

**SKRIPSI**

**PROTOTIPE PAKU MARKA JALAN DENGAN TEKNOLOGI SISTEM  
PEMBANGKIT HIBRID (SEL FOTOVOLTAIK DAN PIEZOELEKTRIK)**

Disusun dan diajukan oleh

**MUH. REYHAN THIRZA ISTAQNALIK RAMADHAN**

**D411 16 313**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2021**

**LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR**

**PROTOTYPE PAKU MARKA JALAN DENGAN TEKNOLOGI SISTEM  
PEMBANGKIT HIBRID (SEL FOTOVOLTAIK DAN PIEZOELEKTRIK)**

Disusun dan diajukan oleh :

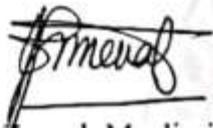
**MUH. REYHAN THIRZA ISTAQNALIK RAMADHAN  
D411 16 313**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian  
Studi Program Sarjana Program Studi Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal 10 Maret 2021  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



Ir. Hj. Zaenab Muslimin, MT  
NIP. 19660201 199202 2 002



Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST, MT  
NIP. 19731118 199803 2 001

Ketua Program Studi



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.  
NIP. 19691026 199412 2 001

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muh. Reyhan Thirza Istaqnalik Ramadhan  
NIM : D41116313  
Program Studi : Teknik Elektro  
Jenjang : S1

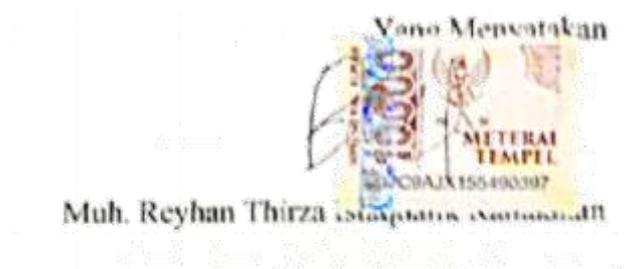
Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### **Prototipe Paku Marka Jalan Dengan Teknologi Sistem Pembangkit Hibrid (Sel Fotovoltaik Dan Piezoelektrik)**

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 11 April 2021



## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena rahmat dan karunia-Nya lah sehingga penulisan laporan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Laporan skripsi ini ditulis untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada pendidikan Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Adapun judul tugas akhir adalah “Prototipe Paku Marka Jalan Dengan Teknologi Sistem Pembangkit Hibrid (Sel Fotovoltaik Dan Piezoelektrik)”

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi masih terdapat kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa yang tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu penulis menerima saran dan kritik, segala koreksi serta perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat.

Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua Orang Tua dan Keluarga, terima kasih atas doa dan dukungan yang diberikan kepada penulis
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT, selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Ibu Ir. Hj. Zaenab Muslimin, MT selaku Pembimbing I dan Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST, MT selaku Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan laporan skripsi ini.
4. Ibu Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D dan Bapak Ir. H. Gassing, MT selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik yang membangun serta saran yang baik kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini.
5. Alya karena telah menemani saya dalam mengerjakan dan memperjuangkan skripsi saya serta menyemangati saya selama ini.
6. The Cola's yang telah saya susahi dalam mengurus konsumsi saya.
7. Segenap Dosen Departemen Teknik Elektro, atas segala ilmu yang bermanfaat, wawasan dan pengalaman yang telah diberikan kepada penulis.

8. Segenap Staf pegawai Departemen Teknik Elektro, yang telah banyak membantu dalam hal administrasi.
9. Seluruh teman-teman EXCITER16, yang menjadi teman seperjuangan penulis selama perkuliahan.
10. Nandemonai yang menjadi teman skripsi saya.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.

Makassar, 11 April 2021

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR .....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
ABSTRAK .....	xii
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Fungsi Paku Marka .....	5
2.2 Bentuk dan Ukuran Paku Marka .....	5
2.3 Paku Marka Solar .....	7
2.4 Pencahayaan di Jalan Raya.....	7
2.5 Sistem Power Hibrid .....	9
2.6 Fotovoltaik .....	11
2.7 Piezoelektrik.....	13
2.7.1 Pengertian Piezoelektrik .....	13
2.7.2 Karakteristik Bahan Piezoelektrik.....	13
2.7.3 Prinsip Kerja Piezoelektrik.....	15
2.8 ATtiny85PU .....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	22
3.1 Tahap Studi Pustaka .....	22
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian .....	22
3.3 Diagram Alir Penelitian .....	23
3.4 Tahap Perancangan dan Pendesainan .....	24

3.4.1	Perancangan Perangkat Keras .....	24
3.4.1.1	Perangkat Keras Sistem Pembangkit Listrik .....	25
3.4.1.2	Perangkat Keras Sistem Pencahayaan Paku Marka .....	27
3.4.2	Perancangan Perangkat Lunak .....	30
3.4.3	Rancangan Awal Paku Marka .....	33
3.4.4	Tahap Perancangan Sistem Elektronik .....	35
3.5	Perakitan dan Pembuatan Alat .....	35
3.6	Tahap Pengujian Alat .....	35
3.7	Tahap Pengolahan Data .....	36
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>37</b>
4.1	Pembuatan Perangkat Lunak Mikrokontroler .....	37
4.2	Pengujian Simulasi Paku Marka .....	38
4.3	Desain Akhir Paku Marka .....	40
4.4	Pengadaan Komponen Paku Marka .....	43
4.5	Pembuatan Rumah Komponen Paku Marka .....	44
4.5.1	Pencetakan Rumah Komponen Paku Marka .....	44
4.5.2	Hasil Cetakan Paku Marka .....	45
4.6	Pembuatan Perangkat Keras Elektronik Paku Marka .....	47
4.6.1	Pembuatan Jalur PCB Sistem Elektronik .....	47
4.6.2	Instrumentasi Komponen Elektronik Paku Marka .....	48
4.6.3	Pemasangan Piezoelektrik .....	50
4.7	Pengujian Kinerja Sel Fotovoltaik .....	51
4.7.1	Tegangan Sel Surya .....	51
4.7.2	Kapasitas Baterai dari Sel Surya .....	55
4.8	Pengujian Piezoelektrik .....	61
4.8.1	Tegangan Piezoelektrik .....	61
4.8.2	Arus Piezoelektrik pada Beban Resistor .....	65
4.8.3	Daya Piezoelektrik .....	67
4.9	Beban pada Paku Marka .....	71
4.9.1	Mengukur Arus Beban Paku Marka .....	71
4.9.2	Persentase Kesalahan Pengukuran Arus Beban Paku Marka .....	74
4.9.3	Besar Konsumsi Beban pada Baterai .....	75

