

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai Energy Harvesting menggunakan sensor piezoelektrik telah banyak dilakukan sebagai upaya pengembangan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan dapat dimanfaatkan pada perangkat elektronik berdaya rendah. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa energi mekanik dari aktivitas manusia, khususnya langkah kaki, memiliki potensi untuk dikonversi menjadi energi listrik menggunakan material piezoelektrik. Namun, setiap penelitian memiliki fokus, metode, dan hasil yang berbeda-beda sesuai dengan tujuan pengembangannya.

Penelitian yang dilakukan oleh Tirta dan Gerhana (2025) membahas sistem pembangkit listrik berbasis piezoelektrik yang diintegrasikan dengan ESP32 dan platform Blynk untuk monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT). Penelitian tersebut menguji beberapa konfigurasi piezoelektrik, yaitu seri-seri, paralel-seri, seri-paralel, dan paralel-paralel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi paralel-paralel menghasilkan performa terbaik dengan arus dan tegangan yang lebih tinggi dibanding konfigurasi lainnya. Selain itu, metode tekanan berupa lompatan menghasilkan daya keluaran yang lebih besar dibandingkan berjalan biasa. Penelitian lain oleh Yusran et al. (2025) menganalisis pengaruh konfigurasi piezoelektrik dan modifikasi material terhadap efisiensi konversi energi listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi seri menghasilkan tegangan tertinggi, sedangkan konfigurasi paralel menghasilkan arus yang lebih besar. Modifikasi material menggunakan *foam tape* dan lilin lem juga terbukti meningkatkan efisiensi keluaran daya piezoelektrik.

Selanjutnya, penelitian oleh Mowaviq et al. (2018) menjelaskan bahwa besar tekanan pada sensor piezoelektrik sangat mempengaruhi energi listrik yang dihasilkan. Semakin besar tekanan yang diberikan, maka semakin besar pula energi listrik yang dihasilkan. Untuk meningkatkan daya keluaran, sensor piezoelektrik dirangkai secara paralel dan dihubungkan dengan rangkaian penyearah agar energi

listrik dapat disimpan ke dalam baterai. Penelitian oleh Kusnandar; et al. (2021) mengembangkan purwarupa lantai piezoelektrik menggunakan 16 sensor piezoelektrik yang disusun paralel serta dilengkapi modul LTC358 dan MT3608 untuk proses *energy harvesting* dan pengaturan tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa energi listrik berhasil disimpan ke dalam baterai dengan daya maksimum mencapai 3,48 W setelah melalui penyearah gelombang penuh.

Sementara itu, penelitian oleh Naufal et al. (2026) memanfaatkan tekanan langkah kaki untuk menghasilkan energi listrik yang digunakan pada beban daya rendah seperti lampu LED. Sistem yang dikembangkan menggunakan rangkaian *bridge rectifier* untuk mengubah arus AC dari piezoelektrik menjadi arus DC sebelum disimpan pada kapasitor dan digunakan sebagai sumber daya. Penelitian lain oleh Tasso et al. (2022) menerapkan teknologi piezoelektrik pada trotoar sebagai sumber energi alternatif sekaligus media edukasi energi hijau di area publik. Sistem tersebut bekerja dengan memanfaatkan tekanan langkah kaki pejalan kaki yang dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sensor piezoelektrik yang dipasang pada pijakan lantai.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, sebagian besar penelitian masih berfokus pada konfigurasi sensor piezoelektrik, peningkatan daya keluaran, dan proses penyimpanan energi. Oleh karena itu, proyek akhir ini melakukan pengembangan dengan menganalisis perbandingan konfigurasi seri dan paralel pada sensor piezoelektrik serta pengaruh aktivitas berjalan ditempat dan melompat terhadap tegangan dan arus yang dihasilkan. Selain itu, proyek akhir ini juga menerapkan sistem penyimpanan energi ke baterai yang dilengkapi monitoring persentase baterai menggunakan INA219 dan tampilan LCD sebagai monitoring pendukung. Dengan demikian, proyek akhir ini diharapkan dapat menghasilkan sistem *energy harvesting* berbasis piezoelektrik yang lebih efektif dalam proses penyimpanan dan pemanfaatan energi listrik skala kecil mampu menghasilkan sistem pemanen energi yang tidak hanya efisien dalam konversi, tetapi juga andal dalam manajemen dan penyimpanan daya.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian	Tujuan & Objek	Metode / Teknologi	Hasil
Tirta dan Gerhana (2025)	Merancang sistem pembangkit listrik berbasis piezoelektrik dengan monitoring berbasis Internet of Things (IoT).	ESP32, Blynk, konfigurasi seri-seri, paralel-seri, seri-paralel, dan paralel-paralel.	Konfigurasi paralel-paralel menghasilkan tegangan dan arus tertinggi. Aktivitas lompatan menghasilkan daya lebih besar dibandingkan berjalan.
Yusran et al. (2025)	Menganalisis pengaruh konfigurasi dan modifikasi material piezoelektrik terhadap keluaran listrik.	Konfigurasi seri dan paralel dengan modifikasi material menggunakan foam tape dan lilin lem.	Konfigurasi seri menghasilkan tegangan tertinggi, sedangkan konfigurasi paralel menghasilkan arus terbesar. Modifikasi material meningkatkan efisiensi keluaran.
Mowaviq et al. (2018)	Menganalisis pengaruh tekanan terhadap energi listrik yang dihasilkan sensor piezoelektrik.	Sensor piezoelektrik disusun paralel dan dihubungkan ke rangkaian penyearah.	Semakin besar tekanan yang diberikan, semakin besar energi listrik yang dihasilkan dan dapat disimpan pada baterai.
Kusnandar et al. (2021)	Mengembangkan purwarupa lantai piezoelektrik sebagai sistem <i>energy harvesting</i> .	16 sensor piezoelektrik, IC LTC3588-1, dan modul MT3608.	Energi listrik berhasil disimpan pada baterai dengan daya maksimum 3,48 W setelah melalui penyearah gelombang penuh.
Naufal et al. (2026)	Memanfaatkan energi langkah kaki sebagai sumber daya untuk beban berdaya rendah.	Bridge rectifier, kapasitor, dan sensor piezoelektrik.	Energi listrik hasil langkah kaki mampu dimanfaatkan sebagai sumber daya untuk beban seperti lampu LED.
Tasso et al. (2022)	Menerapkan piezoelektrik pada trotoar sebagai sumber energi alternatif di ruang publik.	Sensor piezoelektrik pada lantai trotoar (<i>piezoelectric pavement</i>).	Tekanan langkah kaki berhasil dikonversi menjadi energi listrik sekaligus menjadi media edukasi energi hijau.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 *Energy Harvesting*

