

RANCANG BANGUN ROBOT LENGAN SEBAGAI ALAT BANTU SANDAR KAPAL PADA PELABUHAN PINTAR

Muhammad Bagas Fajar Yulianto, Henna Nurdiansari, Intan Sianturi

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya
Jl. Gunung Anyar Boulevard No.1, Gunung Anyar, Surabaya, Telp. (031) 8714673
bagasfajar03@gmail.com

ABSTRAK

Aktivitas sandar kapal niaga yang semakin padat akibat perkembangan industri maritim serta kondisi cuaca yang tidak selalu mendukung menuntut adanya teknologi yang mampu mempercepat dan meningkatkan keselamatan proses penyandaran kapal. Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum tersedianya sistem bantu sandar yang mampu membantu kapal saat mendekati dermaga dan menahan posisi kapal agar tetap aman ketika menghadapi kondisi cuaca buruk di pelabuhan. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun alat bantu sandar pada pelabuhan pintar berupa robot lengan yang berfungsi menangkap dan menahan kapal model saat proses sandar. Metode yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan tahapan perancangan, pembuatan, dan pengujian prototype. Sistem menggunakan ESP-32 sebagai pengendali utama, sensor VL53L0X sebagai pendeteksi jarak dan indikator posisi kapal model, JGY-370 geared motor sebagai penggerak robot lengan, serta BTS7960 motor driver sebagai pengendali motor. Hasil pengujian statis menunjukkan sensor VL53L0X memiliki error terbesar 0,81% dan jarak aman jangkauan terpanjang lengan mencapai 39 cm. Pengujian dinamis menunjukkan prototype mampu menjalankan sistem standby saat proses penyandaran dan release untuk membuka ruang kapal keluar dari pelabuhan.

Kata Kunci: Rancang, Robot Lengan, Alat Bantu, Sadar Kapal, Pelabuhan Pintar

1. PENDAHULUAN

Industri maritim merupakan salah satu penopang utama perdagangan global, karena kapal-kapal beroperasi secara terus-menerus dalam berbagai kondisi cuaca, wilayah perairan, serta untuk mendukung distribusi minyak dan gas yang kebutuhannya terus meningkat di berbagai belahan dunia. Dalam kegiatan operasional tersebut, pelabuhan memiliki peran penting sebagai simpul transportasi dan distribusi. Namun, keterbatasan sarana dan prasarana serta kondisi geografis pelabuhan yang kurang mendukung dapat menurunkan kinerja pelayanan pelabuhan, sehingga proses pelayanan kapal menjadi kurang optimal. Kondisi ini berdampak pada meningkatnya waktu tunggu kapal untuk sandar, terutama pada saat pelabuhan berada dalam kondisi sibuk.

Pada kapal tanker, proses sandar umumnya masih mengandalkan bantuan *tug boat* sebagai penunjang utama saat mendekati dermaga bongkar muat. Proses ini cenderung memerlukan waktu yang cukup lama. Selain itu, ketika kapal telah bersandar, pengamanan posisi kapal masih sangat bergantung pada tali tambat sebagai penahan utama selama aktivitas bongkar muat kargo berlangsung. Kondisi tersebut memiliki tingkat risiko yang tinggi, terutama saat cuaca buruk, karena tali tambat dapat mengalami kerusakan atau putus sewaktu-waktu. Situasi ini sangat berbahaya, terlebih ketika *hose arm* pelabuhan dan *manifold* kapal sudah terhubung, karena dapat menimbulkan gangguan operasional bahkan potensi kecelakaan.

Permasalahan tersebut menunjukkan perlunya inovasi teknologi yang mampu meningkatkan efektivitas dan keselamatan proses sandar kapal di pelabuhan. Salah satu alternatif solusi adalah penerapan robot lengan sebagai alat bantu sandar kapal pada pelabuhan pintar. Sistem ini dirancang untuk membantu proses penyandaran kapal secara lebih aman, efisien, dan terkendali. Dengan sistem kendali jarak jauh, operator dapat memantau dan mengendalikan proses sandar tanpa harus bergantung sepenuhnya pada metode konvensional yang memiliki keterbatasan dalam aspek kecepatan, ketepatan, dan keselamatan.

Pemilihan sistem kendali dalam penerapan robot lengan harus mampu menunjang pekerjaan manusia sekaligus memenuhi tuntutan industri modern yang mengedepankan ketepatan, kecepatan, dan pemanfaatan teknologi terkini. Salah satu perangkat yang sesuai untuk mendukung sistem ini adalah ESP32, yaitu mikrokontroler berperforma tinggi yang mengintegrasikan prosesor *dual-core* 32-bit LX6 dengan kecepatan *clock* hingga 240 MHz. ESP32 memiliki keunggulan berupa konektivitas nirkabel ganda, yaitu Wi-Fi 802.11 dan Bluetooth v4.2, sehingga memungkinkan perangkat bekerja secara fleksibel dalam ekosistem *Internet of Things* (IoT). Selain itu, ESP32 juga dilengkapi dengan manajemen daya yang efisien serta dukungan berbagai antarmuka periferif, seperti GPIO, ADC 12-bit, DAC, SPI, I2C, dan sensor sentuh kapasitif internal [4].

