

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Prosedur dan Metode Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja prototipe sistem anti-tilt pada spreader berbasis kendali PID yang telah dirancang dan dibangun. Pengujian dilakukan pada skala prototipe di dalam ruangan, dengan kondisi bebas beban maupun berbeban sesuai batasan masalah yang ditetapkan pada Bab I. Aspek yang dievaluasi meliputi keandalan indikator status sensor MPU-6050, akurasi dan stabilitas kemiringan spreader baik sebelum maupun sesudah penerapan PID Anti-Tilt, serta kecepatan respon sistem dalam menjalankan perintah pada mode manual dan mode otomatis melalui aplikasi Blynk.

Prosedur pengujian dilakukan secara bertahap agar setiap bagian sistem dapat diperiksa secara terpisah dengan jelas sebelum dilakukan pengujian sistem secara terintegrasi. Pengujian dilaksanakan di dalam ruangan dengan jaringan Wi-Fi aktif pada sisi mikrokontroler, guna memastikan komunikasi antara sistem dengan aplikasi Blynk IoT tetap terjaga selama proses pengujian berlangsung.

Alat dan bahan yang digunakan selama proses pengujian adalah sebagai berikut:

1. Prototipe mini crane (Arduino Mega 2560, driver motor TA6586 dan L298N, motor DC geared, motor servo, sensor MPU-6050, dan modul Wemos S2 Mini)
2. Laptop dengan Arduino IDE untuk memantau Serial Monitor serta perangkat lunak data logger untuk mencatat data sudut kemiringan spreader secara real-time
3. Stopwatch pada smartphone untuk mengukur kecepatan respon aktuator pada pengujian mode manual dan waktu siklus pada pengujian mode otomatis
4. Smartphone dengan aplikasi Blynk IoT untuk mengirimkan perintah kendali ke sistem
5. Jaringan Wi-Fi aktif sebagai media komunikasi antara modul Wemos S2 Mini dengan platform Blynk IoT

6. Beban uji berupa miniatur kontainer untuk mensimulasikan proses pengangkatan dan penurunan muatan

Agar hasil pengujian dapat dipertanggungjawabkan, kondisi sistem perlu dipastikan berada pada keadaan siap sebelum data mulai diambil. Berikut langkah-langkah yang ditempuh pada tiap awal sesi pengujian:

1. Menyiapkan seluruh perangkat pengujian, meliputi prototipe mini crane, laptop, dan smartphone.
2. Menghubungkan prototipe ke sumber tegangan dan memastikan seluruh modul (Arduino Mega 2560, driver motor, sensor MPU-6050, dan Wemos S2 Mini) telah terhubung sesuai konfigurasi pada Bab III.
3. Menyalakan sistem dan memastikan proses inisialisasi berjalan dengan baik, ditandai dengan indikator dua kali bunyi buzzer pendek sebagai tanda sensor MPU-6050 berhasil terdeteksi dan terkalibrasi.
4. Memastikan modul Wemos S2 Mini berhasil terhubung ke jaringan Wi-Fi dan status perangkat pada Blynk Console menunjukkan kondisi Online.
5. Membuka Serial Monitor atau perangkat lunak data logger pada laptop dan memastikan data sudut kemiringan spreader tampil secara kontinu.
6. Melakukan proses homing agar seluruh posisi aktuator berada pada titik awal yang diketahui oleh sistem sebelum pengujian dimulai.
7. Sistem dinyatakan siap untuk pengujian apabila seluruh langkah di atas telah terpenuhi tanpa adanya pesan error pada Serial Monitor.

Adapun rincian parameter beserta cara pengukurannya pada masing-masing pengujian dijabarkan pada **Tabel 5 – 1**.

Tabel 5 - 1 Parameter Pengukuran Percobaan Alat

Parameter	Satuan	Metode Pengukuran	Keterangan
Indikator buzzer	-	Pengamatan jumlah bunyi saat sistem dinyalakan	Verifikasi keberhasilan deteksi sensor MPU-6050

Parameter	Satuan	Metode Pengukuran	Keterangan
<i>Tilt_wheel</i>	°	Pembacaan sensor MPU-6050 melalui <i>serial monitor</i>	Parameter utama evaluasi kinerja PID <i>anti-tilt</i>
<i>Tilt_slider</i>	°	Pembacaan sensor MPU-6050 melalui <i>serial monitor</i>	Parameter pendukung efek sampling kendali
Kecepatan aktuator	cm/s	Jarak tempuh dibagi waktu tempuh hasil pengukuran stopwatch	Parameter kecepatan respon mode manual
Waktu siklus mode otomatis	Menit:detik	<i>Stopwatch</i> , dihitung sejak perintah dikirim hingga satu siklus selesai	Parameter kecepatan respon mode otomatis

5.2 Pengujian Sensor MPU-6050

Pengujian sensor MPU-6050 bertujuan untuk memastikan sensor dapat membaca sudut kemiringan spreader secara akurat dan stabil sebelum digunakan sebagai input kendali PID Anti-Tilt. Sensor dipasang pada spreader dengan orientasi sumbu yang telah ditentukan, yaitu sumbu Y searah gerak roda gantry (arah tilt yang menjadi target kendali) dan sumbu X searah gerak slider.

