

ANALISIS KINERJA METODE *CHARGING-DISCHARGING* BERBASIS ARDUINO UNTUK PENGUKURAN RESISTANSI SENSOR ELASTIS

Jalaluddin Jumhur^{*1}, Bahdin Ahad Badia²

¹ Teknologi Metalurgi Industri Logam, Politeknik Tridaya Virtu Morosi, Konawe, Indonesia

² Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

e-mail: ^{*1}jejetridaya@gmail.com, ²bahdinahadbadia@uho.ac.id.

Abstrak

Penelitian ini menganalisis kinerja metode *charging-discharging* berbasis Arduino Nano untuk pengukuran resistansi sensor elastis (*stretchable sensor*) berbahan silikon yang dilapisi grease konduktif, dengan dukungan Universal Tensile Machine (UTM) rancang bangun mandiri sebagai perangkat pengujian elektromekanikal berbiaya rendah. Kebutuhan terhadap instrumen pengujian yang terjangkau dan mudah dimodifikasi menjadi latar belakang penelitian ini, mengingat alat elektromekanikal komersial umumnya memiliki biaya investasi yang sangat tinggi sehingga membatasi aksesibilitas bagi peneliti dengan sumber daya terbatas. Spesimen sensor elastis difabrikasi dari lembaran silikon laboratorium berukuran panjang 80 mm, lebar 10 mm, dan ketebalan 0,58 mm. Pengujian dilakukan selama 30 siklus tarik-lepas pada kecepatan konstan 200 mm/menit. Modul pengukur resistansi dirancang berdasarkan prinsip pembagi tegangan dengan rangkaian resistor bertingkat dari 100 Ω hingga 1 G Ω yang dikombinasikan dengan transistor PNP, sehingga mampu mengukur rentang resistansi yang sangat luas secara adaptif. Kinerja sistem divalidasi terhadap LCR-meter komersial (*East Tester*) dan menghasilkan koefisien korelasi $R^2 = 0,9003$, yang membuktikan bahwa metode *charging-discharging* berbasis Arduino mampu memberikan pengukuran resistansi yang akurat dan andal dalam skala laboratorium, sekaligus membuka potensi penerapannya pada pengembangan sensor elastis untuk aplikasi *soft robotic* dan sistem *wearable*.

Kata kunci—sensor elastis, metode *charging-discharging*, pengukuran resistansi, Arduino, UTM rancang bangun mandiri, *soft robotic*

Abstract

This study analyzes the performance of an Arduino Nano-based *charging-discharging* method for resistance measurement of an elastic sensor (*stretchable sensor*) fabricated from silicone sheet coated with conductive grease, supported by a independently designed and fabricated Universal Tensile Machine (UTM) as a low-cost electromechanical testing device. The motivation arises from the prohibitively high cost of commercial electromechanical testing equipment, which limits accessibility for researchers with limited resources. The elastic sensor specimen was fabricated from laboratory-grade silicone sheet measuring 80 mm in length, 10 mm in width, and 0.58 mm in thickness. Testing was conducted over 30 stretch-release cycles at a constant speed of 200 mm/min. The resistance measurement module was designed based on a voltage divider principle equipped with a tiered resistor network from 100 Ω to 1 G Ω combined with PNP transistors, enabling adaptive measurement across a wide resistance range. System performance was validated against a commercial LCR meter (*East Tester*), yielding a correlation coefficient of $R^2 = 0.9003$. This result confirms that the Arduino-based *charging-discharging* method delivers accurate and reliable resistance measurements at the laboratory scale, while demonstrating significant potential for elastic sensor development in *soft robotics* and *wearable sensing* applications.

Keywords—elastic sensor, *charging-discharging* method, resistance measurement, Arduino, independently fabricated UTM, *soft robotic*

1. PENDAHULUAN

Soft robotic merupakan salah satu teknologi canggih yang baru dalam bidang robotika. Baru-baru ini, ketertarikan terhadap *soft robotic* telah meningkat dengan signifikan dan mendapatkan banyak perhatian dari para peneliti di bidang-bidang tertentu seperti perawatan kesehatan [1,2,3,4] industri, kedirgantaraan dan sektor robotika itu sendiri [1,5]. *Soft robotic* terdiri dari dua bagian utama, yaitu sensor dan aktuator [6]. Beberapa *soft actuator* yang populer adalah otot buatan pneumatik [7], manipulator lunak [8], aktuator elastomer dielektrik dan pompa lunak [9]. *Soft Robotic* memiliki tantangan sendiri dalam menghasilkan gerakan dengan akurasi tinggi [10]. Ketika aplikasi praktis *soft robotic* diimplementasikan secara nyata, kehadiran berbagai jenis sensor menjadi suatu keharusan. Sayangnya, sensor yang beredar di pasaran pada umumnya dirancang dengan komponen-komponen yang bersifat kaku dan tidak fleksibel. Apabila sensor-sensor komersial tersebut dipasang pada platform *soft robotic*, terdapat risiko nyata bahwa keunggulan keluwesan gerak robot akan terdegradasi secara signifikan. Kondisi ini mendorong kebutuhan mendesak terhadap pengembangan sensor yang sepenuhnya tersusun dari material lunak dan elastis, sehingga kompatibel dengan karakteristik mekanik sistem *soft robotic* itu sendiri.

