

Rancang Bangun Perangkat Otonom, Detektor Mutu, dan Pisau Ganda Berbasis IoT untuk Optimalisasi Kinerja Traktor Roda Dua Konvensional

Gabriella Sunsugos Sianturi¹, Lie Jasa²

[Submission: 25-06-2025, Accepted: 31-12-2025]

Abstract— The issue of limited human resources in the agricultural sector, particularly in terms of labor availability, has led to increased operational costs and decreased harvesting efficiency. On the other hand, existing IoT-based tractors are generally large-scale and expensive, making them inaccessible to smallholder farmers. To address this challenge, this study proposes the development of a modular attachment for conventional two-wheeled tractors. The device is designed to be efficient, affordable, and capable of minimizing dependence on human labor without requiring the replacement of the main tractor unit. The proposed solution includes a dual blade system (for both tilling and harvesting), a harvest quality detection system, and IoT-based autonomous navigation. All components are integrated into a single functional module that can be attached to existing two-wheeled tractors owned by farmers. This approach eliminates the need to purchase a new tractor, as the innovation enhances the functionality of equipment already in use. Additional advantages include the installation of a mechanical counterweight to stabilize the tractor during operation and the integration of quality detection capabilities, which improve efficiency by enabling simultaneous harvesting and quality monitoring. This study demonstrates that transforming conventional tractors into semi-autonomous systems can significantly enhance labor efficiency, harvesting precision, and reduce operational costs. The innovation offers a sustainable approach to agricultural modernization through the integration of modular technology and IoT, tailored for small to medium-scale farming.

Intisari— Permasalahan keterbatasan Sumber Daya Manusia (SDM) di sektor pertanian khususnya pada ketersediaan tenaga kerja telah menyebabkan peningkatan biaya operasional dan penurunan efisiensi panen. Di sisi lain, traktor berbasis IoT yang tersedia saat ini umumnya berskala besar dan mahal sehingga tidak terjangkau oleh petani kecil. Dalam menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan solusi berupa pengembangan attachment modular pada traktor roda dua konvensional. Perangkat ini dirancang agar efisien, terjangkau, dan meminimalkan ketergantungan pada tenaga kerja manusia, tanpa perlu mengganti traktor utama. Solusi yang ditawarkan meliputi *dual blade sistem*, yakni pisau bajak sekaligus panen, sistem detektor mutu hasil panen, dan navigasi otonom berbasis IoT. Seluruh komponen dirancang dalam satu modul fungsional yang terintegrasi dan dapat dipasang pada traktor roda dua yang sudah dimiliki petani. Pendekatan ini menyebabkan petani tidak

perlu membeli traktor baru karena inovasi dirancang untuk meningkatkan fungsionalitas pada alat yang sudah tersedia. Keunggulan lainnya adalah penambahan pemberat mekanis guna menstabilkan traktor saat beroperasi dan kemampuan deteksi kualitas padi yang meningkatkan efisiensi karena dapat dilakukan secara bersamaan dengan proses panen. Penelitian ini menunjukkan bahwa transformasi traktor konvensional menjadi sistem semi-otonom dapat meningkatkan efisiensi tenaga kerja, presisi panen, dan mengurangi biaya operasional. Inovasi ini memberikan pendekatan berkelanjutan terhadap modernisasi pertanian melalui integrasi teknologi modular dan IoT yang aplikatif untuk skala kecil hingga menengah.

Kata Kunci—Internet of Things; konvensional; navigasi otonom; pertanian; traktor

I. PENDAHULUAN

Komoditas pertanian masa kini seakan kehilangan daya tarik untuk dijadikan sumber penghasilan utama. Hal ini memunculkan permasalahan, yakni keterbatasan Sumber Daya Manusia (SDM) yang ingin untuk bekerja menjadi petani. Rendahnya minat masyarakat terhadap pekerjaan di sektor pertanian mendorong kenaikan upah untuk menarik pekerja. Selain itu, pemanfaatan Sumber Daya Manusia (SDM) sebagai tenaga kerja sering kali menghasilkan kinerja yang kurang presisi dengan waktu maksimal. Seluruh masalah ini menyebabkan petani menerima keuntungan yang berkurang dari yang seharusnya didapat pada sekali panen.

Spesialisasi utama yang diperlukan dalam usaha pertanian padi mencakup pengontrolan kualitas padi, pembajakan, dan pemanenan. Namun, alat pertanian dengan ketiga spesifikasi tersebut memiliki harga yang sangat mahal dengan fungsionalitas tertuju bagi lahan persawahan berskala besar. Dalam hal ini, diperlukan suatu inovasi alat pertanian yang mampu meningkatkan efisiensi dan keuntungan dengan harga yang relatif terjangkau.

Traktor tangan atau yang biasa dikenal sebagai traktor roda dua merupakan salah satu mesin yang digunakan untuk mengelola lahan pertanian. Traktor dengan jenis ini unggul dalam pengoperasian pada lahan sempit dan terpisah-pisah. Berdasarkan sudut pandang ekonomis, traktor roda dua memiliki tingkat efisiensi dan efektifitas yang lebih baik untuk digunakan pada kontur dan topografi wilayah di Indonesia [1]. Umumnya, traktor roda dua konvensional menggunakan sistem kendali manual oleh manusia dan berfokus kepada tujuannya sebagai pembajak lahan sawah.

Berdasarkan kendala tersebut, peneliti merumuskan suatu solusi melalui rancangan perangkat elektronika yang dapat

¹Mahasiswa, Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran 80361 INDONESIA (telp: 0361-703315; e-mail: gabriella.cksa2@gmail.com)

²Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran 80361 INDONESIA (telp: 0361-703315; e-mail: liejasa@unud.ac.id)



membajak, memanen, dan mengontrol kualitas padi. Rancangan tersebut mengombinasikan dasar elektronika dan sistem kendali pada traktor konvensional roda dua yang memaksimalkan mesin konvensional menjadi berbasis *Internet of Things* dalam harga yang relatif lebih murah dan efisien tanpa membuang traktor konvensional yang sudah dimiliki. Adapun rancangan komponen melibatkan integrasi komponen aktuator dan situs web dengan mikrokontroler Raspberry PI. Pengiriman data terkait sistem kendali dan deteksi kualitas padi dilakukan melalui koneksi WiFi kepada situs web.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui cara menerapkan dan merancang perangkat otonom, detektor mutu, dan pisau ganda berbasis IoT bagi traktor roda dua konvensional dalam rangka membantu petani untuk proses pembajakan, pemanenan, dan kontrol lahan persawahan. Berawal dari penelitian ini, diharapkan petani dapat mengatasi problematika kekurangan Sumber Daya Manusia (SDM) dan menekan efisiensi biaya produksi dalam pengelolaan sawah.

II. STUDI PUSTAKA

A. Tinjauan Mutakhir

Penelitian sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan penelitian berikut dianalisis untuk menjadi pembeda dengan penelitian yang dirancang dan memperkaya pembahasan pada penelitian. Penelitian berikut menyertakan jurnal yang berhubungan dengan konsep perancangan.

Penelitian yang berkaitan dengan rancangan inovasi ini berjudul “Uji Fungsional Motor Servo Berbasis Mikrokontroller untuk Aplikasi Kemudi Traktor Roda Dua” yang diteliti oleh Syafil Aldama, Muhammad Idkham, dan Indera Sakti Nasution. Penelitian ini membahas mengenai *prototype* mesin IoT sebagai sistem kendali traktor pergerakan roda dua melalui aplikasi android [2]. Selanjutnya, penelitian dengan judul “Alat Kendali Hand Traktor Berbasis Berbasis IoT Pencegah Penyakit Hand-Arm Vibration Syndrome” yang diteliti oleh Muhammad Fauzi Zulkarnaen. Jurnal tersebut memaparkan terkait modifikasi desain produk pada bagian komponen penarik tuas kopling yang pada awalnya menggunakan aktuator menjadi motor *wiper* yang diintegrasikan dengan aplikasi [3].

