonstrasi hasil nyata, pendampingan langsung di lapangan, serta penyajian manfaat ekonomi yang mudah dipahami menjadi strategi penting untuk menurunkan resistensi terhadap teknologi baru. Keberhasilan adopsi ANTRAC 1.0 sangat dipengaruhi oleh kemampuan menunjukkan manfaat nyata secara langsung kepada pengguna.

6.2.2 Pelatihan dan Penguatan Kapasitas

Setelah kesadaran terbentuk, strategi beralih ke pembangunan kapasitas nyata. Pelatihan dibagi menjadi dua jalur yang berjalan secara bersamaan. Jalur teknis ditujukan kepada penyuluh pertanian lapangan dan operator terpilih. Materi mencakup cara mengoperasikan ANTRAC 1.0, membaca dan menginterpretasi data deteksi yang dihasilkan sistem AI, serta menentukan tindak lanjut intervensi yang tepat berdasarkan temuan robot di lapangan.

Jalur non-teknis menyoar aparat dinas dan koordinator kelompok tani. Fokusnya adalah manajemen data lapangan, penyusunan laporan berbasis bukti, dan koordinasi antar lembaga agar informasi dari ANTRAC 1.0 dapat mengalir secara efektif ke dalam rantai pengambilan keputusan. Di samping kedua jalur tersebut, upaya perubahan pola pikir dilakukan secara paralel melalui pendekatan berbasis bukti: menampilkan studi kasus keberhasilan, testimoni petani awal pengguna, serta narasi komparatif antara praktik konvensional dan pendekatan berbasis teknologi presisi.

6.2.3 Pendampingan dan Implementasi Aktif

Pelatihan tanpa pendampingan akan kehilangan dampaknya di lapangan. Oleh karena itu, fase ini menempatkan tim teknis secara langsung bersama para penyuluh selama masa implementasi awal, memastikan bahwa setiap kendala teknis maupun prosedural dapat diatasi secara cepat dan tepat sasaran.

Mekanisme monitoring berkala dijalankan untuk mengevaluasi tingkat penggunaan, mengidentifikasi hambatan adopsi yang muncul, dan menyesuaikan strategi intervensi jika diperlukan. Pada saat yang bersamaan, jaringan pengguna antarwilayah dibangun sebagai forum berbagi pengalaman dan praktik terbaik, sehingga pembelajaran tidak bersifat *silo* melainkan menyebar secara organik antar daerah.

6.2.4 Penguatan Kelembagaan dan Keberlanjutan

Adopsi teknologi hanya akan bertahan jika didukung oleh fondasi kelembagaan yang kuat. Pada fase ini, regulasi pendukung disiapkan dalam bentuk Standar Operasional Prosedur (SOP), petunjuk pelaksanaan teknis, dan kebijakan daerah yang mengakui penggunaan ANTRAC 1.0 sebagai bagian dari sistem pertanian resmi.

ANTRAC 1.0 juga diintegrasikan ke dalam program ketahanan pangan yang telah berjalan di tingkat pusat, sehingga adopsinya tidak berdiri sendiri melainkan menjadi bagian dari ekosistem kebijakan yang lebih besar. Keberhasilan keseluruhan fase ini diukur melalui indikator yang terukur: jumlah lembaga yang telah mengadopsi teknologi, tingkat pengurangan kerugian panen akibat antraknosa, dan peningkatan produktivitas cabai rawit di wilayah implementasi.

6.3 Integrasi Inovasi dalam Program dan Kegiatan Dinas

Hilirisasi teknologi tidak dapat berdiri sendiri sebagai entitas yang terpisah dari ekosistem pemerintahan. Agar ANTRAC 1.0, yang merupakan robot pertanian otonom cerdas berbasis *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), dan mikrokontroler, dapat dieksekusi secara berkelanjutan, inovasi ini harus diterjemahkan ke dalam bahasa birokrasi dan diintegrasikan ke dalam siklus perencanaan instansi terkait. Subbab ini menguraikan strategi pelekatan operasional ANTRAC 1.0 ke dalam nomenklatur program, penyelarasan dengan target kinerja, serta mekanisme penganggaran yang sejalan dengan regulasi keuangan daerah.

