

Rancang Bangun dan Uji Kinerja Mekanisme Crank-Slider pada Alat Resusitasi Jantung Paru Otomatis Berbasis Arduino Mega 2560

Rafiuddin Syam, Muhammad Awaluddin*, Churnia Sari

Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka, Jakarta Timur 13220, Indonesia

*Corresponding author email: muhammad_1527422011@mhs.unj.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Dijadikan pada 25 Juli 2025
Direvisi pada 1 Agustus 2026
Disetujui pada 30 Agustus 2025
Tersedia daring pada 30 Desember 2025



ABSTRAK

Henti jantung mendadak memerlukan tindakan Resusitasi Jantung Paru (RJP) segera dengan kedalaman kompresi 5–6 cm dan frekuensi 100–120 kompresi per menit sesuai standar American Heart Association (AHA) 2020. Pelaksanaan RJP manual rentan mengalami penurunan konsistensi akibat kelelahan penolong, sehingga diperlukan alat RJP otomatis yang mampu menjaga akurasi dan konsistensi kompresi. Penelitian ini merancang dan menguji kinerja mekanisme crank-slider sebagai penekan dada pada alat RJP otomatis berbasis Arduino Mega 2560 dengan sistem lifter berbasis lead screw T8 dan motor stepper NEMA17 untuk menyesuaikan posisi awal (zero point) terhadap variasi dimensi toraks pasien, dibantu rotary encoder incremental berbasis Hall Effect sebagai umpan balik posisi. Pengembangan produk mengacu pada metode VDI 2221, sedangkan pengendalian kecepatan motor DC PG45 menggunakan kontroler PID yang parameternya dioptimasi melalui algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) dengan fungsi objektif Integral Time Absolute Error (ITAE). Hasil optimasi memperoleh $K_p = 5,0000$; $K_i = 2,9519$; dan $K_d = 0,5000$ dengan nilai ITAE minimum 2,3586. Jari-jari crank 28 mm menghasilkan panjang langkah kompresi 56 mm (5,6 cm) sesuai standar AHA. Pengujian fisik pada manekin CPR menunjukkan deviasi (RMSE) sebesar 30,12 antara kecepatan simulasi ideal 120 RPM dan implementasi aktual rata-rata 91,95 RPM, yang diidentifikasi akibat resistensi beban viskoelastik dinding dada manekin serta kerugian gesekan mekanis internal pada beban puncak. Alat yang dikembangkan mampu menghasilkan kedalaman kompresi yang konsisten sesuai standar AHA, meskipun performa kecepatan motor pada implementasi fisik masih perlu ditingkatkan agar lebih mendekati hasil simulasi.

Kata Kunci: mekanisme crank-slider, mikrokontroler, particle swarm optimization, resusitasi jantung paru

ABSTRACT

Sudden cardiac arrest requires immediate cardiopulmonary resuscitation (CPR) with a compression depth of 5–6 cm and a rate of 100–120 compressions per minute according to the 2020 American Heart Association (AHA) guidelines. Manual CPR is prone to declining consistency due to rescuer fatigue, so an automatic CPR device is needed to maintain accurate and consistent compressions. This study designs and evaluates a crank-slider chest-compression mechanism for an automatic CPR device based on an Arduino Mega 2560, using a lead-screw-and-NEMA17-stepper lifter to adjust the zero position for patient chest-size variation, assisted by a Hall-effect incremental rotary encoder. Product development follows the VDI 2221 method, while a PID controller regulates the PG45 DC motor speed, tuned using Particle Swarm Optimization (PSO) with an ITAE objective function. Optimization yielded $K_p = 5.0000$, $K_i = 2.9519$, and $K_d = 0.5000$ with a minimum ITAE of 2.3586. A 28 mm crank radius produced a 56 mm (5.6 cm) compression stroke consistent with the AHA standard. Physical testing on a CPR manikin showed an RMSE of 30.12 between the ideal simulated speed (120 RPM) and the actual implementation (average 91.95 RPM), attributed to the manikin chest wall's viscoelastic resistance and internal mechanical friction under peak load. The developed device produced a compression depth consistent with the AHA standard, although motor-speed performance in the physical implementation still needs improvement.

