DOC. EU-100

Identifikasi Masalah

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi sensor semakin pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem yang *efisien*, hemat energi, dan ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang mendapat perhatian luas dalam *dekade* terakhir adalah sensor *piezoelektrik* (Parung, J dkk.,2021). Sensor ini bekerja berdasarkan efek *piezoelektrik,* yaitu kemampuan suatu material untuk menghasilkan *muatan* listrik ketika mengalami tekanan mekanik. Fenomena ini pertama kali ditemukan oleh Pierre dan Jacques Curie pada tahun 1880 (Fitriani, F dkk.,2023).

Piezoelektrik adalah sebuah komponen elektronika yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik atau sebaliknya berdasarkan efek *piezoelektrik* (Ashara, S. M. 2023). *Piezoelektrik* merupakan sistem yang terdiri dari bahan material tertentu yang akan menghasilkan tegangan listrik akibat tekanan atau kekuatan mekanik yang diberikan pada kedua bidang (Hasibuan, J. A dkk., 2021). Efek *piezoelektrik* ini akan menghasilkan kemampuan suatu benda material tertentu untuk bergetar ketika diberikan tegangan listrik.

Namun sebaliknya ketika pada bidang material tersebut diberikan tekanan tertentu, maka dari material tersebut akan menghasilkan tegangan listrik (Talantan, D. Y. P. 2024). Namun demikian, salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan sensor *piezoelektrik* sebagai sumber energi adalah rendahnya daya listrik yang dihasilkan (Harahap, M. D., & Su'aidy, K. I. 2024). Oleh karena itu, penelitian

yang fokus pada karakterisasi besaran tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan sangat penting untuk menentukan kelayakan penggunaan sensor ini dalam aplikasi praktis (Zarkasyi, M. 2024).

Pengukuran parameter-parameter tersebut dapat memberikan gambaran tentang *efisiensi konversi* energi dan *optimasi* desain sistem pemanen energi *piezoelektrik* (Putra, I. D. G. A. T dkk 2024). Penerapan teknologi dalam menghasilkan energi listrik melalui pemanfaatan *piezoelektrik* sebagai sumber energi listrik alternatif telah dilakukan oleh berbagai peneliti (Ade, R. H. 2020). Salah satu penelitian yang menjadi dasar yang akan dilakukan ini memanfaatkan metode *eksperimen* dengan menggunakan tekanan pijakan kaki pada sensor *piezoelektrik* sebagai *variabel independen* (Wardianto,Wikra.2024).

Adapun penelitian mengenai Analisis Daya *Piezoelektrik* Model *Hybrid Solar Cell-Piezoelektric* Skala Rendah dimana penelitian ini memanfaatkan frekuensi untuk mengetahui seberapa besar daya yang dihasilkan *piezoelektrik* (Diniardi, E dkk.,2018). Penelitian ini berfokus pada analisis tegangan, arus, dan daya murni yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik* tanpa penggunaan komponen pendukung tambahan. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban berupa resistor sebesar 100 kΩ serta mengukur langsung keluaran tegangan dan arus menggunakan multimeter.

Sensor *piezoelektrik* disusun dalam berbagai konfigurasi rangkaian dan jumlah sensor yang berbeda, yaitu: pengujian tunggal menggunakan satu buah *piezoelektrik*; pengujian dengan dua hingga sembilan buah *piezoelektrik* yang dihubungkan secara seri dan paralel; serta pengujian rangkaian seri-paralel

(campuran) menggunakan tiga hingga lima buah *piezoelektrik*, yang masing-masing diberi kode rangkaian Campuran A, B, C, D, dan E. Setiap *konfigurasi* rangkaian akan diberikan tekanan berupa pukulan sebanyak sepuluh kali, kemudian hasil keluarannya dianalisis untuk mengetahui karakteristik listrik yang dihasilkan.

1.2. Rumusan Masalah

1. Meneliti bagaimana *piezoelektrik* menghasilkan tegangan, dan, arus, dengan berbagai kombinasi rangkaian.dan jumlah *piezoelektrik* yang bervariasi.
2. Bagaimana pengaruh jumlah elemen *piezoelektrik* dan jenis rangkaiannya terhadap energi yang dihasilkan.

1.3. Karakteristik Solusi

Solusi yang diusulkan dalam penelitian ini adalah "Studi *Eksperimental* Perbandingan Energi Keluaran Rangkaian *Piezoelektrik* Seri, Paralel, dan Kombinasi Dalam Merespon *Eksitasi* Getaran" untuk menemukan *konfigurasi* rangkaian *piezoelektrik* yang paling optimal dalam menghasilkan energi listrik dari sumber getaran mekanik. empat jenis *konfigurasi* yang diuji, yaitu rangkaian tunggal, seri, paralel, dan kombinasi (seri-paralel), masing-masing konfigurasi dipasang pada kondisi *eksitasi* getaran yang seragam, dan dilakukan pengukuran terhadap tegangan keluaran (V), arus (I), dan daya (P).

Dari sudut pandang ekonomi, *eksperimen* ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan sistem pemanenan energi rendah biaya (Hasid, H. Z.,Se, S. U dkk 2022). Rangkaian *piezoelektrik* merupakan teknologi yang *relatif*

murah dan *pasif*, karena tidak memerlukan sumber daya *eksternal* untuk menghasilkan energi.

Dari aspek lingkungan, solusi yang ditawarkan dalam *eksperimen* ini memiliki dampak positif yang *signifikan*, terutama dalam konteks pengembangan teknologi ramah lingkungan dan berkelanjutan. Sistem *piezoelektrik* bekerja dengan memanen energi dari getaran mekanik yang umumnya bersumber dari energi terbuang seperti tekanan, getaran mesin, lalu lintas, atau aliran *fluida* tanpa menggunakan bahan bakar *fosil* maupun menghasilkan *emisi karbon*. Dengan kata lain, teknologi ini mampu mengubah limbah energi mekanik menjadi listrik, sehingga membantu meningkatkan *efisiensi* energi secara keseluruhan dan mengurangi jejak karbon (*carbon footprint*) (Sidik, S. 2023).

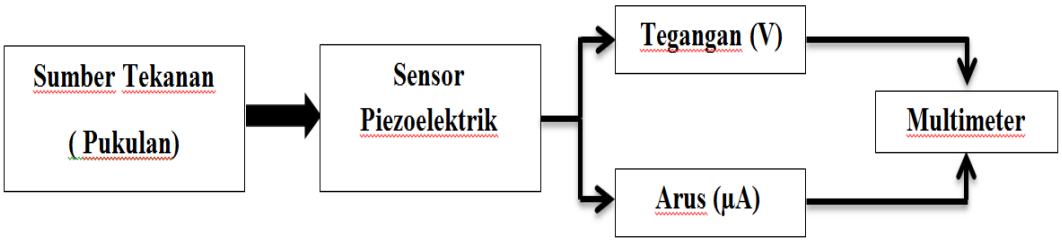
Dari *perspektif* keberlanjutan (*sustainability*)**,** solusi *eksperimen* pemanenan energi menggunakan rangkaian *piezoelektrik* baik *konfigurasi* seri, paralel, maupun kombinasi memiliki potensi yang kuat sebagai teknologi berkelanjutan. Sistem ini memungkinkan pemanfaatan energi getaran yang sebelumnya terbuang sia-sia menjadi sumber energi *alternatif* yang dapat digunakan untuk menghidupkan perangkat *elektronik* kecil. Hal ini sangat relevan dalam konteks kebutuhan energi masa depan yang semakin menekankan pada energi terbarukan, *efisiensi* energi, dan pengurangan dampak lingkungan **(**Wibowo, A. 2023)

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang akurat mengenai jumlah energi yang dihasilkan dari berbagai kombinasi rangkaian dan variasi jumlah sensor *piezoelektrik*. Dengan demikian, kita dapat melakukan perbandingan secara sistematis terhadap performa energi dari masing-masing

konfigurasi rangkaian. Selain itu, penelitian ini juga berperan sebagai solusi untuk mengetahui sejauh mana energi yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik* mampu digunakan untuk mengisi daya baterai.

1.4. Skenario Pengujian

Pengujian *piezoelekrtrik* ini dirancang untuk mengetahui seberapa besar energi listrik yang dapat dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik*. Dengan cara mengukur keluaran tegangan dan arus yang dihasilkan dari tekanan beban (pukulan sebanyak 10 kali). Melalui studi *eksperimental* ini, kita dapat menentukan kombinasi rangkaian *piezoelektrik* yang paling *efektif* dalam menghasilkan energi listrik.



Gambar 1. 1 Diagram Blok Pengujian

Diagram tersebut menggambarkan rangkaian pengujian sensor *piezoelektrik* untuk mengukur respons listrik akibat gaya mekanik. Proses dimulai dari sumber tekanan berupa pukulan, yang berfungsi sebagai *stimulus* mekanik untuk menghasilkan *deformasi* pada permukaan sensor *piezoelektrik*. Sensor *piezoelektrik* bekerja berdasarkan prinsip efek *piezoelektrik*, yaitu kemampuan material tertentu (seperti keramik *piezoelektrik* atau *kristal kuarsa*) untuk

menghasilkan muatan listrik saat mengalami tekanan atau perubahan bentuk mekanis.

Ketika sensor menerima gaya pukulan, terjadi perpindahan muatan dalam struktur *kristal internal* material *piezoelektrik*, sehingga timbul beda potensial listrik yang menghasilkan tegangan, sekaligus arus listrik jika rangkaian tertutup. Tegangan yang dihasilkan biasanya bersifat sementara (*transien*) dan bergantung pada besar gaya mekanik yang diberikan, sifat material sensor, serta kondisi beban listrik yang terhubung pada keluaran sensor. Pada diagram ini, keluaran sensor terhubung ke dua jalur pengukuran, yaitu jalur pengukuran tegangan (dalam satuan volt) dan jalur pengukuran arus (dalam satuan mikroampere). Kedua parameter output tersebut diukur menggunakan multimeter digital yang mampu mendeteksi sinyal tegangan tinggi maupun arus kecil (mikroampere).

Data hasil pengukuran ini digunakan untuk menganalisis performa sensor *piezoelektrik*, misalnya *sensitivitas* sensor terhadap gaya mekanik, kapasitas menghasilkan energi listrik, serta *stabilitas* sinyal keluaran. Dengan demikian, diagram tersebut secara teknis menunjukkan bagaimana sensor *piezoelektrik* mengubah energi mekanik dari pukulan menjadi energi listrik, serta bagaimana besaran tegangan dan arus yang dihasilkan diukur untuk tujuan analisis karakteristik sensor.

1.5 Keuntungan Pengujian *Piezoelektrik*

1. Manfaat Langsung

- Sebagai sumber energi *alternatif* dan mandiri.

Piezoelektrik dapat menghasilkan energi listrik tanpa jaringan listrik bantuan walaupun energi yang dihasilkan *relatif* rendah. Hal ini dapat dimanfaatkan di berbagai bidang sehingga energi yang sehari harinya terbuang dapat dimanfaatkan. Contohnya penerapan pada anak tangga, lantai rumah, jalan dan lain sebagainya (Widiawati, I., Resmana, R., & Novita, S. 2022).

- Penghasil energi yang terbilang murah dan ramah lingkungan.

  Dalam pembuatan rangkaian *piezolektrik* sebagai penghasil energi tidak memerlukan terlalu banyak komponen dan komponen yang digunakan *relatif* murah. Penghasil energi dari *piezoelektrik* ini juga tidak menghasilkan limbah pada pemrosesannya menghasikan energi listrik.

- Cara menghasilkan energi dari *piezoelektrik* termasuk mudah.

  Dalam menghasilkan energi listrik dari *piezoelektrik* ini juga terbilang mudah karena hanya bermodalkan tekanan untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk dan ukuran *piezoelektrik* yang terbilang kecil dan tidak rumit juga mempermudah dalam pengaplikasian di berbagai bidang.

2. Manfaat Tidak Langsung

- Sumber Energi Terbarukan:

  Aktivitas sehari-hari, seperti lalu lintas kendaraan atau langkah kaki, sebagai sumber energi Energi *piezoelektrik* dihasilkan dari tekanan mekanis atau getaran, yang bisa dihasilkan dari sumber-sumber alami atau aktivitas manusia. Ini berarti energi *piezoelektrik* dapat memanfaatkan

- Pengurangan Limbah Energi:

  Dengan memanfaatkan getaran dan tekanan yang biasanya dianggap sebagai limbah energi, teknologi *piezoelektrik* dapat membantu meningkatkan *efisiensi* energi secara keseluruhan dan mengurangi pemborosan energi (Yuliatmo, R., & Udkhiyati, M. 2020).

- Penerapan di Lingkungan Terbatas:

  Teknologi *piezoelektrik* dapat digunakan di tempat-tempat di mana sumber energi *konvensional* sulit diakses atau mahal, seperti di daerah terpencil atau di dalam perangkat kecil.

- Ramah Lingkungan:

  Dalam skala besar Energi *piezoelektrik* tidak melibatkan bahan bakar fosil atau proses kimia berbahaya, sehingga prosesnya lebih bersih dan ramah lingkungan dibandingkan dengan beberapa sumber energi lainnya. Namun, penting juga untuk mempertimbangkan tantangan seperti *efisiensi konversi* energi yang masih terbatas dan biaya material serta produksi perangkat *piezoelektrik* yang bisa menjadi faktor pembatas (Nuryadin, B. W. 2020).

1.6. Kendala dan Parameter Penting

1. **Mengidentifikasi batasan teknis, ekonomi, atau regulasi**

   - Batasan teknis

     A. *Efesiensi* energi yang dihasilkan *piezoelektrik* relatif kecil.

Tegangan yang dihasilkan oleh transduser *piezoelektrik* bergantung pada jenis material *piezoelektrik* dan desain transduser, tetapi tegangan yang umum berkisar dari milivolt hingga ratusan volt. Material *piezoelektrik* menghasilkan potensial listrik saat mengalami tekanan mekanis atau getaran. Jumlah tegangan yang dihasilkan sebanding dengan besarnya gaya atau *deformasi* yang diberikan (Telaumbanua, M. 2021). Material *piezoelektrik* umum yang digunakan dalam transduser meliputi *kuarsa*, *barium titanat*, dan timbal *zirkonat titanat* (PZT). Tegangan keluaran dapat ditingkatkan dengan menggunakan beberapa elemen *piezoelektrik* yang dihubungkan secara seri.

Tegangan keluaran yang dihasilkan *piezoelektrik* dipengaruhi oleh ukuran cakram *piezoelektrik* dan tekanan yang diberikan padanya. Sebagai contoh, cakram *piezoelektrik* dengan ukuran 27 mm dapat menghasilkan tegangan 3–5 V, sementara cakram dengan ukuran 35 mm dapat menghasilkan tegangan 4–6,2 V. Dalam pengujian *piezoelektrik*, tegangan keluaran rata-rata dapat mencapai 5,28 V dengan massa 60 kg (Muliawan, A., dkk. 2021).

Arus keluaran yang dihasilkan oleh *piezoelektrik* dapat berkisar dari 5 µA hingga 50,2 µA. Arus akan berkurang seiring bertambahnya beban yang diberikan. Daya dan energi listrik *piezoelektrik* terbesar dapat mencapai 44,59 mW dan 1,77 *joule*. Dimana daya yang dihasilkan oleh *piezoelektrik* berkisar 0 - 5mW dengan tegangan mencapai 25V (Taqwa, K. Z., & Dwiyantoro, B. A. 2015).

B. Adanya dampak dari lingkungan seperti suhu, kelembaban, atau *korosi* dapat mempengruhi kinerja dari *piezoelektrik*.

1. Dampak *Piezoelektrik* terhadap Suhu

- Efek pada suhu: Material *piezoelektrik* menghasilkan tegangan listrik ketika dikenai tekanan mekanis, dan sebaliknya, mengalami perubahan bentuk (*deformasi*) ketika diberi tegangan listrik. Proses ini dapat menyebabkan perubahan suhu lokal pada material *piezoelektrik* karena efek pemanasan akibat pergerakan partikel dalam material tersebut (Santoso, D. R. 2017).
- Pemanasan akibat *deformasi*: Ketika material *piezoelektrik* mengalami *deformasi* atau tekanan *eksternal*, energi mekanik dapat diubah menjadi energi panas. Proses ini bisa meningkatkan suhu di sekitar material *piezoelektrik*, terutama jika tekanan diberikan secara berkelanjutan (Sakti, S. P. 2017).
- Keterkaitan dengan suhu: Sifat *piezoelektrik* suatu material sering kali bergantung pada suhu. Pada suhu tinggi, banyak material piezoelektrik kehilangan sifat *piezoelektriknya*, atau performanya bisa berkurang. Oleh karena itu, suhu yang tinggi dapat memengaruhi *efektivitas* dan kestabilan material *piezoelektrik* dalam aplikasi tertentu (Putra, D. R., dkk. 2018).

2. Dampak *Piezoelektrik* terhadap Kelembaban

- Kelembaban dan sifat *piezoelektrik*: Kelembaban dapat mempengaruhi *konduktivitas* dan sifat mekanik material *piezoelektrik*. Air atau uap air yang menempel pada permukaan material *piezoelektrik* dapat menyebabkan perubahan pada sifat listrik dan mekanik material tersebut. Material *piezoelektrik* tertentu dapat menjadi lebih *konduktif* jika terkena kelembaban tinggi, yang dapat mengurangi kemampuan *piezoelektrik*-nya (Maladi, I. 2019).
- Penurunan kinerja: Kelembaban tinggi bissa mengurangi *efisiensi konversi* energi dari mekanik ke listrik atau sebaliknya. Dalam beberapa kasus, kelembaban bisa menyebabkan *isolasi* listrik menjadi kurang *efektif*, yang akhirnya mempengaruhi kinerja sensor atau *aktuator piezoelektrik* (Fuadi, Z., & Rahmadiawan, D. 2023).
- Pengaruh pada *stabilitas* jangka panjang: Kelembaban juga dapat menyebabkan *degradasi* material *piezoelektrik* dalam jangka panjang, tergantung pada bahan dasar yang digunakan. Misalnya, pada material *piezoelektrik* berbasis keramik, kelembaban dapat menyebabkan perubahan sifat fisiknya dan memicu kegagalan material (Aritonang, S., & Murniati, R. 2024).