Adapun persamaan dengan penelitian sebelumnya adalah dengan memanfaatkan mikrokontroler. Sebagai contoh, penggunaan aktuator sebagai pengganti tuas kopling manual dan integrasi Raspberry PI dengan sistem IoT.

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah dengan meminimalisir desain komponen dengan membuat inovasi berupa *attachment* yang dapat diintegrasikan bersama traktor roda dua konvensional yang sudah dimiliki. Desain ini ditambahkan dengan pemberian sensor untuk mendekripsi kesehatan, tingkat kelembaban, dan waktu panen padi. Selanjutnya, terdapat navigasi otonom yang lebih kompleks dengan memiliki 6 pilihan pola pembajakan, yakni pola bolak-balik rapat, pola berkeliling, pola spiral, pola tepi, pola tengah, dan pola alfa [4][5] berbasis *website*. Yao et al. (2023) meninjau teknologi *automatic navigation* yang melibatkan kombinasi sensor GNSS, LiDAR, dan visi mesin untuk perencanaan jalur dan penghindaran rintangan yang lebih adaptif. Pendekatan tersebut memperluas kemampuan kendali otonom di lingkungan yang lebih kompleks, sedangkan

penelitian ini mengintegrasikan kondisi real-time berbasis pola jalur yang dipilih pengguna, tetapi tetap menjaga desain yang lebih sederhana dan efisien untuk skenario pertanian terpadu [6]. Selain itu, terdapat penambahan pemberat yang bersifat otomatis untuk menyeimbangkan traktor roda dua tersebut. Perancangan inovasi ini melibatkan pengukuran torsi untuk menjaga kestabilan dan keseimbangan dari kinerja traktor akan tiap komponen yang ditambahkan.

B. Raspberry PI

Raspberry PI 4 adalah komponen komputer mikro berpapan tunggal (*Single Board Computer*) yang dirancang oleh suatu organisasi nirlaba, yaitu Raspberry PI Foundation yang berasal dari Universitas Cambridge, Inggris. Komponen ini didesain untuk mengajarkan dasar-dasar ilmu komputer dan pemrograman [7]. Secara umum, Raspberry PI dibagi menjadi 2 model, yakni model A dan model B yang berbeda pada fitur dan spesifikasi perangkat keras. Model A berkapasitas 256 MB tanpa *port* internet sedangkan model B dirancang dengan RAM berkapasitas 512 MB dengan *port* internet. Terdapat beberapa fitur bawaan pada komponen ini, yakni performa prosesor quad-core 64-bit, dua port micro-HDMI untuk layar ganda beresolusi 4K, perangkat keras dapat mendekode video hingga 4Kp60, dan didukung 4GB RAM, jaringan nirkabel dual band 2,4/5,0 GHz, bluetooth 5,0, Ethernet GB, USB 3.0, serta PoE [8]. Raspberry PI berfungsi menjadi otak utama dalam perancangan dan pengintegrasian dari keseluruhan komponen dan membentuk sistem yang diinginkan. Dalam hal ini, mengintegrasikan komponen elektronika seperti sensor kepada aktuator dan menyampaikan informasi kepada sistem IoT dengan hanya memanfaatkan WiFi.

C. GPS Neo-M8N

Penentuan posisi pada sistem navigasi otonom dilakukan menggunakan modul GPS u-blox Neo-M8N yang bekerja dengan menerima dan mengolah sinyal dari beberapa satelit untuk menghasilkan koordinat geografis berupa lintang dan bujur secara waktu nyata. Data posisi yang diperoleh dari modul GPS diproses melalui format pesan standar NMEA sehingga dapat diintegrasikan ke sistem kendali dan pemantauan kendaraan. Pemanfaatan modul GPS Neo-M8N untuk pelacakan posisi kendaraan secara real-time telah dilaporkan dalam publikasi Majalah Ilmiah Teknologi Elektro (2024), yang menjelaskan implementasi GPS Neo-M8N pada sistem monitoring kendaraan berbasis IoT, termasuk mekanisme penerimaan sinyal satelit, pemrosesan koordinat, serta pengiriman data posisi ke server pemantauan [9]. Penelitian ini memanfaatkan modul GPS bertipe uBlox Neo M8N dikarenakan memiliki fitur dan tingkat akurasi yang tinggi. Fitur-fitur tersebut, yakni baterai cadangan untuk menyimpan data, kompas elektronik yang terintegrasi, dan antena keramik bawaan yang mampu menangkap sinyal dengan baik. Selain itu, GPS Neo-M8N memiliki spesifikasi yang baik untuk menganalisis lahan persawahan yang tidak terlalu luas dan minim rintangan.

D. TF-Luna

Jarak laser dapat diukur dengan satu titik deteksi menggunakan TF-Luna. Komponen ini beroperasi berdasarkan prinsip Time of Flight (TOF). Desain listrik dan optik

ditemukan pada perangkat ini sehingga membuatnya memiliki kapabilitas untuk mengukur jarak dengan tepat dan akurat. Dalam pengaplikasiannya, komponen ini dapat dimanfaatkan dan diatur secara maksimal sesuai kebutuhan dengan memodifikasi algoritma. Tf-Luna memiliki kemampuan untuk beroperasi dengan jarak mencapai hingga 8 m dan beresolusi 1 cm. Selain itu, TF-Luna memiliki konsumsi daya maksimal sebesar 0,35W dengan frame rate yang dapat diatur dari 1 hingga 250Hz (standar 100Hz). Sensor ini memiliki sudut pandang 2 derajat dan bobotnya kurang dari 5 gram [10]. Perangkat ini dapat dioperasikan untuk berbagai tujuan pemanfaatan terutama ketika memerlukan tingkat ketepatan dan kepercayaan yang tinggi. Dalam hal ini, TF-Luna dimanfaatkan untuk menghindari rintangan pada sawah.

E. Aktuator Linear

Aktuator linier bekerja dengan mengubah gerakan putar dari motor dan gearbox menjadi gerak lurus atau bolak-balik (maju-mundur). Komponen tersebut beroperasi dalam satu garis Gerakan sehingga memungkinkan perpindahan secara linear. Fungsi utama dari alat ini adalah untuk mendorong atau menggerakkan benda yang lebih berat dengan tujuan tertentu. Aktuator linier membutuhkan sinyal eksternal berupa berbagai jenis input untuk menerima perintah gerakan yang diperlukan. Dengan demikian, komponen ini dapat bergerak secara tepat sesuai kebutuhan dalam suatu sistem yang telah ditentukan [11]. Dalam hal ini, actuator linear dimanfaatkan dalam pengaturan kopling.

F. Sensor Near-Infrared

Sensor Near-Infrared (NIR) digunakan dalam sistem pertanian cerdas untuk mengevaluasi status vegetasi tanaman berdasarkan karakteristik pantulan cahaya. Sensor ini bekerja dengan mengukur perbedaan pantulan spektral dari area daun pada pita inframerah-dekat dan pita merah; kondisi tanaman yang sehat menunjukkan pola pantulan yang berbeda dibandingkan tanaman yang sudah siap panen atau mengalami stres. Prinsip kerja dan aplikasi sensor NIR dalam monitoring kualitas tanaman telah diuraikan secara rinci dalam Majalah Ilmiah Teknologi Elektro (2024), yang membahas implementasi sensor optik dalam sistem pertanian cerdas untuk menganalisis nilai NIR dan rasio NIR/Red sebagai indikator kesehatan vegetasi tanaman. Referensi ini menjadi dasar yang kuat bagi penggunaan sensor NIR dalam penelitian ini [12].