Sensor MPU-6050 ini bekerja pada alat dengan mengkalibrasi otomatis pada saat alat dinyalakan. Posisi kemiringan spreader awal akan dianggap sebagai titik setimbang yang nantinya selama alat beroperasi, spreader akan dikendalikan oleh gerak motor pulley yang disesuaikan dengan kemiringan awal menggunakan PID. Untuk mengetahui Sensor MPU-6050 bekerja pada alat, *buzzer* digunakan sebagai indikator. Terdapat beberapa indikator *buzzer* pada **Tabel 5 – 2** yang masing-masing memiliki arti tersendiri.

Tabel 5 - 2 Arti Indikator *Buzzer*

Indikator <i>Buzzer</i>	Arti
Beep pendek 2 kali	Sensor MPU-6050 terdeteksi via I2C & kalibrasi offset berhasil / Sensor terdeteksi kembali
Beep pendek 3 kali	Sensor hilang atau tidak terdeteksi saat beroperasi
Beep panjang 5 kali	Sensor gagal terdeteksi

Ketiga indikator buzzer tersebut dirancang untuk memberikan umpan balik langsung kepada operator mengenai status kesiapan sensor MPU-6050 tanpa perlu memeriksa Serial Monitor. Dua bunyi pendek menandakan sensor berhasil diinisialisasi dan proses kalibrasi *offset* berjalan normal, sehingga sistem siap digunakan. Tiga bunyi pendek menandakan sensor sempat kehilangan koneksi I2C saat sistem sedang beroperasi, sedangkan lima bunyi panjang menandakan kegagalan total mendeteksi sensor sejak awal proses *booting*. Untuk memverifikasi keandalan indikator ini, dilakukan pengujian dengan menyalakan sistem sebanyak lima kali dan mencatat bunyi *buzzer* yang muncul pada tiap percobaan. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 5 – 3**.

Tabel 5 - 3 Hasil Percobaan Sensor MPU-6050

Percobaan1	Indikator <i>Buzzer</i>	Keterangan
1	Beep panjang 5 kali	Alat sempat tidak mendeteksi sensor gyro awalnya, setelah <i>home</i> selesai terdeteksi lagi.
2	Beep pendek 2 kali	Sensor Gyro terdeteksi
3	Beep pendek 2 kali	Sensor Gyro terdeteksi
4	Beep pendek 2 kali	Sensor Gyro terdeteksi
5	Beep pendek 2 kali	Sensor Gyro terdeteksi

Dari kelima percobaan, sensor MPU-6050 terdeteksi normal walaupun pada percobaan pertama, sistem sempat menunjukkan indikator kegagalan (5x beep

panjang), namun sensor kembali terdeteksi secara otomatis setelah proses homing selesai dijalankan. Temuan ini mengindikasikan bahwa kegagalan deteksi pada percobaan pertama kemungkinan besar disebabkan oleh keterlambatan inisialisasi komunikasi I2C saat sistem baru dinyalakan bukan oleh kerusakan sensor, karena sensor terbukti dapat terhubung kembali tanpa intervensi manual. Secara keseluruhan, indikator buzzer terbukti bekerja sesuai fungsinya dalam memberi informasi status sensor secara real-time kepada operator.

5.3 Pengujian Kemiringan *Spreader*

Pengujian kemiringan *spreader* merupakan bagian inti dari penelitian ini, karena berkaitan langsung dengan tujuan utama yang disebutkan pada judul penelitian, yaitu menjaga *spreader* tetap seimbang selama proses pengangkatan dan penurunan muatan melalui kendali PID *Anti-Tilt*. Pengujian pada subbab ini dilakukan dalam dua kondisi untuk melihat efektivitas kendali PID secara langsung, yaitu kondisi tanpa PID (*open-loop*) sebagai data pembanding dasar, dan kondisi dengan PID aktif (*closed-loop*) yang mencakup proses *tuning* parameter Kp, Ki, dan Kd secara bertahap hingga diperoleh konfigurasi optimal.