Keywords: cardiopulmonary resuscitation, crank-slider mechanism, microcontroller, particle swarm optimization, PID control

PENDAHULUAN

Henti jantung mendadak merupakan salah satu penyebab utama kematian di dunia yang memerlukan penanganan cepat dan tepat untuk mencegah kerusakan organ vital seperti otak dan jantung. Resusitasi Jantung Paru (RJP) merupakan tindakan penyelamatan yang bertujuan mempertahankan sirkulasi darah dan suplai oksigen ke organ vital melalui kompresi dada yang efektif dan kontinu. Berdasarkan pedoman American Heart Association (AHA), kedalaman kompresi dada pada pasien dewasa direkomendasikan sebesar 5–6 cm dengan frekuensi 100–120 kompresi per menit agar sirkulasi darah tetap optimal selama proses resusitasi (American Heart Association, 2020). Dalam praktiknya, pelaksanaan RJP manual sangat bergantung pada kondisi fisik penolong. Kelelahan yang dialami penolong dapat menurunkan kualitas kompresi baik dari sisi kedalaman maupun konsistensi ritme, sehingga menurunkan peluang keberhasilan penyelamatan pasien. Kondisi ini mendorong pengembangan alat RJP otomatis sebagai solusi untuk menjaga konsistensi dan akurasi kompresi dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan metode manual.

Penelitian terdahulu telah mengembangkan berbagai alat RJP otomatis dengan mekanisme yang berbeda-beda. Syam dan Maruddani mengembangkan prototipe RJP portabel berbasis Arduino, namun masih menghadapi kendala dalam menjaga konsistensi tekanan kompresi ketika menghadapi variasi beban mekanis pada dada pasien. (Noventra dan Lim 2020) menggunakan motor stepper sebagai aktuator utama, namun mekanisme transmisinya menghasilkan gerakan kompresi yang kurang stabil. (Studi et al. 2024) telah mengintegrasikan sistem monitoring pada alat RJP otomatis, tetapi sistem kontrol yang digunakan masih perlu ditingkatkan untuk meminimalkan kesalahan kedalaman kompresi. Sementara itu, (Lescher et al. 2025) menunjukkan bahwa kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) memiliki stabilitas yang baik pada sistem medis yang membutuhkan presisi tinggi secara real-time, dan (Sung et al. 2020) menegaskan pentingnya penyesuaian posisi awal penekan terhadap variasi antropometri dada pasien untuk menjaga konsistensi kedalaman kompresi (Syam, R., & Maruddani, B. 2024). Berdasarkan kajian tersebut (Mohan Aggarwal, C., et al (2022)., teridentifikasi celah penelitian berupa: (1) belum optimalnya kompensasi beban secara real-time terhadap karakteristik viskoelastik dinding dada yang berbeda pada setiap pasien; (2) terbatasnya sensor umpan balik posisi yang terintegrasi dalam kontrol closed-loop; dan (3) minimnya mekanisme penyesuaian posisi awal (zero point) yang mengakomodasi variasi dimensi toraks pasien. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi mekanisme crank-slider sebagai penekan dada dengan sistem lifter adaptif berbasis lead screw T8 dan motor stepper NEMA17 untuk penyesuaian zero point, dipadukan dengan kendali kecepatan motor DC menggunakan PID yang parameternya dioptimasi melalui algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) berbasis fungsi objektif Integral Time Absolute Error (ITAE), serta umpan balik rotary encoder incremental berbasis Hall Effect (Panchal, A. R.,dkk., 2020). Secara global, pengembangan alat ini mendukung Sustainable Development Goals (SDGs) tujuan ke-3, Good Health and Well-Being, dan pada tingkat nasional sejalan dengan visi Asta Cita dalam memperkuat kemandirian industri alat kesehatan yang inovatif, efektif, dan terjangkau. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk merancang struktur mekanis alat RJP portable yang mengintegrasikan sistem lifter dan mekanisme crank-slider, mengimplementasikan rotary encoder sebagai umpan balik penentuan zero point, merancang dan mengimplementasikan kendali PID-PSO untuk mempertahankan kedalaman kompresi pada rentang 5–6 cm, serta mengevaluasi kinerja alat melalui pengujian pada manekin CPR.

METODE

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Rekayasa Otomasi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta selama 6 (enam) bulan, meliputi tahap studi literatur, perancangan sistem, perakitan, pengujian akurasi, hingga penyusunan laporan.