G. Motor DC

Motor DC merupakan perangkat yang mengkonversi energi listrik menjadi gerakan mekanik dengan menggunakan sumber tenaga arus searah. Komponen tersebut memiliki dua terminal yang membutuhkan suplai tegangan DC untuk beroperasi lalu menghasilkan putaran dalam satuan RPM (Revolutions Per Minute). Putaran tersebut dapat diatur arahnya, yakni searah atau berlawanan jarum jam. Struktur motor DC terdiri atas dua bagian utama stator, yaitu bagian statis yang terdiri dari rangka

dan lilitan kawat. Stator memiliki karakteristik yang tetap dan tidak berputar. Selain itu, terdapat rotor yang berputar yang mengandung kumparan jangkar [13]. Motor DC biasanya diintegrasikan dengan beberapa komponen mekanis, yakni dalam penelitian ini dengan besi pemberat dan pisau bajak panen.

H. Driver Motor L298N

Pengendali motor L298N adalah sebuah modul penggerak untuk motor DC yang digunakan untuk mengatur kecepatan serta arah rotasi motor DC. Modul ini mampu mengatur motor DC dengan arus maksimum 4A. IC driver motor DC L298N memungkinkan pengendalian dua motor DC secara simultan dan mandiri [13]. L298N mampu mengontrol dua motor DC secara bersamaan dan independen, memberikan fleksibilitas dalam penggunaannya.

I. LM2596 DC-DC Buck Converter

Modul LM2596 berfungsi sebagai penurun tegangan yang dapat mengatur tegangan DC agar lebih stabil. LM2596 beroperasi pada frekuensi tetap sebesar 150 kHz, yaitu frekuensi step-down dari PWM. Efisiensi dari modul ini tinggi dengan penurunan yang cenderung rendah dan optimal pada pengaturan garis dan beban [11]. Selain itu, regulator ini bersifat praktis karena tidak memerlukan banyak komponen tambahan dan dilengkapi oleh osilator serta kompensasi frekuensi internal. Osilator pada komponen ini memiliki frekuensi yang tetap.

J. Gearbox

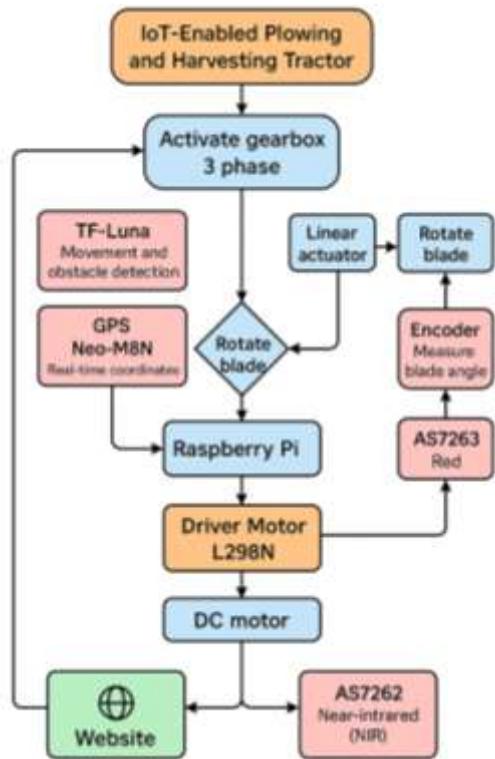
Gearbox atau biasa disebut sebagai persneling merupakan komponen pendukung motor induksi berbentuk roda gigi. Komponen ini berfungsi untuk mentransmisikan tenaga mekanis. Selain itu, gearbox memiliki mekanisme dengan mengurangi kecepatan putaran motor sekaligus meningkatkan torsi output. Selisih kecepatan antara output shaft motor induksi dan output shaft gearbox dapat dihitung dengan mengalikan putaran poros input dengan rasio gearbox yang dimiliki [14]. Dalam perancangan sistem, gearbox ini berfungsi untuk menggerakkan komponen dengan mentransmisikan energi mekanis dari motor ke pisau, kopling, dan pemberat.

III. METODOLOGI

A. Diagram Alir Perancangan Sistem

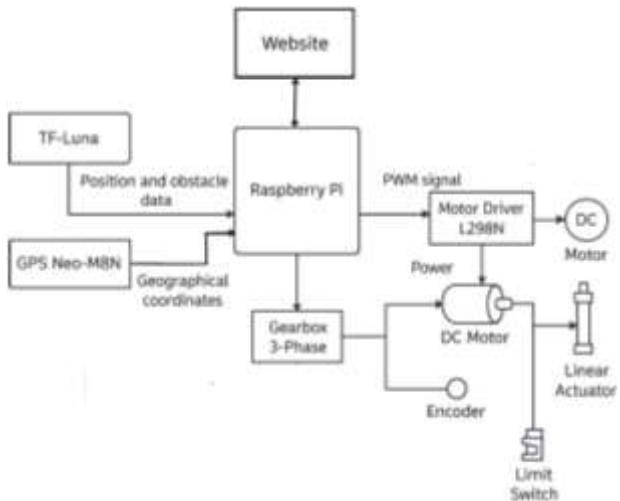
Sebagai dasar implementasi sistem maka dirancang gambaran berupa skema dari alur kerja terstruktur yang dalam bentuk diagram alir. Diagram berikut mengilustrasikan tahapan logis dari pengoperasian sistem secara menyeluruh yang diawali dari input awal hingga output yang dihasilkan oleh inovasi yang dirancang.





Gambar 1: Rancangan Diagram Alir Perancangan Sistem

B. Perancangan Perangkat Keras



Gambar 2: Diagram Blok Perangkat Keras

Desain ini terdiri atas beberapa komponen, yakni Raspberry PI 4 (4GB), GPS Neo-M8N, TF-Luna, Linear Actuator 12V, AS7263, kabel baja/tali kawat, relay 12V 10A, limit switch, roda gigi, motor DC + encoder, driver motor L298N, baterai LiPo 12V 5Ah, kabel jumper, microSD card 128GB, LM2596 DC-DC buck converter, plat aluminium untuk membuat bracket, pisau bajak-panen custom, besi, gearbox 3 saluran, dan UBEC (Universal Battery Eliminator Circuit). Driver Motor L298N menerima sinyal PWM dari Raspberry PI dan mengkonversinya menjadi daya untuk menggerakkan motor/servo. Cara kerja diawali dengan aktivasi gearbox 3 phase untuk memutar pisau bajak-panen sesuai dengan perintah yang dipilih dari website. Lebih lanjut, pergerakan motor DC melalui gearbox 3 phase memutar poros pisau 180° dengan

pergerakan roda gigi untuk mengganti sisi bajak/panen yang dilengkapi limit switch di posisi akhir (bajak/panen) untuk menghentikan motor secara otomatis ketika pisau telah berada di posisi sesuai dengan perintah jenis pisau yang digunakan pada website. Encoder mengukur sudut rotasi pisau untuk memastikan presisi dengan pergerakan pisau. Selanjutnya, motor DC melalui gearbox 3 phase menyalurkan energi mekanis kepada roda gigi untuk menarik besi pemberat untuk menyeimbangkan traktor. Pada mekanisme kendali kendaraan pertanian otomatis, sistem aktuasi diintegrasikan dengan algoritma navigasi untuk mengarahkan pergerakan kendaraan sesuai jalur yang telah ditentukan melalui gearbox 3 phase yang mengaktifkan linear actuator untuk menggerakkan kopling tangan. Sistem kendali ini memungkinkan pengaktifan aktuator secara terkoordinasi berdasarkan perencanaan jalur dan informasi posisi real-time, sehingga arah pergerakan kendaraan dapat disesuaikan secara otomatis tanpa intervensi langsung operator. Pendekatan ini banyak diterapkan pada traktor otomatis dalam konteks smart agriculture melalui integrasi sistem navigasi, aktuator mekanik, dan pemantauan berbasis jaringan [15].