3. Dampak *Piezoelektrik* terhadap *Korosi*

- *Korosi* akibat efek listrik: Tegangan listrik yang dihasilkan oleh material *piezoelektrik* dapat memicu reaksi *elektrokimia* pada permukaan material, terutama jika material tersebut terpapar pada lingkungan yang *korosif*. Tegangan listrik dapat mempercepat proses *korosi* pada logam atau material berbasis logam (Gusty, S. (Ed.). 2023).
- Kerusakan pada perangkat *piezoelektrik*: Jika perangkat *piezoelektrik* berada dalam lingkungan yang lembab atau mengandung zat-zat yang bersifat *korosif*, interaksi antara tegangan listrik yang dihasilkan oleh material *piezoelektrik* dan bahan tersebut dapat mempercepat proses *degradasi*. Ini mengurangi umur pakai dan *efektivitas* dari perangkat *piezoelektrik* tersebut.
- Pengaruh lingkungan *korosif*: Dalam aplikasi tertentu, seperti pada sensor atau aktuator *piezoelektrik* yang digunakan di lingkungan industri atau luar ruangan, keberadaan garam atau bahan kimia lain yang dapat mempercepat *korosi* juga mempengaruhi kinerja *piezoelektrik*. Oleh karena itu, material *piezoelektrik* sering kali dilapisi dengan pelindung atau digunakan dalam kondisi yang lebih terkendali untuk menghindari *korosi* (Setyaningseh, R. E. 2022).

C. Energi yang dihasilkan oleh *piezoelektrik* tidak konsisten.

Energi yang dihasilkan *piezoelektrik* tidak konsisten karena *piezoelektrik* mengandalkan tekanan untuk menghasilkan energi listrik. Energi yang dihasilkan tergantung pada seberapa besar tekanan yang diberikan pada *piezoelektrik*. Namun *piezoelektrik* juga memiliki batasan tegangan dan arus sehingga energi yang dihasilkan tidak besar (Rahman, A., & Noviyanti, A. 2020).

DOC. EU-200

Spesifikasi Sistem/Produk/Pengujian

2.1. Fungsi Pengujian

Eksperimen ini untuk mengukur serta membandingkan energi keluaran dari rangkaian *piezoelektrik* yang disusun secara seri, paralel, dan kombinasi dalam merespons *eksitasi* getaran. Pengukuran dilakukan terhadap tegangan dan arus yang dihasilkan oleh masing-masing *konfigurasi* rangkaian guna mengevaluasi kinerja dan *efisiensi* dalam menghasilkan energi listrik.

Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi *konfigurasi* rangkaian yang paling optimal dalam mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Melalui analisis terhadap karakteristik respon tiap rangkaian terhadap variasi intensitas dan *frekuensi* getaran, hasil studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam bentuk rekomendasi desain sistem pemanen energi berbasis *piezoelektrik* yang *efektif* dan *aplikatif*, khususnya untuk keperluan pengisian daya baterai atau penerapan pada sistem energi terbarukan.

2.2.Kinerja Pengujian

Kemampuan *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik tergantung pada jumlah dan seberapa besar tekanan dan seberapa konsisten tekanan yang diberikan pada *piezoelektrik*. Semakin besar dan konsisten tekanan yang diberikan maka semakin besar pula energi yang dihasilkan, tetapi energi yang dihasilkan *piezoelektrik* tidak begitu besar dan memiliki batasan sehingga pemanfaatan

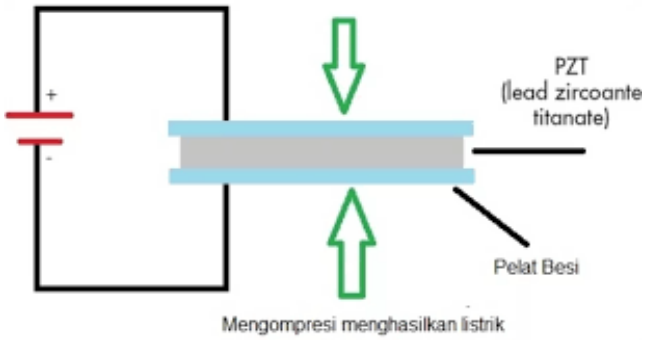
piezoelektrik sebagai sumber energi listrik masih belum terlalu *efisien*. Seperti yang dijelaskan sebelumnya mengenai penelitiian energi yang dihasilkan *piezoelektrik* dimana batasan tegangan yang dihasilkan *piezoelektrik* dengan ukuran cakram 27 mm adalah 3-5 volt. Arus yang dapat dihasilkan berkisar 5-50 µA dengan daya keluaran 44,59 mW, adapun *impedansi* sebesar ≤500 Ω.

Cara kerja Studi *Eksperimental* Perbandingan Energi Keluaran Rangkaian *Piezoelektrik* Seri, Paralel, dan Kombinasi Dalam Merespon *Eksitasi* Getaran yaitu sensor *piezoelektrik* disusun dalam *konfigurasi* rangkaian tunggal, seri, paralel dan campuran. Setiap sensor dilapisi dengan bantalan karet guna mempermudah proses penekanan serta memastikan tekanan yang diterima merata. Setelah seluruh sensor terpasang, rangkaian diberi tekanan berupa pukulan sebanyak sepuluh kali secara berturut-turut untuk memicu respons *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik. Pengukuran arus dan tegangan dilakukan dengan cara memberikan beban berupa resistor pada rangkaian guna mencegah terjadinya hubung singkat dan menstabilkan sinyal keluaran *piezoelektrik*.

Hasil pengukuran dari setiap *konfigurasi* rangkaian dicatat dan dianalisis sebagai data pembanding. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan daya listrik yang dihasilkan dari masing-masing rangkaian. Sebagai tambahan data, digunakan pula rangkaian kombinasi, di mana sensor *piezoelektrik* disusun sebanyak 3 hingga 5 buah dan masing-masing rangkaian diberi kode Campuran A, B, C, D, dan E.

2.3. Karakteristik Pengujian

Sensor piezoelektrik dapat mengukur dua besaran fisik, yaitu percepatan dan tekanan. Baik sensor tekanan maupun akselerometer bekerja dengan prinsip piezoelektrik yang sama, namun keduanya memiliki perbedaan utama dalam cara penerapan gaya pada elemen detektornya. Pada sensor tekanan, terdapat membran tipis yang ditempatkan di atas material padat untuk mentransfer gaya yang diterapkan ke elemen piezoelektrik.Ketika ada tekanan pada membran tipis tersebut, bahan piezoelektrik akan timbul dan menghasilkan tegangan listrik (Ashari, M. 2021).



Gambar 2.1 Cara Kerja *Piezoelektrik*

Besarnya tegangan listrik yang dihasilkan setara dengan jumlah tekanan yang diberikan.Sementara itu, pada akselerometer, massa seismik melekat pada elemen kristal untuk mentransfer gaya yang diberikan ke bahan piezoelektrik.Ketika ada gerakan yang diterapkan, beban massa seismik tersebut menjadi bahan piezoelektrik menurut hukum kedua Newton tentang gerak.Bahan piezoelektrik menghasilkan muatan yang digunakan untuk kalibrasi gerakan.Untuk mengkompensasi getaran yang tidak diinginkan dan membantu

menunjukkan pembacaan yang akurat, elemen kompensasi akselerasi digunakan bersama dengan sensor tekanan.

- Kelebihan *Piezoelektrik*

  - Frekuensi operasional yang tinggi.

    Piezoelektrik dapat bekerja pada frekuensi yang tinggi, bahkan dapat merespons frekuensi audio 20kHz dengan baik.

  - Respon transien yang cepat.

    Output yang dihasilkan oleh *piezoelektrik* linear dan ideal untuk transduser, sehingga dapat mendeteksi hingga mikrodetik.

  - Konsumsi daya yang rendah.

    Pada umumnya, *piezoelektrik* dapat mengeluarkan output yang tinggi dengan konsumsi daya yang rendah.

  - Ukuran yang kecil.

    Ukuran kecil *piezoelektrik* sebagai transduser menjadikannya cocok digunakan pada perangkat kecil (Marasoki, D. 2024).

- Kekurangan *Piezoelektrik*

  - Sinyal output yang relatif rendah. Sinyal output yang dihasilkan oleh komponen piezoelektrik relatif rendah, sehingga sering memerlukan pre-amp untuk meningkatkan sinyal output agar sesuai dengan kebutuhan untuk mendorong sinyal ke rangkaian berikutnya.
  - Impedansi piezoelektrik yang tinggi. Meskipun ini tidak sepenuhnya merupakan kelemahan, kondisi ini memerlukan rangkaian tambahan untuk

membuat impedansi dari piezoelektrik sesuai, baik ketika komponen tersebut digunakan sebagai output (buzzer) atau sebagai input.

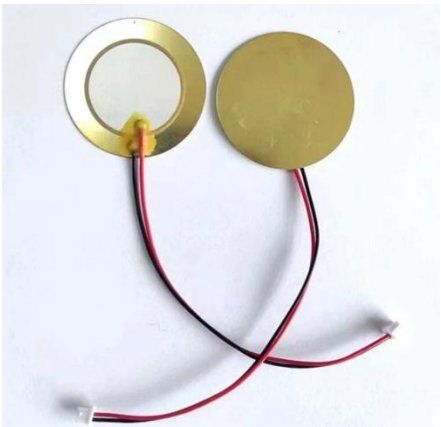
Penelitian ini berupa rangkaian sensor *piezoelektrik* yang memiliki kemampuan untuk mengubah energi mekanik, seperti tekanan atau getaran, menjadi energi listrik melalui efek *piezoelektrik* yang dimilikinya. Sensor yang digunakan berbahan dasar keramik, contohnya *Lead Zirconate Titanate* (PZT), yang dikenal memiliki *koefisien piezoelektrik* tinggi sehingga mampu menghasilkan tegangan listrik yang cukup besar meskipun menerima gaya mekanik relatif kecil. Dalam penelitian ini, *piezoelektrik* disusun sebanyak sembilan buah dan dirangkai dalam tiga *konfigurasi*, yaitu seri, paralel, dan kombinasi, untuk mengevaluasi perbedaan karakteristik energi keluaran yang dihasilkan masing-masing susunan. Selain konfigurasi rangkaian, karakteristik produk ini juga ditentukan oleh adanya bantalan karet yang melapisi permukaan sensor *piezoelektrik*.

Lapisan ini berfungsi untuk mempermudah proses penekanan, membantu mendistribusikan gaya tekan secara merata pada seluruh permukaan sensor, serta memberikan perlindungan mekanis agar sensor tidak mudah retak atau patah akibat beban berlebih. Pengujian produk dilakukan dengan memberikan tekanan secara terkontrol, guna mensimulasikan kondisi dinamis yang mungkin terjadi di aplikasi nyata. Selama pengujian, beberapa parameter penting diukur, antara lain tegangan keluaran (Volt), arus keluaran (mikroampere atau miliampere), daya keluaran (mikrowatt atau miliwatt), serta *efisiensi* konversi energi dari mekanik

menjadi listrik. Pengamatan terhadap nilai-nilai ini penting untuk menentukan konfigurasi rangkaian yang paling *efektif* dalam menghasilkan energi listrik.

Secara fisik, tiap *elemen piezoelektrik* memiliki dimensi standar, misalnya diameter sekitar 27 mm dan ketebalan sekitar 0,5 mm, yang memungkinkan sensor-sensor tersebut disusun dengan mudah ke dalam berbagai pola rangkaian. Selain itu, sensor *piezoelektrik* memiliki *frekuensi resonansi* tertentu, biasanya pada kisaran beberapa kilohertz, yang memengaruhi besaran energi listrik yang dapat dihasilkan. Produk ini memiliki karakteristik *elektrik* yang berbeda tergantung pada konfigurasi rangkaiannya, seperti nilai *impedansi internal*, kestabilan tegangan keluaran, serta respon terhadap variasi beban yang terhubung.

1. Sensor *Piezoelektrik*



Gambar 2.2 Sensor *Piezoelektrik*

Sensor *piezoelektrik* memiliki sejumlah kelebihan yang menjadikannya sangat populer dalam berbagai aplikasi, baik di bidang industri, *elektronik*, maupun penelitian. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuannya menghasilkan tegangan listrik secara langsung ketika mengalami tekanan, getaran,

atau *deformasi* mekanik, sehingga tidak memerlukan sumber energi *eksternal* untuk menghasilkan sinyal.

Sensor ini memiliki respons waktu yang sangat cepat, bahkan dapat mendeteksi perubahan gaya atau getaran dalam rentang *frekuensi* tinggi, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem yang memerlukan deteksi *dinamis* dengan akurasi tinggi. Sensor *piezoelektrik* juga dikenal memiliki ukuran yang *relatif* kecil, ringan, dan mudah diintegrasikan ke berbagai perangkat, tanpa memerlukan ruang yang besar. Konsumsi dayanya sangat rendah, yang menjadi keunggulan penting untuk aplikasi *energy harvesting* atau sistem *elektronik* berdaya rendah.

Selain itu, *piezoelektrik* memiliki daya tahan tinggi terhadap suhu dan lingkungan yang ekstrem, sehingga tetap stabil dan dapat diandalkan meskipun digunakan dalam kondisi operasi yang keras. Dari sisi biaya, sensor *piezoelektrik* cukup *ekonomis* karena dapat diproduksi dalam jumlah besar dengan harga yang *relatif* terjangkau. Keunggulan-keunggulan ini membuat sensor *piezoelektrik* menjadi pilihan ideal dalam berbagai sistem penginderaan, seperti sensor tekanan, sensor getaran, mikrofon, *aktuator ultrasonik*, serta sumber energi *alternatif* untuk perangkat *elektronik* berdaya kecil.

Data sensor *piezoelektrik* yang disajikan pada Tabel 2.1 memuat spesifikasi teknis dari sensor *piezoelektrik*, meliputi parameter tegangan, arus, ukuran *cakram*, daya, energi listrik, *impedansi*, rentang suhu operasi, serta *sensitivitas* tegangan. Informasi ini berfungsi untuk memberikan gambaran awal mengenai

karakteristik performa sensor sebelum dilakukan proses pengujian lebih lanjut, sehingga dapat menjadi acuan dalam analisis hasil *eksperimen*.

Tabel 2.1 Spesifikasi Sensor *Piezoelektrik*

Spesifikasi	**Keterangan**
Tegangan Ukuran Cakram 27 mm	3 V - 5 V
Tegangan Ukuran Cakram 35 mm	4 V – 6,2 V
Arus keluaran	5 µA hingga 50,2 µA
Daya	44,59 mW
Energi listrik	1,77 joule
Impedansi	≤500Ω
Kisaran suhu	-20°C hingga +60°C
Disimpan pada suhu	-30°C hingga +70°C
Sensitivitas regangan	5V/µƐ.

2.4. Rencana dan Jadwal

Rencana dan jadwal pengujian sensor *piezoelektrik* disusun agar setiap tahapan berjalan terstruktur dan sesuai tujuan. Kegiatan penelitian mencakup desain *konseptual*, pembuatan *prototipe*, uji *fungsional*, pengujian awal, *evaluasi*, uji akhir, hingga penyusunan laporan akhir, yang direncanakan selesai dalam empat bulan. Rincian jadwal tiap kegiatan disajikan pada Tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2 Rencana dan Jadwal

No.	Jenis Kegiatan	Bulan			
		1	2	3	4
1.	Desain Konseptual				
2.	Prototyping				
3.	Uji Coba Fungsionalitas				
4.	Pengujian Awal				
5.	Evaluasi				
6.	Uji Akhir				
7.	Laporan Akhir				

2.5. Rencana Anggaran Biaya

Rencana anggaran biaya disusun untuk memperkirakan total biaya yang diperlukan dalam penelitian "Studi *Eksperimental* Perbandingan Energi Keluaran Rangkaian *Piezoelektrik* Seri, Paralel, dan Kombinasi dalam Merespon *Eksitasi* Getaran". Anggaran mencakup komponen perangkat keras, seperti sensor *piezoelektrik*, solder, timah, resistor, kabel jumper, serta bahan pendukung lainnya. Setiap komponen dihitung berdasarkan kebutuhan jumlah (volume) dan harga satuan. Rincian jenis pengeluaran, jumlah unit, harga satuan, dan total biaya masing-masing komponen disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Rencana Anggaran Biaya

Jenis Pengeluaran	**Volume**	**Harga Satuan (Rp)**	**Total (Rp)**
Sensor *Piezoelektrik*	50	2.500	125.000
Solder	1	70.000	70.000
Timah	1	30.000	30.000
Flux	1	15.000	15.000
Lakban	1	20.000	20.000
Resistor 100kΩ	7	1.000	7.000
Double Tip	1	5.000	5.000
Gunting	1	15.000	15.000
Kabel Jumper	1 Set	30.000	30.000
SUB Total (Rp)			**317.000**

2.6.Rencana Pengujian

Ada beberapa rencana pengujian yang akan dilakukan :

1. Pengujian terhadap rangakaian tunggal satu buah *piezoelektrik* dengan beban yang bervariasi yang diukur menggunakan multimeter.
2. Pengujian *piezoelekrik* yang dihubung secara seri, pengujian ini dilakukan dengan cara merangkai *piezoelektrik* secara seri dengan jumlah yang berbeda-beda mulai dari 2 hingga 9 buah *piezoelektrik* yang dihubungkan.
3. Pengujian *piezoelekrik* yang dihubung secara paralel, pengujian ini dilakukan dengan cara merangkai *pizoelektrik* secara paralel dengan jumlah yang berbeda-beda mulai dari 2 sampai 9 buah *piezoelektrik* yang dihubungkan.

