

Prototype Stabilitas Shockbreaker Terhadap Chasis Mobil(Ambulans) Menggunakan Motor Servo dan Metode PID

1st Jerico
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

jerico@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Dr. Basuki Rahmat
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

basukir@telkomuniversity.ac.id

3rd Erwin Susanto
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

erwinelektro@telkomuniversity.ac.id

Ambulans sebagai sarana transportasi medis sering mengalami guncangan berlebihan akibat kondisi jalan yang tidak rata, terutama di daerah dengan infrastruktur terbatas. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem suspensi aktif berbasis kontrol PID untuk meningkatkan stabilitas kendaraan ambulans. Prototipe dibangun menggunakan chasis mobil RC skala 1/16 dengan empat motor servo sebagai aktuator suspensi aktif. Sensor MPU6050 digunakan untuk mendeteksi kemiringan roll dan pitch secara real-time, sedangkan kontrol PID mengatur posisi servo untuk menjaga kestabilan chasis. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mendeteksi kemiringan dengan error 0,1–1%. Respon tercepat dicapai pada kemiringan roll 8° dengan settle-time 1,6 detik dan pitch 2° dengan settle-time 2,1 detik. Sistem terbukti efektif mengurangi guncangan dan menjaga kestabilan kendaraan pada berbagai kondisi kecepatan dan kemiringan jalan

Kata kunci: suspensi aktif, kontrol PID, MPU6050, ambulans, stabilitas kendaraan, servo motor

I. PENDAHULUAN

Ambulans adalah alat transportasi yang termasuk sebagai bentuk pelayanan medis dan fungsi ambulans yang utama adalah untuk membantu berbagai kondisi gawat darurat, seperti kecelakaan lalu lintas, pasien serangan jantung mendadak, wanita yang ingin melahirkan dan lain sebagainya. Lebih tepatnya, fungsi ambulans adalah untuk mengangkut serta memberikan pertolongan pertama pada pasien selama dalam perjalanan menuju rumah sakit [1]. Ambulans sangat diperlukan pada saat kondisi darurat yang merujuk pada UGD (Unit Gawat Darurat) atau IGD (Instalasi Gawat Darurat).

Namun, di Indonesia, kondisi jalan yang tidak rata, bergelombang, atau memiliki kemiringan yang tajam merupakan hal yang umum ditemui, terutama di daerah-daerah dengan infrastruktur yang belum memadai. Hal ini menimbulkan permasalahan berupa guncangan yang berlebihan pada ambulans, yang dapat mengganggu kenyamanan dan keselamatan pasien serta peralatan medis di dalamnya. Kasus seperti seorang wanita yang melahirkan, pasien serangan jantung dan lain sebagainya di dalam ambulans di medan yang tidak rata menggambarkan betapa mendesaknya kebutuhan akan sistem stabilitas yang mampu mengatasi tantangan ini demi keselamatan dan kenyamanan pasien.

Masalah utama pada bidang ini adalah kurangnya stabilitas pada kendaraan ambulans saat melewati jalan yang kemiringannya tidak rata seperti ke pelosok perbukitan, yang

diakibatkan oleh karakteristik *shockbreaker* konvensional yang kurang mampu meredam guncangan besar dalam kondisi medan yang berat. Ketidakmampuan *shockbreaker* untuk menyeimbangkan guncangan ini disebabkan oleh sistem kontrol pasif yang digunakan pada kendaraan konvensional, yang tidak dapat menyesuaikan diri secara otomatis terhadap kondisi jalan yang berubah-ubah. Akibatnya, jalanan yang tidak rata ini ditransmisikan dari jalan langsung memengaruhi chasis dan ruang dalam ambulans, memberikan dampak negatif berupa ketidaknyamanan dan bahkan risiko cedera tambahan bagi pasien dalam perjalanan

Oleh karena itu solusi yang diusulkan dalam penelitian ini adalah upaya penerapan sistem kontrol PID pada *shockbreaker* ambulans untuk mengurangi dampak guncangan terhadap chasis. Salah satu keuntungan dari kontrol PID adalah dapat meningkatkan respon keluaran dengan waktu respon yang cepat (kurang dari 0,1 detik) terhadap nilai set point [2]. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam merespons perubahan secara cepat dan tepat, sehingga sistem *shockbreaker* dapat menyesuaikan diri dengan kondisi medan yang bervariasi. *Prototype* yang dikembangkan akan menggabungkan sensor akselerasi dan sensor *gyroscope* untuk mendeteksi kondisi jalan secara *real-time*, di mana data ini kemudian diolah oleh sistem kontrol PID yang menghasilkan respons optimal pada *shockbreaker*. Dengan implementasi ini, diharapkan ambulans dapat melewati jalanan yang tidak rata dengan lebih stabil, sehingga meningkatkan keselamatan operasional ambulans dalam situasi serta meminimalkan risiko operasional.