Sistem navigasi otomotif umumnya menerapkan konsep pengendalian loop tertutup, di mana keputusan kendali dipengaruhi oleh umpan balik dari sensor lingkungan. Sensor jarak digunakan untuk mendeteksi keberadaan rintangan di jalur pergerakan kendaraan, kemudian informasi tersebut diproses oleh sistem kendali untuk menentukan aksi koreksi yang sesuai. Pendekatan pengendalian berbasis umpan balik ini memungkinkan kendaraan melakukan penyesuaian arah secara adaptif dan menjaga keselamatan pergerakan selama operasi lapangan [16]. Pada inovasi ini, sensor pergerakan, yaitu TF-Luna mendeteksi posisi dan rintangan pada jalur lalu mengirimkan data tersebut kepada Raspberry PI dan diproses sebagai data yang akan dikirimkan kepada motor DC dan website. GPS Neo-M8N memberikan data koordinat geografis (latitude, longitude) traktor secara real-time dan membantu traktor bergerak sesuai 6 pola jalan yang dipilih melalui website.

Ditinjau lebih lanjut, berdasarkan jurnal bertajuk “Pengembangan Alat Peraga “Crander: Crane” Dermaga Untuk Menunjang Pembelajaran Fisika Bab Momen Gaya Dan Katrol”, momen gaya (torsi) adalah besaran yang dihasilkan dari gaya yang bekerja tegak lurus pada lengan gaya yang dapat diketahui dengan mengalikan gaya dengan panjang lengan. Dalam sistem, roda gigi berfungsi sebagai transmisi mekanis untuk mentransfer gaya dari besi pemberat ke titik tumpu belakang. Dengan rasio tertentu, roda gigi memperbesar torsi dan meningkatkan efek tekan pada belakang traktor sehingga bagian depan terangkat melalui prinsip pengungkit. Berat pemberat disesuaikan dengan faktor eksternal seperti kekerasan tanah dan tinggi padi pada saat pemanenan sehingga pemberat dipecah menjadi bagian 1-2 kg untuk memudahkan penyesuaian ketinggian pengungkitan otomatis berbasis sensor. Sistem ini mengoptimalkan keseimbangan dengan memastikan 5 kombinasi jarak dan beban mencapai torsi maksimal, sekaligus meningkatkan stabilitas operasional di lahan pertanian.

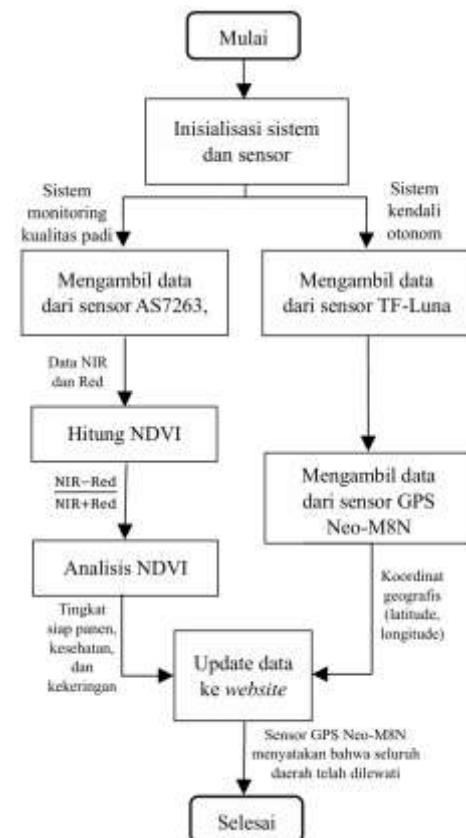
C. Perancangan Perangkat Lunak

Raspberry PI diintegrasikan dengan website melalui PC/Laptop menggunakan sinyal WiFi untuk menghasilkan

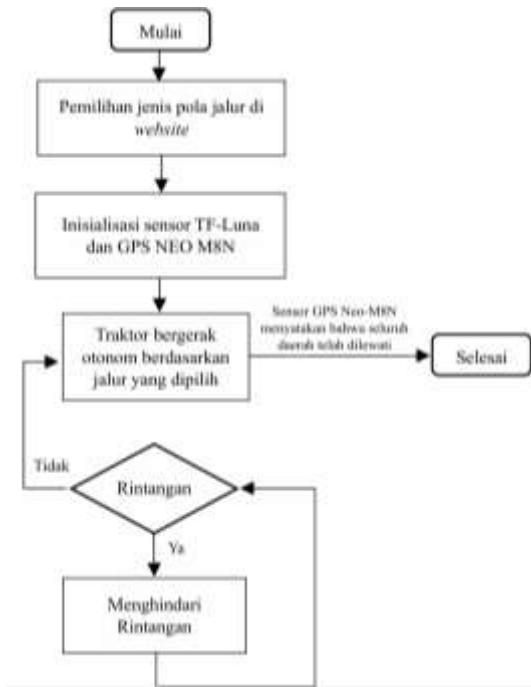
diagram sensorik dan sistem kendali pada IoT. Pengujian ini meliputi pemantauan data yang telah ditampilkan berdasarkan data dari sistem sensorik dan sistem kendali mampu dioperasikan secara presisi melalui sistem IoT.

Berdasarkan jurnal berjudul "Klasifikasi Produktivitas Padi di Kabupaten Jember Menggunakan Indeks Vegetasi NDVI Tahun 2023", diketahui bahwa indeks vegetasi dan Kesehatan tanaman, khususnya padi dapat tercermin dari Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) yang dihitung dengan menggunakan dua pita spektral, yaitu near-infrared (NIR) dan red[17]. Index ini merupakan variabel bebas yang dianalisis menggunakan metode regresi linear berganda melalui pencitraan[18]. Nilai NDVI mampu memetakan dan merepresentasikan fase tumbuh padi, tingkat kehijauan, dan umur padi[19]. Ketika padi mendekati waktu panen, nilai NDVI padi cenderung kecil dikarenakan warna daun yang menguning. Pendekatan ini telah banyak dipakai dalam sistem pemantauan pertanian berbasis IoT untuk mengukur status tanaman secara non-invasif dan real-time. Tinjauan literatur terbaru menunjukkan bahwa NDVI efektif dalam menganalisis tingkat kelembaban, vigor, dan kesehatan tanaman di lahan pertanian terpadu, sehingga menjadi indikator utama dalam sistem smart agriculture dan pemantauan kualitas tanaman [20].

Dalam rancangan, AS7263 menghasilkan data berupa index NIR dan Red. Selanjutnya, nilai yang dihasilkan tersebut menghasilkan nilai NDVI melalui nilai NIR dikurang Red lalu dibagi dengan nilai NIR yang ditambah dengan Red[19]. Nilai tersebut dihasilkan sensor dari analisis warna daun padi. Data ini dikirimkan kepada website. Website tersebut merupakan website yang juga dihubungkan kepada sistem kendali dan tracking traktor.

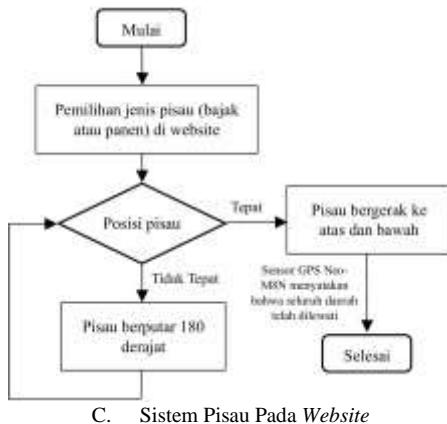


A. Sistem Pemantauan Pada Website



B. Sistem Kendali Otonom Pada Website





Gambar 3: Diagram Alir Perangkat Lunak

Gambar 3a menunjukkan sistem yang terdiri atas dua bagian utama, yaitu sistem monitoring kualitas padi dan sistem kendali otonom yang bekerja secara paralel. Proses dimulai dengan inisialisasi seluruh sistem dan sensor yang akan digunakan. Setelah sistem siap, jalur kerja terbagi menjadi dua bagian.