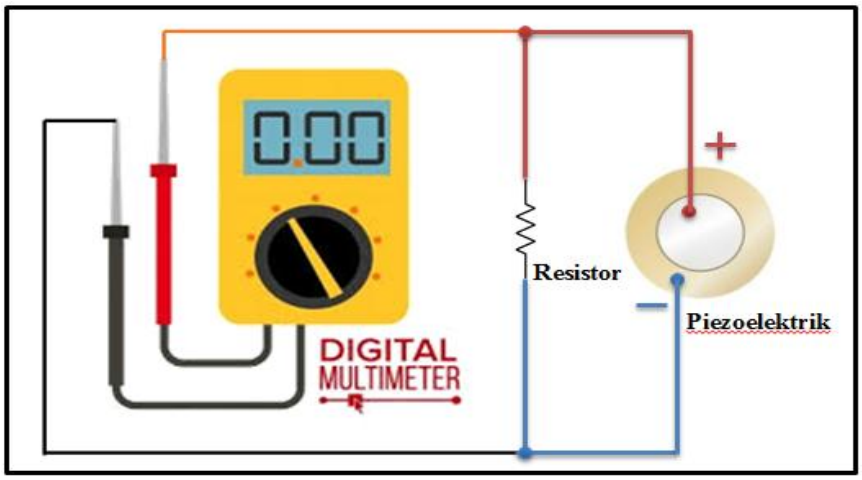
4. Pengujian *piezoelektrik* yang dihubung secara campuran, yaitu menggabungkan antara rangkaian seri dan paralel mulai dari 3 hingga 5 buah *piezoelektrik* yang diberi kode nama rangkaian campuran : A,B,C,D, dan E.
5. Penggujian piezoelektrik menggunakan osiloskop untuk mengetahui waktu sinyal.

DOC. EU-300 Identifikasi Masalah

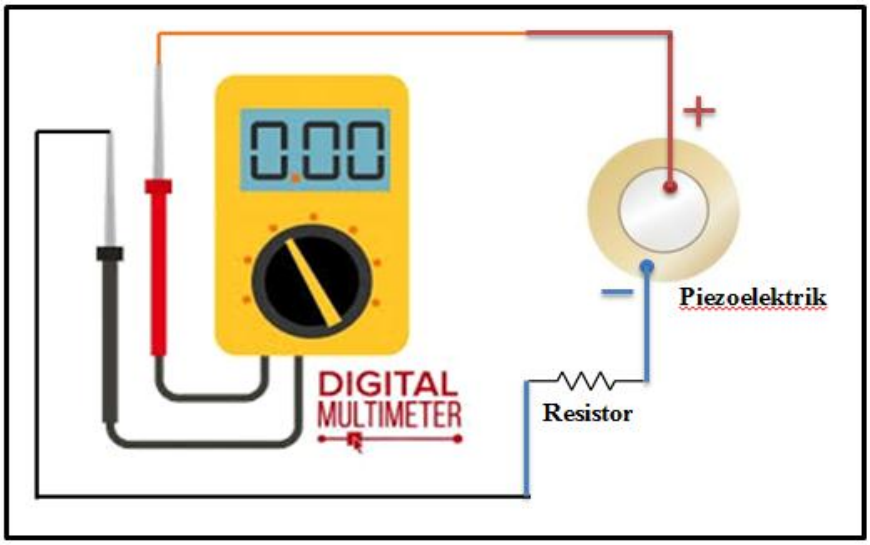
3.1. Perancangan Sistem Pengujian

A. Desain Pengujian:

Desain sistem pengujian ini terdiri dari beberapa komponen utama yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dalam bentuk tegangan dan arus ketika diberikan tekanan mekanik. Komponen utama dalam sistem ini meliputi sensor *piezoelektrik* sebagai elemen utama yang mengubah tekanan menjadi sinyal listrik, resistor yang berperan sebagai beban saat proses pengukuran arus, serta multimeter yang digunakan untuk membaca nilai tegangan dan arus yang dihasilkan. Pada pengukuran tegangan, resistor beban dihubungkan secara paralel dengan piezoelektrik dan alat ukur. Sedangkan pada pengukuran arus, resistor beban dirangkai secara seri dengan piezoelektrik dan alat ukur sehingga membentuk satu rangkaian pengukuran.



(a)



(b)

Gambar 3.1.Desain Pengujian *Piezoelektrik*

a. Pengukuran Tegangan Piezoelektrik

b.Pengukuran Arus *Piezoelektrik*

Selain itu, kabel jumper digunakan sebagai penghubung antar komponen dalam rangkaian, karet berfungsi sebagai pelindung fisik sensor untuk mencegah kerusakan akibat tekanan berlebih, dan alat pukul digunakan sebagai sumber tekanan mekanik pada saat pengujian. Seluruh komponen ini dirancang agar dapat bekerja secara terpadu dalam menguji performa sensor *piezoelektrik* dalam merespons tekanan.

1. Sensor:

   Sensor *piezoelektrik*: komponen elektronik yang memanfaatkan efek *piezoelektrik* untuk mendeteksi perubahan tekanan, getaran, atau gaya mekanik dan mengubahnya menjadi sinyal listrik.

2. Resistor (100kΩ)

   Komponen elektronik yang berfungsi untuk menghambat atau membatasi aliran arus listrik dalam suatu rangkaian. Satuan hambatan resistor adalah ohm (Ω)**.**

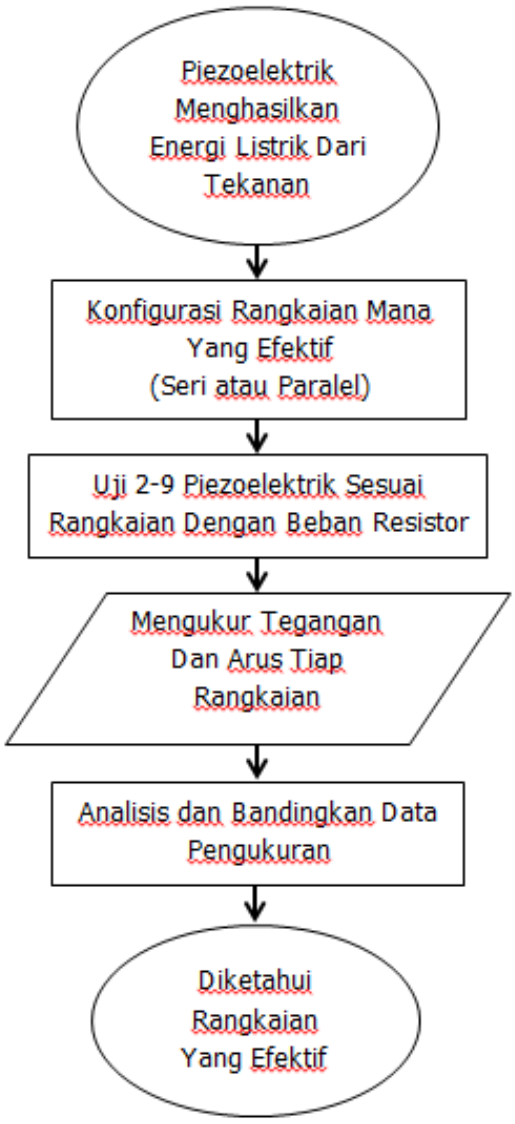
3. Multimeter

   Alat ukur *elektronik* serbaguna yang digunakan untuk mengukur berbagai besaran listrik seperti: Tegangan (Volt), Arus listrik (Ampere), Hambatan atau resistansi (Ohm).

Pengujian sistem ini dilaksanakan dengan menguji berbagai *konfigurasi* rangkaian sensor *piezoelektrik,* meliputi rangkaian tunggal sebagai acan dalam penelitian, rangkaian seri, paralel, serta kombinasi keduanya (rangkaian campuran), sekaligus memvariasikan jumlah sensor yang digunakan dalam setiap *konfigurasi*. Setiap model rangkaian memiliki karakteristik kelistrikan yang berbeda, sehingga penting untuk mengamati bagaimana pengaruh susunan dan jumlah sensor terhadap keluaran listrik yang dihasilkan. Pada pengukuran tegangan, multimeter dihubungkan secara langsung ke terminal output rangkaian untuk mencatat nilai tegangan yang muncul akibat gaya mekanik yang diterima sensor.

Sementara itu, pengukuran arus dilakukan dengan menambahkan resistor beban pada jalur kutub negatif rangkaian. Penambahan resistor ini bertujuan untuk mencegah terjadinya hubung singkat serta membantu menstabilkan arus yang mengalir, mengingat karakteristik keluaran sensor *piezoelektrik* bersifat *transien* dan dapat menghasilkan lonjakan arus sesaat. Proses pengujian dilakukan

sebanyak sepuluh kali percobaan pukulan yang diberikan secara berulang dan konsisten, guna memastikan bahwa respons sensor *piezoelektrik* terhadap tekanan bersifat stabil, dapat *direproduksi*, dan menghasilkan data yang *valid*. Dengan metode ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih *komprehensif* mengenai performa sensor *piezoelektrik* dalam berbagai *konfigurasi* rangkaian, baik dari segi keluaran tegangan maupun kemampuan menghantarkan arus listrik.



Gambar 3.2 Rancangan Penelitian

Eksperimen ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sensor *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik melalui sepuluh kali pukulan berulang. Pengujian difokuskan pada perbandingan nilai tegangan dan arus keluaran pada rangkaian seri dan paralel, dengan tujuan untuk menentukan rangkaian yang lebih efektif dalam menghasilkan energi listrik. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menilai potensi sensor *piezoelektrik* sebagai sumber energi listrik skala mikro.

Penelitian ini bertujuan menjelaskan mekanisme kerja sensor *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik serta membandingkan efektivitas *konfigurasi* seri dan paralel untuk menentukan rangkaian yang lebih optimal. Rancangan penelitian ini menjelaskan mekanisme kerja *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik melalui variasi jumlah *piezoelektrik* dan beban, sehingga memungkinkan perbandingan keluaran energi pada setiap rangkaian.

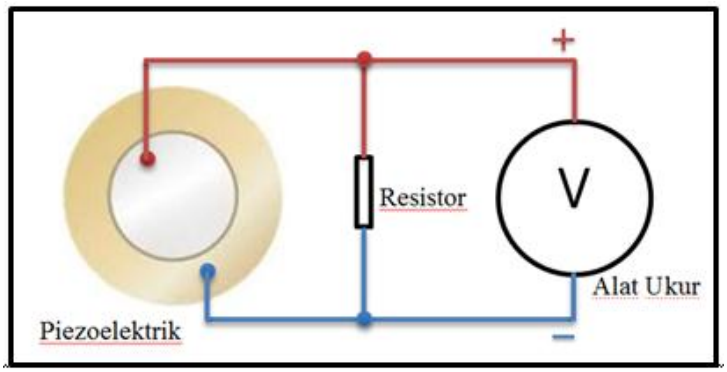
DOC. EU-400 Implementasi

4.1 Hasil Perancangan Sistem Pengujian

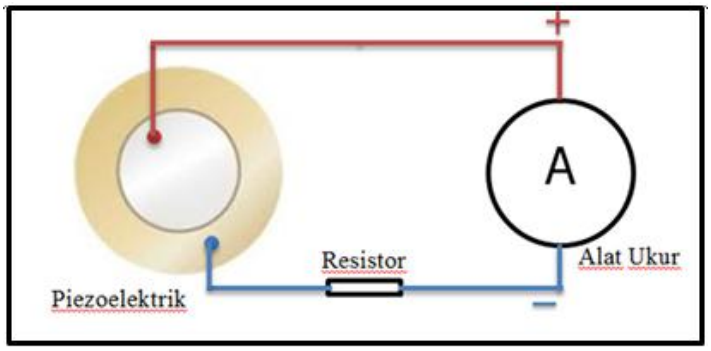
A. Rangkaian Tunggal

Pengujian awal dilakukan menggunakan rangkaian tunggal, yaitu satu sensor piezoelektrik dengan satu resistor beban. Resistor divariasikan dengan nilai 1 MΩ, 100 kΩ, 4,7 kΩ, 680 Ω, dan 330 Ω untuk mengetahui pengaruh resistansi terhadap keluaran sensor. Terdapat tiga bentuk gambar yang disajikan melalui tiga bentuk rancangan, yaitu skematik subsistem, skematik keseluruhan, dan tata letak *PCB*.

Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sensor pada konfigurasi rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar piezoelektrik dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

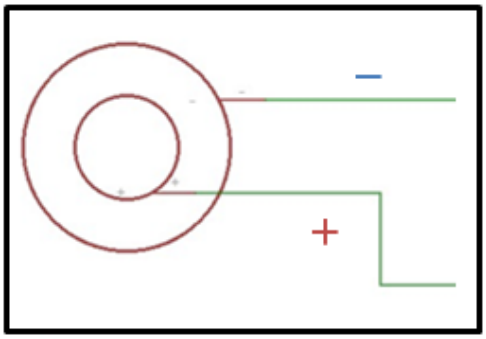


(a)

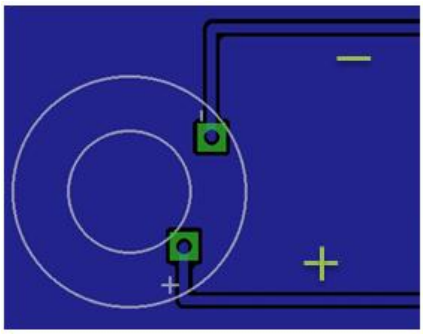


(b)

Gambar 4.1 Desain *Skematik Subsistem* Rangkaian Tunggal
a. Pengukuran Tegangan
b. Pengukuran Arus



Gambar 4. 2 Desain *Skematik* Sistem Keseluruhan Rangkain Tunggal

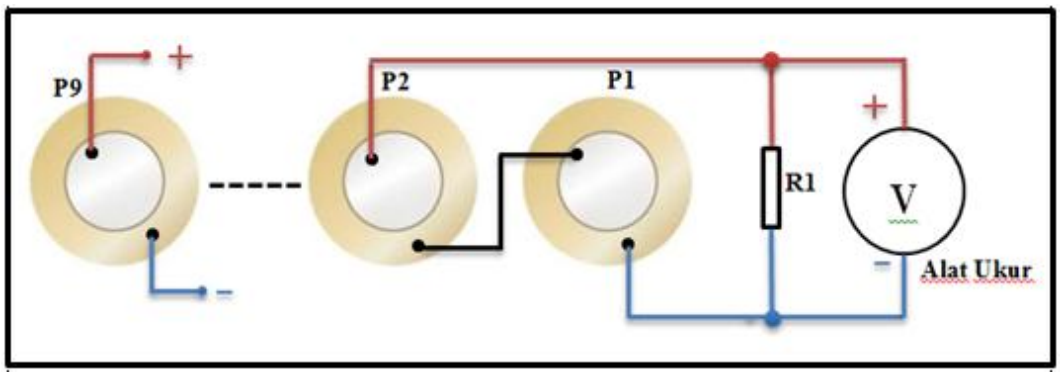


Gambar 4. 3 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Tunggal

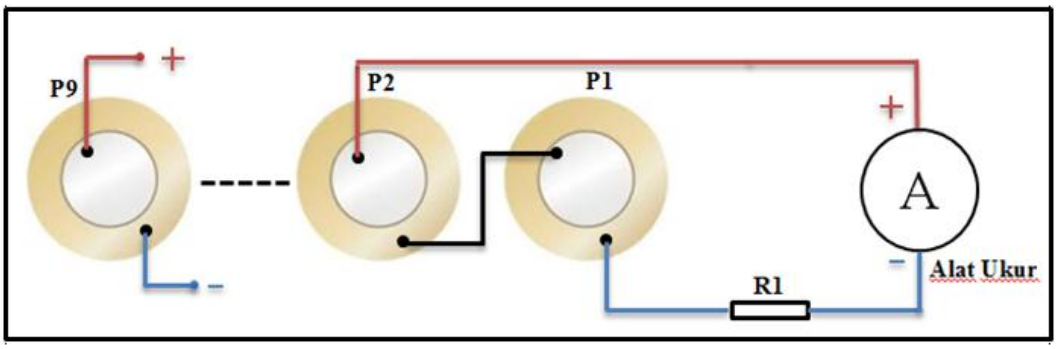
B. Rangkaian Seri

Pada gambar rangkaian sembilan buah sensor *piezoelektrik* yang dihubungkan secara seri, ditampilkan tiga jenis desain, yakni *skematik subsistem*, *skematik* keseluruhan, dan tata letak *PCB Board* sistem. Sensor *piezoelektrik* disusun dalam *konfigurasi matriks* 3×3, di mana kutub positif (+) setiap elemen *piezoelektrik* terhubung ke kutub negatif (–) elemen berikutnya, sehingga membentuk satu jalur rangkaian seri.