II. STABILITAS SHOCKBREAKER CHASIS KENDARAAN AMBULANS

A. Sistem Kontrol *Proportional-Integral-Derivative*

Kontroler *Proportional-Integral-Derivative* (PID) adalah salah satu jenis dari pengendalian sistem, kontrol ini menggabungkan beberapa elemen yaitu elemen *proportional*, elemen *integral* dan elemen *derivative*. Kontrol PID dapat digunakan untuk sistem terbuka dan sistem tertutup, apabila kontrol merupakan sistem kendali tertutup ia akan memiliki umpan balik terhadap hasil keluaran yang tidak sesuai dengan masukannya, sehingga terdapat sensor yang berfungsi mengolah kembali sinyal – sinyal yang salah untuk diproses

kembali, sedangkan untuk sistem kendali terbuka, hasil dari sistem tidak akan ada umpan balik apabila tidak sesuai dengan masukannya [3].

$$u(t) = u(t) - 1 + Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \sum e(t) + Kd \cdot e(t) - e(t - 1) \tag{1}$$

B. Kontrol PID pada Sistem Shockbreaker

Salah satu penerapan kontrol PID yang umum adalah pada *Balancing Robot*. *Balancing Robot* (robot penyeimbang) adalah suatu jenis mobile robot yang pada kanan kirinya terdapat satu buah roda. Robot dua roda ini tidak akan bergerak dengan seimbang apabila tidak diberikan kontroler. Sistem pada *balancing robot* ini adalah pengembangan dari sistem pendulum terbalik atau disebut *inverted pendulum* yang pada kereta beroda diletakkan diatasnya [4]. Sistem ini menggunakan kontrol PID untuk menjaga keseimbangan robot agar tidak jatuh ke depan atau ke belakang, dengan memanfaatkan sensor *gyro* sebagai pendeteksi kemiringan. Dalam penelitian ini, konsep tersebut dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan dua roda tambahan di depan, sehingga membentuk sistem stabilisasi kendaraan empat roda.

C. Sistem Kendali pada Quadcopter

Quadcopter merupakan kendaraan nirawak yang menggunakan 4 motor sebagai alat penggerakannya. Setiap motor dipasangkan sebuah *propeller* (baling- baling) yang berfungsi menghasilkan gaya angkat (*thrust*). *Thrust* ditentukan besar kecil *propeller* (*radius*) dan kecepatan putar motor (rpm) Kombinasi gerakan motor pada *quadcopter* yaitu motor depan dan belakang berputar searah jarum jam, sedangkan motor kiri dan kanan berputar berlawanan arah jarum jam.

Sistem kendali PID merupakan kombinasi kontrol Proporsional, Integral, dan Derivatif yaitu sebuah mekanisme umpan balik untuk memperkecil kesalahan sistem. Nilai kesalahan sistem didapatkan dari selisih present value (nilai keluaran terukur) dengan set point yang diinginkan [5]. Dalam penelitian ini, kontrol PID diaplikasikan pada *shockbreaker* ambulans untuk meminimalkan guncangan pada chasis, hal ini memungkinkan pasien didalam ambulans minim terguncang saat hendak melakukan operasi darurat di perjalanan menuju rumah sakit.