Energy Harvesting merupakan teknologi yang berkembang pesat dalam bidang konversi energi dan menjadi salah satu solusi untuk mendukung kebutuhan sistem elektronik mandiri dan berkelanjutan. Energy Harvesting adalah teknologi yang memanfaatkan energi dari lingkungan sekitar, baik yang berasal dari sumber alami maupun aktivitas manusia, kemudian mengubahnya menjadi energi listrik yang dapat digunakan kembali. Sumber energi tersebut dapat berupa cahaya matahari, getaran, tekanan mekanik, panas, suara, maupun gelombang elektromagnetik Mimi Tam (2025). Teknologi ini mampu mengurangi ketergantungan terhadap baterai konvensional dan sumber daya eksternal sehingga sangat cocok diterapkan pada perangkat elektronik berdaya rendah seperti sensor nirkabel, perangkat wearable, sistem Internet of Things (IoT), dan perangkat monitoring mandiri.

Selain itu, teknologi energy harvesting juga memberikan keuntungan dalam meningkatkan efisiensi energi dan mendukung pengembangan teknologi ramah lingkungan karena energi yang dimanfaatkan berasal dari aktivitas atau kondisi yang sebelumnya tidak digunakan. Dalam penerapannya, salah satu metode energy harvesting yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan energi mekanik menggunakan sensor piezoelektrik. Sensor piezoelektrik mampu mengubah tekanan atau getaran mekanik menjadi energi listrik melalui efek piezoelektrik langsung. Pada proyek akhir ini, sumber energi mekanik yang dimanfaatkan berasal dari tekanan langkah kaki manusia yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik untuk disimpan dan digunakan kembali pada sistem elektronik berdaya rendah.

Selain mampu mengurangi ketergantungan terhadap baterai konvensional, teknologi *energy harvesting* juga dinilai efektif dalam mendukung pengembangan perangkat elektronik mandiri dengan konsumsi daya rendah. Pada sistem berbasis sensor nirkabel dan Internet of Things (IoT), teknologi ini banyak dikembangkan karena mampu memanfaatkan energi lingkungan seperti getaran, tekanan mekanik, dan panas sebagai sumber daya alternatif. Pemanfaatan energi dari lingkungan

tersebut memungkinkan perangkat tetap beroperasi dalam jangka waktu yang lebih lama tanpa penggantian sumber daya secara berkala Shaikh dan Zeadally (2016).

Salah satu metode energy harvesting yang banyak dikembangkan adalah penggunaan material piezoelektrik. Material piezoelektrik mampu menghasilkan energi listrik ketika menerima tekanan atau getaran mekanik melalui efek piezoelektrik langsung. Karakteristik tersebut membuat piezoelektrik banyak diterapkan pada sistem monitoring mandiri, sensor nirkabel, dan perangkat elektronik berdaya rendah karena memiliki ukuran yang relatif kecil, struktur sederhana, serta mampu menghasilkan tegangan listrik secara langsung Izadgoshasb (2021).

2.2.2 Piezoelektrik

1) Pengertian dan Prinsip Kerja

Piezoelektrik merupakan teknologi yang memanfaatkan material tertentu untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Material piezoelektrik memiliki sifat unik, yaitu dapat menghasilkan tegangan listrik ketika diberikan tekanan, getaran, atau gaya mekanik. Fenomena ini dikenal sebagai *Efek Piezoelektrik Langsung (Direct Piezoelectric Effect)* Damjanovic (2005). Sebaliknya, material piezoelektrik juga dapat mengalami deformasi atau getaran ketika diberikan tegangan listrik, sehingga sifat tersebut disebut sebagai efek timbal balik piezoelektrik. Karena kemampuannya tersebut, piezoelektrik banyak dimanfaatkan pada sensor tekanan, sensor getaran, aktuator, serta sistem *energy harvesting*.

Pada sistem *energy harvesting*, piezoelektrik bekerja dengan memanfaatkan tekanan mekanik dari lingkungan sekitar, seperti langkah kaki, getaran mesin, maupun tekanan permukaan lainnya untuk menghasilkan energi listrik. Ketika material piezoelektrik mengalami deformasi akibat tekanan, akan terjadi perpindahan muatan listrik pada permukaan material sehingga menghasilkan tegangan listrik. Besarnya tegangan yang dihasilkan dipengaruhi oleh besar tekanan, frekuensi getaran, serta karakteristik material piezoelektrik yang digunakan He dan Briscoe (2024).

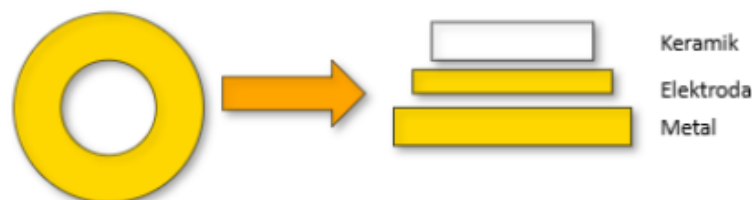


Gambar 2.1 Sensor Piezoelektrik¹

2) Jenis dan Karakteristik Material Piezoelektrik

Material piezoelektrik dibedakan menjadi dua jenis, yaitu material alami dan material buatan. Material piezoelektrik alami antara lain kuarsa (*Quartz*), turmalin, berlinite, dan garam Rochelle. Sementara itu, material piezoelektrik buatan meliputi *Lead Zirconate Titanate* (PZT), *Barium Titanate* (BaTiO_3), dan *Lead Titanate* (PbTiO_3). Dari beberapa jenis material tersebut, PZT menjadi salah satu material yang paling banyak digunakan pada sistem *energy harvesting* karena memiliki sensitivitas dan keluaran tegangan yang relatif lebih tinggi dibandingkan material lainnya Ghemari et al. (2022).