6.3.1 Pemetaan ke dalam Nomenklatur Program dan Kegiatan

Langkah fundamental dalam adopsi institusional adalah memastikan ANTRAC 1.0 memiliki "rumah" di dalam struktur program dinas. Berdasarkan pedoman klasifikasi dan kodifikasi program pemerintah, implementasi robotik dan *Smart Farming* ini tidak memerlukan pembentukan program baru, melainkan disisipkan ke dalam program yang sudah eksis. Secara spesifik, pengadaan layanan ANTRAC 1.0 dapat diintegrasikan pada "Program Penyediaan dan Pengembangan Prasarana Pertanian" dan "Kegiatan Pengendalian Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT)" yang sangat relevan untuk ditujukan pada segmen kelembagaan petani seperti Gapoktan, Koperasi, atau BUMDes. Dengan pendekatan ini, inovasi sistem yang mengintegrasikan robot deteksi visual dengan stasiun mesin aplikator otomatis untuk *spot-treatment* (intervensi titik spesifik) langsung memiliki basis legalitas operasional di lapangan.

6.3.2 Sinkronisasi dengan Indikator Kinerja Utama (IKU)

Setiap instansi pemerintah digerakkan oleh pencapaian Indikator Kinerja Utama (IKU) tahunan. Implementasi ANTRAC 1.0 diposisikan sebagai tuas pengungkit (*leverage*) untuk mempercepat pencapaian target IKU Dinas Pertanian. Melalui modul *computer vision* yang digerakkan oleh algoritma *Deep Learning* (CNN dengan model YOLO), robot ini mampu memberikan deteksi dini antraknosa secara presisi dengan tingkat akurasi 97,2% dan tingkat presisi 97,8%. Mengingat penyakit antraknosa (patek) merupakan ancaman utama yang dapat mengakibatkan gagal panen cabai rawit secara masif hingga 50-70%, dinas dapat menekan angka persentase gagal panen secara

terukur. Penurunan tingkat kerusakan lahan ini secara langsung akan berkontribusi pada dua IKU strategis, yaitu: peningkatan persentase volume produksi komoditas hortikultura (cabai rawit) daerah, dan peningkatan Nilai Tukar Petani (NTP) akibat efisiensi signifikan dalam penggunaan pestisida berkat intervensi *spot-treatment* otomatis.

6.3.3 Skenario Penganggaran dan Eksekusi DPA

Untuk memastikan ketersediaan dana, skema bisnis *Robot-as-a-Service* (RaaS) ANTRAC 1.0 harus dikawal mulai dari tahap perencanaan makro hingga mikro. Model monetisasi berupa layanan berlangganan ini dinilai sebagai pendekatan yang paling realistis dan mudah diterima oleh pasar. Visi digitalisasi pertanian ini pertama-tama dimasukkan ke dalam Rencana Strategis (Renstra) lima tahunan Dinas. Selanjutnya, target luasan lahan yang akan diintervensi robot diturunkan ke dalam Rencana Kerja (Renja) tahunan. Pada tahap eksekusi, pembiayaan layanan RaaS dengan tarif ideal sebesar Rp300.000 per hektar per musim tanam dialokasikan secara resmi melalui Dokumen Pelaksanaan Anggaran (DPA) pada pos Belanja Barang dan Jasa, sehingga penyerapan anggaran menjadi sah dan akuntabel. Pengalokasian dana ini juga sangat dapat dijustifikasi di mata pembuat kebijakan mengingat proyek ini memiliki *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 21,51% dan *Profitability Index* (PI) di angka 4,69.

6.3.4 Integrasi dengan Kemitraan Strategis Non-Pemerintah

Penguatan implementasi ANTRAC 1.0 juga dapat didorong melalui kemitraan strategis dengan pihak non-pemerintah. Bentuk kemitraan tersebut dapat melibatkan koperasi tani, gabungan kelompok tani, dunia usaha sektor pertanian, distributor sarana produksi pertanian, lembaga keuangan, maupun perusahaan yang memiliki program tanggung jawab sosial. Sinergi ini penting untuk memperluas akses pembiayaan, mempercepat adopsi teknologi, serta menciptakan model implementasi yang lebih fleksibel dan berkelanjutan.

6.3.5 Pilot Project Percontohan Nasional

Sebelum direplikasi secara luas, ANTRAC 1.0 perlu membuktikan dampaknya melalui program percontohan yang terstruktur. Wilayah yang dipilih sebagai lokasi *pilot project* adalah daerah yang secara historis memiliki tingkat serangan antraknosa tinggi, sehingga perbedaan dampak sebelum dan sesudah adopsi teknologi dapat terukur secara signifikan.

