

Pengembangan Sistem Kendali Kamera Pemantauan Tank Berbasis Gerakan Kepala Menggunakan Pengendali PID (Proportional–Integral–Derivative)

Lisantino Prasetya D¹⁾ Desyderius Minggu ²⁾ Muhammad Ridwan³⁾
^{1),2),3)} Prodi Teknik Telekomunikasi Militer. Politeknik Angkatan Darat
Jl.Raya Anggrek No.1 Junrejo, Batu, Indonesia
E - mail : ¹⁾lisantinoprasetya5@gmail.com, ²⁾desyderius07@gmail.com,
³⁾ridwan.mtte20@gmail.com

Development of a Head-Movement-Based Tank Surveillance Camera Control System Using a PID (Proportional–Integral–Derivative) Controller

Abstract: Conventional tank monitoring systems using periscopes have problems: limited viewing angle, slow response, and poor night vision. To solve these problems, we developed a pan-mounted monitoring camera control system.-tilt that follows head movement-tracking) with the PID method. This system uses an IMU MPU sensor-6050 in driver's helmet, Arduino Nano to control servo, Bluetooth HC-05 for wireless communication, and a Raspberry Pi 3B+ that works as Edge Computing and is connected to a Night Vision camera. Every change in the head orientation position is immediately processed in a closed-loop control system. This system continuously corrects errors to keep the camera movement smooth and precise. Tests show that the PID algorithm with the best parameters can stabilize the position in 1.2 to 1.6 seconds without any mechanical overshoot. The System accuracy reaches 98.29% in the Pitch axis (vertical) and 98.08% in the Yaw axis (horizontal). The system is highly responsive, featuring a sensor update interval of 45 milliseconds and a very low average wireless communication latency of only 50.5 milliseconds. In conclusion, this mechatronic prototype successfully overcomes the limitations of passive systems, providing real-time visual monitoring.-time, precision, stability and reliability at night, thus increasing the situational awareness of the tank crew. Keywords: PID Control, Head Movement, Surveillance Camera, Raspberry Pi, IMU Sensor.

Abstrak: Sistem pemantauan tank konvensional yang memakai periskop punya masalah: sudut pandang terbatas, respons lambat, dan pengamatan buruk di malam hari. Untuk memecahkan masalah ini, kami buat sistem kontrol kamera pemantauan pan-tilt yang mengikuti gerakan kepala (head-tracking) dengan metode PID. Sistem ini memakai sensor IMU MPU-6050 di helm pengemudi, Arduino Nano untuk mengendalikan servo, Bluetooth HC-05 untuk komunikasi nirkabel, dan Raspberry Pi 3B+ yang bekerja sebagai Edge Computing serta terhubung ke kamera Night Vision. Setiap perubahan posisi orientasi kepala langsung diproses dalam sistem kontrol loop tertutup. Sistem ini terus-menerus mengoreksi kesalahan agar pergerakan kamera tetap halus dan presisi. Tes menunjukkan bahwa algoritma PID dengan parameter terbaik dapat menstabilkan posisi dalam 1,2 sampai 1,6 detik tanpa ada overshoot mekanis. Akurasi sistem mencapai 98,29 % di sumbu Pitch (vertikal) dan 98,08 % di sumbu Yaw (horizontal). Sistem ini sangat responsif dengan interval pembaruan sensor 45 milidetik dan rata-rata latensi komunikasi nirkabel yang sangat rendah, hanya 50,5 milidetik. Kesimpulannya, prototipe mekatronika ini berhasil mengatasi keterbatasan sistem pasif, memberi pemantauan visual real-time, presisi, stabil di malam hari, sehingga meningkatkan kesadaran situasional kru tank. Kata kunci: Kontrol PID, Gerakan Kepala, Kamera Pemantau, Raspberry Pi, Sensor IMU.

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di bidang pertahanan saat ini semakin mengandalkan sistem digital, sensor cerdas, dan tampilan visual imersif guna mendukung efektivitas misi militer. Penerapan antarmuka manusia-mesin (Human Machine Interface) pada kendaraan tempur dirancang untuk mempercepat proses pengambilan keputusan, menekan risiko human error, serta mengoptimalkan kesadaran situasional di medan operasi yang berisiko tinggi [1]. Oleh karena itu, kehadiran sistem kendali dan visual yang intuitif menjadi kunci utama kesuksesan operasi militer darat masa kini [2].

Seiring dengan tren otomatisasi pada alutsista seperti tank, sistem pengintaian (surveillance) yang responsif dan akurat sangatlah dibutuhkan. Salah satu terobosan inovatif yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan pergerakan kepala (head motion) manusia sebagai pengendali perangkat eksternal. Melalui teknologi ini, pengemudi tank mampu mengarahkan kamera pemantau tanpa menggunakan tangan (hands-free), sehingga arah pandangan mata dapat tersinkronisasi langsung dengan pergerakan kamera di luar kendaraan [3]. Pendekatan ini dinilai sangat efektif untuk mendongkrak efisiensi kerja kru saat

berada di lingkungan yang dinamis dan berbahaya.

Sebagai solusi atas terbatasnya jangkauan pandang dan lambatnya respon sistem konvensional, penelitian ini merancang sebuah sistem pengontrol kamera yang mengikuti arah gerak kepala pengemudi dengan menerapkan algoritma PID (Proportional Integral Derivative) [4]. Sistem ini bekerja dengan mendeteksi orientasi kepala secara real-time menggunakan sensor IMU (Inertial Measurement Unit), yang kemudian dijadikan titik acuan (setpoint) untuk menggerakkan aktuator servo pan-tilt pada kamera [5]. Proses pengontrolan loop tertutup ini akan membandingkan dan menghitung selisih antara sudut kamera dan sudut kepala, lalu error tersebut dikoreksi secara berkesinambungan oleh kontroler PID agar pergerakan kamera menjadi presisi, halus, dan responsive [6].