Teknologi piezoelektrik memiliki beberapa keunggulan, seperti ukuran yang relatif kecil, respon yang cepat, serta tidak memerlukan sumber energi eksternal tambahan. Selain itu, piezoelektrik juga mampu memanfaatkan energi getaran dan tekanan mekanik yang tersedia di lingkungan sekitar sehingga banyak diterapkan pada perangkat elektronik berdaya rendah seperti sensor nirkabel, perangkat wearable, dan sistem monitoring mandiri Brusa et al. (2023). Pada proyek akhir ini, piezoelektrik yang digunakan memiliki lapisan berbahan brass atau kuningan dengan kapasitas sebesar 20 nF dan mampu beroperasi pada rentang suhu -20°C hingga 70°C .



Gambar 2.2 Bahan Sensor Piezoelektrik

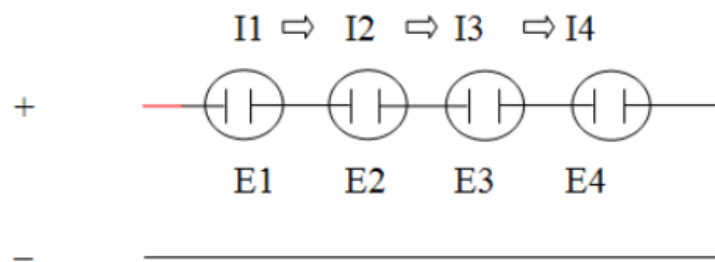
¹ Piezolektrik. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/knBXgine5LRnouNgr>

3) Konfigurasi Rangkaian Listrik Piezoelektrik

Konfigurasi rangkaian listrik piezoelektrik merupakan susunan sensor piezoelektrik yang digunakan untuk memperoleh karakteristik keluaran listrik tertentu sesuai kebutuhan sistem. Dalam penerapan *energy harvesting*, sensor piezoelektrik umumnya disusun dalam konfigurasi seri atau paralel untuk meningkatkan tegangan maupun arus keluaran yang dihasilkan dari tekanan mekanik.

a) Rangkaian Seri

Konfigurasi seri pada piezoelektrik merupakan susunan beberapa sensor piezoelektrik yang dihubungkan secara berurutan untuk meningkatkan tegangan keluaran. Pada konfigurasi ini, terminal positif piezoelektrik dihubungkan dengan terminal negatif piezoelektrik lainnya sehingga tegangan total akan saling dijumlahkan, sedangkan arus keluaran relatif tetap. Konfigurasi seri digunakan ketika sistem membutuhkan tegangan yang lebih tinggi untuk proses penyearahan dan penyimpanan energi Yusran et al. (2025).



Gambar 2.3 Rangkaian Seri

Pada gambar rangkaian seri di atas dapat di jelaskan bahwa jumlah total daya yang masuk suatu titik cabang sama dengan jumlah daya yang keluar tiap titik cabang tersebut, sehingga didapat persamaan 2.1 dan 2.2 sebagai berikut

$$E_{total} = E_1 = E_2 = E_3 = .. = E_n \quad 2.1$$

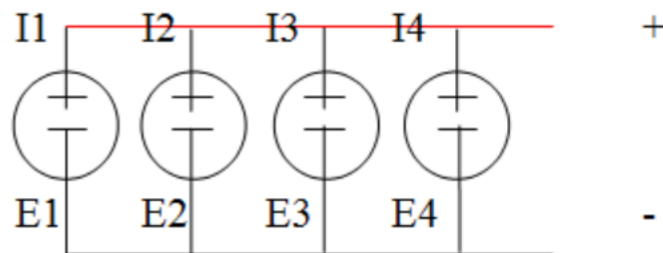
$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + .. + I_n \quad 2.2$$

Pada rangkaian seri, dapat diketahui jumlah total tegangan yang dihasilkan pada rangkaian seri adalah sama dengan jumlah tegangan yang dihasilkan tiap sensor piezoelektrik dan jumlah total arus adalah penjumlahan arus yang

dihasilkan tiap sensor piezoelektrik. Untuk persamaan rangkaian seri tertera pada persamaan 2.1 untuk total daya dan persamaan 2.2 untuk total arus yang dihasilkan. Semakin banyak sensor piezoelektrik yang dirangkai secara seri, maka tegangan keluaran akan semakin besar, namun arus yang dihasilkan cenderung tetap Mowaviq et al. (2018).

b) Rangkaian Paralel

Konfigurasi paralel pada piezoelektrik merupakan susunan beberapa sensor piezoelektrik yang dihubungkan secara sejajar untuk meningkatkan arus keluaran. Pada konfigurasi ini, seluruh terminal positif dihubungkan menjadi satu jalur dan seluruh terminal negatif dihubungkan pada jalur yang sama. Tegangan keluaran pada konfigurasi paralel relatif tetap, sedangkan arus total akan bertambah sesuai jumlah sensor piezoelektrik yang digunakan Tirta dan Gerhana (2025).



Gambar 2.4 Rangkaian Paralel

Pada gambar di atas rangkaian paralel dapat dijelaskan bahwa jumlah total daya yang masuk suatu titik cabang adalah penjumlahan daya yang keluar tiap titik cabang tersebut. Sehingga didapat persamaan 2.3 dan 2.4 sebagai berikut.

$$E_{total} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \quad 2.3$$

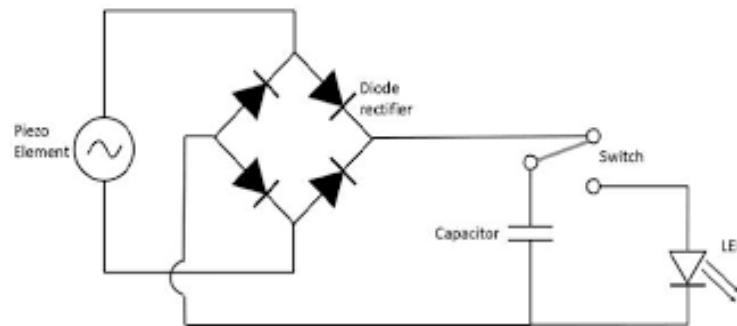
$$I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad 2.4$$

Pada gambar rangkaian paralel, diketahui jumlah total tegangan yang dihasilkan pada rangkaian seri adalah penjumlahan tegangan yang dihasilkan tiap sensor piezoelektrik dan jumlah total arus adalah sama dengan arus yang dihasilkan tiap sensor piezoelektrik. Untuk persamaan 2.3 rangkaian paralel tertera pada persamaan 3 untuk total daya dan persamaan 2.4 untuk total arus yang dihasilkan.