Pengukuran dampak dilakukan melalui komparasi data produktivitas secara kuantitatif, mencakup penurunan persentase kerusakan buah, efisiensi penggunaan pestisida, dan peningkatan pendapatan petani. Hasil dari *pilot project* ini kemudian menjadi rujukan resmi bagi replikasi nasional, memberikan dasar empiris yang kuat kepada kementerian untuk mengalokasikan anggaran dan memperluas program ke wilayah-wilayah lain di seluruh Indonesia.

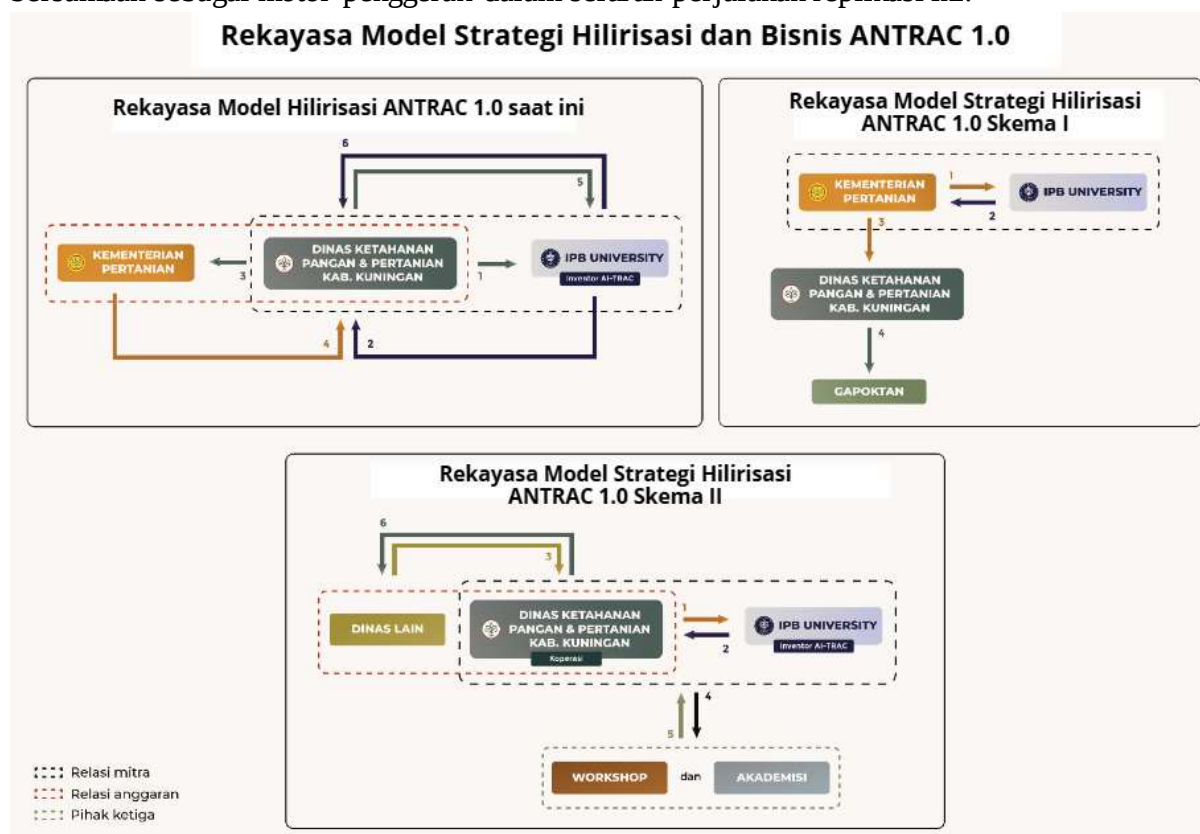
Pelaksanaan *pilot project* juga berfungsi sebagai dasar penyusunan standar operasional nasional dalam pemanfaatan teknologi robotik pertanian pada komoditas hortikultura. Hasil evaluasi dari lokasi percontohan dapat menjadi acuan dalam penyusunan pedoman teknis, model pembinaan SDM, standar pemeliharaan alat, serta

mekanisme integrasi data ke sistem informasi pertanian nasional. Dengan demikian, *pilot project* tidak hanya menghasilkan pembuktian manfaat, tetapi juga menjadi fondasi replikasi yang lebih sistematis.

