

TUGAS AKHIR

SISTEM HYBRID GENERATOR PIEZOELEKTRIK DAN PHOTOVOLTAIK UNTUK LAMPU ROTARY WARNING LIGHT DI PT PELINDO 1 CABANG BELAWAN

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh :

MUHAMMAD ZULHAM

1907220099



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2023**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh :

Nama : Muhammad Zulham
NPM : 1907220099
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Sistem Hybrid Generator Piezoelektrik Dan
Photovoltaik Untuk Lampu Rotary Warning Light
Di PT Pelindo 1 Cabang Belawan
Bidang ilmu : Energi Baru Terbarukan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 9 Oktober 2023

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing



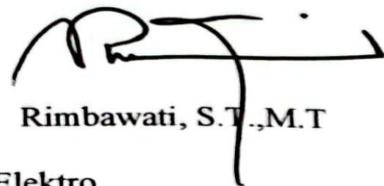
Faisal Irsan Pasaribu, S.T.,M.T

Dosen Penguji I



Elvy Sahnur Nasution, S.T.,M.Pd

Dosen Penguji II



Rimbawati, S.T.,M.T

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,



Faisal Irsan Pasaribu, S.T.,M.T

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Lengkap : Muhammad Zulham

Tempat /Tanggal Lahir : P. Berandan, Langkat / 21 September 1999

NPM : 1907220099

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul :

“Sistem Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik Untuk Lampu Rotary Warning Light Di PT Pelindo 1 Cabang Belawan”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/ kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro/Mesin/Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 09 September 2023

Saya yang menyatakan



Muhammad Zulham

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada penggantian sumber daya energi konvensional (seperti batu bara, minyak bumi, dan nuklir) dengan teknologi sumber daya terbarukan untuk mengatasi tantangan akan berkurangnya sumber daya alam dan pencemaran lingkungan yang berkontribusi pada perubahan iklim global. Tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan sistem generator *hybrid* menggunakan teknologi piezoelektrik dan fotovoltaik untuk memasok energi listrik pada lampu *rotary warning light*. Penelitian ini memodifikasi *speed bump* dengan mengintegrasikan kepingan piezoelektrik agar dapat menghasilkan listrik. Sumber energi alternatif yang digunakan adalah potensi energi dari *speed bump* yang menghasilkan tekanan mekanis menjadi energi listrik melalui teknologi piezoelektrik dan melalui panel surya berdasarkan radiasi matahari. Metode penelitian meliputi studi literatur, observasi lapangan, dan perancangan bangunan. Data dikumpulkan melalui pengamatan, pengukuran, dan pemantauan terhadap performa sistem yang dikembangkan. Hasil penelitian berhasil mengembangkan sistem generator *hybrid* yang menggabungkan teknologi piezoelektrik dengan fotovoltaik dan mampu menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 17,702 volt, arus 2,143 ampere, dan daya 38,132 watt pada sel surya, serta tegangan rata-rata sebesar 1,549 volt, arus 0,016 ampere, dan daya 0,02 watt pada *speed bump* generator piezoelektrik. Selain itu, durasi pengisian baterai 24Ah 12 volt diperoleh sekitar 6,66 jam. Penelitian ini menekankan pentingnya beralih dari sumber daya energi konvensional menuju teknologi sumber daya terbarukan sebagai langkah untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas dan mengurangi dampak pencemaran yang berkontribusi pada perubahan iklim global.

Kata Kunci: *Sistem Hybrid, Piezoelektrik, Sel Surya, Speed Bump, Instalasi.*

ABSTRACT

This research focuses on replacing conventional energy sources (such as coal, oil, and nuclear) with renewable energy technology to address the challenges of diminishing natural resources and environmental pollution contributing to global climate change. The main objective of this research is to develop a hybrid generator system using piezoelectric and photovoltaic technology to supply electrical energy to rotary warning lights. The study involves modifying speed bumps by integrating piezoelectric pieces to generate electricity. The alternative energy source used is the potential energy from speed bumps, which converts mechanical pressure into electrical energy through piezoelectric technology and solar panels based on sunlight radiation. Research methods include literature review, field observations, and building design. Data is collected through observation, measurement, and monitoring of the developed system's performance. The research successfully developed a hybrid generator system that combines piezoelectric technology with photovoltaics and is capable of producing an average voltage of 17,702 volts, current of 2,143 amperes, and power of 38,132 watts on the solar cells, as well as an average voltage of 1,549 volts, current of 0.016 amperes, and power of 0.02 watts on the piezoelectric speed bump generator. In addition, a charging duration of approximately 6.66 hours was obtained for a 24Ah 12-volt battery. This research emphasizes the importance of transitioning from conventional energy sources to renewable energy technology as a step toward reducing reliance on limited natural resources and mitigating pollution's impact on global climate change.

Keywords: *Hybrid System, Piezoelectric, Solar Cell, Speed Bump, Installation.*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatu.

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “*Sistem Hybrid Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik untuk Lampu Rotary Warning Light di PT Pelindo 1 Cabang Belawan*” yang diajukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Penulis menyadari banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini dengan segala hormat dan kerendahan hati penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Kepada Mamak: Ibu Mulyani yang membesarkan, mendo'akan dan memberikan kasih sayangnya yang tidak ternilai kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir.
2. Bapak Dr. Agussani, M.A.P, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Dr. Ade Faisal, M.sc, P.hd, selaku Wakil Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Affandi, S.T., M.T., selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
6. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara dan juga selaku Dosen Pembimbing yang senantiasa membimbing saya dalam penulisan laporan Tugas akhir.
7. Ibu Elvy Sahnur, S.T., M.Pd.,selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara dan

juga selaku dosen penguji saya yang selalu memberi masukan untuk penyelesaian tugas akhir ini

8. Ibu Rimbawati, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik sekaligus dosen penguji saya yang selalu memberi masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Bapak/Ibu Staff Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
10. Dan tersayang Mufti Kamila yang selalu memberi semangat, perhatian, kasih sayang sebagai support sistem terbaik tanpa letih kepada saya untuk segera menyelesaikan tugas akhir.
11. Kepada Pak Pazli Harry Widodo sebagai Deputy Branch Manager Teknik Belawan, terima kasih atas kesempatan dan kepercayaan yang telah diberikan kepada saya.
12. Kepada Pak Suryawan Udadi Nugraha terima kasih banyak pak.
13. Teman-teman teknik SPMT Branch Belawan yang senantiasa memberikan saya semangat untuk segera menyelesaikan perkuliahan S1 saya.
14. Teman-teman “Six Sula (Asyhar, Nurah Madi, Firman, Faisal Dan Suryawan)” yang telah memberi support terbaik untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
15. Teman-teman Seperjuangan PT PDS SPMT Branch Belawan.
16. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro Stambuk 2019.
17. Teman-teman PRANEMA ; Chandra, Syahnan, Kerisna, Deny, Anta, Juna, Fadlan, Udin dan Dina.

Akhir kata, penulis berharap semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah banyak membantu penulis. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih sangat jauh dari kesempurnaan dan memiliki banyak kekurangan karena terbatasnya kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Oleh karena itu segala kritik dan saran yang membangun dari pembaca dengan senang hati penulis terima demi penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Aamin Yaa Rabbal'Alamin.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan.....	7
2.2 Landasan Teori	8
2.2.1 Energi.....	8
2.2.2 PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid)	12
2.2.3 Polisi Tidur (<i>Speed Bump</i>)	15
2.2.4 Piezoelektrik.....	21
2.2.5 Penelitian Terdahulu Terkait <i>Speed Bump</i> Piezoelektrik.....	35
2.2.6 Sistem Pemanen Energi	42
2.2.7 Solar <i>Cell</i>	54
2.2.8 Baterai	57
2.2.9 Proses Pengisian Dan Pengosongan Baterai	62
2.2.10 Charge Controller	65

2.2.11	Inverter.....	66
BAB III METODE PENELITIAN		68
3.1	Metode Penelitian	68
3.2	Tempat Penelitian	69
3.3	Bahan dan Alat Penelitian.....	69
3.4	Perancangan <i>Hybrid</i> Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik.....	70
3.4.1	Perhitungan Beban.....	72
3.4.2	Kapasitas Sollar Cell.....	72
3.4.3	Kapasitas Baterai	72
3.4.4	Kapasitas Inverter	73
3.4.5	Kapasitas Control Charger	73
3.4.6	Diagram Blok Sistem Hybrid.....	74
3.4.7	Diagram Alir	75
3.5	Prosedur Penelitian	76
3.5.1	Studi Pendahuluan	76
3.5.2	Perancangan Sistem Hybrid	76
3.5.3	Pembuatan Prototipe.....	76
3.5.4	Pengujian dan Analisis.....	76
3.5.5	Evaluasi dan Peningkatan	77
3.5.6	Penyusunan Laporan.....	77
3.6	Metode Pengumpulan Data	77
3.6.1	Observasi Lapangan.....	77
3.6.2	Pengukuran dan Pemantauan	78
3.7	Ilustrasi 3D <i>System Hybrid</i>	78
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		81
4.1	Perancangan Modifikasi Speed Bump dengan 56 Keping Piezoelektrik 35 mm.....	81
4.2	Pengujian Alat Prototipe Hybrid System.....	82
4.3	Analisis Rancang Bangun Prototipe System <i>Hybrid</i> Piezoelektrik dan Solar Cell	82
4.4	Cara Kerja Rancang Bangun Sistem Hybrid Berbasis Solar Cell dan Pemanfaatan Piezoelektrik Pada Polisi Tidur	83
4.5	Analisa Daya Pada Sistem Hybrid Piezoelektrik dan Solar Cell	85
4.5.1	Analisa Batas Minimal dan Maksimal Daya Solar Cell 50 Wp.....	85

4.5.2	Analisa Batas Minimum dan Maksimum Daya 56 keping Piezoelektrik.....	87
4.6	Pengujian dan Analisa Daya Yang Dihasilkan Oleh Solar Cell.....	88
4.7	Pengujian dan Analisa Daya Yang Dihasilkan Oleh 56 Keping Piezoelektrik	92
4.8	Analisa Pengisian baterai oleh sistem Hybrid solar cell dan Piezoelektrik	96
4.9	Analisa Pemakaian Beban Lampu Warning Light	96
4.9.1	Ketersediaan Energi dari Sistem Hybrid.....	99
4.9.2	Penggunaan Energi Oleh Beban.....	99
4.9.3	Kapasitas Baterai	100
4.9.4	Waktu Pengisian Baterai.....	100
4.9.5	Efisiensi Sistem	100
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		101
5.1	Kesimpulan	101
5.2	Saran	101
DAFTAR PUSTAKA		102

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Road Barrier (Pembatas Jalan)	17
Gambar 2.2 Guard Rail (Pagar Pembatas Jalan)	17
Gambar 2.3 Traffic Cone (Kerucut Lalu Lintas)	18
Gambar 2.4 Kanstin	18
Gambar 2.5 Rubber Speed Bump	19
Gambar 2.6 Alat Pembatas Tinggi Dan lebar Kendaraan	19
Gambar 2.7 Pita Penggaduh	20
Gambar 2.8 Piezoelektrik	21
Gambar 2.9 Elemen Piezoelektrik	22
Gambar 2.10 Hubungan Beban terhadap output Tegangan Piezoelektrik	22
Gambar 2.11 Perbedaan Piezoelektrik Saat Mendapat Tekanan	23
Gambar 2.12 Daya Yang Dihasilkan Piezoelektrik PZT Terhadap Letak Tekanan	23
Gambar 2.13 Jenis-jenis Meterial Piezoelektrik	25
Gambar 2.14 Struktur Kristal	26
Gambar 2.15 Perbedaan Struktur Kristal	29
Gambar 2.16 Mekanisme Pembangkitan Energi Listrik Direct dan Reverse Piezoelektric Effect	30
Gambar 2.17 Polarisasi pada Piezoelektrik	31
Gambar 2.18 Efek Piezoelektrik	32
Gambar 2.19 Mode Coupling Piezoelektrik	33
Gambar 2.20 Instalasi Karpet Piezoelektrik di Gerbang Tikeet Stasiun Tokyo ...	34
Gambar 2.21 Perakitan Piezoelektrik pada Speed Bumper	36
Gambar 2.22 Proses Pengujian Pembangkit Listrik Tenaga Piezoelektrik Dengan Media Speed Bumper	36
Gambar 2.23 Rangkaian Seri Piezoelektrik	37
Gambar 2.24 Rangkaian Pararel Piezoelektrik	38
Gambar 2.25 Rangkaian Penyearah Tegangan	39
Gambar 2.26 Rangkaian Regulator Tegangan	40
Gambar 2.27 Rangkaian Sebuah Kapasitor Dalam Keadaan Kosong	41

Gambar 2.28 Skema Sederhana Metode Pemanen Energi Piezoelektrik dengan Penyearah Jembatan Dan Kapasitor	43
Gambar 2.29 Wave Rectifier.....	44
Gambar 2.30 Pemanen Energi Piezoelektrik Yang Diimplementasikan Pada Sole Sepatu.....	46
Gambar 2.31 Komponen Primer Pemanen Energi	46
Gambar 2.32 Rangkaian Modifikasi Buck Boost.....	47
Gambar 2.33 Penerapan Metode MPPT pada sistem Pemanen Energi Piezoelektrik	48
Gambar 2.34 Energy Harvester Module	49
Gambar 2.35 Skematik rangkaian LTC3588-1 dan Grafik karakteristik Input-Output rangkaian (Datasheet).....	50
Gambar 2.36 LTC3588-1 Beserta Fiturnya (Datasheet).....	50
Gambar 2.37 Blok Diagram Rangkaian Equivalen dari LTC3588 (Datasheet)....	51
Gambar 2.38 Skematik Rangkaian LTC3588-2 dan Grafik Karakteristik Input-Output rangkaian (Datasheet).....	53
Gambar 2.39 Solar Cell Tipe Polikristal.....	56
Gambar 2.40 Solar Cell Tipe Monokristal.....	56
Gambar 2.41 Baterai Ni-Cd dan Baterai Lead Acid.....	57
Gambar 2.42 Jenis-Jenis Baterai Primer	58
Gambar 2.43 Baterai Lead Acid.....	59
Gambar 2.44 Baterai Ni-Cd.....	59
Gambar 2.45 Baterai Ni-MH.....	60
Gambar 2.46 Baterai Li-Ion	60
Gambar 2.47 Baterai Li-Po	61
Gambar 2.48 Baterai Li-Fe.....	61
Gambar 2.49 Charge Controller SC2430C	65
Gambar 2.50 Inverter	66
Gambar 3.1 Single Line Diagram Hybrid Solar Cell Dengan Generator Piezoelektrik	71
Gambar 3.2 Diagram Block Sistem Hybrid Solar Cell dengan Piezoelektrik	74
Gambar 3.3 Diagram Alir.....	75

Gambar 3.4 Ilustrasi 3D System Hybrid PE dan PV	78
Gambar 3.5 Skema Rangkaian Prototipe Seri	78
Gambar 3.6 Skema Rangkaian Perototipe Pararel.....	79
Gambar 3.7 Rangkaian Cara Pengukuran Arus.....	79
Gambar 3.8 Rangkaian Cara Pengukuran Tegangan	80
Gambar 3.9 Rangkaian Cara Pengukuran Pengisian Kapasitor	80
Gambar 4.1 Modifikasi Speed Bump dengan Piezoelektrik untuk Menghasilkan Energi Listrik DC	81
Gambar 4.2 Protototipe Hybrid System SOLAR Cell dan Piezoelektrik.....	82
Gambar 4.3 Instalasi Rancang Bangun System Hybrid Solar cell dan Piezoelektrik Pada Polisi Tidur.....	83
Gambar 4.4 Instalasi Rancang Bangun Sistem Hybrid Solar Cell dan Piezoelektrik	83
Gambar 4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Maksimal Solar Cell 50wp	87
Gambar 4.6 Instalasi Rancang Bangun Piezoelektrik 56 Keping Piezo Pada System Hybrid	87
Gambar 4.7 Pengujian Prototipe Solar Cell 50 Wp.....	88
Gambar 4.8 Grafik Hasil Tegangan Input, Tegangan Baterai Terhadap Dan Arus Waktu Pengukuran.....	92
Gambar 4.9 Pengujian Analisa Daya Pada Speed Bump Piezoelektrik.....	93
Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengukuran Tegangan, Arus Dan Perhitungan Daya Piezoelektrik	96
Gambar 4.11 Instalasi Lampu Warning Light Pada Sistem Hybrid Solar Cell dan Piezoelektrik	99

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sumber Energi Mekanik Disekitar Kita Yang Dapat Dipanen Mmenjadi Energi Listrik.....	11
Tabel 2.2 Amplitudo Akselarasi dan Frekuensi Getaran	11
Tabel 2.3 Hasil Arus Listrik dan Tegangan Listrik	35
Tabel 2.4 Fungsi Masing-masing Pin pada LTC3588	51
Tabel 5 Mode Output LTC3588-1	53
Tabel 2.6 Mode Output LTC3588-2	54
Tabel 2.7 Spesifikasi Control Charge	66
Tabel 2.8 Spesifikasi Inverter.....	67
Tabel 3.1 Data Beban Total Lampu Rotary Warning Light Dalam Kurun Waktu 24 Jam	72
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Solar Cell 50 Wp.....	88
Tabel 4.2 Merupakan Hasil Pengukuran Dari Piezoelektrik.....	93

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu energi utama yang dibutuhkan manusia dalam kehidupan sehari-hari, baik di rumah tangga maupun di industri. Energi listrik adalah energi yang berasal dari muatan listrik yang menimbulkan medan listrik. (Prastuti, 2017) Energi listrik dihasilkan dari alat pembangkit listrik yang mengubah energi menjadi energi listrik dengan memanfaatkan sumber daya alam seperti Batu Bara, Minyak Bumi, dan Nuklir. Namun, penggunaan sumber daya alam ini menimbulkan masalah seperti berkurangnya cadangan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui dan polusi yang menyebabkan pemanasan global. Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif penghasil energi listrik baru yang terbarukan dan ramah lingkungan. Teknologi fotovoltaik dan piezoelektrik merupakan sumber energi terbarukan yang sedang dikembangkan. Teknologi fotovoltaik mengubah energi dari sinar matahari menjadi energi listrik, sedangkan teknologi piezoelektrik dapat menghasilkan listrik dari getaran mekanik. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengembangkan sebuah sistem generator *hybrid* yang menggunakan teknologi piezoelektrik dan fotovoltaik untuk menyuplai energi listrik yang dibutuhkan oleh lampu *rotary warning light* di PT Pelindo 1 Cabang Belawan.

Sebuah inovasi dalam menghasilkan energi listrik adalah dengan memanfaatkan gundukan di jalan yang disebut *speed bump* atau polisi tidur menggunakan teknologi piezoelektrik. Polisi tidur merupakan penghalang di jalan yang dibuat untuk membatasi kecepatan kendaraan. Fungsinya adalah untuk menjaga lalu lintas dan mendorong pengemudi untuk melambatkan laju kendaraan. Teknologi piezoelektrik memanfaatkan sifat kristal yang dapat menghasilkan arus listrik ketika ditekan. Dengan menggunakan bahan piezoelektrik, energi mekanik dari tekanan kendaraan yang melintas di atas polisi tidur dapat diubah menjadi energi listrik. Kristal piezoelektrik memiliki domain yang terkunci yang terdiri dari muatan positif dan negatif yang dapat menghasilkan tegangan listrik ketika dikenai tekanan atau getaran. Di Indonesia sendiri, *speed bump* diatur dalam Pasal 3 ayat (1) Peraturan Menteri Perhubungan 14 Tahun 2021: "Alat pembatas kecepatan

sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 huruf a digunakan untuk memperlambat kecepatan kendaraan berupa perunggian sebagian badan jalan dengan lebar dan kelandaian tertentu yang posisinya melintang terhadap badan jalan."

Rasio kendaraan bermotor yang melintasi di area pelabuhan ujung baru belawan meningkat hingga saat ini, dengan kerapatan rata-rata 30 detik/kendaraan bergantian masuk melalui *gate* 1 ujung baru yang dapat menghasilkan ratusan energi gerak setiap harinya. Untuk memanfaatkannya adalah dengan memodifikasi *rubber speed bump* agar dapat menghasilkan energi listrik terbarukan. Salah satu cara yang dilakukan adalah dengan menghubungkan polisi tidur sebagai energi kinetik dengan generator piezoelektrik untuk menghasilkan energi listrik. Banyak penelitian yang telah dilakukan terkait dengan pengembangan polisi tidur untuk tujuan ini.

Indonesia memiliki berbagai jenis sumber daya alam yang telah dimanfaatkan secara bervariasi, termasuk sumber daya yang tidak terbatas seperti energi matahari. Karena negara ini diberkahi dengan radiasi matahari yang cukup setiap hari, mulai dari 2,56 kWh/m² hingga 5,75 kWh/m², pengembangan pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia menjadi suatu keharusan. (Efendi L dkk., 2018)

Pembangkit listrik tenaga surya menggunakan sel surya untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Sel surya terdiri dari lapisan-lapisan tipis dari bahan semikonduktor seperti silikon murni. PLTS menggunakan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang kemudian dapat diubah menjadi listrik AC jika diperlukan. PLTS dapat menghasilkan listrik bahkan saat cuaca sedang mendung, selama masih ada cahaya matahari yang cukup. (Noor et al., 2019)

Hybrid pembangkit energi listrik dari generator piezoelektrik dengan photovoltaic merupakan suatu sistem yang menggabungkan teknologi *photovoltaic* (PV) dan generator piezoelektrik (PE) untuk menghasilkan energi listrik. Pada perencanaan sistem *hybrid* ini, PV dan PE diintegrasikan dalam satu sistem untuk memanfaatkan sumber energi yang berbeda secara bersamaan. PV digunakan untuk menghasilkan listrik dari energi sinar matahari, sedangkan PE digunakan untuk menghasilkan listrik dari getaran atau tekanan yang dihasilkan oleh lalu lintas

kendaraan roda dua dan manusia. Getaran atau tekanan yang dihasilkan oleh lalu lintas kendaraan atau manusia dapat dimanfaatkan oleh PE untuk menghasilkan energi listrik tambahan selain dari energi yang dihasilkan oleh PV.

Tujuan PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid*) ini adalah mengkombinasi keunggulan dari setiap pembangkit sekaligus menutupi kelemahan masing-masing pembangkit untuk kondisi-kondisi tertentu, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi lebih ekonomis dan efisien. (Herlina., 2009)

PT Pelabuhan Indonesia (Persero) atau yang dikenal dengan Pelindo merupakan salah satu perusahaan pelabuhan yang terbagi dari beberapa regional dan cabang di Indonesia. Salah satu regional dan cabang dari Pelindo adalah Pelindo Regional 1 Cabang Belawan. Pelabuhan Belawan memiliki aktivitas yang padat dan kompleks, sehingga membutuhkan sistem keamanan dan keselamatan yang cukup baik. Salah satu alat yang sangat penting dalam memastikan keselamatan lalu lintas di dalam lingkungan industri pelabuhan adalah lampu *rotary warning light*.

Lampu *rotary warning light* merupakan lampu navigasi yang dipasang pada bangunan pelabuhan atau dermaga sebagai tanda peringatan bagi transportasi yang akan memasuki pelabuhan atau dermaga tersebut. Lampu ini berputar secara terus-menerus dengan warna kuning atau merah, sehingga transportasi seperti kapal, truk, mobil, sepeda motor dan pejalan kaki yang sedang berlalu lintas dapat dengan mudah melihatnya dari jarak jauh.

Dalam konteks ini, teknologi sumber daya terbarukan seperti piezoelektrik dan fotovoltaik dapat menjadi solusi alternatif yang menarik untuk memenuhi kebutuhan listrik tersebut. Dalam penelitian ini, penulis bermaksud mengembangkan sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan fotovoltaik untuk lampu *rotary warning light* pada pintu masuk 1 ujung baru di PT Pelindo 1 Cabang Belawan. Dengan menggunakan kedua teknologi ini dalam sistem hibrida, diharapkan dapat menghasilkan listrik yang lebih stabil dan dapat beroperasi bahkan di kondisi cuaca yang buruk. Selain itu, penggunaan teknologi sumber daya terbarukan juga dapat membantu mengurangi ketergantungan pada sumber daya

energi konvensional, sehingga dapat mendukung upaya pelestarian lingkungan di wilayah pelabuhan.

Penelitian ini melibatkan tahap perancangan, modifikasi *speed bump*, instalasi *hybrid* PE dan PV dan pengujian sistem generator *hybrid* piezoelektrik dan *fotovoltaic*. Perancangan sistem dilakukan dengan metode studi literatur untuk memperkirakan kebutuhan daya listrik dan kapasitas penyimpanan baterai yang diperlukan. Setelah merancang sistem, dilakukan modifikasi *speed bump* dan instalasi sistem *photovoltaic* di lokasi PT Pelindo 1 Cabang Belawan. Selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap sistem, untuk mengukur kehandalan dari sistem generator *hybrid* piezoelektrik dan *fotovoltaic*.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi sumber daya terbarukan untuk aplikasi lampu *rotary warning light* di pelabuhan, serta dapat menjadi rujukan untuk pengembangan teknologi serupa di masa depan. Hasil penelitian ini dapat membantu PT Pelindo 1 Cabang Belawan untuk mengoptimalkan kinerja dan efisiensi sistem lampu *rotary warning light*, sehingga dapat meningkatkan kualitas layanan dan keselamatan operasi di pelabuhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dapat disusun sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* untuk lampu *rotary warning light* di PT Pelindo 1 Cabang Belawan?
2. Bagaimana cara memodifikasi *speed bump* sehingga dapat menghasilkan listrik?
3. Bagaimana melakukan instalasi dan pengujian sistem *hybrid* generator piezoelektrik dengan *fotovoltaic* tersebut?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Merancang sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* untuk lampu *rotary warning light* di PT Pelindo 1 Cabang Belawan.

2. Memodifikasi *speed bump* dengan merangkai secara campuran kepingan piezoelektrik agar dapat menghasilkan listrik.
3. Melakukan intergrasi instalasi dan pengujian sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* dengan alat ukur multimeter dan tang amper untuk memastikan bahwa sistem berfungsi dengan baik sehingga dapat menghasilkan energi listrik.

1.4 Ruang Lingkup

1. Merancang sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* untuk lampu *rotary warning light* di PT Pelindo 1 Cabang Belawan. Fokus penelitian terbatas pada pengembangan sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* untuk aplikasi khusus di PT Pelindo 1 Cabang Belawan.
2. Memodifikasi *speed bump* agar dapat menghasilkan listrik. Fokus penelitian terbatas pada pengembangan teknologi yang dapat menghasilkan listrik dari *speed bump* dengan efisiensi yang tinggi dan biaya yang terjangkau.
3. Melakukan instalasi dan pengujian sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* terbatas pada lampu *rotary warning light*.

1.5 Manfaat Penelitian

1.5.1 Manfaat Teoritis

1. Menyediakan alternatif sumber energi terbarukan melalui modifikasi *speed bump* yang dapat menghasilkan listrik.
2. Mempelajari bagaimana melakukan instalasi dan pengujian sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* untuk lampu *rotary warning light*, sehingga dapat membantu mengembangkan sistem serupa di tempat lain.
3. Memberikan pemahaman tentang perbandingan antara performa sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* dengan sistem konvensional.
4. Menentukan potensi energi yang dapat dihasilkan oleh instalasi piezoelektrik dan *photovoltaic* dari pengaruh pembebanan sepeda motor dan manusia sehingga dapat membantu memperkirakan jumlah energi yang dapat dihasilkan.

1.5.2 Manfaat Praktis

1. Merancang sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* untuk lampu *rotary warning light* di PT Pelindo 1 Cabang Belawan adalah menghasilkan energi listrik yang dapat digunakan untuk lampu *rotary warning light* dengan menggunakan sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan. Hal ini dapat membantu PT Pelindo 1 Cabang Belawan mengurangi penggunaan energi listrik dari sumber konvensional, sehingga dapat mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan.
2. Memodifikasi *speed bump* agar dapat menghasilkan listrik dari sumber terbarukan dan ramah lingkungan. Hal ini dapat digunakan untuk lampu *rotary warning light*. Selain itu, modifikasi *speed bump* juga dapat membantu mengurangi kecepatan kendaraan di jalan raya, sehingga dapat meningkatkan keamanan lalu lintas.
3. Melakukan instalasi dan pengujian sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* pada lampu *rotary warning light* adalah memastikan bahwa sistem berfungsi dengan baik dan menghasilkan energi yang diharapkan. Dengan melakukan instalasi dan pengujian yang baik, maka sistem dapat digunakan secara handal dalam menghasilkan energi listrik dari sumber terbarukan dan ramah lingkungan.
4. Membandingkan performa sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* dengan sistem konvensional dari segi efisiensi, biaya, keandalan, dan dampak lingkungan adalah dapat memberikan informasi yang penting dalam pengambilan keputusan terkait penggunaan energi di masa depan. Dengan membandingkan performa kedua sistem, maka dapat diketahui kelebihan dan kekurangan masing-masing sistem.
5. Menentukan besar daya listrik yang dapat dihasilkan oleh instalasi piezoelektrik dan *photovoltaic* akibat pengaruh pembebanan dari sepeda dan sepeda motor untuk menentukan potensi energi yang dihasilkan dari sumber energi terbarukan tersebut. Hal ini dapat membantu dalam merencanakan penggunaan energi di masa depan, serta dapat memberikan informasi yang penting bagi masyarakat dan pemerintah terkait dengan potensi energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Sistem *Hybrid* Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik adalah sistem yang menggunakan teknologi piezoelektrik dan photovoltaik untuk menghasilkan listrik. Teknologi piezoelektrik dapat mengubah energi kinetik menjadi energi listrik melalui tekanan atau getaran, sedangkan teknologi photovoltaik mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Kombinasi kedua teknologi ini dapat menghasilkan sistem yang lebih efisien dan dapat beroperasi secara mandiri tanpa memerlukan sumber listrik dari luar.