5.3.1 Tanpa PID

Pengujian tanpa PID dilakukan untuk mendapatkan data dasar (baseline) mengenai seberapa besar kemiringan *spreader* yang terjadi secara alami akibat ketidakseimbangan mekanis antara motor pulley kiri dan kanan, tanpa adanya kompensasi kendali otomatis. Data kemiringan pada konfigurasi mekanis sistem prototipe sebelumnya juga disertakan sebagai pembanding. Data pembanding ini juga diukur menggunakan sensor MPU-6050 yang sama untuk menjaga validitas perbandingan.

Pengujian sistem di subbab ini dinilai menggunakan tiga parameter yang diambil dari data kemiringan hasil pembacaan sensor MPU-6050. Pertama yaitu *peak* yang menunjukkan simpangan kemiringan maksimum absolut yang tercatat selama satu siklus pengujian, parameter ini mencerminkan kondisi terburuk yang terjadi. Lalu RMS (*Root Mean Square*) pada sumbu *tilt_wheel* adalah akar rata-rata kuadrat dari seluruh sampel kemiringan pada arah gerak roda gantry — metrik

inilah yang menjadi target utama optimasi PID *Anti-Tilt*, karena mencerminkan tingkat kemiringan rata-rata sepanjang pengujian, bukan hanya di titik puncaknya. Sementara itu, RMS *tilt_slider* adalah parameter serupa yang diambil pada sumbu arah gerak slider, yang digunakan sebagai indikator *cross-check* untuk memastikan koreksi PID pada sumbu *tilt_wheel* tidak menimbulkan efek samping berupa gangguan kemiringan pada sumbu lainnya. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 5 – 4**.

Tabel 5 - 4 Tabel Pengukuran Kemiringan Spreader Awal

No	Konfigurasi Pengujian	Peak (°)	RMS (°)
1	Rangka prototipe sebelumnya (1 motor <i>pulley</i> , tanpa sensor gyro & PID)	~18,47	-
2	Rangka terbaru untuk <i>tuning</i> PID (PID masih <i>OFF</i>)	18,00	5,213

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rangka baru dengan konfigurasi dua motor *pulley* ketika PID belum diaktifkan menghasilkan kemiringan yang hampir sama dengan sistem prototipe sebelumnya. Hal ini menandakan bahwa modifikasi mekanis pada rangka belum menyelesaikan masalah kemiringan pada *spreader* karena tidak dapat dipungkiri juga pastinya terdapat ketidaksinkronan manufaktur antar kedua motor *pulley* yang menyebabkan perbedaan kemiringan walaupun menggunakan motor dengan jenis dan spesifikasi yang sama.

5.3.2 Menggunakan PID

Setelah diperoleh parameter kendali PID akhir sebesar $K_p = 12$, $K_i = 0,5$, dan $K_d = 0,2$, dilakukan pengujian ulang untuk melihat konsistensi respons sistem terhadap penerapan parameter kendali yang sama. Pada pengujian ini, parameter K_p , K_i , dan K_d dipertahankan pada nilai yang sama, sedangkan respons kemiringan *spreader* diamati melalui sensor MPU-6050. Parameter yang dianalisis meliputi peak, serta RMS pada sumbu *tilt_slider*. Hasil pengujian ulang parameter PID ditunjukkan pada **Tabel 5-5**.

Tabel 5 - 5 Hasil Pengujian Menggunakan PID

Pengujian	Kp	Ki	Kd	Peak (°)	RMS (°)	RMS <i>tilt_slider</i> (°)
1	12	0,5	0,2	1,28	0,45	0,30
2	12	0,5	0,2	1,34	0,47	0,32
3	12	0,5	0,2	1,31	0,46	0,31
4	12	0,5	0,2	1,29	0,45	0,31
5	12	0,5	0,2	1,33	0,47	0,33
Rata – Rata	12	0,5	0,2	1,31	0,46	0,34

Berdasarkan **Tabel 5 – 5**, penerapan parameter $K_p = 12$, $K_i = 0,5$, dan $K_d = 0,2$ menghasilkan nilai kemiringan yang relatif berdekatan pada setiap percobaan. Nilai peak berada pada rentang $1,28^\circ$ – $1,34^\circ$, sedangkan nilai RMS berada pada rentang $0,450^\circ$ – $0,470^\circ$. Nilai rata-rata peak sebesar $1,31^\circ$ dan RMS sebesar $0,460^\circ$ menunjukkan bahwa respons sistem berada pada kisaran yang mendekati hasil tuning sebelumnya.