6.4 Strategi Replikasi dan Difusi Inovasi

Keberhasilan sebuah inovasi tidak diukur dari seberapa canggih teknologinya, melainkan dari seberapa luas ia dapat menjangkau mereka yang membutuhkan. Replikasi teknologi pertanian presisi membutuhkan dukungan ekosistem yang mencakup peningkatan kapasitas pengguna, dukungan kelembagaan, serta kebijakan yang mampu mempercepat penyebaran inovasi (Khaspuria *et al.* 2024).

Oleh karena itu, strategi replikasi dan difusi ANTRAC 1.0 dirancang untuk bergerak secara bertahap dan terstruktur melalui tiga fase, yaitu fase eksisting (saat ini), Skema I (terpusat), dan Skema II (mandiri dan terdesentralisasi). Tiga aktor utama penyuluh pertanian lapangan, dinas pertanian kabupaten/kota, dan Kementerian Pertanian berperan secara bersamaan sebagai motor penggerak dalam seluruh perjalanan replikasi ini.



Gambar 18 Skema Hilirisasi ANTRAC 1.0

1. Kondisi Eksisting: Fase Inkubasi dan Kolaborasi Timbal Balik

Model "saat ini" menggambarkan tahapan awal di mana teknologi masih dalam proses validasi atau *proof of concept*. Pada fase ini, pola komunikasinya sangat padat dan bersifat dua arah (tercermin dari perputaran panah 1 hingga 6). IPB University sebagai pencipta teknologi bekerja berdampingan dengan Dinas Ketahanan Pangan & Pertanian Kabupaten Kuningan untuk menguji alat langsung di lapangan. Di sisi lain, Kementerian Pertanian memposisikan diri sebagai payung

pelindung yang menyokong pendanaan serta membukakan jalan birokrasi. Pola interaksi yang saling tumpang tindih ini memang sengaja dibangun untuk mencari racikan *product-market fit* yang paling pas, di mana *feedback* dari dinas bisa langsung direspons oleh kampus sebelum teknologi diproduksi massal.

2. Skema I: Pendekatan Terpusat (*Top-Down*) untuk *Pilot Project*

Ketika teknologi sudah terbukti stabil, strategi bergeser ke Skema I. Pola kerjanya berubah menjadi lebih rapi dan instruksional dari atas ke bawah (*top-down*). Kementerian Pertanian memegang kendali penuh atas arah kebijakan dan aliran anggaran. Secara praktis, Kementan menunjuk IPB University untuk menyediakan unit ANTRAC 1.0, lalu menginstruksikan Dinas Kabupaten Kuningan agar menyalurkan layanan tersebut langsung ke sasaran akhir, yakni Gabungan Kelompok Tani (Gapoktan). Keuntungan utama dari Skema I adalah kemudahan dalam mengontrol standar mutu operasional dan pengawasan dana. Skema ini sangat ideal diterapkan pada masa-masa awal replikasi nasional karena seluruh komando berada di satu pintu, sehingga risiko melencengnya program di lapangan sangat minim.

3. Skema II: Jejaring Hub-Inovasi dan Kemandirian Ekosistem

Skema II merupakan bentuk paling matang dari komersialisasi ANTRAC 1.0. Arsitektur bisnisnya tidak lagi menggantungkan diri secara vertikal pada anggaran pemerintah pusat, tetapi bertumpu pada kekuatan jejaring daerah dan skema *Business-to-Government* (B2G). Dalam rancangan ini, Dinas Kabupaten Kuningan "naik kelas" dari sekadar operator menjadi simpul utama (*innovation hub*), yang secara legal dapat difasilitasi lewat kelembagaan seperti koperasi.

Jika ada wilayah lain ("Dinas Lain") yang tertarik mengadopsi robot ini, mereka tidak perlu lagi meminta persetujuan panjang ke Jakarta. Mereka cukup menjalin kemitraan pengadaan secara lateral dengan hub di Kuningan atau langsung dengan IPB University. Menariknya, Skema II juga mulai menggandeng aktor di luar pemerintahan, yakni *workshop* (bengkel manufaktur lokal) dan kalangan akademisi (ditandai dengan panah hijau di bagian bawah). Pelibatan pihak ketiga ini sangat krusial untuk mengambil alih urusan perakitan komponen dan layanan purnajual (*maintenance*). Beban kerja kampus menjadi jauh lebih ringan, industri lokal ikut tumbuh, dan pada akhirnya, ekosistem ANTRAC 1.0 bisa hidup secara organik tanpa harus menunggu subsidi APBN terus-menerus.