4.10	Perakitan Rumah Komponen Elektronik dan Modul Sel Surya .....	78
4.11	Pengujian Ketahanan Paku Marka Terhadap Tekanan .....	79
4.12	Pengujian Ketahanan Paku Marka Terhadap Air .....	80
4.13	Pengujian Jarak Tampak Cahaya pada Malam Hari .....	81
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>86</b>
5.1	Kesimpulan .....	86
5.2	Saran.....	87
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>88</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>91</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Paku Marka Berbentuk Bulat [3] .....	6
Gambar 2. 2 Paku Marka Berbentuk Segi Empat [3].....	6
Gambar 2. 3 Paku Marka Solar [11] .....	7
Gambar 2. 4 Gambar Piezoelektrik [17] .....	13
Gambar 2. 5 Piezoelektrik Diafragma [18].....	15
Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Piezoelektrik [19].....	16
Gambar 2. 7 Attiny85 dan Pin I/O [21].....	20
Gambar 2. 8 Konsumsi Arus Pada Clock Frekuensi yang Digunakan [25].....	21
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	23
Gambar 3. 2 Diagram Alir Perancangan Perangkat Keras.....	24
Gambar 3. 3 Diagram Alir Sistem Pembangkit Listrik.....	26
Gambar 3. 4 Rangkaian Sistem Pembangkit Listrik .....	26
Gambar 3. 5 Diagram Alir Sistem Pencahayaan Paku Marka .....	29
Gambar 3. 6 Rangkaian Elektronik Keseluruhan Paku Marka .....	29
Gambar 3. 7 Pin yang Terpakai.....	29
Gambar 3. 8 Diagram Alir Perangkat Lunak Sistem Pencahayaan Paku Marka ..	32
Gambar 3. 9 Rancangan Awal Alat.....	33
Gambar 3. 10 Rancangan Tempat Sel Fotovoltaik .....	34
Gambar 3. 11 Rancangan Tempat Piezoelektrik.....	34
Gambar 4. 1 Program Paku Marka.....	37
Gambar 4. 2 Simulasi Paku Marka pada saat Keadaan Standby.....	39
Gambar 4. 3 Simulasi Paku Marka pada saat Keadaan Aktif .....	39
Gambar 4. 4 Desain Akhir Paku Marka .....	40
Gambar 4. 5 Tempat Modul Sel Surya.....	40
Gambar 4. 6 Tempat Piezoelektrik.....	41
Gambar 4. 7 Tempat Baterai dari Paku Marka .....	41
Gambar 4. 8 Desain Awal Paku Marka saat Dipasang di Jalan.....	43
Gambar 4. 9 Desain Akhir Paku Marka saat Dipasang di Jalan .....	43
Gambar 4. 10 Tempat Komponen Paku Marka .....	44

Gambar 4. 11 Pencetakan Komponen Paku Marka dengan 3D Printer .....	45
Gambar 4. 12 Tempat Piezoelektrik.....	45
Gambar 4. 13 Tempat Baterai .....	46
Gambar 4. 14 Tempat Sel Surya dan Komponen Elektronik.....	46
Gambar 4. 15 Seluruh Komponen Paku Marka yang Telah Tercetak .....	47
Gambar 4. 16 Jalur PCB .....	48
Gambar 4. 17 Rangkaian Elektronik Sedang Dirakit.....	49
Gambar 4. 18 Rangkaian Elektronik yang Telah Terpasang .....	49
Gambar 4. 19 LED pada Paku Marka Menyala .....	50
Gambar 4. 20 Alas Piezoelektrik .....	50
Gambar 4. 21 Rangkaian Uji Coba Data Logger Sel Surya.....	52
Gambar 4. 22 Rangkaian Charge Baterai dengan Sel Surya.....	56
Gambar 4. 23 Rangkaian Discharge Baterai .....	57
Gambar 4. 24 Pengukuran Tegangan Piezoelektrik Menggunakan Multimeter ....	62
Gambar 4. 25 Pengukuran Tegangan Oleh Osiloskop.....	63
Gambar 4. 26 Ilustrasi Saat Piezoelektrik Ditekan .....	64
Gambar 4. 27 Tegangan Resistor dari Pembangkit Piezoelektrik.....	65
Gambar 4. 28 Rangkaian Pengukuran Arus Keadaan Standby.....	71
Gambar 4. 29 Arus yang Terbaca Pada Keadaan Standby.....	72
Gambar 4. 30 Rangkaian Pengukuran Arus Keadaan Aktif .....	73
Gambar 4. 31 Arus yang Terbaca Pada Keadaan Aktif .....	73
Gambar 4. 32 Paku Marka Dilapisi dengan Resin .....	79
Gambar 4. 33 Motor Menginjak Paku Marka .....	79
Gambar 4. 34 Mobil Menginjak Paku Marka .....	80
Gambar 4. 35 Paku Marka Direndam di Dalam Air .....	81
Gambar 4. 36 Paku Marka Bekerja di Dalam Air.....	81
Gambar 4. 37 Cahaya dari Paku Marka dengan Jarak 300 Meter.....	82
Gambar 4. 38 Pengukuran dari 3 titik Paku Marka Menggunakan GPS .....	82
Gambar 4. 39 Paku Marka Terpasang di Jalan .....	83
Gambar 4. 40 Paku Marka Memancarkan Cahaya di Jalan yang Gelap.....	83

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 2. 1 Kualitas Pencahayaan Normal di Ruas Jalan.....	9
Tabel 2. 2 Karakteristik Material Piezoelektrik [19] .....	14
Tabel 2. 3 Persamaan Piezoelektrik menurut dimensi [19].....	18
Tabel 3. 1 Alat dan Bahan Perangkat Keras Sistem Pembangkit Listrik.....	25
Tabel 3. 2 Bahan Perangkat Keras Sistem Pencahayaan Paku Marka.....	28
Tabel 4. 1 Hasil Data Logger .....	52
Tabel 4. 2 Hasil Discharge Baterai dengan Arus Konstan.....	58
Tabel 4. 3 Tegangan yang Terbaca Oleh Multimeter .....	62
Tabel 4. 4 Tegangan Yang Terbaca Oleh Osiloskop .....	63
Tabel 4. 5 Tegangan Resistor 10 Ohm.....	66
Tabel 4. 6 Tegangan Resistor 100 Ohm.....	66
Tabel 4. 7 Arus dari Datasheet Tiap Komponen.....	74
Tabel 4. 8 Besar Konsumsi Beban dalam mAh .....	77
Tabel 4. 9 Besar Lumen yang dibutuhkan untuk Tiap Jenis Jalan.....	84

## ABSTRAK

**Muh. Reyhan Thirza Istaqnalik Ramadhan, Prototipe Paku Marka Jalan Dengan Teknologi Sistem Pembangkit Hibrid (Sel Fotovoltaik Dan Piezoelektrik) (dibimbing oleh Zaenab Muslimin dan Indar Chaerah Gunadin)**

Paku marka solar berfungsi memberikan informasi batas jalan pada pengendara untuk menimalisir terjadinya kecelakaan saat kondisi gelap. Paku marka solar hanya menggunakan sel fotovoltaik, hal ini kurang baik pada pengisian baterai saat kurangnya intensitas cahaya matahari yang diterima. Jika baterai yang digunakan rusak, paku marka tidak dapat digunakan lagi karena baterai dipasang permanen. Oleh karena itu, dibuatlah prototipe paku marka jalan dengan sistem pembangkit hibrid sel fotovoltaik dan piezoelektrik. Desain tempat baterai dibuat berbentuk ulir agar dapat diganti saat baterai rusak. Prototipe dibuat melalui perancangan sistem elektronik, pendesainan alat, dan pengujian sel fotovoltaik, piezoelektrik, beban yang digunakan, ketahanan alat terhadap tekanan kendaraan, dan uji jarak tampak cahaya. Piezoelektrik yang digunakan dapat mengisi baterai 12,6 Wh jika mobil melintas di atas paku marka sebanyak 9279 kali dengan berat 1500 kg atau motor sebanyak  $2 \times 10^6$  kali dengan berat 105 kg dengan masing – masing daya yang dihasilkan  $1,358 \times 10^{-3}$  Wh dan  $6,668 \times 10^{-6}$  Wh. Sel fotovoltaik dapat mengisi baterai hingga 0,74 Ah dalam 1 hari. Beban paku marka menggunakan 90,11 mAh dari 3000 mAh kapasitas baterai dan dapat menyuplai hingga 28 hari. Alat menghasilkan cahaya Led 62,84 lm dan terlihat hingga jarak 300 m. Alat masih dapat bekerja setelah dilindas mobil dan motor serta direndam di dalam air sedalam 60 cm selama 1 jam.

