

PERANCANGAN SISTEM KENDALI PADA ALAT LIQUID HANDLING SYSTEM 3-AXIS MODIFIKASI MESIN 3D PRINTING FUSED DEPOSITION MODELING

Prihatama Wahyu S.¹, Ferly Isnomo Abdi^{2*}, Diah Wulandari³, Arya Mahendra Sakti⁴

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

E-mail: *ferlyabdi@unesa.ac.id

Abstrak: Perkembangan Sistem pipetting manual masih sering digunakan, sehingga berisiko terhadap kontaminasi akibat kontak langsung dengan tangan manusia. Liquid Handling System (LHS) merupakan solusi otomatis untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi risiko kontaminasi, tetapi harganya mahal karena sistem kendali dan mekaniknya yang kompleks. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan prototipe LHS dengan memanfaatkan mesin 3D printing tipe fused deposition modeling (FDM) berbasis sistem gerak kartesius pada sumbu X, Y, dan Z, sehingga menjadi lebih ekonomis dan efisien. Penelitian ini menggunakan metode research and development (R&D) yang meliputi pengembangan desain, pembuatan prototipe, uji coba, dan analisis data. Sistem kendali dirancang berbasis open-loop menggunakan Arduino Nano ATmega168 sebagai pengendali utama, dan ESP32 untuk komunikasi Bluetooth antara joystick dan gerakan LHS. Variasi kecepatan motor stepper (High, Medium, dan Low) diuji untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kecepatan dan akurasi pipetting. Motor stepper NEMA 8 digunakan sebagai aktuator utama, dengan dukungan CNC shield dan driver motor stepper. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan Low dan Medium menghasilkan stabilitas volume cairan yang baik (2,71–12,29 mL dan 2,96–12,42 mL), sedangkan kecepatan High memberikan throughput lebih tinggi (4,25–17,21 mL), tetapi kurang stabil pada step angle besar. Prototipe ini direkomendasikan untuk aplikasi pipetting dengan penyesuaian kecepatan berdasarkan kebutuhan akurasi atau throughput.

Kata kunci: Pipetting, Liquid Handling System, 3D Printing.

Abstract: Manual pipetting systems are still widely used, posing a risk of contamination due to direct contact with human hands. The Liquid Handling System (LHS) offers an automated solution to improve efficiency and minimize contamination risks. However, its adoption is often hindered by the high cost associated with its complex control systems and mechanics. This research aims to develop a more economical and efficient LHS prototype by utilizing a 3D printing machine with a fused deposition modeling (FDM) method, based on a Cartesian motion system in the X, Y, and Z axes. The research employs a research and development (R&D) methodology, encompassing design development, prototyping, testing, and data analysis. The control system is designed as an open-loop system using an Arduino Nano ATmega168 as the primary controller and an ESP32 for Bluetooth communication between the joystick and the LHS movements. Stepper motor speed variations (High, Medium, and Low) were tested to evaluate their effects on pipetting speed and accuracy. A NEMA 8 stepper motor was used as the main actuator, supported by a CNC shield and stepper motor driver. The results demonstrated that Low and Medium speeds provided good liquid volume stability (2.71–12.29 mL and 2.96–12.42 mL, respectively), while High speed delivered higher throughput (4.25–17.21 mL) but exhibited reduced stability at larger step angles. This prototype is recommended for pipetting applications where speed adjustments can be tailored to prioritize either accuracy or throughput, depending on specific requirements.

Keywords: Pipetting, Liquid Handling System, 3D Printing.

© 2024, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di era globalisasi telah membawa manfaat besar dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk di sektor medis dan kesehatan. Teknologi otomatisasi, terutama sistem kendali otomatis, memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas, efisiensi, dan ergonomi pekerjaan, sekaligus menggantikan tugas-tugas rutin yang sebelumnya dilakukan secara manual (Rothmiller dkk., 2020).

Dalam konteks ini, penerapan teknologi otomatisasi telah memberikan dampak positif yang signifikan.