6.5 Institusionalisasi dan Keberlanjutan Program

Institusionalisasi merupakan fase krusial dalam hilirisasi, yaitu saat ANTRAC 1.0 tidak lagi diposisikan sebagai inovasi uji coba, melainkan telah menjadi bagian dari praktik operasional yang diakui dalam sistem pertanian modern. Pada tahap ini, keberlangsungan program tidak bergantung pada proyek atau tim pengembang semata, tetapi telah tertanam dalam mekanisme kerja dan kebijakan pemerintah di sektor pertanian.

6.5.1 Penguatan Aspek Legal dan Kelembagaan

Agar implementasi ANTRAC 1.0 berjalan secara berkelanjutan, diperlukan dukungan kelembagaan yang memberikan kepastian dalam pengelolaan dan pemanfaatan teknologi. Kejelasan aspek legal menjadi penting untuk memastikan bahwa seluruh pihak, baik pemerintah daerah maupun mitra terkait, memiliki landasan yang kuat dalam mengadopsi dan mengembangkan teknologi ini.

Pengelolaan inovasi dilakukan melalui mekanisme kelembagaan yang mampu menjembatani antara pengembang teknologi dan pengguna di lapangan. Dalam hal ini, peran kelembagaan mencakup pengaturan kerja sama, pengawasan implementasi, serta dukungan terhadap proses pengadaan. Dengan struktur yang jelas, risiko hambatan administratif maupun hukum dapat diminimalkan, sehingga proses hilirisasi berjalan lebih stabil.

6.5.2 Sistem Pemeliharaan dan Dukungan Operasional

Keberlanjutan penggunaan ANTRAC 1.0 sangat dipengaruhi oleh tersedianya sistem pemeliharaan yang terencana. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme pemeriksaan berkala, penggantian komponen yang aus, pembaruan perangkat lunak, serta dukungan teknis apabila terjadi gangguan operasional di lapangan. Pemerintah daerah dapat mendorong pembentukan unit layanan teknis atau menunjuk mitra resmi yang bertanggung jawab terhadap pemeliharaan alat. Dengan adanya dukungan operasional yang jelas, ANTRAC 1.0 dapat digunakan secara optimal dalam jangka panjang.

6.5.3 Integrasi ke dalam Sistem Perencanaan Pemerintah

Keberlanjutan ANTRAC 1.0 sangat ditentukan oleh kemampuannya untuk masuk ke dalam siklus perencanaan program pemerintah. Oleh karena itu, strategi yang dilakukan adalah mendorong agar pemanfaatan teknologi ini menjadi bagian dari dokumen perencanaan resmi, seperti rencana kerja tahunan dan rencana strategis perangkat daerah.

Melalui integrasi ini, ANTRAC 1.0 tidak lagi bergantung pada program yang bersifat sementara, tetapi menjadi bagian dari agenda pembangunan pertanian yang terstruktur. Hal ini juga membuka peluang akses pendanaan yang lebih luas, baik dari pemerintah pusat melalui program bantuan alat pertanian, maupun dari sumber pendanaan lain yang relevan dengan pengembangan pertanian berbasis teknologi.

Pendekatan ini memperkuat posisi ANTRAC 1.0 sebagai program yang direncanakan secara sistematis, bukan sekadar inisiatif inovatif yang bersifat insidental.

6.5.4 Sistem Operasional dan Penguatan Kapasitas Pengguna

Keberhasilan jangka panjang ANTRAC 1.0 tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan alat, tetapi juga oleh kemampuan pengguna dalam mengoperasikannya secara optimal. Oleh karena itu, dibangun mekanisme operasional berbasis kolaborasi antara dinas, gapoktan, dan petani.