Ujung-ujung rangkaian seri ini berfungsi sebagai terminal keluaran yang dihubungkan ke multimeter untuk proses pengukuran. Pengukuran tegangan dan arus dilakukan dengan menambahkan resistor beban sebesar 100 kΩ ke kutub negatif (-) dalam rangkaian, yang berfungsi sebagai beban untuk memastikan tegangan dan arus yang dihasilkan dapat terbaca, stabil, dan aman untuk komponen lain seperti multimeter.



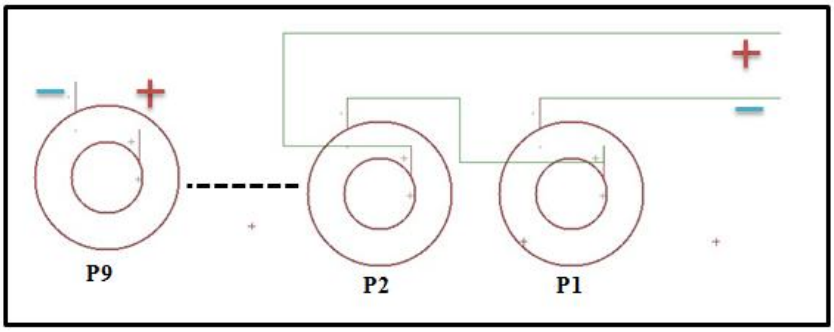
(a)



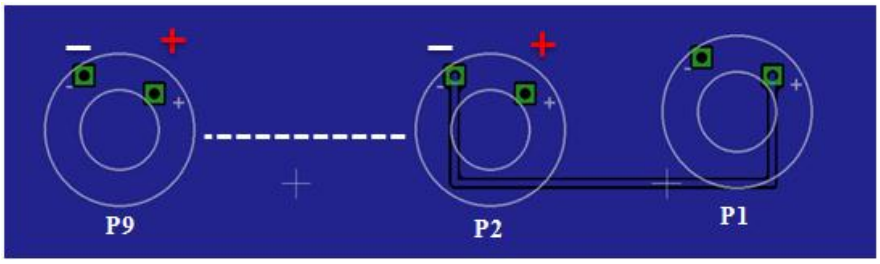
(b)

Gambar 4.4 Desain *Skematik Subsistem* Rangkain Seri

a. Pengukuran Tegangan
b. Pengukuran Arus



Gambar 4. 5 Desain *Skematik* Sistem Keseluruhan Rangkain Seri



Gambar 4. 6 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Seri

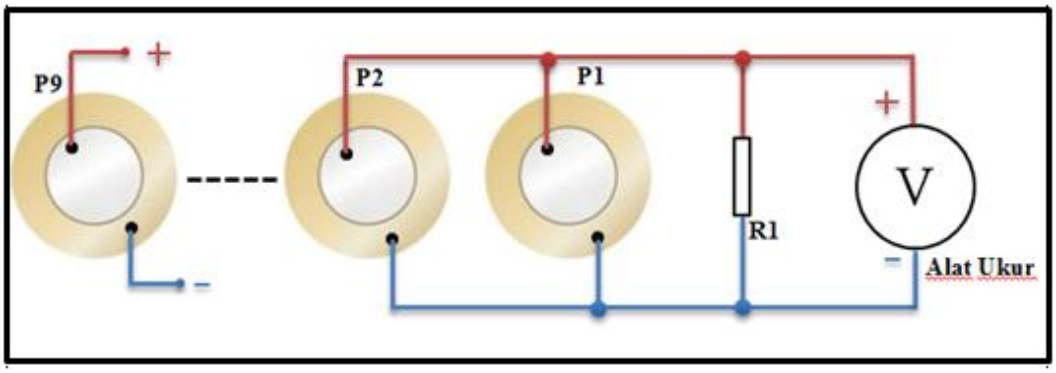
Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk

membandingkan performa sensor pada *konfigurasi* rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

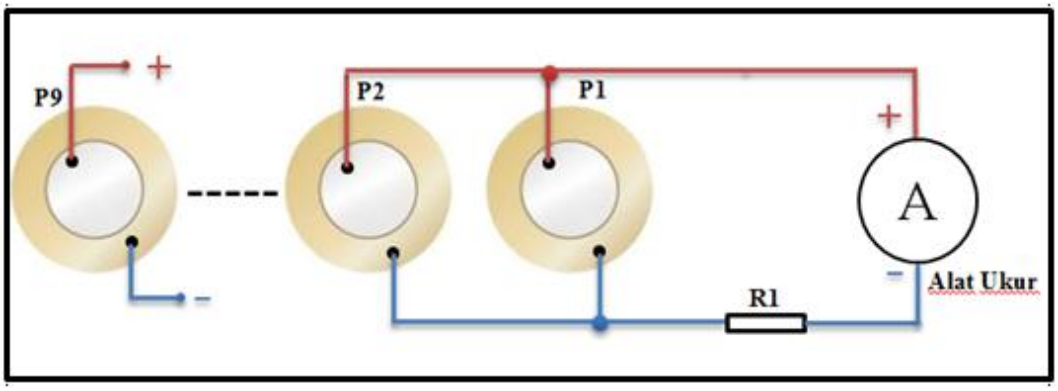
C. Rangkaian Paralel

Rangkaian paralel terdiri atas sembilan buah sensor *piezoelektrik* yang disusun dalam *konfigurasi matriks* 3×3. Pada *konfigurasi* ini, semua terminal positif (+) dari masing-masing sensor dihubungkan menjadi satu *node*, dan seluruh terminal negatif (–) juga dihubungkan ke satu *node* yang berbeda. Kedua *node* ini membentuk sepasang terminal keluaran yang berfungsi sebagai titik pengukuran. Pengukuran tegangan dan arus, dilakukan dengan cara menambahkan beban pada rangkaian berupa resistor sebesar 100 kΩ yang dipasang secara seri pada jalur negatif sebelum terhubung ke alat ukur.

Penambahan resistor ini bertujuan untuk membatasi aliran arus, mencegah terjadinya arus lebih (*overcurrent*), serta menstabilkan nilai arus keluaran selama sensor mengalami *deformasi* akibat *eksitasi* mekanis. Sistem ini divisualisasikan dalam tiga model *representasi* teknis, yaitu *skematik subsistem*, *skematik* keseluruhan sistem, dan tata letak *PCB Board*, yang masing-masing menggambarkan tahapan perancangan dari tingkat blok *fungsional* hingga implementasi pada papan *sirkuit* cetak.



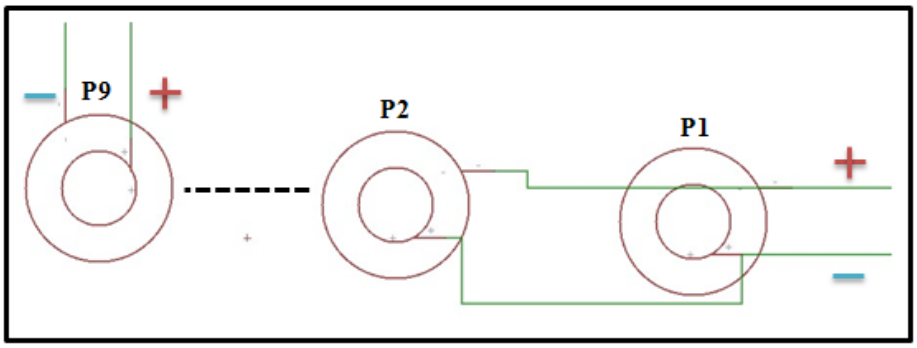
(a)



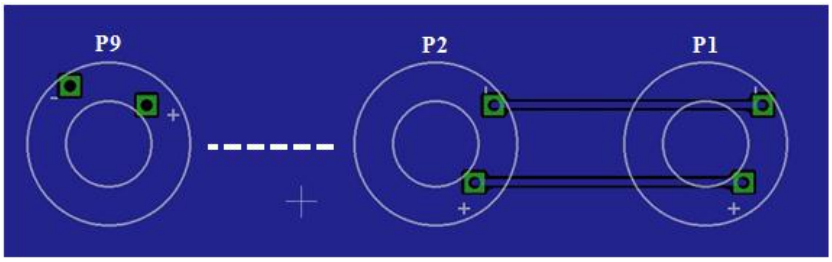
(b)

Gambar 4. 7 Desain *Skematik* Subsistem Rangkain Paralel

a. Pengukuran Tegangan
b. Pengukuran Arus



Gambar 4. 8 Desain *Skematik* Sistem Keseluruhan Rangkain Paralel



Gambar 4. 9 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Paralel

Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sensor pada konfigurasi rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

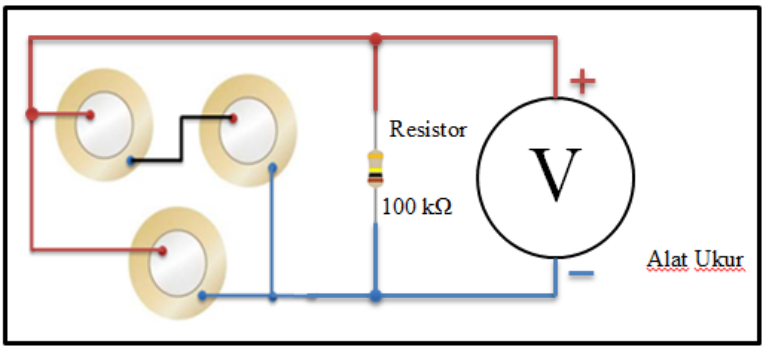
D. Rangkaian Seri-Paralel (Campuran)

1. Rangkaian Campuran A

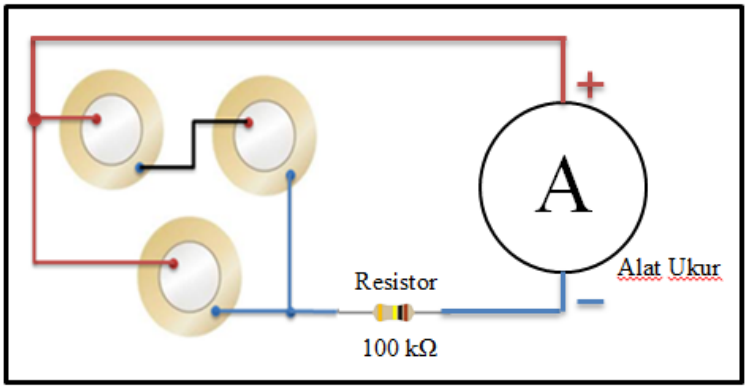
Pada rangkaian campuran A, tiga buah sensor *piezoelektrik* disusun dalam *konfigurasi* gabungan seri-paralel. Dua sensor dihubungkan secara seri dengan menghubungkan kutub positif (+) salah satu sensor ke kutub negatif (–) sensor berikutnya, kemudian rangkaian seri ini dihubungkan secara paralel dengan satu sensor lainnya dengan menyatukan kutub positif (+) dan kutub negatif (–) ke masing-masing jalur.

Rangkaian ini divisualisasikan melalui tiga model desain, yaitu *skematik subsistem*, *skematik* keseluruhan sistem, dan tata letak *PCB Board*. Tegangan dan arus keluaran diukur dengan cara menambahkan

resistor beban sebesar 100 kΩ untuk memastikan tegangan dan arus yang dihasilkan dapat terbaca, stabil, dan aman untuk komponen lain seperti multimeter.



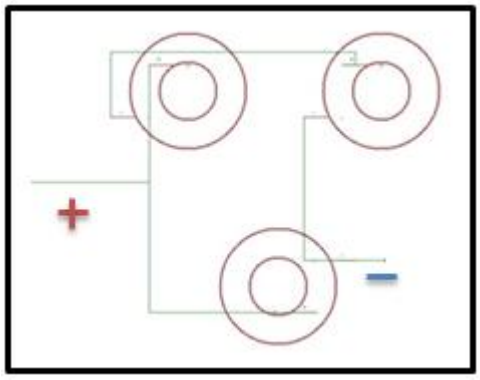
(a)



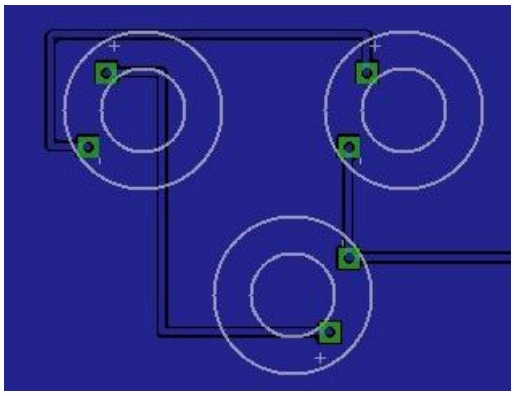
(b)

Gambar 4. 10 Desain *Skematik Subsistem* Rangkain Campuran A

a. Pengukuran Tegangan
b. Pengukuran Arus



Gambar 4. 11 Desain *Skematik* Sistem Keseluruhan Rangkain Campuran A



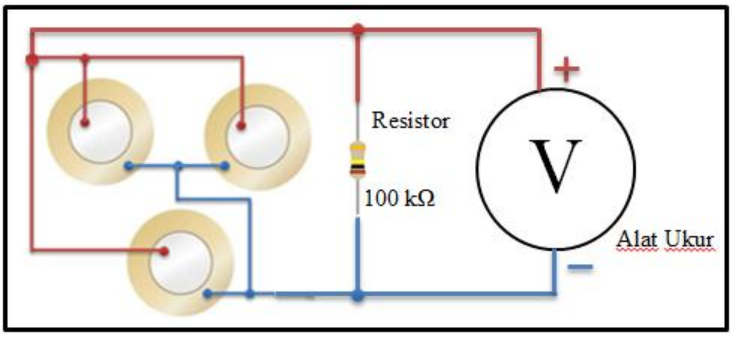
Gambar 4. 12 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Campuran A

Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sensor pada konfigurasi rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

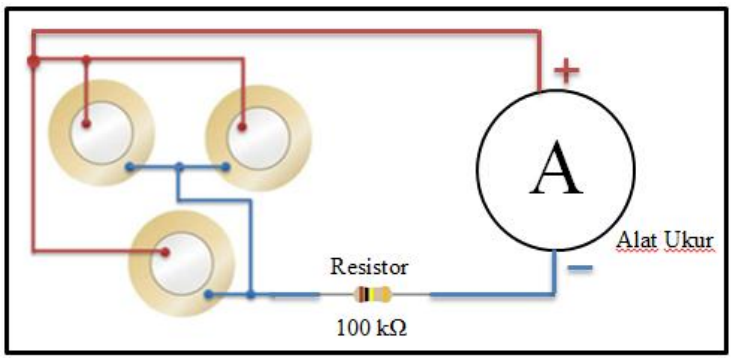
2. Rangkaian Campuran B

Pada rangkaian campuran B, tiga buah sensor *piezoelektrik* disusun dalam *konfigurasi* seri-paralel. Dua sensor pertama dihubungkan secara paralel dengan menyatukan kutub positif (+) pada satu jalur dan kutub negatif (–) pada jalur lainnya. Selanjutnya, rangkaian paralel ini dihubungkan secara seri dengan satu sensor lain, dengan cara menyambungkan kutub positif (+) ke kutub negatif (–). Terminal keluaran dari rangkaian ini kemudian dihubungkan ke multimeter untuk pengukuran.

Rangkaian *divisualisasikan* dalam tiga model desain, yaitu *skematik subsistem, skematik* keseluruhan sistem, dan tata letak *PCB Board*. Pengukuran tegangan dan arus keluaran dilakukan dengan menambahkan resistor beban sebesar 100 kΩ untuk mencegah hubung singkat, serta memastikan tegangan dan arus yang dihasilkan dapat terbaca, stabil, dan aman untuk komponen lain seperti multimeter.