Konfigurasi paralel lebih efektif digunakan pada sistem *energy harvesting* yang membutuhkan arus lebih besar dan lebih stabil untuk proses pengisian baterai atau penyimpanan energi listrik Kusnandar et al. (2021)

c) Rangkaian Pembangkit Listrik Piezoelektrik

Piezoelektrik dalam sekali tekan dan dilepaskan akan menghasilkan arus bolak-balik. Sehingga untuk mendapatkan energi yang maksimal dan dapat disimpan dalam baterai maka perlu disearahkan dengan rectifier (Gambar 2.6). Karena energi listrik yang dihasilkan piezoelektrik sangat kecil, energi listrik disimpan terlebih dahulu dalam baterai atau kapasitor sebelum digunakan pada beban Mowaviq et al. (2018).



Gambar 2.5 Rangkaian Pembangkit Listrik Piezoelektrik²

Dalam penelitian ini, konfigurasi penyusunan transduser piezoelektrik dinyatakan menggunakan notasi S dan P. Huruf S (Series) menunjukkan jumlah transduser yang disusun secara seri, sedangkan huruf P (Parallel) menunjukkan jumlah rangkaian atau cabang yang disusun secara paralel. Dengan demikian, konfigurasi 2S10P berarti terdapat 2 transduser yang disusun secara seri pada setiap cabang dan terdapat 10 cabang yang disusun secara paralel. Konfigurasi 4S5P berarti terdapat 4 transduser yang disusun secara seri pada setiap cabang dan 5 cabang disusun secara paralel. Konfigurasi 5S4P terdiri atas 5 transduser seri pada setiap cabang dengan 4 cabang paralel, sedangkan konfigurasi 10S2P terdiri atas 10 transduser seri pada setiap cabang dengan 2 cabang paralel. Setiap konfigurasi menggunakan total 20 transduser piezoelektrik.

² Rangkaian Pembangkit Listrik Piezoelektrik. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/EduVH0mYXDeA515qg>

2.2.3 Arduino Uno

Arduino Uno merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang dikembangkan sebagai platform open-source untuk mendukung pengembangan sistem elektronika, instrumentasi, dan otomasi. Arduino Uno banyak digunakan dalam penelitian maupun pengembangan sistem tertanam (embedded system) karena memiliki bentuk yang sederhana, mudah diprogram, dan kompatibel dengan berbagai jenis sensor serta modul tambahan. Board ini dilengkapi dengan 14 pin digital input/output, 6 pin analog input, kristal osilator 16 MHz, koneksi USB, sertapin komunikasi serial, SPI, dan I2C.

Arduino Uno dapat diprogram menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman berbasis C/C++ yang telah disederhanakan melalui library bawaan Arduino. Kemudahan dalam proses pemrograman menjadikan Arduino Uno banyak digunakan dalam pengembangan sistem monitoring, sistem kendali, Internet of Things (IoT), dan aplikasi sensor berbasis mikrokontroler. Selain itu, Arduino Uno juga memiliki dokumentasi dan komunitas pengguna yang luas sehingga memudahkan proses pengembangan maupun pemecahan masalah pada sistem yang dirancang.



Gambar 2.6 Arduino Uno³

Fitur:

- Tegangan Operasi: 5V

³Arduino Uno. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/sYkCsUg6pWCaJlpzd>

- Tegangan Input (Rekomendasi): 7-12V
- Memori Flash: 32 KB
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB

2.2.4 DB107 (Bridge Rectifier)

DB107 Bridge Rectifier merupakan komponen elektronika yang digunakan untuk mengubah arus bolak-balik (Alternating Current / AC) menjadi arus searah (Direct Current / DC). Komponen ini termasuk jenis bridge rectifier atau penyearah jembatan yang tersusun dari empat buah dioda di dalam satu paket komponen. Konfigurasi tersebut memungkinkan proses penyearahan gelombang penuh (full-wave rectification) sehingga kedua siklus gelombang AC, baik positif maupun negatif, dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan tegangan DC. Dibandingkan penyearah setengah gelombang, metode penyearahan gelombang penuh menghasilkan efisiensi yang lebih baik serta ripple tegangan yang lebih rendah pada keluaran sistem.

Dalam sistem elektronika daya, bridge rectifier banyak digunakan pada rangkaian catu daya (power supply) dan sistem konversi energi karena mampu menghasilkan tegangan DC yang lebih stabil untuk menyuplai perangkat elektronik. Menurut Rashid (2014), proses penyearahan gelombang penuh memungkinkan transfer energi berlangsung lebih optimal karena seluruh siklus sinyal AC digunakan pada proses konversi daya. Selain itu, penggunaan konfigurasi jembatan juga menghilangkan kebutuhan transformator center-tap sehingga rangkaian menjadi lebih sederhana dan efisien.

Pada sistem energy harvesting berbasis piezoelektrik, sensor piezoelektrik menghasilkan tegangan keluaran berupa arus bolak-balik (AC) akibat perubahan tekanan mekanik yang diterima oleh material piezoelektrik. Tegangan keluaran tersebut bersifat fluktuatif dan memiliki polaritas yang berubah-ubah mengikuti arah deformasi material. Kondisi ini menyebabkan energi listrik dari piezoelektrik tidak dapat langsung digunakan untuk mengisi baterai ataupun menyuplai perangkat elektronik karena sebagian besar sistem elektronik memerlukan tegangan DC yang stabil. Oleh karena itu, diperlukan rangkaian penyearah untuk mengubah

tegangan AC menjadi tegangan DC sebelum masuk ke tahap penyimpanan energi.