Dinas berperan dalam memberikan pelatihan awal kepada gapoktan, yang selanjutnya bertanggung jawab dalam mendiseminasikan pengetahuan kepada petani. Selain itu, gapoktan juga menjalankan fungsi monitoring dan evaluasi penggunaan

teknologi di tingkat lapangan. Pola ini menciptakan sistem pembelajaran berjenjang yang memungkinkan peningkatan kapasitas secara berkelanjutan.

Dengan adanya distribusi peran yang jelas, operasional ANTRAC 1.0 tidak sepenuhnya bergantung pada intervensi pemerintah, melainkan didukung oleh kelembagaan lokal yang aktif dan mandiri.

6.5.5 Dukungan Kebijakan sebagai Penguat Implementasi

Untuk memperkuat keberlanjutan, diperlukan dukungan kebijakan yang mendorong pemanfaatan teknologi dalam sektor pertanian. Pemerintah daerah dapat menginisiasi kebijakan yang mendorong penerapan pertanian berbasis teknologi, termasuk penggunaan ANTRAC 1.0 dalam program-program yang relevan.

Kehadiran kebijakan ini tidak hanya memberikan arah yang jelas dalam implementasi, tetapi juga menjadi instrumen untuk meningkatkan adopsi teknologi secara lebih luas. Selain itu, kebijakan tersebut dapat menjadi dasar bagi pengembangan inovasi lanjutan serta membuka peluang kolaborasi dengan berbagai pihak.

Melalui penguatan kelembagaan, integrasi dalam perencanaan, sistem operasional yang berkelanjutan, serta dukungan kebijakan yang memadai, ANTRAC 1.0 memiliki potensi untuk berkembang dari sebuah inovasi menjadi bagian integral dalam sistem pertanian modern. Pendekatan ini memastikan bahwa manfaat teknologi tidak hanya dirasakan dalam jangka pendek, tetapi juga memberikan kontribusi berkelanjutan terhadap peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan.

Selain kebijakan daerah, dukungan lintas sektor juga penting untuk mempercepat penguatan ekosistem teknologi pertanian. Sinergi antara sektor pertanian, pendidikan tinggi, riset, industri, dan pembiayaan akan memperkuat posisi ANTRAC 1.0 sebagai inovasi nasional yang tidak hanya berorientasi pada penggunaan alat, tetapi juga pengembangan kapasitas SDM, peningkatan industri dalam negeri, dan penguatan daya saing sektor pertanian Indonesia.

6.6 Indikator Keberhasilan Hilirisasi

Indikator keberhasilan hilirisasi ANTRAC 1.0 dirancang sebagai alat ukur untuk menilai sejauh mana inovasi yang dikembangkan mampu diimplementasikan secara efektif, diadopsi oleh pengguna, serta memberikan dampak nyata dalam sistem pertanian. Pengukuran ini mencakup lima aspek utama, yaitu adopsi teknologi, kelembagaan, dampak lapangan, replikasi, dan keberlanjutan program.

6.6.1 Adopsi Teknologi

Keberhasilan dari sisi adopsi ditunjukkan oleh kemampuan ANTRAC 1.0 untuk digunakan secara aktif oleh petani dalam kegiatan budidaya sehari-hari. Indikator ini tidak hanya dilihat dari jumlah alat yang disalurkan kepada kelompok tani, tetapi juga dari tingkat pemanfaatannya secara berkelanjutan. Teknologi dikatakan berhasil diadopsi apabila digunakan secara rutin, tidak bersifat musiman, serta mampu menjangkau lebih banyak kelompok tani secara bertahap.

6.6.2 Keterlibatan Kelembagaan

Pada aspek kelembagaan, indikator keberhasilan tercermin dari keterlibatan aktif dinas dan gapoktan dalam mendukung implementasi teknologi. Dinas berperan dalam proses distribusi dan pelatihan awal, sementara gapoktan mengambil peran dalam pendampingan, transfer pengetahuan, serta evaluasi penggunaan di tingkat petani. Keberhasilan pada aspek ini ditandai dengan berjalannya mekanisme pelatihan berjenjang dan sistem evaluasi yang dilakukan secara mandiri di tingkat lapangan.

6.6.3 Dampak Lapangan

Dari sisi dampak, keberhasilan hilirisasi ANTRAC 1.0 diukur berdasarkan kemampuannya dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan tanaman cabai rawit. Hal ini meliputi kemudahan dalam mendeteksi penyakit antraknosa secara lebih dini, pengurangan risiko kerusakan tanaman, serta peningkatan hasil panen. Efisiensi penggunaan pestisida juga menjadi indikator penting sebagai bentuk pergeseran dari pendekatan konvensional menuju pertanian yang lebih presisi dan berbasis data.