Kata kunci: Paku marka, Hibrid, Sel fotovoltaik, Piezoelektrik, Led

## ***ABSTRACT***

**Muh. Reyhan Thirza Istaqnalik Ramadhan, Prototype of Road Stud with Hybrid Power System Technology (Photovoltaic Cells and Piezoelectric) (supervised by Zaenab Muslimin and Indar Chaerah Gunadin)**

Solar road stud markers provide information on road boundaries to driver to minimize accidents during dark conditions. Solar road stud only use photovoltaic cells, this is not good for charging the battery when the lack of intensity of the sun light is received. If the battery used is damaged, the road stud can no longer be used because the battery is permanently installed. Therefore, a road stud prototype was made using a photovoltaic cells and piezoelectric hybrid power system. The design of the battery compartment is made in the shape of a thread so that it can be replaced when the battery is damaged. Prototypes are made by designing electronic systems, designing tools, and testing photovoltaic cells, piezoelectric, the loads used, resistance to vehicle pressure, and visible light distance testing. The piezoelectric can be used to charge a 12.6 Wh battery if the car crosses the markings 9279 times with a weight of 1500 kg or a motorbike as much as  $2 \times 10^6$  times with a weight of 105 kg with each power generated  $1.358 \times 10^{-3}$  Wh and  $6.668 \times 10^{-6}$  Wh. Photovoltaic cells can charge a battery up to 0.74 Ah in 1 day. The road stud load uses 90.11 mAh of 3000 mAh battery capacity and can supply up to 28 days. Road stud generates 62.84 lm of Led light and is visible to a distance of 300 m. It can still work after being run over by cars and motorbikes and immersed in 60 cm deep water for 1 hour.

Keywords: Road stud, Hybrid, Photovoltaic Cell, Piezoelectric, Led

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Jumlah pengguna jalan di Indonesia secara signifikan terus meningkat setiap tahunnya. Hal ini juga berpengaruh pada angka kecelakaan yang terjadi di Indonesia setiap tahunnya. Menurut data dari Badan Pusat Statistik Indonesia, angka kecelakaan pengguna jalan tinggi setiap tahunnya dengan angka 103 ribu kasus pada tahun 2017 [1].

Salah satu faktor penyebab kecelakaan yang terjadi ialah kondisi jalan terutama pada cuaca yang berubah – ubah. Selain itu adanya pergantian waktu dari pagi, siang, dan malam hari memberikan intensitas penerangan yang berbeda – beda. Hal tersebut mempengaruhi keadaan jalan yang terang, gelap atau remang – remang, sehingga mempengaruhi penglihatan pengemudi sewaktu berkendara.

Pada era moderen ini, perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan sangat pesat dan telah memberikan banyak manfaat dalam kemajuan diberbagai aspek. Salah satunya ialah dibidang insfrastruktur yaitu marka jalan. Marka jalan berfungsi untuk memberikan informasi kepada pengemudi. Informasi tersebut dapat berupa *delineator* (garis pembatas jalan) yang dilengkapi dengan cat yang dapat memantulkan cahaya dan dapat menggunakan paku marka. Pemberian informasi kondisi jalan kepada pengemudi merupakan hal penting, sehingga pengemudi mengetahui batas jalan dan kondisi sekitarnya agar dapat lebih berhati – hati. Maka pembuatan infrastruktur marka jalan berupa paku marka ini efektif digunakan dalam pemberian informasi kepada pengguna jalan [2].

Di Indonesia sendiri, paku jalan diatur dalam Keputusan Menteri Nomor KM 60 Tahun 1993 Tentang Marka Jalan. Paku marka sendiri merupakan alat yang dilengkapi dengan pemantul atau memancarkan cahaya sendiri yang dapat berfungsi sebagai penanda marka jalan khususnya pada cuaca gelap dan malam hari dalam kondisi permukaan jalan kering ataupun basah [3].

Paku marka jalan yang memancarkan cahaya yang bersumber dari baterai bertenaga matahari atau *Solar Road Stud* merupakan paku marka yang paling banyak digunakan pada saat ini yang bekerja dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik untuk menyalakan lampu penanda pada paku marka. Lampu yang digunakan pada paku marka biasanya berupa LED. Tetapi, intensitas cahaya matahari tidaklah selalu sama. Indonesia merupakan negara dengan curah hujan yang tinggi dengan rata-rata 2000 mm sampai 3000 mm per tahunnya [4]. Cuaca yang berubah – ubah, hingga waktu siang dan malam seperti di daerah subtropics (daerah yang waktu siangnya lebih sedikit dari pada waktu malam harinya) mempengaruhi efektifitas penggunaan paku marka bertenaga matahari ini. Musim hujan, mendung, kabut, dan banjir sangat mengurangi kinerja dari alat ini. Paku marka ini juga memiliki kekurangan yaitu, jika terjadi kerusakan pada baterai yang digunakan maka paku marka tidak dapat digunakan lagi. Hal ini dikarenakan baterai pada paku marka dipasang secara permanen pada paku marka [5].

Oleh karena itu, penulis tertarik dalam membuat inovasi berupa prototipe paku marka jalan dengan teknologi sistem pembangkit hybrid (gabungan) menggunakan sel fotovoltaik (tenaga surya) dan piezoelektrik (gaya tekan). Inovasi ini hadir untuk menyempurnakan kekurangan pada paku marka sebelumnya agar dapat merintang berbagai cuaca termasuk di Indonesia. Hal ini juga bertujuan untuk meningkatkan infrastruktur jalan guna memberikan informasi pembatas jalan pada pengemudi. Adapun penggunaan piezoelektrik ini diharapkan dapat memanfaatkan energi mekanik dari setiap kendaraan yang melintas di atas paku marka untuk menghasilkan energi listrik sehingga tidak hanya bergantung pada sinar matahari saja.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana memanfaatkan energi mekanik dari kendaraan yang melintas di atas paku marka jalan?

2. Bagaimana membuat paku marka jalan yang bekerja secara efektif berbagai kondisi?
3. Bagaimana membuat paku marka jalan yang dapat diperbaiki jika terjadi kerusakan?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan cara memanfaatkan energi mekanik dari kendaraan yang melintas di atas paku marka jalan.
2. Membuat prototipe paku marka jalan yang dapat bekerja secara efektif berbagai kondisi.
3. Membuat paku marka jalan yang dapat diperbaiki jika terjadi kerusakan.