Sensor yang dapat meregang (*stretchable sensors*) menjadi komponen kunci dalam sistem *soft robotic* karena kemampuannya mengikuti deformasi struktur tanpa kehilangan fungsi deteksi [11]. Performa sensor semacam ini sangat ditentukan oleh tiga faktor utama: linearitas respons, konsistensi pembacaan, dan daya tahan material konduktif yang digunakan selama pengujian berulang [11]. Ketahanan terhadap siklus deformasi berulang, keandalan sinyal keluaran, serta stabilitas material konduktif dalam jangka panjang menjadi indikator kinerja utama yang menentukan kelayakan sensor untuk aplikasi nyata [12]. Dalam hal ini, aktuator lunak yang dikombinasikan dengan sensor yang dapat diregangkan berkinerja tinggi merupakan solusi untuk pemantauan gerakan presisi tinggi dalam robotika lunak. Ada beberapa jenis sensor yang dapat diregangkan [13]. Dalam konteks ini, salah satu tipe sensor yang banyak dikaji adalah sensor berbasis perubahan resistansi [13]. Di sisi lain, perangkat pengujian elektromekanikal berstandar tinggi yang dibutuhkan untuk mengkarakterisasi sensor semacam ini umumnya hadir dengan harga yang sangat mahal dan tidak terjangkau oleh sebagian besar laboratorium penelitian, terutama di institusi dengan keterbatasan anggaran. Situasi ini menciptakan kesenjangan yang mendorong perlunya pengembangan sistem pengujian alternatif yang terjangkau, dapat dimodifikasi secara bebas, namun tetap mampu memberikan data yang akurat dan andal.

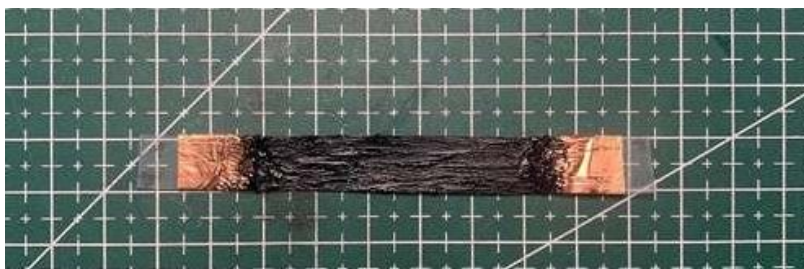
Salah satu solusi yang menjanjikan adalah pemanfaatan Arduino, sebuah platform mikrokontroler berbasis open-source, sebagai instrumen pengukur resistansi alternatif. Berbeda dari multimeter konvensional, Arduino menggunakan pendekatan tidak langsung dalam menentukan nilai resistansi, yakni melalui prinsip pengisian dan pengosongan muatan kapasitor pada rangkaian RC. Dasar dari metode ini adalah hubungan antara konstanta waktu $\tau = RC$ dan laju pengisian kapasitor: semakin besar resistansi yang dilewati, semakin lama waktu yang diperlukan kapasitor untuk mencapai tegangan ambang batas. Dengan mengukur durasi pengisian tersebut, mikrokontroler dapat menghitung nilai resistansi secara komputasional. Konfigurasi resistor referensi yang disusun secara bertingkat memperluas cakupan pengukuran hingga rentang yang sangat lebar, dan hasilnya dapat ditampilkan baik dalam format numerik pada serial monitor maupun dalam bentuk grafik dinamis melalui serial plotter, sehingga pemantauan perubahan resistansi sensor elastis dapat dilakukan secara visual dan kontinu.

2. METODE PENELITIAN

2.1 *Stretchable Sensor*

Karakterisasi sensor elastis dalam penelitian ini dilakukan melalui pengujian beban tarik siklik, yang bertujuan untuk memetakan hubungan antara deformasi mekanik material dan perubahan sifat listriknya. Pendekatan ini dipilih karena sifat resistif sensor elastis sangat sensitif terhadap perubahan geometri akibat regangan, sehingga pengukuran resistansi memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai respons elektromekanikal material dibandingkan pengukuran gaya atau perpanjangan semata.[14]. Dalam penelitian ini, penggunaan pengukuran resistansi menjadi pilihan utama karena resistansi material stretchable akan berubah seiring dengan regangan yang dialami selama pengujian tarik. Hal ini memungkinkan pengukuran yang lebih mudah dan efektif dibandingkan dengan metode pengukuran mekanis yang hanya mengandalkan pengukuran gaya atau elongasi tanpa melibatkan parameter listrik.

Bahan dasar sensor elastis yang digunakan adalah lembaran silikon yang diproduksi secara mandiri di laboratorium. Spesimen dibentuk dengan dimensi panjang 80 mm, lebar 10 mm, dan tebal 0,58 mm. Dimensi ini tidak mengacu pada standar pengujian tarik baku yang berlaku untuk pengujian multisiklus, melainkan diadopsi berdasarkan kesesuaiannya dengan kondisi pengujian yang telah digunakan pada sejumlah studi pendahulu di bidang yang sama.