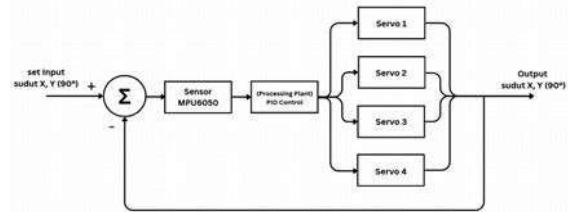
D. Konsep Sistem Suspensi

Suspensi merupakan bagian yang sangat penting bagi sebuah kendaraan. Suspensi dirancang untuk menyerap getaran ketika mobil melewati jalan yang bergelombang maupun jalan yang rusak. Sistem suspensi juga sangat berpengaruh dengan kenyamanan pengemudi maupun penumpang kendaraan [6]. Metode PID Pada Stabilitas Suspensi Kendaraan Kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) adalah salah satu metode pengendalian yang paling sering digunakan dalam sistem kontrol untuk menjaga kestabilan dan mencapai kondisi yang diinginkan pada berbagai sistem dinamis. Pada penelitian ini, yang berbentuk prototype, kontrol PID diterapkan untuk menjaga kemiringan 90° pada sumbu Y dan X, stabilitas *shockbreaker* yang dipasang pada lengan motor servo dan motor servo yang terpasang chasis mobil RC skala 1/16, bertujuan untuk mengurangi dampak guncangan yang diakibatkan oleh perubahan medan yang tidak rata atau miring.

III. METODE

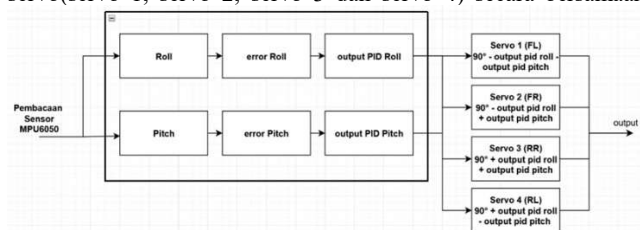
A. Desain Sistem

Sistem dirancang untuk mengimplementasikan kontrol PID pada stabilitas suspensi kendaraan menggunakan prototype berupa chasis mobil RC skala 1/16 dengan motor servo sebagai aktuator yang terhubung ke *shockbreaker*, serta sensor gyro MPU 6050 sebagai pendeteksi kemiringan.



GAMBAR 1 Diagram Blok Sistem PID Method

Pada Gambar 3.1 merupakan diagram blok yang menunjukkan alur kerja pada prototype shockbreaker menggunakan sistem kendali PID dengan input set point 90° pada sumbu X(roll) dan Y(pitch), sensor MPU6050 berfungsi sebagai detektor kemiringan pada chasis mobil, kemudian mengirimkan data ke *processing plant* yaitu Arduino Mega 2566 yang berfungsi sebagai mikrokontroler yang mengendalikan sistem, data dari sensor MPU6050 akan di proses oleh mikrokontroler yang menjalankan algoritma control PID, yang kemudia menghasilkan sinyal kontrol untuk menggerakkan keempat servo(servo 1, servo 2, servo 3 dan servo 4) secara bersamaan.



GAMBAR 2 Diagram Blok *Processing Plant* distribusi Servo Pada Gambar 3. 2 merupakan diagram blok sistem kendali PID pada distribusi servo sebagai shockbreaker aktif dengan nama FL(*Front Left*) sebagai servo 1, FR(*Front Right*) sebagai servo 2, RR(*Rear Right*) sebagai servo 3 dan RL(*Rear Left*) sebagai servo 4, dengan 2 kendali input yaitu *roll* dan *pitch* yang dideteksi oleh sensor MPU6050, sistem kendali PID bekerja secara paralel untuk memproses kedua parameter tersebut secara independen, pada jalur roll data pembacaan sudut *roll* dari sensor akan dihitung selisihnya pada blok (*error Roll*) terhadap nilai set poin dengan hitungan mekanis seperti ini:

$$\text{error roll} = \text{sudut sekarang} - \text{set point} \tag{2}$$

rumus output PID Roll :

$$u(t) = u(t) - 1 + Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \sum e(t) + Kd \cdot e(t) - e(t - 1) \tag{3}$$

Begitu juga dengan jalur *pitch* data pembacaan *pitch* akan menghasilkan *error pitch* yang kemudia diproses oleh mikrokontroler untuk menghasilkan output PID *Pitch* output dari kedua ini (*roll* dan *pitch*) kemudia didistribusikan pada keempat servo dengan kombinasi yang berbeda untuk setiap posisi roda.