Berikut adalah beberapa referensi tinjauan pustaka yang relevan untuk sistem Hybrid Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik:

1. "*A review on piezoelectric energy harvesting from ambient vibration*" oleh S. Roundy, P.K. Wright, dan J. Rabaey. Artikel ini membahas tentang penggunaan teknologi piezoelektrik dalam menghasilkan listrik dari getaran yang ada di sekitar kita, seperti getaran dari lalu lintas kendaraan, aliran air, dan getaran dari mesin. Artikel ini juga membahas tentang desain dan karakteristik sistem piezoelektrik, serta faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi dari sistem ini.
2. "*Hybrid piezoelectric photovoltaic system for power generation in high-rise buildings*" oleh A. H. Al-Waeli, S. Mekhilef, dan S. A. S. Noman. Artikel ini membahas tentang penggunaan sistem Hybrid Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik dalam menghasilkan listrik untuk gedung bertingkat tinggi. Artikel ini menjelaskan tentang desain sistem, pemilihan komponen, dan pengukuran kinerja dari sistem tersebut.
3. "*Optimal sizing of hybrid photovoltaic and piezoelectric energy harvesting system for wireless sensor networks*" oleh J. Shen, Y. H. Lee, dan M. Leong. Artikel ini membahas tentang penggunaan sistem Hybrid Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik dalam memasok listrik untuk jaringan sensor nirkabel. Artikel ini membahas tentang pemilihan ukuran panel photovoltaik

dan piezoelektrik yang optimal untuk memenuhi kebutuhan listrik dari sensor, serta faktor-faktor lain yang mempengaruhi efisiensi sistem.

4. "*Design and implementation of a hybrid piezoelectric and photovoltaic energy harvesting system for streetlights in Ghana*" oleh F. M. Quist, F. K. Hammond, dan E. K. Sakyi. Artikel ini membahas tentang penggunaan sistem Hybrid Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik dalam menghasilkan listrik untuk lampu jalan di Ghana. Artikel ini menjelaskan tentang desain sistem, pemilihan komponen, dan pengukuran kinerja dari sistem tersebut.
5. "*Design and implementation of hybrid energy system for rural electrification using photovoltaic and piezoelectric technology*" oleh B. O. Bolaji dan I. A. Badmus. Artikel ini membahas tentang penggunaan sistem *Hybrid* Generator Piezoelektrik dan Photovoltaik dalam memasok listrik untuk daerah pedesaan di Nigeria. Artikel ini menjelaskan tentang desain sistem, pemilihan komponen, dan pengukuran kinerja dari sistem tersebut.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Energi

Energi merupakan kemampuan untuk melakukan usaha atau kerja, dimana pengertian usaha merupakan gaya yang bekerja pada suatu benda, yang menyebabkan benda tersebut berpindah posisi/tempat. Seperti yang dinyatakan dalam hukum kekekalan energi yaitu "energi tidak dapat diciptakan atau tidak dapat dimusnahkan, energi hanya dapat diubah dari suatu bentuk ke bentuk lain". Dalam sistem Internasional (SI) satuan energi adalah *Joule* (J) sedangkan satuan lainnya yaitu kalori, erg, dan kWh (*kilo watt hours*). Berkaitan dengan piezoelektrik, terjadi peristiwa perubahan bentuk energi mekanik menjadi energi listrik.

1. Energi Mekanik

Energi mekanik adalah penjumlahan antara energi potensial dan energi kinetik. Energi mekanik memiliki persamaan matematis sebagai berikut,

$$E_m = E_k + E_p, \dots\dots\dots (2.1)$$

di mana E_m adalah energi mekanik dalam satuan *joule* (J), E_p adalah energi potensial dalam satuan joule (J) dan E_k adalah energi kinetik dengan satuan joule (J).

2. Energi Potensial

Energi potensial adalah energi yang dimiliki suatu benda karena posisi benda (memiliki ketinggian). Energi potensial terbagi menjadi 2 yaitu:

a. Energi Potensial Gravitasi

Merupakan energi yang dimiliki benda berdasarkan ketinggian benda tersebut. Dalam energi potensial gravitasi didapatkan persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$E_p = m.g.h \text{ atau } E_p = W.h, \dots\dots\dots (2.2)$$

di mana E_p adalah energi potensial gravitasi dalam satuan joule (J), sedangkan m adalah massa benda dengan satuan kilogram (kg), kemudian g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), h adalah ketinggian atau posisi benda berada (m) serta W adalah berat benda.

b. Energi Potensial Pegas

Merupakan energi potensial yang dimiliki sebuah pegas saat ditarik oleh suatu gaya (F) sehingga bertambah panjang (x). Besar energi potensial pegas sama dengan besar usaha gaya pegas, sehingga persamaan energi potensial pegas adalah sebagai berikut:

$$E_p = \frac{1}{2} K x (\Delta x)^2 \quad (2.3)$$

di mana E_p sebagai energi potensial pegas dalam satuan joule (J), variabel k sebagai konstanta pegas (N/m) dan Δx adalah pertambahan panjang pegas (m).

3. Energi Kinetik

Energi kinetik merupakan energi yang dimiliki oleh benda karena pengaruh gerak benda tersebut. Sehingga benda yang bergerak memiliki energi kinetik. Pada persamaan 2.4 di bawah ini merupakan persamaan energi kinetik:

$$E_p = \frac{1}{2} \times M \times V^2 \quad (2.4)$$

di mana Ek sebagai energi kinetik dalam satuan joule (J), variabel m adalah massa benda dalam kilogram (kg) dan variabel v sebagai kecepatan *benca* (m/s).

4. Energi Listrik

Energi listrik merupakan kemampuan untuk melakukan atau menghasilkan usaha listrik (kemampuan yang diperlukan untuk memindahkan muatan dari satu titik ke titik yang lain). Jika arus listrik mengalir pada suatu penghantar yang berhambatan R, maka sumber arus akan mengeluarkan energi pada penghantar yang bergantung pada beda potensial atau tegangan pada ujung-ujung penghantar (V), kuat arus yang mengalir pada penghantar (I) dan waktu atau lamanya arus mengalir (t). Energi listrik dilambangkan dengan W.

Sedangkan perumusan yang digunakan untuk menentukan besar energi listrik nampak pada persamaan 2.5 di bawah ini,

$$W = Q \times V, \dots\dots\dots (2.5)$$

di mana W adalah energi listrik dalam satuan joule (J), Q adalah muatan listrik dalam satuan coulomb (C) dan V adalah beda potensial listrik dalam satuan volt (V). Karena Kuat arus listrik atau $I = Q/t$ maka diperoleh perumusan pada persamaan 2.6,

$$W = (I \times t) \times V, W = V \times I \times t \quad (2.6)$$

Apabila persamaan tersebut dihubungkan dengan hukum Ohm ($V = I.R$) maka diperoleh perumusan sebagai berikut:

$$W = I \times R \times I \times t, W = I^2 \times R \times t \quad (2.7)$$

5. Limbah Energi Aktivitas Manusia (*Waste Mechanical Energy*)

Pesatnya perkembangan teknologi saat membuat penggunaan energi listrik semakin besar. Pemenuhan kebutuhan energi listrik di dunia dan Indonesia gencar dilakukan. Mulai dari pemenuhan dengan metode konvensional seperti penggunaan bahan bakar fosil sebagai energi primer pembangkit listrik namun dampaknya

sangat luar biasa terhadap lingkungan. Metode konvensional sedikit demi sedikit mulai dikesampingkan. Perkembangan teknologi pembangkit energi listrik yang ramah lingkungan serta memanfaatkan energi dari alam gencar dilakukan riset serta penelitiannya. Beberapa diantara adalah panas bumi atau *geothermal*, *photovoltage* atau panel surya, turbin angin, gelombang laut, generator piezoelektrik dan masih banyak lagi.

Selain energi-energi tersebut, penelitian lain juga dilakukan memanfaatkan energi dari aktivitas sehari-hari seperti aktivitas manusia. Manusia saat beraktivitas tentunya memerlukan energi, energi yang dilepaskan oleh para peneliti dikategorikan sebagai energi yang terbuang sia-sia. Namun sebenarnya memiliki potensi dapat dikonversi menjadi bentuk energi lain berdasarkan asas kekekalan energi. Salah satunya adalah energi mekanik berupa tekanan atau getaran yang berasal dari aktivitas manusia (*Waste Mechanical Energy*).

Tabel 2.1 Sumber Energi Mekanik Disekitar Kita Yang Dapat Dipanen Menjadi Energi Listrik

Tubuh Manusia/ Gerakan	Transportasi	Infrastruktur	Industri	Lingkungan
Menarik Nafas, Mengeluarkan nafas, aliran/tekanan darah, berjalan, gerkan jari, jogging, dan talking.	Pesawat, mobil, kereta, roda, track, pedal, rem, mesin turbin, getaran, noise.	Jembatan, jalanan, terowongan, kebun, struktur rumah, kendali saklar, pipa gas/air, sistem AC.	Motor, kompresor, chiler, pompa, kipas, getaran, pemotong, dicing, noise	Angin, arus/ombak laut, gelombang akuistik

Tabel 2.2 Amplitudo Akselerasi dan Frekuensi Getaran

Sumber Getaran	A (m s⁻²)	F_{peak} (Hz)
Mesin Mobil	12.0	200
Dasar mesin 3 – Axis	10.0	70

Casing Blender	6.4	121
Pengeringan Pakaian	3.5	121
Orang Gugup yang menghentikan tumitnya	3.0	1
Panel Instrumen Mobil	3.0	13
Frame Pintu saat pintu ditutup	3.0	125
Oven Mikrowave kecil	2.5	121
Ventilasi HV AC di gedung perkantoran	0.2 – 1.5	60
Jendela di tepi jalan yang ramai	0.7	100
CD di komputer notebook	0.6	75
Lantai dikantor yang sibuk	0.2	100

2.2.2 PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid)

1. Pengertian PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid)

PLTH atau Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* adalah sistem pembangkit listrik yang menggabungkan beberapa jenis teknologi pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda, terutama antara sumber energi baru dan terbarukan (N Kurniasih, dkk, 2015). PLTH menggunakan dua atau lebih jenis pembangkit listrik, seperti turbin angin, panel surya, generator diesel atau sistem baterai untuk memenuhi kebutuhan listrik. PLTH merupakan kombinasi antara PLTS, baterai dan jaringan PLN yang digunakan untuk menyediakan kebutuhan daya untuk beban rumah tangga. Pengaturan pergiliran penyediaan energi dilakukan secara otomatis dari PLTS (*photovoltaic* dan baterai) dan jaringan PLN menggunakan inverter, *solar charge controller*, *minicircuit breaker*, *magnetic contactor*, *time delay relay* (TDR) dan relay (A. A. W. Indrawan dkk., 2016).

PLTH sering digunakan di daerah-daerah yang sulit dijangkau oleh sistem pembangkit listrik konvensional, seperti jaringan PLN atau PLTD, atau di daerah terpencil yang tidak memiliki akses listrik yang memadai. Selain itu, PLTH juga dapat digunakan sebagai sumber energi cadangan untuk memastikan kelangsungan pasokan listrik di daerah yang rentan terhadap gangguan listrik. PLTH dapat juga mengkombinasikan penyaluran daya dengan menggunakan PLTS yang tersambung ke jaringan PLN dengan mengurangi penggunaan baterai seminimal mungkin. Pada

konsep ini, pengaturan suplai daya dilakukan antara PLTS, jaringan PLN dan beban (Purwanto, 2021).

PLTH dapat diterapkan di berbagai jenis lokasi, seperti pulau-pulau kecil, desa-desa terpencil, dan daerah pesisir yang jauh dari pusat kota. PLTH juga dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif untuk industri kecil atau perumahan di daerah-daerah terpencil yang tidak memiliki akses listrik yang memadai.

Sumber energi utama yang digunakan pada PLTH adalah sumber energi terbarukan, seperti energi angin, energi surya, atau energi air. Namun, PLTH juga menggunakan sumber energi konvensional, seperti generator diesel atau bahan bakar fosil lainnya, sebagai sumber energi cadangan untuk memastikan kelangsungan pasokan listrik ketika sumber energi terbarukan sedang tidak tersedia.

PLTH memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik konvensional, yaitu dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, memberikan pasokan listrik yang lebih stabil dan berkelanjutan di daerah-daerah yang sulit dijangkau oleh sistem pembangkit listrik konvensional, dan mengurangi biaya operasional dan pemeliharaan sistem pembangkit listrik karena menggunakan sumber energi yang murah dan mudah diperoleh. Namun, untuk memastikan operasional PLTH secara optimal, sistem ini memerlukan penempatan yang tepat dan pengelolaan yang baik. PLTH harus ditempatkan pada lokasi yang memiliki sumber energi terbarukan yang memadai dan kondisi cuaca yang stabil. Selain itu, pengelolaan dan pemeliharaan sistem pembangkit listrik pada PLTH harus dilakukan secara teratur dan profesional untuk memastikan keandalan dan efisiensi sistem.

Pada PLTH, *renewble Energy* yang digunakan untuk penelitian ini, yaitu menggunakan *Generator Piezoelektrik*, yang dikombinasikan dengan energi *Photovoltaic* sehingga akan menjadi suatu pembangkit yang efisien, efektif dan handal untuk mensuplai kebutuhan listrik *Lampu Warning Light*.

2. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH)

Pembangkit listrik tenaga hybrid adalah sebuah sistem pembangkit listrik yang menggunakan dua atau lebih sumber energi yang berbeda untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja dari pembangkit listrik tenaga *hybrid* bisa berbeda tergantung dari jenis sumber energi yang digunakan, namun secara umum prinsip kerjanya adalah sebagai berikut:

1. Sumber energi pertama menghasilkan listrik - Sumber energi pertama seperti mesin diesel atau turbin gas digunakan untuk menghasilkan listrik. Biasanya sumber energi pertama ini digunakan saat permintaan listrik sedang tinggi atau sumber energi lainnya tidak tersedia.
2. Sumber energi kedua digunakan saat tersedia - Sumber energi kedua seperti panel surya, turbin air, atau turbin angin digunakan saat tersedia untuk menghasilkan energi listrik. Sumber energi kedua biasanya digunakan saat permintaan listrik rendah dan sumber energi pertama tidak diperlukan.
3. Sistem kontrol mengatur penggunaan sumber energi - Sistem kontrol mengatur penggunaan sumber energi untuk memastikan bahwa sumber energi yang tersedia digunakan secara efisien dan optimal. Sistem kontrol juga mengoptimalkan penggunaan sumber energi untuk mengurangi biaya operasional dan emisi gas rumah kaca.
4. Energi listrik disimpan dalam baterai - Energi listrik yang dihasilkan oleh sumber energi kedua disimpan dalam baterai untuk digunakan saat sumber energi kedua tidak tersedia.
5. Listrik disalurkan ke jaringan listrik - listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga *hybrid* disalurkan ke jaringan listrik untuk digunakan oleh konsumen.

Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga *hybrid* dapat disesuaikan dengan jenis sumber energi yang digunakan dan kebutuhan energi listrik yang dihasilkan. Tujuan dari penggunaan pembangkit listrik tenaga *hybrid* adalah untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

2.2.3 Polisi Tidur (*Speed Bump*)

1. Pengertian Polisi Tidur (*Speed Bump*)

Speed bump adalah bagian pada jalan yang ditinggikan dengan tujuan sebagai pengurangan kecepatan pada jalan umum. Secara garis besar, *Rubber Speed Bump* merupakan salah satu alat kelengkapan pada jalan yang digunakan untuk menghambat laju kendaraan. Dalam hal tersebut, *Rubber Speed Bump* berperan penting dalam lalu lintas disuatu kota. Speed bump atau polisi tidur juga dipasang guna keselamatan pengendara kendaraan di jalan raya. Dengan adanya *Rubber Speed Bump*, pengendara akan lebih berhati-hati dalam mengendarai kendaraannya dan lebih waspada. Berikut beberapa sejarah dan pengertian polisi tidur dari beberapa ahli.

Istilah polisi tidur ini berasal dari Bahasa Inggris Britania *sleeping policeman*. Polisi tidur sudah dicatat Abdul Chaer dalam Kamus Idiom Bahasa Indonesia (1984) dan diberi makna “rintangan (berupa permukaan jalan yang ditinggikan) untuk menghambat kecepatan kendaraan” jadi, ungkapan polisi tidur pasti sudah ada sebelum tahun 1984.

Kamus Besar Bahasa Indonesia Edisi Pertama (1988) dan Edisi Kedua (1991), polisi tidur belum terdaftar. Polisi tidur mulai diakui dalam KBBI Edisi Ketiga (2001) dan diberi makna “bagian permukaan jalan yang ditinggikan secara melintang untuk menghambat laju kendaraan”.

Dalam Pasal 3 ayat (1) Peraturan Kemenhub No.3 Tahun 1994 tentang alat Pengendali dan Pengaman Pemakai Jalan menyebutkan bahwa alat pembatas kecepatan adalah kelengkapan tambahan pada jalan yang berfungsi untuk membuat pengemudi kendaraan bermotor mengurangi kecepatan kendaraannya.

Pada Pasal 7 Undang-undang Kemenhub No. 3 Tahun 1994 menyebutkan bahwa “alat pembatas kecepatan” dapat dibuat dengan menggunakan bahan yang sesuai dengan bahan dari badan jalan, karet, atau bahan lainnya yang mempunyai pengaruh serupa. Pemilihan bahan-bahan yang akan digunakan untuk membuat polisi tidur haruslah memperhatikan keselamatan pemakai jalan.

Dari beberapa pengertian diatas, dapat diambil kesimpulan bahwa *Rubber Speed Bump* atau “polisi tidur” merupakan suatu alat yang digunakan untuk membuat pengendara lebih waspada dan menghambat kecepatan kendaraan yang terbuat dari bahan karet yang aman untuk keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan. Selain itu, *Rubber Speed Bump* juga memiliki peran penting di jalan yaitu, Untuk meningkatkan keamanan dan keselamatan maka ketinggian polisi tidur diatur dan dilengkapi dengan rambu-rambu pemberitahuan terlebih dahulu mengenai adanya polisi tidur.

Akan tetapi polisi tidur yang ada di Indonesia lebih banyak bertentangan dengan desain polisi tidur yang diatur berdasarkan Keputusan Menteri Perhubungan No 3 Tahun 1994 dan hal demikian ini dapat membahayakan keamanan dan keselamatan para pemakai jalan tersebut.

2. Klasifikasi *Rubber Speed Bump*

Sebagaimana yang telah kita sebutkan diatas, bahwa *Rubber Speed Bump* merupakan alat yang digunakan untuk menghambat laju kendaraan. Selain itu, *Rubber Speed Bump* juga memiliki arti yang luas, tidak hanya tentang pembatas jalan atau yang sering disebut dengan “polisi tidur”, tetapi *Rubber Speed Bump* memiliki jenis lain yang berbeda. Pada jenisnya, *Rubber Speed Bump* mempunyai banyak macam bentuk dan tentunya berbeda kegunaan dan fungsinya. Banyak sekali masyarakat yang hanya mengetahui suatu benda saja, namun tidak mengetahui apa nama benda tersebut dan apakah kegunaannya bila berada pada jalan. Pada klasifikasinya, alat pembatas jalan memiliki banyak jenis yang serupa namun beda kegunaannya, berikut adalah beberapa jenis pembatas jalan serta kegunaannya:

a. Road Barrier/ pembatas jalan

Road Barrier disebut juga dengan pemisah jalan merupakan bagian dari jalan yang tidak dapat dilalui oleh kendaraan, dengan bentuk yang memanjang sesuai dengan jalan yang memiliki tujuan untuk memisahkan antara jalur yang berbeda fungsi, misalnya seperti pemisah antara jalur cepat dengan jalur lambat.



Gambar 2.1 Road Barrier (Pembatas Jalan)

b. Guard Rail/ pagar pembatas jalan

Pagar pembatas jalan atau biasa disebut pagar pengaman merupakan kelengkapan tambahan pada jalan yang berfungsi sebagai pencegah bagi kendaraan bermotor yang tidak dapat di kendalikan lagi agar tidak keluar dari jalur lalu lintas. Sebagaimana yang telah dijelaskan dalam Pasal 14 ayat (2) Peraturan Kemenhub No. 3 Tahun 1994 bahwa *Guard Rail* atau pagar pengaman terbuat dari bahan baja atau lempengan-lempengan konstruksi dan atau batang besi, tiang penyangga dan pengikatnya yang di pasang di tepi jalan. *Guard Rail* memiliki fungsi utama sebagai peredam energi jika sebuah kendaraan menabrak pembatas jalan. Redaman tersebut membuat kendaraan paling tidak terbalik atau terpelanting jauh dari lokasi kecelakaan.



Gambar 2.2 Guard Rail (Pagar Pembatas Jalan)

c. Traffic Cone /Kerucut Lalu Lintas

Kerucut lalu lintas merupakan suatu alat perangkat pengaturan lalu lintas yang bersifat sementara yang berbentuk kerucut terbuat dari plastik atau karet. Kerucut lalu lintas banyak digunakan untuk mengarahkan lalu lintas untuk menghindari bagian jalan yang sedang ada perbaikan, mengalihkan lalu lintas pada saat terjadi kecelakaan, atau untuk melindungi pekerja di jalan yang sedang melakukan pekerjaan jalan. Kerucut lalu lintas dibuat dengan warna yang mencolok seperti *oranye* atau merah yang dilengkapi dengan pemantul cahaya, sehingga dapat terlihat jelas pada siang maupun pada malam hari.



Gambar 2.3 Traffic Cone (Kerucut Lalu Lintas)

d. Kanstin

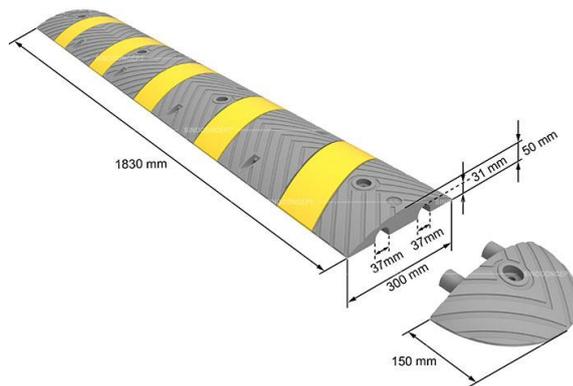
Kanstin merupakan bahan bangunan berupa beton yang berfungsi sebagai penguat yang dipasang di pinggir badan jalan, trotoar, jalan taman atau sebagainya. Fungsi penting Kanstin yakni merupakan pengunci agar susunan yang telah dipasang tidak bergeser.



Gambar2.4 Kanstin

e. Rubber Speed Bump

Rubber Speed Bump atau yang biasa sering disebut dengan polisi tidur dinamis. *Rubber Speed Bump* ini terbuat dari karet. *Rubber Speed Bump* digunakan sebagai pengganti “polisi tidur” yang terbuat dari karet, semen ataupun beton. *Rubber Speed Bump* ini lebih mudah dan lebih jelas terlihat karena warnanya yang mencolok sehingga dapat dilihat pada waktu malam hari.



Gambar 2.5 Rubber Speed Bump

f. Alat Pembatas Tinggi Dan Lebar Kendaraan

Dalam Pasal 8 Peraturan Kemenhub No.3 Tahun 1994, dijelaskan pula tentang alat pembatas tinggi dan lebar kendaraan yang merupakan suatu kelengkapan tambahan pada jalan yang berfungsi untuk membataskan tinggi dan lebar kendaraan beserta muatannya memasuki suatu ruas jalan tertentu. Kelengkapan yang dimaksud dapat berupa portal atau sepasang tiang yang ditempatkan di sisi kiri dan sisi kanan jalur lalu lintas.



Gambar 2.6 Alat Pembatas Tinggi Dan lebar Kendaraan

g. Pita Penggaduh

Pada Pasal 32 Peraturan Kemenhub No.3 Tahun 1994 menyebutkan secara detail mengenai definisi pita penggaduh. Pita penggaduh merupakan kelengkapan tambahan pada jalan yang berfungsi untuk membuat pengemudi lebih meningkatkan kewaspadaan. Pita penggaduh dapat berupa suatu marka jalan atau bahan lain yang dipasang melintang jalur lalu lintas dengan ketebalan maksimum 4 cm.



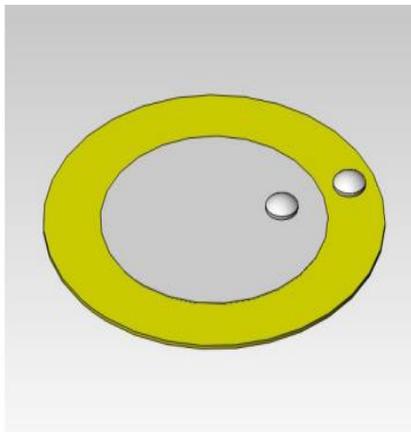
Gambar 2.7 Pita Penggaduh

Klasifikasi *Rubber Speed Bump* di atas adalah beberapa jenis marka jalan yang serupa dengan *Rubber Speed Bump*. Namun, alat-alat tersebut memiliki fungsi dan peranan tersendiri di jalanan yang berbeda dengan *Rubber Speed Bump*. *Rubber Speed Bump* berfungsi sebagai alat pembatas kecepatan jalan atau yang sering disebut polisi tidur dinamis yang digunakan untuk membuat pengendara berhati-hati dan lebih waspada. Namun demikian, Semua jenis dan klasifikasi *Rubber Speed Bump* di atas memiliki tujuan yang sama, yaitu sama-sama melindungi para pengendara, memberikan keselamatan dan juga kenyamanan dalam berlalu-lintas khususnya pada jalan tertentu. Dalam hal ini kesadaran masyarakat dalam tertib berkendara juga sangat diperlukan untuk membantu kesejahteraan dalam berlalu lintas. *Speed bump* merupakan prototipe sistem tuas sebagai alat konversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan memanfaatkan laju kendaraan pada bantalan (*bump*). Kendaraan yang melewati jalan raya akan menginjak bantalan (*bump*) yang terhubung dengan tuas dan pegas, *freewheel*, serta *flywheel* yang terhubung pada poros generator (Aris Suryadi dkk., 2020). Akibat putaran generator menghasilkan energi listrik. Daya keluaran pada generator disimpan pada *accumulator* selanjutnya daya listrik yang tersimpan dapat digunakan untuk penerangan jalan (Heru Firia Nugroho & Bambang Yuniyanto, 2016).

2.2.4 Piezoelektrik

1. Pengertian Piezoelektrik

Piezoelektrik berasal dari kata latin *piezein* yang artinya ditekan dan *piezo* yang artinya didorong. Pada tahun 1880an bahan dari piezoelektrik ditemukan oleh Jacques dan Pierre Curie untuk pertama kalinya. Karena makna dari kata *piezo* itu adalah ditekan, maka piezoelektrik akan bereaksi pada saat material dari piezoelektrik mendapatkan tekanan mekanik. Jacques dan Pierre menggabungkan ilmu pengetahuan mereka tentang piezoelektritas, maksud dari piezoelektritas sendiri adalah kemampuan dari bahan-bahan tertentu untuk menghasilkan sebuah energi listrik pada saat bahan-bahan itu didinginkan atau dipanaskan dengan menambahkan pemahaman akan perilaku dan struktur sebuah bahan kristal. Lalu mereka berdua untuk pertama kalinya mendemonstrasikan efek piezoelektrik dengan menggunakan bahan kuarsa, garam *rossel*, ratna cempaka dan kristal *turmalin*. Pada saat itu diketahui uji coba garam *rossel* dan kristal kuarsa lah menghasilkan kemampuan *piezoelektrisitas* yang paling besar. Maka dapat disimpulkan bahwa piezoelektrik adalah sebuah piranti yang menghasilkan medan listrik ketika piranti tersebut diberi tekanan mekanis.



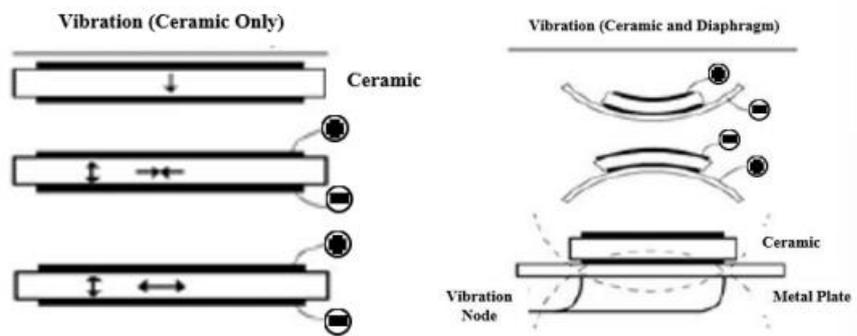
Gambar 2.8 Piezoelektrik

2. Gambaran Umum Mengenai Piezoelektrik



Gambar 2.9 Elemen Piezoelektrik

Piezoelektrik menurut kamus besar bahasa Indonesia digital merupakan arus listrik yang diperoleh dari efek piezoelektrisitas dimana terjadi ketika kristal diberi tekanan mekanis dan akan menimbulkan arus listrik. (Hidayatullah, Syukri and Syukriyadin, 2016).