Gambar 1. Spesimen stretchable sensor berbahan silikon dengan lapisan grease konduktif

Silikon dipilih sebagai substrat utama karena kemampuan elastisitasnya yang tinggi, memungkinkan material mengalami deformasi besar secara berulang tanpa mengalami kerusakan struktural permanen [15]. Untuk memberi sifat konduktif pada permukaan sensor, lapisan grease konduktif dioleskan secara merata di atas lembaran silikon. Lapisan ini berfungsi sebagai jalur hantaran listrik yang responsif terhadap perubahan geometri sensor: ketika sensor meregang, distribusi partikel konduktif dalam grease berubah sehingga nilai resistansinya ikut bergeser, dan pergeseran inilah yang digunakan sebagai sinyal pengukuran.[15]. Lapisan grease conductive diterapkan pada permukaan silikon untuk memastikan konduktivitas yang baik saat sensor mengalami peregangan. Lapisan grease ini berfungsi untuk meningkatkan respons listrik sensor terhadap deformasi mekanis yang terjadi selama pengujian, sehingga hasil yang diperoleh dapat lebih akurat dalam menggambarkan hubungan antara deformasi fisik dan perubahan resistansi.

2.2 *Electrical tester module*

Modul pengujian elektrikal (electrical tester module) yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang untuk mengukur perubahan resistansi sensor elastis secara real-time selama pengujian tarik berlangsung. Prinsip kerjanya didasarkan pada pendekatan sensor resistif, di mana nilai resistansi (R) material dapat dihitung menggunakan hukum Ohm.

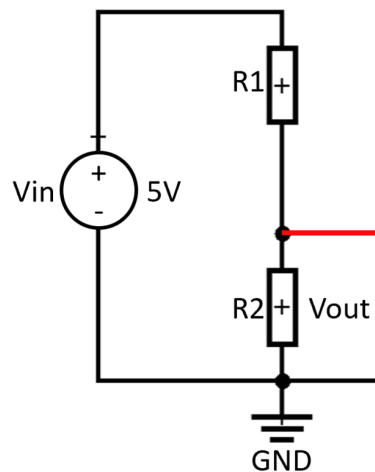
$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \dots\dots\dots (1)$$

R adalah resistansi (ohm),
 ρ adalah resistivitas material (ohm meter),
 L adalah panjang material (meter),
 A adalah luas penampang material (meter persegi).

Berdasarkan relasi tersebut, ketika sensor elastis ditarik secara aksial, panjang efektif jalur konduktif (L) bertambah seiring elongasi material, sementara luas penampang melintangnya (A) menyempit akibat efek Poisson. Kombinasi kedua perubahan geometri ini menyebabkan nilai resistansi meningkat secara terukur. Meskipun sensor berbasis resistansi relatif sederhana dalam fabrikasi dan lebih ekonomis dibandingkan sensor kapasitif, kelemahan utamanya terletak pada kecenderungan terhadap ketidaklinearan respons dan munculnya efek histeresis setelah siklus deformasi berulang.

Guna mengatasi keterbatasan resolusi pengukuran pada rentang resistansi tinggi, modul pengukur resistansi dalam penelitian ini dirancang menggunakan konfigurasi pembagi tegangan yang dimodifikasi. Pembagi tegangan bekerja dengan membagi tegangan suplai antara resistor referensi yang diketahui nilainya dan sensor elastis sebagai resistansi yang hendak diukur, sehingga tegangan keluaran (V_{out}) yang diperlukan. Pada prinsipnya, persamaan pembagi tegangan disajikan dalam Persamaan (2). Berdasarkan Persamaan (2), konsep pembagi tegangan juga dapat digunakan untuk memprediksi resistansi yang tidak diketahui.

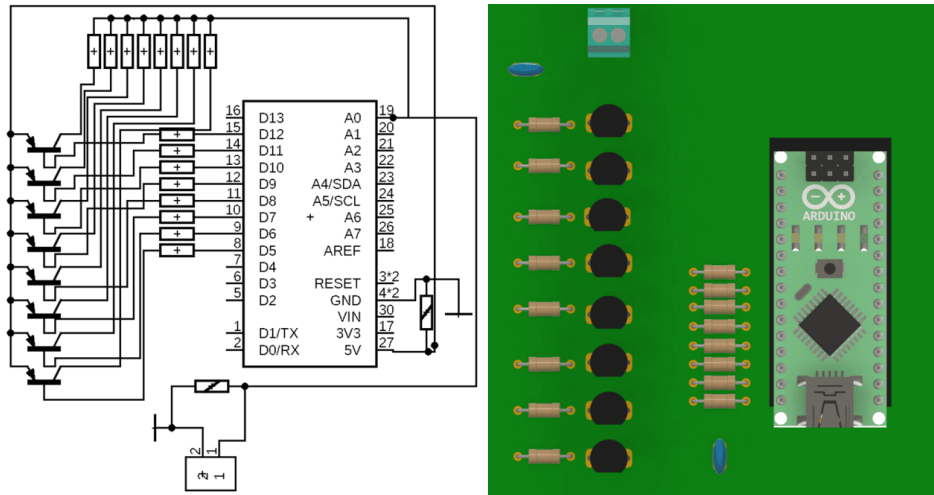
$$V_{in} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{out} \dots\dots\dots (2)$$