Distribusi servo:

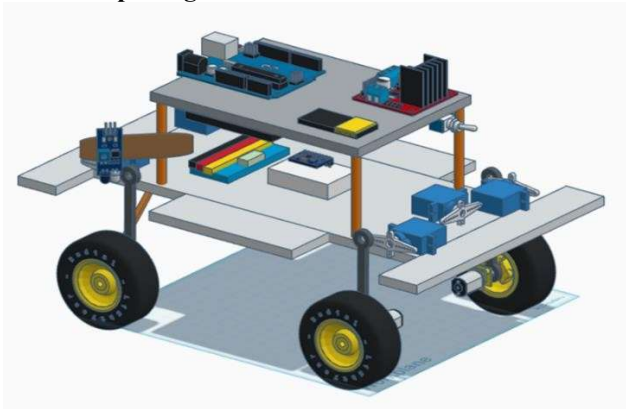
$$FL = \text{set point} - \text{output PID Roll} - \text{output PID Pitch} \tag{4}$$

$$FR = \text{set point} - \text{output PID Roll} + \text{output PID Pitch} \tag{5}$$

$$RR = \text{set point} + \text{output PID Roll} + \text{output PID Pitch} \tag{6}$$

$$RL = \text{set point} + \text{output PID Roll} - \text{output PID Pitch} \tag{7}$$

B. Desain perangkat keras

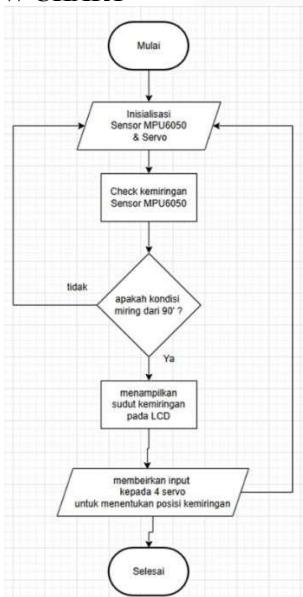


GAMBAR 3
Desain Perangkat Keras

Pada Gambar 3.3 memperlihatkan desain perangkat keras prototipe stabilitas *shockbreaker* berbasis chasis RC. Sistem ini terdiri dari dua platform utama yang dihubungkan oleh empat motor servo sebagai aktuator suspensi aktif pada setiap roda. Platform bawah berfungsi sebagai chasis yang terintegrasi langsung dengan roda, motor servo, *driver* PCA9685, sensor MPU6050, dan sensor IR Flying Fish. Sementara itu, platform atas berperan sebagai bodi kendaraan yang menampung komponen elektronik utama seperti Arduino Mega, modul NRF24L01, *driver* L298N, dan saklar on/off.

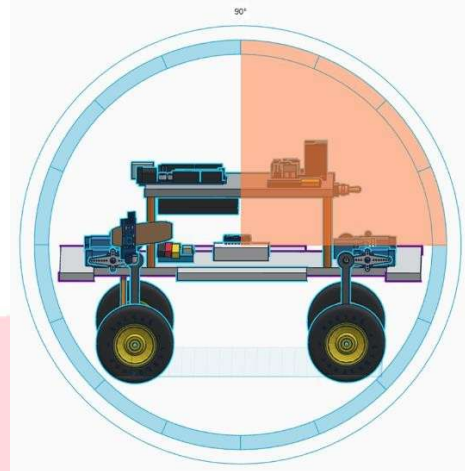
Keempat motor servo dipasang pada posisi *Front Left* (FL), *Front Right* (FR), *Rear Right* (RR), dan *Rear Left* (RL), dengan tugas utama menstabilkan kendaraan secara horizontal terhadap guncangan dan kemiringan jalan. Sensor MPU6050 digunakan untuk mendeteksi sudut *roll* dan *pitch*, sedangkan modul NRF24L01 memungkinkan komunikasi nirkabel untuk transmisi data sensor dan sinyal kendali secara *real-time*. Dengan desain mekanis ini, sistem secara aktif dapat menyesuaikan tinggi setiap roda berdasarkan masukan dari sensor MPU6050 dan keluaran kontroler PID, sehingga bodi kendaraan tetap stabil meskipun roda menghadapi medan yang tidak rata, bergelombang, atau miring.