Pada jalur pertama, sistem monitoring kualitas padi dimulai dengan pengambilan data dari sensor spektral AS7263 yang menghasilkan informasi spektrum cahaya, khususnya cahaya Near-Infrared (NIR) dan Red. Nilai NDVI yang dihasilkan dianalisis untuk menentukan kondisi tanaman padi, termasuk tingkat kesehatan, kesiapan panen, dan potensi kekeringan lahan pada website.

Sementara itu, jalur kedua dari sistem bertanggung jawab atas kendali otonom perangkat yang dipaparkan secara lebih detail pada Gambar 3b. Sistem ini mengandalkan sensor TF-Luna untuk mendeteksi jarak dan hambatan di sekitar perangkat selama bergerak di area pertanian. Ketika TF-Luna mendeteksi adanya rintangan maka kopling pada traktor dikodekan untuk berbelok menghindari rintangan. Jika telah dinilai tidak terdapat rintangan maka traktor akan kembali dan tetap pada jalurnya. Selain itu, data koordinat geografis diperoleh dari sensor GPS Neo-M8N, yang merekam lokasi (latitude dan longitude).

Kedua jalur ini bermuara pada proses pembaruan data ke dalam sebuah website. Website ini berfungsi sebagai *platform* pemantauan jarak jauh yang memungkinkan pengguna untuk mengakses data secara langsung. Proses ini terus berlangsung hingga sensor GPS menyatakan bahwa seluruh area pemantauan telah dilalui.

Selanjutnya, Gambar 3c menjelaskan proses kerja sistem pemilihan dan pengoperasian pisau alat pertanian otomatis yang dapat berfungsi sebagai alat bajak atau alat panen. Proses dimulai dengan pemilihan jenis pisau melalui website. Setelah jenis pisau dipilih, sistem akan memeriksa ketepatan posisi sesuai dengan fungsi yang dipilih. Jika posisi pisau terdeteksi tepat, maka sistem akan mengaktifkan mekanisme gerak vertikal—pisau akan bergerak naik dan turun untuk menjalankan fungsi pemotongan atau pembajakan sesuai kebutuhan.

Jika posisi pisau belum sesuai dengan konfigurasi yang seharusnya, maka sistem akan menggerakkan pisau untuk berputar 180 derajat guna menyesuaikan orientasinya hingga berada pada posisi yang benar. Setelah rotasi ini dilakukan, proses pengecekan posisi akan diulang hingga pisau berada

dalam posisi yang tepat. Sistem akan terus menjalankan proses ini secara otomatis selama area kerja belum sepenuhnya dilalui. Proses akan dihentikan secara otomatis ketika sensor GPS Neo-M8N mendeteksi bahwa seluruh area target telah dilewati oleh alat pertanian.

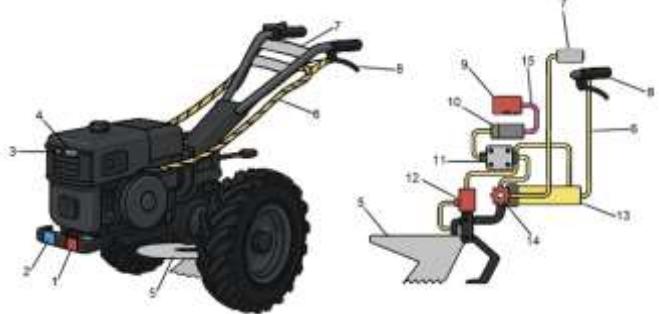
D. Konsep Loop Tertutup pada Navigasi

Navigasi otonom pada penelitian ini menerapkan konsep loop tertutup (*closed-loop control*), yaitu sistem secara periodik membaca sensor sebagai umpan balik, membandingkan kondisi aktual dengan target lintasan, kemudian menghasilkan aksi koreksi agar kendaraan tetap berada pada jalur yang diinginkan. Sensor yang digunakan untuk umpan balik adalah GPS sebagai standar posisi aktual dan TF-Luna sebagai penganalisis jarak rintangan di depan.

Aksi koreksi arah dilakukan melalui aktuasi kopling kiri/kanan melalui *linear actuator* sesuai rancangan perangkat keras). Target lintasan dibentuk berdasarkan pola pergerakan yang dipilih pengguna dengan 6 pola jalur sehingga kendaraan dapat bergerak mengikuti lintasan yang telah ditentukan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Desain Komponen Fisik



Gambar 4: Rancangan Perangkat Keras

Gambar 4 menunjukkan rancangan komponen fisik. Jenis dan penjelasan terkait komponen yang digunakan tertera pada Tabel 1 dengan menyesuaikan sistem penomoran pada rancangan.

TABEL I
KETERANGAN KOMPONEN PADA RANCANGAN PERANGKAT KERAS

Nomor	Keterangan		
	Komponen	Fungsi	Gambar
1 dan 2	Sensor AS7263 [21]	Menghasilkan data spektral red dan near-infrared (NIR) untuk mendeteksi tingkat kekeringan, kesehatan, dan waktu panen padi berdasarkan NDVI.	
3	Sensor TF-Luna [22]	Mendeteksi jarak dan rintangan di jalur traktor secara real-time.	
4	GPS Neo-M8N [23]	Memberikan koordinat geografis (latitude, longitude) traktor untuk navigasi otomatis berdasarkan pola jalur yang dipilih.	