Gambar 2. Skema rangkaian pembagi tegangan untuk pengukuran resistansi sensor

Namun, tantangan muncul ketika nilai resistansi sensor jauh melampaui nilai resistor referensi yang terpasang: dalam kondisi demikian, tegangan keluaran menjadi sangat kecil dan melampaui batas resolusi ADC Arduino, sehingga akurasi pengukuran menurun drastis. Untuk mengatasi kendala ini, modul dirancang dengan menambahkan jaringan resistor bertingkat yang mencakup delapan nilai berbeda, mulai dari 100 Ω hingga 1 G Ω , yang dikendalikan secara selektif melalui transistor PNP [15]. Dengan cara ini, resistor referensi yang aktif selalu dipilih agar nilainya sedekat mungkin dengan resistansi sensor yang sedang diukur, menjaga tegangan keluaran tetap berada dalam rentang kerja ADC yang optimal dan mempertahankan akurasi pengukuran di seluruh rentang regangan yang diuji.[15]. Modifikasi sirkuit dilakukan dengan

menambahkan resistor untuk meningkatkan akurasi pengukuran resistansi, terutama pada material dengan resistansi tinggi. Modifikasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa perubahan kecil dalam resistansi dapat diukur dengan akurat, bahkan pada regangan tinggi.



Gambar 3. Skematik modul pengukuran resistansi berbasis Arduino dengan rangkaian resistor bertingkat dan transistor PNP

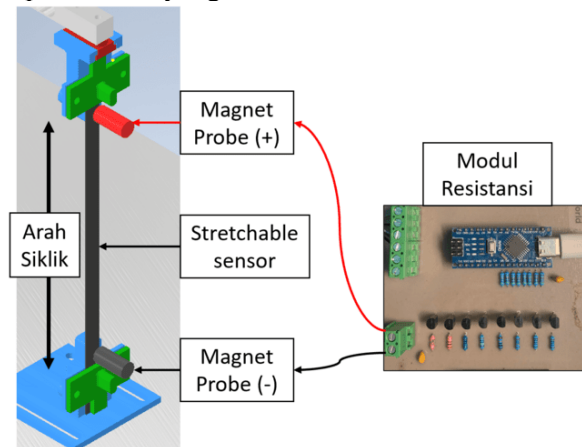
Tabel 1. Komponen Elektronik

No.	Komponen	Nilai	Jumlah
1	Arduino	Nano	1
2	Resistor	100Ω	1
3	Resistor	1kΩ	1
4	Resistor	10kΩ	1
5	Resistor	100kΩ	1
6	Resistor	1MΩ	1
7	Resistor	10MΩ	1
8	Resistor	100MΩ	1
9	Resistor	1GΩ	1
10	Resistor	4.7kΩ	8
11	Transistor	PNP	7
12	Kapasitor	100nF	2

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

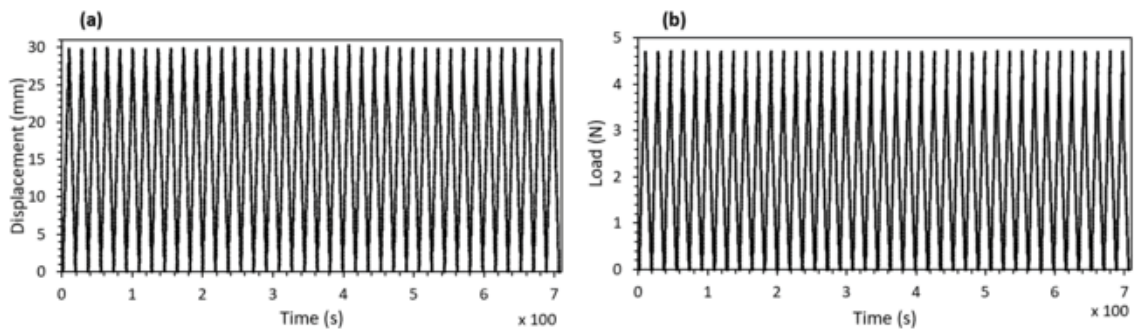
Tahap pengujian dilaksanakan dengan menjalankan dua sistem pengukuran secara bersamaan: modul Arduino Nano berbasis metode charging-discharging dan LCR-meter komersial East Tester sebagai instrumen pembanding. Sensor elastis berbahan silikon dengan

dimensi $80 \times 10 \times 0,58$ mm dipasang pada penjepit UTM rancang bangun mandiri. Elektroda pada kedua ujung sensor dihubungkan ke modul Arduino menggunakan kabel probe, sementara UTM dioperasikan pada laju konstan 200 mm/menit untuk menjalankan siklus ekstensi dan relaksasi secara berulang. Konfigurasi ini memungkinkan perekaman data resistansi secara simultan dari kedua instrumen, sehingga setiap titik perubahan regangan dapat langsung dikorelasikan dengan respons listrik yang terukur.