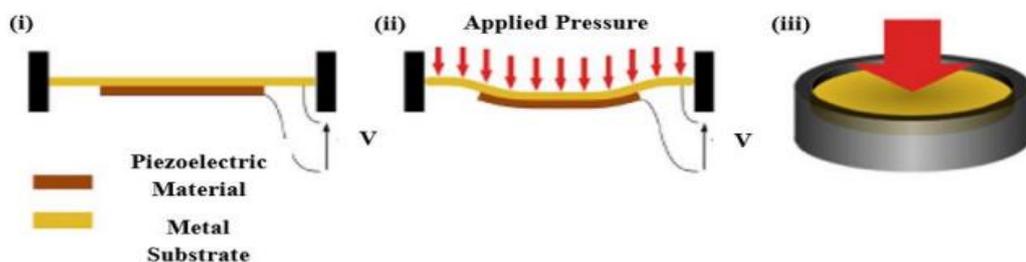


Gambar 2.10 Hubungan Beban terhadap output Tegangan Piezoelektrik

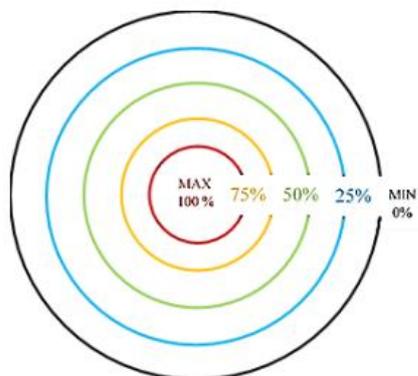
Piezoelektrik akan bergetar jika diberi energi listrik dan jika ditekan akan menghasilkan energi listrik. Sifat unik dari piezoelektrik seringkali digunakan pada teknologi *modern* seperti *oscillator*, sensor temperatur, *renewable energy* dan sebagainya. Bahan piezoelektrik terbentuk oleh keramik yang terpolarisasi sehingga beberapa bagian molekul bermuatan positif dan sebagian lagi bermuatan negatif (Tambunan, 2020). Material piezoelektrik yang paling banyak digunakan pada zaman sekarang ini adalah piezoelektrik dengan material berbasis keramik seperti *lead zirconium titanate* (PbZrTiO_3) atau juga sering dikenal dengan sebutan PZT. Material piezoelektrik berjenis keramik memiliki banyak kelemahan antara lain adalah materialnya yang getas (*brittle*), *yield strain* yang rendah, dan juga berat

yang disebabkan oleh densitas keramik yang cukup tinggi dan memakan biaya yang lumayan tinggi pada pembuatan piezoelektrik tersebut. (Hananto F.S dkk., 2011)

Piezoelektrik yang digunakan pada penelitian ini cukup banyak tersedia dipasaran Indonesia adalah jenis *Lead Zirconate Titanate (PZT)* yang berwujud kepingan logam seperti pada gambar 2.2.4.1 serta bekerja seperti pada gambar ilustrasi 2.2.4.3. Terdapat beberapa variasi ukuran elemen yang dapat digunakan antara lain elemen yang berukuran diameter 15mm, 25 mm, 35mm hingga 50mm. Implementasi penggunaan elemen piezoelektrik tersebut nampak pada gambar 2.2.4.3 Berdasarkan penelitian Patil pada tahun 2015, piezoelektrik tersebut memiliki karakteristik energi optimal yang dihasilkan berdasarkan letak tekanan yang diterima seperti pada gambar 2.2.4.5 Daya tertinggi yang dapat dihasilkan diperoleh pada saat tekanan berada pada titik tengah elemen piezoelektrik. (Deterre, Lefevre, and Dufour-Gergam, 2012)



Gambar 2.11 Perbedaan Piezoelektrik Saat Mendapat Tekanan



Gambar 2.12 Daya Yang Dihasilkan Piezoelektrik PZT Terhadap Letak Tekanan

3. Material Piezoelektrik

Material piezoelektrik adalah material yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik (*direct piezoelectric*) atau dari energi listrik menjadi energi mekanik (*inverse piezoelectric*). Penggunaan material jenis ini telah berkembang amat luas terutama dalam bidang teknologi sensor dan aktuator. Dalam penerapannya untuk sensor, material piezoelektrik banyak digunakan dalam aplikasi pengukuran beban dinamis (*dynamic loads*), seperti pengukuran beban yang berfluktuasi, getaran, atau beban tumbukan (*impact loads*). Pengukuran beban dinamis ini banyak ditemui dalam bidang rekayasa mekanikal, rekayasa struktur, rekayasa medis, *sports engineering* dan *welfare engineering*. Dalam bidang rekayasa ini dibutuhkan material sensor yang bersifat ringan, fleksibel, *yields strain* yang cukup tinggi, cukup kuat menahan tumbukan yang keras serta mudah dalam hal penanganannya (*easy handling*).

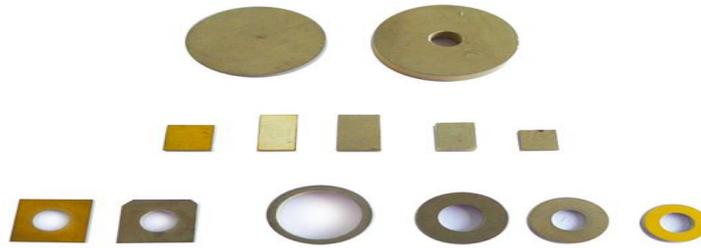
Material piezoelektrik yang umum dan banyak digunakan saat ini adalah material berbasis keramik seperti *lead zirconium titanate* (PbZrTiO_3) yang secara komersial dikenal dengan nama PZT dan *barium titanate* (BaTiO_3). Material-material berbasis keramik ini memiliki beberapa kelemahan yaitu sifatnya yang getas (*brittle*), *yield strain* yang rendah, cukup berat karena densitas keramik yang tinggi dan memakan biaya yang tinggi dalam pembuatannya. Kelemahan kelemahan ini tentu akan membatasi penggunaan material berbasis keramik ini dalam penerapannya, khususnya untuk pengukuran dinamis. Kelemahan-kelemahan ini dapat teratasi dengan penggunaan material sensor berbasis polimer, *Polyvinylidene Flouride* (PVDF) merupakan salah satu jenis *smart material* berbasis polimer yang memiliki kemampuan dalam piezoelektrik.

Material piezoelektrik yang digunakan adalah *quartz kristal* (SiO_2). Material ini sangat melimpah yaitu dalam bentuk pasir dengan struktur non-kristal. *Quartz* kristal terdiri dari atom –atom silicon dan oksigen yang harus tersusun rapi.

Jenis – jenis piezoelektrik:

1. Kristal Quartz (SiO_2), Galium, Galium Orthophosphate (GaPO_4).
2. Keramik Barium Titanate (BaTiO_3).

3. Polimer Poly Vinilidene Diflouride (PVDF).



Gambar 2.13 Jenis-jenis Material Piezoelektrik

4. Karakteristik Material Piezoelektrik

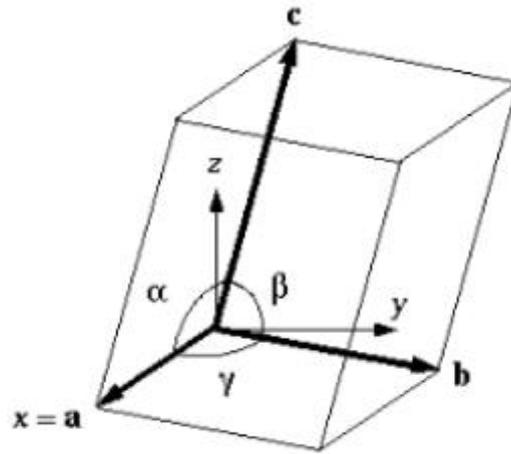
Material Piezoelektrik adalah keramik yang terpolarisasi, seperti material *quartz* (SiO_2) atau *barium titanate* (BaTiO_3) yang akan menghasilkan medan listrik material berubah dimensinya akibat gaya mekanik. Keramik yang terpolarisasi disini yaitu beberapa bagian molekul bermuatan positif dan sebagian yang lain bermuatan *negative* dengan elektroda-elektroda yang menempel pada dua sisi yang berlawanan. Pada saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi.

Penyesuaian molekul akan mengakibatkan material berubah dimensi. Fenomena tersebut dikenal dengan *electrostriction* (efek piezoelektrik) *Barium titanate* dan *zirconate titanate* merupakan material piezoelektrik buatan manusia. Di alam ada banyak material alami yang dapat memberikan efek piezoelektrik, seperti *berlinite*, *kuarsa*, *turmalin*, dan garam *rossel*. Material jenis ini antara lain yaitu lapisan tipis *rhombohedral lead zirconium titanate* (PZT) sebagai *actuator* untuk MEMS, lapisan tipis *aluminium nitride* (AlN) sebagai *filterfr* atau *resonantor* (orde GHz) berbasis efek *surface acoustic wave* (SAW), komposit piezoelektrik seperti serbuk keramik PTCa yang didispersikan dalam epoxy digunakan sebagai *actuator* pembalik (listrik menjadi energy mekanik).

5. Struktur Kristal

Struktur kristal dibangun oleh sel satuan (*Unit Cell*) yang merupakan sekumpulan atom yang tersusun secara khusus dan secara periodik berulang dalam

tiga dimensi dalam suatu kisi kristal (*crystal lattice*). Suatu kristal yang terdiri dari jutaan atom dapat dinyatakan dengan ukuran, bentuk, dan susunan sel satuan yang berulang.



Gambar 2.14 Struktur Kristal

Kisi kristal merupakan jarak antar atom pada kristal atau juga sering disebut dengan konstanta kisi. Suatu konstanta kisi kristal yang terbentuk dalam bentuk tiga dimensi diberi simbol a, b, dan c. Ketiga konstanta tersebut diberi simbol α , β , dan γ . Misalnya, yang berbentuk kubik, kisi nya sama dalam ketiga arah ($a = b = c$), sudut ketiganya sama besar yaitu 90° ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$).

6. Klasifikasi Bahan Piezoelektrik

a. Piezoelektrik Anorganik

Piezoelektrik anorganik merujuk pada bahan-bahan yang tidak mengandung unsur karbon dalam struktur molekulnya dan memiliki sifat piezoelektrik. Sifat piezoelektrik adalah kemampuan suatu bahan untuk menghasilkan tegangan listrik ketika diberikan tekanan mekanik atau gaya tekan. Bahan-bahan piezoelektrik anorganik memiliki struktur kristal yang teratur dan simetris. Ketika diberikan tekanan mekanik, ion-ion dalam kristal ini bergeser dari posisi keseimbangan mereka, menghasilkan perpindahan muatan dan menghasilkan medan listrik. Medan listrik yang dihasilkan kemudian dapat diambil sebagai tegangan listrik. Beberapa contoh bahan piezoelektrik anorganik yang umum digunakan adalah kuarsa (SiO_2), seng oksida (ZnO), kalsium titanat (CaTiO_3), dan berbagai bahan

keramik lainnya. Setiap bahan memiliki struktur kristal yang unik dan memengaruhi sifat piezoelektriknya.

Aplikasi dari piezoelektrik anorganik sangat luas. Mereka digunakan dalam berbagai industri dan teknologi, termasuk elektronik, sensor, pengendalian gerakan, perangkat medis, energi terbarukan, dan sebagainya. Contohnya termasuk mikrofon piezoelektrik, sensor tekanan, osilator kristal, transduser piezoelektrik, dan perangkat piezoelektrik lainnya.

Keuntungan utama dari bahan piezoelektrik anorganik adalah kestabilan, ketahanan terhadap suhu ekstrem, kekuatan mekanik yang tinggi, dan respons yang cepat terhadap tekanan atau getaran mekanik. Kekuatan piezoelektrik anorganik membuatnya menjadi pilihan yang populer dalam berbagai aplikasi di mana konversi energi mekanik menjadi energi listrik diperlukan.

b. Piezoelektrik Organik

Piezoelektrik organik merujuk pada bahan-bahan yang mengandung unsur karbon dalam struktur molekulnya dan memiliki sifat piezoelektrik. Sifat piezoelektrik adalah kemampuan suatu bahan untuk menghasilkan tegangan listrik ketika diberikan tekanan mekanik atau gaya tekan.

Bahan-bahan piezoelektrik organik terdiri dari molekul organik atau polimer yang diatur secara periodik. Ketika molekul-molekul ini diberikan tekanan mekanik, jarak antar molekul dapat berubah, menghasilkan muatan listrik dan menghasilkan medan listrik. Medan listrik yang dihasilkan kemudian dapat diambil sebagai tegangan listrik.

Beberapa contoh bahan piezoelektrik organik yang umum digunakan adalah *kristalin amino asam*, *poliviniliden fluorida (PVDF)*, *polipropilena (PP)*, dan *polietilena (PE)*. Setiap bahan memiliki struktur molekul yang unik dan memengaruhi sifat piezoelektriknya.

Aplikasi dari piezoelektrik organik juga sangat luas. Mereka digunakan dalam berbagai industri dan teknologi, termasuk elektronik fleksibel, sensor tekanan, pengendalian gerakan, perangkat medis, dan sebagainya. Contohnya termasuk pembangkit listrik dengan jalan mengkonversi energi kinetik menjadi

energi listrik dalam bentuk piezoelektrik organik yang digunakan pada sepatu, pakaian, dan tekstil lainnya.

Keuntungan utama dari bahan piezoelektrik organik adalah kekakuan mekanik yang rendah, fleksibilitas yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan kemudahan pembentukan. Bahan-bahan piezoelektrik organik dapat dibentuk menjadi film tipis atau fiber yang fleksibel dan dapat digunakan untuk aplikasi pada berbagai bentuk permukaan. Kelemahan utamanya adalah stabilitas suhu yang rendah dan kurangnya ketahanan terhadap radiasi dan suhu tinggi.

c. Piezoelektrik Gabungan

Piezoelektrik gabungan mengacu pada penggunaan bahan-bahan yang merupakan kombinasi dari material piezoelektrik anorganik dan organik. Dalam sistem piezoelektrik gabungan, bahan anorganik dan organik digabungkan secara sinergis untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing tipe bahan tersebut.

Dalam pendekatan piezoelektrik gabungan, bahan anorganik bertanggung jawab untuk memberikan stabilitas mekanik, kekuatan struktural, dan respons yang cepat terhadap tekanan mekanik. Bahan anorganik sering digunakan sebagai lapisan aktif dalam sistem piezoelektrik gabungan karena sifat piezoelektriknya yang kuat. Contohnya, lapisan tipis dari bahan anorganik seperti kuarsa, turmalin, atau kalsium titanat dapat digunakan untuk menghasilkan respons piezoelektrik yang kuat terhadap tekanan mekanik.

Di sisi lain, bahan organik bertanggung jawab untuk memberikan fleksibilitas, kekakuan mekanik yang rendah, dan kemampuan pembentukan. Bahan organik sering digunakan sebagai lapisan penyangga atau substrat untuk melindungi dan mendukung lapisan piezoelektrik anorganik. Polimer organik seperti *poliviniliden fluorida* (PVDF) atau *polietilena tereftalat* (PET) dapat digunakan dalam sistem piezoelektrik gabungan untuk memberikan fleksibilitas mekanik dan kemampuan pembentukan yang baik.

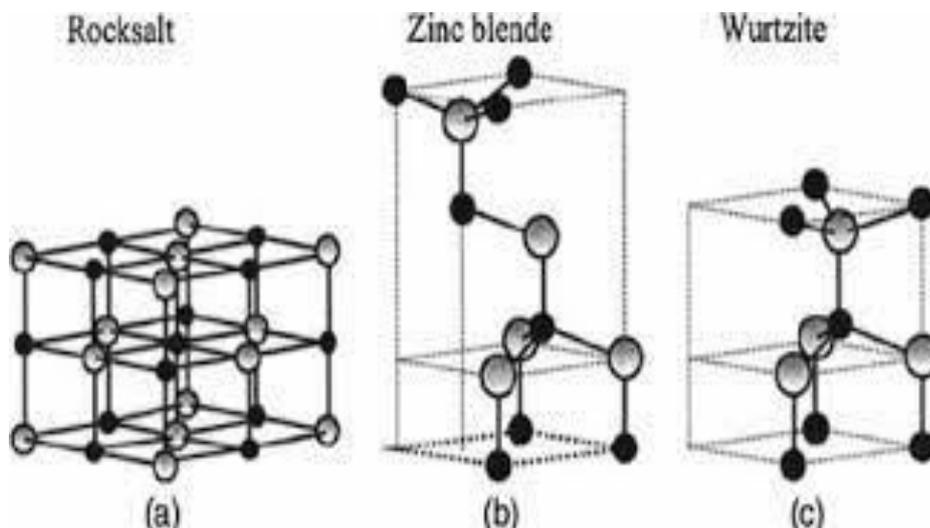
Dengan menggabungkan kekuatan bahan anorganik dan organik, sistem piezoelektrik gabungan dapat menghasilkan perangkat dengan sensitivitas tinggi, kekuatan mekanik yang baik, fleksibilitas, dan kemampuan bentuk yang beragam.

Ini membuka jalan untuk aplikasi yang lebih luas dalam elektronik fleksibel, sensor tekanan yang lentur, pengumpul energi kinetik yang dapat dibentuk, dan lain sebagainya.

7. Pembuatan Bahan Piezoelektrik

Bahan piezoelektrik adalah bahan yang menghasilkan tegangan listrik apabila mengalami perubahan dimensi akibat gaya tekanan atau gaya tarik yang dialaminya. (Wira Hidayatullah dkk., 2016) Material piezoelektrik diproduksi dengan komposisi $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ (PZT) base material yang mengandung unsur timbal (Pb) dan berbahaya terhadap lingkungan. Karena itu perlu penelitian terhadap material keramik piezoelektrik bebas timbal dengan alternatif material pengganti $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ yang ramah lingkungan mulai dikembangkan. material keramik bebas timbal $[\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x}\text{K}_x)_{0.5}]\text{TiO}_3$ (BNKT) dibuat dengan teknik konvensional, raw material penyusun berupa serbuk oksida dan berkarbonat dengan variasi komposisi $x = 0.16 ; 0.17 ; 0.20$.

Campuran serbuk pada masing – masing komposisi dikompaksi melalui metode *dry pressing*, kemudian disintreing dengan variasi temperature 10000C, 10500C, dan 11000C dengan lama waktu penahanan selama 2 jam. Perubahan variabel komposisi x sangat mempengaruhi ukuran kristal dimana nilai komposisi paduan x akan meningkatkan jarak interplanar d , dan akan berpengaruh pada nilai konstanta dielektrik.

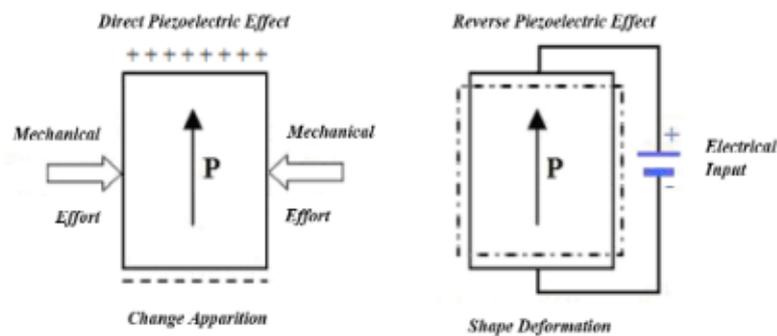


Gambar 2.15 Perbedaan Struktur Kristal

8. Prinsip Kerja Piezoelectric

Piezoelectric terjadi jika medan listrik terbentuk ketika material dikenai tekanan mekanik. Pada saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi. Fenomena tersebut dikenal dengan *electrostiction*. Lantai *Piezoelectric* ini bekerja dengan prinsip tekanan, saat terjadi perubahan tekanan alat ini akan menghasilkan listrik dalam jumlah yang kecil, namun jika digunakan banyak, alat ini dalam suatu wilayah yang luas akan mampu menghasilkan listrik yang cukup besar. Untuk penggunaan pada kehidupan sehari-hari sebenarnya alat ini sangat berguna untuk menghasilkan energi, namun pemasangannya harus pada tempat tertentu yang potensial dan juga mengalami perubahan tekanan seperti polisi tidur di jalan raya, sehingga alat ini efektif dalam menghasilkan listrik.

Piezoelektrik mampu merubah penyensoran, aktuasi, kontrol dan respon kerangka. Berikut gambar yang menunjukkan skema perubahan energi mekanik menjadi energi listrik yang terjadi pada piezoelektrik.



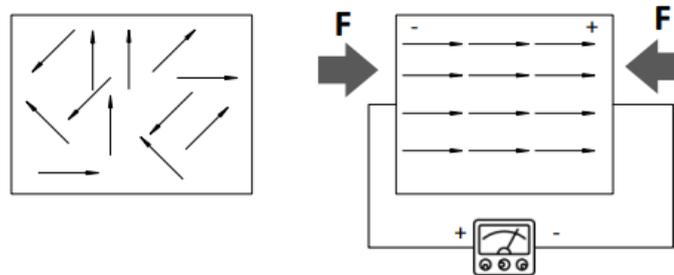
Gambar 2.16 Mekanisme Pembangkitan Energi Listrik Direct dan Reverse Piezoelectric Effect

Gambar 2.16 menunjukkan bahwa efek piezoelektrik dibagi menjadi dua bagian utama. Pertama adalah kemampuan dari piezoelektrik untuk mengubah gaya mekanik (P) menjadi gaya elektrik. Kedua adalah kemampuan dari piezoelektrik untuk mengubah tenaga listrik yang diberikan kepada piezoelektrik menjadi energi regangan mekanikal

9. Efek Piezoelektrik

Efek piezoelektrik merujuk pada fenomena di mana materi menghasilkan potensial listrik saat diberikan tekanan mekanik atau mengalami deformasi. Efek ini ditemukan oleh Pierre dan Jacques Curie pada tahun 1880-an.

Ketika materi piezoelektrik mengalami tekanan atau deformasi mekanik, struktur kristal dalam materi mengalami pergeseran atom atau ion, menyebabkan perubahan dalam distribusi muatan listrik di dalamnya. Akibatnya, polarisasi listrik terjadi, yaitu adanya dipol dalam materi. Hal ini menghasilkan potensial listrik yang dapat diukur antara dua sisi material.



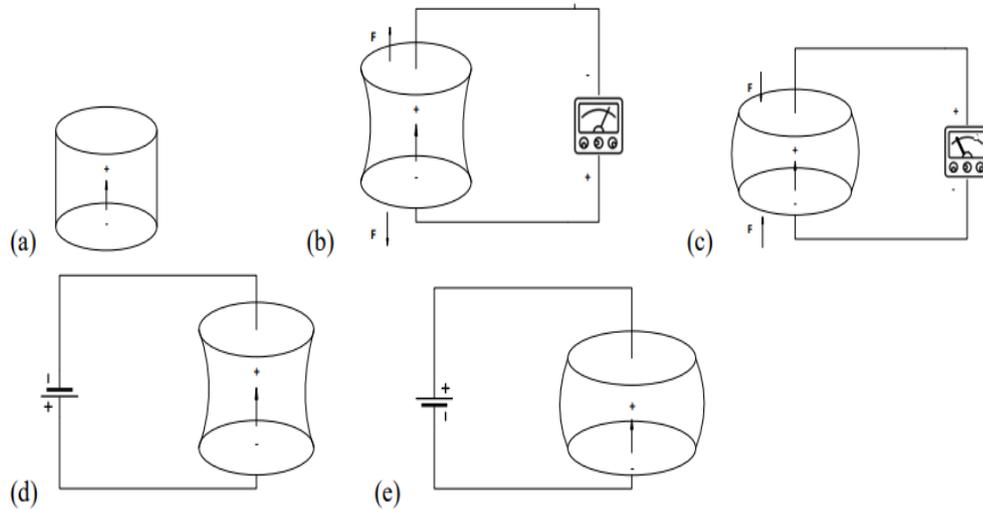
Gambar 2.17 Polarisasi pada Piezoelektrik

Efek piezoelektrik ditemukan dalam berbagai materi seperti kuarsa, turmalin, keramik feroelektrik, polimer piezoelektrik, dan bahan komposit tertentu. Salah satu contoh penerapan efek piezoelektrik adalah pada penggunaan transduser piezoelektrik. Transduser ini mengubah energi mekanik menjadi energi listrik atau sebaliknya. Misalnya, pada mikrofon piezoelektrik, gelombang suara yang mengenai transduser akan menyebabkan deformasi pada material piezoelektrik dan menghasilkan sinyal listrik sesuai dengan amplitudo gelombang suara.

Efek piezoelektrik juga digunakan dalam sensor tekanan, penggerak piezoelektrik, generator listrik piezoelektrik, dan banyak lagi. Di bidang teknologi, efek piezoelektrik telah memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan perangkat elektronik dan sistem yang melibatkan konversi energi mekanik dan listrik.

Secara singkat, efek piezoelektrik adalah kemampuan materi untuk menghasilkan potensial listrik ketika diberikan tekanan mekanik atau deformasi.

Fenomena ini telah dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi teknologi yang melibatkan konversi energi mekanik menjadi energi listrik atau sebaliknya.



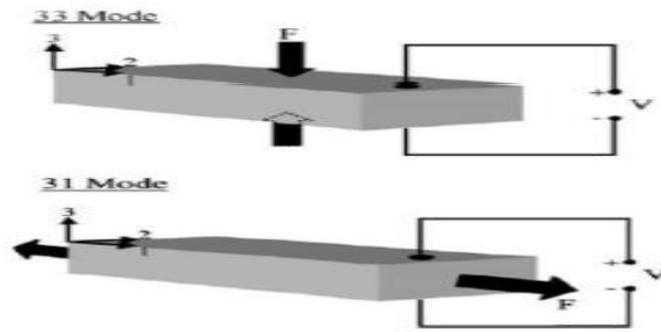
Gambar 2.18 Efek Piezoelektrik

(a) sebelum terjadi efek piezoelektrik, (b) dan (c) efek piezoelektrik langsung, (d) dan (e) efek piezoelektrik terbalik

10. Mode Coupling

Mode Coupling adalah proses terjadinya deformasi pada piezoelektrik dengan beberapa gaya-gaya tertentu. Beban listrik yang menempel pada benda padat tertentu dibawah aksi mekanik dapat disebut juga sebagai efek piezoelektrik. Beban yang diterapkan pada piezoelektrik menyebabkan terjadinya tegangan pada elektroda yang terdapat pada piezoelektrik. Piezoelektrik dapat menerima tekanan dengan sejajar atau tegak lurus sesuai rancangan piezoelektrik. Semakin besar beban yang diberikan maka akan semakin besar juga gaya listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik (Nyamayoka dkk, 2018).

Gambar berikut menunjukkan gaya tekan (F) yang berlaku pada piezoelektrik yang diberikan pada sumbu vertikal dan sumbu horizontal. Tekanan yang diberikan pada piezoelektrik sehingga piezoelektrik akan menghasilkan tegangan listrik (V) dari energi mekanik yang diberikan.



Gambar 2.19 Mode Coupling Piezoelektrik

11. Aplikasi Piezoelektrik

Banyak situasi yang mengharuskan kita untuk melakukan suatu hal yang baru seperti konversi energi mekanik menjadi sinyal elektrik. Hal ini dapat kita lakukan dengan suatu alat yaitu transduser piezoelektrik. Transduser merupakan suatu alat sederhana yang akan mengubah energi menjadi energi lain (contoh mengubah suara, cahaya, tekanan mekanik menjadi energi listrik).

Dalam peralatan ultrasound, piezoelektrik transduser akan mengkonversi energi listrik menjadi getaran mekanik, karena terlalu cepat getaran tersebut akan menimbulkan suara. Pada *microphone* piezoelektrik transduser akan mengkonversi energi bunyi menjadi energi listrik. Pada fenomena ini kristal piezoelektrik akan dapat membantu. Cukup meletakkan bagian penggetar *mikrophone* kepada kristal dan kristal akan bergerak maju – mundur menghasilkan sinyal elektrik.

Berikut adalah beberapa aplikasi sistem generator piezoelektrik pada penelitian yang telah ada sebelumnya.

Electrostatic, electromagnetic dan piezoelektrik adalah metode penghasil energi mekanikal yang paling banyak digunakan pada kalangan umum. Penghasil daya elektromekanikal terbesar berasal dari kegiatan yang berhubungan dengan gerakan dan juga getaran. Bahkan, dalam beberapa tahun terakhir penelitian paling sering dirangsang dengan penemuan-penemuan baru oleh miniatur generator listrik dan mendaur ulang energi disekitar dan melakukan penyimpanan dalam baterai.

Banyak peneliti yang melakukan penelitian pada miniatur generator yang memiliki harga yang murah untuk dilakukan penelitian (Kokkinopoulos, 2014).

Piezoelektrik dapat menyalakan perangkat yang membutuhkan daya kecil. Penelitian kecil mengenai piezoelektrik telah dikembangkan dan diaplikasikan pada skala besar. Generator piezoelektrik adalah teknologi yang menjanjikan perihal penghasil energi dikarenakan piezoelektrik dapat menghasilkan energi dari berat, gerakan, getaran dan perubahan temperatur dan masih banyak lagi pengaplikasiannya pada sarana lain (Kokkinopoulos, 2014).