Metode PID dinilai sangat ideal karena menawarkan keseimbangan antara kecepatan reaksi dan kestabilan sistem. Secara spesifik, parameter Proportional mempercepat respon kamera, Integral meminimalkan sisa kesalahan agar posisi selaras dengan arah pandang, sementara Derivative bertugas meredam getaran dan mencegah lonjakan gerakan berlebih (overshoot) [7]. Perpaduan ketiga elemen

ini menghasilkan sistem yang stabil, cepat, dan akurat, sehingga mampu meningkatkan situational awareness pengemudi tank [8]. Selain itu, beban komputasinya yang ringan membuat PID sangat cocok diaplikasikan pada perangkat keras (embedded) di sektor pertahanan yang menuntut keandalan tinggi [9].

Sebagai alat utama sistem senjata (alutsista) andalan yang memiliki daya hancur dan daya tahan tinggi, tank sangat bergantung pada kemampuan pemantauan lingkungan sekitar untuk bernavigasi dan mendeteksi ancaman [10]. Kendala yang dihadapi saat ini adalah terbatasnya jarak pandang pengemudi karena hanya mengandalkan periskop tradisional dengan jangkauan pandang ke depan serta sudut toleransi $\pm 10^\circ$ ke sisi kiri dan kanan. Keterbatasan ini membuat medan di sekitar tank tidak dapat terawasi secara utuh [1]. Oleh karena itu, peningkatan sistem visual masih sangat diperlukan, khususnya untuk memaksimalkan pengamatan pada kondisi minim cahaya [11].

Meskipun purwarupa alat serupa pernah dikembangkan sebelumnya, rancangan terdahulu masih memiliki sejumlah kelemahan. Beberapa di antaranya adalah sistem yang belum merespons secara real-time (terdapat delay hingga 2 detik), proyeksi tampilan pada layar yang tidak simetris, dan belum

terintegrasinya fitur kamera malam (night vision) [12].

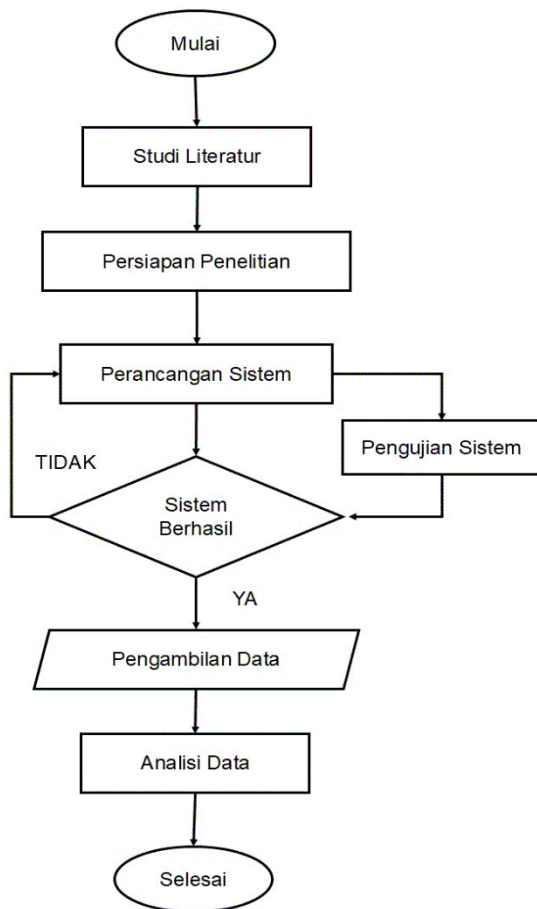
Untuk menyempurnakan kekurangan tersebut, penelitian ini mengusulkan penambahan modul Camera Raspberry Pi yang dilengkapi Night Vision pada helm pengemudi tank agar pandangan ke luar kendaraan menjadi lebih maksimal [13]. Sistem Stabilisasi Pasif [14]. mengembangkan stabilisasi kamera 3-sumbu menggunakan IMU MPU6050 dan PID, sedangkan [7] menerapkan kendali PID Ziegler-Nichols pada gimbal 2-sumbu untuk UAV. Keduanya mencapai waktu stabilisasi antara 0,7 hingga 3,57 detik. Namun, sistem ini murni penstabil pasif dan tidak dirancang untuk mengikuti orientasi arah pandang operator.

Pelacakan Berbasis Visual (CNN) [3]. mengembangkan sistem pengawasan otonom yang memadukan PID dengan face tracking berbasis Convolutional Neural Network (CNN). Walaupun adaptif dengan latensi 100 ms, pemrosesan visual memiliki beban komputasi sangat berat dan rentan gagal pada kondisi minim cahaya.

Pemantauan Statis Berbasis Raspberry Pi: [15]. membuktikan keandalan Raspberry Pi 3B+ untuk pengawasan lingkungan luar ruangan jangka panjang, namun sistem ini bersifat statis tanpa integrasi kontrol aktuator mekanis. Berpijak pada uraian masalah

tersebut, maka penelitian ini diangkat dengan judul "PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL KAMERA PEMANTAUAN TANK MENGGUNAKAN GERAKAN KEPALA BERBASIS PID (PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE)" [16].