5	Pisau Bajak-Panen	Digunakan untuk proses membajak atau memanen, berputar 180° berdasarkan input dari Raspberry Pi.		14	Roda Gigi [31]	Meneruskan putaran dari gearbox untuk memutar pisau dan mengatur posisi pemberat melalui rasio torsi tertentu.		
6	Kabel Baja [24]	Menyambungkan pisau ke sistem gearbox dan aktuator untuk mengatur tinggi atau posisi kerja pisau.		15	Kabel Jumper [32]	Menghubungkan antar komponen elektronik seperti sensor, motor driver, dan Raspberry Pi untuk aliran data dan daya.		
7	Besi Pemberat [25]	Memberikan tekanan pada bagian belakang traktor agar bagian depan terangkat, disesuaikan dengan berat traktor dan tingkat kekerasan tanah pada lahan.		Rancangan alat ini terdiri dari berbagai komponen dengan ukuran dan berat yang bervariasi dan dirancang untuk membentuk sebuah sistem mekanik-elektronik terintegrasi. Rancangan ini merujuk kepada traktor Quick G1000 yang paling sering digunakan oleh petani. Traktor tersebut memiliki dimensi besar yaitu sekitar 275 × 113/86 × 141/127,5 cm dan bobot yang cukup signifikan yang berkisar antara 250 hingga 300 kilogram.				
8	Kopling Tangan (Kanan-Kiri)	Mengatur arah belok traktor secara otomatis melalui perintah dari Raspberry Pi dan linear actuator.		Sebagai rancangan yang memanfaatkan IoT, inovasi ini memanfaatkan Raspberry PI sebagai unit komputasi dan otak dari sistem. Komponen ini memiliki dimensi 8,5 × 5,6 × 1,5 cm dengan berat hanya 0,045 kg.				
9	Raspberry PI [26]	Unit kendali utama dalam memproses semua input sensor, mengontrol motor dan aktuator, serta berkomunikasi dengan website IoT.		Komponen sensor yang digunakan meliputi sensor AS7263 dengan berat 0,01 kg berdimensi 2,5 × 2,5 × 0,5 cm, sensor TF-Luna dengan berat 0,03 kg berdimensi 4,2 × 2,4 × 1,5 cm, dan GPS Neo-M8N dengan berat 0,02 kg dimensi 2,5 × 3,5 × 0,5 cm. Seluruh sensor berukuran kecil dan ringan tetapi memiliki peran yang krusial dalam sistem navigasi dan pemantauan kualitas padi.				
10	Motor DC [27]	Mengerakkan pisau bajak-panen dan sistem pemberat berdasarkan sinyal dari driver motor dan Raspberry Pi.		Alat ini juga dilengkapi dengan pisau bajak-panen berukuran besar dengan panjang 60,891–65,091 cm, lebar 27,43 cm, dan memiliki berat 10 kg. Selanjutnya, terdapat kabel baja sepanjang 150 cm dengan distribusi panjang berbeda untuk berbagai fungsi. Panjang kabel baja penghubung ke besi pemberat sekitar 35 cm, penghubung ke pisau bajak sekitar 15cm, dan penghubung ke kopling kanan-kiri masing-masing sekitar 17 cm. Total berat kabel baja yang digunakan adalah sekitar 0,15 kg.				
11	Gearbox 3 Saluran [28]	Mendistribusikan energi mekanik dari motor ke pisau, kopling, dan pemberat. Mengubah arah atau torsi sesuai kebutuhan.		Besi pemberat memiliki peran penting untuk mengungkit traktor agar traktor dapat bergerak. Selain itu, pemberat dirancang dengan mempertimbangkan besar pisau pembajak dan pemanen agar dapat berfungsi dan memotong padi secara presisi. Berat dari besi ini dirancang dengan bobot yang cukup besar yaitu antara 14 hingga 17 kg dengan memperhitungkan torsi dari traktor dan komponen lainnya.				
12	Limit Switch [29]	Memberikan batasan gerak (end stop) untuk menghentikan motor saat posisi pisau mencapai titik akhir.		Sistem penggerak terdiri dari motor DC berukuran 10–12 × 20–25 cm dan memiliki berat 3–5 kg, gearbox 3 saluran berukuran 12–15 × 20–25 cm dan memiliki berat 4–6 kg, serta limit switch kecil berukuran 2 × 1 × 1 cm dengan berat 0,1 kg. Selain itu, inovasi ini dirancang dengan <i>linear actuator</i> berukuran 15–30 × 3 × 3 cm dengan berat 1 kg. Terdapat roda gigi seberat 1 kg dengan diameter luar (OD): 60 mm, lebar gigi sekitar 20 mm, dan diameter lubang poros sepanjang 12 mm.				
13	Linear Actuator [30]	Mengerakkan kopling tangan (kanan-kiri) sesuai instruksi jalur dari Raspberry Pi dan website.						



Secara keseluruhan, total berat rancangan inovasi ini berada pada kisaran 283,355 kg untuk traktor roda karet. Pada traktor dengan roda besi, total berat rancangan dapat mencapai 340,355 kg yang mencakup seluruh komponen mekanik dan elektronik yang digunakan.

Terdapat beberapa komponen tambahan, yakni Bracket Aluminium dengan plat aluminium, Relay 12V 10A, Baterai LiPo 12V 5Ah, Kabel Jumper, MicroSD card 128GB, LM2596 DC-DC Buck Converter, dan UBEC (Universal Battery Eliminator Circuit). Bracket aluminium memastikan komponen terpasang kokoh dan relay 12V 10A mengontrol aliran daya ke motor atau akuator. Selanjutnya, Baterai LiPo 12V 5Ah menjadi sumber daya utama untuk menggerakkan motor, sensor, dan sistem elektronika traktor dan kabel jumper menghubungkan komponen elektronika yang digunakan dalam Gotrack. MicroSD 128GB menyimpan data pada sistem Raspberry PI dan firmware sistem. Terakhir, UBEC (Universal Battery Eliminator Circuit) menstabilkan tegangan untuk menghindari noise listrik dan LM2596 DC-DC Buck Converter menurunkan tegangan baterai 12V ke 5V/3,3V untuk Raspberry PI dan sensor.

Pada perakitan, tahapan yang dilakukan adalah perakitan Raspberry PI terlebih dahulu lalu dengan menyambungkannya kepada TF-Luna, GPS Neo-M8N, dan AS7263. Selanjutnya, Raspberry PI dihubungkan kepada sistem kendali, yaitu motor DC. Motor DC dihubungkan kepada komponen sistem kendali seperti gearbox 3 phase lalu ke roda gigi, linear actuator, pisau bajak-penan, dan komponen lainnya dengan kabel baja.

B. Definisi Variabel dan Parameter Kontrol

Dalam rangka mendukung implementasi navigasi otonom berbasis loop tertutup, sejumlah variabel dan parameter kontrol didefinisikan guna merepresentasikan kondisi sistem, umpan balik sensor, serta keluaran kendali. Definisi variabel ini bertujuan memperjelas proses pengambilan keputusan pada algoritma navigasi dan memudahkan replikasi sistem.

Posisi aktual kendaraan pada waktu tertentu dinyatakan sebagai $pos(t)$, yang diperoleh dari sensor Global Positioning Sistem (GPS) dalam bentuk koordinat lintang dan bujur. Lintasan referensi dibentuk dari sekumpulan waypoint wp_i yang disusun berdasarkan pola pergerakan yang dipilih pengguna. Jarak antara posisi aktual kendaraan dan waypoint target dinyatakan sebagai error posisi $e_pos(t)$.

Arah target kendaraan menuju waypoint berikutnya dinyatakan sebagai $\psi_{target}(t)$, sedangkan arah gerak aktual kendaraan dinyatakan sebagai $\psi_{current}(t)$. Selisih antara kedua arah tersebut dinyatakan sebagai error heading $e_heading(t)$, yang digunakan sebagai dasar penentuan arah koreksi kendaraan.

Pendeteksian keberadaan rintangan di depan kendaraan, memanfaatkan sensor jarak TF-Luna. Jarak rintangan yang terukur dinyatakan sebagai $d_{obs}(t)$. Nilai ini dibandingkan dengan parameter ambang jarak aman d_{safe} untuk menentukan apakah kendaraan harus tetap mengikuti lintasan atau melakukan manuver penghindaran. Selain itu, parameter e_{th} didefinisikan sebagai ambang error posisi agar waypoint dianggap telah tercapai.

Algoritma navigasi dijalankan secara periodik dengan periode pembaruan T , yang menyatakan interval waktu pembacaan sensor dan perhitungan keputusan kendali.

Keluaran sistem kendali berupa perintah aktuasi kopling kiri dan kanan, yang masing-masing digunakan untuk menghasilkan manuver belok ke kiri (CLUTCH_LEFT) atau ke kanan (CLUTCH_RIGHT), serta kondisi bergerak lurus (STRAIGHT) ketika tidak diperlukan koreksi arah signifikan.

C. Mekanisme Keputusan Berbasis Status

Peningkatan kejelasan alur navigasi dan penghindaran ambiguitas dalam pengambilan keputusan dilakukan dengan algoritma navigasi otonom dirancang melalui pendekatan mesin status (*state machine*). Terdapat tiga status utama yang digunakan dalam sistem navigasi, yaitu Path Tracking, Obstacle Avoidance, dan Rejoin Path.

Status Path Tracking (S0) merupakan kondisi normal ketika kendaraan mengikuti lintasan referensi menuju waypoint target. Pada status ini, sistem secara kontinu menghitung error posisi dan error heading berdasarkan data GPS. Selama jarak rintangan yang terukur (d_{obs}) lebih besar dari ambang jarak aman (d_{safe}), kendaraan akan terus melakukan koreksi arah berdasarkan nilai $e_heading$ untuk menjaga agar pergerakan tetap berada pada lintasan yang diinginkan.

Status Obstacle Avoidance (S1) diaktifkan ketika sensor TF-Luna mendeteksi rintangan dengan jarak d_{obs} yang lebih kecil atau sama dengan d_{safe} . Pada kondisi ini, prioritas sistem berpindah dari pelacakan lintasan menjadi penghindaran rintangan. Kendaraan melakukan manuver belok sementara dengan mengaktifkan kopling kiri atau kanan sesuai aturan yang telah ditetapkan, hingga rintangan tidak lagi terdeteksi dalam jarak kritis.