C. Desain FLOW CHART



GAMBAR 4
Desain Flow Chart

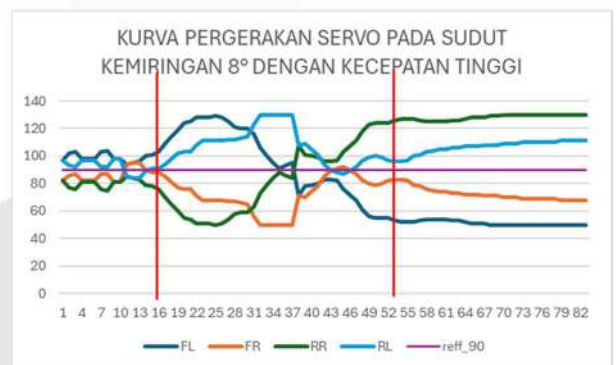
Sudut 90° digunakan sebagai acuan karena pada geometri matematika yang mempelajari sifat-sifat ruang, bentuk, ukuran, garis, sudut, bidang serta bangun (datar dan ruang) sudut siku yang vertikal (tegak) dengan penulisan 90°, untuk implementasinya dapat di lihat pada Gambar 3.5.



GAMBAR 5
Implementasi Pada Kendaraan

D. PENGUJIAN SISTEM

Untuk memvalidasi kinerja sistem suspensi aktif berbasis PID, dilakukan pengujian terhadap respons motor servo terhadap perubahan kemiringan yang terdeteksi oleh sensor MPU6050. Pengujian ini bertujuan untuk menunjukkan kemampuan servo dalam menyesuaikan posisi suspensi secara dinamis sesuai dengan sudut kemiringan yang terjadi pada chasis kendaraan. Berikut adalah contoh hasil pengujian pada kondisi roll dengan kemiringan 8° pada kecepatan tinggi.



GAMBAR 6
Kurva Pergerakan Servo pada Sudut Kemiringan 8° dengan Kecepatan Tinggi

Pada Gambar 3.6 menunjukkan kurva respons keempat motor servo (FL, FR, RR, RL) dalam menanggapi kemiringan yang sama. Setelah sistem PID memproses data dari sensor, keempat servo bergerak secara berbeda-beda sesuai dengan distribusi kontrol yang telah dirancang (persamaan 4-7). Servo pada sisi yang mengalami penurunan (kiri) akan menaikkan posisinya, sedangkan servo pada sisi yang naik (kanan) akan menurunkan posisinya, sehingga chasis kembali mendekati posisi stabil (*reff_90*). Respon sistem *settle-time* terjadi dalam 3 detik dengan *overshoot* minimal, menunjukkan bahwa algoritma PID berhasil mengoptimalkan gerakan servo untuk menstabilkan kendaraan.



GAMBAR 7

Kurva Pergerakan Servo pada Sudut Kemiringan 4 dengan Kecepatan Tinggi

Pada Gambar 3.7 menampilkan kurva respons motor servo pada keempat roda terhadap kemiringan pitch yang sama. Servo pada roda depan (FL dan FR) akan menurunkan posisinya, sedangkan servo pada roda belakang (RR dan RL) akan menaikkan posisinya, sesuai dengan prinsip distribusi kontrol PID untuk sumbu *pitch* (persamaan 4-7). Respon sistem menunjukkan settling time sebesar 2.2 detik, dengan overshoot yang terkontrol, membuktikan bahwa algoritma PID mampu menstabilkan chasis dengan baik meskipun terjadi gangguan pada arah depan-belakang.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian

Hasil dari pengujian sistem kendali PID shockbreaker otomatis pada mobil RC dilakukan dengan 2 variasi kemiringan, variasi 1 yaitu *pitch* seperti pada gambar 4.1 pengujian alat variasi 1 *pitch* dan variasi 2 yaitu *roll* seperti pada gambar 4.2 pengujian alat versi 2 *roll*. Untuk pengujian pada masing masing kemiringan diuji juga dengan 3 kondisi kecepatan yang berbeda yaitu kondisi kecepatan rendah, kecepatan sedang, kecepatan tinggi dan juga dengan rata-rata hasil dari 5 kali percobaan pada masing masing kecepatan dan sudut kemiringan.