### **1.4 Batasan Masalah**

Untuk mendapatkan hasil pembahasan yang terarah, maka penulis perlu membatasi masalah yang akan dibahas. Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Pemilihan bahan dalam pembuatan prototipe paku marka ini berupa PLA atau ABS
2. Penggunaan piezoelektrik sebagai sumber listrik dalam pengisian daya pada baterai selama paku marka diberi gaya mekanis
3. Penggunaan sel photovoltaic sebagai sumber listrik dalam pengisian daya pada baterai selama paku marka menerima cahaya matahari
4. Pembuatan paku marka menggunakan pencetak 3 dimensi dengan metode FDM
5. Paku marka hanya memancarkan cahaya menggunakan LED
6. Pemilihan jumlah piezoelektrik disesuaikan dengan desain akhir dari penelitian ini

7. Penelitian ini tidak membahas waktu yang diperlukan pada konsumsi daya pada paku marka saat baterai yang digunakan habis atau rusak.
8. Desain dari paku marka akan disesuaikan dengan Keputusan Menteri Nomor KM 60 Tahun 1993 (tidak boleh menonjol lebih dari 40 mm di atas permukaan jalan) [3]

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitan ini:

1. Memberikan informasi jalan pada pengemudi diberbagai kondisi dan cuaca guna dalam peningkatan keselamatan pengguna jalan.
2. Sebagai pilihan pengganti dari paku marka konvensional sebagai infrastruktur jalan
3. Mengurangi biaya dalam perbaikan paku marka jika terjadi kerusakan
4. Meningkatkan kreatifitas mahasiswa dalam pengembangan teknologi yang dapat berguna bagi masyarakat sehingga fungsi mahasiswa dalam tri darma perguruan tinggi dapat tercapai
5. Memberikan informasi dan referensi bagi penelitian – penelitan selanjutnya yang berkaitan dengan berkaitan dengan penelitan ini.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Fungsi Paku Marka**

Paku marka adalah suatu tanda yang berada di permukaan jalan atau di atas permukaan jalan. Paku marka kaca berfungsi untuk mengarahkan arus lalu lintas dan membatasi daerah kepentingan lalu lintas dan juga bisa sebagai tanda pengingat ketika pengendara melewati batas jalan [6].

Paku marka telah diatur dalam Keputusan Menteri Nomor: KM 60 Tahun 1993 Tentang Marka Jalan. Berdasarkan peraturan tersebut, paku marka bisa menjadi pengganti marka jalan berbentuk garis pada permukaan jalan. Terdapat 2 jenis paku marka yaitu paku marka reflektor (pantulan cahaya) dan paku marka yang memancarkan cahaya di malam hari [3]. Paku marka memiliki 3 warna berbeda baik paku marka reflektor maupun paku marka yang memancarkan cahaya. Warna tersebut memiliki fungsi sebagai berikut:

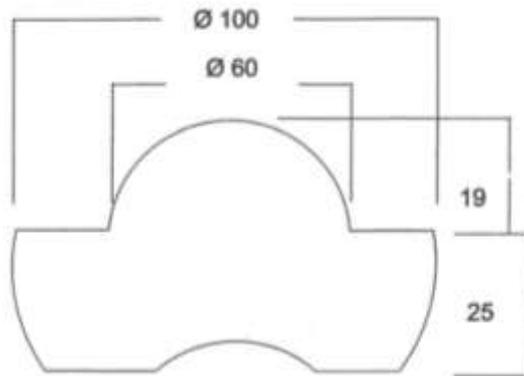
1. Paku jalan dengan pemantul cahaya berwarna kuning digunakan untuk pemisah jalur atau lajur lalu lintas.
2. Paku jalan dengan pemantul cahaya berwarna merah, ditempatkan pada garis batas disisi kiri jalan.
3. Paku jalan dengan pemantul cahaya berwarna putih, ditempatkan pada garis batas sisi kanan jalan [7].

Paku jalan adalah marka jalan berupa paku yang dipasang pada permukaan jalan yang dilengkapi dengan pemantul cahaya berwarna kuning, merah atau putih yang berfungsi meningkatkan daya pantul marka jalan pada keadaan gelap dan malam hari terutama pada kondisi permukaan jalan basah dan berkabut [8].

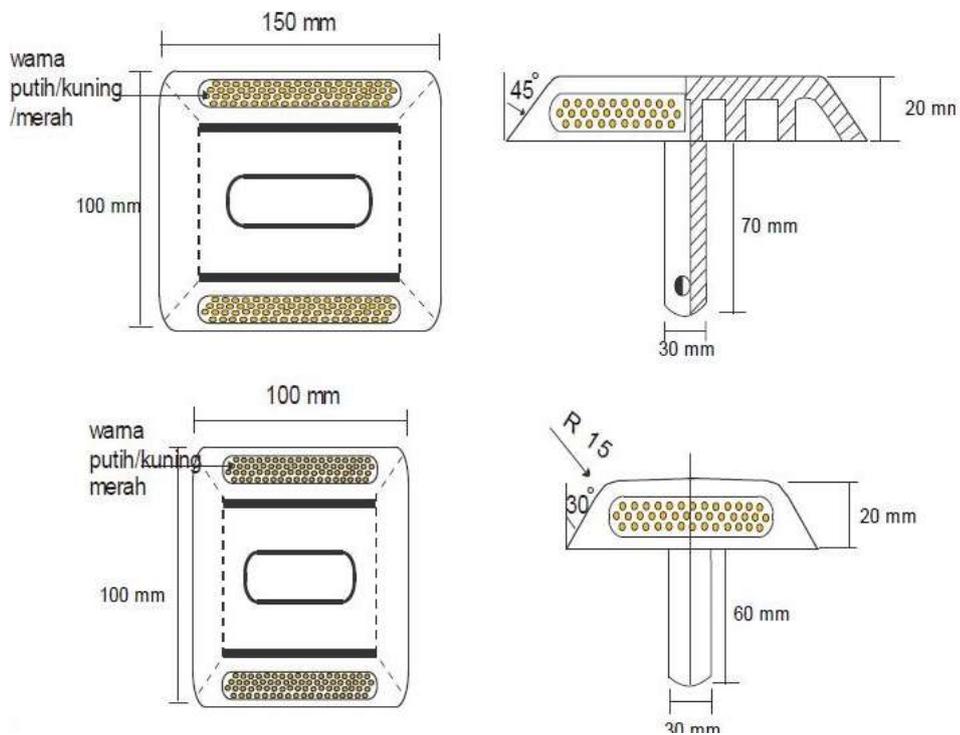
#### **2.2 Bentuk dan Ukuran Paku Marka**

Bentuk dan ukuran paku marka mengacu pada Keputusan Menteri Nomor: KM. 60 Tahun 1993 Tentang Marka jalan. Paku marka memiliki 3 bentuk dengan ukuran yang berbeda. Paku marka jalan terdiri dari bujur sangkar, persegi panjang,

dan bulat seperti Gambar 2.1 dan Gambar 2.2. Paku marka tidak boleh menonjol lebih dari 15mm di atas permukaan jalan, dan apabila dilengkapi dengan reflektor atau cahaya maka paku marka tidak boleh lebih dari 40 mm di atas permukaan jalan. Tiap jalan akan dipasang paku marka dengan tiap jarak paku marka sebesar 5 m [8].



Gambar 2. 1 Paku Marka Berbentuk Bulat [3]



Gambar 2. 2 Paku Marka Berbentuk Persegi Panjang dan Bujur Sangkar [3]

### 2.3 Paku Marka Solar

Paku marka solar merupakan perangkat pencahayaan dengan LED bertenaga surya yang digunakan dalam konstruksi jalan untuk menggambarkan tepi jalan dan *centerlines* seperti Gambar 2.3. Tertanam di permukaan jalan. Ada beberapa jenis dari Paku marka solar, yaitu berbentuk persegi panjang, persegi empat, dan bulat. Penggunaan LED ini guna untuk memberikan informasi kondisi jalan pada pengguna jalan. Hal ini dikarena saat jalan gelap atau berkabut maka pengguna jalan sulit untuk mengetahui batas – batas jalan, sehingga dapat menyebabkan pengemudi melewati batas jalan. Penggunaan solar ini bertujuan sebagai pengisi daya baterai pada paku marka agar saat kondisi jalan gelap, maka paku marka dapat memancarkan cahaya tanpa harus menunggu adanya cahaya dari luar sebagai reflektor. Biasanya LED pada solar road stud akan berkedip tiap 3 detik sekali [9].