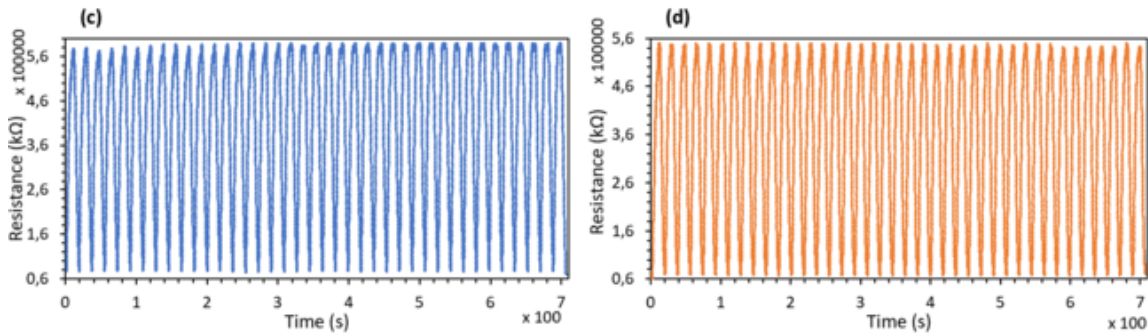


Gambar 4. Setup pengujian: sensor elastis terpasang pada UTM rancang bangun mandiri yang terhubung dengan modul Arduino dan LCR-meter untuk pengukuran simultan

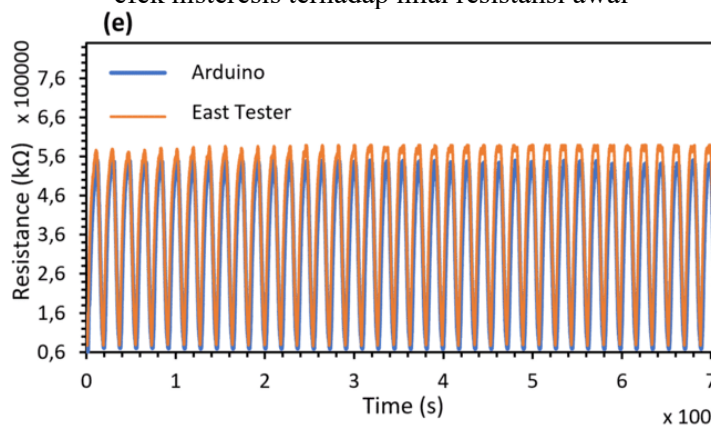
Jumlah siklus dibatasi pada 30 ulangan dengan fokus pada karakterisasi awal perilaku elektromekanikal, bukan pada evaluasi umur pakai sensor. Pada material berbasis elastomer, fase pengujian awal umumnya diperlukan sebagai tahap penyesuaian (*pre-conditioning*) untuk menstabilkan respons mekanik dan listrik sebelum data yang representatif dapat direkam [12]. Dalam penelitian ini, selama rentang pengujian tersebut, terdeteksi pergeseran modulus sebesar 37,5%, yang mencerminkan adanya reorganisasi distribusi partikel konduktif dalam lapisan grease akibat deformasi siklik yang terakumulasi. Fenomena ini secara bertahap memengaruhi jalur konduksi listrik pada permukaan sensor dan menjadi faktor penyebab utama terjadinya pergeseran (*drift*) nilai resistansi dasar yang teramati antar siklus.



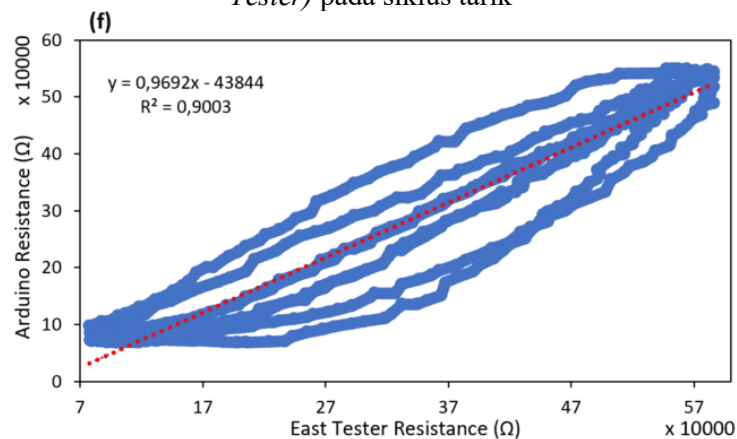
Gambar 5. Grafik respons resistansi sensor selama fase tarik (*loading*) yang direkam oleh Arduino melalui serial plotter



Gambar 6. Grafik respons resistansi sensor selama fase lepas (*unloading*) yang memperlihatkan efek histeresis terhadap nilai resistansi awal



Gambar 7. Grafik perbandingan nilai resistansi hasil pengukuran Arduino vs LCR-meter (*East Tester*) pada siklus tarik