Pada awal 2008, *East Japan Railway Company* (JR East) mempunyai fokus dalam meneliti pembuatan stasiun kereta yang memiliki tingkat hemat energi yang tinggi. Karena alasan itu, mereka memasang bantalan piezoelektrik pada lantai untuk pemesanan tiket kereta pada stasiun di Tokyo. Sebagai hasilnya, beberapa fasilitas sudah ditenagai oleh tenaga piezoelektrik itu sendiri seperti contoh lampu-lampu dan mesin tiket otomatis yang ada pada stasiun kereta tersebut (Han & Kaajakari, 2009).



Gambar 2.20 Instalasi Karpet Piezoelektrik di Gerbang Tiket Stasiun Tokyo

Penelitian lainnya yang inovatif dengan menggunakan piezoelektrik adalah sebuah klub malam yang berada di London yang dimana klub tersebut membuat sebuah klub malam yang *yangeco-friendly*. gerakan dari penari-penari yang ada di klub malam tersebut relatif menghasilkan 60% dari kebutuhan daya listrik yang ada pada gedung klub malam tersebut. Semua ini bisa terwujud dikarenakan diletakkannya piezoelektrik yang ada pada lantai dansa klub malam tersebut dimana pemilik klub malam tersebut menggunakan keramik piezoelektrik untuk mengubah energi

mekanik penari-penari tersebut menjadi energi listrik (N.S. Shenck & J. A Paradiso, 2001).

Dari penelitian – penelitian diatas peneliti terinspirasi untuk melakukan penelitian tentang piezoelektrik dan akan melakukan rancangan sistem *hybrid* generator piezoelektrik dengan *Sollar Cell* dengan media *Speed Bump* di dalam penelitian ini.

2.2.5 Penelitian Terdahulu Terkait *Speed Bump* Piezoelektrik

Berikut hasil penelitian sebelumnya dengan *speed bump* dapat menghasilkan listrik dari kendaraan roda 2 dan 4 yang melintas dengan rangkaian seri. (Abdurahim Sidiq, 2021).

Tabel 2.3 Hasil Arus Listrik dan Tegangan Listrik

No	Berat Spesifikasi Kendaraan dan Berat Penumpang	Arus Listrik (A)	Tegangan Listrik (V)
1	Yamaha Byson dan Berat Penumpang	0.13	5,48
2	Yamaha Mio Sporty dan Berat Penumpang	0.24	9.87
3	Yamaha Byson dan Berat Penumpang	0.39	17.88
4	Honda Vario 125cc dan 2 Penumpang	0.17	5.83
5	Yamaha Byson dan Berat Penumpang	0.15	6.07
6	Mobil RANGER	0.34	15.75



Gambar 2.21 Perakitan Piezoelektrik pada Speed Bumper



Gambar 2.22 Proses Pengujian Pembangkit Listrik Tenaga Piezoelektrik Dengan Media Speed Bumper

12. Rangkaian Pembangkitan Piezoelektrik

1) Rangkaian Seri

Rangkaian seri merupakan rangkaian yang hanya ada satu jalur tempat arus listrik mengalir dari sumber arus listrik. Pada Gambar rangkaian seri dapat dijelaskan bahwa untuk pemasangannya pada piezoelektrik bagian positif piezo pertama disambungkan ke bagian negatif piezo kedua dan bagian positif piezo kedua disambungkan ke bagian negatif piezo ke tiga begitu seterusnya. Untuk Dayanya jumlah total daya yang masuk ke suatu titik percabangan sama dengan jumlah daya yang keluar pada titik percabangan tersebut, sehingga bisa dirumuskan dengan persamaan berikut:

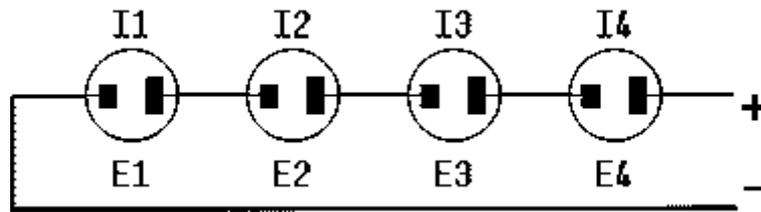
$$E_{total} = E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = \dots = E_N \quad (2.1)$$

Sedangkan untuk total arusnya pada rangkaian seri adalah sama dengan penjumlahan arus yang dihasilkan oleh tiap komponen, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_N \quad (2.2)$$

Dimana E = Daya (Watt) E_{total}

I = Arus (Ampere)



Gambar 2.23 Rangkaian Seri Piezoelektrik

2) Rangkaian Paralel

Rangkaian paralel adalah rangkaian yang memiliki lebih dari satu jalur tempat arus listrik mengalir dari sumber arus listrik. Pada Gambar dijelaskan bahwa rangkaian piezoelektrik secara paralel disusun dengan cara menggabungkan semua bagian positif dari piezo menjadi satu dan juga menghubungkan semua bagian negatif piezo menjadi satu juga. Untuk dayanya jumlah total daya yang masuk pada suatu titik percabangan merupakan penjumlahan daya yang keluar pada setiap titik percabangan tersebut sehingga bisa dirumuskan persamaannya sebagai berikut:

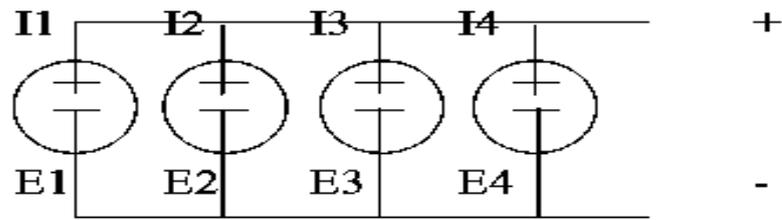
$$E_{total} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + \dots + E_N \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk arusnya pada rangkaian paralel, sesuai dengan bunyi dari *Hukum Kirchof 1* "Arus listrik yang masuk pada suatu titik percabangan sama dengan arus yang keluar pada suatu titik percabangan tersebut, sehingga persamaannya bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = \dots = I_N \quad (2.4)$$

Dimana E = Daya (Watt)

I = Arus (Ampere)



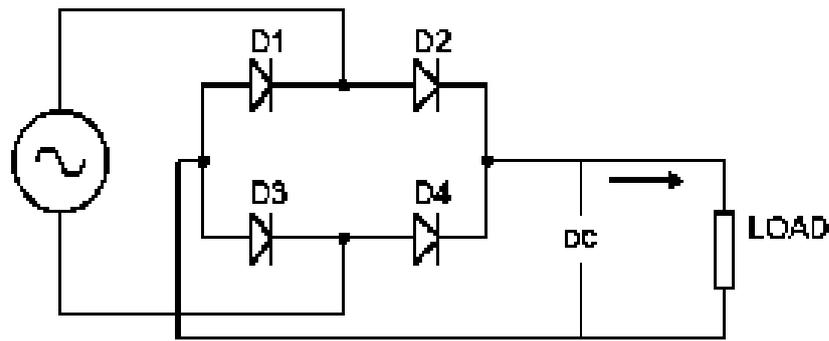
Gambar 2.24 Rangkaian Pararel Piezoelektrik

3) Rangkaian Penyearah dan Regulator

Tegangan keluaran dari piranti piezoelektrik yang berupa tegangan Ac atau sinyal impuls tidak bisa atau kurang efektif bila dimanfaatkan secara langsung, sehingga dibutuhkan suatu sistem rangkaian seperti sistem *harvesting energy*, sistem ini terdiri atas rangkaian *rectifier* (Penyearah), regulator dan media penyimpanan energi. Penyearah dan regulator merupakan komponen-komponen elektronika yang terdiri atas penyearah jembatan dan juga regulator tegangan yang dibuat dalam satu rangkaian. Penyearah gelombang penuh berfungsi untuk merubah sinyal listrik Ac (Bolak-balik) menjadi sinyal listrik Dc (Searah). Sedangkan regulator tegangan hanya berfungsi untuk menstabilkan tegangan keluaran.

Penyearah sistem jembatan ini ialah sebuah penyearah yang memakai empat buah dioda yang disusun seperti model jembatan. Penyearah sistem jembatan bisa menghasilkan keluaran gelombang penuh. Penyearah sistem jembatan ini disusun oleh empat buah dioda yang bekerja secara bergantian pada tiap fase sinyal sinusoidal. Hal ini mengakibatkan keluaran penyearah sistem jembatan ini sama dengan penyearah gelombang penuh.

Sebuah penyearah sistem jembatan sederhana dapat digambarkan dengan empat buah dioda yang disusun seperti model jembatan. Penyearah terdiri dari empat buah dioda, tetapi hanya dua dioda yang bekerja pada masing-masing fase sinyal sinus. Dioda D1 dan D3 menyearahkan tegangan positif dari sinyal sinus, sedangkan D2 dan D4 meyearahkan tegangan negatif dari sinyal sinus Berikut gambar rangkaian penyearah jembatan:

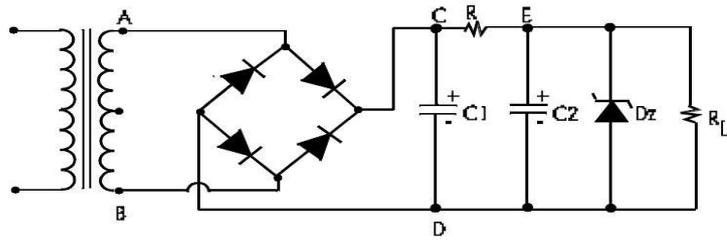


Gambar 2.25 Rangkaian Penyearah Tegangan

Prinsip kerja rangkaian dari Gambar diatas cukup sederhana, arus akan mengalir ke D2 apabila rangkaian mendapat siklus sinyal Ac yang bagian positif, kemudian ke beban dan kembali lagi melalui D3. Pada saat siklus positif terjadi D4 dan D1 secara bersamaan akan mengalami reverse bias sehingga arus tidak akan bisa mengalir melalui D4 dan D1. Kemudian arus akan mengalir ke D4 dan D1 apabila rangkaian mendapat siklus sinyal negatif, dan sebaliknya D2 dan D3 akan mengalami *reverse* bias atau akan bersifat isolator sehingga arus tidak bisa mengalir melalui D2 dan D3.

Secara sederhana fungsi dari regulator tegangan adalah untuk menstabilkan output keluaran tegangan dari suatu sumber. Karna biasanya *output* dari tegangan keluaran Dc yang berasal dari rangkaian penyearah dioda tidak stabil atau berubah-ubah nilai keluarannya pada saat beroperasi. Penyebab utamanya karna terjadinya ketidakstabilan pada keluaran suatu sumber adalah karna biasanya adanya perubahan pada masukan sumber Ac dan juga beban yang bervariasi.

Terjadinya perubahan catu daya akan berakibat cukup serius pada sebagian peralatan elektronika, regulator tegangan untuk suatu sumber tegangan yang paling simple dan sederhana ialah dengan menggunakan sebuah dioda zener. Berikut adalah rangkaian sederhana menggunakan sebuah dioda zener yang difungsikan sebagai regulator:



Gambar 2.26 Rangkaian Regulator Tegangan

Pada Gambar diatas merupakan sebuah contoh rangkaian sederhana untuk cara penerapan regulator tegangan. Hanya dengan memakai satu buah dioda zener yang dipasang dalam posisi *reverse bias*, *dioda zener* ini hanya akan bekerja pada saat diberikan tegangan *reverse bias*. Posisi pemasangannya *dioda zener* cukup dipasang paralel dengan beban resistor dengan posisi *reverse bias*.

4) Rangkaian Kapasitor

Selain baterai, kapasitor juga bisa dijadikan sebagai media penyimpanan, karena alat yang di buat dalam bentuk prototipe sehingga daya yang dihasilkan cukup kecil, sehingga media penyimpanannya bisa diaplikasikan menggunakan kapasitor. Suatu kapasitor dengan kapasitansi C bila dihubungkan dengan suatu sumber tegangan V maka setelah beberapa waktu akan terisi oleh muatan sebesar:

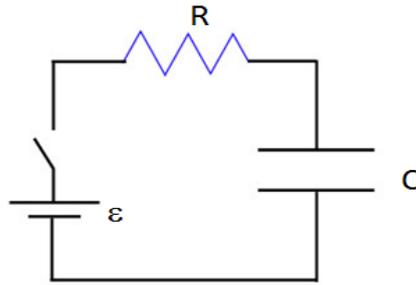
$$Q = C \times V \quad (2.5)$$

Dimana: Q = Jumlah muatan listrik (Coloumb)

C = Kapasitas Kondensator (Farad)

V = Tegangan Listrik (Volt)

Berikut gambar rangkaian sebuah kapasitor dalam keadaan kosong dan belum dihubungkan dengan sumber tegangan:



Gambar 2.27 Rangkaian Sebuah Kapasitor Dalam Keadaan Kosong

Kapasitor akan terhubung dengan sumber tegangan saat saklar ditutup. Kapasitor akan segera terisi muatan tetapi tidak akan langsung penuh. Perlu beberapa waktu agar kapasitor bisa terisi penuh. Hal tersebut didapati dalam persamaan berikut:

$$V_c(t) = V_{in} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (2.6)$$

Dimana: R = Resistansi/hambatan (ohm)
 C = Kapasitansi (Farad)
 t = Konstanta Waktu (sekon)
 V = Tegangan (V).

13. Kelemahan dan Kelebihan Piezoelektrik

Kelemahannya adalah piezoelektrik bukan alat elektrik yang bagus. Ada sedikit kebocoran di piezoelektrik. Karena fenomena ini ada konstanta waktu penyimpanan tegangan pada piezoelektrik setelah diberi tekanan. Konstanta ini tergantung pada kapasitas elemen dan resistansi kebocoran. Piezoelektrik juga memiliki kelebihan dibandingkan mekanisme sensing lain yaitu piezoelektrik dapat membangkitkan tegangan sendiri. Karena itu piezoelektrik tidak memerlukan daya dari luar untuk operasionalnya. Efek piezoelektrik memiliki hukum penyekalan yang menarik sehingga bermanfaat pada piranti kecil. Kekurangan piezoelektrik adalah sensitifitasnya hanya bagus untuk sinyal yang berubah – ubah terhadap waktu.

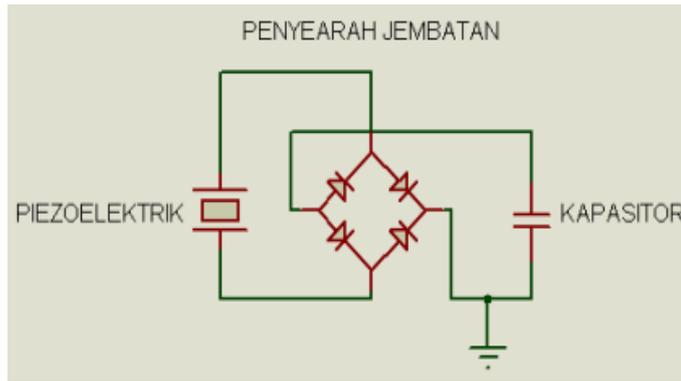
2.2.6 Sistem Pemanen Energi

Secara umum, pemanen energi diartikan sebagai upaya menghimpun atau mengumpulkan energi yang nilainya relatif kecil kemudian disimpan dalam suatu media penyimpanan sehingga terakumulasi menjadi energi yang lebih besar dan dapat digunakan. Sistem pemanen energi identik dengan pemanfaatan energi yang terbuang dari aktivitas sehari-hari. Energi tersebut dikonversi menjadi bentuk energi lain salah satunya adalah energi listrik.

Energi yang dihasilkan oleh sistem pemanen energi cenderung ramah lingkungan bahkan ada diantaranya yang *zero* emission sehingga banyak penelitian dilakukan untuk mengoptimalkan sistem pemanen energi. Seperti yang telah dibahas pada tinjauan pustaka diatas, sistem pemanen energi khususnya yang digunakan untuk memanen energi listrik dari piezoelektrik cukup beragam. Mulai metode yang sangat sederhana hingga yang lebih kompleks untuk mengoptimalkan energi yang dihasilkan piezoelektrik. Metode-metode tersebut diantaranya adalah sebagai berikut:

a. Metode Rectifier dan Kapasitor

Keluaran piezoelektrik yang bersifat impuls serta adanya *direct* dan *indirect effect* pada piezoelektrik mengharuskan keluaran tersebut diubah menjadi lebih stabil agar dapat disimpan pada media penyimpanan sekunder seperti baterai atau kapasitor. Sistem penyearah yang biasanya digunakan mengubah listrik AC menjadi DC dapat juga digunakan untuk upaya menstabilkan keluaran piezoelektrik tersebut seperti pada gambar 2.28. Keluaran piezoelektrik dapat bersifat positif (+) dan negatif (-), dengan sistem penyearah maka keluaran yang dihasilkan hanya bersifat tegangan positif atau DC positif yang kemudian baru dapat disimpan atau digunakan pada rangkaian listrik DC.



Gambar 2.28 Skema Sederhana Metode Pemanen Energi Piezoelektrik dengan Penyearah Jembatan Dan Kapasitor

b. Rectifier atau Penyearah

Pada metode ini, berlaku prinsip penyearahan yang biasa digunakan dalam mengkonversi input AC menjadi output DC. Adapun prinsip dasar penyearahan tersebut adalah sebagai berikut:

1) *Half Wave Rectifier*

Half Wave Rectifier atau Penyearah Setengah Gelombang secara sederhana menggunakan 1 buah dioda sebagai komponen utama dalam menyearahkan gelombang AC. Prinsip kerja dari penyearah setengah gelombang ini adalah mengambil sisi sinyal positif dari gelombang AC. Pada saat sumber memberikan *output* sisi positif dari gelombang AC maka dioda dalam keadaan *forward* bias sehingga sisi positif dari gelombang AC tersebut dilewatkan dan pada saat sumber memberikan sinyal sisi negatif gelombang AC maka dioda dalam posisi *reverse* bias, sehingga sinyal sisi negatif tegangan AC tersebut ditahan seperti terlihat pada gambar 2.29 a.

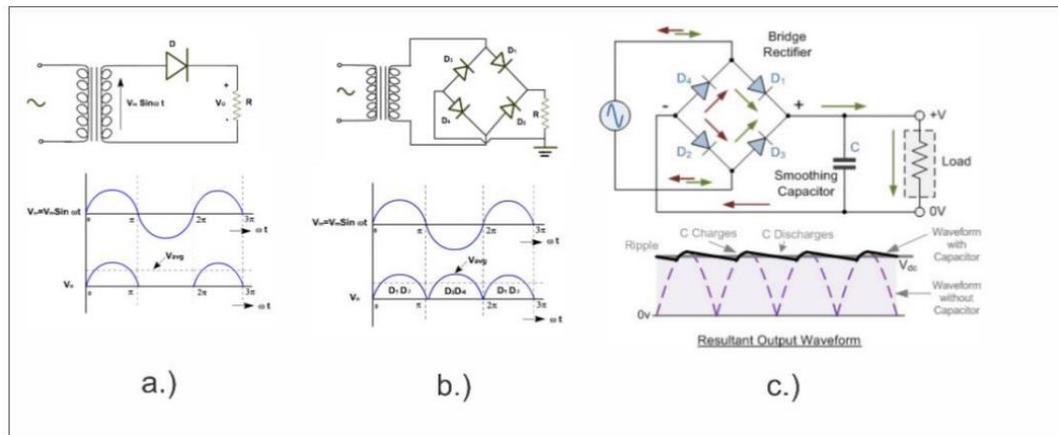
2) *Full-Wave Rectifier*

Full-wave rectifier menggunakan 2 atau 4 dioda untuk menyearahkan gelombang AC. *Full-wave rectifier* dengan 4 dioda yang paling sering digunakan. Prinsip kerjanya dimulai pada saat output sumber memberikan level tegangan sisi positif, maka D1, D4 pada posisi *forward* bias dan D2, D3 pada posisi *reverse* bias sehingga level tegangan sisi puncak positif tersebut akan di lewatkan melalui D1 ke D4. Kemudian pada saat output sumber memberikan level tegangan sisi

puncak negatif maka D2, D4 pada posisi *forward* bias dan D1, D2 pada posisi *reverse bias* sehingga level tegangan sisi negatif tersebut dialirkan melalui D2, D4. Penjelasan lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2.29 b.

3) Full-Wave Rectifier dengan Kapasitor

Pada gambar 2.29 c untuk *full-wave rectifier* didapatkan *ripple* yang cukup besar. Sehingga di pasang kapasitor untuk mengurangi besar *ripple* tersebut. Hasil dari pengurangan *ripple* bergantung pada kapasitas kapasitor yang digunakan.



Gambar 29 Wave Rectifier a.) Half-Wave Rectifier, b.) Full-Wave Rectifier, c.) Full-Wave Rectifier dengan kapasitor beserta gelombang output

c. Kapasitor

Kapasitor adalah salah satu jenis komponen elektronika yang memiliki kemampuan dapat menyimpan muatan arus listrik di dalam medan listrik selama batas waktu tertentu dengan cara mengumpulkan ketidakseimbangan internal dari muatan arus listrik tersebut. Kapasitor juga memiliki sebutan lain, yakni kondensator dan dikategorikan sebagai komponen elektronika pasif. Fungsi dari kapasitor sendiri bermacam-macam diantaranya adalah:

- 1) Sebagai Penyimpan sebuah arus atau tegangan listrik
- 2) Sebagai konduktor yang bisa melewatkan arus AC (*Alternating Current*)
- 3) Sebagai isolator yang bisa menghambat arus DC (*Direct Current*)
- 4) Sebagai *filter* (penyaring) dalam rangkaian *power supply* (Catu Daya)
- 5) Sebagai pembangkit frekuensi dalam rangkaian osilator
- 6) Sebagai penggeser fasa.

- 7) Sebagai pemilih gelombang frekuensi (Kapasitor *Variabel* yang digabungkan dengan *Spul Antena* dan *Osilator*)
- 8) Sebagai *kopling*.

Sedangkan Kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan listrik disebut sebagai kapasitansi kapasitor. Muatan listrik (Q) berbanding lurus dengan beda *potensial* (V) yang dapat dihitung dengan rumus berikut

$$C = Q \times V \dots\dots\dots (2.8)$$

di mana variabel C adalah kapasitansi kapasitor dalam satuan Farad (F), Q adalah muatan yang tersimpan dalam satuan *Coulomb* (C) serta V adalah Beda potensial atau tegangan dalam satuan *Volt* (V).

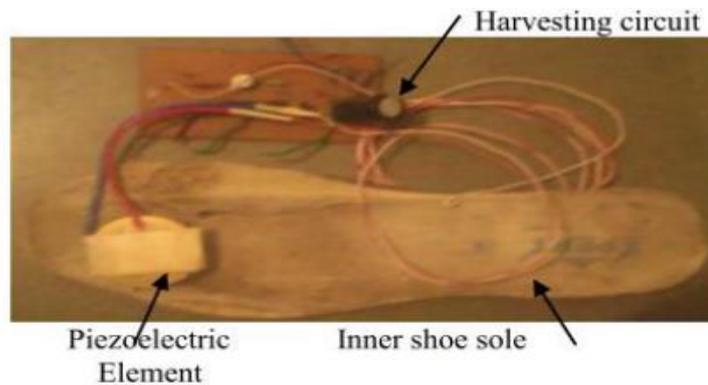
d. Metode Konverter DC-DC

Konverter DC-DC atau lebih dikenal sebagai *DC Chopper* biasa digunakan untuk mengkonversi energi listrik DC ke DC lain dengan nilai tertentu (menaikkan atau menurunkan) tanpa mengubah polaritasnya. *DC Chopper* memanfaatkan mekanisme *charging* dan *discharging* pada lilitan atau induktor dengan metode *switching*. *Switch* yang digunakan adalah semikonduktor yang beroperasi pada frekuensi tinggi seperti transistor BJT dan FET. Aplikasi konverter DC-DC ini cukup luas, aplikasi diantaranya catu daya dengan *switching*, konversi tegangan dan arus dc (*regulator*), pengendalian motor listrik, dll.

Pengaplikasian konverter DC-DC pada sistem pemanen energi, umumnya digunakan *direct converter*. Memanfaatkan metode *buck* dan *boost* serta kombinasi keduanya untuk mendapatkan keluaran energi listrik yang diinginkan.

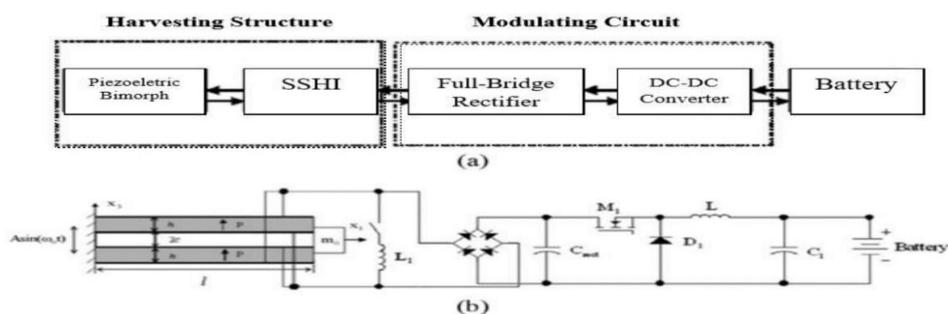
Beberapa penelitian mengenai penggunaan konverter DC - DC sebagai pemanen energi piezoelektrik juga banyak dilakukan. Diantaranya penelitian Ashish Gupta pada tahun 2015 juga meneliti sistem pemanen energi piezoelektrik yang diimplementasikan pada sol sepatu. Elemen piezoelektrik dipasang pada bagian sol sepatu yang nampak pada gambar 2.2.4.23 Penelitian tersebut memanfaatkan penyearah dan konverter DC - DC step-up. Penyearah yang digunakan terdiri atas 4 buah *dioda schottky* dengan jatuh tegangan yang rendah saat *forward* bias. Selain itu, DC - DC *step-up* yang digunakan adalah tipe *switching*

menggunakan transistor. Sebuah induktor 100mH juga digunakan dan dirangkai secara seri dengan rangkaian penyearah. Tegangan yang dihasilkan elemen piezoelektrik jika hanya dihubungkan dengan penyearah adalah 1,0 V. Sedangkan percobaan dengan DC - DC *step-up* yang inputnya 0,4 V dihasilkan tegangan 2,45 V dan efisiensi sistem mencapai 80% (K. K Sharma & K. Ghupta, 2015).



Gambar 2.30 Pemanen Energi Piezoelektrik Yang Diimplementasikan Pada Sole Sepatu

Metode menggunakan penyearah dan konverter DC - DC (DDC) juga dilakukan oleh Yuantai Hu, dkk untuk memanen energi dari piezoelektrik bimorph dan disimpan pada *electrochemical battery* (ECB) dengan skema dan blok diagram seperti pada gambar dibawah ini, Sebuah *synchronized switch harvesting inductor* (SSHI) diparalel dengan sistem pemanen energi untuk membalikkan tegangan melalui transfer muatan antara elektroda keluaran pada momen transisi dari sirkuit tertutup ke terbuka.

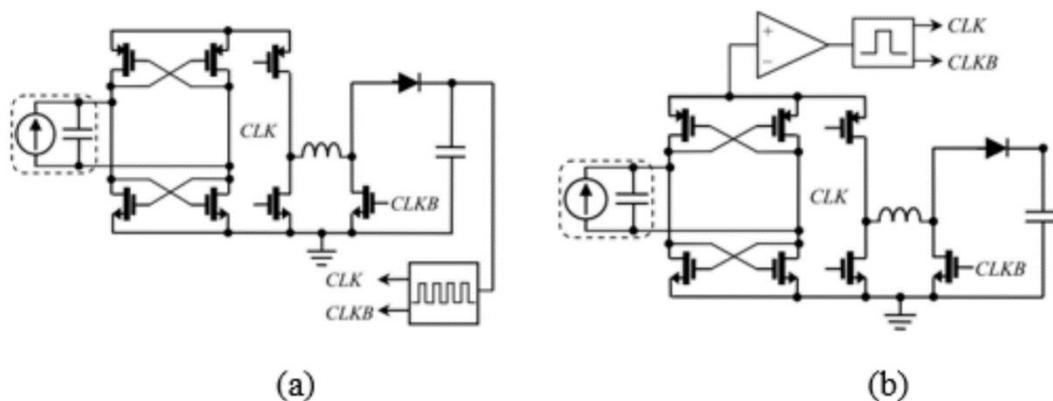


Gambar 2.31 Komponen Primer Pemanen Energi

Pada penelitian tersebut dibandingkan efek penggunaan DDC pada sistem penyimpanan energi dan SSHI yang digunakan pada sistem pemanen energi.

Dihasilkan daya 2,5 kali lebih besar pada saat SSHI dan DDC digunakan bersama dibanding hanya digunakan SSHI pada sistem pemanen energinya. Sedangkan daya keluaran 5 kali lebih besar jika SSHI dan DDC dipasang bersamaan dibanding hanya penggunaan DDC saja pada sistem penyimpanan. Penggunaan SSHI dan DDC dapat meningkatkan efisiensi pada sistem pengisian dibanding tanpa penggunaan salah satu dari SSHI atau DDC saja (Yuantai Hu et al., 2008).

Selain penggunaan SSHI dan DCC seperti diatas, salah satu metode pemanen energi piezoelektrik menggunakan rangkaian *Buck Boost* yang diteliti oleh *I Made Darmayuda*. Buck boost sendiri adalah rangkaian untuk mengubah tegangan input DC tertentu menjadi nilai tegangan yang lebih tinggi atau lebih rendah terdiri atas sebuah *switch*, induktor, dioda dan kapasitor. Pada penelitiannya, *buck boost* dimodifikasi agar *outputnya* linear berdasarkan konsep saat beroperasi pada *Discontinuous Conduction Mode* (DCM) dan *output non-linear* berdasarkan konsep *Synchronous Charge Extraction* (SCE).