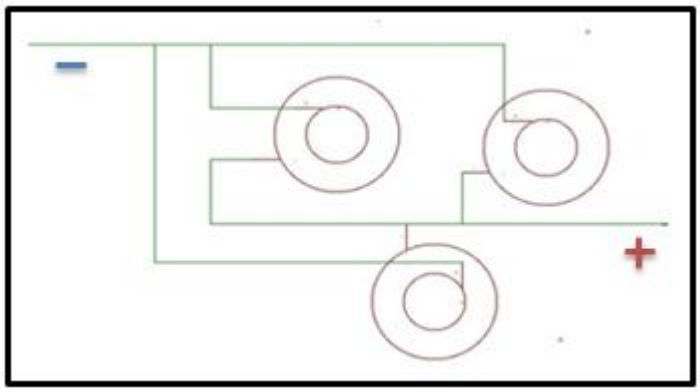


(a)

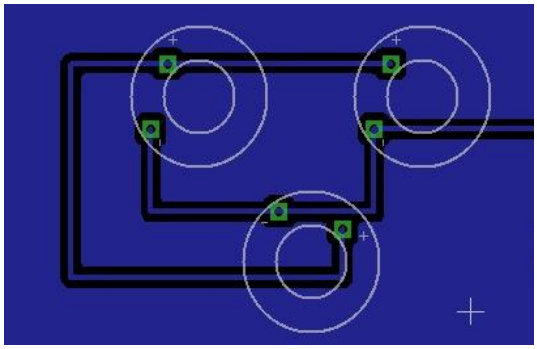


(b)

Gambar 4.13 Desain *Skematik Subsistem* Rangkain Campuran B



Gambar 4. 14 Desain *Skematik* Sistem Keseluruhan Rangkain Campuran B



Gambar 4. 15 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Campuran B

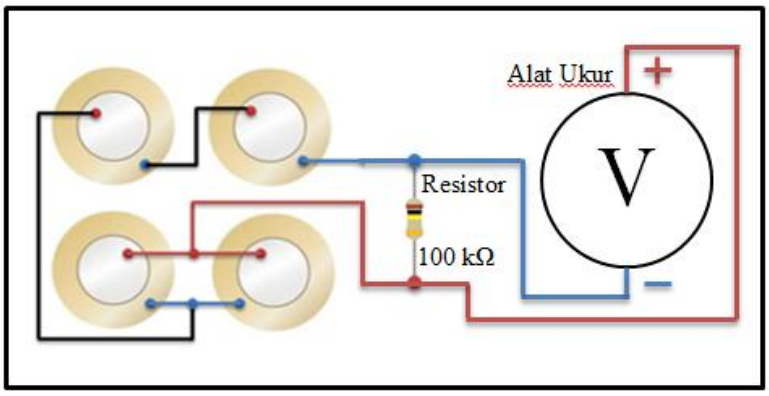
Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sensor pada konfigurasi rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

3. Rangkaian Campuran C

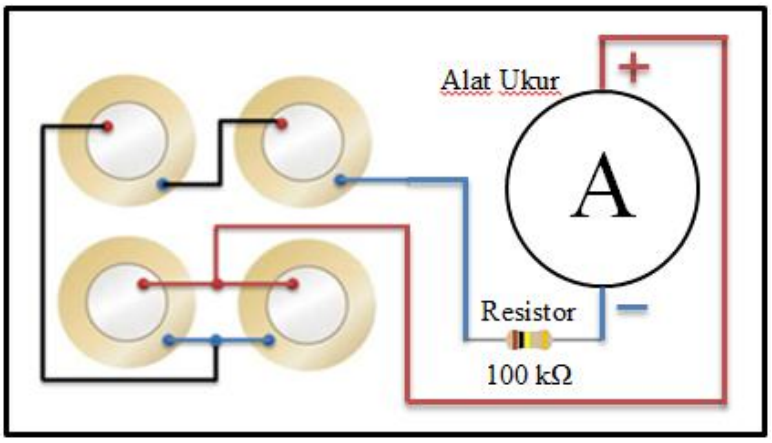
Terdapat empat buah sensor *piezoelektrik* yang disusun dalam *konfigurasi* seri-paralel. Dua buah sensor dihubungkan secara seri, yakni dengan menyambungkan kutub positif (+) dari sensor pertama ke kutub negatif (−) sensor kedua. Sementara itu, dua sensor lainnya dihubungkan secara paralel dengan cara menggabungkan kedua kutub positif (+) menjadi satu jalur, dan kedua kutub negatif (−) menjadi jalur lainnya. Selanjutnya, rangkaian seri dan rangkaian paralel tersebut dihubungkan kembali secara seri, di mana kutub positif (+) dari rangkaian seri dihubungkan ke kutub negatif (−) dari rangkaian paralel.

Tegangan dan arus keluaran diambil dari kutub negatif (−) rangkaian seri dan kutub positif (+) rangkaian paralel, kemudian diukur menggunakan multimeter. Pengukuran tegangan dan arus dilakukan dengan menambahkan resistor beban sebesar 100 kΩ untuk mencegah terjadinya hubungan singkat serta memastikan tegangan dan arus yang dihasilkan dapat terbaca, stabil, dan aman untuk komponen lain seperti

multimeter. Rangkaian ini *divisualisasikan* dalam tiga model desain, yaitu *skematik subsistem*, *skematik* keseluruhan sistem, dan tata letak pada papan *PCB* (*Printed Circuit Board*).



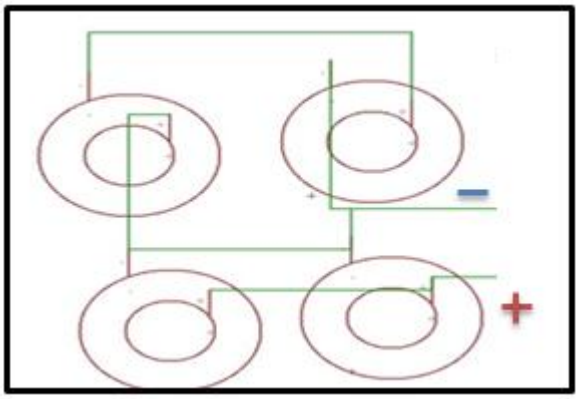
(a)



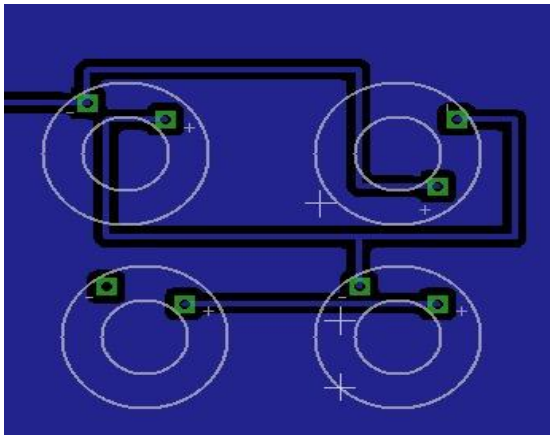
(b)

Gambar 4. 16 Desain *Skematik Subsistem* Rangkain Campuran C

a. Pengukuran Tegangan
b. Pengukuran Arus



Gambar 4. 17 Desain *Skematik Sistem* Keseluruhan Rangkain Campuran C



Gambar 4. 18 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Campuran C

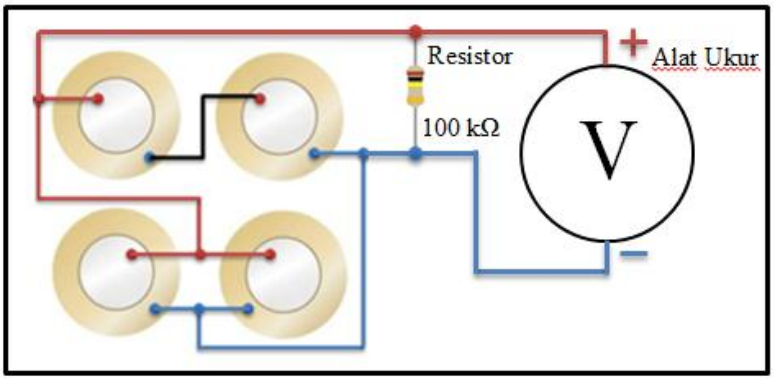
Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sensor pada konfigurasi rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

4. Rangkaian Campuran D

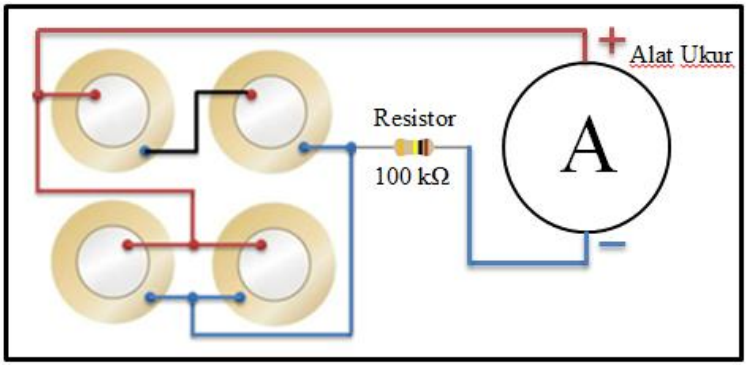
Terdapat empat buah sensor *piezoelektrik* yang disusun dalam *konfigurasi* seri-paralel. Dua buah sensor dihubungkan secara seri, yakni dengan menyambungkan kutub positif (+) dari sensor pertama ke kutub negatif (−) sensor kedua. Sementara itu, dua sensor lainnya dihubungkan secara paralel dengan cara menggabungkan kedua kutub positif (+) menjadi satu jalur, dan kedua kutub negatif (−) menjadi jalur lainnya.

Selanjutnya, rangkaian seri dan rangkaian paralel tersebut dihubungkan kembali secara paralel, di mana menggabungkan kedua kutub positif (+) menjadi satu jalur dan kedua kutub negatif (−) menjadi jalur lainnya. Tegangan dan arus keluaran diambil dari kutub negatif (−) rangkaian seri dan kutub positif (+) rangkaian paralel, kemudian diukur menggunakan multimeter.

Pengukuran tegangan dan arus dilakukan dengan menambahkan resistor beban sebesar 100 kΩ untuk mencegah terjadinya hubung singkat serta memastikan tegangan dan arus yang dihasilkan dapat terbaca, stabil, dan aman untuk komponen lain seperti multimeter. Rangkaian ini *divisualisasikan* dalam tiga model desain, yaitu *skematik subsistem*, *skematik* keseluruhan sistem, dan tata letak pada papan *PCB* (*Printed Circuit Board*).



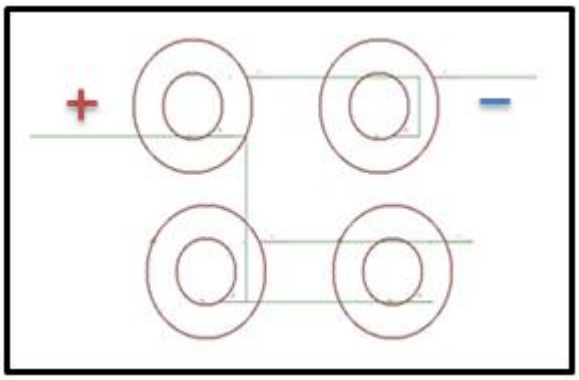
(a)



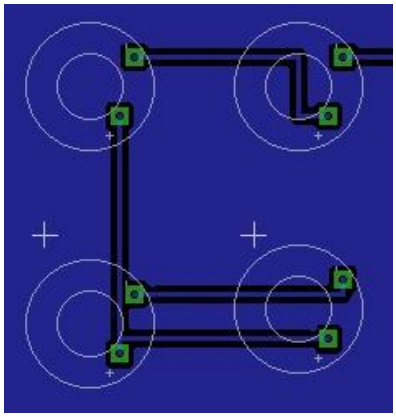
(b)

Gambar 4. 19 Desain *Skematik Subsistem* Rangkain Campuran D

a. Pengukuran Tegangan
b. Pengukuran Arus



Gambar 4. 20 Desain *Skematik* Sistem Keseluruhan Rangkain Campuran D



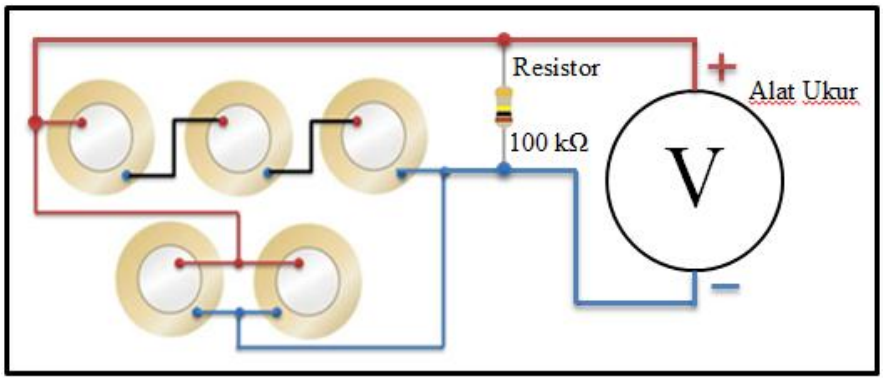
Gambar 4. 21 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Campuran D

Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sensor pada konfigurasi rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

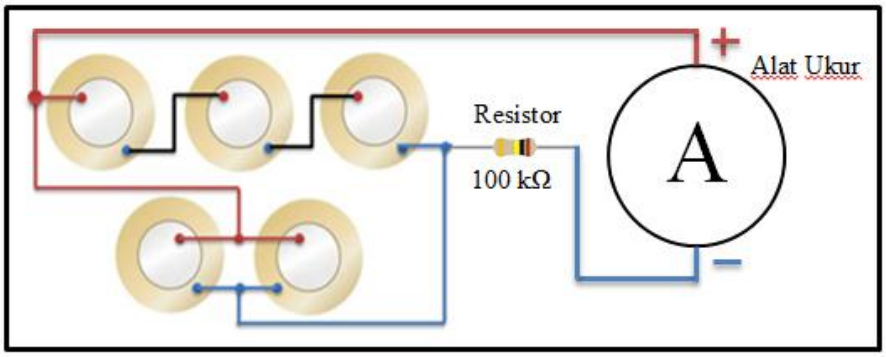
5. Rangkaian Campuran E

Pada rangkaian campuran E ini terdapat 5 *piezoelektrik*, dimana 3 buah *piezoelektrik* dihubung secara seri dengan menyambungkan kutub (+) ke kutub (-) *piezoelektrik* berikutnya, lalu menghubungkan 2 buah *piezoelektrik* yang lainnya dengan menghubungkan kutub (+) menjadi satu jalur dan kutub (-) menjadi satu jalur, hasil dari hubungan seri dan paralel dihungkan lagi secara paralel hingga membentuk satu rangkaian kemudian keluarannya diambil dari kutub (-) rangkaian seri dan kutub (+) rngkaian paralel.

Pengukuran tegangan dan arus dilakukan dengan menambahkan resistor beban sebesar 100 kΩ untuk mencegah terjadinya hubungan singkat serta memastikan tegangan dan arus yang dihasilkan dapat terbaca, stabil, dan aman untuk komponen lain seperti multimeter. Rangkaian ini *divisualisasikan* dalam tiga model desain, yaitu skematik subsistem, *skematik* keseluruhan sistem, dan tata letak pada papan *PCB* (*Printed Circuit Board*).



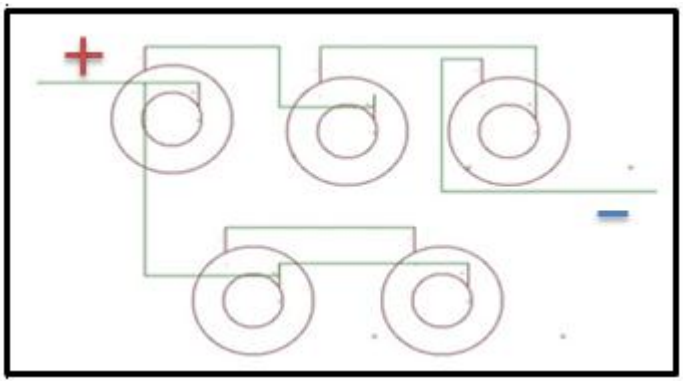
(a)



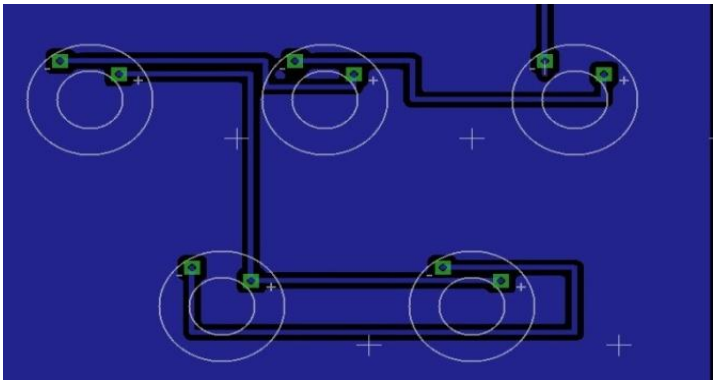
(b)

Gambar 4. 22. Desain *Skematik Subsistem* Rangkain Campuran E

a. Pengukuran Tegangan,
b. Pengukuran Arus



Gambar 4. 23 Desain *Skematik Sistem* Keseluruhan Rangkain Campuran E



Gambar 4. 24 Desain *PCB Board* Sistem Rangkain Campuran E

Pada pengukuran tegangan, resistor dipasang paralel dengan sensor dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus dipasang seri agar hasil lebih akurat. Data dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sensor pada konfigurasi rangkaian seri dan paralel, sekaligus menunjukkan kemampuan dasar *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik pada beban berbeda.

4.2 Cara Pengujian Sistem

A. Prosedur Percobaan :

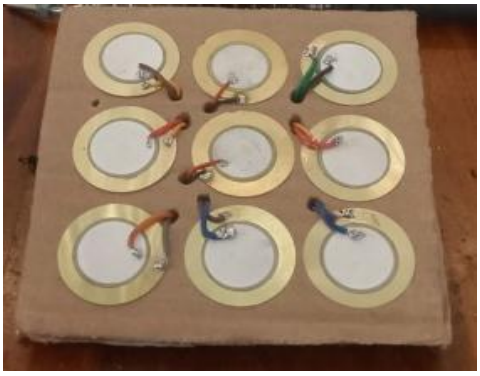
1. Persiapan Alat dan Bahan



Gambar 4. 25 Alat dan bahan Rangkaian Sensor *Piezoelektrik*

2. Beberapa sensor *piezoelektrik* disiapkan dalam jumlah bervarisi antara 1 hingga 9 buah.
3. Peralatan seperti solder, timah, dan kabel digunakan untuk merakit rangkaian sensor.
4. Adapun resistor disediakan sebagai beban dalam rangkaian *piezoelektrik*..
5. Untuk melindungi sensor *piezoelektrik*, digunakan bahan tambahan berupa karet dan kardus.
6. Adapun plat besi berfungsi sebagai landasan, sementara dan alat pukul digunakan untuk memberikan tekanan mekanik pada sensor.