METODE PENELITIAN



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Studi ini menggunakan eksperimen terapan yang fokus pada desain, pelaksanaan, dan uji sistem secara nyata. Pemilihan pendekatan ini didasari oleh tujuan penelitian yang tidak sekadar melakukan analisis konseptual, melainkan

juga membangun sebuah purwarupa sistem yang kinerjanya dapat dievaluasi secara langsung. Pada fase awal, tinjauan literatur dilakukan terhadap riset-riset terdahulu mengenai pelacakan wajah (face tracking), estimasi pose kepala (head pose estimation), dan pemanfaatan Raspberry Pi sebagai unit pemroses utama. Lebih lanjut, spesifikasi teknis seperti kebutuhan frame rate, rentang putaran aktuator servo, dan tingkat kepekaan kamera night vision juga ditetapkan agar sistem beroperasi sesuai dengan standar operasional yang dibutuhkan. Penelusuran pustaka tersebut difokuskan pada pemanfaatan Raspberry Pi Camera yang dilengkapi fitur Night vision, sistem pemantauan visual, sensor Inertial Measurement Unit (IMU), serta implementasi head tracking sebagai metode kendali gestur melalui pergerakan kepala. Selain itu, referensi terkait Human Machine Interface (HMI) pada kendaraan komersial maupun alutsista pertahanan turut menjadi landasan esensial guna mendesain bentuk interaksi manusia dan mesin yang lebih natural, cepat tanggap, dan aman ketika digunakan pada kondisi medan operasi yang dinamis.

Data dari studi pendahuluan tersebut dimanfaatkan untuk mengkaji prinsip kerja setiap instrumen teknologi, meninjau metodologi dari penelitian sebelumnya, sekaligus memetakan peluang pengembangan lebih lanjut

sebagai fondasi dalam merumuskan metode penelitian, menyusun arsitektur sistem, serta menetapkan indikator pengujian. Pendekatan terstruktur ini diharapkan dapat menciptakan sebuah sistem yang tidak hanya inovatif, tetapi juga ditopang oleh kaidah teoretis dan teknis yang solid. Dalam riset ini, variabel terikat yang diukur adalah performa keseluruhan dari sistem kendali servo dan kamera. Kinerja tersebut sangat bergantung pada modifikasi variabel bebas, yaitu parameter-parameter pengendali dari algoritma PID yang meliputi Konstanta Proporsional (K_p) untuk mengakselerasi reaksi sistem terhadap galat, Konstanta Integral (K_i) untuk menekan sisa galat, dan Konstanta Derivatif (K_d).

Kalibrasi dari kombinasi ketiga parameter tersebut akan diatur dan dievaluasi dampaknya terhadap beberapa indikator kinerja utama. Indikator evaluasi tersebut mencakup waktu respon (*response time*) atau durasi yang diperlukan sistem penggerak untuk menyentuh titik acuan (*setpoint*), tingkat overshoot atau simpangan lonjakan terjauh yang melampaui target, serta *error steady-state* yang merupakan sisa margin kesalahan antara posisi aktual dengan target saat sistem sudah berada pada kondisi stabil. Lebih dari itu, pengukuran juga dilakukan terhadap stabilitas sistem dalam mencapai dan mempertahankan

kondisi seimbang tanpa menghasilkan osilasi yang berlebihan, serta akurasi derajat ketepatan arah posisi kamera menuju titik sudut komando yang diberikan.

Dalam pengembangan purwarupa ini, pergerakan kamera dikendalikan menggunakan arsitektur kontrol loop tertutup (*closed-loop*). Titik acuan (*setpoint*) sistem bersumber dari orientasi sudut kepala pengemudi yang dibaca oleh sensor IMU MPU-6050. Untuk menyaring derau (*noise*) atau gangguan sinyal dari pembacaan sensor mentah, diterapkan algoritma *Complementary Filter* pada mikrokontroler di helm. Secara prinsip, filter ini bekerja dengan cara menggabungkan pembacaan akselerometer yang stabil untuk jangka panjang, dengan pembacaan giroskop yang cepat merespons pergerakan mendadak.

Sebagai jalur umpan balik (*feedback*), sistem mendeteksi posisi aktual dari kamera dengan membaca nilai sinyal analog (ADC) dari potensiometer internal yang ada pada motor servo MG996R. Nilai ADC ini kemudian dikalibrasi dan dipetakan (*mapping*) ke dalam satuan derajat ($^{\circ}$) agar satuannya sama persis dengan nilai *setpoint* dari sensor helm pengemudi. Selisih antara *setpoint* sudut kepala pengemudi dan *feedback* sudut aktual kamera inilah yang menghasilkan nilai simpangan atau *error*.

Nilai *error* tersebut kemudian diproses secara terus-menerus menggunakan algoritma kendali PID. Secara logika kerja, parameter Proporsional (P) memberikan dorongan kecepatan berdasarkan besarnya *error*, parameter Integral (I) menjumlahkan sisa *error* agar posisi tepat di titik nol, dan parameter Derivatif (D) membaca kecepatan perubahan *error* untuk mengerem servo agar tidak terjadi *overshoot* (kebablasan). Hasil perhitungan PID ini dikonversi menjadi sinyal penggerak (PWM) untuk motor servo. Untuk mencegah batas mekanis berlebih, keluaran sinyal dibatasi (*output limit*). Seluruh siklus ini dieksekusi periodik oleh Arduino dengan waktu *sampling* sekitar 45 hingga 50 milidetik, menjaga sinkronisasi gerakan tetap *real-time*.