Salah satu tantangan di laboratorium medis dan kesehatan adalah proses pipetting, yang membutuhkan ketelitian tinggi dalam mengukur volume cairan yang sangat kecil. Sistem pipetting tradisional sering kali membutuhkan tenaga kerja yang besar dan rentan terhadap kesalahan manusia, yang dapat mempengaruhi akurasi dan efisiensi hasil penelitian

(Pan dkk., 2021). Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam bentuk sistem pipetting otomatis yang lebih efisien dan andal.

Sistem pipetting, atau yang dikenal sebagai sistem penanganan cairan, adalah metode untuk memindahkan cairan dari satu wadah ke wadah lain menggunakan alat yang dikalibrasi (Townsend dkk., 2015). Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi Liquid Handling System (LHS) telah muncul sebagai solusi yang memberikan presisi dan akurasi tinggi untuk berbagai aplikasi, seperti penelitian molekuler, pengujian obat, diagnostik medis, dan studi kimia (Kai-Hua Chow, 2018). Namun, harga sistem LHS yang sangat tinggi, berkisar antara \$50.000 hingga \$250.000, menjadi kendala bagi banyak laboratorium (Karp dkk., 2020).

Untuk mengatasi masalah ini, modifikasi LHS dengan memanfaatkan mesin 3D printing 3-axis menjadi alternatif yang hemat biaya. Mesin 3D printing memiliki keunggulan dalam desain sederhana, pengoperasian yang mudah, dan biaya produksi yang relatif rendah, tanpa mengurangi tingkat presisi (Dettinger dkk., 2022). Modifikasi ini tidak hanya membantu menekan biaya tetapi juga meningkatkan kinerja laboratorium dengan throughput tinggi.

Modifikasi LHS berbasis mesin 3D printing ini memanfaatkan Arduino UNO dan stepper driver untuk membangun perangkat keras kontrol numerik yang ekonomis dan berbasis sumber terbuka. Sistem ini menggunakan mekanisme gerak kartesius 3D yang dapat beroperasi pada tiga sumbu (X, Y, Z) dengan teknik micro-stepping untuk memastikan presisi tinggi. File kode-G dihasilkan untuk mengatur posisi cairan dan botol secara numerik sesuai dengan koordinat yang telah ditentukan (Ashima dkk., 2021; Choong dkk., 2020).

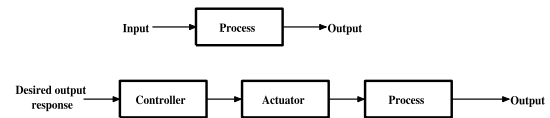
Pengembangan sistem LHS berbasis mesin 3D printing ini diharapkan dapat menyederhanakan proses pipetting, meningkatkan akurasi dan efisiensi, serta menyediakan solusi otomatisasi yang terjangkau bagi laboratorium medis dan kesehatan. Dengan demikian, inovasi ini tidak hanya mengatasi kendala biaya tetapi juga mendukung kemajuan teknologi di bidang medis.

DASAR TEORI

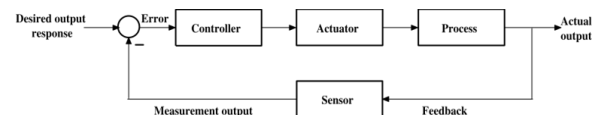
A. Sistem Kendali otomatis

Sistem kendali otomatis merupakan teknologi yang dirancang untuk mengontrol proses secara mandiri tanpa memerlukan campur tangan manusia. Sejak pertama kali diperkenalkan oleh James Watt pada abad ke-18, teknologi ini telah berkembang menjadi komponen vital di berbagai sektor, termasuk industri medis. Sistem kendali terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu sistem kendali open-loop dan closed-loop. Sistem open-loop tidak menggunakan umpan balik

untuk mengontrol proses, sedangkan closed-loop menggunakan umpan balik untuk memastikan bahwa keluaran sesuai dengan target yang diharapkan (Mahmoud, 2018). Fungsi dasar sistem kendali meliputi operasi perbandingan, pengukuran, dan kalkulasi, yang bekerja secara sinergis untuk mencapai performa optimal (Nurkamiden dkk., 2017).