TABEL 1
Kondisi Kecepatan

Kecepatan	Throttle Analog Input	RPM	Speed(m/s)
Rendah	0-450	0-209	0-0.7
Sedang	450-700	240-247	0.8-0.9
Tinggi	700-1023	350-450	1.3-1.4



GAMBAR 8

Pengujian Alat Variasi 1 Pitch

TABEL 2

Hasil Pengujian Sistem Variasi 1 Pitch Sudut Kemiringan 2° dengan Kecepatan Rendah, Sedang dan Tinggi

Sudut	Kecepatan	Settle-time(detik)	Max overshoot(sudut)	Steadystate error(sudut)
2°	Rendah	4.18	4.58°	1.72°
2°	Sedang	3.28	5.7°	1.4°
2°	Tinggi	2.34	1.4°	1°

Pada variasi 1 *pitch* sudut kemiringan 2° dengan kecepatan rendah, sedang dan tinggi, sistem mampu mendeteksi kemiringan jalan dan melakukan pengkondisian kemiringan mobil melalui suspensi aktif dengan baik pada kecepatan rendah dengan kemiringan jalan 2 derajat, dimana sistem dapat mengkondisikan mobil kembali ke horizontal dengan rata-rata waktu berkisar (4.18 detik), *steadystate* error 1.7° dan maksimal *overshoot* pada 4.6°, untuk kecepatan sedang sistem dapat mengkondisikan mobil kembali ke horizontal dengan rata-rata waktu berkisar (3.28 detik), *steadystate* error 1.4° dan maksimal *overshoot* pada 5.7°, untuk kecepatan tinggi sistem dapat mengkondisikan mobil kembali ke horizontal dengan rata-rata waktu berkisar (2.34 detik), *steadystate* error 1° dan maksimal *overshoot* pada 1.4°.

Secara keseluruhan hasil pengujian pada variasi 1 *pitch* sudut kemiringan 2° dengan kecepatan rendah, sedang dan tinggi menunjukkan bahwa kecepatan gangguan berpengaruh signifikan terhadap performa sistem suspensi aktif. Kecepatan tinggi menghasilkan *settling-time* tercepat (2.34 detik), *overshoot* terkecil (1.4°), dan *steady-state* error (1°), hal ini mengindikasikan bahwa sistem kontrol PID lebih efektif meredam gangguan dengan kecepatan tinggi dibandingkan kecepatan rendah.

TABEL 3

Hasil Pengujian Sistem Variasi *Pitch* 1 Sudut Kemiringan 3° dengan Kecepatan Rendah, Sedang dan Tinggi

Sudut	Kecepatan	Settle-time(detik)	Max overshoot(sudut)	Steadystate error(sudut)
3°	Rendah	5.26	4.4°	2.1°
3°	Sedang	4.2	0.8°	1.3°
3°	Tinggi	2.12	1°	1.3°

Pada variasi 1 *pitch* sistem mampu mendeteksi kemiringan jalan dengan kemiringan 3° dan melakukan pengkondisian kemiringan mobil melalui suspensi aktif dengan baik pada kecepatan rendah, sedang dan tinggi, pada kecepatan rendah dimana sistem dapat mengkondisikan mobil kembali ke horizontal dengan rata-rata waktu *settle-time* (5.26 detik), *steady-state* error (2.1°) dan maksimal *overshoot* 4.4°, untuk kecepatan sedang dengan rata-rata waktu *settle-time* (4.2 detik), *steady-state* error (1.3°) dan maksimal *overshoot* 0.8°, untuk kecepatan tinggi dengan rata-rata waktu *settle-time* (2.12 detik), *steady-state* error (1°) dan maksimal *overshoot* 1.3°.

Hasil pengujian pada variasi 1 *pitch* kemiringan 3° menunjukkan bahwa pengaruh kecepatan terhadap performa

sistem semakin signifikan seiring bertambahnya sudut kemiringan. Kecepatan tinggi menghasilkan *settling-time* tercepat (2.12 detik), yang mengindikasikan bahwa sistem PID bereaksi lebih agresif terhadap gangguan yang lebih besar.