Gambar 2. 3 Paku Marka Solar [11]

### 2.4 Pencahayaan di Jalan Raya

Spesifikasi pencahayaan jalan di kawasan perkotaan ini bertujuan untuk mendapatkan keseragaman dalam merencanakan penerangan jalan khususnya di kawasan perkotaan, sehingga dihasilkan penerangan jalan yang dapat memberikan keselamatan, kelancaran, dan kenyamanan bagi pengguna jalan.

Jalan atau prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu

lintas yang berada pada permukaan tanah, di bawah permukaan tanah dan/atau air, kecuali jalan kereta api, jalan lori dan jalan kabel. Berdasarkan istilahnya, jalan terbagi atas 3 yaitu jalan arteri, kolektor, dan lokal.

Jalan Arteri adalah jalan umum yang berfungsi melayani angkutan utama dengan ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rata-rata tinggi, dan jumlah jalan masuk dibatasi secara berdaya guna. Jalan kolektor adalah jalan umum yang berfungsi melayani angkutan pengumpul atau pembagi dengan ciri perjalanan jarak sedang, kecepatan rata-rata sedang, dan jumlah jalan masuk dibatasi. Jalan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan setempat dengan ciri perjalanan jarak dekat, kecepatan rata-rata rendah, dan jumlah jalan masuk tidak dibatasi [10].

Tingkat pencahayaan diukur dari lumens atau lux. Lumen, tingkat cahaya yang diarahkan dari sumber lampu. Lumen menjadi angka kekuatan cahaya pada saat cahaya di arahkan pada sudut tertentu. Angka Lumen bisa berubah walau menggunakan cahaya dari lampu dengan candela yang sama. Karena cahaya bisa diarahkan dengan reflektor. Lux adalah hasil akhir jatuhnya cahaya. Berapapun angka Candle dan Lumen tidak berlaku di Lux. Lux hanya menghitung cahaya sinar pada satu ruang saja, dan angka cahaya terang dari Lux. Sehingga digunakan untuk pencahayaan lampu rumah atau lampu jalan. dan seberapa luas cahaya bisa menerangi satu bidang. Lux dibutuhkan untuk mengetahui tingkat cahaya yang dibutuhkan dalam menerangi suatu tempat [11]. Untuk mengetahui besar cahaya atau lumens dari lux yang diperlukan maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\Phi = E \times L \times W \times LLF \times Cu \quad (2.1)$$

$$\Phi = 2\pi \times I \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.2)$$

Dimana,

$\Phi$  = Total nilai pencahayaan lampu (lm atau lumens)

E = Kuat penerangan (lx atai lux) dapat dilihat beberapa kondisi

L = Panjang ruangan (m)

$I$  = Candela (cd)

$\alpha$  = Apex Angle

$W$  = Lebar ruangan (m)

LLF = *Light Loss Factor*, biasa nilainya antara 0,7 – 0,8

$C_u$  = *Coeffesien of Utilization*, biasa nilainya 0,2 – 0,5

Persamaan (2.1) dan Persamaan (2.2) untuk mengetahui besar lumens, lux, dan candela dalam menentukan besar penerangan yang dibutuhkan [12] [13].

Tabel 2. 1 Kualitas Pencahayaan Normal di Ruas Jalan

<b>Jenis/ Klasifikasi jalan</b>	<b>Kuat pencahayaan (iluminansi) atau E rata-rata (lux)</b>	<b>Lebar Ruas Jalan (m)</b>
Jalan Lokal	2 – 5	6
Jalan Kolektor	3 – 7	7
Jalan Arteri	11 – 20	8

Kualitas pencahayaan pada suatu jalan diukur berdasarkan metoda iluminansi atau luminansi. Meskipun demikian lebih mudah menggunakan metoda iluminansi, karena dapat diukur langsung di permukaan jalan dengan menggunakan alat pengukur kuat cahaya. Kualitas pencahayaan normal menurut jenis/klasifikasi fungsi jalan ditentukan seperti pada Tabel 2.1 [14].

## 2.5 Sistem Power Hibrid

Sistem power hibrid adalah kombinasi antara teknologi yang berbeda untuk menghasilkan tenaga. Dalam rekayasa tenaga listrik, istilah hibrid menggambarkan sistem daya dan penyimpanan energi gabungan. Salah satunya ialah fotovoltaik dan piezoelektrik. Contoh dari produsen tenaga yang menggunakan sistem hibrid adalah fotovoltaik dan piezoelektrik. Pembangkit listrik hibrid seringkali mengandung komponen energi terbarukan yang diseimbangkan melalui

penyimpanan seperti genset atau sistem penyimpanan baterai. Sistem power hibrid sudah sangat populer di era perkembangan teknologi ini. Hal ini disebabkan karena energi fosil yang terus berkurang [14].

Sistem hibrid merupakan konsep penggabungan dua atau lebih sumber energi yang berbeda untuk memenuhi kebutuhan beban yang ada. Salah satu sistem pembangkit listrik hibrid yang berpotensi untuk dikembangkan seperti di kapal yang beroperasi di Indonesia adalah kombinasi antara sel surya (Photovoltaic) dengan diesel generator. Hal ini dikarenakan letak geografis Indonesia yang berada pada daerah khatulistiwa, sehingga wilayah Indonesia akan selalu disinari matahari selama 10-12 jam dalam sehari. Potensi sumber energi matahari di Indonesia mencapai rata-rata 4,5 kWh per meter persegi per hari, matahari bersinar berkisar 2000 jam per tahun, sehingga Indonesia tergolong kaya sumber energi matahari. Penggunaan sistem pembangkit hibrid tanpa menggunakan listrik dari PLN biasanya disebut dengan *off grid system*.

Sistem hibrid atau Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) merupakan salah satu alternatif sistem pembangkit yang tepat diaplikasikan pada daerah-daerah yang sukar dijangkau oleh sistem pembangkit besar seperti jaringan PLN atau PLTD. Merupakan solusi untuk mengatasi krisisnya berbahan fosil dan ketiadaan listrik di daerah terpencil, pulau- pulau kecil dan pada daerah perkotaan, umumnya terdiri atas: modul surya, turbin angin, piezoelektrik, baterai, dan peralatan kontrol yang terintegrasi. Tujuan PLTH 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. Mampu menghasilkan daya listrik secara efisien pada berbagai kondisi pembebanan. Untuk mengetahui unjuk kerja sistem pembangkit hibrid ini, hal – hal yang perlu dipertimbangkan antara lain ialah karakteristik beban pemakaian dan karakteristik pembangkitan daya khususnya dengan memperhatikan potensi energi alam yang ingin dikembangkan baik karakteristik kondisi alam itu sendiri, seperti pergantian siang dan malam, kemudian pergantian musim dan sebagainya. Energi yang terbuang percuma pun

bisa dimanfaatkan seperti energi mekanik atau tekanan dari kendaraan ataupun orang yang berjalan (piezoelektrik) [15].

## **2.6 Fotovoltaik**

Fotovoltaik adalah istilah yang mencakup konversi cahaya menjadi listrik dengan menggunakan bahan semikonduktor yang menunjukkan efek fotovoltaik, sebuah fenomena yang dipelajari dalam fisika, fotokimia, dan elektrokimia. Sistem fotovoltaik yang khas menggunakan panel surya, masing-masing terdiri dari sejumlah sel surya, yang menghasilkan tenaga listrik. Instalasi PV dapat dipasang di tanah, dipasang di atap atau di dinding. Gunung itu bisa diperbaiki, atau menggunakan pelacak matahari untuk mengikuti matahari di langit. Solar PV memiliki kelebihan khusus sebagai sumber energi: operasinya tidak menghasilkan polusi dan tidak ada emisi gas rumah kaca yang pernah dipasang, ini menunjukkan skalabilitas sederhana sehubungan dengan kebutuhan daya dan silikon memiliki ketersediaan besar di kerak bumi [16].