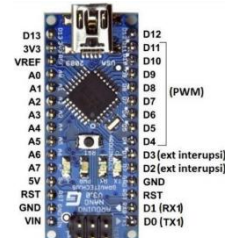
Gambar 1 Open loop control system (Mahmoud, 2018)



Gambar 2 Closed loop system (Mahmoud, 2018)

B. Mikrokontroler dan Arduino Nano

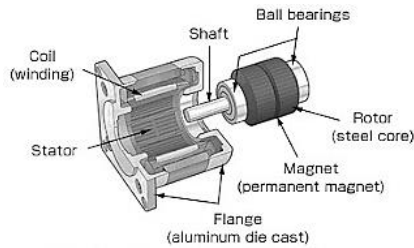
Mikrokontroler adalah perangkat elektronik yang mengintegrasikan RAM, ROM, CPU, dan port input/output dalam satu unit. Salah satu varian mikrokontroler yang banyak digunakan adalah Arduino Nano berbasis ATmega328. Mikrokontroler ini memiliki spesifikasi yang ideal untuk aplikasi otomasi, seperti 14 pin digital I/O, 8 input analog, dan kemampuan Pulse Width Modulation (PWM). Arduino Nano juga dikenal dengan kemudahannya serta dukungan komunitas yang luas, sehingga cocok untuk pengembangan sistem otomasi yang kompleks namun hemat biaya (Rif'at Suhayri & Candra, 2021).



Gambar 3 Arduino nano atmega 168 (Iksal, 2018).

C. Motor Stepper

Motor stepper merupakan aktuator yang menghasilkan gerakan berurutan dengan tingkat presisi tinggi melalui pergerakan sudut tertentu. Komponen ini bekerja dengan prinsip elektromagnetik antara rotor dan stator. Penggunaan teknologi micro-stepping pada motor stepper memungkinkan pergerakan yang lebih halus dan presisi, sehingga banyak diaplikasikan dalam sistem otomasi seperti printer 3D dan sistem penanganan cairan (Aditya, 2019; Wardhana & Nugroho, 2018). Motor stepper memiliki dua mode utama, yaitu single-step untuk presisi maksimal dan slew mode untuk pergerakan yang lebih cepat.



Gambar 4 Konstruksi motor stepper (sumber : electricaltechnology.org)

D. Syringes Actuator

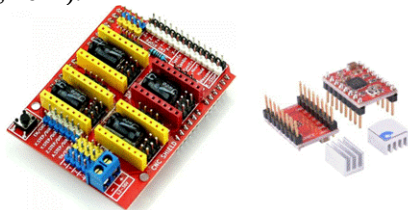
Syringes actuator adalah perangkat mekanis yang memanfaatkan prinsip kerja alat suntik untuk mengontrol cairan secara presisi. Dengan menerapkan hukum Pascal, perangkat ini memanfaatkan tekanan dalam ruang tertutup untuk menarik dan mengeluarkan cairan. Kombinasi mekanisme rack and pinion pada syringes actuator meningkatkan stabilitas dan keakuratan kontrol, sehingga sangat cocok untuk aplikasi laboratorium dan medis yang memerlukan penanganan cairan dalam volume kecil dengan tingkat presisi tinggi (Thomas George Brinton dkk., 1996).



Gambar 5 Syringes actuator liquid handling system

E. CNC Shield

CNC Shield adalah modul yang dirancang untuk menghubungkan mikrokontroler dengan driver motor stepper, memungkinkan kontrol otomatis untuk berbagai sumbu gerakan. Dengan dukungan firmware seperti GRBL, CNC Shield menjadi solusi ekonomis dan fleksibel untuk aplikasi seperti mesin CNC dan printer 3D. Driver motor stepper seperti A4988 mendukung fitur micro-stepping, yang menghasilkan gerakan motor yang lebih presisi dan halus (Çakir & Mizrak, 2021).



Gambar 6 CNC Shield (Hasan dkk., 2018).