Setelah rintangan berhasil dilewati dan nilai d_{obs} kembali lebih besar dari d_{safe} , sistem berpindah ke status Rejoin Path (S2). Pada status ini, kendaraan diarahkan kembali menuju lintasan referensi dengan meminimalkan error posisi dan error heading terhadap waypoint target. Apabila nilai e_{pos} telah lebih kecil dari ambang e_{th} atau arah kendaraan telah sejajar dengan lintasan, sistem kembali ke status Path Tracking. Penggunaan tersebut memastikan bahwa setiap keputusan navigasi merupakan hasil evaluasi berulang terhadap kondisi sensor, sehingga sistem benar-benar bekerja dalam skema loop tertutup dan mampu menganalisis perubahan secara *real-time*.

D. Pseudocode Algoritma Navigasi Otonom

Implementasi algoritma navigasi otonom berbasis loop tertutup disusun menggunakan pseudocode sebagai representasi langkah-langkah logika yang dijalankan oleh sistem kendali.

```
import time
import math

# ===== Parameter =====
T      = 0.5      # periode kontrol (detik)
d_safe = 1.5      # ambang jarak aman lintangan (meter)
e_th   = 1.0      # ambang jarak waypoint tercapai (meter)
theta  = 10.0     # ambang heading (derajat)

TRACKING = "TRACKING"
AVOIDANCE = "AVOIDANCE"
REJOIN   = "REJOIN"

# ===== Fungsi bantu (pseudocode) =====
def readGPS():
    # return (lat, lon)
    pass

def readTFLuna():
    # return d_obs (meter)
    pass

def distance(pos, wp):
    # hitung jarak pos ke wp (meter)
    pass

def bearing(pos, wp):
    # hitung arah target dari pos ke wp (derajat 0..360)
    pass

def estimate_heading_from_GPS():
    # estimasi arah gerak aktual dari perubahan GPS (derajat 0..360)
def wrap_angle_deg(a):
    # normalisasi sudut ke rentang [-180, 180]
    a = (a + 180.0) % 360.0 - 180.0
    return a

def clutch_left():
    # aktifkan kopling kiri
    pass

def clutch_right():
    # aktifkan kopling kanan
    pass

def straight():
    # bergerak lurus
    pass

def stop_system():
    # berhenti
    pass

def avoid_maneuver():
    # manuver penghindaran (mis. belok kanan beberapa detik)
    pass

# ===== Input lintasan =====
wp = [] # daftar waypoint: [(lat1, lon1), (lat2, lon2), ...]
N = len(wp)

# ===== Main =====
```

```
i = 0
state = TRACKING

while True:
    time.sleep(T)

    pos = readGPS()
    d_obs = readTFLuna()

    wp_target = wp[i]
    e_pos = distance(pos, wp_target)

    psi_target = bearing(pos, wp_target)
    psi_current = estimate_heading_from_GPS()
    e_heading = wrap_angle_deg(psi_target - psi_current)

    # Waypoint tercapai?
    if e_pos < e_th:
        i += 1
        if i >= N:
            stop_system()
            break
        wp_target = wp[i]

    # State machine
    if state == TRACKING:
        if d_obs <= d_safe:
            state = AVOIDANCE
        else:
            if e_heading > +theta:
                clutch_left()
            elif e_heading < -theta:
                clutch_right()
            else:
                straight()

    elif state == AVOIDANCE:
        avoid_maneuver()
        if d_obs > d_safe:
            state = REJOIN

    elif state == REJOIN:
        if e_heading > +theta:
            clutch_left()
        elif e_heading < -theta:
            clutch_right()
        else:
            straight()

    if (e_pos < e_th) or (abs(e_heading) <= theta):
        state = TRACKING
```

Gambar 5: Pseudocode Prototype

Pseudocode tersebut menunjukkan bahwa sistem navigasi tidak hanya bergantung pada satu kali pembacaan sensor, melainkan melakukan proses pengambilan keputusan secara berulang berdasarkan umpan balik aktual. Dengan demikian, koreksi arah kendaraan dilakukan secara kontinu hingga tujuan tercapai atau kondisi lingkungan berubah.

E. Desain Prototype Website

Pengoperasian website diawali dengan memilih navigasi dan kontrol. Pilihan navigasi berfungsi untuk mengendalikan pergerakan traktor. Bagian kontrol berisi analisis kualitas padi yang dilewati oleh traktor. Sebelum memilih navigasi, pengguna dapat menentukan terlebih dahulu fungsionalitas pisau yang akan digunakan, yakni antara pisau pembajakan atau pemanen.





Gambar 6: Desain Prototype Website

Pada bagian navigasi, diawali dengan menyalakan tombol sistem kontrol. Selanjutnya, pengguna dapat memilih pilihan antara digerakkan secara otonom atau sesuai dengan pergerakan yang diarahkan oleh pengguna. Setelah itu, terdapat pilihan untuk menentukan pola pembajakan yang diinginkan berdasarkan 6 pola pembajakan. Jika pengguna memilih otonom maka traktor akan otomatis bergerak sesuai pola pembajakan yang dipilih, tetapi jika pengguna memilih manual maka pada navigasi akan muncul rute yang disarankan sesuai pola yang telah dipilih. Pada bagian sistem navigasi, pengguna dapat melihat secara langsung pergerakan traktor. Navigasi ditampilkan dengan 3 bentuk, yakni tampilan kamera depan, pergerakan rill, dan lampau berbentuk titik koordinat.

Pada bagian kontrol, diawali dengan pemilihan skala peta analisis Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Peta ini berupa gambaran yang menunjukkan tingkat kematangan, kesehatan, dan stress kekeringan dari padi yang telah dilewati oleh traktor secara garis besar. Hasil analisis peta tersebut ditampilkan kembali berupa grafik presentase index NDVI yang dianalisis lebih dalam berbentuk grafik presentase kematangan, kesehatan, dan stress kekeringan dari padi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan:

1. Rancang bangun sistem traktor otomatis berbasis IoT yang terdiri dari sensor AS7263, TF-Luna, GPS Neo-M8N, serta Raspberry Pi sebagai unit kontrol utama berhasil dibuat sesuai dengan tujuan utama, yaitu mengendalikan arah serta gerakan traktor secara otomatis dan mendeteksi kesehatan, tingkat kelembaban, serta waktu panen padi.
2. Rancangan mampu meminimalkan biaya operasional karena dirancang sebagai *attachment* yang dapat diintegrasikan bersama traktor roda dua konvensional yang sudah dimiliki.
3. Terdapat navigasi otonom lebih kompleks, yakni memiliki pilihan membajak mengikuti 6 pola pembajakan dan penambahan pemberat untuk menyeimbangkan traktor pada sistem kendali serta penambahan sistem pemberat otomatis untuk menyeimbangkan traktor roda dua konvensional.

4. Modul website berbasis IoT berhasil dikembangkan untuk memantau status padi dan mengendalikan traktor secara jarak jauh melalui jaringan internet yang dapat diakses melalui smartphone atau komputer untuk mengatur pola jalan dan arah kopling.