Dalam sistem robot lengan, aktuator memegang peranan penting karena berfungsi sebagai penggerak utama pada mekanisme kerja robot [10]. Salah satu

motor yang sesuai digunakan adalah JGY-370 *Geared Motor*, yaitu motor DC yang dilengkapi *gearbox* sehingga mampu menghasilkan torsi tinggi pada kecepatan rendah. Karakteristik ini menjadikannya ideal untuk pergerakan sumbu atau sendi robot lengan, serta untuk sistem penggerak rel linear dalam penentuan posisi. Dengan torsi yang memadai, motor ini mampu menghasilkan pergerakan robot lengan yang stabil, halus, dan efisien dalam menopang beban kerja.

Selain aktuator, sistem robot lengan juga memerlukan integrasi sensor yang andal untuk mendukung ketepatan gerak dan deteksi posisi objek. Salah satu sensor yang dapat digunakan adalah VL53L0X, yaitu sensor pengukur jarak berbasis teknologi *Time-of-Flight* (ToF) menggunakan laser inframerah. Sensor ini mampu mengukur jarak hingga 2 meter dengan tingkat akurasi yang tinggi, berukuran kompak, serta memiliki konsumsi daya yang rendah. Karakteristik tersebut membuat VL53L0X sangat sesuai diterapkan pada sistem prototipe yang membutuhkan pengukuran cepat dan presisi dalam kondisi pencahayaan yang bervariasi [6].

Berdasarkan uraian tersebut, tujuan penelitian ini adalah merancang dan membangun robot lengan sebagai alat bantu sandar kapal pada pelabuhan pintar guna meningkatkan efektivitas dan keselamatan proses penyandaran kapal. Adapun rencana penyelesaian masalah dilakukan melalui perancangan sistem berbasis ESP32 sebagai pusat kendali, pemanfaatan JGY-370 *Geared Motor* sebagai aktuator penggerak, serta penggunaan sensor VL53L0X sebagai pendeteksi jarak. Ketiga komponen tersebut akan diintegrasikan dalam sebuah prototipe robot lengan yang dapat dikendalikan dari jarak jauh untuk membantu proses sandar kapal secara lebih aman, cepat, dan presisi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Prototipe Pelabuhan Pintar

Pelabuhan merupakan infrastruktur yang kompleks karena operasionalnya sangat bergantung pada kondisi hidro-oseanografi. Angin dan arus laut menjadi variabel penting dalam keberhasilan olah gerak kapal. Angin memberikan tekanan pada bagian atas kapal yang dapat menimbulkan pergeseran lateral, sedangkan arus laut memberikan gaya dorong pada bagian lambung bawah yang memengaruhi stabilitas serta kecepatan relatif kapal terhadap dermaga [7]. Oleh karena itu, proses sandar kapal di pelabuhan dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti kecepatan angin, kondisi cuaca, dan arus laut di wilayah perairan.

2.2. Robot Lengan

Robot lengan diciptakan untuk berbagai keperluan industri, terutama untuk meningkatkan produktivitas dalam proses pemindahan barang. Robot lengan umumnya terdiri atas lengan-lengan

kaku yang terhubung secara seri dan memiliki sendi yang dapat bergerak secara rotasi maupun translasi atau prismatik, dengan tingkat kecepatan dan ketepatan yang tinggi. Sistem pengendaliannya dapat dilakukan secara otomatis maupun manual [1]. Dalam penelitian ini, robot lengan diterapkan untuk menangkap, menarik, mendorong, dan menahan kapal sesuai kebutuhan proses sandar. Dengan demikian, alat yang dirancang diharapkan dapat meningkatkan efektivitas proses sandar kapal di pelabuhan.

2.3. Rel Robot Lengan

Rel robot lengan merupakan bagian dari prototipe yang berfungsi untuk menggerakkan robot lengan ke arah kanan dan kiri. Sistem ini mengacu pada konsep Robot Transport Unit (RTU), yaitu jalur linier yang dilengkapi dengan platform tempat robot dipasang dan digerakkan sepanjang lintasan. RTU dapat dipasang di lantai, dinding, maupun bagian atas, tergantung pada kebutuhan sistem kerja. Berbagai metode dapat digunakan untuk menghasilkan gerakan linier pada sistem tersebut [X]. Dalam penelitian ini, rel digunakan sebagai media pergerakan robot lengan agar posisi kapal model sebagai objek penyandaran dapat disesuaikan dengan titik yang diinginkan.

2.4. ESP-32

ESP32 merupakan salah satu mikrokontroler yang mampu mengendalikan berbagai modul, sensor, dan perangkat keras pendukung lainnya, seperti relay. Mikrokontroler ini juga memiliki kemampuan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth dual-mode dalam satu board, sehingga mendukung penerapan sistem kendali yang fleksibel dan terintegrasi [4].

2.5. Motor Driver BTS7960

Motor driver BTS7960 digunakan pada sistem robot lengan sebagai pengendali arus listrik menuju motor penggerak. Modul ini bekerja seperti sakelar elektronik yang mengatur suplai daya ke *geared motor*. BTS7960 merupakan modul motor driver yang dirancang untuk mengendalikan motor DC maupun motor stepper dengan memanfaatkan sistem H-Bridge, sehingga motor dapat bergerak dalam arah maju dan mundur [5].

2.6. VL53L0X *Time-of-Flight* (ToF) Laser Distance Sensor

VL53L0X merupakan sensor jarak berbasis teknologi *Time-of-Flight* (ToF) yang menggunakan laser inframerah untuk mengukur jarak dengan tingkat akurasi yang tinggi. Sensor ini mampu mengukur jarak objek hingga 2 meter dengan presisi yang baik melalui perhitungan waktu tempuh cahaya yang dipantulkan kembali setelah mengenai objek. Selain itu, sensor ini berkomunikasi menggunakan protokol I2C, memiliki konsumsi daya yang rendah, dan berukuran kompak, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi robotika, pengukuran jarak, dan sistem penghindaran hambatan [6].