F. Relevansi dengan Sistem Liquid Handling

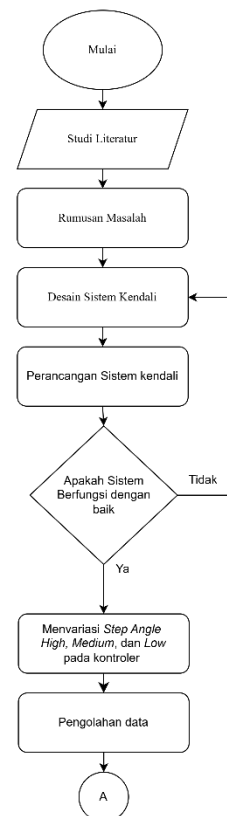
Sistem liquid handling dirancang untuk memindahkan cairan dengan tingkat presisi tinggi, yang sangat penting untuk berbagai aplikasi medis dan laboratorium. Dengan memanfaatkan kombinasi

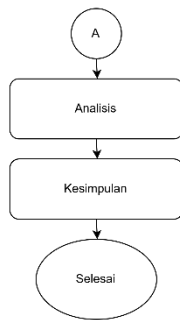
mikrokontroler, motor stepper, dan syringe actuator, sistem ini dapat meningkatkan efisiensi dan keakuratan proses pipetting. Implementasi CNC Shield serta penerapan teknik micro-stepping memungkinkan pengendalian cairan yang lebih stabil dan presisi, sehingga menghasilkan sistem otomatis yang unggul dan ekonomis..

METODE

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D), sebagaimana dijelaskan oleh Sugiyono (2013), yang bertujuan untuk menghasilkan dan mengembangkan produk baru. Proses penelitian dimulai dengan pengumpulan data dari penelitian terdahulu, dilanjutkan dengan perancangan sistem kendali, dan pengujian fungsionalitas liquid handling system (LHS) menggunakan Arduino Nano ATmega168. Penelitian ini melibatkan variabel bebas berupa variasi kecepatan motor stepper (tinggi, sedang, rendah), variabel terikat berupa volume cairan yang diproses oleh sistem, serta variabel kontrol berupa penggunaan Arduino Nano ATmega168 sebagai pengendali otomatis.

Diagram alir metode penelitian dibuat dengan mengonsep seluruh alur penelitian sesuai tahapan penelitian sehingga analisis penelitian dapat dijelaskan dengan jelas berdasarkan alur penelitian. Oleh karena itu, Diagram alir dapat dijelaskan seperti pada Gambar





Gambar 7 Diagram Alir Penelitian

a. Studi Literatur

Mengumpulkan informasi terkait desain dan prinsip kerja sistem kendali LHS, termasuk analisis langkah motor stepper.

b. Perumusan Masalah

Menganalisis permasalahan pada sistem LHS untuk menghasilkan solusi yang inovatif.

c. Desain Sistem Kendali

Membuat rancangan sistem kendali secara detail menggunakan blok diagram untuk mempermudah proses perakitan dan dokumentasi.

d. Perancangan dan Perakitan Sistem

Merakit komponen sesuai desain yang telah dibuat, diikuti dengan pemeriksaan kelengkapan dan fungsionalitas.

e. Pengujian Fungsionalitas

Menguji sistem untuk memastikan bahwa alat berfungsi dengan baik. Pengujian dianggap berhasil jika sistem berjalan sesuai spesifikasi.

f. Variasi Kecepatan Motor Stepper

Menerapkan variasi sudut langkah (*High*, *Medium* dan *low*) untuk mengevaluasi kecepatan motor stepper.

g. Pengolahan dan Analisis Data

Data dari pengujian diolah untuk menganalisis hubungan antara sudut langkah motor dan efisiensi sistem.

pada sumbu X, Y, Z, dan E dengan variasi mikrostepping.

Respon kecepatan pada setiap variasi kecepatan mikro stepping dianalisis dengan membandingkan hasil aktual dengan posisi target yang diinginkan. Data pengujian diambil melalui tiga kali percobaan, dan hasil akhir merupakan rata-rata dari ketiga percobaan tersebut. Respon pada setiap kecepatan mikro stepping dapat dilihat sebagai berikut.