B. Perakitan Rangkaian *Piezoelektrik*



Gambar 4. 26 *Prototipe* Rangkaian *Piezoelektrik*

1. Sensor *piezoelektrik* dirangkai dalam empat *konfigurasi*, yaitu tunggal, seri, paralel, dan campuran dengan menyatukan terminal yang sesuai.
2. Multimeter dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan.
3. Dipasang resistor secara paralel dan seri dengan rangkaian piezoelektrik sebagai beban.
4. Ujung-ujung dari rangkaian sensor kemudian dihubungkan ke multimeter guna mengukur tegangan (V) dan arus (µA) yang dikeluarkan sensor.
5. Pengukuran awal dilakukan terhadap satu buah sensor *piezoelektrik* yang dihubung paralel dengan beban resistor yang berbeda-beda untuk memperoleh data tunggal sebagai acuan.
6. Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap 2 hingga 9 buah sensor *piezoelektrik* yang disusun dalam konfigurasi rangkaian seri dan paralel dimana beban dihubung secara seri dengan rangkaian.

7. Untuk rangkaian seri-paralel (campuran), pengujian dilakukan dengan 3 hingga 5 buah sensor *piezoelektrik* yang disusun dalam berbagai variasi, masing-masing dikategorikan sebagai Rangkaian Campuran A, B, C, D, dan E dimana beban dihubung secara seri dengan rangkaian.
8. Saat tidak ada tekanan, multimeter harus menunjukkan angka nol sebagai indikator kondisi awal.
9. Seluruh sambungan kabel diperiksa untuk memastikan tidak terjadi arus bocor.

C. Pengambilan Data



Gambar 4. 27 Pengujian Rangkaian *Piezoelektrik*

1. Tekanan mekanik diberikan pada sensor *piezoelektrik* dengan pukulan yang konsisten.
2. Setiap *konfigurasi* jumlah sensor menerima 10 kali pukulan.

3. Pengukuran tegangan dan arus yang dihasilkan direkam melalui video untuk mempermudah pencatatan hasil.
4. Seluruh data tegangan dan arus dari tiap konfigurasi rangkaian dan setiap pukulan dicatat secara *sistematis* ke dalam tabel data.

D. Pengulangan Pengujian



Gambar 4. 28 Rangkaian Percobaan *Piezoelektrik*

1. Apabila ditemukan kerusakan seperti kabel terputus atau sensor retak, pengujian dilakukan setelah perbaikan dilakukan.
2. Dalam kondisi di mana multimeter menunjukkan angka nol secara terus menerus, pengujian diulang kembali guna memastikan konsistensi dan akurasi hasil pengukuran.

DOC. EU-500 Pengujian dan Analisis

5.1 Pengujian Spesifikasi Sistem

A. Hasil Pengujian

Eksperimen ini, dilakukan pengujian terhadap sensor *piezoelektrik* dalam menghasilkan energi listrik melalui empat model pengujian, yaitu: (1) pengujian dalam bentuk rangkaian tunggal, (2) pengujian sensor *piezoelektrik* dalam bentuk rangkaian seri, (3) pengujian dalam bentuk rangkaian paralel, dan (4) pengujian dengan susunan campuran (seri-paralel).

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui seberapa lama waktu muncul tegangan dan seberapa besar tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik*. Nilai tegangan dan arus yang diperoleh kemudian dihitung menggunakan rumus daya listrik, sehingga dapat diketahui besarnya daya yang dihasilkan. Seluruh pengujian dilakukan dengan memberikan tekanan berupa pukulan pada permukaan sensor, dan hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk tabel data.

a. Rangkaian Tunggal

Pengujian awal dilakukan dengan memberikan variasi beban resistor yang dihubungkan pada satu sensor *piezoelektrik*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui perbandingan antara tegangan dan arus yang dihasilkan pada setiap variasi beban. Dengan demikian, data yang diperoleh dapat memberikan gambaran mengenai karakteristik keluaran sensor *piezoelektrik* terhadap perubahan beban listrik. Hasil pengukuran tegangan dan arus selengkapnya disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Data rangkaian tunggal

Resistor Beban	Output	Pukulan									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 MΩ	Tegangan (V)	0,27	0,26	0,12	0,19	0,02	0,42	0,02	0,14	0,04	0,02
	Arus (µA)	0,3	0,2	0,23	0,2	0,03	0,3	0,03	0,22	0,06	0,1
100 kΩ	Tegangan (V)	0,74	0,12	0,47	0,08	0,44	0,35	0,2	0,64	0,11	0,32
	Arus (µA)	7	1,2	4,7	0,8	4,4	3,6	2,1	6,1	1	3,1
4,7 kΩ	Tegangan (V)	0,92	0,89	1	0,96	0,87	0,95	1,01	0,96	0,88	0,9
	Arus (µA)	194	189	211	200	184	202	213	219	186	190
680 Ω	Tegangan (V)	1,07	1,02	1,05	1,06	1,12	1,01	1,11	1,04	1,09	1,05
	Arus (mA)	1,51	1,8	1,59	1,49	1,7	1,52	1,68	1,57	1,58	1,53
330 Ω	Tegangan (V)	1,14	1,52	1,6	1,25	1,17	1,69	1,38	1,17	1,58	1,39
	Arus (mA)	3,42	4,65	4,87	3,81	3,52	5,09	4,22	3,61	4,74	4,33

Hasil pengujian sensor piezoelektrik dengan rangkaian tunggal menunjukkan bahwa variasi resistor beban berpengaruh signifikan terhadap keluaran tegangan dan arus. Pada beban 1 MΩ, tegangan maksimum hanya 0,42 V dengan arus 0,3 µA, sehingga energi yang dihasilkan sangat kecil. Penurunan beban ke 100 kΩ meningkatkan tegangan hingga 0,74 V dan arus 7 µA, meskipun masih fluktuatif. Pada 4,7 kΩ, tegangan lebih stabil mendekati 1 V dengan arus tertinggi 219,6 µA. Beban 680 Ω menghasilkan tegangan 1,01–1,12 V dan arus hingga 1,71 mA, menunjukkan daya lebih besar. Hasil terbaik diperoleh pada 330 Ω, dengan tegangan 1,69 V dan arus maksimum 5,09 mA, sehingga memberikan keluaran energi tertinggi.

b. Rangkaian Seri

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menyusun sensor *piezoelektrik* secara seri, dengan jumlah sensor yang divariasikan mulai dari 2 hingga 9 buah.

Setiap *konfigurasi* diuji untuk mengetahui output tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ketika diberi tekanan mekanis berupa pukulan sebanyak 10 kali. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan beban *resistif* sebesar 100 kΩ untuk setiap *konfigurasi* rangkaian. Hasil pengujian berupa nilai tegangan dan arus dari masing-masing jumlah sensnor *piezoelektrik* dalam susunan seri disajikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5. 2 Data Hasil Pengujian Rangkaian Seri

Jumlah *Piezoelektrik*	**Output**	**Pukulan**									
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
2	Tegangan (**V**)	0,37	0,45	0,35	0,32	0,44	0,32	**0,25**	**0,81**	0,47	0,72
	Arus (**µA**)	3,6	4,5	3,5	**3,2**	3,6	3,3	3,5	**8,6**	3,6	8,5
3	Tegangan (**V**)	**0,2**	**0,61**	0,34	0,54	0,34	0,26	0,34	0,21	0,26	0,29
	Arus (**µA**)	**3,2**	8,6	8,2	**8,7**	8,6	3,6	4	3,6	3,7	4,2
4	Tegangan (**V**)	**1,2**	0,53	0,31	0,523	**0,29**	0,35	0,31	0,59	0,23	0,97
	Arus (**µA**)	**15**	8	5	7	5	6,5	6,8	8,2	**4,7**	8,6
5	Tegangan (**V**)	0,63	0,57	0,74	0,58	0,927	1,11	**1,25**	**0,56**	0,71	0,75
	Arus (**µA**)	**7,6**	8,6	**9,6**	8,4	9,5	9,6	9,5	8	8,6	8,6
6	Tegangan (**V**)	0,9	0,94	0,73	0,83	1,37	1,2	**1,64**	0,91	0,96	**0,69**
	Arus (**µA**)	9,3	9,5	8,6	8,6	10,5	10,6	**13,2**	9,2	10	**8,2**
7	Tegangan (**V**)	5,2	**12,2**	8,32	4,53	3,76	8,38	6,93	6,51	**3,06**	4,96
	Arus (**µA**)	55	**120**	80,5	41,5	37,2	86,7	69,6	67,6	**32,7**	43,5
8	Tegangan (**V**)	5,51	6,07	11,6	6,78	6,74	**16,2**	7,73	8,82	**5,03**	11,32
	Arus (**µA**)	54,7	63	119,2	59,6	60,6	**167**	73	88	**51,3**	113,3
9	Tegangan (**V**)	18,74	**12**	16,44	15,07	17,10	13,77	**19,5**	13,31	12,53	18,08
	Arus (**µA**)	187,5	123,3	163,2	149,5	177	139	**191**	139,6	**123**	181,6

Hasil analisis data pada Tabel 5.2 menunjukkan bahwa output tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik* bervariasi tergantung pada jumlah sensor yang digunakan dalam *konfigurasi* seri. Secara umum, penambahan jumlah sensor *piezoelektrik* dalam rangkaian menyebabkan peningkatan nilai tegangan dan arus keluaran. Meskipun demikian, terdapat beberapa data yang menunjukkan penurunan output pada pukulan tertentu.

Hal ini disebabkan oleh tingkat *sensitivitas* sensor *piezoelektrik* yang sangat bergantung pada kekuatan dan konsistensi tekanan mekanis yang diberikan. *Fluktuasi* data ini mencerminkan bahwa respons sensor dapat dipengaruhi oleh variasi gaya tumbukan, sehingga perlu dilakukan pengujian dengan tekanan yang lebih terkontrol untuk memperoleh hasil yang lebih konsisten. Berikut ini merupakan penjelasan rinci dari hasil pengujian sensor *piezoelektrik* dalam *konfigurasi* seri.

1. Pola Keluaran Tegangan

- Terdapat peningkatan tegangan yang *signifikan* seiring bertambahnya jumlah sensor.
- Tegangan tertinggi sebesar 19,5 V (ditandai hijau) muncul pada *konfigurasi* 9 sensor, pukulan ke-7.
- Tegangan terendah sebesar 0,25 V (ditandai merah) tercatat pada *konfigurasi* 2 sensor, pukulan ke-7.

- Setiap penambahan jumlah sensor memberikan kontribusi kenaikan tegangan karena tegangan pada rangkaian seri merupakan penjumlahan dari tiap sensor.

Contoh:

- 2 sensor → tegangan rata-rata yaitu 0,45 V
- 5 sensor → rata-rata meningkat menjadi 0,78 V
- 9 sensor → rata-rata tegangan mencapai 15,26 V

2. Pola Keluaran Arus

Arus pada rangkaian seri meningkat seiring penambahan sensor, namun tidak linier dan kurang signifikan dibanding tegangan. Arus tertinggi sebesar 191,6 µA tercatat pada konfigurasi 9 sensor pukulan ke-7, sedangkan arus terendah 0,32 µA muncul pada konfigurasi 2 dan 3 sensor. Peningkatan hambatan total akibat susunan seri membatasi arus meskipun tegangan meningkat.

3. Konsistensi dan Respon Terhadap Tekanan

- Variasi antar pukulan menunjukkan bahwa output sensor sangat dipengaruhi oleh konsistensi kekuatan pukulan.Meski terjadi *fluktuasi*, tren umum tetap menunjukkan bahwa *konfigurasi* dengan jumlah sensor lebih banyak cenderung menghasilkan output lebih tinggi. Nilai *ekstrem* (baik tertinggi maupun terendah) umumnya muncul pada pukulan awal

atau tengah, kemungkinan karena faktor kelelahan mekanis atau perubahan gaya tekanan.

c. Rangkaian Paralel

Pengujian konfigurasi paralel dilakukan dengan jumlah sensor bervariasi dari 2 hingga 9 buah, menggunakan beban 100 kΩ dan tekanan mekanis sebanyak 10 kali. Tujuannya adalah untuk mengetahui karakteristik tegangan dan arus dari setiap jumlah sensor. Hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 5.3 untuk dianalisis lebih lanjut.

Tabel 5. 3 Data Hasil Pengujian Rangkaian Paralel

Jumlah *Piezoelektrik*	**Output**	**Pukulan**									
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
2	Tegangan (**V**)	0,42	0,24	0,3	0,25	0,11	0,2	0,54	**0,12**	0,613	**0,7**
	Arus (**µA**)	4,3	4,4	4,5	**3,5**	4,5	4,4	4,7	3,6	6,7	**7,2**
3	Tegangan (**V**)	0,51	0,81	**1,1**	0,8	0,87	0,7	0,62	0,41	**0,32**	0,62
	Arus (**µA**)	**5,7**	9	**9,6**	8,7	8,2	7	6,5	5,6	6,4	7,7
4	Tegangan (**V**)	**1,38**	1,22	0,63	0,798	0,58	1,11	**0,53**	0,59	0,97	0,97
	Arus (**µA**)	**18**	12	6,5	8,8	**6,4**	12,2	8,6	6,5	9	8,4
5	Tegangan (**V**)	1,73	1,49	1,7	1,63	**1,86**	1,33	1,49	1,26	**1,15**	1,85
	Arus (**µA**)	17,5	14,4	16,5	16,3	**18,3**	**13**	14,6	15,5	14,2	15,3
6	Tegangan (**V**)	**2,7**	2,41	2,6	2,24	2,22	2,21	2,16	2,64	2,65	**2,1**
	Arus (**µA**)	27,5	24,2	**27**	22,7	**22**	23,3	22,5	24,5	25,5	23,4
7	Tegangan (**V**)	3,35	**2,11**	10,1	5,93	3,5	10,5	8,16	5,12	11,5	**18,9**
	Arus (**µA**)	30,8	**21,4**	103	55,5	38,7	107	80,2	50,2	116	**188**
8	Tegangan (**V**)	7,14	8,9	**2,9**	**10,2**	3,3	5,64	3,39	5,82	9,7	7,27
	Arus (**µA**)	71	89,5	**34**	**114**	38	55	39	57,5	96,7	72
9	Tegangan (**V**)	10,2	12,1	9,67	10,4	11,3	13	9,45	7,43	**13,8**	**9,23**
	Arus (**µA**)	102	120	97,5	104	113	135,3	95,3	74,5	**141**	**92,6**

Pengujian sensor *piezoelektrik* dalam *konfigurasi* paralel menunjukkan bahwa nilai tegangan dan arus yang dihasilkan bergantung pada jumlah sensor yang digunakan serta besar tekanan mekanis yang diberikan. Untuk mencegah terjadinya hubungan singkat dan memastikan pengukuran arus yang stabil, rangkaian dilengkapi dengan resistor beban sebesar 100 kΩ. Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 5.3, secara umum terdapat kecenderungan peningkatan nilai tegangan dan arus seiring dengan bertambahnya jumlah sensor *piezoelektrik* yang dirangkai secara paralel. Meskipun demikian, pada beberapa konfigurasi jumlah sensor tertentu, terjadi *fluktuasi* atau penurunan nilai keluaran. Hal ini diduga disebabkan oleh ketidakteraturan dalam distribusi tekanan mekanis atau adanya perbedaan *sensitivitas* antar sensor yang digunakan

1. Pola Keluaran Tegangan

- Tegangan tidak meningkat secara *signifikan* meskipun jumlah sensor bertambah.
- Tegangan tertinggi adalah 10,64 V pada konfigurasi 9 sensor (pukulan ke-4) – ditandai hijau.
- Tegangan terendah tercatat 0,12 V pada *konfigurasi* 2 sensor (pukulan ke-8) – ditandai merah.
- Dalam rangkaian paralel, tegangan cenderung tetap karena setiap sensor bekerja pada tegangan yang sama, sehingga penambahan sensor tidak secara langsung meningkatkan tegangan secara *proporsional*.

2. Pola Keluaran Arus

- Arus meningkat *signifikan* seiring dengan penambahan jumlah sensor.
- Arus tertinggi tercatat 188,6 µA pada konfigurasi 7 sensor (pukulan ke-10).
- Arus terendah adalah 3,5 µA pada *konfigurasi* 2 sensor (pukulan ke-4).
- Ini sesuai dengan karakteristik dasar rangkaian paralel, di mana total arus adalah jumlah arus dari masing-masing cabang sensor.

Contoh:

- 2 sensor: arus rata-rata ~4 µA
- 5 sensor: arus meningkat ke ~15 µA
- 9 sensor: arus mencapai lebih dari 140 µA

3. Konsistensi dan Respons Sensor

- Nilai-nilai output bervariasi antar pukulan karena kekuatan tekanan yang tidak sepenuhnya seragam.
- Sensor *piezoelektrik* menunjukkan respons yang *fluktuatif* akibat *sensitivitas* tinggi terhadap *intensitas* gaya mekanik.
- Meskipun demikian, tren kenaikan arus dengan bertambahnya jumlah sensor tetap konsisten.

4. Perbandingan Tegangan vs Arus

- Tegangan**:** *Relatif* stabil dan tidak meningkat *drastis* → sesuai karakteristik paralel.
- Arus**:** Meningkat tajam dengan bertambahnya jumlah sensor → memperlihatkan *efisiensi* paralel dalam menyalurkan arus besar.

d. Rangkaian Seri-Paralel (Campuran)

Hasil analisis data pada Tabel 5.4 menunjukkan bahwa output tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik* bervariasi tergantung pada jumlah sensor yang digunakan dalam *konfigurasi* seri-paralel (campuran). Secara umum, penambahan jumlah sensor *piezoelektrik* dalam rangkaian menyebabkan peningkatan nilai tegangan dan arus keluaran.