HASIL PENELITIAN

Hasil perancangan alat dalam penelitian ini diwujudkan melalui dua purwarupa perangkat keras nirkabel yang saling terintegrasi, yaitu unit pengendali (transmitter) dan unit eksekutor (receiver). Unit pengendali dipasang pada helm pengemudi tank dan memakai sensor IMU MPU-6050 untuk mendeteksi perubahan orientasi kepala secara *real-time*. Data sudut kemudian diproses oleh Arduino Nano dan dipancarkan melalui modul Bluetooth HC-05. Unit eksekutor menempatkan unit kamera di lambung luar

kendaraan, menerima instruksi lewat modul Bluetooth HC-05 penerima. Arduino Nano pada unit eksekutor menerjemahkan instruksi menjadi perintah gerak bagi dua aktuator motor servo MG996R (pan-tilt), sehingga Pi Camera NoIR dapat mengarahkan pandangan. Sementara itu, Raspberry Pi 3B+ mengompresi video dan mengalirkannya nirkabel ke monitor Android di dalam kabin kru. Untuk memvalidasi keandalan integrasi, dilakukan pengujian stabilitas aliran data dari sensor IMU ke mikrokontroler penggerak, yang dipantau langsung melalui antarmuka Serial Monitor pada Arduino IDE. Log transmisi sensor orientasi kepala dicatat untuk memastikan bahwa instruksi perubahan sudut dapat dikirim cepat, stabil, dan tanpa gangguan lonjakan sinyal (*noise/jitter*) yang dapat membuat pergerakan kamera tersendat atau patah-patah. Analisis data Serial Monitor pada mengungkap dua indikator utama keberhasilan kinerja sistem. Pertama, stabilitas pembacaan (**smoothness**) terlihat jelas ketika nilai sudut Yaw dan Pitch berubah secara bertahap, dengan presisi dua desimal – contohnya pergerakan dari 111.95° ke 112.18° – tanpa lonjakan nilai yang tiba-tiba. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma *Complementary Filter* berhasil menyaring derau (*noise*) sensor dengan baik, sehingga instruksi ke motor servo tetap

stabil. Kedua, kecepatan pemrosesan (*processing speed*) terlihat dari selisih waktu (*timestamp*); mikrokontroler dapat memperbarui dan mengirimkan data orientasi kepala dalam 35 hingga 48 milidetik. Frekuensi transmisi yang tinggi sangat penting bagi algoritma PID, karena aliran data puluhan kali per detik membuat perhitungan daya dorong aktuator menjadi lebih reaktif, sehingga kamera selalu tersinkronisasi dengan gerakan kepala operator.

Tabel 1 Waktu Perekaman

Waktu Perekaman (Timestamp)	Sudut Yaw (Vertikal)	Sudut Pitch (Horizontal)	Interval Waktu / Delay Antardata
18:31:01.373	111.95°	93.30°	34 ms
18:31:01.408	111.99°	93.37°	35 ms
18:31:01.455	112.01°	93.41°	47 ms
18:31:01.503	112.05°	93.48°	48 ms
18:31:01.549	112.07°	93.52°	46 ms
18:31:01.597	112.09°	93.59°	48 ms
18:31:01.644	112.13°	93.66°	47 ms
18:31:01.691	112.14°	93.69°	47 ms
18:31:01.737	112.16°	93.76°	46 ms
18:31:01.785	112.18°	93.83°	48 ms
Rata rata			45 ms

Berdasarkan Tabel 1, Pengujian kecepatan pemrosesan data menunjukkan bahwa interval rata-rata pembaruan data sensor gerak di kepala pengemudi adalah sekitar 45 milidetik. Frekuensi pembaruan tinggi memastikan setiap perubahan sudut kepala langsung tercatat oleh sistem.

Selain mengukur interval pembaruan sensor, kami juga menguji latensi komunikasi nirkabel modul Bluetooth HC-05. Latensi komunikasi diukur dengan waktu tempuh paket data instruksi dari mikrokontroler transmitter (helm) sampai diterima penuh oleh mikrokontroler receiver (aktuator servo). Dari 50 percobaan, rata-rata latensi komunikasi adalah 50,5 milidetik. Angka latensi komunikasi dan interval pembaruan jauh di bawah ambang 100 milidetik, sehingga sistem berjalan secara real-time. Kecepatan respons ini membuat tidak ada jeda visual besar yang dapat memicu motion sickness bagi pengemudi saat memantau kondisi di luar tank melalui monitor.

Evaluasi ini dilakukan untuk mengukur seberapa andal dan seberapa baik algoritma kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative) bekerja dalam menggerakkan motor servo. Tujuannya agar kamera pengawas tank bisa menyesuaikan posisinya dengan sangat tepat, stabil, dan tanpa lonjakan berlebihan saat mengikuti arah pandangan

pengemudi. Pengujian dimulai dengan mencoba berbagai nilai konstanta kontrol, termasuk K_p , K_i , dan K_d . Setiap parameter diatur secara berbeda untuk melihat dampaknya pada sistem.

Evaluasi dibagi menjadi dua bagian. Pertama, pengujian statis, di mana kamera diberi titik acuan sudut tiba-tiba pada sumbu Pitch dan Yaw, seperti 30 derajat, 45 derajat, atau 90 derajat. Tujuannya untuk mengukur seberapa akurat kamera mencapai posisi yang ditentukan. Kedua, pengujian dinamis, yang lebih mengevaluasi respons sistem saat pengemudi mengubah posisi kepalanya tiba-tiba dari tengah (0 derajat) ke arah tertentu. Di sini, kita melihat bagaimana kamera bereaksi secara real time. Semua gerakan kamera dicatat dan dianalisis berdasarkan tiga indikator utama. Pertama, overshoot, yaitu seberapa besar kamera melampaui sudut target sebelum kembali ke posisi yang benar.