Gambar 8. Grafik perbandingan nilai resistansi hasil pengukuran Arduino vs LCR-meter (*East Tester*) pada siklus lepas (kanan), dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9003$

Tren resistansi yang terekam oleh Arduino sejalan dengan prediksi teoritis berdasarkan hukum Ohm dalam bentuk $R = \rho L/A$. Saat sensor elastis ditarik, penambahan panjang jalur konduktif disertai penyempitan penampang mengakibatkan peningkatan resistansi yang proporsional. Pada fase relaksasi, resistansi cenderung kembali turun, namun tidak sepenuhnya mencapai nilai semula karena adanya efek histeresis — fenomena yang lazim pada material elastomer akibat sifat viskoelastisitasnya. Ketidaktepatan pemulihan ini tampak jelas pada

grafik serial plotter Arduino, di mana lintasan kurva saat penarikan dan pelepasan beban tidak berimpit, membentuk loop histeresis yang khas. Pola serupa juga dilaporkan pada studi sensor resistif berbasis komposit PDMS/MWCNT, yang mengkonfirmasi bahwa fenomena ini merupakan karakteristik intrinsik material elastomer konduktif [12].

Evaluasi kinerja metode charging-discharging dilakukan melalui komparasi langsung antara data resistansi yang diperoleh Arduino dengan nilai yang dihasilkan LCR-meter East Tester sebagai acuan terstandar. Analisis statistik terhadap kedua set data menghasilkan koefisien determinasi $R^2 = 0,9003$, yang secara kuantitatif berarti lebih dari 90% variasi resistansi yang terukur oleh LCR-meter dapat dijelaskan oleh sistem Arduino. Simpangan yang tersisa diperkirakan bersumber dari dua faktor utama: perbedaan frekuensi sinyal eksitasi antara kedua instrumen, dan keterbatasan resolusi konverter analog-ke-digital (ADC) 10-bit yang dimiliki Arduino Nano. Meski demikian, tingkat korelasi ini sangat memadai untuk keperluan karakterisasi awal dan pengembangan prototipe di lingkungan laboratorium berbiaya terbatas. Keunggulan tambahan sistem ini adalah kemampuan visualisasi data secara langsung melalui serial plotter, yang memungkinkan peneliti mendeteksi anomali atau kegagalan sensor lebih cepat dibandingkan metode perekaman data konvensional.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menganalisis kinerja metode charging-discharging berbasis Arduino Nano sebagai solusi pengukuran resistansi sensor elastis berbahan silikon berlapis grease konduktif yang terjangkau dan dapat diandalkan. Pengujian dilakukan menggunakan UTM rancang bangun mandiri yang disinkronkan dengan sistem Arduino, dan hasilnya dibandingkan terhadap LCR-meter komersial sebagai referensi. Dari keseluruhan proses penelitian, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode charging-discharging yang diimplementasikan pada Arduino Nano terbukti efektif dalam merekam dinamika perubahan resistansi sensor elastis silikon-grease konduktif selama pengujian tarik siklik. Nilai resistansi yang diperoleh pada setiap siklus menunjukkan pola yang terulang secara konsisten, mengindikasikan repeatabilitas pengukuran yang baik.
 2. Uji komparasi antara pembacaan Arduino dan LCR-meter East Tester menghasilkan koefisien determinasi $R^2 = 0,9003$, yang secara statistik menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi antara kedua instrumen. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa Arduino layak diposisikan sebagai alternatif instrumen pengukur resistansi yang andal dalam lingkungan pengujian laboratorium skala kecil.
 3. Desain jaringan resistor bertingkat yang mencakup delapan dekade nilai — dari 100Ω hingga $1 \text{ G}\Omega$ — dan dikendalikan melalui transistor PNP terbukti memperluas cakupan pengukuran secara signifikan. Sistem mampu beradaptasi secara otomatis terhadap perubahan besar nilai resistansi sensor tanpa intervensi manual, menjadikannya solusi yang fleksibel untuk berbagai kondisi regangan.
 4. UTM yang dikembangkan secara mandiri melalui proses rancang bangun di laboratorium, ketika diintegrasikan dengan sistem Arduino, mampu menghasilkan data pengujian yang terstruktur dan reproduktibel. Hal ini membuktikan bahwa perangkat pengujian elektromekanikal hasil rancang bangun mandiri dapat berfungsi sebagai pengganti yang viable untuk alat komersial berbiaya tinggi, khususnya bagi laboratorium dengan keterbatasan anggaran.
 5. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan bukti konsep bahwa sistem pengujian berbiaya rendah berbasis Arduino mampu memenuhi kebutuhan karakterisasi sensor elastis secara memadai. Pendekatan ini membuka aksesibilitas yang lebih luas bagi peneliti bersumber daya terbatas untuk terlibat dalam pengembangan sensor elastis, khususnya untuk aplikasi soft robotic dan perangkat wearable generasi berikutnya.
-