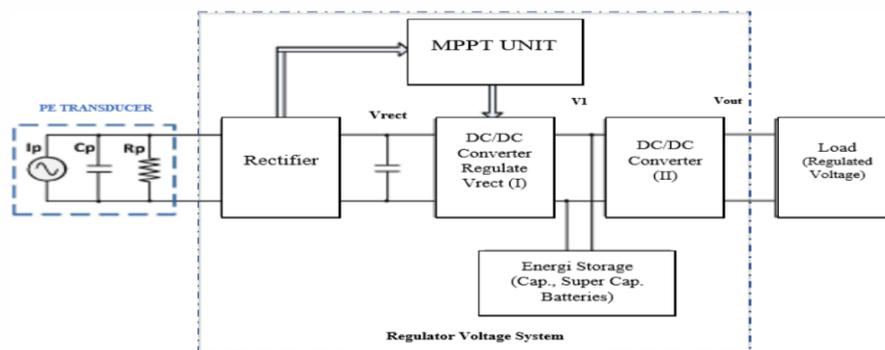
Gambar 2.32 Rangkaian Modifikasi Buck Boost

Modifikasi linear menambahkan kontroler sederhana yaitu sebuah cincin osilator dengan frekuensi dan *duty cycle* yang tetap seperti nampak pada gambar 2.32 a. Pada sistem linear tidak membutuhkan catu daya eksternal serta tidak dapat bekerja jika kedua *clock* yaitu CLK dan CLKB mendapat sinyal 0 (nol) bersamaan. Sedangkan pada modifikasi *non-linear* ditambahkan sensor tegangan untuk mendeteksi tegangan puncak setelah *output* transduser melewati penyearah dan *adjustable pulse generator* sebagai pengatur durasi pemanenan energi dengan

skema seperti pada gambar 2.32 b. Modifikasi sistem non-linear mampu menghasilkan *output* energi lebih besar dibanding sistem *linear*. Namun, sistem modifikasi non-linear tidak absolut digunakan pada kondisi output yang dihasilkan terlalu kecil serta keadaan tidak ada atau tidak diperlukannya catu daya eksternal sistem (Darmayuda et al., 2013).

e. Metode Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT atau *Maximum Power Point Tracking* adalah algoritma yang termasuk dalam sistem pengendali. MPPT umumnya digunakan untuk mengekstraksi daya maksimum pada sistem panel surya. Daya maksimum yang dihasilkan panel surya bervariasi dengan radiasi matahari, suhu lingkungan dan suhu sel surya. Prinsip utama MPPT adalah mengekstrak daya maksimum yang tersedia dari modul panel surya dengan membuatnya beroperasi pada tegangan paling efisien (*power point* maksimum). MPPT memeriksa *output* modul panel surya dan membandingkannya dengan tegangan baterai kemudian memperbaikinya untuk mencapai titik daya terbaik modul panel surya untuk mengisi baterai dan mengubahnya menjadi tegangan optimum untuk mendapatkan arus maksimum ke baterai. Hal ini juga dapat memasok daya ke beban DC yang terhubung langsung ke baterai. Salah satu penelitian mengenai MPPT membahas tentang penerapan metode ini pada pemanen energi piezoelektrik seperti nampak pada gambar berikut ini:



Gambar 2.33 Penerapan Metode MPPT pada sistem Pemanen Energi Piezoelektrik

Penelitian *Xuan-Dien Do*, dkk pada tahun 2014 menggunakan sebuah penyearah jembatan (*full-bridge rectifier*) yang digabungkan dengan unit MPPT seperti nampak pada gambar 2.2.4.26. Unit MPPT yang digunakan adalah MCU-TI ez430-RF2500, bertujuan untuk mendapatkan daya *output* yang lebih besar dengan mengendalikan konverter DC-DC yang diseri dengan penyearah jembatan sebelumnya. Unit MPPT tersebut digunakan untuk mendeteksi titik keluaran maksimum dan mengendalikan penyearah untuk tetap bekerja pada titik maksimum tersebut. Selain itu, MPPT tersebut juga digunakan untuk pengaturan *duty cycle* konverter DC-DC. MPPT membantu transduser mencapai titik *output* tertinggi dengan efisiensi lebih dari 80%. Sedangkan untuk sistem piezoelektrik, metode ini sederhana dan efisiensinya mencapai 64% (Do, Han and Lee, 2014).

F. Metode Integrated Circuit (IC) – LTC3588

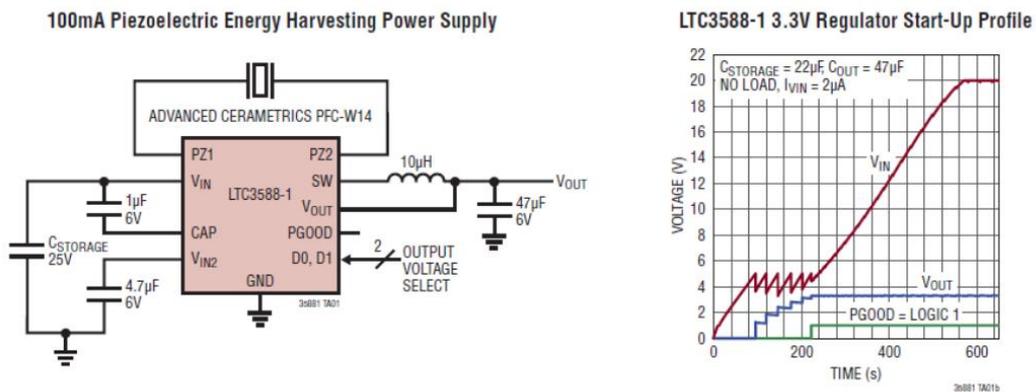
Seiring berkembangnya pengetahuan mengenai komponen elektronika dan produksinya yang dikemas dalam bentuk yang kecil namun terintegrasi sehingga lebih sederhana dalam bentuk *integrated circuit* (IC). Dengan alasan tersebut, bahkan suatu sistem pemanen energi menjadi lebih sederhana dari segi rangkaian serta ukuran rangkaian dan komponen yang digunakan namun dengan kemampuan yang lebih optimal. Metode pemanen energi menggunakan modul IC sebenarnya adalah penggabungan metode-metode sebelumnya seperti penggunaan rectifier dan konverter DC-DC namun dibuat sederhana dan di-intergrasi dalam sebuah chip pemanen energi. Salah satu yang digunakan dalam sistem pemanen energi adalah LTC3588 *energy harvester module*.

a) LTC3588-1



Gambar 2.34 Energy Harvester Module

LTC3588-1 mengintegrasikan jembatan penyearah gelombang penyearah dengan resolusi rendah dengan konverter *buck* efisiensi tinggi untuk menghasilkan pemanenan energi untuk sumber energi impedansi keluaran tinggi seperti transduser piezoelektrik. Mode *ultralow quiescent current undervoltage lockout* (UVLO) terdapat celah histeresis yang lebar memungkinkan muatan menumpuk pada kapasitor input sampai konverter buck secara efisien mentransfer sebagian muatan yang tersimpan ke output. 28 LTC3588-1 memasuki keadaan sleep dimana arus input dan output minimal. Konverter *buck* menyala dan mati sesuai kebutuhan untuk menjaga regulasi. Empat tegangan keluaran yaitu 1.8V, 2.5V, 3.3V dan 3.6V (*selectable*) serta arus keluaran kontinyu mencapai hingga 100mA. Namun, kapasitor output mungkin berukuran untuk melayani ledakan arus keluaran yang lebih tinggi. *Shunt* pelindung masukan yang dipasang pada 20V memungkinkan energi lebih besar.



Gambar 2.35 Skematik rangkaian LTC3588-1 dan Grafik karakteristik Input-Output rangkaian (Datasheet)

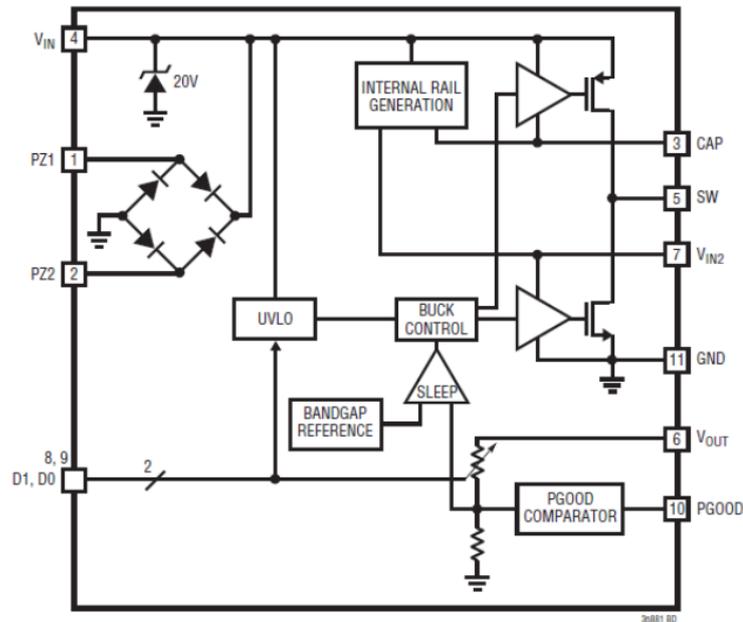


FEATURES

- 950nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load)
- 450nA Input Quiescent Current in UVLO
- 2.7V to 20V Input Operating Range
- Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier
- Up to 100mA of Output Current
- Selectable Output Voltages of 1.8V, 2.5V, 3.3V, 3.6V
- High Efficiency Integrated Hysteretic Buck DC/DC
- Input Protective Shunt – Up to 25mA Pull-Down at $V_{IN} \geq 20V$
- Wide Input Undervoltage Lockout (UVLO) Range
- Available in 10-Lead MSE and 3mm × 3mm DFN Packages

Gambar 2.36 LTC3588-1 Beserta Fituranya (Datasheet)

Seperti yang telah dijelaskan diatas bahwa LTC3588 juga dikategorikan *buck converter*. Rangkaian *equivalen* dari IC LTC3588 dapat diamati pada gambar 2.37 Tiap pin kaki memiliki fungsi masing-masing dan dapat diamati pada tabel 2.4.



Gambar 2.37 Blok Diagram Rangkaian Equivalen dari LTC3588 (Datasheet)

Tabel 2.4 Fungsi Masing-masing Pin pada LTC3588

No. Pin	Nama Pin	Keterangan
1	PZ1	Sambungan <i>input</i> untuk elemen piezoelektrik atau sumber AC lainnya (digunakan bersamaan dengan PZ2)
2	PZ2	Sambungan input untuk elemen piezoelektrik atau sumber AC lainnya (digunakan bersamaan dengan PZ1)
3	CAP	Rel internal yang direferensikan ke VIN untuk digunakan sebagai gatedrive untuk saklar PMOS buck. Kapasitor 1 μ F harus dihubungkan antara CAP dan VIN. Pin ini tidak dimaksudkan untuk digunakan sebagai rel sistem eksternal
4	VIN	Tegangan <i>Input</i> Rektifikasi. Sebuah kapasitor pada pin ini berfungsi sebagai reservoir energi dan suplai masukan

		untuk <i>buck regulator</i> . Tegangan VIN dijepit secara internal sampai maksimum 20V (tipikal).
5	SW	Pin Beralih untuk Buck Switching Regulator. Sebuah induktor 10 μ H atau lebih besar harus dihubungkan dari SW ke VOUT.
6	VOUT	Pin digunakan untuk memantau tegangan output dan menyesuaikannya melalui umpan balik internal.
7	VIN2	Rel tegangan rendah internal berfungsi sebagai gate drive untuk buck NMOS <i>switch</i> . Juga berfungsi sebagai logika rel tinggi untuk tegangan keluaran pilih bit D0 dan D1. Kapasitor 4.7 μ F harus dihubungkan dari VIN2 ke GND. Pin ini tidak dimaksudkan untuk digunakan sebagai rel sistem eksternal
8	DI	<i>Output Voltage</i> Pilih Bit. D1 harus dihubungkan <i>HIGH</i> ke VIN2 atau <i>LOW</i> ke GND untuk memilih VOUT yang diinginkan (lihat Tabel Mode Operasi Tegangan).
9	DO	<i>Output Voltage</i> Pilih Bit. D0 harus dihubungkan <i>HIGH</i> ke VIN2 atau <i>LOW</i> ke GND untuk memilih VOUT yang diinginkan (lihat Tabel Mode Operasi Tegangan).
10	PGOOD	Logika <i>HIGH</i> ketika VOUT di atas 92% dari nilai target. Logika <i>HIGH</i> diacu ke rel VOUT.
11	GND	<i>Ground</i> . Pada Tertutup harus dihubungkan ke bidang <i>ground kontinyu</i> pada lapisan kedua PCB oleh beberapa vias langsung di bawah LTC3588-1.

Sedangkan pengaturan tegangan output atau pemilihan mode output dapat dilakukan dengan mengubah logika D0 dan D1 dengan menghubungkannya ke VIN2 untuk mendapat logika 1 (*HIGH*) atau GND untuk mendapat logika 0 (*LOW*). Adapun mode keluaran tersebut dapat diamati pada tabel 2.5 berikut.

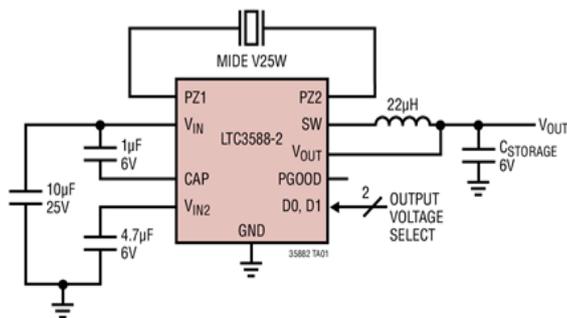
Tabel 2.5 Mode Output LTC3588-1

DI	DO	VOUT	Vout Quiescent Current (Ivout)
0	0	1.8V	44nA
0	1	2.5V	64nA
1	0	3.3V	81nA
1	1	3.6V	89nA

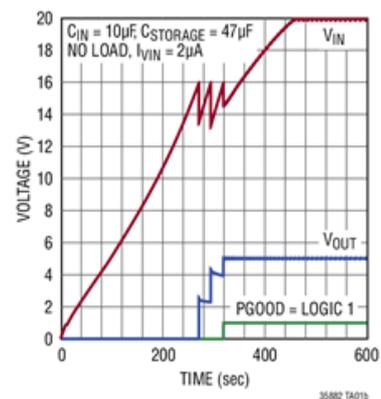
b) LTC3588-2

LTC3588-2 adalah versi lanjutan dari LTC3588-1. Sehingga sistem kerjanya tidak jauh berbeda dengan LTC3588-1 begitupun skematiknya yang dapat diamati pada gambar 2.2.4.31 Sama seperti LTC3588-1, terdapat juga mode *ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO)* dengan tegangan 16 V. Terdapat empat tegangan keluaran yang dapat diatur yaitu 3.45, 4.1V, 4.5V dan 5.0V (*selectable*) serta arus keluaran kontinyu mencapai hingga 100mA. Hal tersebut yang membedakan LTC3588-2 dengan vesri sebelumnya, *output* tegangan dan arus yang dihasilkan cocok untuk baterai *Li-Ion* dan *Li-Fe* serta sama baiknya dengan penggunaan super-kapasitor (Device, 2023).

High Voltage Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-2 5.0V Regulator Start-Up Profile



Gambar 2.38 Skematik Rangkaian LTC3588-2 dan Grafik Karakteristik Input-Output rangkaian (Datasheet)

Jumlah pin kaki, konfigurasi pin kaki dan rangkaian *ekuilvalen* yang dimiliki LTC3588-2 sama seperti LTC3588-1. Begitupun untuk pengaturan tegangan *output* atau pemilihan mode output dapat dilakukan dengan mengubah logika D0 dan D1 dengan menghubungkannya ke VIN2 untuk mendapat logika 1 (HIGH) atau GND

untuk mendapat logika 0 (*LOW*). Adapun mode keluaran tersebut dapat diamati pada tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.6 Mode Output LTC3588-2

DI	DO	VOUT	Vout Quiescent Current (Ivout)
0	0	3.45V	86nA
0	1	4.1V	101nA
1	0	4.5V	111nA
1	1	5.0V	125nA

2.2.7 Solar Cell

1. Pengertian Solar Cell

Pembangkit listrik tenaga surya *sollar cell* adalah contoh pembangkit yang memanfaatkan energi surya dengan sinar matahari sebagai penghasil listrik alat utama untuk menangkap, perubah dan penghasil listrik adalah *photovoltaic* atau modul/panel Surya Cell. Solar cell atau sel *photovoltaic*, adalah sebuah alat semikonduktor yang terdiri dari sebagian besar dioda p-n *junction* dan dengan adanya cahaya matahari mampu menciptakan energi listrik, perubahan ini disebut efek *photovoltaic* (Pasaribu dkk., 2021). Dengan alat tersebut sinar matahari dirubah menjadi listrik melalui proses aliran-aliran elektron negatif dan positif didalam cell modul tersebut karena perbedaan elektron. Hasil dari aliran-aliran *elektron* akan menjadi listrik DC yang dapat langsung dimanfaatkan untuk mengisi battery/aki. Posisi pemasangan panel surya yang ideal adalah menghadap langsung ke sinar matahari. Panel surya memiliki proteksi *overheating* yang baik, panel surya dapat mengkonversi kurang dari 20% dari cahaya menjadi listrik.

2. Prinsip Kerja Sollar Cell

Susunan *solar cell* memiliki kesamaan dengan sebuah diode, yaitu terdiri dari lapisan yang dinamakan PN *Junction* yang diperoleh dari menodai sebatang bahan semikonduktor silikon murni dengan valensi impuritu tiga disebelah kiri (N) dan lima sebelah kanan (P) (Subandi & Muhammad Suyanto, 2020). Silikon murni mengandung dua macam pembawa muatan listrik yang seimbang yaitu muatan listrik positif yang disebut *hole*, dan muatan listrik *negative* yang disebut elektron.

Setelah silikon murni jenis P dilakukan proses penodaan, maka terbentuk muatan positif (*hole*) yang sangat besar dibandingkan muatan elektronnya. Sebaliknya pada silikon jenis N terbentuk elektron yang sangat besar.

Didalam batang silikon terjadi pertemuan antara N dan P yang dinamakan PN Junction. Bila bagian P dan N di hubungkan dengan kutub positif dari sebuah baterai maka akan terjadi *Forward Bias*, dimana pada keadaan ini pada serangkaian silikon terdapat arus listrik. Tapi sebaliknya jika P dihubungkan pada kutub *negative* sebuah baterai dan N kutub positif maka akan terjadi *reverse bias*, dimana kondisi ini *hole* dapat tersambung ke positif dan elektron ke negatif.

3. Komponen Sollar Cell

Dalam proses pengkonversian panas matahari menjadi energi listrik perlu komponen – komponen khusus, yaitu:

1. *Module Sollar cell*
2. *Charger controller*
3. Baterai
4. Inverter
5. Beban

Pada panel surya menghasilkan energi listrik dengan mengkonversikan tenaga matahari menjadi listrik. *Charger controller* digunakan untuk mengatur pengisian baterai sehingga menjamin panel dan baterai bekerja secara optimal. Baterai adalah perangkat untuk menyimpan tenaga listrik dari tenaga surya sebelum di manfaatkan oleh beban. Tanpa baterai energi surya hanya dapat digunakan pada saat ada sinar matahari. Inverter adalah alat yang mengkonversikan tegangan DC menjadi tegangan AC. Perlu untuk diingat bahwa panel surya dan baterai menggunakan arus DC. Sedangkan beban merujuk pada alat apapun yang memerlukan daya listrik, dan merupakan jumlah konsumsi listrik dari semua peralatan listrik yang dihubungkan dengan sistem

4. Jenis – jenis Sollar Cell

a. Polikristal

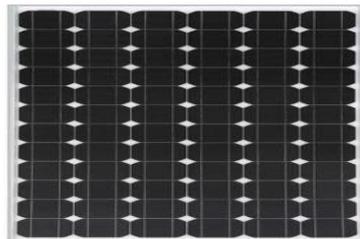
Solar cell ini memiliki susunan kristal acak. Tipe *polikristal* harus memiliki permukaan yang luas guna untuk menghasilkan daya listrik yang maksimal. Panel ini kurang efektif dibandingkan dengan panel polikristal. Efektifitas 18% tetapi biaya lebih murah.



Gambar 2.39 *Solar Cell* Tipe Polikristal

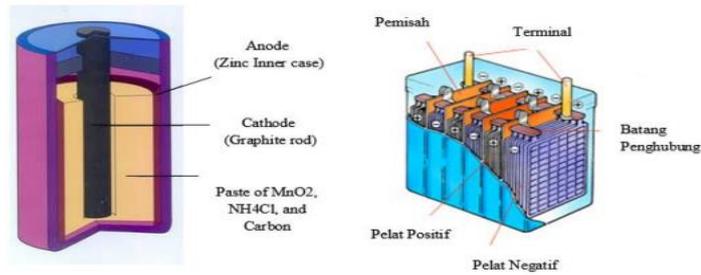
b. Monokristal

Panel ini dibuat dari bahan silikon yang dibentuk batangan dan di iris. Panel monokristal merupakan panel yang efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini dan menghasilkan daya listrik yang luas. Panel monokristal ini di rancang untuk penggunaan yng memerlukan konsumsi listrik besar pada tempat yang beriklim ekstrim. Panel ini memiliki efisiensi sampai 24%. Kelemahannya dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi dengan baik di tempat yang cahaya matahari nya kurang, dan akan turun drastis apabila cuaca berawan (Aris Heri Andiawan & Puji Slamet, 2017).



Gambar 2.40 *Solar Cell* Tipe Monokristal

2.2.8 Baterai



Gambar 2.41 Baterai Ni-Cd dan Baterai Lead Acid

Baterai (*Battery*) adalah sebuah alat atau media penyimpanan energi listrik sekunder seperti halnya kapasitor. Namun, baterai mengubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi listrik. Umumnya, setiap baterai terdiri dari terminal positif (*katoda*) dan terminal negatif (*anoda*) serta elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar. *Output* arus listrik dari baterai adalah arus DC (*Direct Current*). Baterai terdiri dari 2 Jenis yakni baterai *primer* yang hanya dapat sekali pakai (*single use battery*) dan baterai sekunder yang dapat diisi ulang (*rechargeable battery*).

Jenis baterai primer saat ini masih digunakan namun penggunaannya tidak sepopuler jenis baterai rechargeable karena menimbulkan limbah setelah selesai digunakan. Beberapa macam baterai yang tergolong baterai *primer* adalah sebagai berikut:

1. Baterai Zinc-Carbon (Seng-Karbon)

Baterai *Zinc-Carbon* juga disering disebut dengan Baterai *Heavy Duty* dan mudah didapatkan dipasaran. Baterai jenis ini terdiri dari bahan *Zinc* yang berfungsi sebagai Terminal Negatif dan juga sebagai pembungkus Baterainya. Sedangkan Terminal Positifnya adalah terbuat dari *Karbon* yang berbentuk Batang (rod). Baterai jenis *Zinc-Carbon* merupakan jenis baterai yang relatif murah dibandingkan dengan jenis lainnya.

2. Baterai Alkaline (Alkali)

Baterai Alkaline ini memiliki daya tahan yang lebih lama dengan harga yang lebih mahal dibanding dengan Baterai *Zinc-Carbon*. Elektrolit yang digunakannya

adalah *Potassium hydroxide* yang merupakan Zat Alkali (*Alkaline*) sehingga namanya juga disebut dengan Baterai *Alkaline*.

3. Baterai Lithium

Baterai *Primer Lithium* menawarkan kinerja yang lebih baik dibanding jenis Baterai Primer lainnya. Baterai *Lithium* dapat disimpan lebih dari 10 tahun dan dapat bekerja pada suhu yang sangat rendah. Karena keunggulannya tersebut, Baterai jenis *Lithium* ini sering digunakan untuk aplikasi *Memory Backup* pada komputer maupun jam tangan. Baterai Lithium biasanya dibuat seperti bentuk Uang Logam atau disebut juga dengan Baterai Koin (*Coin Battery*). Ada juga yang memanggilnya *Button Cell* atau Baterai Kancing.

4. Baterai Silver Oxide

Baterai Silver Oxide merupakan jenis baterai yang tergolong mahal dalam harganya. Hal ini dikarenakan tingginya harga Perak (Silver). Baterai *Silver Oxide* dapat dibuat untuk menghasilkan Energi yang tinggi tetapi dengan bentuk yang relatif kecil dan ringan. Baterai jenis *Silver Oxide* ini sering dibuat 34 dalam bentuk Baterai Koin (*Coin Battery*). Baterai jenis *Silver Oxide* ini sering dipergunakan pada Jam Tangan, Kalkulator maupun aplikasi militer.



Gambar 2.42 Jenis-Jenis Baterai Primer

Sedangkan hingga saat ini baterai yang termasuk dalam kategori atau jenis baterai *rechargeable* adalah sebagai berikut:

1. *Lead Acid (Asam Timbal)*



Gambar 2.43 Baterai Lead Acid

Baterai ini biasa dikenal dengan nama baterai aki (*accumulator*). Biasa digunakan untuk sistem kelistrikan kendaraan bermotor. Memiliki kapasitas baterai yang cukup besar tergantung pada penggunaannya. Level tegangannya pun bervariasi antara 12V hingga 24V bahkan ada yang berukuran kecil dengan 35 tegangan 4V hingga 6V. Namun secara struktur memiliki kesamaan yaitu terdapat 2 plat elektroda dengan elektroda positif terbuat dari logam timbal (Pb) dan elektroda negatif terbuat dari logam timbal oksida (PbO₂) dan terdapat larutan elektrolit H₂SO₄

2. *Nickle Cadmium (Ni-Cd)*



Gambar 2.44 Baterai Ni-Cd

Nickle Cadmium (NiCd) merupakan jenis baterai pertama dan tertua yang digunakan untuk ponsel. Baterai ini juga paling tahan banting, tetapi berat dan volumenya paling besar. Baterai jenis ini sudah jarang digunakan pada gadget masa kini karena dianggap tidak praktis. Dan juga dikarenakan, baterai ini memiliki “Efek Memori”, artinya baterai ini harus benar-benar kosong sebelum dilakukan pengisian kembali karena jika tidak dilakukan maka dapat mengurai daya pada baterai itu sendiri. Bahkan lebih parahnya lagi, baterai ini akan kehabisan dayanya dalam waktu 90 hari walaupun sama sekali tidak pernah dipakai. Selain itu, bahan kimia yang digunakan dalam baterai *Ni-Cd* juga tidak ramah lingkungan

3. Nickel Metal Hydride (Ni-MH)



Gambar 2.45 Baterai Ni-MH

Baterai *Ni-MH* yang mampu menampung kapasitas 40% lebih banyak ketimbang *Ni-Cd*. *Ni-MH* merupakan generasi lanjutan dari *Ni-Cd*, akan tetapi jika dibanding dengan *Ni-Cd* dengan volume yang sama, kapasitasnya jauh lebih besar. Namun, seperti halnya *Ni-Cd*, *Ni-MH* juga rawan terhadap *memory effect* walaupun tidak sebesar *Ni-Cd*, sehingga setiap 10 – 15 kali isi ulang kita harus mengosongkannya terlebih dahulu. Baterai ini biasanya dapat bertahan dengan baik untuk diisi ulang hingga 500 kali. Namun jika sudah melebihi batas tersebut, sebaiknya dilakukan penggantian baterai walaupun dalam kondisi masih digunakan. Baterai ini juga tidak boleh dibuang sembarangan karena kandungan kimianya bisa mencemari tanah.

4. Lithium Ion (Li-ion)



Gambar 2.46 Baterai Li-Ion

Baterai *Li-Ion* Baterai *Lithium Ion* atau *Li-ion* merupakan baterai standar yang banyak digunakan pada gadget masa kini. Jika dibandingkan baterai dengan bahan nikel, kelebihan baterai ini lebih efisien energi dan tidak memiliki efek memori, akan tetapi juga lebih mahal harganya. *Li-Ion* juga sedikit lebih ringan daripada baterai *Ni-MH* dan memiliki umur lebih lama. Baterai *Li-Ion* juga memiliki umur yang lebih lama karena hanya kehilangan sekitar 5% dari kapasitasnya setiap bulan dibandingkan dengan baterai *Ni-MH* yang kehilangan hingga 20% kapasitasnya setiap bulannya. *Li-ion* juga dapat bertahan hingga 1000 kali pengisian ulang.

Walaupun memiliki banyak kelebihan, baterai jenis ini tetap memiliki kelemahan seperti sensitif terhadap suhu tinggi sehingga umur baterai cepat berkurang. Membiarkan baterai ini hingga habis juga akan mengurangi kapasitasnya. Bahaya lain dari *Li-Ion* adalah rawan meledak jika kemasan pada baterai rusak.

5. LithiumIon Polymer (Li-Po)



Gambar 2.47 Baterai Li-Po

LithiumIon Polymer merupakan jenis baterai yang berasal dari *lithium ion* tetapi menggunakan elektrolit berbasis polimer gel sehingga namanya menjadi *LithiumIon Polymer*. Baterai jenis ini sangat ringan sehingga dapat dibentuk dengan sesuka hati. Selain itu baterai ini juga lebih aman dari resiko ledakan ketimbang baterai Liion. Karena memiliki banyak kelebihan yang dimiliki, baterai jenis ini kini banyak digunakan pada berbagai macam ponsel dan tablet, terutama untuk kelas menengah ke atas. Namun, baterai ini biasanya akan lebih cepat habis dibandingkan dengan baterai *Li-ion*. Bobot yang ringan dan fleksibel yang dimilikinya juga membuat harga baterai ini lebih mahal ketimbang baterai *Li-ion*.