Perbedaan nilai yang muncul pada setiap percobaan menunjukkan adanya variasi respons sistem selama pengoperasian. Variasi tersebut dapat dipengaruhi oleh kondisi awal mekanisme, pergerakan *motor pulley*, serta karakteristik pembacaan sensor MPU-6050. Meskipun terdapat perbedaan nilai antarpercobaan, seluruh hasil pengujian masih berada pada rentang yang berdekatan. Hal tersebut menunjukkan bahwa parameter $K_p = 12$, $K_i = 0,5$, dan $K_d = 0,2$ dapat memberikan respons pengendalian yang relatif konsisten dalam mempertahankan kemiringan spreader mendekati setpoint.

5.4 Pengujian Kecepatan Respon Sistem

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kecepatan respon sistem prototipe dalam menanggapi perintah pergerakan yang diberikan melalui aplikasi Blynk, baik pada mode manual maupun otomatis, serta untuk memastikan bahwa penambahan kendali PID Anti-Tilt tidak menimbulkan penurunan performa (latency) yang berarti pada kecepatan operasional sistem secara keseluruhan.

5.4.1 Mode Manual

Pengujian kecepatan respon mode manual dilakukan dengan mengirimkan perintah gerak secara langsung melalui tombol pada aplikasi Blynk, kemudian mengukur kecepatan aktuasi tiap komponen: pergerakan gantry (roda), trolley (slider), hoist (pulley/spreader), dan gripper. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali percobaan untuk masing-masing aktuator yang dapat dilihat pada **Gambar 5.1** hingga **Gambar 5.3**.



Gambar 5 . 1 Pengujian Kecepatan Respon Manual (*Trolley*)



Gambar 5 . 2 Pengujian Kecepatan Respon Manual (*Spreader*)



Gambar 5 . 3 Pengujian Kecepatan Respon Manual (*Gantry*)

Percobaan pada respon sistem mode manual tercatat pada **Tabel 5 – 6**:

Tabel 5 - 6 Data Pengujian Kecepatan Respon Manual

No	Kecepatan <i>Gantry</i> (cm/s)	Kecepatan <i>Trolley</i> (cm/s)	Kecepatan <i>Spreader</i> (cm/s)	Kecepatan <i>Gripper</i> (cm/s)
1	15,62	1,34	3,88	5,18
2	16,57	1,39	3,87	4,94
3	15,38	1,38	3,76	5,18
4	16,04	1,37	3,63	6,44
5	16,95	1,36	3,71	5,18
Rata- Rata	16,11	1,37	3,77	5,38

Berdasarkan data pada tabel di atas, terlihat bahwa *gantry* memiliki kecepatan jauh lebih tinggi dibandingkan aktuator lainnya, karena pergerakan roda tidak dibebani oleh mekanisme transmisi presisi seperti pada *trolley*. Sebaliknya, *trolley* mencatatkan kecepatan paling rendah, hal ini wajar mengingat mekanisme slider menggunakan sistem transmisi berupa *lead screw* yang secara desain mengutamakan presisi posisi dibandingkan kecepatan linier. Kecepatan spreader dan gripper berada pada rentang menengah, sesuai dengan fungsinya sebagai

aktuator pendukung proses pengangkatan dan penguncian kontainer yang tidak menuntut kecepatan tinggi, melainkan lebih mengutamakan ketepatan gerak.

Sebagai pembandingan, sistem prototipe sebelumnya mencatatkan kecepatan rata-rata *gantry* 15,69 cm/s, *trolley* 0,88 cm/s, *spreader* 3,16 cm/s, dan *gripper* 5,56 cm/s. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan respon mode manual pada prototipe ini dan sebelumnya memiliki rentang yang relatif sebanding, mengingat komponen dan mekanisme penggerak tidak banyak diubah. Peningkatan paling signifikan terjadi pada kecepatan *trolley*, yang naik sebesar 55,7% dibandingkan prototipe sebelumnya, sejalan dengan penggantian spesifikasi motor *slider* menjadi 100 RPM yang dijalankan pada PWM maksimal tanpa pembatasan kecepatan tambahan. Kecepatan *spreader* juga meningkat sebesar 19,3%, sebagai dampak dari penggunaan dua motor *pulley* independen yang masing-masing dikendalikan oleh keluaran PID *Anti-Tilt*. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan kendali PID *Anti-Tilt* tidak mengorbankan kecepatan operasional sistem, bahkan disertai peningkatan performa pada sebagian besar aktuator.

5.4.2 Mode Otomatis

Pengujian kecepatan respon mode otomatis dilakukan dengan mengukur waktu yang dibutuhkan sistem sejak perintah dikirim melalui aplikasi Blynk hingga crane menyelesaikan satu siklus penuh pemindahan kontainer menuju koordinat blok tujuan (A–I), mencakup kondisi Load (dari container yard ke homebase) dan Unload (dari homebase ke container yard).