DB107 dipilih karena memiliki ukuran yang relatif kecil, konfigurasi yang sederhana, serta mampu menangani tegangan dan arus yang sesuai untuk aplikasi daya rendah hingga menengah. Selain itu, karakteristik tegangan reverse dan kemampuan arus pada DB107 dinilai cukup untuk mendukung proses konversi energi pada sistem piezoelektrik skala kecil. Menurut Kumar dan Singh (2020), penggunaan bridge rectifier pada sistem energy harvesting mampu meningkatkan efektivitas transfer energi menuju rangkaian penyimpanan daya dengan memanfaatkan seluruh siklus sinyal AC yang dihasilkan sumber energi.

Pada proyek akhir ini, DB107 digunakan sebagai bagian dari sistem manajemen daya untuk membantu proses konversi energi listrik hasil piezoelektrik sebelum disimpan ke dalam baterai lithium-ion. Tegangan DC hasil penyearahan selanjutnya akan distabilkan menggunakan kapasitor sebelum diteruskan menuju modul pengisian baterai. Dengan adanya proses penyearahan ini, energi listrik yang dihasilkan dari tekanan langkah kaki dapat dimanfaatkan secara lebih optimal dan stabil untuk mendukung kebutuhan daya sistem monitoring berbasis mikrokontroler.



Gambar 2.7 DB107⁴

Fitur:

- Jenis Penyearah: Full-Wave Bridge Rectifier
- Arus Maksimum: 1-6A
- Tegangan Balik Maksimum (*Peak Reverse Voltage*): 1000 V
- Jumlah Dioda Internal: 4 buah

⁴ DB107. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/q1VlAxVnk9lyzRcLK>

- Frekuensi Operasi: 50–60 Hz
- Kemasan: DIP-4
- Tegangan Keluaran: DC (hasil penyearahan AC)

2.2.5 Kapasitor

Kapasitor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi untuk menyimpan muatan listrik sementara dalam medan listrik. Kapasitor terdiri dari dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh bahan isolator atau dielektrik. Kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan listrik disebut kapasitansi dan dinyatakan dalam satuan Farad (F). Dalam rangkaian elektronika, kapasitor banyak digunakan untuk berbagai fungsi seperti penyaring tegangan (*filter*), penyimpan energi sementara, penstabil tegangan, kopling sinyal, dan pengurang noise pada sistem elektronik.

Selain itu, kapasitor juga membantu meningkatkan efisiensi sistem dengan mengurangi lonjakan tegangan dan menjaga kestabilan suplai daya pada rangkaian elektronika. Pada proyek akhir ini, kapasitor digunakan sebagai bagian dari sistem manajemen daya untuk membantu proses penyimpanan energi sementara dari sensor piezoelektrik sebelum energi tersebut disimpan ke dalam baterai lithium-ion. Penggunaan kapasitor diharapkan dapat meningkatkan kestabilan tegangan dan efektivitas pemanfaatan energi listrik yang dihasilkan dari langkah kaki.



Gambar 2.8 Kapasitor⁵

Kapasitor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi untuk

⁵ *Kapasitor*. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/pp8nrdu8V76KC2xor>

menyimpan muatan listrik sementara dalam medan listrik. Kapasitor terdiri dari dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh bahan isolator atau dielektrik. Kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan listrik disebut kapasitansi dan dinyatakan dalam satuan Farad (F). Dalam rangkaian elektronika, kapasitor banyak digunakan untuk berbagai fungsi seperti penyaring tegangan (filter), penyimpan energi sementara, penstabil tegangan, kopling sinyal, dan pengurang noise pada sistem elektronik.

Selain itu, kapasitor juga membantu meningkatkan efisiensi sistem dengan mengurangi lonjakan tegangan dan menjaga kestabilan suplai daya pada rangkaian elektronika. Karakteristik kapasitor yang mampu melakukan proses pengisian (charging) dan pengosongan muatan (discharging) dalam waktu singkat membuat komponen ini efektif digunakan pada sistem penyimpanan energi sementara (temporary energy storage). Pada sistem energy harvesting, kapasitor berperan penting dalam meredam fluktuasi tegangan keluaran yang dihasilkan oleh sumber energi piezoelektrik, karena tegangan yang dihasilkan cenderung tidak stabil dan berubah-ubah mengikuti tekanan mekanik yang diterima.

Secara teknis, kapasitor bekerja dengan menyimpan energi listrik dalam bentuk medan elektrostatik ketika diberikan tegangan pada kedua terminalnya. Energi yang tersimpan kemudian dapat dilepaskan kembali ke rangkaian saat sumber tegangan mengalami penurunan. Menurut Koya dan S.P. Venu Madhava Rao (2021), kapasitor memiliki peran penting pada sistem elektronika daya dan energy harvesting karena mampu membantu proses penyaringan tegangan, mengurangi ripple, serta menjaga kestabilan suplai daya pada rangkaian elektronika. Oleh karena itu, pemilihan nilai kapasitansi menjadi faktor penting karena memengaruhi kemampuan kapasitor dalam meredam ripple tegangan dan mempertahankan kestabilan keluaran sistem.

2.2.6 Baterai Lithium Ion 3.7V

Lithium-ion Battery merupakan salah satu jenis baterai isi ulang (*rechargeable battery*) yang banyak digunakan pada perangkat elektronik modern karena memiliki densitas energi yang tinggi, ukuran yang relatif kecil, bobot ringan, serta kemampuan pengisian ulang yang baik. Baterai lithium-ion bekerja

berdasarkan perpindahan ion lithium antara elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda) selama proses pengisian (charging) dan pengosongan daya (discharging). Proses perpindahan ion tersebut memungkinkan energi listrik disimpan dan digunakan kembali secara efisien. Tegangan nominal yang umum digunakan pada baterai lithium-ion adalah 3,7 Volt, sehingga baterai jenis ini banyak diterapkan pada perangkat portabel seperti smartphone, sensor nirkabel, sistem Internet of Things (IoT), dan perangkat elektronik berdaya rendah lainnya.

Dibandingkan jenis baterai konvensional lainnya, baterai lithium-ion memiliki beberapa keunggulan seperti tingkat self-discharge yang rendah, efisiensi pengisian yang tinggi, serta siklus pengisian ulang yang lebih panjang. Menurut Nitta et al. (2015), baterai lithium-ion menjadi teknologi penyimpanan energi yang dominan pada perangkat elektronik modern karena mampu menyediakan kapasitas energi yang besar dengan ukuran fisik yang relatif kecil. Selain itu, kemampuan baterai lithium-ion dalam mempertahankan kestabilan tegangan keluaran membuatnya sesuai digunakan pada sistem elektronik yang memerlukan suplai daya stabil dan kontinu.