Kedua, settling time, atau berapa lama kamera membutuhkan waktu untuk benar-benar stabil di posisi target. Ketiga, steady-state error, yang mengukur selisih akhir antara posisi kepala pengemudi dengan posisi kamera saat sistem sudah tidak bergerak lagi. Dengan tiga ukuran ini, kita bisa menilai seberapa baik sistem kontrol PID bekerja dalam kondisi nyata.

Untuk memverifikasi karakteristik transien dan keandalan metode PID yang

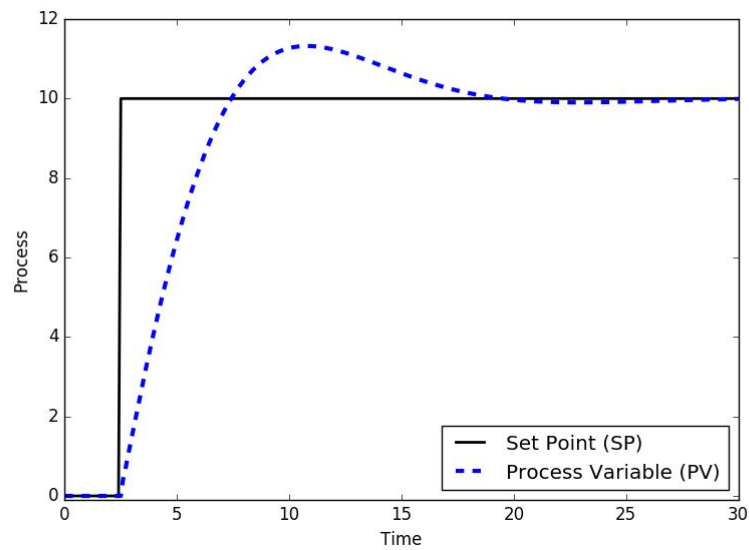
digunakan, respons dinamis sistem direkam dan divisualisasikan dalam bentuk kurva *setpoint* berbanding respons aktual (*actual response*) terhadap waktu. Pengujian ini menggunakan konfigurasi parameter terbaik hasil *tuning*, yaitu $K_p = 2,5$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0,4$ untuk sumbu Pitch, dan $K_p = 3,5$, $K_i = 0,2$, $K_d = 0,6$ untuk sumbu Yaw. Berdasarkan grafik respons dinamis pada Gambar 2, terlihat jelas bagaimana kontroler PID merespons perubahan sudut *setpoint* secara mendadak. Posisi aktual aktuator berhasil mengejar target tanpa melampaui titik acuan (no *overshoot*) dan mencapai kondisi stabil (*settling time*) sesuai dengan hasil pengujian pada Tabel 2 dan Tabel 3. Kurva ini secara empiris memvalidasi bahwa parameter Derivatif (K_d) sukses meredam osilasi sehingga aktuator tidak bergetar saat berhenti di titik target.

Tabel 2 Pengujian Tuning PID Sumbu Pitch (Target 45°)

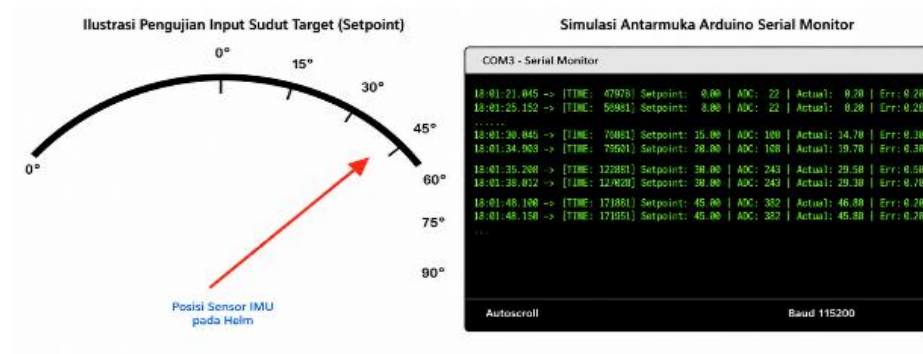
Kp	Ki	KD	Set Time	Overshoot
1,0	0.0	0.0	4,2s	Tidak ada
2,5	0,0	0.0	5,5s	ada
2,5	0,1	0.0	3,8s	ada
2,5	0,1	0,4	1,2s	Tidak ada

Tabel 3 Pengujian Tuning PID Sumbu Pitch (Target 45°)

Kp	Ki	KD	Set Time	Overshoot
1,5	0,0	0,0	5,1s	Tidak ada
3,5	0,0	0,0	6,8s	Ada
3,5	0,2	0,0	4,5s	Ada
3,5	0,2	0,6	1,6s	Tidak ada



Gambar 2 Grafik Respons Dinamis Setpoint vs Posisi Aktual Kamera



Gambar 3 Pengukuran

Tabel 3 Hasil Pengujian Akurasi Sumbu Pitch (Vertikal/Elevasi)

Sudut Kepala (°)	Target	Sudut Aktual Servo (°)	Selisih Error (°)	Persentase Error (%)	Persentase Akurasi (%)
15°		14,8°	0,2°	1,33%	98,67%
30°		29,5°	0,5°	1,67%	98,33%
45°		45,1°	0,1°	0,22%	99,78%
-15° (Bawah)		-14,6°	0,4°	2,67%	97,33%
-30° (Bawah)		-29,2°	0,8°	2,67%	97,33%
Rata-rata			0,4°	1,71%	98,29%