2.7. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengembangan robot manipulator telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan sistem kendali. Salah satu penelitian merancang prototype robot manipulator berbasis Raspberry Pi Zero W yang mampu beroperasi dengan baik untuk memindahkan beban ringan. Pemilihan Raspberry Pi dinilai efektif karena fitur-fiturnya mendukung kebutuhan sistem [9]. Perbedaan dengan penelitian ini terletak pada bidang penerapan, ukuran prototype, serta sistem kontrol yang digunakan, karena penelitian ini difokuskan pada sistem untuk menarik dan menahan kapal pada pelabuhan.

Penelitian lain mengembangkan sistem kendali pergerakan lengan robot 4-DOF menggunakan tumbol dan mikrokontroler ESP32 [4]. Berbeda dari penelitian tersebut, penelitian ini menggunakan ESP32 yang diintegrasikan dengan microcomputer Raspberry Pi 4 serta memiliki tujuan dan penerapan sistem yang berbeda. Selain itu, terdapat pula penelitian yang merancang robot lengan otomatis untuk proses *lifting* barang berbasis Android [8]. Perbedaannya terletak pada jenis pengendali utama, tingkat akurasi sistem, serta fokus implementasi, karena penelitian ini menitikberatkan pada penerapan robot lengan untuk kebutuhan maritim, khususnya dalam membantu proses menarik dan menahan kapal saat sandar. Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu tersebut, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan Raspberry Pi sebagai pengendali utama pada sistem pelabuhan pintar secara keseluruhan, sedangkan ESP32 difungsikan sebagai pengendali yang berfokus pada robot lengan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D). Metode Research and Development merupakan metode penelitian yang digunakan untuk menghasilkan suatu produk tertentu, kemudian menguji tingkat kelayakan dan efektivitas produk tersebut. Dalam penelitian ini, produk yang dikembangkan berupa prototype robot lengan sebagai alat bantu sandar kapal pada pelabuhan pintar. Pemilihan metode ini didasarkan pada tujuan penelitian yang tidak hanya berhenti pada perancangan konsep, tetapi juga sampai pada tahap pembuatan, pengujian, dan evaluasi kinerja alat.

Pelaksanaan penelitian diawali dengan identifikasi kebutuhan sistem. Pada tahap ini peneliti melakukan pengamatan terhadap permasalahan proses sandar kapal yang masih memiliki risiko tinggi serta kurang efisien apabila hanya mengandalkan tug boat dan tali tambat. Dari permasalahan tersebut kemudian ditentukan kebutuhan fungsional alat, yaitu sistem yang mampu membantu proses sandar kapal model secara lebih aman, presisi, dan terkontrol. Selain itu, dilakukan pula identifikasi kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak yang akan digunakan dalam pembuatan prototype, seperti

mikrokontroler ESP32, sensor jarak VL53L0X, motor JGY-370 Geared Motor, driver motor, catu daya, rangka mekanik robot lengan, serta media kendali dan pemantauan.

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem. Pada tahap ini peneliti menyusun konsep kerja alat secara menyeluruh agar proses pengembangan prototype memiliki alur yang jelas. Perancangan dimulai dari pembuatan flowchart sistem untuk menggambarkan urutan proses kerja alat, mulai dari pembacaan jarak objek, pengolahan data oleh mikrokontroler, pengiriman perintah ke aktuator, hingga pergerakan robot lengan dalam membantu proses sandar kapal model. Selain flowchart, peneliti juga membuat wiring diagram sebagai acuan hubungan antar komponen elektronik, sehingga proses perakitan dapat dilakukan dengan sistematis dan meminimalkan kesalahan pemasangan. Selanjutnya dilakukan desain mekanik yang meliputi perancangan bentuk robot lengan, titik pergerakan, dudukan motor, serta konstruksi prototype pelabuhan pintar agar sesuai dengan fungsi alat yang diinginkan.

Setelah tahap perancangan selesai, penelitian dilanjutkan pada tahap pembuatan prototype. Pada tahap ini seluruh komponen yang telah direncanakan mulai dirakit menjadi satu sistem yang utuh. ESP32 digunakan sebagai pusat kendali yang menerima input dari sensor jarak dan mengolah data tersebut untuk mengendalikan aktuator. Sensor VL53L0X dipasang untuk mendeteksi jarak antara kapal model dengan pelabuhan, sehingga sistem dapat mengetahui posisi kapal secara real time. Sementara itu, motor JGY-370 Geared Motor digunakan sebagai penggerak utama pada mekanisme robot lengan agar mampu bergerak dengan torsi yang cukup dan kecepatan yang stabil. Perakitan juga mencakup pemasangan rangka mekanik, rel pergerakan, sistem penahan, serta penyesuaian posisi komponen agar prototype dapat bekerja secara optimal.

Tahap selanjutnya adalah pemrograman sistem. Pada tahap ini peneliti menulis program untuk ESP32 agar seluruh komponen dapat bekerja sesuai fungsi yang direncanakan. Program dirancang untuk membaca data dari sensor jarak, menentukan kondisi jarak tertentu sebagai parameter pergerakan robot lengan, serta mengendalikan motor agar lengan dapat bergerak menuju posisi yang diinginkan. Selain itu, sistem juga dirancang agar dapat dikendalikan atau dipantau dari jarak jauh sesuai konsep pelabuhan pintar berbasis teknologi. Setelah program selesai dibuat, dilakukan proses unggah program ke mikrokontroler dan dilanjutkan dengan pengecekan setiap fungsi untuk memastikan tidak terdapat kesalahan logika maupun gangguan komunikasi antar komponen.