Metode Pengembangan Produk

Pengembangan alat mengacu pada metode VDI 2221 yang membagi proses perancangan menjadi empat tahap, yaitu analisis kebutuhan (clarification of task) berdasarkan standar AHA 2020, penyusunan konsep (conceptual design) berupa pemilihan mekanisme crank-slider, motor DC PG45 gearbox 71:1, serta lifter lead screw T8 dan motor stepper NEMA17, perancangan wujud (embodiment design) meliputi desain mekanik pada Autodesk Fusion 360 dan diagram blok sistem, serta perancangan terperinci (detail design) berupa penyusunan algoritma kendali PID, optimasi parameter menggunakan PSO, simulasi MATLAB, dan implementasi pada Arduino Mega 2560. Gambar dibawah ini adalah blok diagram keseluruhan sistem.

Bahan dan Peralatan

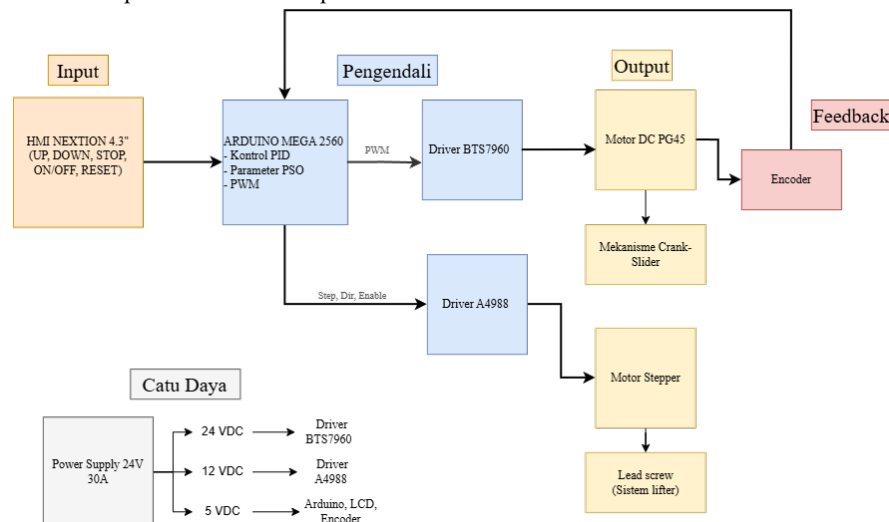
Sistem mekanik menggunakan mekanisme crank-slider (crank arm, rod end bearing, piston penekan, shaft) dan sistem lifter (lead screw T8, linear rail MGN, shaft lifter) dengan rangka aluminium dan bagian cetak 3D PETG. Sistem elektronik terdiri atas Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama, motor DC PG45 24V gearbox 71:1, motor stepper NEMA17, rotary encoder incremental, driver BTS7960 43A, driver A4988, LCD TFT 4,3 inci, serta catu daya 24 VDC. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE, Autodesk Fusion 360, MATLAB, dan Ultimaker Cura.

Perancangan Mekanik

Mekanisme crank-slider berfungsi mengubah gerak rotasi motor DC menjadi gerak translasi pada batang penekan. Panjang langkah kompresi (stroke) ditentukan oleh jari-jari crank menggunakan persamaan (1).

$$S = 2r \quad (1)$$

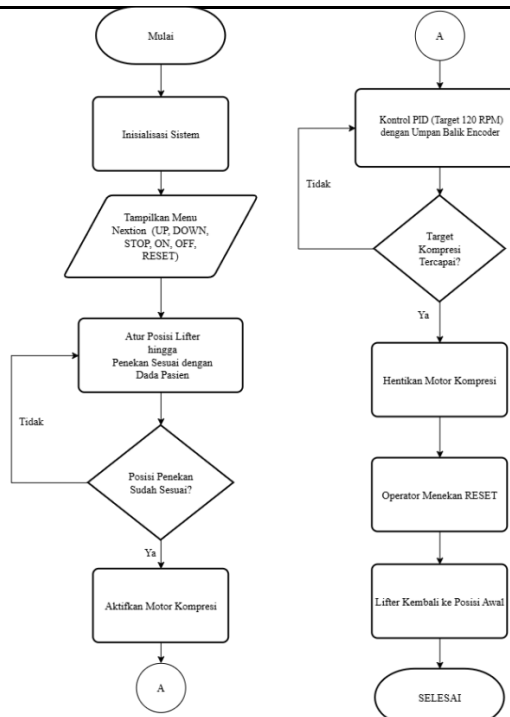
Dengan menggunakan jari-jari crank $r = 28 \text{ mm}$ diperoleh panjang langkah $S = 2 \times 28 = 56 \text{ mm}$ (5,6 cm), sesuai rentang kedalaman kompresi 5–6 cm yang direkomendasikan AHA. Panjang connecting rod ditentukan menggunakan rasio $k = 4$ terhadap jari-jari crank sehingga $l = k \cdot r = 4 \times 28 = 112 \text{ mm}$, guna menghasilkan gerakan slider yang stabil dengan gaya samping (side thrust) yang minimal. Sistem lifter menggunakan lead screw T8 dengan lead 8 mm/putaran yang digerakkan motor stepper NEMA17 (1,8°/step, 200 step/putaran) untuk mengatur posisi awal (zero point) penekan sebelum kompresi dimulai. Perpindahan linier per putaran dihitung dengan $L = n \cdot l$, sehingga satu putaran penuh menghasilkan perpindahan 8 mm, dengan resolusi per langkah sebesar $8/200 = 0,04 \text{ mm}$. Lead screw sepanjang 150 mm memberikan kapasitas gerak maksimum 18,75 putaran atau 3.750 langkah, mencukupi untuk mengakomodasi variasi dimensi toraks pasien sebelum kompresi dimulai.