Table 1 Kategori Kecepatan Step Motor Stepper

Sumbu	Step High	Step Medium	Step Low
X	1200 μ s	1300 μ s	1400 μ s
Y	1000 μ s	1100 μ s	1200 μ s
Z	1450 μ s	1550 μ s	1650 μ s
E	30 ms	40 ms	50 ms

Tabel 1. Mempresentasikan nilai waktu step motor stepper dalam tiga kategori kecepatan, yaitu tinggi (high), sedang (medium), dan rendah (low), untuk masing-masing sumbu gerak pada sistem. Pada tabel tersebut, terlihat bahwa waktu step terendah berada pada kategori high,

Nilai-nilai dalam tabel ini mengindikasikan bahwa semakin kecil waktu step, semakin tinggi kecepatan gerakan motor stepper, yang dapat meningkatkan efisiensi proses. Sebaliknya, peningkatan waktu step dalam kategori low digunakan untuk memberikan stabilitas lebih tinggi pada sistem, yang penting untuk menghindari kesalahan atau gangguan selama pemindahan cairan. Data ini menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi kecepatan optimal untuk menjaga keseimbangan antara kecepatan, stabilitas, dan presisi pada alat pemipetan semi-otomatis.

2. Hasil Pecobaan Uji Fungsi LHS

Uji fungsi sistem *Liquid Handling System* (LHS) dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan motor stepper terhadap efisiensi dan stabilitas perpindahan cairan. Pengujian ini melibatkan variasi kecepatan operasi (Low, Medium, dan High) dan sudut gerakan motor servo (2°, 5°, 8°, dan 10°). Dengan menerapkan mode mikrostepping, motor stepper mampu menghasilkan langkah-langkah kecil yang meningkatkan akurasi posisi serta mengurangi getaran selama proses perpindahan cairan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan presisi sistem tetapi juga meminimalkan risiko tumpahan atau ketidaksesuaian volume cairan. Fokus utama pengujian ini adalah mengoptimalkan gerakan pada setiap sumbu sistem untuk memastikan stabilitas dan efisiensi yang maksimal dalam proses pemindahan cairan.

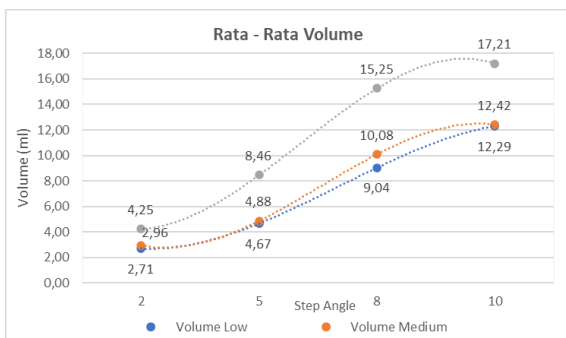
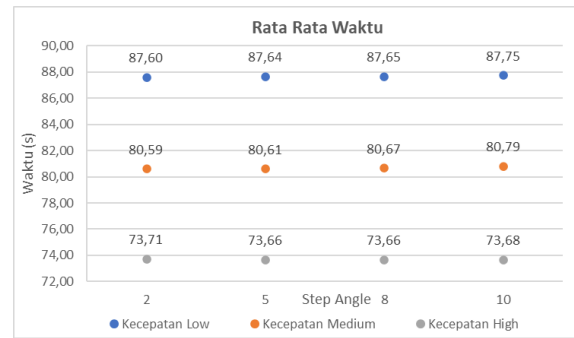
Berikut hasil uji fungsi pada liquid Handling System yang dapat dilihat pada Tabel 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN**1. Pengujian Performa Sistem**

Pengujian dilakukan pada berbagai kecepatan dan step angle pada motor stepper untuk menentukan respon optimal sistem. Tabel 1 menunjukkan hasil uji