Setelah prototype selesai dirakit dan diprogram, penelitian dilanjutkan dengan uji coba alat. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah sistem yang telah dibuat mampu bekerja sesuai tujuan penelitian. Uji coba dilakukan dalam dua tahap, yaitu uji statis dan

uji dinamis. Uji statis bertujuan untuk mengetahui kinerja masing-masing komponen secara individual maupun terintegrasi dalam kondisi diam. Pada tahap ini dilakukan pengujian sensor jarak untuk melihat akurasi pembacaan terhadap objek, pengujian motor untuk melihat kemampuan pergerakan robot lengan, serta pengujian sistem kendali untuk memastikan seluruh komponen dapat merespons perintah dengan baik. Hasil uji statis digunakan untuk mengetahui apakah terdapat kesalahan teknis pada sensor, aktuator, maupun sistem kendali.

Selanjutnya dilakukan uji dinamis, yaitu pengujian alat pada kondisi prototype yang menyerupai proses sandar kapal secara nyata. Pada tahap ini kapal model digerakkan mendekati area pelabuhan pintar, kemudian sensor jarak akan membaca posisi kapal terhadap dermaga. Data yang diterima sensor selanjutnya diproses oleh ESP32 untuk menggerakkan robot lengan sesuai kebutuhan sistem. Uji dinamis bertujuan untuk mengetahui kemampuan alat dalam membantu kapal model bersandar, menahan posisi kapal model setelah mencapai titik tertentu, serta menilai kestabilan gerakan robot lengan selama proses berlangsung. Selain itu, pengujian ini juga digunakan untuk melihat respons alat terhadap perubahan posisi kapal model dan memastikan bahwa sistem dapat bekerja secara efektif, aman, dan konsisten.

Data penelitian diperoleh dari hasil observasi selama proses perancangan, perakitan, dan pengujian prototype. Data yang dikumpulkan meliputi hasil pembacaan sensor jarak, respons pergerakan motor, waktu yang dibutuhkan robot lengan dalam merespons posisi kapal model, serta keberhasilan alat dalam membantu proses sandar. Data tersebut kemudian dianalisis secara deskriptif dengan cara membandingkan antara kondisi perancangan yang diharapkan dengan hasil kerja alat saat pengujian. Dari hasil analisis tersebut dapat diketahui tingkat keberhasilan sistem, kelemahan yang masih muncul, serta bagian yang perlu diperbaiki agar alat dapat bekerja lebih optimal.

Penelitian ini dilaksanakan pada semester VIII sebagai bagian dari penyusunan proyek dan pengambilan data penelitian. Adapun lokasi penelitian dilaksanakan di area kampus Politeknik Pelayaran Surabaya, yang digunakan sebagai tempat perancangan, perakitan, serta pengujian prototype. Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada ketersediaan sarana pendukung penelitian, kemudahan akses alat dan bahan, serta efisiensi dalam pelaksanaan seluruh tahapan penelitian.

Melalui tahapan metode Research and Development tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan sebuah prototype robot lengan yang dapat berfungsi sebagai alat bantu sandar kapal pada pelabuhan pintar. Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya berupa rancangan teoritis, tetapi juga berupa produk nyata yang dapat diuji

tingkat efektivitasnya sebagai solusi terhadap permasalahan sandar kapal.

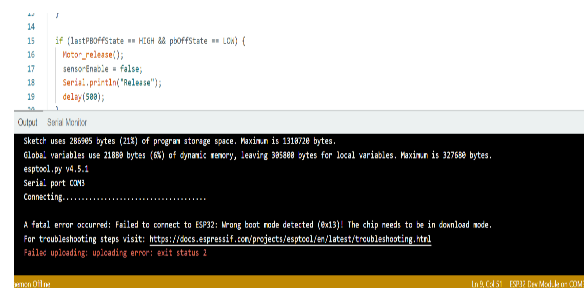
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Statis

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan kinerja dari komponen yang digunakan berjalan dengan sebagaimana mestinya, pengujian ini dilakukan satu per satu komponen sesuai fungsi yang ada.

4.2. Pengujian ESP32

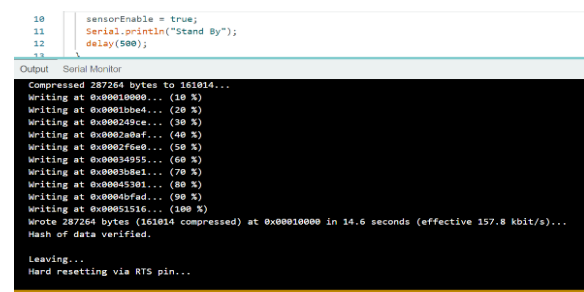
Mikrokontroler ESP32 diujikan dengan memasukkan kode pemrograman yang telah dibuat melalui aplikasi Arduino IDE pada laptop. Kemudian mengunggah program dan memantau *output* pada area bawah tampilan pemrograman pada laptop yang menunjukkan mikrokontroler sudah bekerja dengan baik.