TABEL 4

Hasil Pengujian Sistem Variasi *Pitch* 1 Sudut Kemiringan 4° dengan Kecepatan Rendah, Sedang dan Tinggi

Sudut	Kecepatan	Settle-time(detik)	Max overshoot(sudut)	Steadystate error(sudut)
4°	Rendah	4.72	0.3°	1.6°
4°	Sedang	3.28	0°	2.4°
4°	Tinggi	2.36	0.5°	2.8°

Hasil pengujian pada *Pitch* 4 derajat menunjukkan perubahan karakteristik sistem yang signifikan dibandingkan *pitch* 2° dan 3°. *Overshoot* mengalami penurunan drastis hingga 0° pada kecepatan sedang, mengindikasikan sistem sangat stabil. Namun, *steady-state* error meningkat drastis hingga 2.8° pada kecepatan tinggi, fenomena ini bisa disebabkan oleh keterbatasan kemampuan aktuator atau parameter PID yang kurang optimal untuk sudut kemiringan besar, hasil uji coba pada *pitch* 4° dimana kecepatan tinggi menghasilkan *steady-state* error lebih besar, berbanding terbalik dengan *pitch* 2° dan 3° yang mengindikasikan adanya batas kerja optimal sistem yang terlampaui pada kombinasi sudut besar dan kecepatan tinggi.



GAMBAR 9
Pengujian Alat Versi 2 Roll

TABEL 5

Hasil Pengujian Sistem Variasi 2 *Roll* Kemiringan 4° dengan Kecepatan Rendah, Sedang dan Tinggi

Sudut	Kecepatan	Settle-time(detik)	Max overshoot(sudut)	Steadystate error(sudut)
4°	Rendah	2.7	3°	0.6°
4°	Sedang	2	2°	1.2°
4°	Tinggi	2.1	4.6	1.9°

Pada variasi 2 *roll* sistem mampu mendeteksi kemiringan jalan dan melakukan pengkondisian kemiringan mobil melalui suspensi aktif dengan baik pada kecepatan rendah dengan kemiringan jalanan 4°, dimana sistem dapat mengkondisikan mobil kembali ke horizontal dengan waktu *settle-time* (2.7detik), *overshoot* maksimal 3°, *steady-state* error 0.6°, untuk kecepatan sedang dengan waktu *settle* (2detik), *overshoot* maksimal 2°, *steady-state* error 1.2°, untuk kecepatan tinggi waktu *settle* (2.1 detik), *overshoot* maksimal 4.6° dan *steadystate* error 1.9°.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan sedang menghasilkan performa optimal dengan *settling time* lebih cepat (2 detik) dan *overshoot* 2°, yang mengindikasikan

adanya kinerja optimal pada sistem dimana kombinasi gangguan dan respons sensor dan aktuator bekerja optimal.

TABEL 6

Hasil Pengujian Sistem Variasi 2 *Roll* Kemiringan 8° dengan Kecepatan Rendah, Sedang dan Tinggi

Sudut	Kecepatan	Settle-time(detik)	Max overshoot(sudut)	Steadystate error(sudut)
8°	Rendah	3.6	3.7°	0.7°
8°	Sedang	2.4	2.9°	0.4°
8°	Tinggi	1.6	3.5°	0.6°

Pada variasi 2 *roll* sistem mampu mendeteksi kemiringan jalan dan melakukan pengkondisian kemiringan mobil melalui suspensi aktif dengan baik pada kecepatan rendah dengan kemiringan jalanan 8°, dimana sistem dapat mengkondisikan mobil kembali ke horizontal dengan waktu *settle-time* (3.6 detik), *overshoot* maksimal 3.7°, *steady-state* error 0.7°, untuk kecepatan sedang dengan waktu *settle* (2.4 detik), *overshoot* maksimal 2.9°, *steady-state* error 0.4°, untuk kecepatan tinggi waktu *settle* (1.6 detik), *overshoot* maksimal 3.5° dan *steadystate* error 0.6

Hasil pengujian pada variasi 2 *Roll* kemiringan 8° menunjukkan bahwa kecepatan tinggi menghasilkan performa terbaik dengan *settling-time* tercepat(1.6 detik), hal ini mengindikasikan bahwa sistem PID bereaksi lebih agresif dan efektif terhadap gangguan yang lebih besar.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian prototipe sistem kendali PID pada suspensi aktif mobil RC menggunakan sensor mpu6050 dan servo sebagai suspensi aktif dapat meredam gangguan *pitch* dan disimpulkan bahwa:Sistem ini mampu mendeteksi kemiringan secara *realtime* menggunakan sensor mpu6050 dengan rata rata error rendah yaitu 0.1-1%.