Table 2 hasil uji fungsi *liquid handling system*

	Step Motor	Percobaan I		Percobaan II		Percobaan III		Rata Rata	
		Volume	Second	Volume	Second	Volume	Second	Volume	Second
LOW	2°	2,88	87,62	2,50	87,73	2,75	87,44	2,71	87,60
	5°	4,88	87,73	4,63	87,51	4,50	87,68	4,67	87,64
	8°	8,75	87,49	9,13	87,60	9,25	87,86	9,04	87,65
	10°	12,75	87,97	12,00	87,42	12,13	87,87	12,29	87,75
MEDIUM	2°	3,00	80,61	3,00	80,37	2,88	80,78	2,96	80,59
	5°	5,13	80,30	4,88	80,71	4,63	80,81	4,88	80,61
	8°	10,25	80,52	9,88	80,62	10,13	80,87	10,08	80,67
	10°	12,38	80,67	12,50	80,92	12,38	80,78	12,42	80,79
HIGH	2°	4,38	73,60	4,25	73,69	4,13	73,85	4,25	73,71
	5°	8,38	73,67	8,63	73,54	8,38	73,76	8,46	73,66
	8°	15,75	73,45	14,63	73,71	15,38	73,81	15,25	73,66
	10°	17,75	73,78	15,75	73,49	18,13	73,76	17,21	73,68


Gambar 8 Grafik Perbandingan Volume

Gambar 9 Grafik Perbandingan kecepatan

Dari hasil uji fungsi pada liquid Handling System menunjukkan hubungan antara nilai volume (ml) dan waktu tempuh (s) terhadap sudut pergerakan aktuator pada liquid Handling System. Sumbu horizontal merepresentasikan volume (ml) pada Gambar 8 dan waktu tempuh (s) pada Gambar 9. Sementara sumbu vertikal menunjukan step motor pada aktuator

Pada Gambar 8 Grafik ini menunjukkan hubungan antara jumlah step angle dengan volume cairan yang dihasilkan pada tiga kecepatan operasi sistem (Low, Medium, High). Terlihat bahwa semakin besar jumlah step angle, volume cairan yang dihasilkan meningkat secara konsisten untuk ketiga kategori kecepatan. Pada kecepatan Low, volume yang dihasilkan cenderung lebih rendah dibandingkan kategori lainnya, mencerminkan bahwa sistem bekerja dengan laju perpindahan cairan yang lambat. Kecepatan Medium menghasilkan volume cairan yang lebih tinggi daripada Low, namun masih di bawah kategori High. Di sisi lain, kecepatan High menunjukkan volume cairan yang jauh lebih besar dibandingkan dua kategori lainnya, terutama pada step angle 8 dan 10. Hal tersebut disebabkan oleh miss step

mengakibatkan ketidak akuratan yang terdapat pada pengujian *high*

Pada Gambar 9 Grafik ini menggambarkan waktu rata-rata yang diperlukan oleh sistem untuk menyelesaikan proses perpindahan cairan pada setiap step angle di tiga kategori kecepatan. Terlihat bahwa waktu rata-rata relatif konstan di semua step angle untuk masing-masing kategori. Pada kecepatan Low, waktu yang dibutuhkan adalah yang paling lama (sekitar 87 detik). Ini menunjukkan bahwa sistem bekerja lebih lambat pada kecepatan ini. Pada kecepatan Medium, waktu yang diperlukan lebih singkat (sekitar 80 detik), sementara kecepatan High menunjukkan waktu rata-rata terendah (sekitar 73 detik). Waktu yang lebih rendah pada kecepatan High menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dalam menyelesaikan proses perpindahan cairan.

3. Kapasitas Volume Total LHS

Kapasitas total pada Liquid Handling System merupakan parameter penting untuk memastikan akurasi dan keandalan dalam distribusi cairan.