Gambar 1. Blok Diagram Alat

Perancangan Software

Sistem elektronik dirancang agar Arduino Mega 2560 dapat mengendalikan motor kompresi, mengatur posisi awal mekanisme lifter, membaca data sensor, serta menampilkan informasi kepada pengguna. Rotary encoder membaca kecepatan putaran motor DC PG45 sebagai umpan balik bagi pengendali PID, yang keluarannya berupa sinyal PWM dikirim ke driver BTS7960 untuk mengatur tegangan motor. Motor stepper NEMA17 dikendalikan melalui driver A4988 dan hanya aktif pada tahap pengaturan zero point, sedangkan seluruh proses kompresi dijalankan oleh motor DC PG45 melalui mekanisme crank-slider.



Gambar 2. Flowchart Algoritma Sistem

Pemodelan Sistem dan Perancangan Kendali PID

Model sistem terdiri atas tiga bagian: model motor DC PG45, model mekanisme crank-slider, dan model beban kompresi. Dinamika mekanik motor dinyatakan melalui hubungan tegangan, arus armatur, dan kecepatan sudut motor, sedangkan hubungan sudut crank terhadap perpindahan slider dinyatakan sebagai $x = r(1 - \cos\theta)$. Beban kompresi dimodelkan sebagai sistem pegas-redaman (spring-damper), $F = Kx + Bv$, yang kemudian dikonversi menjadi torsi beban pada motor. Kecepatan putaran motor dikendalikan menggunakan pengendali PID yang secara matematis dinyatakan pada Persamaan (2).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Dengan $e(t)$ merupakan selisih antara kecepatan referensi 120 RPM dan kecepatan aktual hasil pembacaan rotary encoder, sedangkan K_p , K_i , dan K_d merupakan konstanta penguatan yang ditentukan melalui proses optimasi. Persamaan PID diimplementasikan dalam bentuk diskrit pada mikrokontroler, dilengkapi dengan anti-windup pada aksi integral, low-pass filter ($\alpha = 0,75$) pada pembacaan kecepatan, serta feedforward control untuk mempercepat respons awal motor.

Optimasi Parameter PID Menggunakan PSO

Parameter K_p , K_i , dan K_d tidak ditentukan secara manual, melainkan diperoleh melalui optimasi menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) dengan fungsi objektif Integral Time Absolute Error (ITAE), sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (3).

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (3)$$

Setiap partikel merepresentasikan satu kombinasi K_p , K_i , dan K_d yang dievaluasi berdasarkan nilai ITAE hasil simulasi sistem kendali tertutup. Parameter algoritma PSO dan rentang pencarian parameter PID yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Parameter algoritma Particle Swarm Optimization.

Parameter	Nilai
Jumlah partikel	15
Jumlah iterasi maksimum	20
Inertia weight (w)	0,6
Cognitive coefficient (c_1)	1,5
Social coefficient (c_2)	1,5

Tabel 2. Rentang pencarian parameter PID.