REFERENSI

- [1] Matshuri, M. Idkham, and I. S. Nasution, "Perancangan Motor Servo untuk Pengendalian Kemudi Traktor Roda Dua (Mervo Motor Design for Two-Wheel Tractor Steering)," *J. Ilm. Mhs. Pertan.*, vol. 9, no. 2, pp. 130–136, 2024, [Online]. Available: www.jim.usk.ac.id/JFP
- [2] S. Aldama, M. Idkham, and I. S. Nasution, "Uji Fungsional Motor Servo Berbasis Mikrokontroller untuk Aplikasi Kemudi Traktor Roda Dua," *J. Ilm. Mhs. Pertan.*, vol. 8, no. 3, pp. 414–421, 2023.
- [3] M. F. Zulkarnaen and W. Bagye, "Alat Kendali Hand Traktor Berbasis IoT Pencegah Penyakit Hand-Arm Vibration Syndrome," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 52–56, 2024, doi: 10.37905/jjeee.v6i1.23271.
- [4] A. Saputra, S. Suharyatun, W. Rahmawati, and Warji, "Pengaruh Pola Pengolahan Terhadap Efisiensi Pengolahan Tanah Menggunakan Traktor Tangan," *J. Agric. Biosyst. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 450–460, 2023.
- [5] M. W. Rozzinkin, A. Finali, I. Yuniwati, E. N. Sari, and C. Anam, "Analisis Pengujian Performa Mesin Pengembur Tanah Berdasarkan Pola Jalan Dengan Sistem Pisau Rotary," *J. Sci. Res. Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 845–857, 2024, [Online]. Available: <https://idm.or.id/JSCR/index.php/JSCR/article/view/14>
- [6] Z. Yao, C. Zhao, and T. Zhang, "Agricultural Machinery Automatic Navigation Technology," *iScience*, vol. 26, no. 10, pp. 1–18, 2023, doi: 10.1016/j.isci.2023.108714. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004223027918>
- [7] F. Vandio, F. Dewanta, and B. Aditya, "Implementasi Raspberry Pi Pada Sistem Otomasi Dan Pemantauan," *e-Proceeding Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 1195–1200, 2024.
- [8] F. B. Setiawan, H. W. Kusuma, S. Riyadi, and L. H. Pratomo, "Penerapan PI Cam Menggunakan Program Berbasis Raspberry PI 4," *Cyclotr. J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 51–56, 2022.
- [9] I. K. Suryawan, A. A. G. Ekayana, and N. M. A. E. Dewi, "Implementasi Sistem Monitoring Kendaraan Berbasis IoT Menggunakan Modul GPS Neo-M8N," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 24, no. 2, pp. 145–154, 2024. [Online]. Available: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/MITe/article/view/14035>
- [10] S. Shinde *et al.*, "Advanced adaptive cruise control and vehicle to vehicle communication using LiDAR," *Multidiscip. Sci. J.*, vol. 6, no. 3, 2024, doi: 10.31893/multiscience.2024022.
- [11] W. C. Manalu, U. F. S. S. Pane, and M. Ramadhan, "Rancang Bangun Sistem Keamanan Sepeda Motor Menggunakan Modul GSM Berbasis Arduino," *J. Sist. Komput. Triguna Dharma (JURSIK TGD)*, vol. 2, no. 6, pp. 286–297, 2023, doi: 10.53513/jursik.v2i6.8575.
- [12] A. A. G. Ekayana, I. K. Suryawan, and N. M. A. E. Dewi, "Implementasi Sensor Optik untuk Pemantauan Kualitas Tanaman pada Sistem Pertanian Cerdas," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 24, no. 1, pp. 94–102, 2024. [Online]. Available: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/MITe/article/view/13892>
- [13] N. Wulantika, Tasmi, and R. M. Fajri, "Sistem Buka Tutup Terpal Secara Otomatis Pada Penjemuran Gabah Berbasis Telegram Berdasarkan Sensor Bh1750 (Sensor Cahaya) dan Rain Drop Sensor (Sensor Hujan)," *J. Intell. Networks IoT Glob.*, vol. 1, no. 1, pp. 60–74, 2023, doi: 10.36982/jinig.v1i1.3078.
- [14] W. Setiawan and M. R. A. Cahyono, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Alat Unwider Green Hose Dengan Motor 3 Phasa," *J. Instrumenasi dan Teknol. Inform.*, vol. 5, no. 2, pp. 94–102, 2024.
- [15] H. Wang and X. Wang, "Review on Key Technologies for Autonomous Navigation in Field Agricultural Machinery," *Agriculture*, vol. 15, no. 12, pp. 1–27, 2023, doi: 10.3390/agriculture15121297. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/12/1297>
- [16] M. Li, Y. Chen, and Z. Liu, "Closed-Loop Control and Obstacle Avoidance for Autonomous Ground Vehicles Based on Sensor Feedback," *Sensors*, vol. 22, no. 18, pp. 1–18, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6895>

- [17] S. A. Nurazizah, "Klasifikasi Produktivitas Padi di Kabupaten Jember Menggunakan Indeks Vegetasi NDVI Tahun 2023," vol. 1, no. 3, pp. 136–141, 2024.
- [18] A. R. Masdian, N. Bashit, and F. Hadi, "Analisis Produktivitas Padi Menggunakan Algoritma Machine Learning Random Forest Di Kabupaten Batang Tahun 2018 - 2022," *Elipsoida J. Geod. dan Geomatika*, vol. 6, no. 1, pp. 43–51, 2023, doi: 10.14710/elipsoida.2023.19023.
- [19] Z. A. Fajri, J. Juhadi, T. B. Sanjoto, and W. A. B. N. Sidiq, "Model Estimasi Produktivitas Padi Menggunakan NDVI Di Wilayah Kabupaten Demak Tahun 2021," *J. Geosaintek*, vol. 8, no. 3, pp. 279–289, 2022, doi: 10.12962/j25023659.v8i3.14900.
- [20] M. A. Smith, J. Zhang, and D. Patel, "Remote Sensing and Vegetation Indices for Smart Agriculture: A Review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 210, pp. 107462, 2023, doi:10.1016/j.compag.2023.107462. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169923001675>
- [21] (2023) RobotShop website. [Online]. Available: <https://uk.robotshop.com/products/sparkfun-spectral-sensor-breakout-board-as7263-nir-qwiic>
- [22] (2023) Cytron website. [Online]. Available: <https://www.cytron.io/p-tf-luna-tof-lidar-module-8-meters-distance-sensor>
- [23] (2023) ChiptronicX website. [Online]. Available: <https://chiptronicx.com/product/gygpsv1-neo-m8n-gps-module-subsistube-for-neo-6m-gy-neo8mv2-with-battery%EF%BC%89/>
- [24] (2024) Made-in-China website. [Online]. Available: https://id.made-in-china.com/co_tzhqlw/product_Round-Stainless-Steel-Wire-Cable-Stainless-Steel-Memory-Wire-Rope_uohhuhuusg.html
- [25] (2024) KPS Steel website. [Online]. Available: <https://kpssteel.com/besi-beton/cara-mengetahui-besi-beton-asli-dengan-yang-palsu/>
- [26] (2024) CanaKit website. [Online]. Available: <https://www.canaakit.com/raspberry-pi-4-4gb.html>
- [27] (2024) Automation Indo website. [Online]. Available: <https://automationindo.com/thermal-imager/berdayakan-bisnis-anda-dengan-motor-dc-dan-inverter-motor-12v-yang-penuh-power/>
- [28] (2024) Made-in-China website. [Online]. Available: https://id.made-in-china.com/co_gearbox-motor/product_90W-3-Phase-AC-Induction-Gear-Motor_ersouiosy.html
- [29] (2024) Ichibot Store website. [Online]. Available: <https://store.ichibot.id/product/limit-switch-3-kaki-omron-ss-5gl-spdt/>
- [30] (2024) Perintang website. [Online]. Available: <https://www.perintang.com/product/linear-actuator-motor-200mm-12v-dc/>
- [31] (2024) Richconn CNC website. [Online]. Available: <https://www.richconn-cnc.com/id/p/high-precision-spur-gear-series.html>
- [32] (2023) Edukasi Elektronika website. [Online]. Available: <https://www.edukasielektronika.com/2023/05/kabel-jumper-pengertian-dan-jenis-jenisnya.html>



{Halaman ini sengaja dikosongkan}