Gambar 1. Pengujian ESP-32 gagal
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Gambar 1 menunjukkan proses upload kode pemrograman ke ESP-32 gagal. Kegagalan upload ini memiliki berbagai penyebab seperti port yang ditentukan pada aplikasi salah, kode pemrograman bermasalah, mikrokontroler ESP-32 dalam kondisi rusak.

Pengujian yang ditunjukkan pada gambar 4.1 gagal terupload karena kondisi ESP-32 yang rusak karena pada tampilan menunjukkan *error exit status*, padahal setelah dicek pada pengaturan *port* yang dihubungkan sudah benar namun ESP-32 tidak terdeteksi pada sistem.



Gambar 2. Pengujian ESP-32 berhasil
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Gambar 2 menunjukkan kode pemrograman yang telah dibuat berhasil diunggah ke ESP-32.

4.3. Pengujian DC Geared Motor Dan Driver BTS 7960

Pengujian pada *geared motor* bertujuan untuk mengetahui kinerja yang dimiliki *geared motor* dan diberikan beban secara berkala untuk memastikan torsi yang kemungkinan diperlukan pada *prototype robot lengan*.

Pengujian dilakukan dengan cara memberikan tagangan 12 VDC pada motor melalui *power supply adaptor* 220 VAC ke 12 VDC yang dihubungkan dengan *BTS 7960 driver motor* dan diberikan PWM sebesar 200 agar memiliki tegangan yang cukup namun tidak berlebihan, kemudian motor diberi beban secara berkala.

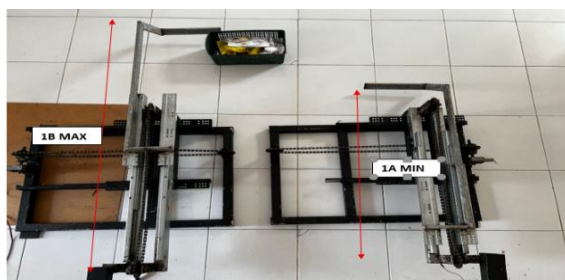
Tabel 1. Hasil pengujian Motor DC

No	Beban yang diberikan (kg)	Arus (A)	RPM
1	0	0,85	11
2	1	0,85	10
3	2	0,85	10
4	4	0,9	10
5	6	1	9,8
6	8	1	9,5
7	10	1,1	9,4

Sumber : Dokumentasi pribadi

Tabel 1 menunjukkan pengujian kekuatan pada torsi JGY-370 geared motor, didapatkan hasil bahwa mulai dari pengujian tanpa beban yang mendapatkan arus 0,85 A dan 11 RPM. Semakin beban ditambahkan pada geared motor, arus yang dimiliki semakin tinggi dan RPM kian menurun, hingga didapat pada pengujian beban 10 kg hingga putaran semakin berat mencapai 9,4 RPM. JGY-370 geared motor efektif digunakan pada sistem ini karena RPM pada beban 10 kg memiliki selisih tidak sampai 1 RPM dari RPM *standard* yaitu 10 RPM.

Selain itu juga dilakukan pengujian DC *geared motor* yang sudah terinstal pada lengan robot lengan yang terhubung dengan rel melalui rantai dilakukan pengujian karena pergerakan lengan pada setiap rel berbeda-beda karakteristiknya, pengujian ini bertujuan untuk mengukur titik batas ujung yang dapat dijangkau oleh lengan robot pada setiap kerangka rel dan juga untuk melindungi motor agar tidak melebihi batas yang dapat merusak motor itu sendiri maupun komponen yang berkaitan dengan motor penggerak lengan pada robot lengan.



Gambar 1. Jangkauan pergerakan rel

Sumber: Dokumentasi pribadi

Keterangan:

- 1B MAX = kondisi terpanjang rel kanan dan kiri = 132 cm
- 1A MIN = kondisi terpendek rel kanan dan kiri = 89 cm
- Maka jangkauan maksimal rel = 1B MAX – 1A MIN
- = 132 cm – 89 = 43 cm
- Jangkauan aman = jangkauan maksimal – 4 cm
- = 43 cm – 4 cm = 39 cm
- Atau kondisi aman terpanjang = 132 cm – 2 cm = 130 cm
- Dan kondisi aman terpendek = 89 cm + 2 cm = 91 cm

Dari gambar 3 ditunjukkan bahwa batas kondisi terpanjang rel bagian atas kiri dan kanan adalah 132 cm, sementara itu kondisi terpendek sepanjang 89 cm. Untuk mencari jangkauan yang aman peneliti memberi toleransi 4 cm agar komponen pada robot lengan aman. Dengan ini jangkauan aman terpanjang lengan 130 cm dan terpendek adalah 91 cm.

Kemudian dari jarak aman terpanjang yaitu 130 cm dilakukan pengujian *DC motor* untuk menentukan *delay* yang diterapkan pada sistem robot lengan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan PWM sebesar 200 dengan *delay* yang diterapkan secara berkala pada R-PWM *driver BTS 7960* untuk pergerakan memajukan lengan.

Tabel 2. Pengujian jarak aman terpanjang

No	Delay (micro second)	Jarak pergerakan (cm)	Jarak aman terpanjang (cm)	Selisih (cm)
1	20.000	132	130	2
2	19.000	132	130	2
3	18.000	130,3	130	0,3
4	17.000	128,4	130	1,6
5	18.000	129,6	130	0,4
6	18.000	130,0	130	0
7	18.000	130,2	130	0,2

Sumber : Dokumentasi pribadi

Tabel 2 menunjukkan bahwa pengaturan *delay* yang cocok untuk diterapkan pada sistem robot lengan adalah pada pengaturan *delay* 18.000 *microsecond* dengan selisih terbesar 0,4 cm menunjukkan bahwa jarak yang ditempuh masih dalam toleransi yaitu sebesar 2 cm.