Dengan tingkat akurasi deteksi sebesar 97,2%, ANTRAC 1.0 mampu meningkatkan efektivitas deteksi dini penyakit antraknosa secara signifikan. Hal ini berdampak langsung pada penurunan potensi kerusakan tanaman, peningkatan kualitas hasil panen, serta efisiensi dalam penggunaan pestisida melalui intervensi yang lebih tepat sasaran dan berbasis data.

Dari sisi ekonomi, keberhasilan implementasi ANTRAC 1.0 juga diukur melalui peningkatan efisiensi biaya budidaya dan potensi peningkatan pendapatan petani. Dengan kemampuan deteksi dini yang akurat, teknologi ini berkontribusi pada pengurangan kerugian hasil panen serta optimalisasi penggunaan pestisida.

Dalam jangka menengah, peningkatan jumlah pengguna hingga melampaui titik impas (422 petani) menjadi indikator penting keberlanjutan model bisnis, sekaligus menunjukkan bahwa inovasi telah mencapai skala implementasi yang ekonomis dan mandiri.

6.6.4 Replikasi dan Skalabilitas

Keberhasilan hilirisasi juga dapat dilihat dari potensi replikasi dan perluasan implementasi ke wilayah lain. Munculnya minat dari wilayah lain serta kesesuaian ANTRAC 1.0 dengan program pengembangan *smart farming* nasional menjadi sinyal positif terhadap skalabilitas inovasi ini. Pada tahap awal, replikasi diukur secara kualitatif melalui tingkat ketertarikan dan kesiapan wilayah baru untuk mengadopsi teknologi.

6.6.5 Keberlanjutan Program

Keberlanjutan program menjadi indikator kunci dalam menilai keberhasilan hilirisasi secara menyeluruh. ANTRAC 1.0 dinilai berhasil apabila tetap digunakan dalam jangka panjang, didukung oleh peran aktif kelembagaan lokal, serta terus masuk dalam program pemerintah melalui dukungan anggaran yang berkelanjutan. Kelima indikator di atas tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi, tetapi juga sebagai arah strategis dalam memastikan bahwa inovasi ini berkembang secara konsisten dan memberikan manfaat yang berkelanjutan bagi sistem pertanian nasional. Sebagai

gambaran implementasi bertahap, indikator jangka menengah dapat mencakup jumlah lokasi *pilot project* yang aktif, jumlah penyuluh dan operator yang telah dilatih, peningkatan jumlah kelompok tani pengguna, penurunan tingkat kerusakan akibat antraknosa, efisiensi penggunaan pestisida, serta peningkatan produktivitas cabai rawit di wilayah sasaran. Dalam jangka panjang, keberhasilan hilirisasi ditandai dengan integrasi ANTRAC 1.0 ke dalam program nasional modernisasi pertanian.

ANTRAC 1.0 bukan sekadar inovasi perangkat robotik pertanian, melainkan model transformasi pengendalian penyakit hortikultura berbasis teknologi yang memiliki potensi direplikasi secara nasional. Melalui strategi hilirisasi yang sistematis, dukungan kelembagaan yang kuat, serta sinergi antara pemerintah pusat dan daerah, ANTRAC 1.0 berpotensi menjadi bagian penting dalam peningkatan produktivitas cabai rawit, efisiensi budidaya, stabilitas pasokan pangan, dan penguatan ketahanan pangan Indonesia secara berkelanjutan.