Penggunaan sistem kendali PID dengan 2 input yaitu *Pitch*(miring depan atau belakang) dan *Roll*(miring kanan atau kiri) dengan 1 output(pengkondisian mobil agar tidak miring), masing masing tugas terbukti mampu memberikan respon pengkondisian mobil terhadap kondisi jalan dengan respons *settle-time* tercepat pada roll 8° yaitu (1.6 detik) dan respons tercepat *pitch* pada kemiringan sudut 2° dengan respons (2,1 detik).

Hasil pengujian sistem menunjukkan bahwa sistem bekerja dalam mengatur suspensi secara aktif agar kondisi mobil tidak mengikuti kondisi jalanan untuk mencegah guncangan dan terguling dalam tikungan tajam, sesuai dengan kemiringan dan kecepatan aktual.

Dengan demikian, sistem yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian untuk meningkatkan keselamatan operasional kendaraan ambulans dengan prototipe RC mobil, khususnya dalam skenario jalanan yang miring, bergelombang serta tikungan tajam.

Berdasarkan hasil dan analisis yang diperoleh dalam penelitian ini, terdapat beberapa saran pengembangan yang dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kinerja dan potensi penerapan sistem ke depannya yaitu menggunakan integrasi sensor kecepatan yang lebih presisi seperti sensor berbasis optik atau IMU dapat diterapkan agar pengukuran kecepatan menjadi lebih akurat, sehingga respons sistem

terhadap perubahan kecepatan dapat berjalan dengan lebih tepat dan andal

Pengembangan sistem kontrol PID menjadi PID adaptif perlu dipertimbangkan agar sistem memiliki kemampuan untuk menyesuaikan parameter kontrol secara dinamis sesuai dengan kondisi lingkungan yang berubah-ubah, meningkatkan fleksibilitas dan ketangguhan sistem dalam skenario nyata

Penambahan elemen suspensi yang lebih empuk atau penggunaan material peredam getaran yang lebih baik dapat diintegrasikan untuk meningkatkan kenyamanan dan kemampuan sistem dalam meredam guncangan pada permukaan jalan yang tidak rata. pengujian dan implementasi sistem pada kendaraan skala lebih besar—baik melalui simulasi lanjutan maupun prototipe fisik—perlu dilakukan guna mengevaluasi kelayakan dan efektivitas sistem dalam kondisi operasional nyata, serta membuka peluang adopsi teknologi ini dalam aplikasi transportasi medis maupun kendaraan umum lainnya.

REFERENSI

- [1] T. M. S. Hospitals, "Siloam Hospital," 29 Agustus 2024. [Online]. Available: <https://www.siloamhospitals.com/informasi-siloam/artikel/ambulans-bukan-sekadar-transportasi-pasien-ke-rumah-sakit>.
- [2] A. K. I. S. Mohammad Andrian, "Sistem Kendali Suhu Menggunakan Metode PID dalam Proses," *Jurnal Ilmu Teknik*, vol. 1, p. 131, 2024.
- [3] D. M. RIYANTO, "RANCANGAN BANGUN SELF BALANCING ROBOT MENGGUNAKAN SISTEM KENDALI PID DAN KALMAN FILTER," *RANCANGAN BANGUN SELF BALANCING ROBOT MENGGUNAKAN SISTEM KENDALI PID DAN KALMAN FILTER*, p. 1, 22 September 2019.
- [4] "PENERAPAN KENDALI PID PADA BALANCING ROBOT SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN ROBOTIKA PADA PROGRAM STUDI PENDIDIKAN VOKASIONAL MEKATRONIKA," *Jurnal Elektronika Telekomunikasi & Computer*, vol. 17, p. 77, 2022.
- [5] V. H. P. W. W. V. A. G. Agus Sehatman Saragih, "RANCANG BANGUN QUADCOPTER DENGAN KENDALI PID," *Jurnal Teknik*, p. 1, 2020.
- [6] T. W. KURNIAWAN, "ANALISIS PENGUATAN SUSPENSI SUZUKI KATANA," p. 6, 2017.