Kemudian dilakukan pengujian untuk mencari *delay* yang diterapkan untuk pergerakan mundur dengan cara memberikan PWM 200 pada L-PWM *motor driver BTS 7960*. Sebelumnya posisi lengan ditempatkan pada jarak aman terpanjang yaitu 130 cm.

Tabel 3. Pengujian jarak aman terpendek

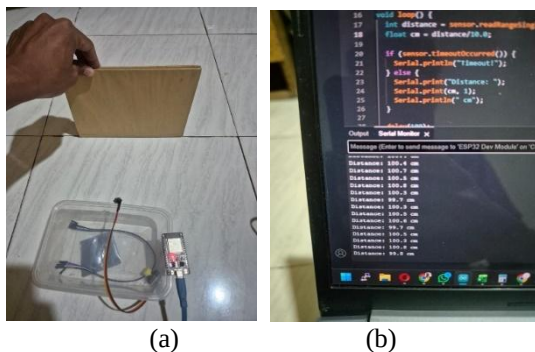
No	Delay (micro second)	Jarak pergerakan (cm)	Jarak aman terpendek (cm)	Selisih (cm)
1	18.000	90,3	91	0,7
2	17.000	92,8	91	1,8
3	18.000	91,4	91	0,4
4	18.000	90	91	0
5	18.000	90	91	0

Sumber : Dokumentasi pribadi

Tabel 3 ditunjukkan pengujian pada pergerakan DC motor untuk mencari *delay* yang sesuai dengan pergerakan terpendek yaitu 91 cm. Dengan hasil *delay* 18.000 *microsecond* adalah *delay* yang sesuai dengan jarak aman terpendek yaitu 91 cm. Beberapa kali percobaan menunjukkan hasil yang bervariasi, namun masih sangat sesuai karena jarak yang ditunjukkan dengan jarak yang diinginkan hanya memiliki selisih terbesar pengujian pada *delay* tersebut sebesar 0,7 cm.

4.4. Pengujian Sensor Jarak VL53L0X

Pengujian sensor jarak dilakukan dengan cara menghubungkan sensor jarak VL53L0X ke ESP32 dengan rincian *port* VCC sensor VL53L0X pada catu daya 3,3V, GND pada *ground*, pin SDA pada GPIO 21, SCL pada GPIO 22. Kemudian kode pemrograman yang dibuat untuk mendeteksi objek diterapkan pada sistem dan di depan sensor VL53L0X diberikan objek dan data yang didapat dibandingkan dengan pengukuran secara manual dengan alat ukur jarak konvensional.



Gambar 2. Pengujian sensor jarak VL530X
Pemberian objek terhadap sensor jarak
Tampilan serial monitor
Sumber : Dokumentasi pribadi

Gambar 4 menunjukkan bahwa (a) proses pengujian sensor jarak VL53L0X dengan cara mengaktifkan sensor dan memberikan objek di depan sensor dengan jarak yang berbeda beda. Dan pada gambar (b) adalah serial monitor yang menunjukkan hasil pengukuran dari sensor VL53L0X.

Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran sensor jarak VL53L0X yang dibandingkan dengan pengukuran dengan alat ukur konvensional dimana terlihat *error* yang muncul pada 50 cm dengan selisih

pengukuran sebesar 0,4 cm dan memiliki tingkat *error* terbesar 0,81 %. Maka dari itu sensor VL53L0X tepat digunakan dalam perancangan robot lengan karena toleransi *error* maksimal sensor jarak VL53L0X adalah 3%.

Tabel 4. Hasil pengujian sensor jarak VL53L0X

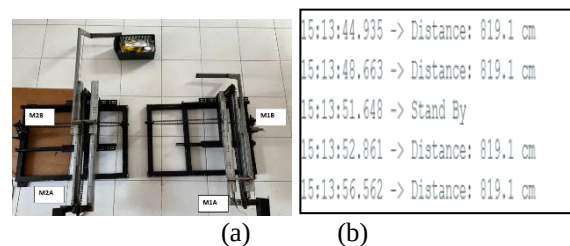
No	Nilai Aktual	Nilai Terukur	Error
1	10 cm	10 cm	0,00 %
2	20 cm	20,1 cm	0,50 %
3	30 cm	29,9 cm	0,33 %
4	40 cm	39,9 cm	0,25 %
5	50 cm	49,6 cm	0,81 %
6	60 cm	60 cm	0,00 %
7	70 cm	69,7 cm	0,43 %
8	80 cm	80 cm	0,00 %
9	90 cm	90 cm	0,00 %
10	100 cm	99,8 cm	0,20 %

Sumber : Dokumentasi pribadi

4.5. Pengujian Kondisi Standby

Pengujian kondisi *standby* ini merupakan pengujian terhadap ketepatan kerja robot lengan dalam menempatkan kapal di area yang sudah ditentukan.

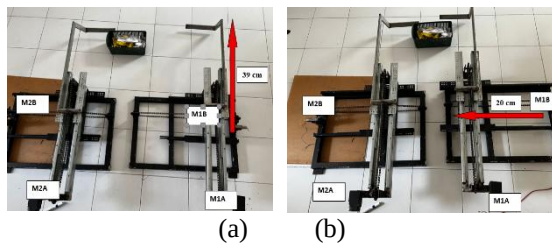
Ketika *push button standby* ditekan maka sistem robot lengan siap bekerja menerima kapal atau objek untuk disandarkan dengan sensor jarak sebagai inisiasi.