6. Lithium Iron Phosphate (Li-Fe)



Gambar 2.48 Baterai Li-Fe

Lithium Iron Phosphate (Li-Fe) adalah jenis baterai yang dikembangkan saat ini. Baterai jenis ini belum dipakai untuk ponsel karena harganya yang sangat mahal. Baterai ini merupakan pengembangan dari *lithiumion* yang menggantikan campuran *oksida kobalt* dalam *li-ion*. Tipe ini lebih kecil kemungkinannya meledak serta dapat melepaskan kapasitas dan terisi ulang dengan sangat cepat. Namun sampai saat ini *lithium iron phosphate* masih mahal dan rumit pembuatannya.

2.2.9 Proses Pengisian Dan Pengosongan Baterai

1. Pengisian Baterai (Accu)

Menurut Juan Prasetyadi (2017). Pengisian arus dialirkan berlawanan dengan waktu pengeluaran isi yang berarti juga bahwa beban aktif dan elektrolit diubah supaya energi kimia baterai mencapai maksimum. Ada tiga metode pengisian baterai antara lain adalah:

- a. Pengisian perawatan (*maintenance charging*) digunakan untuk mengimbangi kehilangan isi (*self discharge*), dilakukan dengan arus rendah sebesar 1/1000 dari kapasitas baterai. Ini biasa dilakukan pada baterai tak terpakai untuk melawan proses pensulfatan. Bila baterai memiliki kapasitas 45 Ah maka besarnya arus pengisian perawatan adalah 45 MA (miliAmpere).
- b. Pengisian lambat (*slow charging*) adalah suatu pengisian yang lebih normal. Arus pengisian harus sebesar 1/10 dari kapasitas baterai. Bila baterai memiliki kapasitas 45 Ah maka besarnya arus pengisian lambat adalah 4,5 A. Waktu pengisian ini bergantung pada kapasitas baterai, keadaan baterai pada permulaan pengisian, dan besarnya arus pengisian. Pengisian harus sampai gasnya mulai menguap dan berat jenis elektrolit tidak bertambah walaupun pengisian terus dilakukan sampai 2 - 3 jam kemudian.
- c. Pengisian cepat (*fast charging*) dilakukan pada arus yang besar yaitu mencapai 60 - 100 A pada waktu yang singkat kira-kira 1 jam dimana baterai akan terisi sebesar tiga per empatnya. Fungsi pengisian cepat adalah memberikan baterai suatu pengisian yang memungkinkannya dapat

menstarter motor yang selanjutnya generator memberikan pengisian ke baterai.

2. Proses Pengosongan Baterai

a. Baterai Basah

Pada saat baterai digunakan, terjadi perubahan energi kimia menjadi energi listrik dan terjadi perubahan anode, katode dan elektrolitnya. Pada anode terjadi perubahan yaitu timbal dioksida (PbO_2) menjadi timbal sulfat (PbSO_4). Perubahan yang terjadi pada katode adalah timbal murni (Pb) menjadi timbal sulfat (PbSO_4). Adapun pada larutan elektrolit terjadi perubahan, yaitu asam sulfat pekat menjadi encer, karena pada pengosongan baterai terbentuk air (H_2O) (Robby Satrio Utomo, 2017).

Reaksi kimia pada baterai yang dikosongkan adalah sebagai berikut :

Pada elektrolit : $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$.

Pada anode : $\text{PbO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Pada Katode : $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4$.

b. Baterai Kering

Susunan Baterai :

Anoda : Cd

Katoda : NiO_2

Elektrolit : Pasta Mengandung OH^-

Potensial : 1,25 V

Reaksi Pengosongan :

Anode : $\text{Cd} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$

Katode : $\text{NiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$

Reaksi Total : $\text{Cd} + \text{NiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + \text{Ni}(\text{OH})_2$.

3. Proses Pengisian Baterai

a. Baterai Basah

Baterai termasuk elemen sekunder, sehingga setelah habis dapat diisi kembali. Pada saat pengisian baterai terjadi perubahan energi listrik menjadi energi kimia. Reaksi kimia saat baterai diisi yaitu :

Pada Elektrolit : $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$

Pada Anode : $\text{PbSO}_4 + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$

Pada Katoda : $\text{PbSO}_4 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Pb} + \text{H}_2\text{SO}_4$.

Jadi, saat pengisian kembali baterai pada prinsipnya mengubah anode dan katode yang berupa timbal sulfat (PbSO_4) menjadi timbal dioksida (PbO_2) dan timbal murni (Pb) (Robby Satrio Utomo, 2017).

b. Baterai Kering

Baterai nikel kadnium merupakan baterai yang dapat diisi ulang kembali. Baterai ini menggunakan Cd sebagai anode dan pasta NiO (OH) sebagai katodanya. Sedangkan elektrolitnya adalah KOH. Pada saat pengisian telah selesai maka suhu akan naik dengan cepat (panas meningkat dengan cepat) sehingga *charger* perlu dimatikan. Karena jika tidak dimatikan akan menyebabkan suhu baterai naik terus dan pada akhirnya akan meledak dan logam Cd itu beracun, oleh karena itu penggunaan Cd diganti dengan logam hidrida, misalnya litium hidrida (LiH).

c. Pengisian baterai ada 2 cara yaitu :

1. Pengisian Normal

Pada penelitian ini peneliti akan menggunakan baterai berkapasitas 12 V 24 Ah. Maka didapat durasi pengisian baterai \pm 28.8 jam dengan besar arus pengisian yaitu 1 A.

Pengisian normal merupakan pengisian dengan besaran arus 10% dari kapasitas baterai. Lamanya waktu pengisian dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut :

$$\text{Pengisian Baterai (Jam)} = \left(\frac{\text{Kapasitas Baterai Ah}}{\text{Arus Charger (10\%)}} \right) + 20\%$$

20% merupakan hasil pembagian dari kapasitas baterai dibagi arus *charger*, Jika kita memiliki baterai 24 Ah, arus pengisian adalah 1 A, maka waktu yang dibutuhkan adalah ± 28.8 jam (Suriadi & Fanni, 2023).

Pada Penelitian (Abdurahim Sidiq, 2021) didalam penyusunan piezoelektrik dengan rangkaian seri sebanyak 38 *disk* piezoelektrik didapat besar tegangan yang dihasilkan oleh uji coba pada kendaraan *yamaha byson* dan berat penumpang yang melintasi speed bump yaitu 17,88 *volt* dan besar arus 0,39 A.

$$\text{Pengisian Baterai (Jam)} = \left(\frac{24Ah}{1} \right) + 20\%$$

$$\text{Pengisian Baterai (Jam)} = 28.8 \text{ (jam)}$$

2. Pengisian Cepat

Pengisian cepat adalah pengisian dengan arus yang sangat besar. Besarnya arus pengisian tidak boleh lebih dari 50% dari kapasitas baterai (Suriadi & Fanni, 2023). Dengan demikian untuk baterai 24 Ah, besar arus pengisian tidak boleh lebih dari 4.5A.

2.2.10 Charge Controller



Gambar 2.49 Charge Controller SC2430C

Charge Controller adalah alat yang digunakan untuk mengatur sumber tegangan listrik yang dihasilkan dari pembangkit energi listrik skala tegangan rendah (TR) untuk disimpan ke *battrey*. Alat ini juga digunakan untuk menjaga keamanan pada saat pengisian *battrey* agar tidak *over charging* karena kelebihan *voltase*.

Tabel 2.7 Spesifikasi Control Charge

Model	SC2430C
Batt Voltase	12 V
Charger Current	10 A
Discharge Current	10 A
Max Solar Input	< 50 V
Float Charge	13.7 V (Adjustable)
Discharge Stop	10.7 V (Adjustable)
Discharge Reconnect	12.6 V
USB	5 V/2 A
Self - consume	< 10 mA
Dimensi	133 * 85 * 35 mm/180g

2.2.11 Inverter

Didalam penelitian ini, inverter berfungsi sebagai penyearah tegangan DC Accu menuju tegangan AC yang kemudian dihubungkan ke lampu *rotary warning light*.



Gambar 2.50 Inverter

Tabel 2.8 Spesifikasi Inverter

Output Voltage	220 VAC
Output Frequency	50 Hz \pm 2Hz
Output USB	DC 0.5 V / 0.5 A Max
Output Waveform	Modified Sine Wave
Input Voltage Range	10.0 – 15.0 VDC
Low Battery Alarm	10.4 – 11.0 V
Low Battery Shutdown Point	9.7 – 10.3 V
High Battery Shutdown Point	14.5 – 15.5 V
Battery Drain With no AC Load	< 0.3 A
Peak Efficiency	> 95%
Dimensi	13 * 5.5 * 9.5 cm

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

1. Studi Literatur:

Melakukan studi literatur tentang sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic*, serta teknologi terbaru yang relevan dengan penggunaan energi terbarukan. Mempelajari dokumentasi teknis mengenai lampu *rotary warning light*, spesifikasi peralatan, dan konfigurasi peralatan.

2. Analisis Kebutuhan Energi:

Melakukan analisis kebutuhan energi untuk lampu *rotary warning light* di PT Pelindo 1 Cabang Belawan. Menentukan daya lampu, durasi operasi, dan konsumsi energi harian untuk menentukan kapasitas sistem *hybrid* generator yang diperlukan.

3. Identifikasi Lokasi dan Sumber Energi:

Melakukan survei lokasi untuk menemukan lokasi yang tepat untuk pemasangan sistem *hybrid* generator. Mengidentifikasi sumber energi yang ada di lokasi, seperti pola lalu lintas yang melintasi speed bump, intensitas cahaya matahari.

4. Perancangan Sistem Hybrid Generator:

Berdasarkan analisis kebutuhan energi dan sumber energi yang telah diidentifikasi, rancang sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan *photovoltaic* yang sesuai. Membuat simulasi dan perhitungan teknis untuk menentukan ukuran dan jenis peralatan yang dipakai dengan tepat.

5. Modifikasi Speed Bump:

Melakukan studi tentang modifikasi yang dibutuhkan pada *speed bump* agar dapat menghasilkan energi ketika kendaraan roda 2 melintasinya. Merancang sistem piezoelektrik yang efisien dan aman untuk mengekstrak energi dari tekanan kendaraan di atas *speed bump*.

6. Pembuatan Prototipe:

Membuat prototipe sistem *hybrid* generator piezoelektrik dan photovoltaic yang telah dirancang. Sistem ini harus mampu menghasilkan energi listrik dan dapat diintegrasikan dengan lampu *rotary warning light*.

7. Instalasi dan Pengujian:

Melakukan instalasi prototipe sistem *hybrid* generator di lokasi yang telah ditentukan. Lakukan pengujian terhadap kinerja sistem dalam menghasilkan energi dari *speed bump* dan *photovoltaic*. Amati stabilitas dan kesesuaian energi listrik dengan kebutuhan penelitian.

8. Analisis Data dan Evaluasi:

Menganalisis data yang dihasilkan dari pengujian sistem *hybrid* generator. Mengevaluasi kinerja sistem dan mengidentifikasi perbaikan atau peningkatan yang perlu dilakukan untuk meningkatkan keandalan.

9. Kesimpulan dan Rekomendasi:

Membuat kesimpulan, saran dari hasil penelitian dan rekomendasi untuk pengembangan implementasi penelitian ini di PT Pelindo 1 Cabang Belawan lebih lanjut.

3.2 Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT Pelindo 1 cabang Belawan Jl. Sumatera, Belawan I, Medan Kota Belawan, Kota Medan, Sumatera Utara, 20411.

3.3 Bahan dan Alat Penelitian

Untuk melakukan penelitian ini digunakan beberapa alat dan bahan meliputi:

a. Bahan-Bahan

1. Piezoelektrik 50 mm.
2. LTC3588.
3. Maximum Power Point Tracking (MPPT)/SCC.
4. Photo Cell 50 Wp Polykristal.

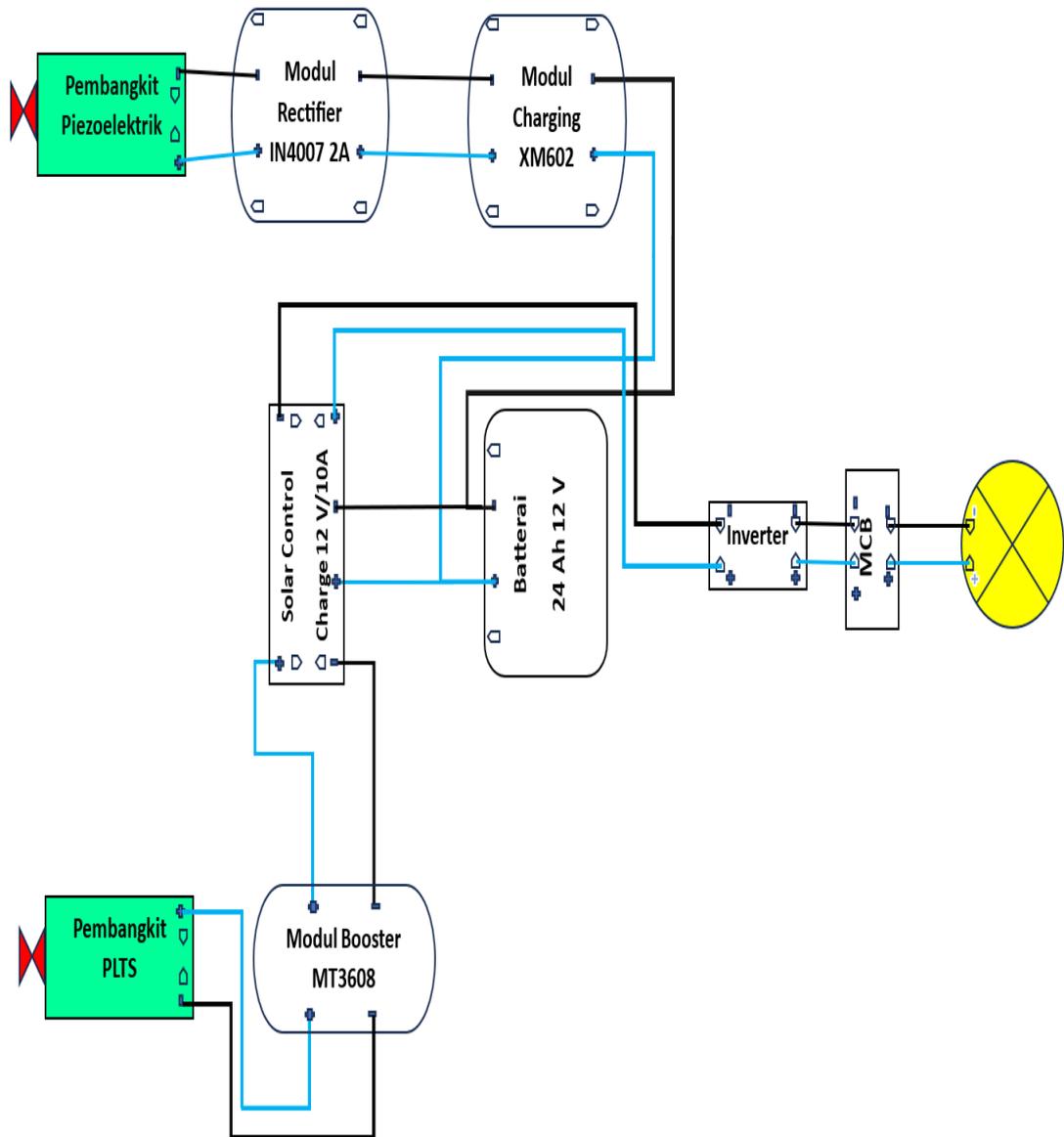
5. Charger Kontroler XH-M604 12V 10 A.
6. Aki VOZ 12V 24 Ah.
7. MCB 4 A.
8. Per tekan pegas baja kawat 6mm od 50mm tinggi 100mm/10cm.
9. Kawat Timah.
10. Kabel NYHY 0.75 mm² x 1.
11. Rubber Speed Bump 100 x 35 x 5 cm
12. Rubber Mat Coin.
13. Pipa Besi 1”.
14. Besi Plat.
15. Dynabolt 10 mm².
16. Klem Pipa Conduit 20 mm².
17. BOX Panel Listrik 40 x 50 x 20 mm².
18. Rel MCB.

b. Alat-Alat

1. Gerinda Tangan
2. Solder
3. Bor Tangan
4. Tools SET
5. Multitester
6. Tang Amper

3.4 Perancangan *Hybrid* Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik

Dalam perancangan ini *Hybrid* adalah penggabungan antara 2 pembangkit yang sama-sama menghasilkan tenaga listrik. Berikut adalah single diagram *hybrid* sistem *sollar cell* dengan generator piezoelektrik.



Gambar 51 Single Line Diagram Hybrid Solar Cell Dengan Generator Piezoelektrik

Berdasarkan gambar diatas cara kerja control Hybrid yang berasal dari 2 pembangkit yaitu *sollar cell* dan generator piezoelektrik, kemudian tegangan akan di teruskan ke *control charger*. Dimana control charger di program dengan batas bawah 13 *volt*. Setelah control charger akan disimpan menuju baterai. Sumber listrik yang tersimpan di dalam battrey akan di salurkan ke lampu *rotary warning*

light melalui inverter sebagai pengubah sumber tegangan dc menjadi ac dan MCB sebagai pengaman jika terjadi beban lebih.

3.4.1 Perhitungan Beban

Tabel 3.1 Data Beban Total Lampu Rotary Warning Light Dalam Kurun Waktu 24 Jam

Beban	Daya	Jumlah	Daya Total	Lama Pemakaian	Energi
	(Watt)		(W)	Jam	(Wh)
Lampu <i>Rotary Warning Light</i>	10	1	10	24	240
Total Energi					240

3.4.2 Kapasitas Sollar Cell

Untuk Mencari total kapasitas *sollar cell* adalah:

$$\begin{aligned} \text{kapasitas Solar Cell} &= \frac{\text{Total Beban Pemakaian Harian}}{\text{Insolasi Surya Harian}(4.5 - 4.8 \text{ kWh/m}^2)} \\ &= \frac{240}{4.8 \text{ kWh/m}^2} \end{aligned}$$

$$\text{kapasitas Solar Cell} = 50 \text{ Wp}$$

Untuk menjaga kehandalan jangka panjang, maka didalam penelitian ini akan menggunakan kapasitas *sollar cell* monokristal sebesar 50Wp.

3.4.3 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai mengacu pada jumlah energi yang dapat disimpan oleh sebuah baterai dan diukur dalam satuan ampere-hour (Ah) atau *milliampere-hour* (mAh). Kapasitas baterai menunjukkan berapa lama baterai dapat memberikan daya sebelum harus diisi ulang. Kapasitas baterai tergantung pada beberapa faktor, termasuk jenis baterai, ukuran fisik baterai, dan teknologi yang digunakan.

Satuan energi dalam (Wh) dalam kapasitas baterai harus bisa mensuplai beban dari energi yang sudah terencana yaitu 24 jam sehingga baterai dalam (Ah) terhitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{kapasitas Baterai} &= \frac{\text{Watt Total}}{\text{Tegangan Baterai}} \\
 &= \frac{240}{12} \\
 &= 20 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

Rugi – rugi dan *factor safety* harus ditambahkan pada pembebanan sebagai pengganti rugi – rugi *system* dan untuk faktor keamanan dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{kapasitas Baterai} + \text{rugi \& safety factor} &= I \text{ tot beban} \times 1.20 \\
 &= 20 \text{ Ah} \times 1.2 \\
 &= 24 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

Untuk keandalan sistem, maka dipilih *battrey* dengan kapasitas yang lebih besar yaitu 24 Ah 12 V.

3.4.4 Kapasitas Inverter

Kapasitas inverter yang dipilih harus lebih besar dari spesifikasi daya beban total. Maka dari itu dipilih inverter dengan kapasitas 500Watt dengan tegangan input 12 Volt dan tegangan keluaran 220 VAC dan frekuensi 50/60 Hz.

3.4.5 Kapasitas Control Charger

Dalam satu hari beban menyala selama 24 jam maka dalam satu hari *battrey* memiliki waktu *charger* selama 24 jam, diketahui kapasitas *battrey* 24 Ah. Arus pengisian *battrey* dapat dihitung dengan hitungan:

$$\begin{aligned}
 \text{Arus Pengisian} &= \frac{\text{Kapasitas Solar Cell}}{\text{Tegangan Baterai}} \\
 &= \frac{50}{12} \\
 &= 4,16 \text{ A}
 \end{aligned}$$

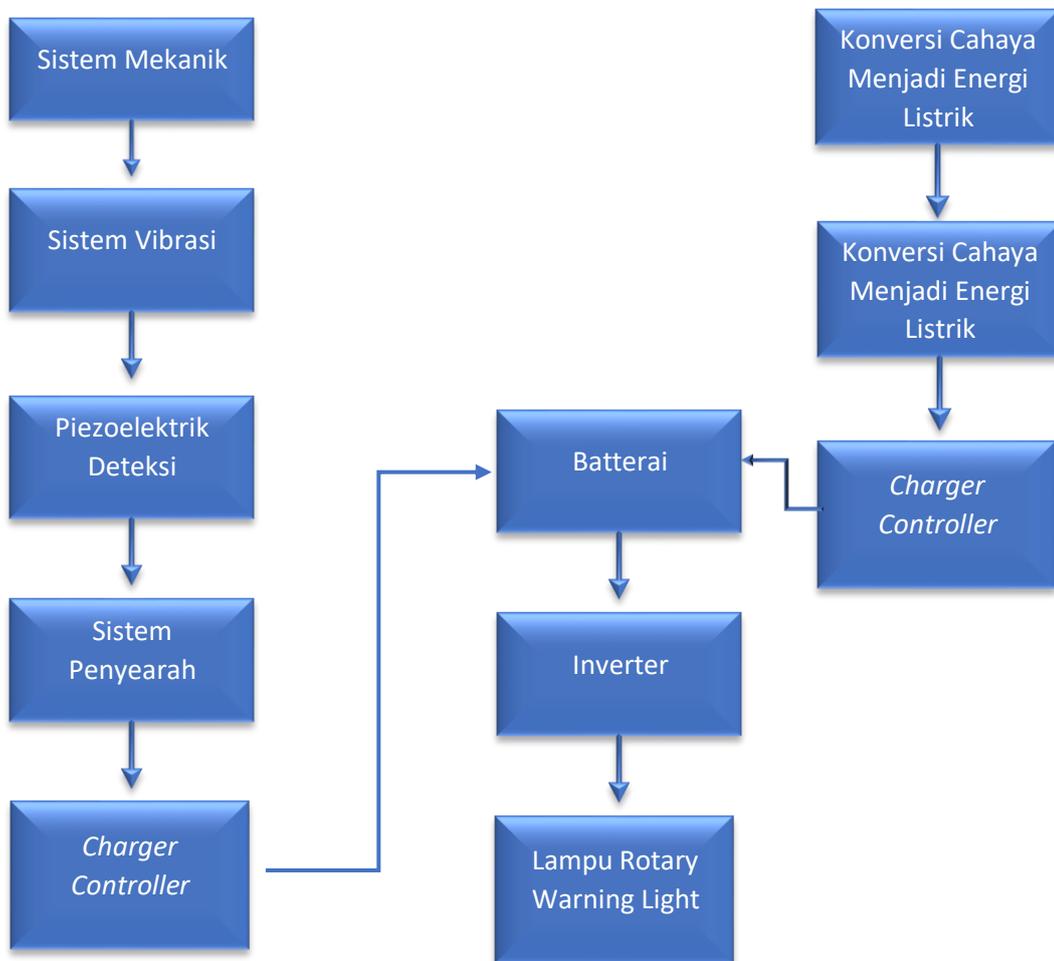
Tegangan Pengisian *Battery* dapat dihitung dengan:

$$\text{Tegangan Baterai} = \frac{\text{Total daya tersedia} \times \text{waktu pengisian}}{\text{kapasitas baterai}}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan pengisian} &= \frac{43,21 \text{ Watt} \times 6,665 \text{ jam}}{24\text{Ah}} \\ &= 11,999 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Maka *charger controller* harus memiliki spesifikasi tegangan pengisian sebesar 11,999 V dan arus pengisian 4,16 Ampere ke baterai 12 volt dalam kondisi standar. Faktor-faktor seperti intensitas cahaya matahari, sudut panel surya terhadap matahari dan kondisi cuaca akan mempengaruhi kinerja sebenarnya. Kapasitas *charger controller* yang ada dipasaran tidak ada yang 4,16 ampere, maka dari itu di ambil kapasitas yang lebih tinggi yaitu 10 Ampere.

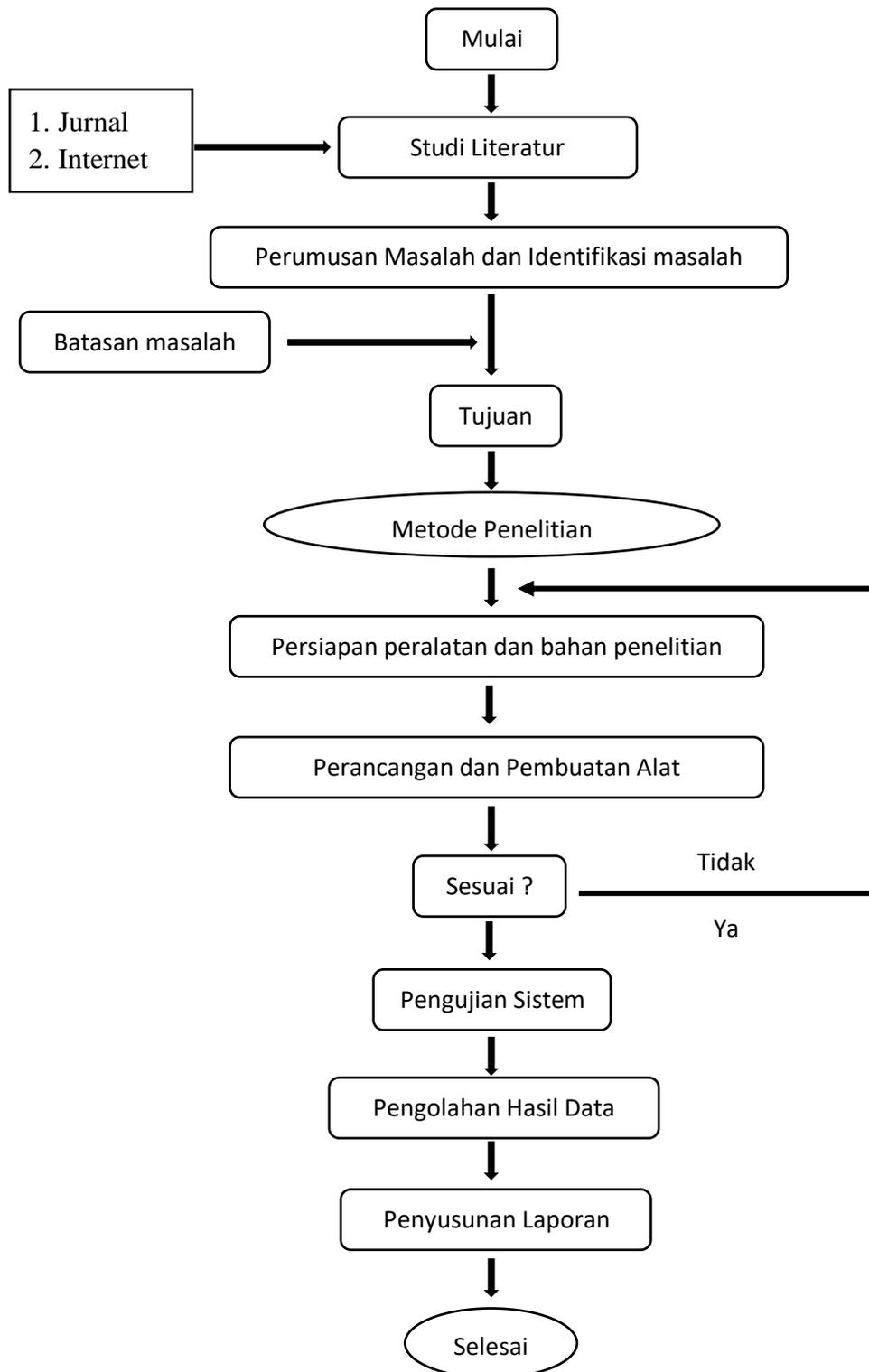
3.4.6 Diagram Blok Sistem Hybrid



Gambar 52 Diagram Block Sistem Hybrid Solar Cell dengan Piezoelektrik

3.4.7 Diagram Alir

Langkah kerja dalam penelitian ini mencakup perencanaan pembangkit *hibryd* tenaga piezoelektrik dan surya hingga analisa data.



Gambar 53 Diagram Alir

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Studi Pendahuluan

- a. Mengumpulkan informasi tentang sistem lampu *rotary warning light* yang digunakan di PT Pelindo 1 Cabang Belawan.
- b. Melakukan tinjauan literatur mengenai teknologi generator piezoelektrik dan *photovoltaik*, serta aplikasinya dalam sistem *hybrid*.
- c. Mempelajari prinsip kerja, komponen, dan spesifikasi teknis generator piezoelektrik dan panel *photovoltaik* yang akan digunakan.