Saat tengah hari yang cerah radiasi sinar matahari mampu mencapai 1000 watt per meter persegi. Jika sebuah piranti semikonduktor seluas satu meter persegi memiliki efisiensi 10%, maka modul sel surya ini mampu memberikan tenaga listrik sebesar 100 watt. Modul sel surya komersial memiliki efisiensi berkisar antara 5% hingga 15% tergantung material penyusunnya. Tipe silikon kristal merupakan jenis piranti sel surya yang memiliki efisiensi tinggi meskipun biaya pembuatannya relatif lebih mahal dibandingkan jenis sel surya lainnya. Masalah yang paling penting untuk merealisasikan sel surya sebagai sumber energi alternatif adalah efisiensi piranti sel surya dan harga pembuatannya. Efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara tenaga listrik yang dihasilkan oleh piranti sel surya dibandingkan dengan jumlah energi cahaya yang diterima dari pancaran sinar matahari. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebenarnya tergantung pada efisiensi konversi energi dan konsentrasi sinar matahari yang diterima sel tersebut.

Faktor dari pengoperasian Sel surya agar didapatkan nilai yang maksimum sangat tergantung pada:

1. Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi, dan sangat tergantung keadaan spektrum solar ke bumi. Insolation solar matahari akan banyak berpengaruh pada current (I) sedikit pada tegangan.
2. Kecepatan tiupan angin disekitar lokasi larik sel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca larik sel surya
3. Keadaan atmosfer bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara (Rh), kabut dan polusi sangat menentukan hasil maximum arus listrik dari deretan sel surya.
4. Orientasi dari rangkaian sel surya (larik) ke arah matahari secara optimum adalah penting agar panel/deretan sel surya dapat menghasilkan energi maksimum. Selain arah orientasi, sudut orientasi (tilt angle) dari panel/deretan sel surya juga sangat mempengaruhi hasil energi maksimum. Sebagai guideline: untuk lokasi yang terletak di belahan Utara latitude, maka panel/deretan sel surya sebaiknya diorientasikan ke Selatan, orientasi ke Timur Barat walaupun juga dapat menghasilkan sejumlah energi dari panel/deretan sel surya, tetapi tidak akan mendapatkan energi matahari optimum.
5. Mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan panel sel surya secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum  $\pm 1000 \text{ W/m}^2$  atau  $1 \text{ kW/m}^2$ . Kalau tidak dapat mempertahankan ketegak lurus antara sinar matahari dengan bidang sel surya, maka ekstra luasan bidang panel sel surya dibutuhkan (bidang panel sel surya Sel surya pada Equator (latitude 0 derajat) yang diletakkan mendatar (tilt angle = 0) akan menghasilkan energi maksimum, sedangkan untuk lokasi dengan latitude berbeda harus dicarikan "tilt angle" yang optimum [17].

## 2.7 Piezoelektrik

### 2.7.1 Pengertian Piezoelektrik

Piezoelektrik adalah suatu bahan yang apabila diberi tekanan mekanik akan menghasilkan medan listrik sebaliknya apabila medan listrik di terapkan pada piezoelektrik akan terjadi deformasi mekanik atau perubahan dimensi bahan. Piezoelektrik memiliki beberapa macam bentuk, salah satunya seperti Gambar 2.4. Sifat yang reversibel dari material piezoelektrik dapat berfungsi sebagai transduser dan actuator dan secara rinci Piezoelektrik didefinisikan sebagai suatu kemampuan yang dimiliki sebagian Kristal maupun bahan-bahan tertentu lainnya yang dapat menghasilkan tegangan listrik jika mendapatkan perlakuan tekanan atau regangan. Piezoelektrik adalah suatu efek yang reversibel, dimana terdapat efek piezoelektrik langsung (*direct piezoelectric effect*) yaitu produksi potensial listrik akibat adanya tekanan mekanik dan efek piezoelektrik balikan (*converse piezoelectric effect*) yaitu produksi tekanan akibat pemberian tegangan listrik yang menghasilkan perubahan dimensi [18].



Gambar 2. 4 Gambar Piezoelektrik [18]

### 2.7.2 Karakteristik Bahan Piezoelektrik

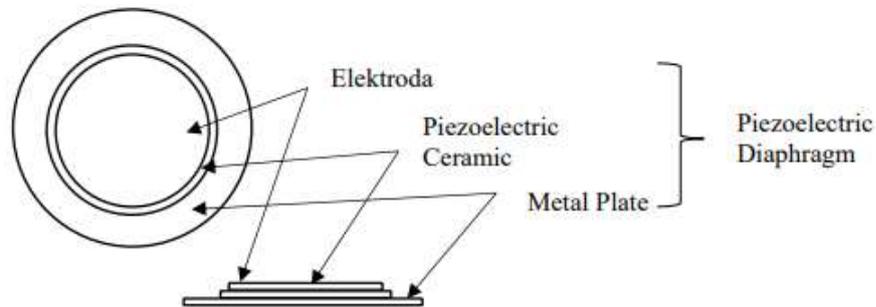
Bahan piezoelektrik merupakan material yang memproduksi medan listrik ketika dikenai regangan atau tekanan mekanis. Tekanan tersebut akan menyebabkan penyesuaian molekul sehingga material mengalami perubahan dimensi. Kuarsa

(Quartz, SiO<sub>2</sub>), Berlinite, Turmalin dan Garam Rossel merupakan bahan piezoelektrik alami, sementara Barium titanate (BaTiO<sub>3</sub>), Lead zirconiumtitanate (PZT), Lead titanate (PbTiO<sub>3</sub>) merupakan bahan piezoelektrik buatan. Material jenis ini antara lain lapisan tipis rhombohedral lead zirconium titanate (PZT) sebagai actuator untuk MEMS, lapisan tipis Aluminium Nitride (AlN) sebagai filter atau resonator (orde GHz) berbasis efek Surface Acoustic Wave (SAW), komposit piezoelektrik seperti serbuk keramik PTCa yang didispersikan dalam epoxy digunakan sebagai actuator pembalik (listrik menjadi energi mekanik). Adapun karakteristik material dari piezoelektrik pada umumnya dapat dilihat di Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Karakteristik Material Piezoelektrik [19]

<b>Material</b>	<b>Density (Mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dielectric Constant</b>	<b>Curie Temperature (°C)</b>	<b>Saturation Polarization (C/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Coupling Coefficient, K</b>
Quartz	2,65	4,6	575	-	-
Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,06	10,3	-	-	-
BaTiO <sub>3</sub>	5,7	1.900	130	0,26	0,38
PbTiO <sub>3</sub>	7,12	43	494	-	-
PZT-4	7,6	1.300	230	-0,5	0,56
PZT-5	7,7	1.700	365	-0,5	0,66
LiNbO <sub>3</sub>	4,64	29	1210	0,74	0,035
Rochelle Salt	-	5.000	24	-	-