REFERENSI

- Agelli M, Corona N, Maggio F, Moi PV. 2024. Unmanned Ground Vehicles for Continuous Crop Monitoring in Agriculture: Assessing the Readiness of Current ICT Technology. *Machines*. 12(11):750. doi:10.3390/machines12110750.
- Alhwaiti Y, Khan M, Asim M, Siddiqi MH, Ishaq M, Alruwaili M. 2025. Leveraging YOLO deep learning models to enhance plant disease identification. *Scientific Reports* 2025 15:1. 15(1):7969-. doi:10.1038/s41598-025-92143-0.
- Benos L, Tagarakis AC, Dolias G, Berruto R, Kateris D, Bochtis D. 2021. Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. *Sensors*. 21(11). doi:10.3390/s21113758.
- Gil G, Casagrande DE, Cortés LP, Verschae R. 2023. Why the low adoption of robotics in the farms? Challenges for the establishment of commercial agricultural robots. *Smart Agricultural Technology*. 3. doi:10.1016/j.atech.2022.100069.
- Kakani V, Nguyen VH, Kumar BP, Kim H, Pasupuleti VR. 2020. A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *J Agric Food Res*. 2. doi:10.1016/j.jafr.2020.100033.
- Kariyanna B, Senthil-Nathan S, Vasantha-Srinivasan P, Subba Reddy B V., Krishnaiah A, Meenakshi NH, Han YS, Karthi S, Chakravarthy AK, Park KB. 2024. Comprehensive insights into pesticide residue dynamics: unraveling impact and management. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 2024 11:1. 11(1):182-. doi:10.1186/S40538-024-00708-4.
- Khaspuria G, Khandelwal A, Agarwal M, Bafna M, Yadav R, Yadav A. 2024. Adoption of Precision Agriculture Technologies among Farmers: A Comprehensive Review. *J Sci Res Rep*. 30(7):671–686. doi:10.9734/jsrr/2024/v30i72180.
- Liu J, Wang X. 2021. Plant diseases and pests detection based on deep learning: a review. *Plant Methods*. 17(1). doi:10.1186/s13007-021-00722-9.
- Madiwal AS, B Jha. R, Barthakur DrP. 2025. Edge AI and IoT for Real-Time Crop Disease Detection: A Survey of Trends, Architectures, and Challenges. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*. X VII:1011–1027. doi:10.51584/IJRIAS.2025.100700092.
- Mushaf Al Ramadhani F, Ariadi H, Mufid A, Handriatni A, Sajuri, Costa Ximenes R da. 2024 Sep 5. A Comprehensive Study On The Business Feasibility, And Optimization Model For Paddy Cultivation On Marginal Agricultural Land In Pekalongan District. *Jurnal AGRISEP: Kajian Masalah Sosial Ekonomi Pertanian dan Agribisnis.*, siap terbit.
- Nasir FE, Tufail M, Haris M, Iqbal J, Khan S, Khan MT. 2023. Precision agricultural robotic sprayer with real-time Tobacco recognition and spraying system based on deep learning. *PLoS One*. 18(3):e0283801. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0283801.
- Rana A, Vaidya P. 2026. YOLO-based deep learning framework for real-time multi-class plant health monitoring in precision agriculture. *Scientific Reports* 2025 16:1. 16(1):197-. doi:10.1038/s41598-025-29132-w.
- Rejeb A, Rejeb K, Zailani S, Keogh JG, Appolloni A. 2022. Examining the interplay between artificial intelligence and the agri-food industry. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 6:111–128. doi:10.1016/j.aiaa.2022.08.002.

- de Silva DD, Groenewald JZ, Crous PW, Ades PK, Nasruddin A, Mongkolporn O, Taylor PWJ. 2019. Identification, prevalence and pathogenicity of *Colletotrichum* species causing anthracnose of *Capsicum annuum* in Asia. *IMA Fungus* 2019 10:1. 10(1):8. doi:10.1186/S43008-019-0001-Y.
- Strong R, Wynn JT, Lindner JR, Palmer K. 2022. Evaluating Brazilian Agriculturalists' IoT Smart Agriculture Adoption Barriers: Understanding Stakeholder Salience Prior to Launching an Innovation. *Sensors*. 22(18). doi:10.3390/s22186833.
- Theresia A, Ikhsan M, Kacaribu FN, Sumarto S. 2025. Spillover Effect of Food Producer Price Volatility in Indonesia. *Economies* 2025, Vol 13, Page 256. 13(9):256. doi:10.3390/ECONOMIES13090256.
- Vahdanjoo M, Gislum R, Sørensen CAG. 2023. Operational, Economic, and Environmental Assessment of an Agricultural Robot in Seeding and Weeding Operations. *AgriEngineering*. 5(1):299–324. doi:10.3390/agriengineering5010020.
- Vargas C, Gamache S, Henao N, Agbossou K, Nagarsheth S. 2024. A comprehensive cost mapping of digital technologies in greenhouses. *Smart Agricultural Technology*. 9. doi:10.1016/j.atech.2024.100634.