Tabel 4 Hasil Pengujian Akurasi Sumbu Yaw (Horizontal/Azimut)

Sudut Target Kepala (°)	Sudut Aktual Servo (°)	Selisih Error (°)	Persentase Error (%)	Persentase Akurasi (%)
15° (Kanan)	14,6°	0,4°	2,67%	97,33%
30° (Kanan)	29,3°	0,7°	2,33%	97,67%
45° (Kanan)	44,5°	0,5°	1,11%	98,89%
60° (Kanan)	58,9°	1,1°	1,83%	98,17%
90° (Kanan)	88,5°	1,5°	1,67%	98,33%
Rata-rata		0,84°	1,92%	98,08%

PEMBAHASAN

Setelah melalui berbagai pengujian yang dilakukan baik secara parsial maupun menyeluruh pada sistem kendali kamera pemantau tank yang berbasis pergerakan kepala, diperoleh beberapa data yang perlu dianalisis lebih dalam. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menggabungkan hasil pengujian, mengidentifikasi aspek teknis yang memengaruhi kinerja sistem, serta mengevaluasi kelayakan purwarupa (*proof-of-concept*) sistem kendali ini sebagai langkah awal pengembangan instrumen observasi pada kendaraan tempur.

Mengenai analisis kinerja pengendali PID, dari hasil uji respons pada sumbu Pitch dan Yaw, terlihat bahwa sistem mekanik gimbal kamera tidak cukup hanya mengandalkan parameter Proporsional (K_p). Meski nilai K_p tinggi bisa mempercepat pergerakan motor servo, hal ini justru menyebabkan inersia berlebih

yang menyebabkan overshoot dan osilasi. Kamera pun bergetar ketika berhenti. Oleh karena itu, penerapan parameter Derivatif (K_d) sangat penting. Pada sumbu Yaw yang menanggung beban mekanik lebih berat, dibutuhkan nilai K_d sebesar 0.6, lebih tinggi dibandingkan sumbu Pitch yang hanya memerlukan 0.4. Nilai K_d ini memberikan efek redaman yang efektif, membatasi kecepatan servo sesaat sebelum mencapai titik target. Hasilnya, algoritma PID berhasil memangkas waktu stabilisasi di bawah 2 detik, dengan gerakan kamera yang mulus tanpa guncangan.

Dalam evaluasi sistem gerak kepala, baik orientasi pitch (naik-turun) maupun yaw (kiri-kanan) menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi dan mengubah perubahan sudut pandang menjadi gerakan kamera pan-tilt secara real-time. Aktuator servo merespons

pergerakan pengemudi secara proporsional sesuai dengan setpoint referensi. Penerapan kontrol PID juga memberikan dampak besar terhadap stabilitas pergerakan kamera, terutama dalam menekan getaran dan mengurangi overshoot saat terjadi perubahan sudut tiba-tiba. Baik saat bergerak cepat maupun lambat, sistem tetap mampu mempertahankan akurasi pelacakan yang sesuai dengan arah pandangan pengemudi.

Dari sisi akurasi dan latensi transmisi data, tingkat akurasi sudut mekanik mencapai di atas 98%. Terdapat sedikit kesalahan sekitar 1-2% yang disebabkan oleh faktor backlash atau celah antar-gir pada motor servo MG996R, serta noise dari sensor IMU MPU6050. Namun, selisih sudut di bawah 1 derajat ini tidak mengganggu kualitas visual pengemudi. Terkait kecepatan sistem, pembaruan data orientasi dari sensor terbukti berjalan sangat cepat dengan rata-rata interval 45 milidetik. Sementara itu, untuk transmisi data instruksinya, modul Bluetooth HC-05 mampu mencatatkan latensi komunikasi nirkabel rata-rata sebesar 50,5 milidetik. Kedua angka ini berada jauh di bawah batas toleransi latensi *real-time* 100 ms, sehingga membuktikan bahwa integrasi antara pembacaan sensor dan sistem komunikasi nirkabel yang dibangun mampu

memberikan sinkronisasi gerak kepala yang sangat responsif.

Raspberry Pi dapat mengekode video secara lokal dengan kompresi H.264. Video yang dihasilkan memiliki kecepatan bingkai sekitar 30 FPS ketika berada di dalam kabin. Penglihatan malam yang menggunakan kamera NoIR dan LED inframerah juga dapat bekerja, menampilkan objek sampai jarak sekitar 15 meter pada gelap. Baterai lithium cukup kuat untuk memberi daya pada semua komponen tanpa masalah selama purwarupa berjalan. Karena tujuan utama penelitian ini adalah menguji efektivitas head-tracking PID, ketiga aspek tambahan—video, penglihatan malam, dan baterai—hanya dianggap sebagai pendukung awal dan belum diuji secara mendalam.