5. SARAN

Sejumlah rekomendasi diajukan untuk memperkuat dan memperluas cakupan penelitian ini di masa mendatang. Pertama, pengujian dengan jumlah siklus yang jauh lebih banyak — misalnya 500 hingga 1.000 siklus — perlu dilakukan guna mengevaluasi stabilitas jangka panjang lapisan grease konduktif dan mengidentifikasi titik kegagalan material secara lebih komprehensif. Kedua, eksplorasi material lapisan konduktif alternatif, seperti pasta karbon nanotube, tinta perak, atau polimer intrinsik konduktif, disarankan untuk meningkatkan linearitas respons dan menekan efek histeresis. Ketiga, pengembangan algoritma pemilihan resistor referensi secara otomatis pada firmware Arduino akan meningkatkan akurasi dan kenyamanan operasional tanpa memerlukan intervensi pengguna. Keempat, penambahan modul komunikasi nirkabel seperti Bluetooth Low Energy atau Wi-Fi pada sistem akan membuka kemungkinan pemantauan resistansi sensor secara real-time dari jarak jauh, yang sangat relevan untuk aplikasi wearable. Kelima, validasi metode ini perlu diperluas menggunakan sensor elastis dengan variasi geometri, ketebalan, dan jenis material konduktif lainnya untuk menguji tingkat generalisasi dan adaptabilitas sistem pengukuran yang dikembangkan. .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Rubio-González, J. de J. Ku-Herrera, J. Wang, A. Patterson, J. A. Soto-Cajiga, and O. Olvera-Silva, “Effect of printing parameters on the mechanical and piezoresistive response of cellular structures manufactured with a conductive polylactic acid nanocomposite through a material extrusion process,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 132, pp. 375–391, 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.10.074.
- [2] F. Huang, Y. Zhu, L. Shi, M. Y. Teo, S. Kandasamy, and K. Aw, “Capacitive stretch sensors for knee motion and muscle activity tracking for gait analysis,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 390, p. 116574, 2025, doi: 10.1016/j.sna.2025.116574.
- [3] X. Wang et al., “Fabrication of highly stretchable composite organohydrogel for strain sensors with high sensitivity and broad temperature tolerance,” *Applied Materials Today*, vol. 39, p. 102319, 2024, doi: 10.1016/j.apmt.2024.102319.
- [4] L. Xing et al., “Self-adhesive, stretchable waterborne polyurethane-based flexible film as wearable conformal strain sensor for motion and health monitoring,” *Advanced Nanocomposites*, vol. 1, no. 1, pp. 171–179, 2024, doi: 10.1016/j.adna.2024.05.001.
- [5] C. Sirithunge, H. Wang, and F. Iida, “Soft touchless sensors and touchless sensing for soft robots,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 11, pp. 1–20, 2024, doi: 10.3389/frobt.2024.1224216.
- [6] A. Wiranata, Y. Ohsugi, A. Minaminosono, Y. Kuwajima, and S. Maeda, “Electromechanical tensile test equipment for stretchable conductive materials,” *HardwareX*, vol. 11, p. e00287, 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00287.
- [7] M. N. Muftah, A. A. M. Faudzi, S. Sahlan, and S. Mohamaddan, “Fuzzy fractional order PID tuned via PSO for a pneumatic actuator with ball beam (PABB) system,” *Fractal and Fractional*, vol. 7, no. 6, 2023, doi: 10.3390/fractalfract7060416.
- [8] W. Liu et al., “Touchless interactive teaching of soft robots through flexible bimodal sensory interfaces,” *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-32702-5.
- [9] Y. Kuwajima et al., “Electrochemical dual transducer for fluidic self-sensing actuation,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 14, no. 2, pp. 3496–3503, 2022, doi: 10.1021/acsami.1c21076.