3.5.2 Perancangan Sistem Hybrid

- a. Menentukan kebutuhan daya dan spesifikasi sistem lampu *rotary warning light* yang akan diintegrasikan dengan generator piezoelektrik dan *photovoltaik*.
- b. Merancang skema pengaturan daya dan kelistrikan yang sesuai dengan kebutuhan sistem.
- c. Memilih komponen-komponen yang tepat untuk sistem *hybrid*, termasuk generator piezoelektrik, panel *photovoltaik*, baterai, kontroler daya, dan pengatur beban.

3.5.3 Pembuatan Prototipe

- a. Membangun prototipe sistem hybrid generator piezoelektrik dan *photovoltaik* untuk lampu *rotary warning light*.
- b. Mengintegrasikan komponen-komponen yang telah dipilih ke dalam prototipe.
- c. Memastikan bahwa prototipe sistem dapat beroperasi dengan baik dan memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan.

3.5.4 Pengujian dan Analisis

- a. Melakukan pengujian terhadap prototipe sistem hybrid secara komprehensif.
- b. Merekam dan menganalisis data hasil pengujian, seperti daya yang dihasilkan oleh generator piezoelektrik dan panel *photovoltaik*, kestabilan sistem, efisiensi energi, dan kinerja lampu *rotary warning light*.

- c. Membandingkan hasil pengujian dengan sistem konvensional yang digunakan saat ini di PT Pelindo 1 Cabang Belawan.

3.5.5 Evaluasi dan Peningkatan

- a. Mengevaluasi kinerja prototipe sistem *hybrid* berdasarkan hasil pengujian dan analisis.
- b. Mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan sistem *hybrid* yang dibangun.
- c. Merancang perbaikan atau peningkatan yang diperlukan untuk meningkatkan kinerja sistem.

3.5.6 Penyusunan Laporan

- a. Menulis laporan penelitian yang mencakup deskripsi sistem, metodologi penelitian, hasil pengujian, analisis data, dan kesimpulan.
- b. Menyusun daftar pustaka yang merujuk pada sumber-sumber yang digunakan dalam penelitian.
- c. Membuat ringkasan atau abstrak yang menjelaskan secara singkat tujuan, metode, dan hasil penelitian.

3.6 Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini bersifat merancang 2 sistem pembangkit listrik sebagai sumber listrik untuk dapat mengoperasikan lampu *rotary warning light*. Adapun beberapa metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari Observasi lapangan, Pengukuran dan Pemantuan.

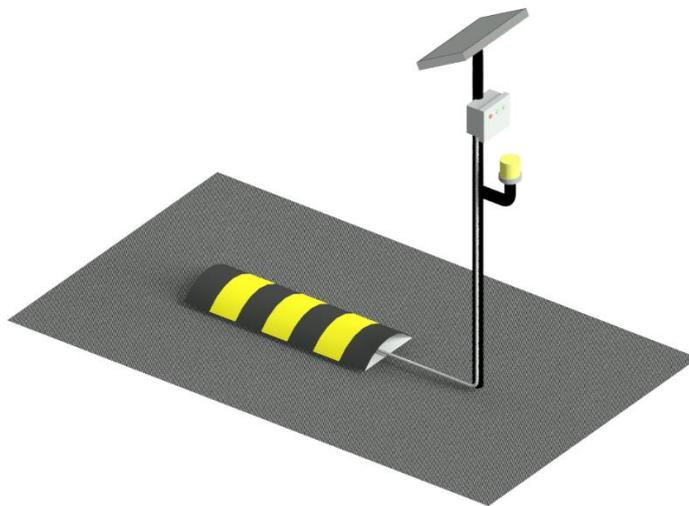
3.6.1 Observasi Lapangan

- a. Melakukan observasi langsung terhadap sistem lampu *rotary warning light* yang ada di PT Pelindo 1 Cabang Belawan.
- b. Mengamati penggunaan energi dan sumber daya yang saat ini digunakan dalam sistem tersebut.
- c. Mencatat kondisi lingkungan, seperti intensitas cahaya matahari, kecepatan angin, dan getaran yang mungkin mempengaruhi kinerja sistem.

3.6.2 Pengukuran dan Pemantauan

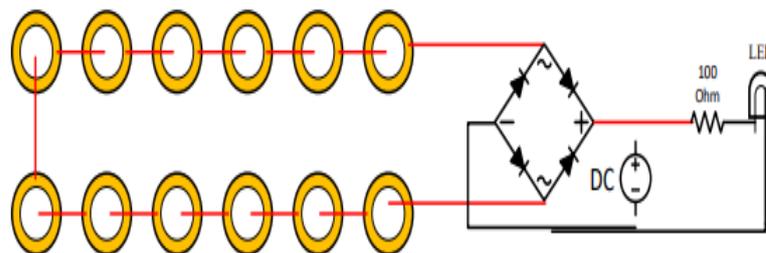
- a. Mengukur dan memantau parameter-parameter penting seperti intensitas cahaya matahari, kecepatan angin, dan getaran menggunakan alat pengukur yang sesuai.
- b. Merekam data pengukuran dalam jangka waktu yang cukup untuk mendapatkan informasi yang representatif tentang kondisi lingkungan.
- c. Merekam data pengukuran daya yang dihasilkan oleh generator piezoelektrik dan panel *photovoltaik*.

3.7 Ilustrasi 3D System Hybrid



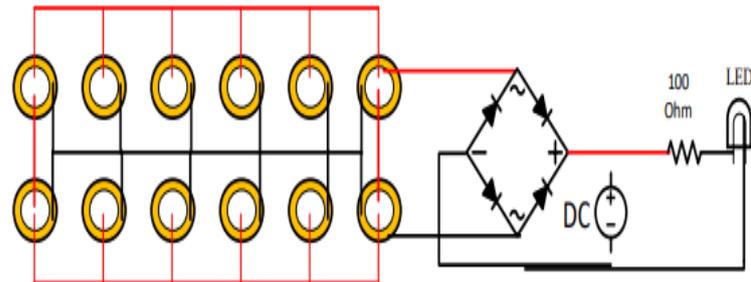
Gambar 3.4 Ilustrasi 3D System Hybrid PE dan PV

3.8 Skema Sistem Rangkaian Seri Piezoelektrik



Gambar 54 Skema Rangkaian Prototipe Seri

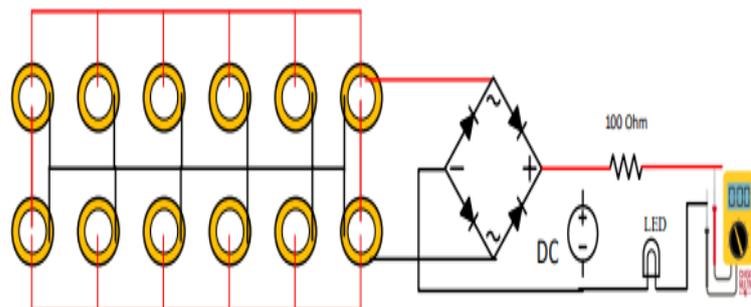
3.9 Skema Sistem Rangkaian Pararel Piezoelektrik



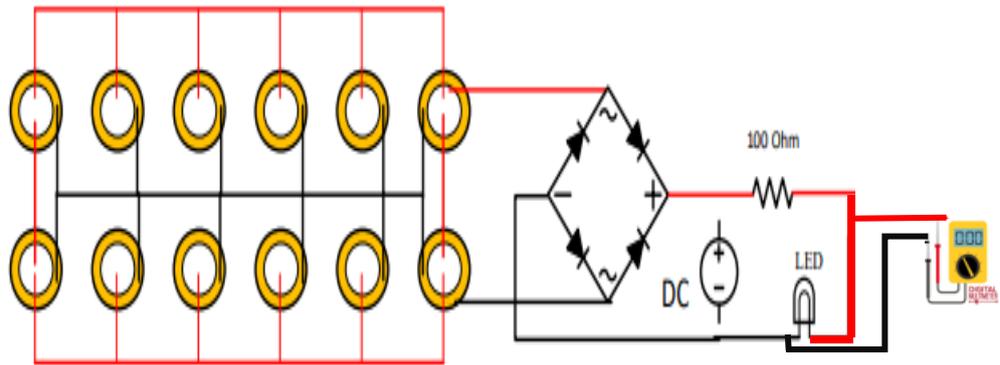
Gambar 55 Skema Rangkaian Perototipe Pararel

3.10 Analisis dan Pengambilan Data

Pada proses pengujian dan pengambilan data dilakukan secara langsung dengan menggunakan multimeter digital sebagai alat pengukur tegangan dan arus yang dihasilkan oleh prototipe. Sedangkan untuk daya didapatkan dengan menggunakan rumus $P = V \times I$. Cara pengujian prototipe dibagi menjadi 2 yang pertama adalah penggunaan berat kendaraan roda dua yang melewati prototipe berada pada interval 150 Kg sampai 200 Kg dan yang kedua yaitu berat badan manusia. Sedangkan untuk proses pengambilan data ada 2 pengujian yang dilakukan dengan menggunakan berat yang bervariasi, yaitu pengujian alat pada rangkaian seri dan rangkaian paralel. Berikut adalah gambar rangkaian pengujian prototipe untuk pengujian arus dan tegangan:

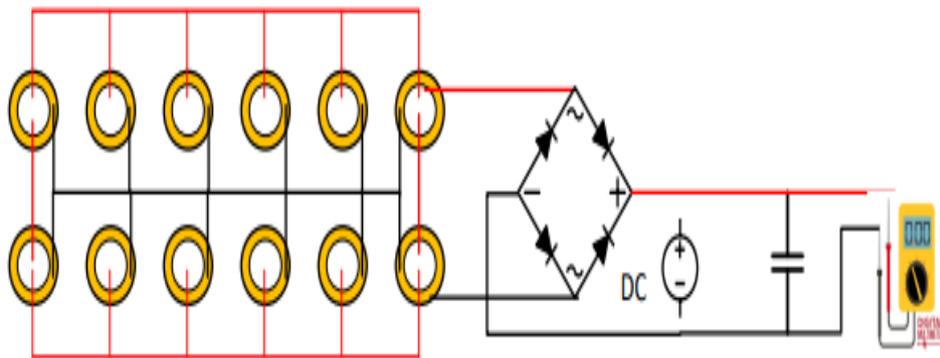


Gambar 56 Rangkaian Cara Pengukuran Arus



Gambar 3.8 Rangkaian Cara Pengukuran Tegangan

Setelah dianalisa dan mendapatkan hasil konfigurasi, disini akan diambil data waktu pengisian muatan listrik pada kapasitor, waktu yang digunakan adalah 1 menit dengan melihat interval waktu pengisian setiap 10 detik sekali. Pada pengujian kali ini menggunakan satu sample berat saja yaitu 62 Kg. Berat ini akan memberikan tekanan secara impuls atau konstan pada prototipe selama 1 menit. Berikut adalah Gambar 3.7.6 yang menjelaskan tentang rangkaian prototipe untuk pengukuran pengisian kapasitor:



Gambar 57 Rangkaian Cara Pengukuran Pengisian Kapasitor

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Modifikasi Speed Bump dengan 56 Keping Piezoelektrik 35 mm

Speed bump atau polisi tidur yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari bahan karet, plastik kuat dan bahan komposit yang tahan terhadap cuaca dan beban berat dalam jangka panjang dan sudah didesain terdapat dua line jalur kabel. Desain pada polisi tidur tersebut diperuntukan untuk melindungi kabel listrik atau kabel komunikasi yang melintasi jalan atau area lalu lintas. Tujuannya adalah untuk memastikan keamanan kabel tersebut, mencegah kerusakan dan menghindari bahaya potential bagi kendaraan dan pejalan kaki. Dari kehandalan material tahan lama dan juga desain *speed bump* tersebut saya memanfaatkan untuk dimodifikasi agar dapat menghasilkan energi listrik.

Speed bump yang digunakan berukuran 970 x 235 x 50 mm dengan ukuran jalur 32 x 32 x 2 mm. Dengan ukuran speed bump tersebut saya menambahkan support untuk dudukan kepingan piezo agar optimal mendapatkan tekanan dari kendaraan yang melintas. Support dudukan tersebut berukuran 30 mm yang berarti menyisahkan 2 mm dari permukaan speed bump. Jumlah kepingan piezo yang dirangkai berjumlah 56 keping. Kepingan piezo dirangkai menggunakan kabel NYAF berukuran 1 x 0,5 mm dengan warna kabel bervariasi. 56 kepingan piezo dirangkai secara seri sebanyak 6 kali dan paralel sebanyak 1 kali. Rangkaian tersebut dihubungkan juga dengan modul rectifier untuk membentuk gelombang penuh dan menghasilkan tegangan 1,549 Volt, 0,016647 Amper dan 0,025333 Watt.



Gambar 4.1 Modifikasi Speed Bump dengan Piezoelektrik untuk Menghasilkan Energi Listrik DC

4.2 Pengujian Alat Prototipe Hybrid System

Rancangan sistem *hybrid* generator piezoelektrik photovolataik dengan memodifikasi *speed bump*, menyusun beberapa keping piezoelektrik baik rangkaian seri maupun rangkaian paralel didalamnya dan menghubungkan kedua pembangkit tersebut untuk membentuk suatu sistem pembangkit energi listrik yang disebut pembangkit listrik tenaga *hybrid* (PLTH). PLTH akan menghasilkan tegangan dan arus yang diperlukan untuk mengoperasikan lampu *rotary warning light* di Gate PT Pelindo Regional 1 Belawan selama 24 jam. Pada rancang bangun PLTH ini akan dilakukan 2 pembangkitan energi listrik yang pertama perancangan *speed bump* untuk dapat menghasilkan energi listrik skala mikro dengan mengkonversi hasil variasi tekanan kendaraan roda 2 yang melintas diatas *speed bump* melalui gate 1 pintu masuk pelabuhan indonesia cabang belawan, dan yang kedua perancangan pembangkit energi listrik dari *solar cell* 50 Wp.



Gambar 4.2 Prototipe Hybrid System Solar Cell dan Piezoelektrik

4.3 Analisis Rancang Bangun Prototipe System Hybrid Piezoelektrik dan Solar Cell

Analisis rancang bangun sistem penggabungan 2 pembangkitan energi listrik membahas mengenai pengujian prototipe generator piezoelektrik dan solar cell dengan pemanfaatan piezoelektrik dan panel surya sebagai pengisian pembangkit energi listrik untuk pengisian pada baterai yang selanjutnya akan dianalisa, hal tersebut bertujuan untuk memperoleh data yang dibutuhkan untuk memperoleh besar tegangan, arus, dan daya listrik yang dibutuhkan baterai untuk tetap terus beroperasi sehingga dapat diketahui apakah penggunaan pembangkitan sistem hybrid piezoelektrik dan solar cell dapat memenuhi kebutuhan dalam pengisian baterai.

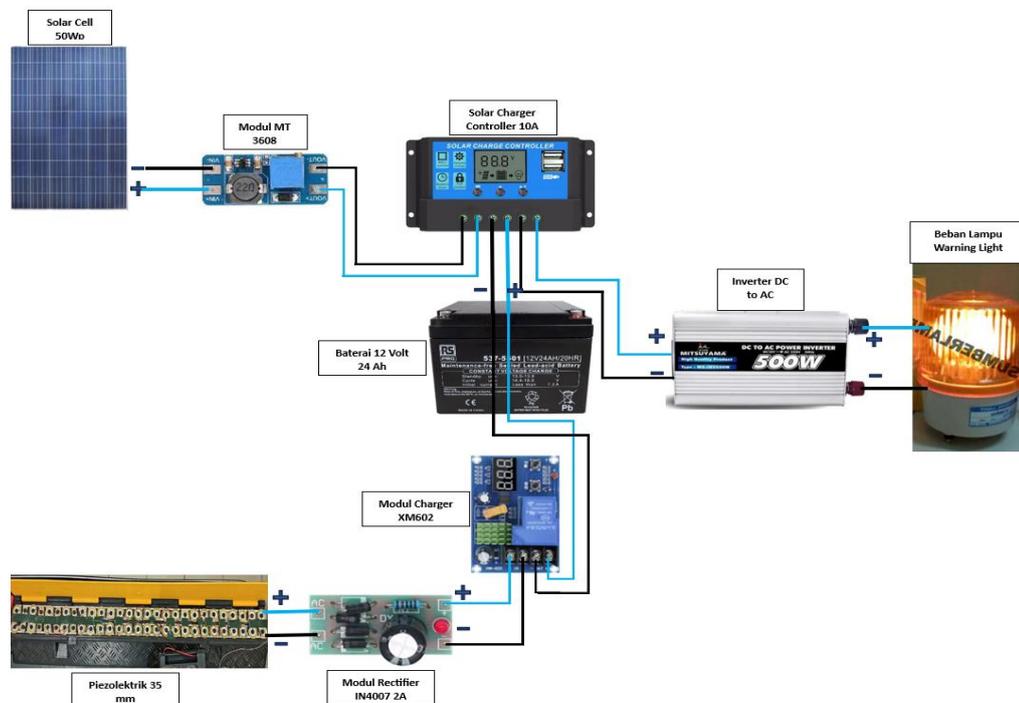
Analisa rancangan sistem pengisian baterai diperoleh dari data percobaan dan pengukuran konstruksi prototipe speedbump yang telah dimodifikasi terdapat 56 keping piezoelektrik 35 mm dan dihubungkan seri dengan solar cell 50 Wp untuk dapat mengisi baterai dengan kapasitas 12 volt 24 Ah.



Gambar 4.3 Instalasi Rancang Bangun System Hybrid Solar cell dan Piezoelektrik Pada Polisi Tidur

4.4 Cara Kerja Rancang Bangun Sistem Hybrid Berbasis Solar Cell dan Pemanfaatan Piezoelektrik Pada Polisi Tidur

Cara kerja rancang bangun pengisian baterai pada sistem hybrid berbasis solar cell dan pemanfaatan piezoelektrik pada modifikasi polisi tidur, yaitu skema rangkaian pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Instalasi Rancang Bangun System Hybrid Solar Cell dan Piezoelektrik

Gambar diatas merupakan instalasi skema rangkaian sistem hybrid pengisian baterai dengan memanfaatkan solar cell dan piezoelektrik. Terlihat pada sel surya dihubungkan ke input MT3608 dan output MT3608 dihubungkan ke SCC sebagai tegangan input SCC. Tegangan yang masuk melalui SCC akan langsung mengisi baterai yang terhubung. Output SCC akan langsung terhubung ke input inverter dan output inverter setelah melewati pengaman aliran listrik langsung terhubung ke beban. Sementara hasil listrik dari piezoelektrik terhubung ke input *rectifier IN 4007* yang telah terpasang indikator *LED*, *output IN4007* dihubungkan ke input XM602, output XM602 langsung masuk ke baterai untuk melakukan pengisian.

Konsep kerja pengisian baterai dari skema 4.2 adalah sebagai berikut :

1. Solar cell menerima cahaya, sehingga solar cell bekerja mengkonversi cahaya dari matahari untuk menghasilkan energi listrik.
2. Piezoelektrik yang mendapatkan energi mekanik berupa gaya tekan dari kendaraan roda 2 yang melintas akan menghasilkan energi listrik dan akan melakukan pengisian ke baterai.
3. Sumber listrik yang dihasilkan dari sistem solar cell dan piezoelektrik ditransmisi menuju baterai untuk melakukan pemulihan pada baterai untuk diisi.
4. Output dari rectifier dihubungkan ke input MT 3608 untuk mengubah sumber tegangan menjadi 12 volt, bertujuan agar hasil sumber listrik yang telah dihasilkan dapat disesuaikan dengan tegangan yang dapat diterima SCC.
5. Modul IN4007 akan membentuk gelombang penuh pada tegangan listrik yang melewatinya.
6. XM 602 akan melakukan pengisian pada baterai dari sumber listrik piezoelektrik.
7. SCC (Solar Charge Controller) menyalurkan dan mengontrol sumber energi listrik untuk pengisian baterai dan mentransmisikan sumber listrik ke inverter.
8. Inverter, setelah menerima sumber tegangan akan merubah sumber listrik DC menjadi AC dan outputnya akan dihubungkan ke lampu warning light.

4.5 Analisa Daya Pada Sistem Hybrid Piezoelektrik dan Solar Cell

Analisis kinerja pada sistem hybrid yang menggabungkan teknologi piezoelektrik dan sel surya melibatkan pengukuran dan perhitungan terhadap bagaimana setiap komponen sistem menghasilkan daya, bagaimana interaksi antara komponen-komponen tersebut memengaruhi hasil akhir, dan sejauh mana sistem ini dapat memproduksi energi listrik.

4.5.1 Analisa Batas Minimal dan Maksimal Daya Solar Cell 50 Wp

Untuk menganalisis batas minimal dan maksimal daya dari sebuah sel surya polykristal 50 Wp (Watt peak), perlu mempertimbangkan beberapa faktor. Berikut adalah langkah-langkah untuk menganalisis batas daya minimal dan maksimal:

1. Intensitas Cahaya Matahari (*Illuminance*):

Batas minimal daya tergantung pada intensitas cahaya matahari di lokasi dan kondisi tertentu. Pada kondisi matahari terbenam atau cuaca buruk, intensitas cahaya akan berkurang, yang dapat menghasilkan daya minimal. Selama kondisi matahari puncak, intensitas cahaya akan mencapai maksimum, yang akan memberikan daya maksimal.

2. Efisiensi Sel Surya:

Efisiensi sel surya monokristal adalah faktor penting. Efisiensi ini mewakili seberapa besar persentase energi cahaya yang diubah menjadi energi listrik. Untuk menghitung daya maksimal teoritis, dapat mengalikan kapasitas puncak (50 Wp) dengan efisiensi sel surya dalam bentuk desimal. Misalnya, jika efisiensi sel surya adalah 20%, maka daya maksimalnya adalah $0,20 \times 50 \text{ Wp} = 10 \text{ W}$.

3. Suhu:

Suhu juga memengaruhi daya yang dihasilkan oleh sel surya. Semakin tinggi suhu, semakin rendah efisiensi sel surya. Sebaliknya, pada suhu rendah, efisiensi mungkin meningkat.

4. Orientasi dan Inklinasi:

Orientasi dan inklinasi sel surya akan memengaruhi seberapa baik sel surya menangkap cahaya matahari. Pemasangan yang optimal akan memaksimalkan daya yang dihasilkan.

5. Faktor Kinerja Maksimal (Maximum Power Point):

Mengidentifikasi titik daya maksimum pada kurva daya-tegangan (P-V) atau kurva daya-arus (P-I) dari sel surya tersebut. Titik ini dikenal sebagai Maximum Power Point (MPP), dan daya maksimal dapat diperoleh pada titik ini dengan menggunakan konverter daya yang sesuai.

6. Resistansi Internal:

Sel surya memiliki resistansi internal yang dapat memengaruhi daya yang dihasilkan. Sel surya polykristal 50 Wp, daya maksimal yang dapat dihasilkan pada kondisi ideal (efisiensi 100%, suhu optimal, intensitas cahaya maksimum) adalah 50 Watt. Namun, dalam kondisi praktis yang nyata, daya yang dihasilkan akan kurang dari nilai ini karena faktor-faktor seperti intensitas cahaya yang berfluktuasi, suhu yang tidak selalu ideal, dan resistansi internal.

Penting untuk memahami bahwa daya 50 Wp merupakan kapasitas puncak atau daya maksimal dalam kondisi optimal. Daya sebenarnya yang dihasilkan akan bervariasi seiring perubahan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, untuk menentukan daya aktual yang dihasilkan oleh sel surya ini dalam kondisi tertentu, perlu melakukan pemantauan atau mengacu pada data karakteristik kinerja sel surya dalam berbagai kondisi operasional.

Sistem hybrid ini menggunakan 1 buah baterai 12 volt 24 Ah. Daya input yang digunakan dalam pengisian baterai merupakan sumber listrik DC (*Direct Current*) sebesar 13.7 volt agar menyesuaikan input yang dapat diterima baterai, ini dibuktikan dengan melakukan pengukuran menggunakan multimeter DC.



Gambar 4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Maksimal Solar Cell 50wp

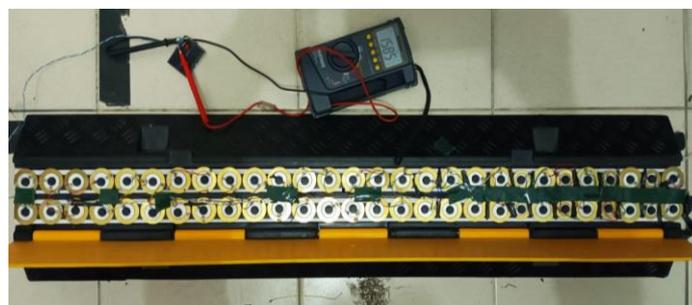
Hasil pengukuran yang telah dilakukan diperoleh data sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Daya minimal} \quad P &= V \times I \\
 &= 16,1 \times 1,9 \\
 &= 30,59 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Daya maksimal} \quad P &= V \times I \\
 &= 20,48 \times 2,3 \\
 &= 47,104 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

4.5.2 Analisa Batas Minimum dan Maksimum Daya 56 keping Piezoelektrik

Selain dengan menggunakan solar cell sistem hybrid ini juga dilengkapi dengan piezoelectric sebagai sumber energi. Sebagai penunjang energi tambahan pada sistem hybrid ini, piezoelectric di instalasi pada *speed bump* agar menghasilkan daya yang optimal. *Piezoelectric* yang digunakan yaitu sebanyak 56 keping yang dibagi menjadi delapan keping dipasang seri menjadi tujuh rangkaian paralel sepanjang 100 cm.



Gambar 4.6 Instalasi Rancang Bangun Piezoelektrik 56 Keping Piezo Pada System Hybrid

Hasil pengukuran yang telah dilakukan diperoleh data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Daya minimal} \quad P &= V \times I \text{ mA} \\ &= 1,459 \times 0,0163 \text{ mA} \\ &= 0,023781 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Daya maksimal} \quad P &= V \times I \\ &= 1,615 \times 0,0176 \text{ mA} \\ &= 0,028424 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.6 Pengujian dan Analisa Daya Yang Dihasilkan Oleh Solar Cell

Pada tabel berikut merupakan hasil dari analisis pengukuran yang telah dilakukan terhadap 1 buah solar cell 50 Wp dalam 15 kali pengukuran dan terdapat 15 kali perhitungan dengan selang waktu per 30 menit dari pukul 09:30-16:30.



Gambar 4.7 Pengujian Prototipe Solar Cell 50 Wp

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran dan Perhitungan Solar Cell 50 Wp

No	Jam	Tegangan Input Solar cell (V)	Arus Input (A)	Tegangan Baterai (V)	Hasil Daya (Watt)	Kondisi Cuaca
1	09:30	16,1	1,9	12,5	30,59	Cerah Berawan
2	10:00	16,15	2	12,5	32,3	Cerah Berawan
3	10:30	16,3	2,05	12,5	33,415	Cerah Berawan

4	11:00	16,39	2,1	12,6	34,419	Cerah Berawan
5	11:30	20,39	2,3	12,6	46,897	Cerah
6	12:00	20,48	2,3	12,6	47,104	Cerah
7	12:30	20,42	2,3	12,4	46,966	Cerah
8	13:00	20,42	2,3	12,4	46,966	Cerah
9	13:30	18,41	2,2	12,8	40,502	Cerah
10	14:00	18,37	2,2	12,7	40,414	Cerah
11	14:30	16,37	2,1	12,5	34,377	Cerah Berawan
12	15:00	16,35	2,1	12,4	34,335	Cerah Berawan
13	15:30	16,47	2,1	12,3	34,587	Cerah Berawan
14	16:00	16,46	2,1	12,9	34,566	Cerah Berawan
15	16:30	16,45	2,1	12,4	34,545	Cerah Berawan
Rata-rata Total		17,702	2,143333333	12,54	38,1322	

Dari data diatas maka dapat dilakukan perhitungan daya *solar cell* sebagai berikut :

- 1) Daya input *solar cell* pada jam 09:30

$$\begin{aligned}
 P &= V \times I \\
 &= 16,10 \times 1,9A \\
 &= 30,59 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

- 2) Daya input *solar cell* pada jam 10:00

$$\begin{aligned}
 P &= V \times I \\
 &= 16,15 \times 2A \\
 &= 32,3 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

3) Daya input *solar cell* pada jam 10:30

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 16,30 \times 2,05A \\ &= 33,415 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4) Daya input *solar cell* pada jam 11:00

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 16,39 \times 2,1A \\ &= 34,419 \text{ Watt} \end{aligned}$$

5) Daya input *solar cell* pada jam 11:30

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 20,39 \times 2,3A \\ &= 46,897 \text{ Watt} \end{aligned}$$

6) Daya input *solar cell* pada jam 12:00

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 20,48 \times 2,3A \\ &= 47,104 \text{ Watt} \end{aligned}$$

7) Daya input *solar cell* pada jam 12:30

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 20,42 \times 2,3A \\ &= 46,966 \text{ Watt} \end{aligned}$$

8) Daya input *solar cell* pada jam 13:00

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 20,42 \times 2,3A \\ &= 46,966 \text{ Watt} \end{aligned}$$

9) Daya input *solar cell* pada jam 13:30

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 18,41 \times 2,2A \\ &= 40,502 \text{ Watt} \end{aligned}$$

10) Daya input *solar cell* pada jam 14:00

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 18,37 \times 2,2A \\ &= 40,414 \text{ Watt} \end{aligned}$$

11) Daya input *solar cell* pada jam 14:30

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 16,37 \times 2,1A \\ &= 34,377 \text{ Watt} \end{aligned}$$

12) Daya input *solar cell* pada jam 15:00

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 16,35 \times 2,1A \\ &= 34,335 \text{ Watt} \end{aligned}$$

13) Daya input *solar cell* pada jam 15:30

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 16,47 \times 2,1A \\ &= 34,587 \text{ Watt} \end{aligned}$$

14) Daya input *solar cell* pada jam 16:00

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 16,46 \times 2,1A \\ &= 34,566 \text{ Watt} \end{aligned}$$

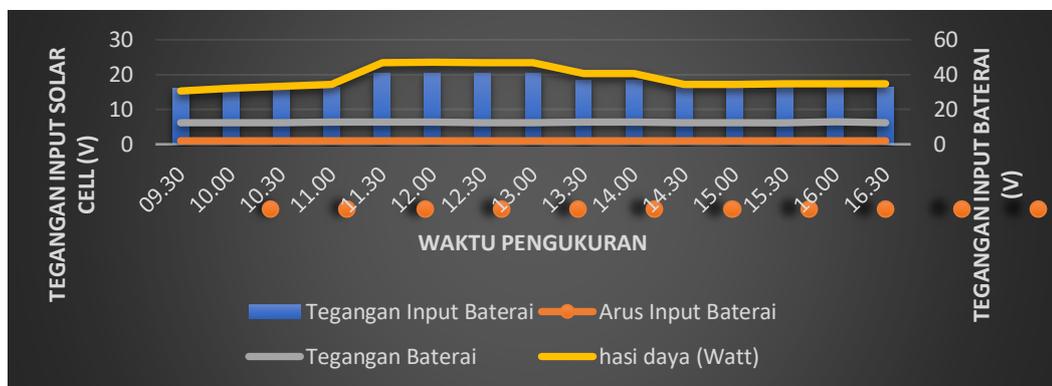
15) Daya input *solar cell* pada jam 16:30

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 16,45 \times 2,1A \\ &= 34,545 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan pada hari pertama dengan kondisi cuaca cerah yang dimulai pada pukul 09:30 pagi sampai dengan 16:30 sore. Pengukuran dilakukan setiap 30 menit untuk mendapatkan sampel tegangan yang dihasilkan oleh solar cell. Pengukuran awal dilakukan terhadap solar cell

menghasilkan tegangan sebesar 16,10volt kemudian pada jam 09:30, 30 menit berikutnya tegangan meningkat menjadi 16,15volt begitu seterusnya hingga mencapai titik maksimal pada jam 12.00 dengan tegangan 20,48 volt. Setelah mencapai titik tertinggi kemudian tegangan mengalami penurunan terus menerus hingga 16,45volt pada akhir pengambilan sampel yaitu pukul 16.30 sore. Hal ini terjadi dikarenakan titik intensitas cahaya matahari yang mengenai solar cell menurun sehingga menyebabkan penurunan tegangan.