Dalam sistem energy harvesting, baterai lithium-ion berfungsi sebagai media penyimpanan energi sementara maupun jangka menengah untuk menampung energi listrik yang dihasilkan dari sumber energi lingkungan. Energi yang dihasilkan oleh sensor piezoelektrik umumnya bersifat kecil, fluktuatif, dan tidak kontinu karena bergantung pada tekanan atau getaran mekanik yang diterima sensor. Oleh karena itu, keberadaan baterai sangat penting untuk menjaga kontinuitas suplai daya pada sistem elektronik sehingga perangkat tetap dapat bekerja meskipun sumber energi mekanik tidak selalu tersedia.

Baterai lithium-ion 3,7V pada proyek akhir ini digunakan sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh sensor piezoelektrik dari tekanan langkah kaki manusia. Energi hasil konversi piezoelektrik akan disimpan ke dalam baterai melalui modul pengisian daya sebelum digunakan untuk menyuplai sistem monitoring berbasis mikrokontroler. Penggunaan baterai lithium-ion diharapkan mampu meningkatkan kestabilan daya sistem, memperpanjang waktu operasional perangkat, serta mendukung penerapan sistem elektronik mandiri berbasis energy harvesting.



Gambar 2.9 Baterai Lithium⁶

2.2.7 INA219

INA219 merupakan sensor elektronik yang digunakan untuk melakukan pengukuran arus, tegangan, dan daya listrik DC secara digital. Sensor ini dikembangkan oleh Texas Instruments dan banyak digunakan pada sistem elektronika maupun embedded system karena memiliki tingkat akurasi yang cukup baik serta mudah diintegrasikan dengan berbagai jenis mikrokontroler seperti Arduino, ESP32, dan Raspberry Pi. INA219 bekerja dengan prinsip pengukuran beda tegangan pada resistor shunt. Ketika arus listrik mengalir melalui resistor shunt, akan muncul tegangan jatuh (voltage drop) dengan nilai yang sangat kecil. Tegangan tersebut kemudian diperkuat dan diproses oleh internal ADC (Analog to Digital Converter) sehingga menghasilkan data pengukuran arus dalam bentuk digital. Selain mengukur arus, sensor ini juga mampu membaca tegangan bus pada sisi beban dan menghitung nilai daya listrik berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus yang diperoleh.

Pada modul INA219 umumnya telah tersedia resistor shunt presisi dengan nilai hambatan rendah sehingga sensor dapat langsung digunakan tanpa memerlukan rangkaian pengukuran arus tambahan. Penggunaan resistor shunt dengan hambatan kecil bertujuan untuk mengurangi rugi daya pada saat proses pengukuran berlangsung. Sensor INA219 mampu mengukur tegangan DC hingga sekitar 26 Volt dengan kemampuan pembacaan arus yang bergantung pada spesifikasi resistor shunt yang digunakan pada modul. Sensor ini menggunakan metode komunikasi I2C (Inter-Integrated Circuit) yang hanya memerlukan dua

⁶ *Baterai Lithium*. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/DATCDFOpfNVK01LSZ>

jalur komunikasi, yaitu SDA (Serial Data) dan SCL (Serial Clock). Penggunaan komunikasi I2C membuat proses integrasi sensor dengan mikrokontroler menjadi lebih sederhana serta menghemat penggunaan pin input/output pada sistem.

Sensor INA219 memiliki beberapa keunggulan, di antaranya mampu melakukan pengukuran arus dan tegangan secara realtime, menghasilkan data pengukuran digital yang lebih stabil terhadap noise, serta dapat menghitung daya listrik secara langsung tanpa memerlukan perhitungan manual tambahan. Oleh karena itu, sensor ini banyak digunakan pada berbagai aplikasi seperti monitoring konsumsi daya perangkat elektronik, sistem monitoring baterai, panel surya, monitoring motor DC, serta sistem IoT. Dalam proyek akhir ini, sensor INA219 digunakan untuk memantau parameter kelistrikan pada sistem yang dirancang sehingga kondisi tegangan, arus, dan daya dapat diketahui selama proses pengujian berlangsung. Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler dan digunakan sebagai bagian dari sistem monitoring secara realtime.



Gambar 2.10 INA219⁷

Fitur:

- Tegangan Operasi: 3,0–5,5 V
- Tegangan Bus Maksimum: 26 V DC
- Komunikasi: I2C (SDA dan SCL)
- Parameter Pengukuran: Tegangan, Arus, dan Daya
- ADC Internal: 12-bit

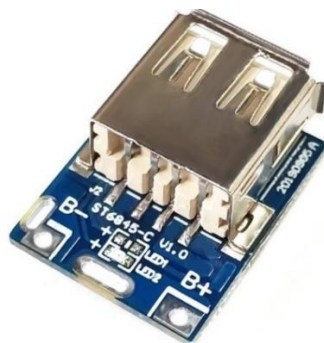
⁷ INA219. Retrieved August 28, 2026, <https://share.google/vzU9Yg0Sskmj5jyNH>

2.2.8 Modul Powerbank

Modul powerbank merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi mengubah tegangan dari baterai lithium-ion menjadi tegangan keluaran 5 V DC melalui proses konversi menggunakan rangkaian DC-DC boost converter. Modul ini memungkinkan baterai lithium-ion dengan tegangan nominal sekitar 3,7 V menghasilkan tegangan yang stabil sehingga dapat digunakan untuk menyuplai berbagai perangkat elektronik yang membutuhkan catu daya 5 V, seperti mikrokontroler Arduino Uno, sensor, maupun perangkat berbasis USB.

Pada penelitian ini, modul powerbank digunakan sebagai sumber catu daya bagi sistem monitoring. Energi listrik yang telah disimpan pada baterai lithium-ion diubah menjadi tegangan keluaran 5 V melalui modul powerbank, kemudian digunakan untuk menyuplai Arduino Uno beserta komponen pendukung lainnya. Dengan demikian, sistem dapat beroperasi menggunakan energi yang berhasil dipanen dari transduser piezoelektrik tanpa memerlukan sumber daya eksternal.