Parameter	Lower bound	Upper bound
Kp	0,1	5,0
Ki	0,5	10,0
Kd	0,0	0,5

Simulasi dan Pengujian

Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB selama 6 detik dengan waktu sampling 0,005 detik dan target kecepatan motor 120 RPM untuk menghasilkan frekuensi kompresi 120 CPM. Setelah parameter PID hasil optimasi diverifikasi melalui simulasi, parameter tersebut diimplementasikan pada program Arduino Mega 2560 untuk mengendalikan prototipe alat RJP. Pengujian implementasi dilakukan pada manekin CPR meliputi pengujian kecepatan motor menggunakan rotary encoder dan tachometer digital, serta pengujian kedalaman kompresi menggunakan jangka sorong (digital caliper). Tingkat kesesuaian antara hasil simulasi dan implementasi dievaluasi menggunakan metode Root Mean Square Error (RMSE) pada Persamaan (4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - y_i)^2} \quad (4)$$

dengan r_i adalah data hasil simulasi, y_i adalah data hasil implementasi, dan N adalah jumlah data pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Optimasi Parameter PID Menggunakan PSO

Proses optimasi menggunakan algoritma PSO berhasil memperoleh kombinasi parameter PID dengan nilai fungsi objektif ITAE minimum sebesar 2,3586, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter PID hasil optimasi PSO.

Parameter	Nilai
Kp	5,0000
Ki	2,9519
Kd	0,5000
Nilai ITAE	2,3586

Kurva konvergensi PSO menunjukkan nilai Global Best ITAE menurun dari 3,1617 pada iterasi pertama menjadi 2,3586 pada iterasi kelima, kemudian relatif konstan hingga iterasi ke-20. Kondisi ini mengindikasikan bahwa algoritma telah mencapai konvergensi dan tidak ditemukan solusi yang lebih baik pada ruang pencarian yang ditetapkan.

Hasil Simulasi

Simulasi menggunakan parameter PID hasil optimasi menunjukkan bahwa kecepatan motor mampu meningkat dengan cepat menuju nilai referensi 120 RPM dan mempertahankan putarannya dengan fluktuasi yang sangat kecil, tanpa osilasi berlebihan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3(b). Performa tracking yang baik ini didukung oleh penerapan feedforward control, low-pass filter pada pembacaan kecepatan, dan anti-windup pada aksi integral, dengan proses pencarian parameter PID melalui algoritma PSO mencapai konvergensi seperti terlihat pada Gambar 3(a). Sinyal PWM yang dihasilkan berada pada kisaran 245–255, menunjukkan bahwa motor memerlukan tegangan relatif tinggi untuk mempertahankan putaran 120 RPM saat menggerakkan mekanisme crank-slider. Kedalaman kompresi hasil simulasi membentuk pola periodik yang seragam pada setiap siklus dengan nilai maksimum sekitar 5,6 cm, sedangkan frekuensi kompresi stabil pada kisaran 120 CPM. Kedua nilai tersebut telah memenuhi rekomendasi AHA sebesar 5–6 cm dan 100–120 kompresi per menit.

Implementasi Sistem

Parameter PID hasil optimasi PSO diterapkan pada program Arduino Mega 2560 untuk mengendalikan motor DC PG45 melalui driver BTS7960 berdasarkan umpan balik rotary encoder. Realisasi mekanik menunjukkan bahwa mekanisme crank-slider dan sistem lifter berhasil dirakit sesuai rancangan dan mampu bekerja sebagaimana mestinya, sedangkan realisasi elektronik menunjukkan seluruh komponen terhubung sesuai wiring diagram dan mampu melakukan komunikasi data serta pengendalian secara normal. Realisasi fisik alat RJP portable hasil implementasi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Purwarupa alat resusitasi jantung paru hasil rancang bangun
Sumber: Dokumen pribadi

Hasil Pengujian Alat

Pengujian kecepatan motor dilakukan dengan target referensi 120 RPM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan aktual motor pada kondisi implementasi bervariasi antara 80,1 RPM hingga 110,7 RPM, dengan persentase kesalahan (error) yang menurun dari sekitar 33% pada awal pengujian menjadi sekitar 7,8% pada kondisi mendekati stabil, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian kecepatan motor (ringkasan)

Target RPM	RPM Aktual	Error (%)
120	80,1 – 87,3	27,3 – 33,3
120	98,2 – 103,4	13,8 – 18,2
120	108,2 – 110,7	7,8 – 9,8

Pengujian kedalaman kompresi menggunakan digital caliper terhadap target 56 mm menunjukkan hasil yang sangat konsisten, dengan pengukuran berada pada rentang 55,8–56,0 mm dan persentase kesalahan maksimum sebesar 0,34%, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian kedalaman kompresi (10 kali pengulangan)

Target (mm)	Rentang hasil (mm)	Error maksimum (%)
56	55,8 – 56,0	0,34

Perbandingan Simulasi dan Implementasi

Perbandingan antara hasil simulasi dan implementasi pada parameter kecepatan motor ditunjukkan pada Tabel 6. Kecepatan motor rata-rata pada implementasi sebesar 91,95 RPM, lebih rendah dibandingkan target simulasi sebesar 120 RPM, dengan selisih rata-rata 28,05 RPM.