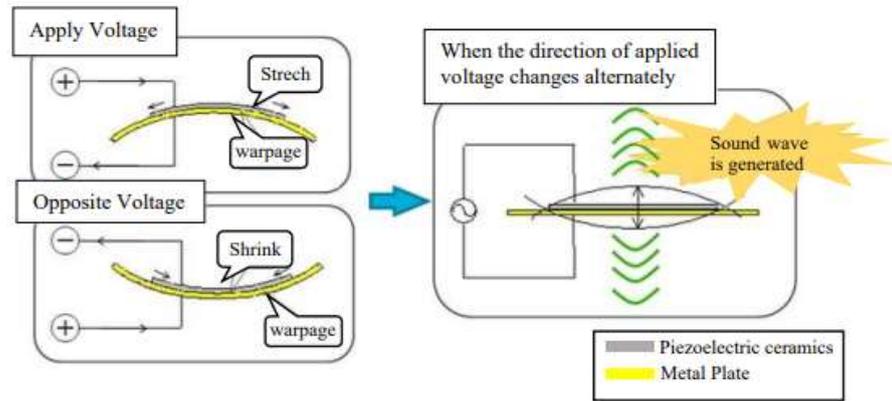
Bahan piezoelektrik merupakan material yang dapat memproduksi medan listrik ketika mendapat tekanan mekanis. Sebaliknya, ketika medan listrik diterapkan maka material tersebut akan mengalami regangan atau tekanan mekanis. Elemen piezoelektrik ini tersusun dari elektroda yang terdapat pada lapisan atas, piezoelectric ceramic berada di lapisan tengah dan metal plate yang terdapat pada lapisan bawah. Susunan material pada elemen piezoelektrik terdapat pada Gambar 2.5 [20].



Gambar 2. 5 Piezoelektrik Diafragma [20]

### 2.7.3 Prinsip Kerja Piezoelektrik

Teknologi piezoelektrik bisa dimanfaatkan karena teknologi ini memanfaatkan energi mekanik meskipun energi yang di hasilkan cukup kecil. Nilai koefisien muatan piezoelektik berkisar direntang nilai 1 – 100 pico Coloumb/Newton. Kata piezoelektrik berasal dari bahasa Latin, piezein yang berarti ditekan dan electric yang bermakna energi listrik. Piezoelektrik merupakan sebuah alat yang dapat mengukur gaya maupun tekanan dengan mengubahnya menjadi muatan listrik menggunakan prinsip efek piezoelektrik. Efek piezoelektrik merupakan efek yang terjadi pada sebuah material solid akibat adanya tekanan mekanik sehingga beberapa bagian material yang 4 bermuatan positif dan sebagian bermuatan negatif membentuk elektroda-elektroda yang kemudian menyebabkan terakumulasinya muatan listrik pada material tersebut. Semakin adanya tekanan yang di berikan atau yang diterima pada material piezo tersebut, output tegangan yang dihasilkan berubah ubah seperti Gambar 2.6. Bahan piezoelektrik adalah material yang apabila dikenai regangan atau tekanan mekanis dapat menghasilkan medan listrik. Karena tegangan yang dihasilkan berubah – ubah sesuai dengan regangan dan tekanan yang diberikan maka keluaran dari piezoelektrik bisa dikatakan bolak balik [21].



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Piezoelektrik [21]

Adapun perhitungan dasar dari piezoelektrik dengan memerhatikan dari dimensi dan getaran piezoelektrik seperti Tabel 2.3. Piezoelektrik memiliki beberapa macam – macam salah satunya ialah *Thickness*. Pada persamaan *Thickness*, tegangan dapat diperoleh dengan menggunakan rumus berikut

$$V = \frac{4 \times T \times g_{33}}{\pi \times D^2} \times F \quad (2.3)$$

$$F = m \times g \quad (2.4)$$

$$C = \frac{\pi \times \epsilon_{33} \times D^2}{4 \times T} \quad (2.5)$$

$$C = \frac{\pi \times \epsilon_{33} \times D^2}{4 \times T} \quad (2.6)$$

$$E = \frac{C \times V^2}{2} \quad (2.7)$$

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.8)$$

$$P = \frac{\pi \times D^2 \times d_{33} \times V}{2 \times 4T \times t \times g_{33}} \quad (2.9)$$

Dimana,

$V$  = Tegangan dari Piezoelektrik (V)

$T = \text{Tebal Piezoelektrik (m)}$

$C = \text{Kapasitansi (Farads)}$

$E = \text{Energi listrik (J)}$

$t = \text{waktu (s)}$

$P = \text{Daya (W)}$

$g_{33} = \text{Konstanta Tegangan Piezoelektrik } \left(\frac{Vm}{N}\right)$

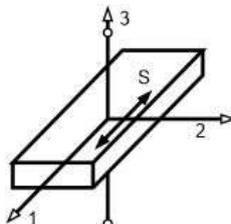
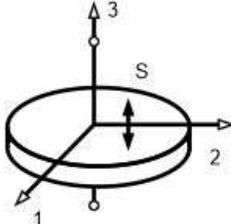
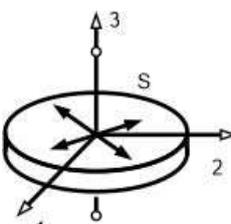
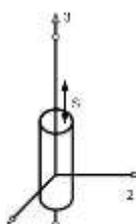
$d_{33} = \text{Konstanta Muatan Piezoelektrik } \left(\frac{C}{N}\right)$

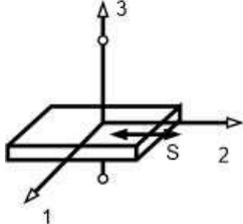
$D = \text{Diameter dalam Piezoelektrik (m)}$

$m = \text{Massa dari Tekanan yang Diberikan (kg)}$

$F = \text{Gaya (N) [22].}$

Tabel 2. 3 Persamaan Piezoelektrik menurut dimensi [19].

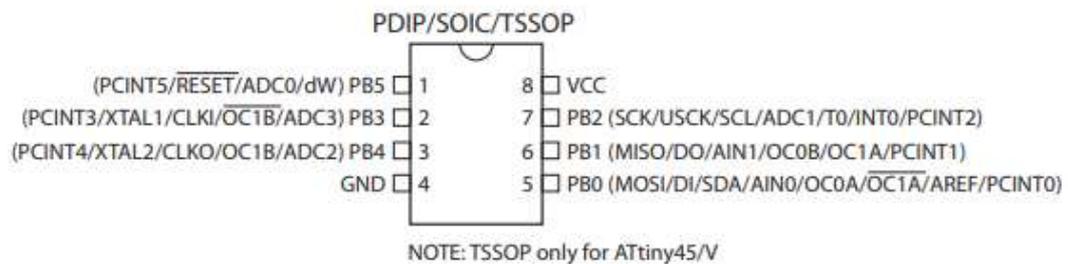
Action Mode (L,length; W,width; T,thickness; D,diameter)	Generated Voltage (V)	Displacement $\Delta L$ ( $\Delta T$ )	Capacitance (C)
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$ 	$W = \frac{g_{31}}{W} F$	$\Delta l = \frac{d_{31} L}{T} V$	$C = \frac{\epsilon_3^T L}{T} W$
Thickness extension mode: $D > 5T$ 	$V = \frac{4T g_{33}}{\pi D^2} F$	$\Delta T = d_{33} V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^T D^2}{4T}$
Radial mode: $D > 5T$ 	<i>Not applied</i>	$\Delta D = \frac{d_{33} D}{T} V$	$C = \frac{\pi K_3^T \epsilon_0 D^2}{4T}$
Longitudinal mode: $L > 3D$ 	$V = \frac{4L g_{33}}{\pi D^2} F$	$\Delta L = d_{33} V$	$C = \frac{\pi K_3^T \epsilon_0 D^2}{4L}$