Mengenai ketahanan baterai lithium, pengujian menunjukkan bahwa baterai ini mampu memberikan tegangan stabil ke semua komponen selama operasional. Penurunan daya terjadi secara perlahan namun tetap dalam batas aman, sehingga tidak mengganggu kinerja servo, komunikasi data, atau streaming kamera. Baterai lithium memiliki keunggulan dibandingkan power bank konvensional karena tegangannya yang lebih stabil, kemudahan dibawa, dan

mendukung mobilitas sistem tanpa harus tergantung pada listrik eksternal.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa purwarupa ini telah berfungsi dengan baik dalam mengintegrasikan sistem mekatronika dan telekomunikasi nirkabel. Penggunaan kendali berbasis orientasi kepala menawarkan alternatif kontrol *hands-free* yang secara konseptual dapat menyederhanakan interaksi dibandingkan penggunaan *joystick* manual. Sistem ini menunjukkan respons yang sangat cepat, ditandai dengan interval pembaruan sensor sebesar 45 ms dan latensi komunikasi nirkabel rata-rata 50,5 ms, sehingga mampu meminimalkan keterlambatan respons mekanik. Selain itu, integrasi awal dengan kamera NoIR membuka potensi pemanfaatan sistem untuk pengamatan pada kondisi minim cahaya. Penerapan algoritma PID serta optimasi konektivitas nirkabel pada penelitian ini berhasil menghasilkan sebuah purwarupa (*proof-of-concept*) sistem observasi yang stabil, responsif, dan dapat menjadi landasan bagi pengembangan teknologi antarmuka manusia-mesin (HMI) alutsista di masa mendatang.

PENUTUP

Berdasarkan keseluruhan proses perancangan, pengujian, dan evaluasi dalam Pengembangan Sistem Kontrol

Kamera Pemantauan Tank Menggunakan Gerakan Kepala Berbasis PID, beberapa simpulan utama dapat diambil. Pertama, algoritma kontrol loop tertutup PID berhasil diterapkan dengan baik pada mekanisme pan-tilt kamera. Untuk sumbu Pitch (vertikal), nilai parameter yang paling optimal adalah $K_p = 2,5$, $K_i = 0,1$, dan $K_d = 0,4$. Hasilnya, waktu stabilisasi sistem mencapai 1,2 detik. Sedangkan untuk sumbu Yaw (horizontal) yang menanggung beban mekanis lebih berat, nilai terbaik diperoleh dari $K_p = 3,5$, $K_i = 0,2$, dan $K_d = 0,6$, dengan waktu stabilisasi sekitar 1,6 detik.

Nilai parameter turunan (K_d) sangat penting karena berperan sebagai peredam bagi getaran dan lonjakan sudut (*overshoot*). Tanpa K_d , sistem akan mengalami osilasi yang mengganggu akurasi. Dalam uji coba, sistem ini mampu mencapai presisi tinggi, dengan rata-rata akurasi 98,29% untuk sumbu Pitch dan 98,08% untuk sumbu Yaw. Selain itu, error saat kondisi stabil berhasil dikurangi hingga di bawah satu derajat, menunjukkan keandalan sistem kontrol.

Dari sisi responsivitas, sistem ini terbukti sangat cepat. Sensor mampu melakukan pembaruan data orientasi (*update interval*) rata-rata setiap 45 milidetik, sementara latensi komunikasi nirkabel melalui Bluetooth HC-05 tercatat

hanya 50,5 milidetik. Kedua angka ini berada jauh di bawah ambang batas standar sistem kendali *real-time* yaitu 100 ms. Hasil ini memenuhi target yang ditetapkan dan jauh lebih baik daripada desain prototipe sebelumnya yang sempat memiliki jeda hingga dua detik.

Di luar fokus utama sistem kendali PID, purwarupa ini juga berhasil menunjukkan fungsi awal (proof-of-concept) pada tiga aspek penting: komputasi tepi, pengamatan malam, dan catu daya. Raspberry Pi 3B+ terbukti mampu menjalankan kompresi video H.264 secara lokal dengan kecepatan frame rate sekitar 30 FPS. Kamera NoIR bersama LED inframerah terlihat mampu menangkap gambar dalam kondisi gelap, dengan jangkauan perkiraan sekitar 10 hingga 15 meter. Meski hasil awal ini menunjukkan kemajuan yang positif, fitur-fitur pendukung ini tetap dianggap sebagai bukti konsep. Mereka masih membutuhkan pengujian lebih lanjut dalam skenario eksperimental di luar lingkup penelitian ini untuk mencapai tingkat validasi penuh.

Pengujian visual pada kondisi gelap juga memberikan hasil positif. Kamera NoIR bersama LED inframerah berhasil menghasilkan citra objek yang jelas bahkan dalam kegelapan total (0 Lux). Jangkauan pandang yang efektif berkisar antara 10 hingga 15 meter, menjadikan

sistem layak digunakan dalam operasi malam hari.

Berdasarkan temuan selama penelitian, ada sejumlah rekomendasi untuk pengembangan sistem di masa depan. Langkah pertama, motor servo MG996R sebaiknya diganti dengan motor brushless (BLDC) atau motor stepper yang dilengkapi encoder eksternal. Tujuannya adalah untuk mengurangi celah mekanis (backlash) antar gigi, sehingga error stabil bisa ditekan semakin mendekati nol. Ini akan meningkatkan ketepatan gerakan dan daya tahan sistem.

Di samping itu, agar sistem cocok digunakan dalam kondisi medan militer nyata, sistem komunikasi data dan video perlu ditingkatkan. Daripada menggunakan Bluetooth atau hotspot, sebaiknya digunakan modul frekuensi radio (RF) taktis militer. Jaringan ini harus didukung oleh enkripsi tingkat tinggi seperti Quantum Cryptography atau teknik Frequency Hopping. Tujuannya adalah untuk mencegah penyadapan data visual maupun gangguan sinyal yang bisa disebabkan oleh musuh.