Tabel 6. Perbandingan kecepatan motor simulasi dan implementasi

Parameter	Simulasi	Implementasi	Selisih
Target RPM	120,0	120,0	0
RPM rata-rata	120,0	91,95	28,05
RPM minimum	120,0	80,1	39,9
RPM maksimum	120,0	110,7	9,3

Analisis RMSE terhadap data kecepatan motor menghasilkan nilai sebesar 30,12, yang menunjukkan adanya penyimpangan yang cukup signifikan antara model simulasi dan kondisi implementasi nyata, terutama pada aspek kecepatan putaran motor terhadap beban mekanis.

Hasil simulasi pada MATLAB menunjukkan performa pengendalian yang baik karena model yang digunakan masih mengasumsikan kondisi ideal tanpa pengaruh gesekan mekanik, beban dinamis, toleransi komponen, maupun gangguan perangkat keras. Pada kondisi implementasi nyata, kecepatan motor mengalami respons transien berupa overshoot pada awal pengoperasian sebelum menuju kondisi yang relatif stabil, namun belum mampu mencapai nilai referensi 120 RPM dan hanya berada pada kisaran 80–110 RPM ketika sistem bekerja melawan beban mekanisme kompresi. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor. Pertama, akurasi pembacaan rotary encoder sebagai sensor umpan balik dapat berkurang akibat kehilangan pulsa (missing pulse) atau noise akibat getaran mekanik, sehingga nilai RPM yang dihitung mikrokontroler dapat menyimpang dari kecepatan sebenarnya. Kedua, karakteristik hubungan kecepatan-torsi (speed-torque characteristic) motor DC PG45 menyebabkan kecepatan putaran menurun ketika beban meningkat akibat gesekan mekanik pada mekanisme crank-slider, bantalan, dan efisiensi gearbox 71:1. Ketiga, spesifikasi kecepatan pada datasheet motor umumnya merupakan kecepatan tanpa beban (no-load speed), sedangkan pada implementasi motor bekerja dengan beban mekanik yang berubah-ubah selama proses kompresi, sehingga memerlukan torsi lebih besar untuk mempertahankan putaran konstan. Meskipun demikian, mekanisme crank-slider dengan jari-jari crank 28 mm tetap berhasil menghasilkan kedalaman kompresi konsisten sebesar 55,8–56,0 mm (sekitar 5,6 cm) dengan error di bawah 0,4%, karena kedalaman kompresi pada penelitian ini ditentukan secara mekanis melalui geometri crank-slider dan tidak bergantung sepenuhnya pada pencapaian kecepatan referensi motor. Hal ini menunjukkan bahwa keunggulan utama penelitian ini terletak pada akurasi kedalaman kompresi yang presisi dan konsisten sesuai standar AHA, sedangkan aspek kecepatan atau frekuensi kompresi masih memerlukan penyempurnaan lebih lanjut, khususnya pada pemilihan aktuator dengan torsi lebih tinggi dan peningkatan kualitas sinyal umpan balik encoder.

KESIMPULAN

Alat Resusitasi Jantung Paru (RJP) portable berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560 berhasil dirancang dan direalisasikan dengan mengintegrasikan mekanisme crank-slider sebagai penekan dada dan sistem lifter berbasis lead screw T8 dan motor stepper NEMA17 untuk penyesuaian posisi awal (zero point). Optimasi parameter PID menggunakan algoritma PSO dengan fungsi objektif ITAE menghasilkan $K_p = 5,0000$, $K_i = 2,9519$, dan $K_d = 0,5000$ dengan ITAE minimum 2,3586, yang mampu menghasilkan respons kecepatan motor yang cepat dan stabil pada simulasi MATLAB dengan target 120 RPM. Pada implementasi, jari-jari crank 28 mm terbukti menghasilkan kedalaman kompresi 55,8–56,0 mm dengan error di bawah