Berikut dibawah ini merupakan grafik hasil pengukuran tegangan pada solar cell sebanyak 15 kali percobaan.



Gambar 4.8 Grafik Hasil Tegangan Input, Tegangan Baterai Terhadap Dan Arus Waktu Pengukuran

Berdasarkan grafik diatas tegangan minimum terjadi pada jam 09:30 sedangkan tegangan pada titik maksimum yaitu terjadi pada jam 12:00. Tinggi rendahnya tegangan yang dihasilkan tergantung dari panas dari matahari yang didapatkan oleh solar cell. Rata-rata tegangan yang didapatkan dari pengukuran jam 09:30 hingga 16:30 adalah 17,702 volt.

4.7 Pengujian dan Analisa Daya Yang Dihasilkan Oleh 56 Keping Piezoelektrik

Analisis ini akan memberikan perkiraan daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh 56 keping piezoelektrik pada berat kendaraan roda dua yang melintas sebanyak 15 kali. Berikut dibawah ini adalah hasil analisis yang telah dilakukan terhadap piezoelektrik:



Gambar 4.9 Pengujian Analisa Daya Pada Speed Bump Piezoelektrik

Tabel 4.2 Merupakan Hasil Pengukuran Dari Generator Piezoelektrik Pada Speed Bump

No	Jenis Kendaraan Roda Dua	Berat Kendaraan + pengendara (KG)	Interval Setiap Motor (menit)	Hasil Tegangan (V)	Hasil Arus (mA)	Hasil Daya (Watt)
1	Honda Beat	170	1	1,615	0,0175	0,028
2	Honda Vario 125	200	1	1,614	0,0176	0,028
3	Honda Supra	190	2	1,527	0,0172	0,026
4	Honda PCX	220	3	1,487	0,0162	0,024
5	Yamaha VEGA	180	1	1,575	0,0167	0,026
6	Yamaha MIO SPORTY	180	1	1,523	0,0165	0,025
7	Yamaha Vixion R	210	1	1,516	0,0164	0,024
8	Yamaha AEROX	190	1	1,556	0,0163	0,025
9	Yamaha Scorpio 225	230	1,5	1,459	0,0163	0,023
10	Yamaha NMAX	210	0,5	1,563	0,0164	0,025
11	Yamaha Fazzio	175	0,5	1,612	0,0174	0,028
12	Honda Scoopy	170	1	1,559	0,0163	0,025
13	Yamaha Fino	180	0,5	1,542	0,0162	0,024
14	Honda Vario 160	200	0,5	1,512	0,0162	0,024
15	Yamaha LEXI	200	0,5	1,575	0,0165	0,025
Total Rata-Rata		193	1,27	1,549	0,016647	0,025333

Dari data diatas maka dapat dilakukan perhitungan daya *piezoelektrik* sebagai berikut :

- 1) Daya input *piezoelktrik* pada kendaraan *Honda Beat* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,615 \times 0,0175A \\ &= 0,028 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- 2) Daya input *piezoelktrik* pada kendaraan *Honda Vario* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,614 \times 0,0176A \\ &= 0,028 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- 3) Daya input *piezolektrik* pada kendaraan *Hondra Supra* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,527 \times 0,0172A \\ &= 0,026 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- 4) Daya input *piezolektrik* pada kendaraan *Honda PCX* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,487 \times 0,0162A \\ &= 0,024 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- 5) Daya input *piezolektrik* pada kendaraan *Vega* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,575 \times 0,0167A \\ &= 0,026 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- 6) Daya input *piezolektrik* pada kendaraan *Mio Sporty* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,523 \times 0,0165A \\ &= 0,025 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- 7) Daya input *piezolektrik* pada kendaraan *Vixion R* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,516 \times 0,0164A \\ &= 0,024 \text{ Watt} \end{aligned}$$

8) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *Aerox* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,556 \times 0,0163A \\ &= 0,025 \text{ Watt} \end{aligned}$$

9) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *Scorpio* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,459 \times 0,0163A \\ &= 0,023 \text{ Watt} \end{aligned}$$

10) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *N-max* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,563 \times 0,0164A \\ &= 0,025 \text{ Watt} \end{aligned}$$

11) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *Fazzio* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,612 \times 0,0174A \\ &= 0,028 \text{ Watt} \end{aligned}$$

12) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *Scoopy* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,559 \times 0,0163A \\ &= 0,025 \text{ Watt} \end{aligned}$$

13) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *Fino* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,542 \times 0,0162 \\ &= 0,024 \text{ Watt} \end{aligned}$$

14) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *Honda Vario 160* dan pengendara

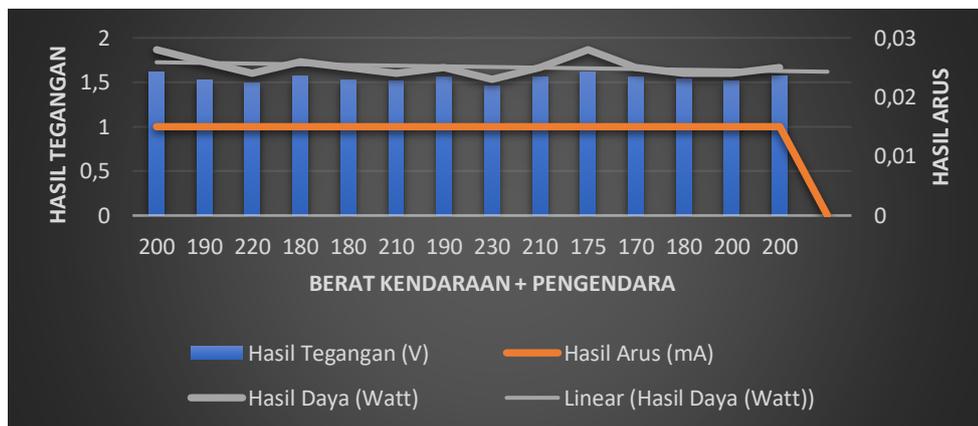
$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,512 \times 0,0162A \\ &= 0,024 \text{ Watt} \end{aligned}$$

15) Daya input *piezoelektrik* pada kendaraan *Yamaha Lexi* dan pengendara

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 1,575 \times 0,0165A \\ &= 0,025 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Hasil analisis pada Tabel 4.2 menyiratkan bahwa ketika tekanan yang diberikan pada speed bump yang telah dilengkapi dengan piezoelektrik diatur secara seri dan paralel, tegangan yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan peningkatan tekanan. Namun, perlu diperhatikan bahwa penambahan lebih banyak piezoelektrik tidak selalu menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam tegangan. Hal ini disebabkan oleh ketidakmerataan tekanan yang diberikan pada setiap rangkaian piezoelektrik, dan juga sensitivitas yang tinggi dari piezoelektrik terhadap tekanan. Akibatnya, tegangan yang dihasilkan oleh setiap rangkaian piezoelektrik dapat berbeda secara signifikan..

Berikut dibawah ini merupakan grafik hasil pengukuran tegangan pada solar cell sebanyak 15 kali percobaan.



Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengukuran Tegangan, Arus Dan Perhitungan Daya Piezoelektrik

4.8 Analisa pengisian baterai oleh sistem hybrid solar cell dan piezoelektrik

Rumus untuk menganalisis pengisian baterai oleh sistem Hybrid Solar Cell dan Piezoelektrik melibatkan berbagai parameter seperti daya yang dihasilkan oleh panel surya, daya yang dihasilkan oleh perangkat Piezoelektrik dan kapasitas baterai. Berikut adalah rumus dasar yang digunakan didalam penelitian ini:

1) Daya yang Dihasilkan oleh Panel Surya (P_s):

Besarnya daya yang dihasilkan pada panel surya dipengaruhi oleh beberapa hal seperti luas panel surya sendiri, adanya intensitas radiasi

matahari dan efisiensi konversi panel surya. Berikut ini hasil pengukuran dan perhitungan besarnya daya yang dihasilkan oleh panel surya:

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Daya yang Dihasilkan Solar Cell

Luas Panel (A)	Intensitas (I)	Efisiensi (E)	Ps ($A \times I \times E$)
50 Wp	5 Jam	0,2	50 Watt

Jadi, panel surya dengan daya 50 Wp akan menghasilkan 50 Watt energi listrik dalam sehari dengan cuaca cerah.

2) Daya yang Dihasilkan oleh Perangkat Piezoelektrik (Pp):

Besarnya daya yang dihasilkan oleh perangkat piezoelektrik dipengaruhi oleh beberapa hal seperti kapasitansi piezoelektrik, tegangan yang dihasilkan oleh piezoelektrik, dan frekuensi getaran atau tekanan yang diterapkan pada piezoelektrik. Berikut ini hasil pengukuran besarnya daya yang dihasilkan oleh perangkat piezoelektrik:

Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Daya yang Dihasilkan Piezoelektrik

Kapasitas (C)	Tegangan (V)	Frekuensi (f)	Pp ($\frac{1}{2} \times C \times V^2 \times f$)
1 nF	1,549 Volt	21 Hz	0,0251937105 Watt

Jadi, perangkat piezoelektrik dengan kapasitas 1 nF, dalam kondisi tersebut akan menghasilkan 0,025 Watt energi listrik dalam sehari dengan cuaca cerah.

3) Daya yang Dihasilkan oleh Sistem Hybrid (Phybrid):

Besarnya daya yang dihasilkan oleh sistem hybrid dipengaruhi oleh besarnya daya yang dihasilkan oleh panel surya dan juga besarnya daya yang dihasilkan oleh perangkat piezoelektrik. Berikut ini hasil pengukuran besarnya daya yang dihasilkan oleh sistem hybrid:

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Daya yang Dihasilkan Sistem Hybrid

Daya Panel Surya (Ps)	Daya Piezoelektrik (Pp)	Phybrid (Ps + Pp)
50 Watt	0,025 193 710 5	50,025 Watt

Jadi, sistem hybrid dengan daya yang dihasilkan panel surya sebesar 50 W dan dengan daya perangkat piezoelektrik sebesar 0,025W akan menghasilkan daya pada sistem hybrid sebesar 50,025 Watt.

4) Daya yang Masuk ke Baterai (Pb):

Besarnya daya yang masuk pada baterai dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu: daya pada panel surya, daya pada perangkat piezoelektrik dan besarnya daya pada sistem hybrid serta energi eksternal atau internal yang dihasilkan. Berikut ini hasil pengukuran besarnya daya yang masuk pada baterai:

Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Daya yang Masuk ke Baterai

Daya Phybrid	Energi	Pb (Phybrid × nb)
50, 025 Watt	86,8%	43,421 Watt

Jadi, daya yang akan masuk pada baterai dengan jumlah besar daya pada sistem hybrid sebesar 50,025 dan energi yang dihasilkan sebesar 86,8% adalah 43,421 W.

5) Waktu Pengisian Baterai (t):

Lama nya waktu yang diperlukan untuk dapat mengisi baterai pada penelitian ini dipengaruhi oleh beberapa komponen yaitu: kapasitas baterai yang digunakan, total power pada baterai dan juga tegangan baterai. Berikut ini hasil pengukuran lama nya waktu yang dibutuhkan untuk mengisi baterai:

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Waktu Pengisian Baterai

Kapasitas	Total Power	Tegangan	$T = \left(\frac{\text{Kapasitas}}{\text{Total Power/Tegangan}} \right)$
24 Ah	43,21 W	12 V	6,665 Jam

Jadi, waktu yang diperlukan agar dapat mengisi bagterai dengan kapasitas 24 Ah dan total power sebesar 43,21 W serta dengan tegangan baterai sebesar 12 V adalah selama 6,665 Jam.

Perlu diingat bahwa rumus-rumus ini adalah dasar untuk menganalisis pengisian baterai oleh sistem *Hybrid Solar Cell* dan Piezoelektrik. Variabel-variabel seperti karakteristik material, dan kondisi lingkungan perlu ditentukan secara spesifik berdasarkan desain dan aplikasi sistem yang digunakan. Selain itu, pemantauan dan pengendalian yang baik juga diperlukan untuk mengoptimalkan pengisian baterai.

4.9 Analisa Pemakaian Beban Lampu Warning Light



Gambar 4.11 Instalasi Lampu Warning Light Pada Sistem Hybrid Solar Cell dan Piezoelektrik

Dalam analisis pemakaian beban listrik 10watt pada 12volt selama 24 jam pada sistem hybrid solar cell dan piezoelektrik dengan daya total 50,025watt pada 12volt dan kapasitas baterai 24 Ah pada 12 volt, kita akan melihat apakah sistem ini mampu memenuhi kebutuhan listrik beban selama 24 jam. Langkah-langkah analisisnya adalah sebagai berikut:

4.9.1 Ketersediaan Energi dari Sistem Hybrid

- a) Sistem *hybrid* ini memiliki total daya 50,025watt dengan tegangan 12volt, yang dapat digunakan untuk mengisi baterai dan memasok beban.
- b) Ketersediaan energi dari panel surya dan generator piezoelektrik akan bervariasi sepanjang hari dan mungkin tidak selalu mencukupi untuk memenuhi kebutuhan beban 10 watt.

4.9.2 Penggunaan Energi Oleh Beban

Beban listrik 10watt pada 12volt akan mengkonsumsi energi sebanyak $10\text{watt} \times 24 \text{ jam} = 240 \text{ watt-jam (Wh)}$ dalam satu hari.

4.9.3 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai adalah 24 Ah pada 12volt. Untuk menghitung kapasitas baterai dalam watt-jam, Anda dapat menggunakan rumus:

$$\begin{aligned}\text{Kapasitas (Wh)} &= \text{Kapasitas (Ah)} \times \text{Tegangan (V)} \\ \text{Kapasitas (Wh)} &= 24\text{Ah} \times 12\text{V} \\ &= 288 \text{ Wh}\end{aligned}$$

4.9.4 Waktu Pengisian Baterai

- a) Sistem hybrid akan mengisi baterai selama berfungsi dan memiliki energi berlebih.
- b) Ketika sumber daya (panel surya dan generator piezoelektrik) tidak aktif atau tidak cukup, baterai akan mulai digunakan untuk memasok beban.

4.9.5 Efisiensi Sistem

Analisis juga harus mempertimbangkan efisiensi sistem, termasuk kerugian selama konversi energi dan pengisian baterai. Efisiensi ini dapat mengurangi kapasitas yang tersedia.

Dalam situasi ini, jika sumber daya dari sistem *hybrid* (*solar cell* dan piezoelektrik) tersedia secara kontinu sepanjang waktu, baterai akan terisi ulang saat energi berlebih, dan beban akan diberi daya selama 24 jam. Namun, jika sumber daya tidak mencukupi atau tidak aktif, baterai akan digunakan, tetapi akan mencukupi untuk sekitar 1,2 hari.

Dalam kondisi praktis, ini berarti membutuhkan penyimpanan energi tambahan atau backup daya jika ingin memastikan pasokan listrik yang kontinu selama 24 jam untuk memasok listrik ke *lampu warning light*, terutama jika kondisi cuaca atau getaran mekanis bervariasi sepanjang waktu.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan ruang lingkup penelitian yang telah dijelaskan, dapat diambil beberapa kesimpulan penting:

1. Penelitian ini berhasil merancang dan mengembangkan sebuah sistem hybrid generator yang menggabungkan teknologi piezoelektrik dan fotovoltaik. Dengan daya total yang dihasilkan sistem *hybrid* sebesar 50,025 Watt dalam kondisi cuaca cerah dan cerah berawan. Sistem ini dirancang khusus untuk menyuplai energi listrik yang dibutuhkan oleh lampu rotary warning light di PT Pelindo 1 Cabang Belawan.
2. Modifikasi speed bump telah berhasil dilakukan dan menghasilkan tegangan listrik rata-rata sebesar 1,549 volt dari 15 kali percobaan. Tegangan yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan peningkatan interval tekanan. Namun, penambahan lebih banyak piezoelektrik tidak selalu menghasilkan peningkatan tegangan yang signifikan karena ketidakmerataan tekanan pada setiap rangkaian piezoelektrik, menyebabkan perbedaan tegangan yang signifikan di antara mereka.
3. Instalasi dan pengujian sistem hybrid generator piezoelektrik dan fotovoltaik telah dilakukan pada lampu rotary warning light. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan daya total pada kondisi cuaca cerah dan cerah berawan sebesar 50,025 Watt, dengan waktu pengisian baterai 12 volt 24 Ah selama 6,665 jam untuk memenuhi kebutuhan lampu tersebut.

5.2 Saran

1. Lebih lanjutnya penelitian dan pengembangan teknologi sumber daya terbarukan, terutama dalam mengintegrasikan sumber daya energi alternatif seperti piezoelektrik dan fotovoltaik, harus didorong. Ini dapat membantu meningkatkan penggunaan energi terbarukan.
2. Penerapan teknologi sumber daya terbarukan, seperti yang dijelaskan dalam penelitian ini, dapat diperluas ke wilayah pelabuhan dan area lain yang memerlukan pasokan energi listrik. Hal ini akan mendukung upaya pelestarian lingkungan dan mengurangi dampak negatif pada lingkungan sekitar.
3. Pemerintah dan industri perlu bekerja sama untuk mendorong penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurahim Sidiq, G. R. (2021). Studi Experimental Pemanfaatan Speed Bumper (Polisi Tidur) Menjadi Energi Listrik Menggunakan Piezoelektrik. *Jurnal Teknik Mesin UNSIKA*, 1-7.
- Bhusari Priya Govind. (2015). A Hybrid Piezoelectric-Solar Based Power Generation System. *IJARCC*.
- A. W. Indrawan, S. Pranoto, A. R. Sultan, & R. Ramadhan. (2016). Rancang Bangun Automatic Transfer Switch (Ats) System Hybrid. *Prosiding Seminar Teknik Elektro & Informaika It_039, Makasar*.
- Aris Heri Andiawan & Puji Slamet. (2017). Tegangan Keluaran Cell Type Monocrystalline Sebagai Dasar Pertimbangan Pembangkit Tenaga Surya. *Jurnal Penelitian Lppm Untag Surabaya*, 1(2), 39–45.
- Aris Suryadi, Emmanuel Agung Nugroho, & Purwandito Tulus Asmoro. (2020). Rancang Bangun Speed Bump Sebagai Pembangkit Listrik Energi Alternatif. *Jurnal Teknik Industri, Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 11(1), 307–311.
- Efendi L, Darajat D.M, & Lestari S. (2018). Simulasi Optimalisasi Kapasitas Plts Atap Untuk Rumah Tangga Di Surabaya. *Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah*, 12(2).
- Han & Kaajakari. (2009). Microstructured Polymer For Shoe Power Generation. *Ieee Transducer*, 1393–1396.
- Hananto F.S, Santoso D.R., & Julius. (2011). Application Of Piezoelectric Material Film PvdF (Polyvinylidene Flouride) As Liquid Viscosity Sensor. *Jurnal Neutrino*, 3(2).
- Herlina. 2009. “Analisis Dampak Lingkungan Dan Pembangkitan Listrik Tenaga Hibrida Di Pulau Sebesi Lampung Selatan”. Thesis. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Heru Firia Nugroho & Bambang Yunianto. (2016). Pengujian Penggunaan Generator Hho Jenis Drycell Terhadap Performa Mesin Sepeda Motor. *Jurnal Teknik Mesin*, 4(2), 258–265.

- K. K Sharma & K. Ghupta. (2015). *International Journal Of Advanced Research In Computer Engineering And Technology*, 4.
- Kokkinopoulos, A., Vokas, G., & Papageorgas, P. 2014. Energy Harvesting Implementing Embedded Piezoelectric Generators - The Potential For The Attiki Odos Traffic Grid. *The International Conference On Technologies And Materials For Renewable Energy, Environment And Sustainability, Tmrees14*. 1070-1085.
- Kurniasih, N., & Nazir, R. (2015). Analisis Mode Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Microhydro-Photovoltaic Array Menggunakan Homer (Studi Kasus: Kampung Bayang Janiah, Kabupaten Pesisir Selatan). *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 4(1), 30-40.
- Noor, N. A., Hamma, H., & Asriyadi, A. (2019). IbM Penerapan Iptek Guna Mewujudkan Listrik Berbasis Plts Bagi Kelompok Masyarakat Miskin Di Lingkungan Jamarang Seminar Nasional Hasil ..., 2017, 361–366.
- N.S. Shenck & J. A Paradiso. (2001). Energy Scavenging With Shoe-Mounted Piezoelectrics. *Ieee Micro*, 21(3), 30–42.
- Pasaribu, Faisal Irsan, & Muhammad Reza. (2021). Rancangan Bangun Charging Station Berbasis Arduino Menggunakan Solar Cell 50 Wp, R E L E(Rekayasa Elektrikal Dan Energi. *Jurnal Teknik Elektro*, 3(2), 46–45.
- Prastuti, O. P. (2017). Pengaruh Komposisi Air Laut dan Pasir Laut Sebagai Sumber Energi Listrik. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, 1(1), 35-41.
- Purwanto, S. (2021). Pengembangan Sistem Pengaturan Suplai Beban (Ats) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Berbasis Mikrokontroler. *KILAT*, 10(2), 261-271.
- Robby Satrio Utomo, N. A. (2017). Analisis Pengaruh Variasi Ampere Terhadap Pengisian Baterai Mobil Listrik Habe Ev-2 Yang Dirangkai Seri. 1-8.
- Subandi & Muhammad Suyanto. (2020). Pemasangan Sollar Cell Untuk Setrika Listrik Pada Usaha Sonic Laundry Condong Catur. *Era Abdimas, Iv(Ii)*, 8–17.
- Suriadi, R. H., & Fanni, C. (2023). Rancang Bangun Sistem Pengisian Baterai Menggunakan Solar Cell Berbasis Mikrokontroler ATmega328. 1-8.
- Wira Hidayatullah, Mahdi Syukri, & Syukriyadin. (2016). Perancangan Prototype Penghasil Energi Listrik Berbahan Dasar Piezoelectrik. *KITEKTRO: Jurnal Online Teknik Elektro*, 1(3).

LAMPIRAN

A. Berita acara seminar proposal, hasil dan sidang



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jalan Kapten Mochtar Basri No.3 Medan Sumatera Utara 20238 Indonesia

Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir (Skripsi)

Nama : Muhammad Zulham

Npm : 1907220099

Judul Tugas Akhir : **“SISTEM HYBRID GENERATOR
PIEZOELEKTRIK DAN PHOTOVOLTAIK
UNTUK LAMPU ROTARY WARNING
LIGHT DI PT PELINDO CABANG
BELAWAN”**

No	Tanggal	Catatan	Paraf
1.	13/06/2023	Miringkan Suku Kata Asing	
2.	13/06/2023	Perbaiki Format Tabel	
3.	13/06/2023	Perbaiki Spasi Judul	
4.	13/06/2023	Perbaiki format Judul Mengerucut Kebawah	
5.	13/06/2023	Isi Dengan Judul Jangan Di Pisah Halaman	
6.	13/06/2023	Sesuaikan proses Hitungan Di BAB 3 dengan BAB 2	
7.	13/06/2023	Masukan data Berat Kendaraan	
8.	14/06/2023	Perbaiki Nomor Halaman	
9.	14/06/2023	Membuat Daftar Asistensi	
10.	14/06/2023	ACC Seminar Proposal	

Dosen Pembimbing

Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jalan Kapten Mochtar Basri No.3 Medan Sumatera Utara 20238 Indonesia

Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir (Skripsi)

Nama : Muhammad Zulham

Npm : 1907220099

Judul Tugas Akhir : **“SISTEM HYBRID GENERATOR
PIEZOELEKTRIK DAN PHOTOVOLTAIK
UNTUK LAMPU ROTARY WARNING
LIGHT DI PT PELINDO CABANG
BELAWAN”**

No	Tanggal	Catatan	Paraf
1.	8/09/2023	Abstrak Harus 1 Paragraf saja	
2.	10/09/2023	Abstrak terdiri dari 200-250 kata	
3.	11/09/2023	Abstrak memiliki kata kunci 3-5 kata	
4.	12/09/2023	Perbaiki isi abstrak	
5.	13/09/2023	Isi abstrak harus terdiri dari latar belakang, inti, tujuan penelitian, metode dan hasil	
6.	14/09/2023	Isi hasil abstrak diambil dari rangkuman kesimpulan	
7.	15/09/2023	Kesimpulan harus terdiri 3 poin, ikutin ruang lingkup dan hasil juga didapat 3 point	
8.	16/09/2023	Perbaiki daftar table	
9.	17/09/2023	Perbaiki daftar gambar	



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jalan Kapten Muehtar Basri No.3 Medan Sumatera Utara 20238 Indonesia

10.	18/09/2023	Perbaiki ukuran gambar	
11.	19/09/2023	Tambahkan literatur penelitian jurnal internasional	
12.	20/09/2023	Rapikan	
13.	21/09/2023	Segera daftar seminar hasil	
14.	27/09/2023	Acc Seminar Hasil	
15.	29/09/2023	Perbaiki margin	
16.	29/09/2023	Perbaiki Maksud Kata Di tabel data Solar cell	
17.	29/09/2023	Perbaiki Tata Letak Nomor Persamaan	
18.	30/09/2023	Segera Daftar Sidang	
19.	30/09/2023	Acc Sidang	

Dosen Pembimbing

Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

B. Proses modifikasi speed bump dan instalasi sistem hybrid generator piezoelektrik dan fotovoltaik



DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA PRIBADI

Nama : Muhammad Zulham
Alamat : Jln. Young Panah Hijau Gg. Keluarga Lk 09 Kec.
Medan Marelan Kota Medan Sumatera Utara
Jenis kelamin : Laki – laki
Umur : 24 Tahun
Agama : Islam
Status : Belum Menikah
Tempat, Tgl. Lahir : P. Berandan, 21 September 1999
Tinggi/Berat Badan : 169 cm/80 Kg
Kewarganegaraan : Indonesia
No.Hp : 085361817791
Email : 1907220099@umsu.ac.id

ORANG TUA

Nama Ayah : M. Yunan
Agama : Islam
Nama Ibu : Mulyani
Agama : Islam
Alamat : Jln. Young Panah Hijau Gg. Keluarga Lk 09 Kec.
Medan Marelan Kota Medan Sumatera Utara

LATAR BELAKANG PENDIDIKAN

2007-2013 : SDIS SALSABILA
2013-2016 : SMPT N 5 MEDAN
2016-2019 : SMKS TR SINAR HUSNI 2
2019-2023 : Tercatat Sebagai Mahasiswa Program Studi Teknik
Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah
Sumatera Utara (UMSU)

PENGALAMAN ORGANISASI

2020-2021 : Ketua Bidang Riset Pengembangan Keilmuan PK
IMM FATEK UMSU

PENGALAMAN BEKERJA

2022-SEKARANG : PT PELINDO DAYA SEJAHTERA (TEKNISI
LISTRIK)