Gambar 3. Inisiasi push button pada robot lengan
Posisi awal robot lengan
Tampilan serial monitor standby
Sumber : Dokumentasi pribadi

Pada gambar 5 menunjukkan posisi awal robot lengan saat *push button* ditekan, dan serial monitor menunjukkan adanya perintah *standby* dan sistem penyandaran bisa dilakukan ketika objek terdeteksi oleh sensor jarak.

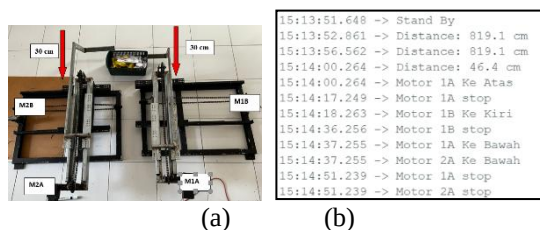
Ketika sensor VL530X membaca objek kurang dari 47 cm, maka motor DC M 1A menggerakkan lengan kanan atas robot lengan untuk maju sepanjang 39 cm. Pengaturan seberapa panjang motor M 1A menggerakkan lengan dengan mengatur *delay* sebanyak 18.000 *microsecond* pada program yang sudah dirancang. Berlanjut ke M 1B menggerakkan rel kanan bawah agar rangka atas robot lengan bagian kanan bergerak ke kiri sepanjang 20 cm dengan mengatur *delay* 16.000 *microsecond* untuk menjangkau objek yang terdeteksi oleh sensor.



Gambar 4. Pergerakan robot lengan bagian kanan Motor M 1A menggerakkan lengan kanan atas ke depan, Motor M 1B menggerakkan rangka atas ke kiri

Sumber : Dokumentasi pribadi

Gambar 6 menunjukkan proses motor M 1A menggerakkan lengan atas kanan maju, kemudian motor M 1B menggerakkan kerangka kanan atas ke kiri untuk meraih objek yang terdeteksi.



Gambar 5. Pergerakan robot lengan mendekati objek ke robot

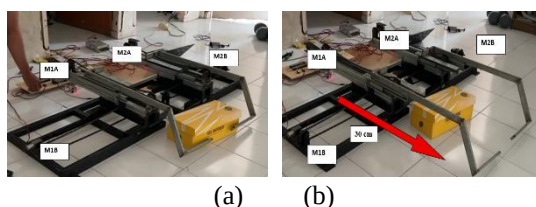
M 1A dan M 2A mendekati objek ke kerangka robot

Tampilan serial monitor

Sumber : Dokumentasi pribadi

Gambar 7 menunjukkan M 1A dan M 2A menggerakkan lengan atas kanan dan kiri secara bersamaan untuk menarik objek mendekat sepanjang 30 cm, pergerakan ini diatur dengan menetapkan *delay* selama 14.000 *microsecond*. Gambar 4.5 bagian (b) menunjukkan serial monitor proses pergerakan robot lengan dalam menyandarkan kapal ke pelabuhan. Setiap pergantian pergerakan diberikan program untuk memberhentikan motor dengan memberikan nilai 0 pada R-PWM dan L-PWM motor yang telah mencapai pergerakan yang diinginkan dengan *delay* sebesar 2.000 *microsecond*.

4.6. Pengujian Kondisi Release



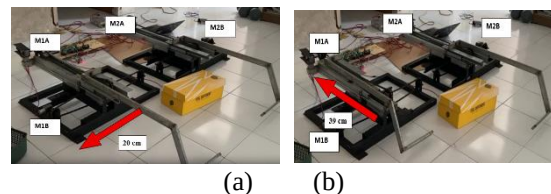
Gambar 6. Pergerakan robot lengan kondisi release Posisi awal robot lengan kondisi release

M 1A dan M 2A bergerak maju

Sumber : Dokumentasi pribadi

Pengujian kondisi *release* ini merupakan pengujian terhadap ketepatan kerja motor pada sendi robot lengan dalam melepaskan kapal dari pelabuhan agar bisa berlayar kembali. Dengan menekan *push button release* sistem pada robot lengan akan memberi ruang agar kapal bisa keluar dari pelabuhan.

Ketika tombol *release* ditekan, maka motor M 1A dan M 2A bergerak maju sepanjang 30 cm secara bersamaan dengan pengaturan *delay* 14000 *microsecond*.



Gambar 7. Pergerakan robot lengan memberi ruang objek

M 1B menggerakkan kerangka kanan atas ke kanan M 1A menggerakkan lengan kanan atas mundur

Sumber : Dokumentasi pribadi

Kemudian motor M 1B bergerak ke kanan sepanjang 20 cm dengan pengaturan *delay* 14.000 *microsecond* kemudian dilanjutkan pergerakan motor M 1A bergerak ke belakang sepanjang 39 cm dengan pengaturan *delay* 18.000 *microsecond*. Posisi *release* ini bertujuan memberi ruang terhadap kapal agar bisa keluar dari area pelabuhan. Setiap pergantian pergerakan diberikan program untuk memberhentikan motor dengan memberikan nilai 0 pada R-PWM dan L-PWM motor yang telah mencapai pergerakan yang diinginkan dengan *delay* sebesar 2.000 *microsecond*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, perancangan, dan pengujian yang telah dilakukan terhadap prototype robot lengan sebagai alat bantu sandar kapal pada pelabuhan pintar, dapat disimpulkan bahwa sistem berhasil dirancang dan direalisasikan sesuai dengan konsep yang telah ditetapkan. Robot lengan dibuat dengan menerapkan desain mekanik yang memanfaatkan bearing, rantai, serta kerangka berbahan besi sebagai struktur utama. Sistem kendali menggunakan ESP-32 sebagai pusat pengendalian, sensor jarak VL53L0X sebagai masukan untuk membaca jarak objek, serta motor DC JGY-370 sebagai aktuator pada setiap rel robot lengan. Integrasi ketiga komponen tersebut memungkinkan robot lengan melakukan pergerakan sesuai kebutuhan sistem untuk mencapai kondisi standby dan release.