<p>Thickness shear mode:</p> <p><math>W &gt; 5T, L &gt; 5T</math></p> 	$V = \frac{g_{15}}{W} F$	$\Delta x = d_{15} V$	$C = \frac{LWK_1^T \epsilon_0}{T}$
---	--------------------------	-----------------------	------------------------------------

Pada kristal piezoelectric beban elektrik positif dan negatif terpisahkan namun terdistribusi simetri maka kristal secara elektrik netral. Tiap – tiap sisinya membentuk dua kutub elektrik. Jika tegangan mekanik diaplikasikan maka distribusi yang simetri tadi akan menjadi asimetri dan membangkitkan tegangan listrik melintasi material seperti terlihat pada Gambar 2.6. Sebagai contoh sebuah kubus quartz 1 cm<sup>3</sup> dengan gaya yang diaplikasikan sebesar 2 kN (500 lbf) dapat memproduksi tegangan listrik sebesar 12.500 V. Material piezoelectric juga mampu menghasilkan efek yang berkebalikan, disebut converse piezoelectric effect dimana bila material dikenai sebuah medan listrik maka akan menghasilkan deformasi mekanik pada kristal atau material [23].

## 2.8 ATtiny85PU

ATtiny85 adalah mikrokontroler 8-bit keluaran Atmel dengan frekuensi maksimum 20 MHz. ATtiny85 hanya memiliki total 8 kaki pin terdiri dari VCC, GND, Reset dan 5 pin I/O seperti Gambar 2.7. Dengan ukurannya yang kecil, harganya yang murah dan mudah didapatkan, ATtiny85 selalu menjadi pilihan tepat untuk membuat proyek kecil dan sederhana. Dengan hadirnya Digispark, kini kita dapat memprogram ATtiny85 lebih mudah lagi karena Digispark dapat diprogram menggunakan Arduino langsung. Selain itu Digispark selalu saya anjurkan untuk digunakan oleh teman-teman yang baru belajar Arduino karena harganya lebih murah dibanding board lain (seperti Arduino UNO) dan masih bisa mengcover keperluan belajar Arduino dasar [24].

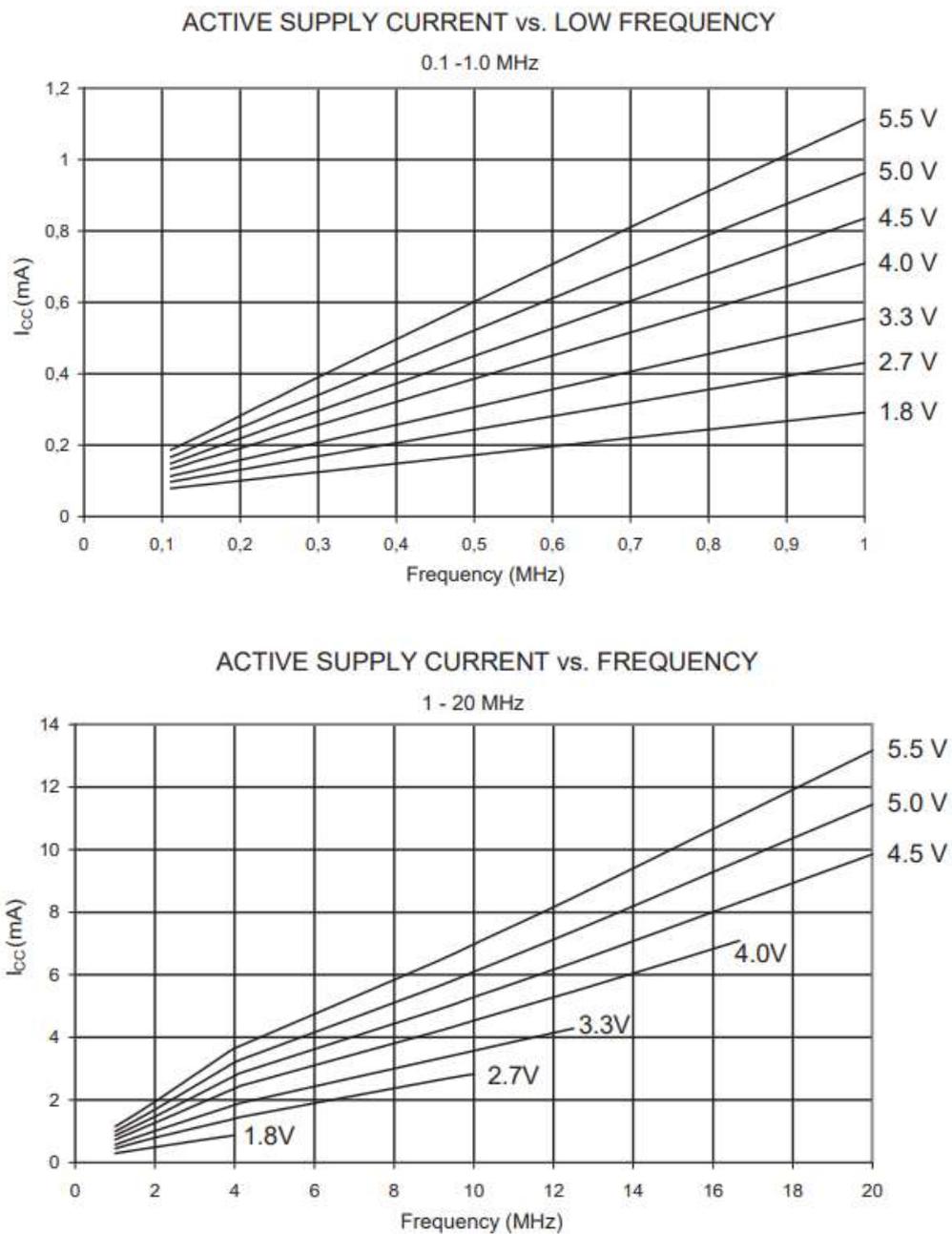


Gambar 2. 7 Attiny85 dan Pin I/O [25].

Ukurannya yang sekeping uang logam Rp 500, merupakan pilihan tepat untuk membuat proyek kecil dan sederhana. Dan harganya yang ekonomis juga merupakan pilihan tepat bagi mereka yang ingin belajar Arduino dengan harga murah, karena spesifikasi yang dimiliki sudah cukup untuk kita belajar berbagai fungsi pada mikrokontroler. Berikut Spesifikasi yang dimiliki Digispark:

1. Mendukung Arduino IDE 1.0+ (OSX/Win/Linux).
2. Dapat dicatu menggunakan sumber keV cc dari 1,8 – 5,5 V dengan tegangan operasi maksimum 6 V.
3. Sudah terdapat regulator 5 V 500 mA on Board.
4. Built-in USB
5. Memiliki 6 Pin I/O (2 pin diantaranya digunakan sebagai USB hanya jika program digunakan berkomunikasi secara aktif dengan USB. meskipun begitu, kita masih bisa menggunakan ke – 6 pin meskipun sedang memprogram melalui USB)
6. I2C dan SPI (via USI)
7. pin PWM [25].

Attiny85Pu memiliki clock internal dari 1 MHz dan 8 MHz. Clock dari mikrokontroler ini dapat diatur menggunakan Arduino IDE. Semua pengukuran arus merupakan uji coba saat semua Pin I/O terkonfigurasi dan digunakan. Arus yang digunakan juga tergantung dari clock internal yang digunakan seperti Gambar 2.8 [26].



Gambar 2. 8 Konsumsi Arus Pada Clock Frekuensi yang Digunakan [26].