0,4% sehingga konsisten memenuhi standar AHA sebesar 5–6 cm. Namun demikian, kecepatan motor pada implementasi nyata hanya mencapai kisaran 80–110 RPM dari target 120 RPM, dengan RMSE sebesar 30,12, akibat resistensi beban viskoelastik dinding dada manekin, gesekan mekanis internal, serta keterbatasan torsi motor DC PG45 pada beban puncak. Berdasarkan temuan tersebut, beberapa saran diajukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Pertama, penggunaan aktuator dengan torsi lebih tinggi atau rasio gearbox yang lebih besar diperlukan agar kecepatan motor tetap mampu mempertahankan nilai referensi ketika bekerja melawan beban viskoelastik dinding dada pasien maupun manekin. Kedua, kualitas pembacaan rotary encoder perlu ditingkatkan, misalnya dengan resolusi pulsa yang lebih tinggi atau filtering sinyal tambahan, guna mengurangi missing pulse dan noise akibat getaran mekanik pada saat kompresi. Ketiga, penerapan metode kendali adaptif seperti Adaptive PID atau Fuzzy-PID dapat dipertimbangkan untuk mengkompensasi perubahan beban mekanis secara real-time sehingga kecepatan motor dapat dipertahankan lebih dekat dengan nilai referensi pada kondisi pembebanan nyata. Keempat, pengujian lanjutan perlu dilakukan pada manekin dengan variasi karakteristik kekakuan dada maupun pada subjek yang lebih representatif, untuk memvalidasi konsistensi kedalaman dan frekuensi kompresi pada kondisi yang lebih beragam. Kelima, penambahan sistem monitoring dan logging data secara real-time disarankan agar kinerja alat dapat dipantau dan dievaluasi lebih lanjut selama proses resusitasi berlangsung.

STATEMENT DAN DECLARATION

Competing Interests. Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian maupun publikasi artikel ini.

Author Contributions. RS berkontribusi dalam konseptualisasi penelitian, perancangan mekanisme *crank-slider*, analisis karakteristik mekanis sistem, serta supervisi pelaksanaan penelitian. MA berkontribusi dalam analisis kebutuhan, perancangan dan pembuatan prototipe, integrasi mekanisme *crank-slider* dengan sistem kendali berbasis Arduino Mega 2560, pelaksanaan pengujian kinerja, pengolahan dan analisis data, serta penyusunan manuskrip awal. CS berkontribusi dalam perancangan sistem, pengujian kinerja mekanisme, analisis dan interpretasi hasil pengujian, validasi hasil, serta penelaahan dan penyempurnaan manuskrip. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir manuskrip.

Ethics Approval. Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa yang berfokus pada perancangan, pembuatan, dan pengujian kinerja mekanisme *crank-slider* pada prototipe alat resusitasi jantung paru otomatis berbasis Arduino Mega 2560. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik dan kinerja mekanis sistem serta tidak melibatkan penerapan atau pengujian alat secara langsung pada manusia maupun hewan. Oleh karena itu, persetujuan etik tidak diperlukan.

Informed Consent to Participate. Tidak berlaku. Penelitian ini berfokus pada pengembangan dan pengujian aplikasi perangkat lunak dan tidak melibatkan partisipan manusia sebagai subjek penelitian.

Consent for Publication. Tidak berlaku. Manuskrip ini tidak memuat informasi pribadi atau data yang dapat mengidentifikasi individu.

Data Availability. Data dan hasil pengujian yang mendukung temuan penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar.

Use of Artificial Intelligence Tools. Tidak ada alat OpenAI atau alat kecerdasan buatan generatif lainnya yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian, pengembangan aplikasi, pengujian sistem, analisis data, maupun penulisan manuskrip. Jika perangkat lunak pemeriksaan bahasa digunakan selama proses penyusunan manuskrip, penggunaannya terbatas pada pemeriksaan tata bahasa dan kebahasaan. Seluruh saran perbaikan bahasa ditinjau oleh para penulis, yang bertanggung jawab penuh atas isi akhir manuskrip.