Selain menaikkan tegangan keluaran, modul powerbank juga membantu menjaga kestabilan tegangan sehingga perangkat yang terhubung memperoleh suplai daya yang lebih aman dan andal. Beberapa modul powerbank juga telah dilengkapi dengan fitur proteksi, seperti perlindungan terhadap arus berlebih (overcurrent), hubungan singkat (short circuit), dan tegangan berlebih (overvoltage), sehingga dapat meningkatkan keamanan selama proses penggunaan baterai.



Gambar 2.11 Modul powerbank⁸

⁸Modul Powerbank. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/2qQzjSfpNhblOBMs2>

2.2.9 Modul SD Card

Modul SD Card merupakan perangkat yang digunakan sebagai media penyimpanan data pada sistem mikrokontroler. Modul ini memungkinkan data hasil pengukuran dan monitoring sistem disimpan ke dalam kartu memori sehingga dapat digunakan untuk keperluan analisis dan dokumentasi. Komunikasi antara mikrokontroler dan modul SD Card umumnya menggunakan protokol Serial Peripheral Interface (SPI).

Modul SD Card memiliki kapasitas penyimpanan yang besar dan mampu menyimpan data secara permanen meskipun sumber daya listrik dimatikan. Data yang tersimpan dapat berupa nilai tegangan, arus, daya, maupun energi yang dihasilkan oleh sensor piezoelektrik.

Dalam penelitian ini, modul SD Card digunakan untuk menyimpan data hasil pemanenan energi dari langkah kaki menggunakan sensor piezoelektrik. Data yang tersimpan selanjutnya dapat digunakan untuk menganalisis performa sistem dan mengetahui besarnya energi listrik yang dihasilkan dari setiap langkah kaki.



Gambar 2.13 Modul SD Card⁹

Fitur:

- Antarmuka Komunikasi: SPI
- Tegangan Operasi: 3,3–5 V
- Mampu menyimpan data secara permanen

⁹SD card Module. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/w6ZJNyPFWmEiTTBAQ>

- Kapasitas penyimpanan besar
- Mendukung fungsi data logging

2.2.10 LCD (*Liquid Crystal Display*)

Liquid Crystal Display merupakan perangkat tampilan elektronik yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk teks, angka, maupun simbol. LCD bekerja dengan memanfaatkan kristal cair (liquid crystal) yang dapat mengatur cahaya ketika diberikan tegangan listrik. Teknologi LCD banyak digunakan pada berbagai perangkat elektronik karena memiliki konsumsi daya yang rendah, ukuran yang tipis, serta mampu menampilkan informasi dengan cukup jelas.



Gambar 2.12 LCD¹⁰

Dalam sistem elektronika dan mikrokontroler, LCD sering digunakan sebagai media antarmuka untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor, status sistem, maupun parameter tertentu secara real-time. Salah satu jenis LCD yang umum digunakan adalah LCD karakter 16x2, yaitu LCD yang mampu menampilkan 16 karakter dalam 2 baris. LCD dapat dihubungkan dengan mikrokontroler menggunakan komunikasi paralel maupun antarmuka I2C sehingga memudahkan proses integrasi dengan sistem elektronik.

Pada proyek akhir ini, LCD digunakan untuk menampilkan informasi terkait kondisi sistem pemanen energi, seperti tegangan keluaran, kapasitas baterai, maupun status pengisian daya secara langsung. Penggunaan LCD bertujuan untuk memudahkan pengguna dalam melakukan monitoring terhadap kondisi sistem

¹⁰ LCD I2C August 28, 2026, from <https://share.google/1kwChzEVNmfqY6Uk7>

secara real-time tanpa memerlukan perangkat tambahan. Selain itu, LCD juga membantu meningkatkan kemudahan pengoperasian dan pengamatan data pada sistem pemanen energi berbasis piezoelektrik.

Fitur:

- Jenis Display: LCD 16×2
- Tegangan Operasi: 5 V
- Antarmuka Komunikasi: I2C
- Jumlah Karakter: 16×2

2.2.11 Relay

Relay merupakan komponen elektromekanis yang berfungsi sebagai sakelar (switch) yang dikendalikan oleh sinyal listrik. Relay memungkinkan rangkaian dengan tegangan atau arus yang kecil untuk mengendalikan beban yang memiliki tegangan atau arus yang lebih besar. Prinsip kerja relay didasarkan pada gaya elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan (coil). Ketika kumparan dialiri arus listrik, akan terbentuk medan magnet yang menarik kontak mekanis sehingga mengubah posisi kontak dari Normally Open (NO) menjadi tertutup atau dari Normally Closed (NC) menjadi terbuka. Sebaliknya, ketika arus pada kumparan dihentikan, pegas akan mengembalikan kontak ke posisi semula.

Secara umum, relay terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu kumparan (coil), inti besi (core), jangkar (armature), pegas (spring), dan kontak (contact). Kontak relay biasanya terdiri dari Common (COM), Normally Open (NO), dan Normally Closed (NC). Terminal COM merupakan terminal utama yang akan terhubung ke NO saat relay aktif, sedangkan pada kondisi tidak aktif COM terhubung ke NC.

Dalam sistem kendali berbasis mikrokontroler, relay banyak digunakan sebagai antarmuka untuk menghubungkan sinyal kontrol bertegangan rendah dengan peralatan listrik bertegangan tinggi, seperti lampu, motor AC, pompa, dan heater. Penggunaan relay memberikan keuntungan berupa isolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya sehingga meningkatkan keamanan sistem serta melindungi mikrokontroler dari gangguan listrik yang berasal dari beban.

Pada penelitian ini, relay digunakan sebagai sakelar untuk menghubungkan

dan memutus aliran listrik menuju beban sesuai dengan perintah dari mikrokontroler. Dengan demikian, relay berfungsi sebagai perangkat pengendali yang memastikan beban hanya bekerja ketika kondisi yang telah ditentukan oleh sistem terpenuhi.



Gambar 2.13 Relay¹¹

2.2.12 Step Down (DC-DC Buck Converter)

Step-down converter atau DC-DC buck converter merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk menurunkan tegangan DC dari nilai yang lebih tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah tanpa mengubah jenis arusnya. Berbeda dengan regulator linier, buck converter bekerja menggunakan metode switching sehingga memiliki efisiensi yang tinggi, umumnya mencapai lebih dari 80%, dengan rugi-rugi daya yang relatif kecil.