Kapasitas ini dihitung berdasarkan jumlah cairan maksimum yang dapat diambil dalam satu siklus operasional. Pada sistem ini, kapasitas teoritis aktuator adalah 60 mL, namun terdapat variasi pada kapasitas aktual akibat perbedaan panjang stroke pompa. Kapasitas aktual dihitung menggunakan persamaan volume silinder, dengan hasil menunjukkan kapasitas maksimum aktuator sebesar 54,157 mL. Perhitungan ini membantu mengoptimalkan performa sistem untuk berbagai kebutuhan aplikasi cairan.

a Volume Tabung

Syringe berbentuk tabung silinder, sehingga volumenya dapat dihitung dengan rumus volume silinder

$$V = \pi r^2 h \text{ (Thomas George Brinton dkk., 1996)}$$

Dimana :

V = Volume cairan dalam syringe (mL atau cm^3)

r = Jari-jari dalam syringe (cm), yaitu setengah dari diameter internal syringe

h = Panjang stroke piston (cm), yaitu panjang cairan yang menempati syringe

π = 3.14 (konstanta pi)

b Dimensi Syringe

Dimensi Syringe dapat dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini

$$V = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \text{ (ISO 7886-1:2017, 2017)}$$

Dimana :

d = Diameter internal syringe

h = Panjang stroke piston

Maka dapat dihitung nilai kapasitas aktuator sebagai berikut.

a Perhitungan Volume tabung syringe

$$d = 2,8$$

$$h = 8,5$$

$$r = \frac{d}{2} = \frac{2,8}{2} = 1,4$$

$$V = \pi r^2 h = 3,14 \times (1,4)^2 \times 8,5$$

$$V = 3,14 \times 1,96 \times 8,5 = 52 \text{ mL}$$

b Perhitungan Volume selang Tambahan

$$r = 1\text{mm} (0,1 \text{ cm})$$

$$h = 5 \text{ cm}$$

$$V = 3,14 \cdot 12 \cdot 5$$

$$V = 0.05\pi \text{ cm}^3 \approx 0.157\text{cm}^3$$

c Kapasitas Total

$$V_{\text{total}} = 54\text{mL} + 0.157\text{mL} = 54.157\text{mL}$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan kapasitas maksimal aktuator pada Liquid Handling System yaitu sebesar 54,157 mL.

SIMPULAN

Liquid Handling System (LHS) 3-axis dirancang dengan memodifikasi mesin 3D printing tipe *Fused Deposition Modeling* (FDM) menggunakan pendekatan sistem open-loop. Sistem ini memanfaatkan Arduino Nano sebagai pengendali utama, ESP32 untuk konektivitas Bluetooth, serta CNC Shield dan driver motor stepper tipe Nema 8. Dengan kapasitas aktuator sebesar 52 mL, sistem ini mampu mendukung aplikasi cairan dengan volume kecil hingga menengah. Hasil uji fungsi menunjukkan bahwa kecepatan Low memberikan hasil terbaik dengan akurasi tinggi dan stabilitas optimal, sedangkan pada volume pada 2,71 dengan sudut langkah 2° . Kecepatan Medium juga memberikan performa yang baik, menghasilkan volume rata-rata 2,96 mL pada sudut langkah yang sama. Sementara itu, kecepatan High memungkinkan throughput yang lebih tinggi namun membutuhkan optimasi untuk meningkatkan stabilitas pada sudut langkah besar. Hal ini menunjukkan potensi LHS dalam meningkatkan efisiensi dan akurasi pada berbagai aplikasi laboratorium.

REFERENSI

- Aditya, L. (2019). *PROTOTIPE 3D PRINTER BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO MEGA 2560*. 9–21.
- Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S., & Singh, S. (2021). Automation and manufacturing of smart materials in additive manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.583>
- Çakir, A., & Mizrak, N. (2021). Arduino Controlled CNC Printing Circuit Machine. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*, 6(1), 819–825.
- Choong, Y. Y. C., Tan, H. W., Patel, D. C., Choong, W. T. N., Chen, C. H., Low, H. Y., Tan, M. J., Patel, C. D., & Chua, C. K. (2020). The global rise of 3D printing during the COVID-19 pandemic. Dalam *Nature Reviews Materials* (Vol. 5, Nomor 9, hlm. 637–639). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00234-3>
- Dettinger, P., Kull, T., Arekatla, G., Ahmed, N., Zhang, Y., Schneiter, F., Wehling, A., Schirmacher, D., Kawamura, S., Loeffler, D., & Schroeder, T. (2022). Open-source personal pipetting robots with live-cell incubation and microscopy compatibility. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30643-7>