DAFTAR PUSTAKA

- American Heart Association. (2020). Guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care. American Heart Association.
- Ab Wahab, M. N., Nefti-Meziani, S., & Atyabi, A. (2015). A comprehensive review of swarm optimization algorithms. *PLoS ONE*, 10(5), e0122827. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122827>
- Fiebig, W., & Pratiyo, W. (2022). Analysis of the slider-crank mechanism kinematics for reciprocating machinery applications. *Archive of Mechanical Engineering*, 69(3), 45–58.
- Freitas, D., Lopes, L. G., & Morgado-Dias, F. (2020). Particle swarm optimisation: A historical review up to the current developments. *Entropy*, 22(3), 362. <https://doi.org/10.3390/e22030362>
- Lescher, A., González, L., Griffith, I., Molino, J., Rojas, A., & Quijano, D. (2025). Evaluation of flow control using PID versus fuzzy logic in an electropneumatic circuit for pulmonary ventilation applications. *medRxiv*.

<https://doi.org/10.1101/2025.01.07.25320144>

- Meaney, P. A., Bobrow, B. J., Mancini, M. E., Christenson, J., de Caen, A. R., Bhanji, F., Abella, B. S., Kleinman, M. E., Edelson, D. P., Berg, R. A., Aufderheide, T. P., Menon, V., & Leary, M. (2013). Cardiopulmonary resuscitation quality: Improving cardiac resuscitation outcomes both inside and outside the hospital. *Circulation*, 128(4), 417–435. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e31829d8654>
- Merchant, R. M., Topjian, A. A., Panchal, A. R., Cheng, A., Aziz, K., Berg, K. M., Lavonas, E. J., & Magid, D. J. (2020). Part 1: Executive summary: 2020 American Heart Association guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care. *Circulation*, 142(16_suppl_2), S337–S357. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000918>
- Mohan Aggarwal, C., Dhanwaria, B., Kudiya, A., & Rani, D. (2022). Study the slider crank mechanism. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 6(9), 112–118.
- Nowicki, M., & Respondek, W. (2022). Mechanical feedback linearization of single-input mechanical control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 68(9), 5432–5447. <https://doi.org/10.1109/TAC.2023.3259004>
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Panchal, A. R., Bartos, J. A., Cabanas, J. G., Donnino, M. W., Drennan, I. R., Hirsch, K. G., Kudenchuk, P. J., Kurz, M. C., Lavonas, E. J., Morley, P. T., O'Neil, B. J., Peberdy, M. A., Rittenberger, J. C., Rodriguez, A. J., Sawyer, K. N., & Berg, K. M. (2020). Part 3: Adult basic and advanced life support: 2020 American Heart Association guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care. *Circulation*, 142(16_suppl_2), S366–S468. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000916>
- Perkins, G. D., Gräsner, J. T., Semeraro, F., Olasveengen, T., Soar, J., Lott, C., Van de Voorde, P., Madar, J., Zideman, D., Mentzelopoulos, S., Bossaert, L., Greif, R., Monsieurs, K., Svavarsdóttir, H., & Nolan, J. P. (2021). European Resuscitation Council guidelines 2021: Executive summary. *Resuscitation*, 161, 1–60. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2021.02.003>
- Sanoj, K., & Dhanya Ram, S. (2024). Performance comparison of ITAE, IAE, ISE, and ITSE based tuning of PID controllers. *International Journal of Control and Automation*, 17(2), 33–44.
- Studi, P., Elektro, T., Sains, F., Teknologi, D., Fakultas, E., & Dan, S. (2024). Prototype resusitasi jantung paru (RJP) menggunakan motor NEMA 23 dan sensor detak jantung untuk memudahkan media interface [Skripsi, Universitas Negeri Jakarta].
- Sung, C. W., Wang, H. C., Shieh, J. S., & Jaw, F. S. (2020). A novel mechanical chest compressor with rapid deployment in all population cardiopulmonary resuscitation. *Scientific Reports*, 10(1), 20653. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63058-9>
- Syam, R., & Maruddani, B. (2024). Prototype of a portable cardiopulmonary resuscitation device using microcontroller technology. *International Journal on Smart Material and Mechatronics*, 11(2), 45–52.
- Utkarsh Patil, M., Nishant Khengare, M., Rokade, M. O., Siddhant Poman, M., & Kokare, N. (2024). Optimizing linear motion: Choosing the right lead screw actuator configuration. *International Journal for Science and Advance Research in Technology*, 10(4), 220–226.
- Xu, X., Wang, S., Wang, S., & Liu, G. (2022). Mathematical model of blood circulation with compression of the prototype's mechanical CPR waveform. *Bioengineering*, 9(12), 802. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9120802>