Prinsip kerja buck converter didasarkan pada proses pensaklaran (switching) yang dilakukan oleh transistor dengan frekuensi tinggi. Ketika sakelar aktif (ON), energi disimpan pada induktor dan dialirkan ke beban. Saat sakelar tidak aktif (OFF), energi yang tersimpan pada induktor tetap mengalir ke beban melalui dioda atau MOSFET sinkron. Kapasitor pada sisi keluaran berfungsi untuk meratakan tegangan sehingga diperoleh tegangan DC yang stabil.

Komponen utama pada buck converter terdiri atas transistor switching, induktor, dioda (atau MOSFET sinkron), kapasitor input, kapasitor output, dan rangkaian pengendali (controller). Besarnya tegangan keluaran ditentukan oleh duty cycle dari sinyal switching yang mengendalikan transistor, sehingga tegangan

¹¹ Relay. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/AG1PMP9UCT8x2AQdC>

keluaran dapat diatur sesuai kebutuhan aplikasi.

Dalam sistem berbasis mikrokontroler, modul step-down banyak digunakan sebagai catu daya karena mampu menyediakan tegangan yang stabil untuk berbagai komponen elektronik, seperti mikrokontroler, sensor, modul komunikasi, dan perangkat lainnya. Selain memiliki efisiensi yang tinggi, penggunaan step-down converter juga dapat mengurangi panas yang dihasilkan dibandingkan regulator linier.

Pada penelitian ini, modul step-down digunakan untuk menurunkan tegangan dari sumber catu daya utama menjadi tegangan yang sesuai dengan kebutuhan masing-masing komponen sistem. Tegangan keluaran yang stabil dari modul step-down memastikan mikrokontroler, sensor, dan modul pendukung lainnya dapat bekerja dengan baik serta meningkatkan keandalan keseluruhan sistem.



Gambar 2.14 Stepdown¹²

2.2.13 Step Up (Dc – Dc Boost Converter)

Step-up converter atau DC-DC boost converter merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk menaikkan tegangan DC dari nilai yang lebih rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi tanpa mengubah jenis arusnya. Boost converter banyak digunakan pada sistem elektronika yang membutuhkan tegangan keluaran lebih tinggi daripada tegangan sumber, dengan tetap mempertahankan efisiensi konversi daya yang tinggi.

Prinsip kerja boost converter didasarkan pada proses pensaklaran (switching) transistor dengan frekuensi tinggi. Ketika transistor berada pada kondisi ON, arus mengalir melalui induktor sehingga energi disimpan dalam bentuk medan magnet. Ketika transistor berubah ke kondisi OFF, energi yang tersimpan pada induktor

¹² Stepdown. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/5DdcDnHE1iA24yeMe>

dilepaskan dan dijumlahkan dengan tegangan sumber melalui dioda menuju kapasitor keluaran. Proses ini menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibandingkan tegangan masukan. Besarnya tegangan keluaran dapat diatur melalui duty cycle sinyal switching yang mengendalikan transistor.

Komponen utama pada boost converter terdiri atas induktor, transistor switching, dioda, kapasitor input, kapasitor output, dan rangkaian pengendali (controller). Kombinasi komponen tersebut memungkinkan boost converter menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dengan efisiensi yang tinggi, sehingga banyak digunakan pada berbagai aplikasi elektronika, sistem tenaga, dan perangkat berbasis mikrokontroler.

Dalam sistem berbasis mikrokontroler, modul step-up digunakan untuk menyediakan tegangan yang lebih tinggi bagi komponen atau perangkat tertentu yang tidak dapat dioperasikan langsung dari sumber tegangan utama. Penggunaan boost converter memberikan keuntungan berupa efisiensi daya yang tinggi, ukuran rangkaian yang relatif kecil, serta kemampuan menghasilkan tegangan keluaran yang dapat diatur sesuai kebutuhan.

Pada penelitian ini, modul step-up digunakan untuk meningkatkan tegangan DC dari sumber catu daya menjadi tegangan yang dibutuhkan oleh komponen tertentu dalam sistem. Dengan adanya modul step-up, seluruh komponen dapat memperoleh suplai tegangan yang sesuai dengan spesifikasi kerjanya sehingga sistem dapat beroperasi secara optimal dan andal.



Gambar 2.15 Step Up¹³

2.2.14 Arduino IDE

Arduino IDE merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis,

¹³ Stepup. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/CHEgkfUarXMqF7yKc>

mengedit, mengompilasi, dan mengunggah program ke papan mikrokontroler seperti Arduino dan ESP32. Arduino IDE dikembangkan oleh Arduino Official Website dan dirancang dengan tampilan yang sederhana sehingga mudah digunakan oleh pemula maupun pengembang sistem embedded. Bahasa pemrograman yang digunakan pada Arduino IDE berbasis bahasa C/C++ dengan struktur program yang sederhana menggunakan fungsi utama `setup()` dan `loop()`.

Arduino IDE menyediakan berbagai fitur pendukung seperti editor kode, serial monitor, library manager, dan board manager yang memudahkan proses pengembangan perangkat keras berbasis mikrokontroler. Selain itu, Arduino IDE mendukung berbagai jenis papan mikrokontroler, termasuk ESP32-S3, melalui penambahan package board tertentu. Dengan adanya library yang lengkap dan komunitas pengguna yang besar, Arduino IDE menjadi salah satu software yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT), robotika, sensor, dan sistem monitoring elektronik.

Pada proyek akhir ini, Arduino IDE digunakan sebagai media pemrograman untuk mengembangkan sistem pemanen energi berbasis piezoelektrik. Software ini digunakan untuk menulis program pengolahan data, pembacaan sensor, monitoring kondisi baterai, serta pengendalian tampilan LCD pada mikrokontroler Arduino Uno. Penggunaan Arduino IDE dipilih karena memiliki antarmuka yang mudah digunakan, mendukung berbagai library pendukung, dan mempermudah proses pengujian serta debugging sistem secara real-time.



Gambar 2.16 Arduino Ide¹⁴

¹⁴ *Arduino Ide*. Retrieved August 28, 2026, from <https://share.google/OwQdOIWdyHSEZKrUL>