Sistem yang dibangun melalui dua proses utama, yaitu standby dan release, terbukti mampu mendukung proses sandar kapal model serta membuka ruang agar kapal dapat keluar dari area pelabuhan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perhitungan pergerakan motor DC pada setiap rel robot lengan menjadi faktor penting dalam keberhasilan proses penyandaran dan pelepasan

kapal. Melalui pengaturan delay dan jarak perpanjangan lengan, sistem dapat menyesuaikan posisi robot lengan dengan ukuran objek serta posisi yang diinginkan pada prototype pelabuhan pintar. Penerapan nilai 0 pada R-PWM dan L-PWM dengan delay 2.000 microsecond pada setiap motor juga mampu memastikan motor berhenti dengan baik serta memberikan jeda waktu yang cukup bagi pergerakan motor lainnya.

Secara keseluruhan, rancang bangun robot lengan ini berhasil dibuat untuk memperagakan proses sandar kapal secara sederhana pada prototype pelabuhan pintar. Meskipun demikian, sistem yang dikembangkan masih bersifat simulatif dan belum melibatkan seluruh faktor yang memengaruhi proses sandar kapal di pelabuhan nyata, seperti pengaruh gelombang, angin, arus, ukuran kapal yang bervariasi, serta kondisi operasional pelabuhan yang lebih kompleks. Oleh karena itu, prototype ini dapat dijadikan sebagai dasar pengembangan lebih lanjut menuju sistem bantu sandar kapal yang lebih aplikatif, akurat, dan sesuai dengan kebutuhan operasional di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Rizka Gita, "Rancang Bangun Lengan Robot Penjepit PCB 3 DOF Berbasis Arduino untuk Proses Etching PCB Otomatis," Diploma thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017. [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/47867/> . [Accessed: Jun. 26, 2025].
- [2] Kraus and T. J., "Controlled Car: The Design and Assembly of a Bluetooth Controlled Remote Controlled Car," *Honors Capstone Projects and Theses*, no. 813, 2023. [Online]. Available: <https://louis.uah.edu/honors-capstones/813> . [Accessed: Jul. 28, 2025].
- [3] Okpatrioka, "Research and Development (R&D) Penelitian yang Inovatif dalam Pendidikan," *Dharma Acariya Nusantara: Jurnal Pendidikan, Bahasa dan Budaya*, vol. 1, no. 1, pp. 86–100, Mar. 2023. doi: 10.47861/jdan.v1i1.154.
- [4] A. I. Pawelloi, M. Basri, and Irwandi, "Perancangan Sistem Kendali untuk Pergerakan Lengan Robot 4-DOF," *Jurnal Mosfet*, vol. 4, no. 2, pp. 75–83, 2024. doi: 10.31850/jmosfet.v4i2.3426.
- [5] P. Peerzada, W. Hyder Larik, and A. Abbas Mahar, "DC Motor Speed Control Through Arduino and L298N Motor Driver Using PID Controller," *International Journal of Electrical Engineering & Emerging Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 21–24, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/361763175_94-Article-Text-198-1-10-20211204 . [Accessed: Jun. 6, 2025].
- [6] J. Riyanto and A. Wasid, "Perancangan Alat Bantu Parkir Mobil Berbasis ESP32-CAM dan Sensor Jarak VL53L0X Menggunakan VLC," *Jurnal Informatika & Komputasi*, vol. 17, 2023. doi: 10.56956/jiki.v17i1.173.
- [7] A. A. Saputro, Z. Hidayah, and H. Wirayuhanto, "Pemodelan Dinamika Arus Permukaan Laut Alur Pelayaran Barat Surabaya," *Jurnal Kelautan*, vol. 16, no. 1, 2023. doi: 10.21107/jk.v16i1.18269.
- [8] E. Sulistyono, "Kendali Lengan Robot Berbasis Android untuk Otomasi Lifting Barang," Thesis, Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, 2021. [Online]. Available: <https://repository.unissula.ac.id/23997/> . [Accessed: Jul. 28, 2025].
- [9] J. Supriyono, D. Wahjudi, and T. Watiningsih, "The Prototype of Robot Manipulator 4 DOF Based on Raspberry Pi Zero W," *JTECE*, vol. 4, no. 1, pp. 25–38, 2022. doi: 10.20895/jtece.v4i1.528.
- [10] N. A. Sutisna, P. Suwarno, and A. R. Firmansyah, "Rancang Bangun Robot Arm Berbasis Raspberry Pi Menggunakan Printer 3D," *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, vol. 7, no. 2, 2022. [Online]. Available: <https://e-journal.president.ac.id/index.php/JMEM/article/view/3885> . [Accessed: Mar. 27, 2025].