Meskipun demikian, terdapat beberapa data yang menunjukkan penurunan output pada pukulan tertentu. Hal ini disebabkan oleh tingkat *sensitivitas* sensor *piezoelektrik* yang sangat bergantung pada kekuatan dan konsistensi tekanan mekanis yang diberikan. *Fluktuasi* data ini mencerminkan bahwa respons sensor dapat dipengaruhi oleh variasi gaya tumbukan, sehingga perlu dilakukan pengujian dengan tekanan yang lebih terkontrol untuk memperoleh hasil yang lebih konsisten. Berikut ini merupakan penjelasan rinci dari hasil pengujian sensor *piezoelektrik* dalam *konfigurasi* seri.

Tabel 5. 4 Data Hasil Pengujian Rangkaian Campuran

Rangkaian Campuran	Output	Pukulan									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	Tegangan (V)	0,57	0,28	**0,77**	0,4	**0,21**	0,39	0,35	0,35	0,4	0,26
	Arus (µA)	5,2	2,8	**7,9**	4,4	**2,1**	4,5	3,8	4,5	4,2	2,3
B	Tegangan (V)	**0,8**	0,71	0,29	**0,16**	0,35	0,2	0,28	0,18	0,3	0,32
	Arus (µA)	**7,8**	7,4	2,9	**2,5**	3,3	2,7	2,8	2,9	3,1	3,1
C	Tegangan (V)	**1,11**	1,68	1,22	**2,02**	1,98	1,65	1,58	1,52	1,76	1,39
	Arus (µA)	**11,9**	16,8	12,5	**20,8**	19,7	16,2	16	15	18	14,8
D	Tegangan (V)	3,33	3,63	3,5	2,77	3,19	**4,31**	2,54	3,19	2,98	**2,3**
	Arus (µA)	33,5	36	35,6	27,6	30	**41,6**	41,6	25	32,5	**22,5**
E	Tegangan (V)	7,02	**4,03**	7,15	6,19	6,34	4,36	**8,17**	4,52	6,19	7,41
	Arus (µA)	75,6	**41,3**	77,5	64,7	67,4	44	**80,4**	44,5	71,4	75,4

Pengujian sensor *piezoelektrik* dalam konfigurasi seri-paralel (campuran) dilakukan sebanyak lima kali, dengan masing-masing *konfigurasi* diberi kode rangkaian campuran A, B, C, D, dan E. Jumlah sensor yang digunakan dalam setiap rangkaian bervariasi, mulai dari tiga hingga lima buah sensor. Setiap rangkaian diberi tekanan mekanis sebanyak sepuluh kali dalam bentuk pukulan. Nilai tegangan dan arus yang dihasilkan bergantung pada jumlah sensor *piezoelektrik* yang digunakan serta besar tekanan mekanis yang diberikan.

➢ Rangkaian Campuran A

- Tegangan**:** Nilai tegangan berkisar antara 0,21 V (pukulan ke-5) hingga 0,77 V (pukulan ke-3). Terjadi fluktuasi yang cukup *signifikan* di antara setiap pukulan, menandakan kurangnya kestabilan keluaran tegangan.

- Arus**:** Arus maksimum tercatat 7,9 µA, sementara nilai terendah berada di 2,1 µA. Pola arus mengikuti kecenderungan tegangan, dengan nilai puncak dan minimum terjadi secara bersamaan.
- *Interpretasi***:** Rangkaian ini menghasilkan output yang *relatif* rendah baik dari sisi tegangan maupun arus. *Fluktuasi* tajam pada nilai output kemungkinan disebabkan oleh ketidakseimbangan distribusi tekanan antar sensor atau *konfigurasi* susunan sensor yang kurang optimal

➢ Rangkaian Campuran B

- Tegangan**:** Nilai tertinggi berada pada pukulan pertama sebesar 0,802 V, kemudian mengalami penurunan tajam pada pukulan ke-4 (0,165 V). Secara keseluruhan, rentang tegangan berkisar 0,165–0,802 V.
- Arus**:** Arus berada dalam rentang 2,5–7,8 µA, dengan nilai tertinggi juga tercatat pada pukulan pertama.
- *Interpretasi***:** Performa Rangkaian B sedikit lebih baik dari A di awal pengujian, namun mengalami penurunan *stabilitas* setelah beberapa kali tekanan. Ini menunjukkan bahwa mungkin terdapat kelemahan dalam ketahanan sensor terhadap tekanan berulang atau adanya ketidakseimbangan tekanan mekanis yang diterima setiap sensor.

➢ Rangkaian Campuran C

- Tegangan**:** Cenderung lebih stabil dan lebih tinggi dibanding A dan B, dengan nilai tertinggi 2,02 V dan nilai terendah 1,11 V.

- Arus**:** Menghasilkan arus yang cukup besar, berkisar 11,9–20,8 µA. Nilai arus maksimum tercatat pada pukulan ke-5, berbanding lurus dengan nilai tegangan.
- *Interpretasi***:** Rangkaian C menunjukkan kinerja yang cukup baik, dengan output listrik yang lebih tinggi dan *fluktuasi* yang lebih terkendali. Ini menandakan bahwa *konfigurasi* sensor pada rangkaian C mulai menunjukkan *efisiensi konversi* energi mekanis menjadi energi listrik.

➢ Rangkaian Campuran D

- Tegangan**:** Memiliki rentang yang lebih luas, dari 2,77 V (pukulan ke-4) hingga 3,65 V (pukulan ke-3). Tegangan rata-rata cenderung tinggi dan stabil.
- Arus**:** Arus berkisar 22,5 – 41,6 µA, dengan nilai tertinggi tercatat pada pukulan ke-6 dan ke-7. Nilai-nilai ini menandakan kestabilan output dan *efisiensi* tinggi**.**
- *Interpretasi***:** Rangkaian D menghasilkan output yang kuat dan konsisten, baik tegangan maupun arus. Hal ini mengindikasikan bahwa *konfigurasi* sensor dalam rangkaian ini sangat optimal untuk menangkap dan mengonversi tekanan mekanis menjadi energi listrik. Penurunan kecil pada pukulan ke-10 (22,5 µA) menunjukkan adanya potensi kelelahan sensor atau variasi tekanan yang perlu dikendalikan lebih lanjut

- Rangkaian Campuran E

  - Tegangan**:** Memiliki output tertinggi dibandingkan semua rangkaian lainnya, dengan nilai antara 4,03 V hingga 7,41 V. Puncak tegangan dicapai pada pukulan ke-10.
  - Arus**:** Arus yang dihasilkan sangat tinggi, mencapai 80,4 µA pada pukulan ke-7, dan tidak pernah turun di bawah 41,3 µA.
  - *Interpretasi***:** Rangkaian E adalah konfigurasi paling optimal dan *efisien*, dengan performa output listrik yang sangat tinggi dan stabil. Ini menunjukkan bahwa kombinasi susunan seri-paralel sensor *piezoelektrik* pada rangkaian E sangat ideal untuk aplikasi yang membutuhkan daya lebih besar. Performa tinggi ini juga menunjukkan bahwa tekanan mekanis dapat terdistribusi secara merata ke seluruh sensor.

B. Analisis Data

Pada hasil pengujian ada 3 parameter yang akan di analis yaitu : Tegangan dan Arus (Maksimum, Minimum, dan Rata-Rata) yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik*. Dimana setelah memperoleh tegangan dan arus yang dihasilkan kita dapat mengetahui berapa besar daya yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik* , dengan persamaan sebagai berikut :

$$P = V \times I$$

Ket : P → Daya (Watt)

V → Tegangan (Volt)

I → Arus (Ampere)

Rumus tersebut merepresentasikan persamaan dasar untuk menghitung besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh sensor piezoelektrik. Pada prinsipnya, nilai daya diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan (V) dan arus (I) yang dihasilkan sensor saat menerima tekanan atau getaran mekanis. Dengan menghitung daya, dapat diketahui seberapa besar energi listrik yang berhasil dikonversi dari energi mekanik oleh sensor piezoelektrik.

Selanjutnya, hasil perhitungan daya ini dianalisis secara lebih mendetail berdasarkan masing-masing konfigurasi rangkaian yang digunakan, baik dengan variasi nilai resistor beban maupun bentuk penyusunan komponennya. Analisis tidak hanya terbatas pada nilai sesaat, tetapi juga mencakup parameter penting seperti nilai maksimum, minimum, serta rata-rata dari tegangan, arus, dan daya yang terukur. Dengan demikian, perhitungan daya ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa sensor piezoelektrik, serta memungkinkan untuk mengevaluasi efektivitas rangkaian dalam memanfaatkan energi listrik yang dihasilkan.

1. Rangkaian Tunggal

Pengujian terhadap satu buah sensor *piezoelektrik* dilakukan dengan mengelompokkan hasil berdasarkan tiga parameter, yaitu nilai maksimum, minimum, dan rata-rata. Output daya listrik yang dihasilkan oleh sensor tersebut disajikan dalam Tabel 5.5.

Tabel 5. 5 Data Daya Rangkaian Tunggal

Resistor Beban	**Parameter**	**Output**		**Daya (µW)**
		Tegangan (V)	**Arus (µA)**	
1 MΩ	Maksimum	0,42	0,3	0,126
	Minimum	0,022	0,03	0,00066
	Rata-rata	0,15	0,16	0,024
100 kΩ	Maksimum	0,74	7	5,18
	Minimum	0,089	0,8	0,071
	Rata-rata	0,34	3,4	1,156
4,7 kΩ	Maksimum	1,01	219,6	221,79
	Minimum	0,87	184,1	160,16
	Rata-rata	0,93	199,2	185,25
680 Ω	Maksimum	1,12	1.710	1.915,2
	Minimum	1,01	1.490	1.504,9
	Rata-rata	1,06	1.590	1.685,4
330 Ω	Maksimum	1,69	5.090	8.602,1
	Minimum	1,14	3.420	3.878,28
	Rata-rata	1,38	4.220	5.823,6

Terlihat pada tabel diatas bahwa beban resistor mempengaruhi tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik*, semakin besar beban resistor yang diberikan maka semakin kecil tegangan dan arus yang dihasilkan oleh

sensor piezoelektrik begitupun sebaliknya ini membuktikan kebenaran hukum ohm. Dimana terlihat daya tertinggi terjadi ketika beban resistor 330 Ω yaitu 8.602,1 µW dan yang terendah terjadi ketika beban resistor 1 MΩ yaitu 0,00066 µW.

2. Rangkaian Seri

Parameter pengujian pertama dihitung dengan mengalikan nilai tegangan maksimum dan arus maksimum menggunakan rumus daya listrik. Hasil perhitungan daya tersebut kemudian disajikan pada Tabel 5.6 sebagai acuan untuk menganalisis kinerja masing-masing konfigurasi sensor *piezoelektrik*.

Tabel. 5.6. Data Daya Rangkaian Seri

Jumlah Piezoelektrik	Output								
	Maksimum			Minimum			Rata-Rata		
	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)
2	0,81	8,6	6,96	0,25	3,2	0,8	0,45	4,59	2,06
3	0,619	8,7	**5,38**	0,2	3,2	**0,64**	0,34	5,64	**1,91**
4	1,21	15	18,15	0,259	4,7	1,38	0,53	7,48	3,96
5	1,25	9,6	12	0,56	7,6	4,25	0,78	8,8	6,86
6	1,64	13,2	21,64	0,69	8,2	5,65	1,017	9,77	9,93
7	12,27	120,5	1.478,53	3,06	32,7	100,06	6,43	63,48	408,17
8	16,27	167,2	2.720,34	5,03	51,3	258,03	8,58	84,99	729,21
9	19,59	191,6	**3.753,44**	12,02	123,2	**1.480,8**	15,26	157,5	**2.404,2**

Berdasarkan hasil pengujian, jumlah piezoelektrik yang digunakan berpengaruh langsung terhadap besarnya tegangan, arus, dan daya keluaran. Secara umum, semakin banyak jumlah piezo yang dipasang, maka tegangan, arus, serta daya yang dihasilkan mengalami peningkatan signifikan. Tegangan maksimum meningkat dari 0,81 V pada konfigurasi 2 piezo hingga mencapai

19,59 V pada 9 piezo, sedangkan nilai rata-ratanya naik dari 0,45 V menjadi 15,26 V.

Arus juga menunjukkan pola serupa, di mana arus maksimum bertambah dari 8,6 µA menjadi 191,6 µA, dan rata-rata arus naik dari 4,59 µA menjadi 157,5 µA. Peningkatan paling mencolok terlihat pada daya, terutama setelah penggunaan lebih dari 6 piezo. Jika pada konfigurasi 2 hingga 3 piezo daya rata-rata hanya berkisar 1–2 µW, maka pada konfigurasi 7 piezo daya yang dihasilkan sudah mencapai lebih dari 1.400 µW, dan melonjak hingga sekitar 2.400 µW pada 9 piezo.

Meskipun demikian, terdapat anomali pada konfigurasi 3 piezo, di mana daya rata-rata justru menurun dibandingkan penggunaan 2 piezo. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh distribusi tekanan yang tidak merata, adanya resistansi internal, atau sambungan rangkaian yang kurang optimal. Namun, secara keseluruhan hasil pengujian memperlihatkan bahwa semakin banyak jumlah *piezoelektrik* yang digunakan, keluaran energi tidak hanya meningkat secara drastis tetapi juga lebih stabil. Nilai minimum pada 9 piezo pun tetap jauh lebih tinggi dibandingkan rata-rata keluaran pada jumlah kecil, yang menunjukkan konsistensi energi yang dihasilkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan jumlah piezoelektrik yang lebih banyak sangat potensial untuk menghasilkan energi listrik dalam skala kecil secara lebih efektif dan stabil.

3. Rangkaian Paralel

Parameter pengujian pertama dihitung dengan mengalikan nilai tegangan maksimum dan arus maksimum menggunakan rumus daya listrik. Hasil perhitungan daya tersebut kemudian disajikan pada Tabel 5.7 sebagai acuan untuk menganalisis kinerja masing-masing konfigurasi sensor *piezoelektrik.*

Tabel 5.7. Data Daya Rangkaian Paralel

Jumlah Piezoelektrik	Output								
	Maksimum			Minimum			Rata-Rata		
	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)
2	0,79	7,2	**5,68**	0,12	3,5	**0,42**	0,45	4,78	**2,5**
3	1,19	9,6	11,42	0,32	5,7	1,82	0,68	7,44	5,05
4	1,38	18	24,48	0,53	6,4	3,39	0,87	9,64	8,38
5	1,86	18,3	34,03	1,15	13,5	15,52	1,55	15,61	24,19
6	2,76	27,8	76,72	2,14	22	47,08	2,41	24,34	58,65
7	18,98	188,6	**3.579,6**	2,11	21,4	45,15	7,93	79,3	628,84
8	10,2	114	1.162,8	2,94	34,5	101,4	6,45	66,72	430,34
9	13,83	141	1.950	9,23	92,6	**854,69**	10,67	107,61	**1.148,19**

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada tabel, dapat dilihat bahwa jumlah piezoelektrik yang digunakan berpengaruh signifikan terhadap besarnya tegangan, arus, dan daya keluaran. Pada kondisi maksimum, tegangan meningkat dari 0,79 V dengan 2 piezoelektrik hingga mencapai 18,98 V pada konfigurasi 7 piezoelektrik, sebelum kemudian menurun pada jumlah piezo berikutnya. Arus maksimum juga menunjukkan pola serupa, dengan nilai tertinggi sebesar 188,6 µA pada 7 piezoelektrik. Hal ini berimplikasi pada daya maksimum yang dicapai, di mana keluaran tertinggi sebesar 3.579,6 µW diperoleh pada konfigurasi 7 piezoelektrik. Dengan demikian, jumlah piezoelektrik yang paling optimal untuk menghasilkan daya puncak adalah 7 buah.

Pada kondisi minimum, nilai tegangan, arus, dan daya cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah piezoelektrik. Tegangan minimum meningkat dari 0,12 V pada 2 piezoelektrik menjadi 9,23 V pada 9 piezoelektrik, sedangkan arus minimum naik dari 3,5 µA menjadi 92,6 µA. Peningkatan ini berdampak pada daya minimum yang juga meningkat secara signifikan dari 0,42 µW hingga 854,69 µW. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi dengan jumlah piezoelektrik yang lebih banyak mampu memberikan keluaran yang lebih stabil meskipun tidak selalu mencapai daya puncak.

Jika ditinjau dari nilai rata-rata, tegangan, arus, dan daya menunjukkan tren yang konsisten meningkat seiring bertambahnya jumlah piezoelektrik. Tegangan rata-rata naik dari 0,45 V pada 2 piezoelektrik menjadi 10,67 V pada 9 piezoelektrik, sementara arus rata-rata bertambah dari 4,78 µA menjadi 107,61 µA. Daya rata-rata juga meningkat dari 2,5 µW hingga 1.148,19 µW pada konfigurasi 9 piezoelektrik. Dengan demikian, meskipun daya maksimum tertinggi diperoleh pada 7 piezoelektrik, rata-rata daya keluaran terbesar justru dihasilkan oleh konfigurasi 9 piezoelektrik yang lebih stabil.

Secara keseluruhan, semakin banyak jumlah piezoelektrik yang digunakan maka semakin besar pula energi listrik yang dapat dihasilkan. Namun, terdapat perbedaan karakteristik antara keluaran maksimum dan rata-rata, di mana jumlah optimal untuk menghasilkan daya puncak adalah 7 piezoelektrik, sedangkan jumlah optimal untuk menghasilkan daya rata-rata yang lebih stabil adalah 9 piezoelektrik.