- Hasan, Y. M., Shakir, L. F., & Naji, H. H. (2018). Implementation and Manufacturing of a 3-Axes Plotter Machine by Arduino and CNC Shield. *International Iraqi Conference on Engineering Technology and its Applications, IICETA 2018*, 25–29.
<https://doi.org/10.1109/IICETA.2018.8458071>
- Iksal, S. S. (2018). *SNARTISI Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Informasi Perancangan Sistem Kendali Otomatisasi On-Off Lampu*. ISO 7886-1:2017. (2017). *Sterile hypodermic syringes for single use-Part 1*. www.iso.org
- Kai-Hua Chow, E. (2018). The 2018 SLAS Technology Ten: Translating Life Sciences Innovation. Dalam *SLAS Technology* (Vol. 23, Nomor 1, hlm. 1–4). SAGE Publications Inc.
<https://doi.org/10.1177/2472630317744283>
- Karp, D. G., Cuda, D., Tandel, D., Danh, K., Robinson, P. V., Seftel, D., Tian, H., Pandori, M., Miller, K. W. P., & Tsai, C. T. (2020). Sensitive and Specific Detection of SARS-CoV-2 Antibodies Using a High-Throughput, Fully Automated Liquid-Handling Robotic System. *SLAS Technology*, 25(6), 545–552.
<https://doi.org/10.1177/2472630320950663>
- Mahmoud, M. S. (2018). Advanced Control Design with Application to Electromechanical Systems. Dalam *Advanced Control Design with Application to Electromechanical Systems* (hlm. 1–41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814543-2.00001-1>
- Nurkamiden, M. R., Najoran, M. E. I., & Putro, M. D. (2017). Rancang Bangun Sistem Pengendalian Perangkat Listrik Berbasis Web Server Menggunakan Mini PC Raspberry Pi Studi Kasus Gedung Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi. *Jurnal Teknik Informatika*, 11(1).
<https://doi.org/10.35793/jti.11.1.2017.15980>
- Pan, J. Y., Chang-Yen, D., Blanchard, D. P., Lam, W., & Searle, P. A. (2021). An Automated Tube Labeler for High-Throughput Purification Laboratories. *SLAS Technology*, 26(1), 113–116.
<https://doi.org/10.1177/2472630320930685>
- Rifat Suhayri, F., & Candra, O. (2021). RANCANG BANGUN 3 DIMENSION PRINTER MENGGUNAKAN SMART LCD DENGAN ARDUINO MEGA 2560 DESIGN AND BUILD 3 DIMENSION PRINTER USING SMART LCD WITH ARDUINO MEGA 2560. *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, 4(2), 2021.
- Rothmiller, S., Balszuweit, F., Menacher, G., Steinritz, D., Kehe, K., Thiermann, H., & Schmidt, A. (2020). Validation of automated pipetting systems for cell culture seeding, exposure and bio-analytical assays in sulfur mustard toxicology. *Toxicology Letters*, 320, 80–86.
<https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2019.12.003>
- Thomas George Brinton, Weir Maurice D., & Finney Ross L. (1996). *Calculus and Analytic Geometry* (9 ed.).
- Towns, M., Harwood, C. J., Robertshaw, M. B., Fish, J., & O’Shea, K. (2015). The Digital Pipetting Badge: A Method to Improve Student Hands-On Laboratory Skills. *Journal of Chemical Education*, 92(12), 2038–2044.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00464>
- Wardhana, A. W., & Nugroho, D. T. (2018). Pengontrolan Motor Stepper Menggunakan Driver DRV 8825 Berbasis Signal Square Wave dari Timer Mikrokontroler AVR. *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, 7(1), 80.
<https://doi.org/10.25077/jnte.v7n1.530.2018>