-
- [10] Y. Zhang, P. Li, J. Quan, L. Li, G. Zhang, and D. Zhou, "Progress, challenges, and prospects of soft robotics for space applications," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, no. 3, 2023, doi: 10.1002/aisy.202200071.
- [11] M. Alshawabkeh et al., "Highly stretchable additively manufactured capacitive proximity and tactile sensors for soft robotic systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3250232.
- [12] K. Song, J. Kim, J. Heo, N. K. Cho, S. Lee, and M. Gu, "Novel numerical approach for predicting the cyclic mechanical behaviour of stretchable resistive sensors based on PDMS/MWCNT micro-composites," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 387, p. 116446, 2025, doi: 10.1016/j.sna.2025.116446.
- [13] S. Kim et al., "Stretchable and soft electroadhesion and capacitive sensors enabled by spider web-inspired interdigitated liquid metal subsurface microwires," *Chemical Engineering Journal*, vol. 456, p. 141018, 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.141018.
- [14] Y. Liu et al., "A super-stretchable conductive film with strain-insensitive conductivity for stretchable EMI shielding materials and wearable capacitive strain sensors," *Composites Science and Technology*, vol. 258, p. 110877, 2024, doi: 10.1016/j.compscitech.2024.110877.
- [15] A. Wiranata et al., "Economically viable electromechanical tensile testing equipment for stretchable sensor assessment," *HardwareX*, vol. 19, p. e00546, 2024, doi: 10.1016/j.ohx.2024.e00546.
- [16] Aji, A. A., Badia, B. A., Putra, M. I., Putra, F. C., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Simanjuntak, R. A. H., "Optimasi Parameter Pembubutan Baja AISI 1045 Menggunakan Metode Taguchi," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 11, no. 2, pp. 247-257, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i2.13719>.
- [17] Erdani, Y., Fahrurozi, A., Suhada, M. G., Hidayatullah, C. T., Naufal, M., & Badia, B. A., "Analisis Dampak Kesalahan Penyetelan Screw Adjusting terhadap Kinerja Kelistrikan Horn Kendaraan," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 11, no. 2, pp. 288-295, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i2.13774>.
- [18] Asiri, M. H., Husen, M., Badia, B. A., & Syafrun, M., "Studi Kekuatan Sambungan Las Terhadap Material Baja TRS 500 Menggunakan Variasi Gerakan Elektroda," *Jurnal Polimesin*, vol. 18, no. 2, pp. 82-90, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v18i2.1828>.
- [19] Badia, B. A., Asiri, M. H., & Husen, M., "Analisa Variasi Gerakan Elektroda pada Hasil Las Bahan Baja Karbon Rendah (ST37) Terhadap Sifat Mekanik," *Jurnal Polimesin*, vol. 19, no. 1, pp. 53-60, 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v19i1.1912>.
- [20] Badia, B. A., Sudia, B., Mangalla, L. K., Gunawan, Y., Aksar, P., Samhuddin, S., Putra, M. I., Larobu, F. E., Darwin, D., Efendi, R., Defi, S., Gamsir, L. O. A., & Darwis, M., "Analisis Pengaruh Komposisi Perekat Terhadap Karakteristik Termal Briket Arang Pelepah Sagu Sebagai Bahan Bakar Alternatif," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 38-44, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v10i1.9208>.
- [21] Nuryanti, N., Erdani, Y., Subekti, R., Purnomo, W., Indrajaya, N., & Badia, B. A., "Tracking Solar Panel Maximum Power Point Using IoT-Based Mamdani Fuzzy Logic Control," *Jurnal Polimesin*, vol. 23, no. 5, pp. 703-710, 2025. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i5.7709>.
- [22] Aji, A. A., Cesar Putra, F., Badia, B. A., Idris Putra, M., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Hasudungan Simanjuntak, R. A. (2025). Analysis Of The Effect Of Machining Variables On Surface Roughness and Vibration Amplitude in Turning AISi 1045 Steel Using The Taguchi Method. *PHENOMENON : Multidisciplinary Journal Of Sciences and Research*, 3(01), 53–62. <https://doi.org/10.62668/phenomenon.v3i1.1406>
-

-
- [23] W. P. Sahputra, B. A. Badia, M. I. Putra, F. C. Putra, and A. A. Aji, “Rekayasa Proses Ekstraksi dan Pengelolaan Bijih Nikel: Teknologi, Tantangan, Dan Prospek Masa Depan”, *Kapalamada*, vol. 4, no. 02, pp. 243–255, Jun. 2025.
- [24] Y. Erdani, R. A. Pratama, B. A. Badia, and G. I. Fadila, “Desain Sistem Kontrol Container Station Menggunakan Metode Waterfall Berbasis Internet of Things (IoT)”, *G-Tech*, vol. 8, no. 3, pp. 1415–1430, Jul. 2024.
- [25] F. E. Larobu, Y. Erdani, B. A. Badia, and L. O. M. F. Rachim, “Rancang Bangun PLTMH Skala Kecil Dengan Sistem On-Grid Untuk Respons Dinamis Terhadap Perubahan Beban Listrik”, *Kapalamada*, vol. 4, no. 01, pp. 07–18, Mar. 2025.
- [26] A. Kadir and B. A. Badia, “Rancang Bangun Belt Konveyor Rotary Untuk Pengayakan Pasir”, *Kapalamada*, vol. 4, no. 04, pp. 755–766, Dec. 2025.
- [27] Badia, B. A., Delly, J., Ardiansal, M., & Rahmatullah, P., “Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Pengiris Bawang Merah Otomatis Berbasis Motor Listrik untuk Meningkatkan Produktivitas UMKM”, *Jurnal Teknologi Terapan (JTT)*, vol. 12, no. 1, pp. 84-94, 2026. <https://doi.org/10.31884/jtt.v12i1.1294>
- [28] S. Defi, L. Pagiling, M. N. A. Nur, F. E. Larobu, A. Jalil, and B. A. Badia, “Rancang bangun prototipe sistem kontrol automatic main failure (AMF) menggunakan SMS (Short Message Service) berbasis PLC (Programmable Logic Controller),” *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 75–87, 2024. doi: <https://doi.org/10.12345/jmekanova.v10i1.75-87>
- [29] R. Efendi, D. Darwin, B. A. Badia, A. Tando, H. Herlina, and W. L. Padang, “Rancang bangun termokopel data logger berbasis Arduino Mega 2560 skala laboratorium,” *Machine: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 15–19, 2023. doi: <https://doi.org/10.xxxxx/machine.v9i2.15-19>.
-