Gambar 5 . 4 Posisi *Homebase Kontainer*

Gambar 5. 4 menunjukkan posisi *standby* kontainer serta pembagian koordinat blok penempatan (A hingga I) yang menjadi titik tujuan pergerakan gantry crane secara otomatis. Kesembilan blok tersebut merepresentasikan susunan 3×3 posisi kontainer pada container yard, dengan jarak tempuh yang berbeda-beda terhadap posisi *homebase*, sehingga variasi waktu tempuh antar blok dapat digunakan untuk mengevaluasi konsistensi kecepatan respon sistem terhadap jarak. Pengujian dilakukan sebanyak empat kali untuk tiap blok, pada kedua kondisi operasi yaitu *Unload* (kontainer diantarkan dari *homebase* menuju *container yard*) dan *Load* (kontainer diambil dari *container yard* menuju *homebase*). Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 5 – 7**.

Tabel 5 - 7 Data Pengujian Kecepatan Mode Otomatis

Penempatan Kontainer	Mode	Percobaan				Rata-Rata
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	
A	Unload	00:53,80	00:54,05	00:52,75	00:52,75	00:53,34

	Load	00:53,01	00:53,22	00:54,00	00:52,86	00:53,27
B	Unload	01:16,42	01:16,40	01:16,90	01:16,47	01:16,55
	Load	01:16,42	01:16,17	01:16,89	01:16,87	01:16,59
C	Unload	01:39,95	01:40,94	01:40,23	01:40,32	01:40,36
	Load	01:39,80	01:41,13	01:40,72	01:39,27	01:40,23
D	Unload	00:55,80	00:55,15	00:56,03	00:56,05	00:55,76
	Load	00:55,20	00:56,07	00:55,55	00:55,38	00:55,55
E	Unload	01:18,77	01:18,75	01:18,85	01:19,07	01:18,86
	Load	01:18,90	01:18,88	01:18,45	01:19,16	01:18,85
F	Unload	01:41,52	01:42,36	01:41,00	01:41,95	01:41,71
	Load	01:42,20	01:41,81	01:42,00	01:42,55	01:42,14
G	Unload	00:59,12	00:59,60	00:59,71	00:59,65	00:59,52
	Load	00:59,69	00:58,99	00:59,08	00:59,04	00:59,20
H	Unload	01:22,99	01:21,98	01:20,21	01:22,26	01:21,86
	Load	01:21,97	01:21,96	01:22,13	01:22,40	01:22,12
I	Unload	01:46,38	01:45,11	01:45,21	01:45,79	01:45,62
	Load	01:46,14	01:45,31	01:45,58	01:45,82	01:45,71

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem prototipe saat ini secara konsisten menyelesaikan satu siklus kerja mode otomatis sekitar 33–37% lebih cepat dibandingkan sistem prototipe sebelumnya pada seluruh sembilan titik koordinat. Hal ini mengindikasikan bahwa percepatan yang terjadi bukan berasal dari perbedaan jarak atau rute tempuh, melainkan dari peningkatan kecepatan dasar aktuator secara menyeluruh, sejalan dengan temuan pada pengujian mode manual sebelumnya (khususnya pada *trolley* dan *spreader*).

Pola waktu tempuh terhadap jarak tercatat sangat beragam dimana Blok A, D, dan G (jarak terdekat) selalu mencatatkan waktu tercepat, sedangkan Blok C, F, dan I (jarak terjauh) selalu mencatatkan waktu terlama, menunjukkan hubungan yang proporsional antara jarak tempuh dan durasi siklus pada kedua sistem.

Dokumentasi hasil percobaan mode otomatis pada *Rubber Tyred Gantry Crane* disajikan pada **Tabel 5 – 8**.

Tabel 5 - 8 Hasil Penempatan Kontainer Mode Otomatis

Penempatan Kontainer	Hasil
A	
B	
C	

Penempatan Kontainer	Hasil
	
D	
E	

Penempatan Kontainer	Hasil
F	
G	
H	

Penempatan Kontainer	Hasil
I	

Tabel ini mempresentasikan hasil yang menunjukkan bahwa sistem mampu menyelesaikan siklus pemindahan kontainer dengan jarak yang sudah diprediksi, tanpa penyimpangan berarti pada blok mana pun, sehingga menunjukkan kendali motor *gantry*, *trolley*, dan *spreader* yang telah dilengkapi PID *Anti-Tilt* tetap bekerja andal secara konsisten pada seluruh area operasi.