Untuk meningkatkan performa pengamatan malam hari, disarankan untuk menambahkan rangkaian High-Power LED IR Array eksternal atau lampu sorot inframerah khusus pada badan tank. Perangkat iluminasi taktis ini akan

memperluas jarak deteksi kamera NoIR, mampu menjangkau hingga lebih dari 30 meter. Ini sangat membantu dalam meningkatkan kesadaran situasional (situational awareness) pada jarak jauh.

Terakhir, sisa kapasitas komputasi pada Raspberry Pi masih banyak tersedia. Teknologi Kecerdasan Buatan (AI) bisa dimanfaatkan dengan menyematkan algoritma deteksi objek ringan seperti YOLO Nano. Dengan demikian, sistem akan mampu melakukan pemindaian otomatis, mengunci, serta melacak target yang bergerak di sekitar tank — termasuk pasukan infanteri maupun kendaraan musuh. Fitur ini akan membuat sistem lebih cerdas dan mandiri dalam lingkungan operasi yang kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Pradana, Raziqa Izza Langundi, Djoko Pramono, and Nur Ida Iriani, "Analisis Perbandingan Kinerja Pola MVVM dan MVP pada Sistem Dasbor Android," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 14, no. 2, pp. 87–95, 2025.
- [2] Doris Juarsa, Muhammad Fadli, and E. R. Susanto, "Rancang Bangun Modul Kontrol Berbasis PID untuk Pengaturan Kecepatan dan Posisi Motor DC Menggunakan STM32 dan Rotary Encoder," *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 4, no. 4, pp. 845–859, 2025, doi: 10.55123/insologi.v4i4.6081.
- [3] V. Balaji Gurav, A. Umesh Eyyappadi, K. Ramesh Parmar, and D. Shete, "Autonomous Security and Surveillance System using Deep Learning and Face Tracking".
- [4] D. Krisla *et al.*, "SPEKTRAL : Journal of Communications, Antennas and Propagation Jurusan Teknik Elektro," *Politek. Negeri Jakarta*, vol. 1, p. 24, 2023.
- [5] Y. F. Irawan, "Pengembangan Modul Pembelajaran Berbasis Sensor Inertial Measurement Unit (IMU) untuk Meningkatkan Keterampilan Teknik Tendangan Sepak Bola Mahasiswa Pendidikan Jasmani," vol. 7, no. 02, pp. 973–982, 2025.
- [6] B. Satria and F. Ramadhani, "Pan and Tilt Camera Object Tracking Using Ziegler-Nichols Method for Control PID," *J. Ilmu Komput. dan Sist. Inf.*, vol. 6, no. September, pp. 94–102, 2023.
- [7] T. K. Priyambodo, "Implementasi Sistem Kendali PID pada Gimbal Kamera 2-sumbu dengan Aktuator Motor Brushless," *IJEIS (Indonesian J. Electron. Instrum. Syst.*, vol. 7, no. 2, p. 111, 2017, doi: 10.22146/ijeis.18238.
- [8] J. S. Komputer, K. Buatan, S. Apriyani, R. T. Subagio, and W. Ilham, "Aplikasi Monitoring Keamanan Ruang Menggunakan IP Camera Berbasis Android," vol. IV, no. September, pp. 1–7, 2020.
- [9] P. K. Prayogo, L. P. Pratama, and D. Junesco, "Home Security System Based on Raspberry Pi and PIR Sensor Using WhatsApp Messenger," *J. Glob. Eng. Res. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: 10.56904/j-gers.v4i1.134.
- [10] I. K. Okantara and A. Carna, "DALAM PENGEMBANGAN ALUTSISTA MEDIUM TANK HARIMAU TAHUN 2019-2024," vol. 02, no. 02, 2025.
- [11] I. J. P. Wibowo, G. Dewantoro, and D. Susilo, "Stabilisasi Orientasi Kamera 3-Axis Berbasis Pengendali PID untuk Fabrikasi Gimbal Ekonomis dan Praktis," *JST (Jurnal Sains dan Teknol.*, vol. 12, no. 3, pp. 681–690, 2024, doi: 10.23887/jstundiksha.v12i3.47080.
- [12] P. Chaware, V. Dhamdhere, M. Sawane, S. Patil, P. Sarode, and K. Ukey, "Development of Intelligent Video Surveillance System Using Deep Learning and Convolutional Neural Networks: A Proactive Security Solution †," *Eng. Proc.*, vol. 114, no. 1, pp. 1–13,

- 2025, doi: 10.3390/engproc2025114011.
- [13] E. G. Utama, T. Triwiyanto, T. Rahmawati, V. Abdullayev, and M. Abdulhamid, "Implementation of Gyro Accelerometer Sensor for Measuring Respiration Based on Inhale And Delphi Based Exhale," *J. Teknokes*, vol. 16, no. 2, pp. 236–241, 2023, doi: 10.35882/teknokes.v16i2.477.
- [14] T. Cepat, R. A. Pratama, and B. S. Wibowo, "Cemerlang Multidisciplinary Science Optimalisasi Android sebagai Web Server Daring dengan Integrasi Virtual Private Network".
- [15] "Methods Ecol Evol - 2021 - Wilkinson - A Raspberry Pi-based camera system and image processing procedure for low cost and.pdf."
- [16] B. A. Iza, C. Imron, and Mardijah, "Adaptive Trajectory Control for Quadcopter using Extended Kalman Filter-Based Self-Tuning PID under Gaussian Disturbances," *J. Robot. Control*, vol. 6, no. 5, pp. 2249–2259, 2025, doi: 10.18196/jrc.v6i5.27955.