4. Rangkaian Seri-Paralel (Campuran)

Pada konfigurasi *rangkaian campuran, terdapat tiga parameter yang dianalisis, yaitu output maksimum, minimum, dan rata-rata. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jumlah sensor* piezoelektrik *berpengaruh terhadap besarnya output tegangan dan arus yang dihasilkan. Semakin banyak jumlah* piezoelektrik *yang disusun dalam rangkaian, maka semakin besar pula tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sensor* piezoelektrik. Hasil perhitungan daya tersebut kemudian disajikan pada Tabel 5.8 sebagai acuan untuk menganalisis kinerja masing-masing konfigurasi sensor *piezoelektrik*.

Tabel 5.8. Data Daya Rangkaian Campuran

Rangkaian Campuran	**Output**								
	Maksimum			**Minimum**			**Rata-Rata**		
	Tegangan (V)	**Arus (µA)**	**Daya (µW)**	**Tegangan (V)**	**Arus (µA)**	**Daya (µW)**	**Tegangan (V)**	**Arus (µA)**	**Daya (µW)**
A	0,77	7,9	**6,08**	0,21	2,1	0,44	0,39	4,17	1,62
B	0,8	7,8	6,25	0,16	2,5	**0,41**	0,36	3,85	**1,38**
C	2,02	20,8	42,01	1,11	11,9	13,2	1,59	16,17	25,71
D	4,32	41,6	179,71	2,3	22,5	51,75	3,17	31,39	99,5
E	8,17	80,4	**656,86**	4,03	41,3	**166,43**	6,13	61,22	**375,27**

Berdasarkan pengujian lima konfigurasi rangkaian campuran *piezoelektrik*, terlihat perbedaan signifikan pada keluaran daya. Rangkaian A dan B hanya menghasilkan daya maksimum sekitar 6 µW dengan rata-rata rendah dan tidak stabil. Peningkatan terjadi pada rangkaian C dengan daya maksimum 42,01 µW dan rata-rata 25,71 µW, lalu meningkat lebih jauh pada rangkaian D yang mencapai 179,71 µW dengan rata-rata 99,5 µW. Rangkaian E menjadi yang paling optimal dengan daya maksimum 656,86 µW, minimum 166,43 µW, dan

rata-rata 375,27 µW. Secara keseluruhan, semakin kompleks konfigurasi rangkaian, semakin besar dan stabil daya yang dihasilkan, dengan rangkaian E sebagai pilihan paling efisien.

Tabel 5. 9. Data Daya Listrik yang dihasilkan *Piezoelektrik*

No	Jenis Rangkaian	Parameter	Daya (µA)	
1	**Rangkain Seri**	Maksimum	Tertinggi	**3.753,44**
			Terendah	**5,38**
			Rata-rata	**1.002,05**
		Minimum	Tertinggi	**1.480,86**
			Terendah	**0,64**
			Rata-rata	**231,45**
		Rata-Rata	Tertinggi	**2.404,21**
			Terendah	**1,91**
			Rata-rata	**445,78**
2	**Rangkaian Paralel**	Maksimum	Tertinggi	**3.579,62**
			Terendah	**5,68**
			Rata-rata	**730,64**
		Minimum	Tertinggi	**854,69**
			Terendah	**0,42**
			Rata-rata	**133,68**
		Rata-Rata	Tertinggi	**1.148,19**
			Terendah	**2,5**
			Rata-rata	**288,26**
3	**Rangkaian Campuran**	Maksimum	Tertinggi	**656,86**
			Terendah	**6,08**
			Rata-rata	**178,18**
		Minimum	Tertinggi	**166,43**
			Terendah	**0,41**
			Rata-rata	**46,44**
		Rata-Rata	Tertinggi	**375,27**
			Terendah	**1,38**
			Rata-rata	**100,69**

Berdasarkan hasil pengujian, rangkaian seri menghasilkan daya listrik tertinggi dengan nilai maksimum 3.753,44 µW dan daya minimum tertinggi 1.480,86 µW, meskipun kestabilannya kurang karena rentang variasi dayanya besar. Rangkaian paralel menunjukkan performa paling stabil dengan rata-rata daya tertinggi 1.148,19 µW dan daya maksimum 3.579,62 µW, sehingga lebih efisien pada berbagai kondisi tekanan. Sementara itu, rangkaian campuran memiliki performa terendah dengan daya maksimum hanya 656,86 µW dan rata-rata 100,69 µW. Dengan demikian, rangkaian seri cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya besar, sedangkan rangkaian paralel lebih sesuai untuk kondisi yang menuntut kestabilan, sementara rangkaian campuran hanya layak digunakan pada aplikasi sederhana.

5.2 Pengujian Pemecahan Masalah

A. Evaluasi Terhadap Rumusan Masalah

Evaluasi terhadap rumusan masalah terkait Studi *Eksperimental* Perbandingan Energi Keluaran Rangkaian *Piezoelektrik* Seri, Paralel, dan Kombinasi dalam Merespon *Eksitasi* Getaran dilakukan dengan menguji solusi yang telah dirancang. Rumusan masalah yang diangkat adalah "Seberapa besar tegangan, arus dan daya yang dihasilkan oleh sensor *piezoelektrik* dengan berbagai kombinasi rangkaian (seri, paralel, dan campuran)?". Solusi yang diuji melibatkan penggunaan sensor *piezoelektrik* yang diberikan tekanan berupa pukulan sebanyak 10 kali secara konsisten. Metode pengujian dilakukan dengan menguji 1 buah *piezoelektrik* (rangkaian tunggal), rangkaian seri dan paralel dari 2 hingga 9 buah *piezoelektrik*, dan

rangkaian campuran 3 hingga 5 *piezoelektrik* yang diberi kode nama rangkaian campuran A,B,C,D, dan E yang diberi beban berupa resistor 100 kΩ lalu keluarannya di ukur lamgsung menggunakan multimeter, hasilnya akan di analisis dengan persamaan rumus daya listrik sehingga dapat diketahui besaran energi yang dihasilkan. Adapun beberapa masalah yang didapat pada saat pengujian yaitu terjadi keretakan pada cakram sensor *piezoelektrik* dan putusnya kabel penghubung yang dipengaruhi oleh tekanan pukulan pada rangkaian.

B. Evaluasi *Efektivitas* Solusi:

Keberhasilan dari pengujian sistem menunjukkan bahwa sensor mampu menghasilkan tegangan dan arus walaupun sangan rendah. Selain itu terlihat pada pengujian bahwa tegangan dan arus naik seiring bertambahnya jumlah *piezoelektrik* walaupun ada data yang tidak konsisten naik karena dipengaruhi oleh pukulan yang mungkin menyebabkan getaran tidak konsisten pada sensor *piezoelektrik*. Pada pengujian rangkaian tunggal juga terlihat bahwa tegangan dan arus berbanding lurus dan berbanding terbalik dengan tahanannya yang membuktikan kebenaran hukum ohm dimana ketika beban yang diberikan pada rangkaian besar maka tegangan dan arus akan menurun begitu pula sebaliknya jika beban yang diberikan keci maka tegangan dan arus akan meningkat

Penutup

6.1.Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian berjudul *Studi Eksperimental Perbandingan Energi Keluaran Rangkaian Piezoelektrik Seri, Paralel, dan Kombinasi dalam Merespon Eksitasi Getaran*, dapat disimpulkan bahwa :

Pengujian dilakukan dengan memberikan eksitasi mekanis berupa tekanan manual sebanyak sepuluh kali pada setiap konfigurasi rangkaian. Tegangan dan arus keluaran diukur menggunakan multimeter digital, kemudian dihitung dayanya dengan persamaan $P=V\times I$. Empat konfigurasi rangkaian dengan beban resistor 100 kΩ diuji, yaitu tunggal, seri, paralel, dan seri-paralel (campuran). Rangkaian tunggal menggunakan satu sensor dengan variasi resistor, konfigurasi seri dan paralel terdiri atas dua hingga sembilan sensor, sedangkan konfigurasi campuran terdiri atas tiga hingga lima sensor dengan lima variasi (A–E). Karena keluaran sensor tidak stabil, analisis dilakukan terhadap nilai maksimum, minimum, dan rata-rata. Hasil menunjukkan bahwa jumlah dan konfigurasi sensor berpengaruh signifikan terhadap tegangan, arus, dan daya. Konfigurasi seri menghasilkan daya tertinggi sebesar 3.753,44 µW, diikuti paralel 3.579,62 µW, campuran 100,69 µW, dan tunggal 5,8 µW. Dengan demikian, konfigurasi seri lebih efektif menghasilkan daya dibandingkan konfigurasi lainnya. Meskipun daya yang dihasilkan relatif kecil, hasil ini membuktikan bahwa sensor piezoelektrik mampu menghasilkan energi listrik dari eksitasi mekanis.

6.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang dapat dijadikan sebagai saran untuk penyempurnaan dan pengembangan penelitian serupa di masa yang akan datang.

1. Penggunaan Rangkaian Penyearah dan Penyimpanan Energi

   Salah satu kendala penelitian ini adalah rendahnya daya dan bentuk tegangan output yang tidak stabil akibat sifat alami sensor piezoelektrik yang menghasilkan arus AC. Oleh karena itu, pada penelitian selanjutnya disarankan penggunaan rangkaian penyearah, seperti penyearah gelombang penuh atau Schottky, untuk mengubah output menjadi arus DC yang lebih stabil. Energi tersebut dapat disalurkan ke media penyimpan seperti kapasitor, superkapasitor, atau baterai guna menampung akumulasi energi.

2. Mekanisme Getaran yang Konsisten dan Terkontrol

   Tekanan manual pada penelitian ini menyebabkan variasi hasil karena intensitasnya tidak seragam. Untuk meningkatkan akurasi, penelitian selanjutnya perlu menggunakan mekanisme eksitasi terkontrol, misalnya motor penggetar, shaker table, atau sistem elektromagnetik, yang mampu menghasilkan frekuensi dan amplitudo getaran secara konstan.

3. Penambahan Sensor dan Optimalisasi Konfigurasi

   Penelitian ini hanya menggunakan sembilan sensor pada konfigurasi seri dan paralel serta lima sensor pada konfigurasi campuran. Penelitian lanjutan

disarankan menambah jumlah sensor dan mengoptimalkan kombinasi konfigurasi, misalnya 3 seri × 3 paralel, agar daya dan energi yang dihasilkan lebih besar. Simulasi menggunakan perangkat lunak seperti LTspice atau Proteus juga dapat membantu merancang konfigurasi sebelum diuji secara fisik.

4. Karakterisasi Output Sensor

   Disarankan dilakukan karakterisasi output sensor secara lebih mendalam, antara lain dengan pengamatan bentuk gelombang menggunakan osiloskop, respons terhadap berbagai frekuensi getaran, serta pengukuran efisiensi konversi energi mekanik ke energi listrik.

5. Aplikasi pada Sistem Nyata

   Untuk mendukung implementasi praktis, sensor piezoelektrik perlu diuji pada sumber getaran nyata, seperti lantai pejalan kaki, sepatu pintar, alat berat, atau kendaraan. Integrasi sensor pada sistem monitoring energi mikro juga dapat menjadi langkah awal menuju pengembangan perangkat mandiri berbasis energi terbarukan.Dengan mempertimbangkan saran-saran di atas, diharapkan penelitian mengenai sensor *piezoelektrik* dapat dikembangkan lebih lanjut dan memberikan kontribusi yang lebih besar dalam bidang energi terbarukan, sistem monitoring, dan *Internet of Things* (*IoT*) berbasis energi mikro.

DAFTAR PUSTAKA

Ade, R. H. (2020). Prototipe pemanfaatan piezoelektrik pada pijakan kaki manusia sebagai sumber energi listrik alternatif.

Aritonang, S., & Murniati, R. (2024). MATERIAL PERTAHANAN. *CV. AKSARA GLOBAL AKADEMIA*.

Ashara, S. M. (2023). *Rancang Bangun Prototype Karpet Penghasil Energi Listrik Berbasis Piezoelektrik* (Doctoral dissertation, Politeknik Pelayaran Surabaya).

Ashari, M. (2021). *Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Speed Bump (Polisi Tidur) Sebagai Energi Alternatif Menggunakan Sensor Piezoeletrik* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Lamongan).

Diniardi, E., Syawaluddin, S., Ramadhan, A. I., Fithriyah, N. H., & Dermawan, E. (2018). Analisis Daya Piezoelektrik Model Hybrid Solar Cell-Piezoelectric Skala Rendah. *Jurnal Teknologi*, *10*(2), 139-146.

Fuadi, Z., & Rahmadiawan, D. (2023). *Tribologi Pelumasan: Pelumas Terbarukan*. Syiah Kuala University Press.

Fitriani, F., Fadillah, M. S., & Christian, J. (2023). SPEEDBUMP PIEZOELEKTRIK SEBAGAI ENERGI LISTRIK ALTERNATIF (STUDI KASUS GERBANG KAMPUS UBT). *Elektrika Borneo*, *9*(2).

Gusty, S. (Ed.). (2023). *Pengantar Fisika Material Metal, Ceramic, Polymer, Composite*. Tohar Media.

Harahap, M. D., & Su'aidy, K. I. (2024). *Smart and Low Power Inverter (SMALLER)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).

Hasibuan, J. A., Ekaputri, C., & Sasmono, S. (2021). Perancangan Prototipe Konversi Energi Suara Menjadi Energi Listrik Dengan Bahan Piezoelektrik Memanfaatkan Energi Tekanan Tambahan Yang Berasal Dari Angin Untuk Kawasan Industri. *eProceedings of Engineering*, *8*(5).

Hasid, H. Z., Se, S. U., Akhmad Noor, S. E., Se, M., & Kurniawan, E. (2022). *Ekonomi sumber daya alam dalam lensa pembangunan ekonomi*. Cipta Media Nusantara.

Maladi, I. (2019). *Pembuatan bioplastik berbahan dasar pati kulit singkong (Manihot utilissima) dengan penguat selulosa jerami padi, polivinil alkohol dan bio-compatible zink oksida* (Bachelor's thesis, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta).

Marasoki, D. (2024). *Teknik Piezoelectric Footstep pada Pembangkit Listrik untuk Pengisian Daya dengan Rfid* (Doctoral dissertation, Universitas Medan Area).

Muliawan, A., Satria, E., Taba, H. H. T., Siregar, J., Yani, A., Nugraha, A. S. A., & Widyastuti, H. (2021). *Fisika Terapan*. Zahir Publishing.

Nuryadin, B. W. (2020). Pengantar Fisika Nanomaterial: Teori dan Aplikasi.

Parung, J., Larissa, S., Santoso, A., & Prayogo, D. N. (2021). Penggunaan Teknologi Blokchain, Internet Of Things Dan Artifial Intelligence Untuk Mendukung Kota Cerdas. Studi Kasus: Supply Chain Industri Perikanan.

Putra, D. R., Oktoricoento, J. S., Sahrudin, S., Mujirudin, M., Ramza, H., Heriyani, O., & Maddu, A. (2018). Energi alternatif melalui getaran beban mekanis. In *Seminar Nasional TEKNOKA Ke-3* (Vol. 3, pp. 8-17

Putra, I. D. G. A. T., Septiadi, W. N., Negara, D. N. K. P., & Nindhia, T. G. T. (2024). *Atomisasi Ultrasonik Prinsip-prinsip dan Aplikasinya dalam Engineering*. MEGA PRESS NUSANTARA.

Rahman, A., & Noviyanti, A. (2020). PENGARUH PARAMETER SENTRIFUGASI PADA RENDEMEN MINYAK KELAPA DARA (VIRGIN COCONUT OIL) DAN INDEKS BIASNYA. *PROSIDING*, 190.

Sakti, S. P. (2017). *Pengantar Teknologi Sensor: Prinsip Dasar Sensor Besaran Mekanik*. Universitas Brawijaya Press.

Santoso, D. R. (2017). *Pengukuran Stress Mekanik Berbasis Sensor Piezoelektrik: Prinsip Desain dan implementasi*. Universitas Brawijaya Press.

Setyaningseh, R. E. (2022). *Pemetaan Korosifitas Atmosfer Menggunakan Logam Uji Fe, Cu, Dan Cr Pada Wilayah Kota Surabaya* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

Sidik, S. (2023). *Jejak Karbon Akibat Kendaraan bermotor dan Konsumsi Listrik di kota Banda Aceh* (Doctoral dissertation, UIN Ar-Raniry Banda Aceh).

Talantan, D. Y. P. (2024). *Desain Dan Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Getar Turbin* (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri ujung Pandang).

Taqwa, K. Z., & Dwiyantoro, B. A. (2015). Studi eksperimental pengaruh intensitas cahaya terhadap performa dssc (dye sensitized solar cell) dengan ekstrak buah dan sayur sebagai dye sensitizer. *vol*, *4*, 103.

Telaumbanua, M. (2021). *Buku ajar pengantar teknologi instrumentasi teknik pertanian*. Penerbit NEM.

Wardiyanto, W. (2021). ANALISIS PEMANFAATAN PIEZOELEKTRIK SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK ALTERNATIF BERBASIS PIJAKAN KAKI. *MOSFET*, x(x), xx-xx.

Wibowo, A. (2023). Internet of Things (IoT) dalam Ekonomi dan Bisnis Digital. *Penerbit Yayasan Prima Agus Teknik*, 1-94.

Widiawati, I., Resmana, R., & Novita, S. (2022). *Gerakan Janin dan Desain Metode Pemantauan Berbasis Ni fECG*. Penerbit NEM.

Yuliatmo, R., & Udkhiyati, M. (2020). Aplikasi enzim bakteri pada penyamakan kulit: Review dalam pengolahan kulit mutakhir. *Semin. Nas. Teknol. Ind. Hijau*, *3*, 184-190.

Zarkasyi, M. (2024). *Perancangan Trainer Dan Modul Internet Of Things (IOT) Pada Mata Kuliah Praktikum Sensor Dan Tranduser* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry).