



**IMPLEMENTASI RANGKAIAN *VOLTAGE-DOUBLER*
PIEZOELEKTRIK KERAMIK MURATA 7BB-35-3 UNTUK
PEMANENAN ENERGI GETARAN MOTOR BAKAR**

SKRIPSI

Oleh:

Achmad Nuary Sendanu

NIM 161910201059

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO STRATA 1
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**



**IMPLEMENTASI RANGKAIAN *VOLTAGE-DOUBLER*
PIEZOELEKTRIK KERAMIK MURATA 7BB-35-3 UNTUK
PEMANENAN ENERGI GETARAN MOTOR BAKAR**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh:

Achmad Nuary Sendanu

NIM 161910201059

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO STRATA 1

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2020

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini merupakan langkah awal kesuksesan yang saya raih sebelum menuju kesuksesan selanjutnya dalam hidup saya. Dengan penuh rasa syukur say persembahkan skripsi saya ini kepada :

1. Allah SWT, atas segala limpahan rahmat nikmat, hidayah dan inayah-Nya sehingga berkesempatan menimba ilmu di Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Rasulullah Muhammad SAW, sebagai *uswah* terbaik sepanjang masa;
3. Kedua orangtua tercinta, Ayah kapten Czi. Sumayar , Ibunda Hulatus Sundusiyah, dan kakak-kakak tercinta Eky Ismaningrum dan Desty Husumardiana atas segala kasih sayang, motivasi, nasehat, dan bimbingan, serta doa setulus hati yang tiada henti diberikan sampai saat ini;
4. Dosen Pembimbing Utama Bapak Andi Stiawan, S.T., M.T. dan Dosen Pembimbing Anggota Bapak Wahyu Muldayani, S.T., M.T yang telah sabar dan ikhlas memberi bimbingan kepada saya serta para bapak dan ibu dosen yang telah memberi ilmu dan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini;
5. Sahabat-sahabat saya yang selalu menemani dan memberi semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini;
6. Semua dulur-dulur Ikatan Dulur Teknik Elektro 2016, Kakak tingkat, dan Adik tingkat yang telah berjuang bersama-sama di Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember tercinta ini;
7. Almamater Teknik Elektro Fakultas Teknik Univeristas Jember.

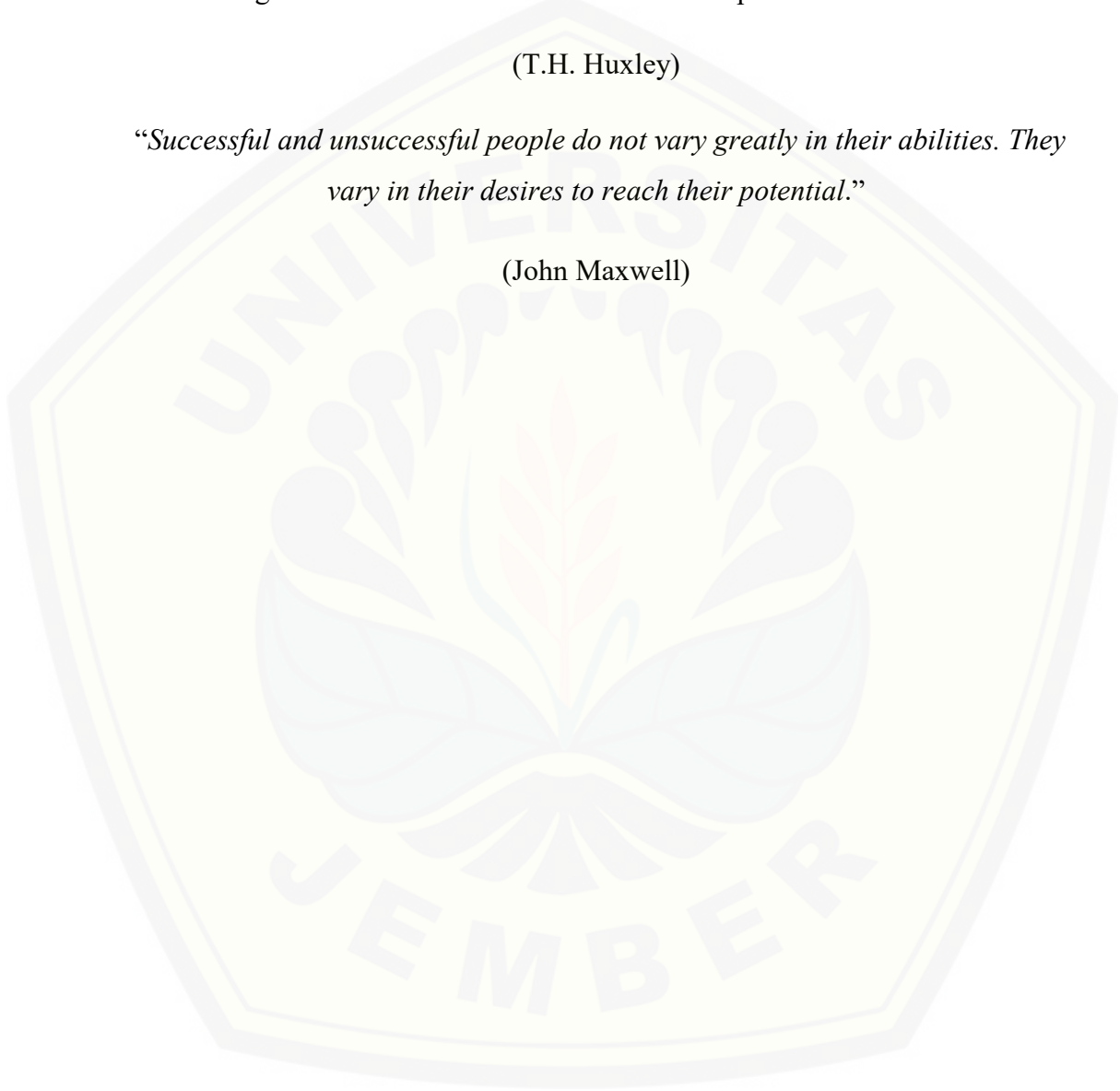
MOTTO

“Apa yang kita ketahui itu terbatas; secara intelektual kita berdiri di suatu pulau kecil di tengah-tengah lautan ketidaktahuan tak terbatas. Tugas kita di tiap generasi adalah mereklamasi untuk memperluas daratan.”

(T.H. Huxley)

“Successful and unsuccessful people do not vary greatly in their abilities. They vary in their desires to reach their potential.”

(John Maxwell)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Achmad Nuary Sendanu

NIM : 161910201059

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa proyek akhir yang berjudul: “Implementasi Rangkaian *Voltage-Doubler* Piezoelektrik Keramik Murata 7BB-35-3 Untuk Pemanenan Energi Getaran Motor Bakar” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun serta bukan karya plagiasi. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 8 Juli 2020

Yang menyatakan,

Achmad Nuary Sendanu

NIM 161910201059

SKRIPSI

**IMPLEMENTASI RANGKAIAN *VOLTAGE-DOUBLER*
PIEZOELEKTRIK KERAMIK MURATA 7BB-35-3 UNTUK
PEMANENAN ENERGI GETARAN MOTOR BAKAR**

Oleh

Achmad Nuary Sendanu

NIM 161910201066

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Andi Setiawan S.T., M.T

NIP. 196910101997021001

Dosen Pembimbing Anggota : Wahyu Muldayani, S.T., M.T.

NIP. 760016799

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Implementasi Rangkaian *Voltage-Doubler* Piezoelektrik Keramik Murata 7BB-35-3 Untuk Pemanenan Energi Getaran Motor Bakar” karya Achmad Nuary Sendanu telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Rabu, 8 Juli 2020

tempat : Fakultas Teknik, Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Andi Setiawan, S.T., M.T.
NIP 196910101997021001

Wahyu Muldayani, S.T., M.T.
NIP 760016799

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP. 197008261997021001

Dr. Ir. Satriyo Budi Utomo, ST., M.T.
NIP 198501262008011002

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Jember,

Dr. Ir. Triwahju Hardiyanto, S.T., M.T.
NIP 197008261997021001

RINGKASAN

Implementasi Rangkaian *Voltage-Doubler* Piezoelektrik Keramik Murata 7BB-35-3 Untuk Pemanenan Energi Getaran Motor Bakar; Achmad Nuary Sendanu; 161910201059; 2020; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember

Perkembangan teknologi yang bertambah pesat serta kebutuhan energi listrik yang terus meningkat tiap tahunnya menuntut untuk adanya peningkatan sumber energi listrik. Namun masih banyak sumber energi yang menggunakan sumber daya alam yang suatu hari akan habis. Maka dari itu dibutuhkan sumber energi alternatif yang dapat dilakukan dengan menggunakan *energy harvesting*.

Pemanenan energi (*Energy Harvesting*) memanfaatkan sejumlah kecil energi dari lingkungan untuk dijadikan sumber energi listrik. Contoh pemanenan energi dapat menggunakan piezoelektrik yang mengubah energi getaran menjadi listrik. Akan tetapi, pemanenan energi menggunakan piezoelektrik ini hanya menghasilkan tegangan yang rendah, sehingga perlu adanya sistem yang dapat meningkatkan tegangan yang dihasilkan. Salah satu sistem yang dapat meningkatkan tegangan yaitu rangkaian *voltage doubler* yang dapat meningkatkan tegangan dua kali lipat tegangan masuk sekaligus menyearahkan arus AC dari piezoelektrik.

Pada penelitian ini dilakukan menggunakan empat buah keramik piezoelektrik serta empat buah rangkaian *full-wave Villard cascade voltage doubler* (FWVC-VD). Terdapat lima pengujian pada penelitian ini yaitu pengujian karakteristik tegangan, pengujian rangkaian, pengujian korelasi, pengujian konfigurasi seri dan pengujian konfigurasi paralel. Pada pengujian karakteristik tegangan bertujuan untuk mengetahui karakteristik tegangan pada keramik piezoelektrik dan tegangan pada rangkaian serta hubungannya dengan frekuensi. Untuk pengujian rangkaian bertujuan untuk mengetahui *voltage gain* dari rangkaian FWVC-VD yang telah dirancang apabila menggunakan tegangan masuk dari *voltage regulator* dan tegangan masuk dari mekanisme penggetar. Pengujian ketiga

yaitu pengujian korelasi antara RPM motor bakar dengan tegangan *output* bertujuan mencari hubungan terhadap kedua variabel. Pengujian konfigurasi seri rangkaian bertujuan untuk mengetahui penambahan tegangan ketika rangkaian FWVC-VD dirangkai secara seri. Dan yang terakhir pengujian konfigurasi paralel bertujuan untuk menemukan daya yang dihasilkan sistem apabila diberi beban yang bervariasi.

Pada pengujian konfigurasi seri, sistem akan menghasilkan tegangan yang makin tinggi apabila jumlah yang diseri bertambah banyak. Sistem semula memiliki tegangan 2,87 V ketika tidak diseri, kemudian bernilai 5,51 V jika dua rangkaian diseri, kemudian 7,15 V apabila tiga rangkaian diseri, dan bernilai 11,07 V apabila keempat rangkaian diseri. Pada pengujian konfigurasi paralel, daya yang dihasilkan akan bertambah seiring bertambahnya jumlah paralel. Pada pengujian dengan beban 0,1 Ω daya yang dihasilkan satu rangkaian adalah 0,242 μW dan naik hingga 11,129 μW ketika keempat rangkaian diparalel. Ketika beban ditambah menjadi 0,5 Ω , daya yang dihasilkan satu rangkaian adalah 0,233 μW dan naik hingga 4,163 μW ketika keempat rangkaian diparalel. Pada pengujian dengan beban 2,2 Ω , daya yang dihasilkan satu rangkaian adalah 0,056 μW dan naik hingga 2,5 μW ketika keempat rangkaian diparalel. Dari percobaan tersebut dapat disimpulkan bahwa rangkain FWVC-VD dapat meningkatkan tegangan, namun dibutuhkan keramik piezoelektrik dengan jumlah yang banyak untuk dapat memanen energi secara optimal dari sumber ini.

SUMMARY

Voltage-Doubler Circuit Implementation of Murata 7BB-35-5 Piezoelectric For Energy Harvesting From Combustion Engine Vibration; Achmad Nuary Sendanu; 161910201059; 2020; *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember*

The rapid development of technology and the need for electricity that continues to increase every year demanding an increase in electrical energy sources. But there are still many energy sources that use natural resources which will one day run out. Therefore an alternative energy source is needed and that can be done using an energy harvesting.

Energy harvesting utilizes a small amount of energy from the environment to be used as a source of electrical energy. The examples of energy harvesting is using piezoelectricity that converts vibrational energy into electricity. However, the piezoelectric can only produces a low voltage, so it needs a system that can increasing the voltage output. The system that can increase a voltage output is a voltage doubler circuit that can double the voltage input and also rectifying the AC current from piezoelectric.

This research was conducted using four piezoelectric ceramics and four Full-Wave Villard Cascade Voltage Doublers (FWVC-VD). There are five tests in this research, firstly the voltage characteristic testing, circuit testing, correlation testing, series configuration testing and parallel configuration testing. In the voltage characteristic testing aims to determine the voltage characteristics of piezoelectric ceramics and the voltage in the circuit and its relationship with frequency. Then, circuit testing aims to determine the voltage gain of the FWVC-VD circuit that has been designed when using the input voltage from the voltage regulator and the input voltage from the vibrating mechanism. The third test is testing the correlation between RPM from combustion engine with the output voltage that aimed to find the relationship between the two variables. The series

configuration test aims to find out the total voltage when the FWVC-VD circuit is arranged in series. And lastly the parallel configuration test that aims to find the power generated by the system when it's given a varies of load.

In series configuration testing, the system will produce a higher voltage if the number of series is increased. The initial system has a voltage of 2,87 V, then it's increased to 5,51 V if two circuits are series, then 7,15 V when three circuits are series, and 11,07 V when the four circuits are in series. In parallel configuration testing, the power generated will increase with increasing number of parallels. In the test with a load of 0,1 Ω the power produced by a sigle circuit is 0,242 μ W and rises to 11,129 μ W when all four circuits are paralleled. When the load is increases to 0,5 Ω , the power produced by a single circuit is 0,233 μ W and increases to 4,163 μ W when all four circuits are paralleled. In the 2,2 Ω load test, the power produced by a series is 0,056 μ W and increases to 2,5 μ W when all four circuits are paralleled. From these experiments it can be concluded that the FWVC-VD circuit can be used to increasing the voltage, but it requires so much more piezoelectric ceramics to optimally harvest it's energy.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Implementasi Rangkaian *Voltage-Doubler* Piezoelektrik Keramik Murata 7bb-35-3 Untuk Pemanenan Energi Getaran Motor Bakar”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, karena berkat kuasa dan kehendak-Nya penulis diberi kekuatan jasmani dan rohani, kesabaran, ketabahan, kelancaran, dan kemudahan;
2. Orang tua tercinta, Ayah Kapten Czi Sumayar dan Ibunda Hulatus Sundusiyah, Kakak-Kakakku Eky Ismaningrum dan Desty Husumardiana, dan seluruh keluarga besar yang tidak pernah berhenti memberikan segala macam dukungan, kasih sayang, do'a, dan semangat dalam penyelesaian skripsi ini, serta tidak lupa pula kepada Annisafitri atas segala bantuan, *support* dan pemberi semangat selama ini;
3. Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
4. Bapak Andi Setiawan, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Wahyu Muldayani, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan dan motivasi dengan penuh kesabaran sehingga skripsi ini terselesaikan, serta Bapak Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T, selaku Dosen Penguji Ketua dan, Bapak Dr. Ir. Satrio Budi Utomo, ST., MT selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan skripsi ini;
5. Dr. Khairul Anam, S.T., M.T., P.hd selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasehat selama ini;
6. Teman kontrakan 3 tahun: Fany, Diki, Ucup dan Zaki yang telah bersama dan

memberi semangat serta dukungan kepada saya:

7. Teman se-proyekan: Yanuar dan Alfian yang telah membantu penelitian saya sehingga terselesaikannya skripsi ini;
8. Rekan - rekan IT-COM yang telah membantu dan memberikan pengalaman selama ini;
9. Kawan-kawan KKN 32 Kedawung Lumajang yang telah memberikan semangat dan dukungan kepada saya;
10. Dulur-dulur angkatan INDUKTRO 16 atas segala kebersamaan dan kerja samanya selama \pm 4th;
11. Semua pihak yang terlibat baik langsung maupun tidak langsung yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 8 juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
PERSEMBAHAN.....	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
LEMBAR PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
<i>SUMMARY</i>	x
PRAKATA.....	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Piezoelektrik	5
2.2 Koefisien-Koefisien Piezoelektrik	7
2.2.1 Konstanta Piezoelektrik d_{ij}	7
2.2.2 Konstanta Piezoelektrik g_{ij}	7
2.2.3 <i>Dielectric Coefficient</i> ϵ_{ij}	8
2.2.4 <i>Piezoelectric Coupling Factor</i> k_{ij}	8
2.3 Piezoelectric Ceramic.....	9
2.4 Sumber Getaran Motor Bakar.....	11

2.5 Pemanen Energi.....	13
2.6 Rangkaian Voltage-Doubler (Villard Cascade).....	14
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Jenis Penelitian	17
3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian.....	17
3.3 Kerangka Pemecahan Masalah.....	18
3.4 Alat Dan Bahan	19
3.5 Alur Perancangan Rangkaian FWVC-VD	20
3.5.1 Membuat Simulasi Rangkaian	20
3.5.2 Pembuatan Rangkaian FWVC-VD.....	20
3.5.3 Perhitungan Rangkaian.....	21
3.6 Alur Perancangan Sistem Mekanisme Penggetar	24
3.6.1 Blok Diagram Sistem	24
3.6.2 Desain Dan Mekanisme Penggetar Keramik Piezoelektrik	25
3.7 Metode Pengujian.....	27
3.7.1 Pengujian Karakteristik Tegangan <i>Output</i>	27
3.7.2 Pengujian Rangkaian FWVC-VD	28
3.7.3 Pengujian Korelasi Antara Kecepatan Putaran Motor Bakar dengan Tegangan <i>Output</i>	29
3.7.4 Pengujian Konfigurasi Seri Rangkaian FWVC-VD.....	30
3.7.5 Pengujian Konfigurasi Paralel Rangkaian FWVC-VD.....	31
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Pengujian Karakteristik Tegangan Output.....	34
4.1.1 Pengujian Karakteristik Tegangan Keluaran Dari Keramik Piezoelektrik Dan Rangkaian FWVC-VD	34
4.1.2 Pengujian Pengaruh Frekuensi Terhadap Tegangan <i>Output</i>	36
4.2 Pengujian Rangkaian FWVC-VD.....	40
4.2.1 Pengujian Rangkaian FWVC-VD Menggunakan Tegangan <i>Input</i> VR	41
4.2.2 Pengujian Rangkaian FWVC-VD Menggunakan Tegangan <i>Input</i> Mekanisme Penggetar	45

4.3 Pengujian Korelasi Antara Kecepatan Putaran Motor Bakar dengan Tegangan Output.....	50
4.4 Pengujian Konfigurasi Seri Rangkaian FWVC-VD	54
4.4.1 Pengujian Rangkaian FWVC-VD Nomor 1	54
4.4.2 Pengujian Rangkaian Seri FWVC-VD Nomor 1 dan Nomor 2	55
4.4.3 Pengujian Rangkaian Seri FWVC-VD Nomor 1, Nomor 2 dan Nomor 3	57
4.4.4 Pengujian Rangkaian Seri Keempat Rangkaian FWVC-VD	59
4.5 Pengujian Konfigurasi Paralel Rangkaian FWVC-VD	62
4.5.1 Pengujian Rangkaian Paralel FWVC-VD dengan Beban 0,1 Ω	64
4.5.2 Pengujian Rangkaian Paralel FWVC-VD dengan Beban 0,5 Ω	65
4.5.3 Pengujian Rangkaian Paralel FWVC-VD dengan Beban 2,2 Ω	67
BAB 5. PENUTUP.....	73
5.1. Kesimpulan	73
5.2. Saran	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	76

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai Konstanta Pada Keramik Piezoelektrik $PbTiO_3$	9
Tabel 2.2 <i>Datasheet</i> Keramik Piezoelektrik Murata 7BB-35-3.....	11
Tabel 3.1 Rencana Kegiatan Penelitian.....	17
Tabel 4.1 Pengujian Pengaruh Frekuensi Terhadap Tegangan <i>Output</i>	37
Tabel 4.2 Spesifikasi Komponen Rangkaian FWVC-VD.....	40
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Voltage Gain Rangkaian FWVC-VD Menggunakan VR.....	41
Tabel 4.4 Rata-Rata Nilai Voltage Gain Pada Tiap Rangkaian FWVC-VD	44
Tabel 4.5 Pengujian <i>Voltage Gain</i> Keempat Rangkaian FWVC-VD Menggunakan Mekanisme Penggetar	45
Tabel 4.6 Rata-Rata Nilai <i>Voltage Gain</i> dan V_{out} Teori Pada Tiap Rangkaian FWVC-VD	47
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Relasi Antara Putaran Motor Bakar Dengan Hasil Keluaran Mekanisme Penggetar	50
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Tegangan <i>Output</i> Rangkaian seri FWVC-VD nomor 1	54
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Tegangan <i>Output</i> Rangkaian seri FWVC-VD nomor 1 dan 2	56
Tabel 4.10 Hasil Pengujian Tegangan <i>Output</i> Rangkaian seri FWVC-VD nomor 1, Nomor 2 dan Nomor 3	58
Tabel 4.11 Hasil Pengujian Tegangan <i>Output</i> Rangkaian seri keempat rangkaian FWVC-VD	59
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Tegangan <i>Output</i> dan Arus <i>Output</i> Rangkaian paralel FWVC-VD dengan beban $0,1 \Omega$	64
Tabel 4.13 Hasil Pengujian Tegangan <i>Output</i> dan Arus <i>Output</i> Rangkaian paralel FWVC-VD dengan beban $0,5 \Omega$	66
Tabel 4.14 Hasil Pengujian Tegangan <i>Output</i> dan Arus <i>Output</i> Rangkaian paralel FWVC-VD dengan beban $2,2 \Omega$	67
Tabel 4.15 Nilai Rata-Rata Tegangan, Arus dan Daya.....	69

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Reaksi Bahan Piezoelektrik Saat Diberi Respon Tekanan.....	5
Gambar 2.2 Macam-Macam Piezoelektrik	6
Gambar 2.3 Pengaturan Piezoelektrik Dengan Muatan untuk Pengukuran d_{33}	7
Gambar 2.4 Piezoelektrik Dengan Sirkuit Terbuka untuk Pengukuran Pada g_{31}	7
Gambar 2.5 <i>Polling Process</i>	9
Gambar 2.6 Komponen Generator Listrik	12
Gambar 2.7 Penyebab Utama Eksentrisitas Mekanik <i>Air Gap</i>	13
Gambar 2.8. Cara Kerja Rangkaian <i>Full Wave Villard Cascade</i> VD.....	15
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	18
Gambar 3.2 Hasil Rangkaian FWVC-VD.....	21
Gambar 3.3 Perhitungan Rangkaian	22
Gambar 3.4 Grafik Tegangan berdasarkan Perhitungan	24
Gambar 3.5 Blok Diagram Sistem	25
Gambar 3.6 Desain Perancangan Keseluruhan Mekanisme Penggetar.....	25
Gambar 3.7 Mekanisme Penggetar Bagian Atas.....	26
Gambar 3.8 Mekanisme Penggetar Bagian Bawah.....	26
Gambar 3.9 Hasil Perangkaian Mekanisme Penggetar dan Rangkaian FWVC-VD.....	27
Gambar 3.10 Pengujian Karakteristik Tegangan <i>Output</i>	28
Gambar 3.11 Pengujian Rangkaian FWVC-VD	29
Gambar 3.12 Pengujian Korelasi Antara Kecepatan Putaran Motor Bakar dengan Tegangan <i>Output</i>	30
Gambar 3.13 Pengujian Konfigurasi Seri Rangkaian FWVC-VD.....	31
Gambar 3.14 Pengujian Konfigurasi Paralel Rangkaian FWVC-VD.....	32
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan tegangan <i>output</i> Piezoelektrik dan Rangkaian FWVC-VD Saat Pengisian Kapasitor	34
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan tegangan <i>output</i> Piezoelektrik dan Rangkaian FWVC-VD Saat Kapasitor <i>Discharge</i>	35
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan tegangan <i>output</i> Piezoelektrik dan Rangkaian FWVC-VD Saat Tegangan Kapasitor Stabil.....	35

Gambar 4.4 Grafik Perubahan Tegangan Rata-Rata Rangkaian FWVC-VD Terhadap Frekuensi Rata-Rata	38
Gambar 4.5 Grafik Tegangan <i>Output</i> Rangkaian FWVC-VD Ketika Frekuensi 6 Hz.....	38
Gambar 4.6 Grafik Tegangan <i>Output</i> Rangkaian FWVC-VD Ketika Frekuensi 3 Hz.....	39
Gambar 4.7 Grafik Tegangan <i>Output</i> tiap rangkaian FWVC-VD Menggunakan <i>Input</i> VR	43
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Tegangan <i>Output</i> dan <i>Input</i> Rangkaian FWVC-VD 1.....	48
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Tegangan <i>Output</i> dan <i>Input</i> Rangkaian FWVC-VD 2.....	48
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Tegangan <i>Output</i> dan <i>Input</i> Rangkaian FWVC-VD 3.....	48
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Tegangan <i>Output</i> dan <i>Input</i> Rangkaian FWVC-VD 4.....	49
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan <i>Voltage Gain</i> Pada Pengujian Dengan VR dan Mekanisme Penggetar	49
Gambar 4.13 Grafik Pengujian Relasi Putaran Motor Bakar Dengan Tegangan <i>Output</i> Mekanisme Penggetar	52
Gambar 4.14 Skema Rangkaian FWVC-VD Nomor 1	54
Gambar 4.15 Skema Rangkaian Seri FWVC-VD Nomor 1 dan Nomor 2	56
Gambar 4.16 Skema Rangkaian Seri FWVC-VD Nomor 1, Nomor 2 dan Nomor 3	57
Gambar 4.17 Skema Rangkaian Seri Keempat Rangkaian FWVC-VD	59
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Tegangan <i>Output</i> Tiap Pengujian Selama 15 Detik..	60
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Rata-rata Tegangan <i>Output</i> Tiap Pengujian.....	61
Gambar 4.20 Konfigurasi Rangkaian FWVC-VD	63
Gambar 4.21 Grafik Rata-rata tegangan keluaran.....	70
Gambar 4.22 Grafik Daya keluaran	71
Gambar 4.23 Grafik Rata-rata arus keluaran	70

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era kemajuan teknologi saat ini sebagian besar kegiatan manusia ditunjang oleh berbagai peralatan serta teknologi yang menggunakan sumber energi listrik. Hal ini tentu menjadikan energi listrik sebagai bagian yang tidak dapat terpisahkan dalam kegiatan manusia. Sumber energi listrik itu sendiri merupakan hasil akhir yang dihasilkan oleh pembangkit listrik. Pembangkit listrik yang ada saat ini masih banyak yang menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber pembakaran. Akan tetapi bahan bakar fosil ini merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui dan kesediannya sangat terbatas. Selain itu produksi dan pemakaian bahan bakar fosil secara terus-menerus memiliki dampak yang buruk bagi lingkungan. Bahan bakar fosil juga merupakan penghasil karbondioksida yang dapat mengakibatkan efek rumah kaca. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik, maka pengembangan sumber energi alternatif sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi saat ini dan juga untuk menekan penggunaan dari bahan bakar fosil.

Pemanenan energi (*energy harvesting*) telah menjadi topik diskusi dan penelitian selama 30 tahun terakhir. Pemanenan energi merupakan sebuah proses dimana sejumlah kecil energi dari lingkungan (sekitar) dimanfaatkan dengan cara atau alat tertentu menjadi energi listrik untuk digunakan secara langsung, atau energi ditangkap dan disimpan untuk penggunaan di masa depan. Pemanenan energi dibagi menjadi dua skala yaitu skala makro dengan sumber energi yang terdiri dari energi terbarukan yang ada saat ini seperti energi matahari, energi angin dan energi gelombang. Untuk pemanenan energi skala mikro terdiri dari energi yang berskala kecil seperti panas, gerakan dan getaran.

Pemanenan energi dengan skala mikro yang bersumber dari gerakan atau getaran dapat dipanen menggunakan keramik piezoelektrik. Piezoelektrik sendiri ialah efek linier yang berkaitan dengan struktur mikroskopis benda padat. Efek piezoelektrik terjadi ketika perpindahan muatan ionik dalam struktur kristal.

Namun, ketika tekanan eksternal diterapkan, muatan akan berpindah dan distribusi muatan tidak lagi simetris. Polarisasi yang terjadi pada kristal berkembang dan menghasilkan medan listrik. Singkatnya, ketika tekanan diberikan kepada kristal piezoelektrik, kesimetrisan dari kristal akan terganggu, dan ketidaksimetrisan pada kristal tersebut menghasilkan tegangan. Akan tetapi pemanenan energi dengan menggunakan sensor ini hanya dapat menghasilkan tegangan listrik yang relatif rendah.

Dari permasalahan tersebut maka dibutuhkan sebuah sistem yang dapat meningkatkan *output* tegangan yang dihasilkan dari piezoelektrik. Salah satu sistem yang dapat meningkatkan tegangan keluaran *output* dari suatu sumber adalah rangkaian *Voltage-Doubler* (VD). Rangkaian VD merupakan salah satu rangkaian bertipe khusus dari rangkaian penyearah dioda yang menghasilkan tegangan *output* berupa tegangan DC yang bernilai dua kali lebih besar dari tegangan *input* AC yang diterima. Rangkaian ini terdiri dari kapasitor dan dioda yang terhubung seri sehingga memungkinkan untuk menghasilkan tegangan *output* yang dua kali lebih besar dari tegangan *input*.

Banyak sekali penelitian tentang pemanenan energi yang menggunakan sumber dari sistem piezoelektrik. Salah satu penelitian yang membahas tentang pemanenan energi menggunakan piezoelektrik yaitu "*A Study on Vibration Energy Harvesting in Electric Generators*". Pada jurnal tersebut membahas tentang cara pemanenan energi dan penempatan sistem pemanenan energi pada generator. Namun pemanenan energi hanya dilakukan pada generator berukuran 2025KVA, 440KVA, 700KVA dan 500KVA serta tidak membahas pemanenan menggunakan motor bakar (Pacis & Bersano Jr., 2017). Selanjutnya penelitian sebelumnya yang membahas tentang penggunaan rangkaian VD pada piezoelektrik adalah "*Analysis of Voltage Multiplier Circuit Simulation for Rain Energy Harvesting Using Circular Piezoelectric*". Penelitian tersebut membahas tiga rangkaian VD untuk pemanenan energi dari air hujan namun hanya berupa simulasi dan belum melakukan secara langsung (Abidin, Nayan, Azizan, & Ali, 2018).

Berdasarkan uraian tersebut, maka penelitian ini diberi judul yaitu “Implementasi Rangkaian *Voltage-Doubler* Piezoelektrik Keramik Murata 7BB-35-3 Untuk Pemanenan Energi Getaran Motor Bakar”. Keramik piezoelektrik Murata 7BB-35-3 disini adalah jenis keramik piezoelektrik dengan diameter 35 milimeter dari perusahaan Murata. Sedangkan motor bakar disini berperan sebagai sumber penghasil getaran yang nantinya akan diberi mekanisme penggetar untuk menggetarkan keramik piezoelektrik sehingga keramik piezoelektrik tersebut menghasilkan energi listrik.

Dari penelitian ini diharapkan agar dapat membuat sistem pemanenan energi ramah lingkungan yang berasal dari rugi-rugi getaran yang dihasilkan oleh motor bakar. Sehingga rugi-rugi getaran ini dapat dimanfaatkan kembali menjadi sumber energi. Serta, semoga penelitian yang akan dilakukan ini diharapkan dapat meningkatkan nilai *output* tegangan keramik piezoelektrik yang kecil menggunakan rangkaian VD.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas dapat ditarik beberapa permasalahan yaitu:

1. Bagaimana cara melakukan pemanenan energi menggunakan keramik piezoelektrik Murata 7BB-35-3 pada motor bakar?
2. Bagaimana cara merancang rangkaian VD untuk pengoptimalan nilai tegangan keluaran dari keramik piezoelektrik Murata 7BB-35-3?

1.3 Batasan Masalah

Pada proses studi kasus dan penelitian tentu terdapat masalah yang akan terjadi, agar tidak timbul pembahasan masalah yang terlalu meluas, maka diperlukan pembatasan masalah yaitu:

1. Tidak membahas konstruksi motor bakar.
2. Tidak mengukur jumlah frekuensi yang diterima keramik piezoelektrik ketika diberi tekanan

3. Keramik piezoelektrik menggunakan produk dari perusahaan Murata dengan tipe 7BB-35-3.
4. Mekanisme penggetar menggunakan konstruksi *spring* dengan sumber getaran menggunakan motor bakar HIITACHI HC338.
5. Rangkaian VD yang digunakan hanya rangkaian *full wave Villard cascade* (FWVC) dan hanya satu tahap.
6. Pengujian hanya berfokus untuk mencari peningkatan tegangan sistem pemanen saat tanpa beban dan saat diberikan variasi beban.
7. Pengujian pembebanan hanya dilakukan ketika rangkaian FWVC-VD dirangkai secara paralel dan menggunakan beban resistor 0,1 Ω , 0,5 Ω , dan 2,2 Ω .

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini memiliki beberapa tujuan untuk dicapai sebagai pencapaian akhir, diantaranya:

1. Membuat sistem pemanen energi dengan menggunakan keramik piezoelektrik Murata 7BB-35-3 pada motor bakar.
2. Merancang rangkaian VD untuk pengoptimalan nilai tegangan keluaran dari keramik piezoelektrik Murata 7BB-35-3.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat diantaranya:

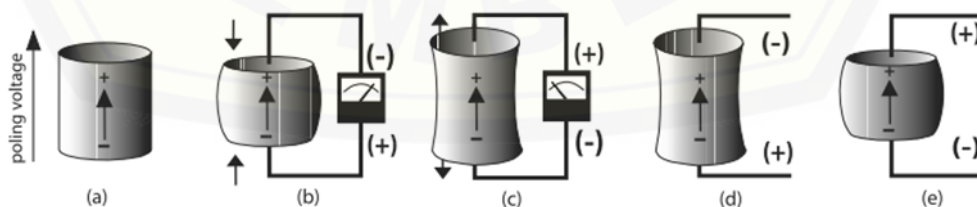
1. Terciptanya sistem pemanen energi dengan menggunakan keramik piezoelektrik.
2. Terciptanya model pemanenan energi yang baru dengan skala mikro menggunakan keramik piezoelektrik
3. Memanfaatkan rugi-rugi getaran pada motor bakar agar dapat dimanfaatkan kembali menjadi energi

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Piezoelektrik

Piezoelektrik (*Piezoelectricity*) merupakan sebuah material yang memiliki ciri khas apabila dibengkokkan dengan tekanan mekanik dari luar akan menghasilkan muatan listrik pada permukaannya. Efek ini ditemukan pada 1880 oleh Curie bersaudara. Efek piezoelektrik merupakan efek yang dapat dibalik yaitu ketika medan listrik diterapkan pada bahan piezoelektrik maka akan terjadi deformasi mekanik (perubahan dimensi bahan). Sifat yang *reversible* ini menjadikan material piezoelektrik dapat berfungsi sebagai transduser dan aktuator (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Piezoelektrik adalah efek linier yang berkaitan dengan struktur mikroskopis benda padat. Efek piezoelektrik bermula saat perpindahan muatan ionik dalam struktur kristal. Dengan tidak adanya tekanan eksternal, distribusi muatan dalam kristal simetris dan momen dipol pada posisi ini adalah nol. Namun, ketika tekanan eksternal diterapkan, muatan akan berpindah dan distribusi muatan tidak lagi simetris. Polarisasi yang terjadi pada kristal berkembang dan menghasilkan medan listrik. Singkatnya, ketika tekanan diberikan kepada kristal piezoelektrik, kesimetrisan dari kristal akan terganggu, dan ketidaksimetrisan pada kristal tersebut menghasilkan tegangan. Ilustrasi dari efek piezoelektrik dapat dilihat pada gambar 2.1. 1 cm kubus kuarsa yang diberikan tekanan sebesar 2 kN secara tepat pada permukaannya dapat menghasilkan listrik sampai dengan 12.500 V.



Gambar 2.1 Reaksi Bahan Piezoelektrik Saat Diberi Respon Tekanan (Sumber: Moheimani, 2006)

Banyak sekali bahan yang dapat menghasilkan efek piezoelektrik, termasuk kristal kuarsa analog seperti berlinite (AlPO_4) dan *gallium orthophosphate*

(GaPO₄), keramik dengan logam berstruktur perovskite (BaTiO₃, PbTiO₃, CaTiO₃, KNbO₃, LiNbO₃, LiTaO₃, BiFeO₃, Na_xWO₃, Ba₂NaNb₅O₁₅, Pb₂KNb₅O₁₅). Bahan polimer seperti karet, wol, rambut, serat kayu, dan sutra juga dapat menghasilkan efek piezoelektrik dengan kondisi tertentu. Polimer polivinilidena fluorida, (-CH₂-CF₂-)_n, dapat menghasilkan piezoelektrik beberapa kali lebih besar dari kuarsa. Bahkan tulang mampu menghasilkan piezoelektrik dengan teknik *bone remodeling* (Sharma, 2006).

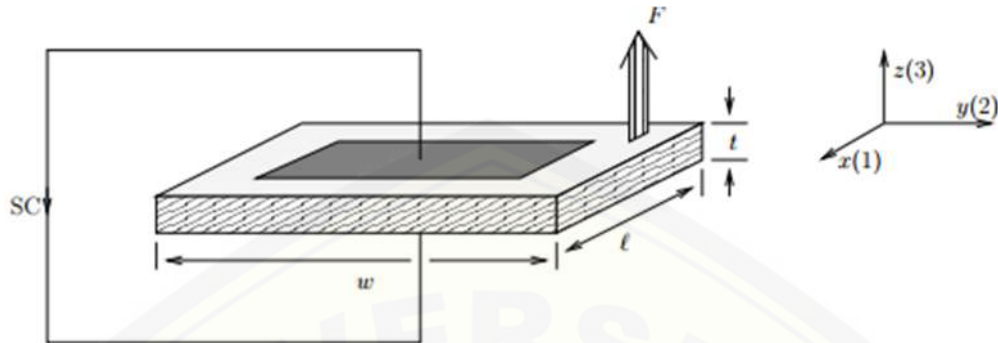
Bahan piezoelektrik memiliki jenis dan bentuk yang bermacam-macam. Kebutuhan yang tinggi dari piezoelektrik inilah yang membuat bentuk dan jenis yang ada sangat beragam sebagai contoh dapat dilihat pada gambar 2.2. Secara umum piezoelektrik dibedakan menjadi piezoelektrik transduser, piezoelektrik aktuator dan piezoelektrik sensor. Piezoelektrik transduser terdiri dari *patch transducer*, *power patch transducer* dan *piezo tubes*. Piezoelektrik aktuator terdiri dari *stack multilayer piezo*, *stack piezo*, *stack multilayer ring piezo*, *thru ring piezo*, *chip actuator*, *bender piezo*, *shear actuators* dan *picoactuator*. Piezoelektrik sendiri juga dapat digunakan pada rangkaian *driver*, *amplifier* dan *controller* (Piceramic, 2016).



Gambar 2.2 Macam-Macam Piezoelektrik (Sumber: Pic ceramic Manual Book)

2.2 Koefisien-Koefisien Piezoelektrik

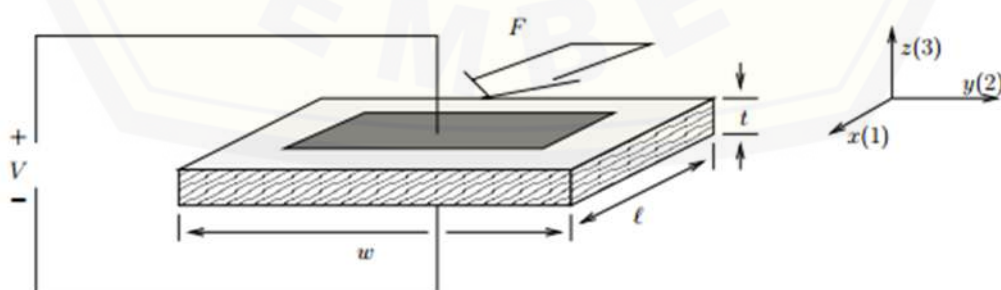
2.2.1 Konstanta Piezoelektrik d_{ij}



Gambar 2.3 Pengaturan Piezoelektrik Dengan Muatan untuk Pengukuran d_{33} (sumber: Moheimani, 2006)

Konstanta piezoelektrik d_{ij} merupakan rasio regangan (*strain*) yang diberikan pada sumbu j dengan medan listrik pada sumbu i ketika tekanan eksternal yang diberikan adalah konstan. Pada gambar 2.3 dapat dilihat yaitu ketika *strain* yang diberikan berada di sumbu z serta medan listrik yang mengalir juga di sumbu z , sehingga konstanta tersebut adalah konstanta d_{33} . Konstanta piezoelektrik d_{33} dapat digunakan untuk mencari perubahan ketebalan piezoelektrik (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). Selain itu Konstanta piezoelektrik d_{33} juga dapat digunakan untuk mencari muatan listrik dengan mengalikan konstanta piezoelektrik d_{33} dengan tekanan yang diterima (Moheimani & Fleming, 2006). Nilai dari konstanta d_{33} dapat dilihat pada tabel 2.1

2.2.2 Konstanta Piezoelektrik g_{ij}



Gambar 2.4 Piezoelektrik Dengan Sirkuit Terbuka untuk Pengukuran Pada g_{31} (Sumber: Moheimani, 2006)

Konstanta piezoelektrik g_{ij} merupakan perkembangan medan listrik pada sumbu i ketika material diberi tekanan (*stress*) pada sumbu j . Dari gambar 2.4 dapat dilihat bahwa tekanan F berasal dari sumbu x dan medan listrik mengalir di sumbu z sehingga konstanta tersebut bernama konstanta g_{31} . Ketika gaya F yang diterima sesuai dengan ilustrasi 2.4, maka nilai tegangan *output* dapat dihitung.

Penerapan lain dari konstanta g_{ij} adalah perbandingan rasio dari regangan yang diberikan pada sumbu j terhadap muatan (per unit area) yang tersimpan pada elektroda yang tegak lurus pada sumbu i . Pada gambar 2.4, bila muatan listrik Q disimpan pada permukaan elektroda, ketebalan piezoelektrik yang berubah dapat dihitung (Moheimani & Fleming, 2006). Nilai dari konstanta g_{33} dapat dilihat pada tabel 2.1

2.2.3 Dielectric Coefficient ϵ_{ij}

Koefisien dielektrik ϵ_{ij} merupakan rasio antara muatan per satuan luas pada sumbu i ketika medan listrik diterapkan pada sumbu j . Pada sebagian besar material piezoelektrik, medan yang diterapkan sepanjang sumbu j menyebabkan perpindahan listrik hanya pada arah tersebut. Konstanta dielektrik relatif, didefinisikan sebagai rasio dari *absolute permittivity* dari suatu bahan dengan permitifitas ruang bebas yang dilambangkan oleh K (Moheimani & Fleming, 2006).

2.2.4 Piezoelectric Coupling Factor k_{ij}

Koefisien piezoelektrik k_{ij} merupakan kemampuan bahan *piezoceramic* untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dan sebaliknya. Transformasi energi antara domain mekanik dan listrik digunakan pada sensor dan aktuator yang terbuat dari bahan piezoelektrik. Indeks i dan j menunjukkan tekanan atau regangan pada sumbu j kemudian elektroda tegak lurus dengan sumbu i .

Ada sejumlah cara untuk mengukur koefisien k_{ij} . Salah satunya adalah untuk menerapkan gaya tekan ke piezoelektrik, sambil membiarkan terminalnya *open-circuit*. Piezoelektrik akan terdefleksi seperti pegas. Defleksi Δz yang terjadi pada piezoelektrik ini dapat diukur dan kerja mekanis yang dilakukan oleh gaya F

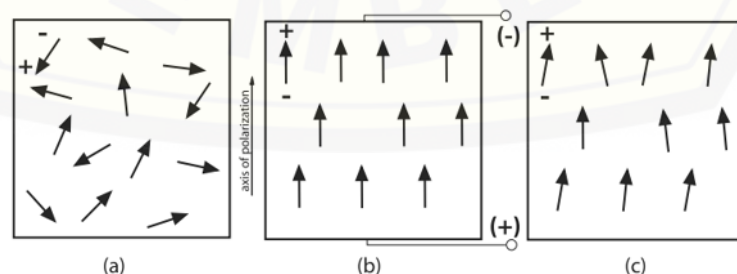
dapat ditentukan (Moheimani & Fleming, 2006). Nilai dari konstanta K_p dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai Konstanta Pada Keramik Piezoelektrik $PbTiO_3$

Konstanta	Satuan	Nilai
d33	10-12 m/V	340
g33	10-3 Vm/N	24
K_p	-	-0,57

2.3 Piezoelectric Ceramic

Piezoelectric Ceramic merupakan sekumpulan kristal perovskite (kristal yang memiliki struktur yang sama seperti kristal kalsium titanium oksida ($CaTiO_3$)). Untuk membuat keramik piezoelektrik, kristal perovskite harus dipanaskan terlebih dahulu sampai di atas batas *Curie Temperature*. Ketika kristal perovskite tadi dipanaskan, terjadi reaksi polarisasi terhadap kristal. Kristal akan menjadi beberapa domain yang memiliki momen *dipole* sehingga kristal tersebut terpolarisasi secara acak terhadap domain lainnya. Kemudian medan listrik DC berkapasitas tinggi diberikan pada kristal-kristal tersebut sehingga domain-domain yang sebelumnya acak akan memiliki arah yang sama. Proses ini dinamakan *polling process* dan diilustrasikan pada gambar 2.5 (Moheimani & Fleming, 2006).



(a) Polarisasi Akibat Panas Menghasilkan Domain Dengan Acak; (b) Pemberian Medan Listrik DC Berkapasitas Tinggi Untuk Polarisasi Lanjutan; (c) Ketika Medan DC Dihilangkan, Domain Memiliki Arah Yang Tetap.

Gambar 2.5 *Polling Process* (Sumber: Moheimani, 2006)

Piezoelektrik keramik terkenal dengan efek piezoelektrik yang dapat dibalik. Efek piezoelektrik menyebabkan kristal menghasilkan potensial listrik ketika mengalami getaran mekanis. Sebaliknya, efek piezoelektrik dapat menyebabkan kristal menghasilkan getaran ketika diberi medan listrik. Bahan yang sering digunakan untuk membuat keramik piezoelektrik yaitu garam Rochelle dan kuarsa. Namun, material-material ini memiliki jangkauan aplikasi yang relatif terbatas terutama karena stabilitas kristal garam Rochelle yang buruk dan tingkat keterbatasan karakteristik kuarsa.

Kemudian keramik piezoelektrik berbahan barium titanate (BaTiO_3) diperkenalkan untuk aplikasi dalam transduser ultrasonik, terutama untuk pencarian. Bahan terbaru untuk keramik piezoelektrik adalah *lead titanate, lead zirconate system* ($\text{PbTiO}_3 \cdot \text{PbZrO}_3$) yang memiliki efisiensi dan stabilitas transformasi elektromekanis (termasuk karakteristik suhu) jauh lebih unggul dari material-material sebelumnya. Material ini secara dramatis memperluas jangkauan aplikasi keramik piezoelektrik. Jika dibandingkan dengan material-material piezoelektrik lainnya, BaTiO_3 dan $\text{PbTiO}_3 \cdot \text{PbZrO}_3$ memiliki keunggulan sebagai berikut:

- a) Efisiensi transformasi elektromekanik yang tinggi,
- b) Kemampuan kontrol yang baik,
- c) Berbagai karakteristik dapat terpenuhi dengan komposisi bahan yang berbeda (tingkat kebebasan yang tinggi dalam desain karakteristik),
- d) Stabilitas tinggi,
- e) Cocok untuk produksi massal dan harga terjangkau.

Banyak sekali pengaplikasian dari keramik piezoelektrik ini. Pengaplikasiannya tidak hanya berada pada bidang elektro, namun berbagai bidang juga mulai menggunakan teknologi keramik piezoelektrik. Contoh dari pengaplikasian keramik piezoelektrik yaitu:

- a) Bidang mekanikal (transduser elektrik-ke-mekanik): Aktuator piezoelektrik, kipas piezoelektrik, pembersih ultrasonik, dll.
- b) Sensor (transduser mekanik-ke-listrik): Sensor ultrasonik, sensor ketukan, sensor kejutan, sensor akselerasi, dll.

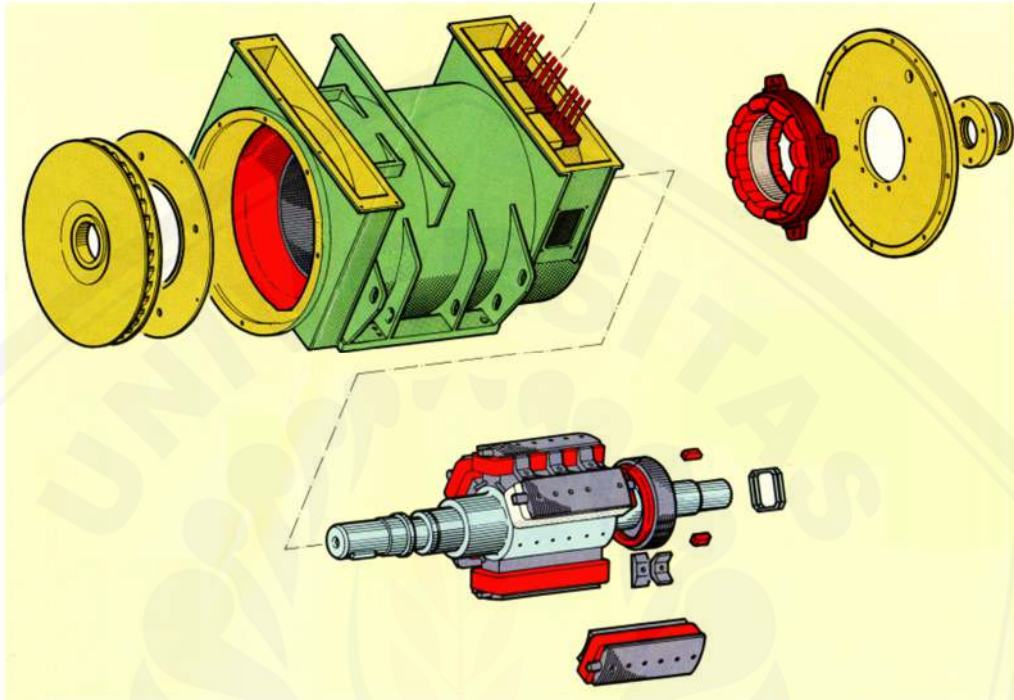
- c) Komponen sirkuit elektronik (transduser): Filter keramik, resonator keramik, filter gelombang akustik, *microforks*, dll (Murata Manufacturing, 2002).

Tabel 2.2 *Datasheet* Keramik Piezoelektrik Murata 7BB-35-3

<i>Resonant Frequency (KHz)</i>	2.8 ±0.5kHz
<i>Resonant Impedance (Ω)</i>	200 max
<i>Capacitance (nF)</i>	30.0 ±30% [1kHz]
<i>Plate size diameter (mm)</i>	35.0
<i>Element size (mm)</i>	25.0
<i>Electrode size (mm)</i>	23.0
<i>Plate Thickness (mm)</i>	0.30
<i>Plate Material</i>	Brass

2.4 Sumber Getaran Motor Bakar

Getaran merupakan sumber utama untuk menghasilkan tegangan pada piezoelektrik. Pada penelitian yang akan dibahas ini getaran yang digunakan merupakan getaran yang berasal dari motor bakar. Cara kerja dari motor bakar ini mirip seperti generator. Komponen utama dari generator listrik hamper sama seperti motor bakar yaitu stator, rotor, dan kerangka seperti pada gambar 2.6. Energi yang dihasilkan medan elektromagnetik mengalir menuju *air gap* dan ke stator. Arus listrik yang mengalir pada lilitan di stator menghasilkan medan magnet. Medan magnet akan menghasilkan gaya buang yang harus ditransferkan akibat hukum kekekalan energi. Namun, medan magnet juga dapat menghasilkan gaya radial yang tegak lurus terhadap medan magnet. Gaya radial inilah yang akan menghasilkan getaran pada generator dan juga pada motor bakar (Klinge & Hynninen, 2001).

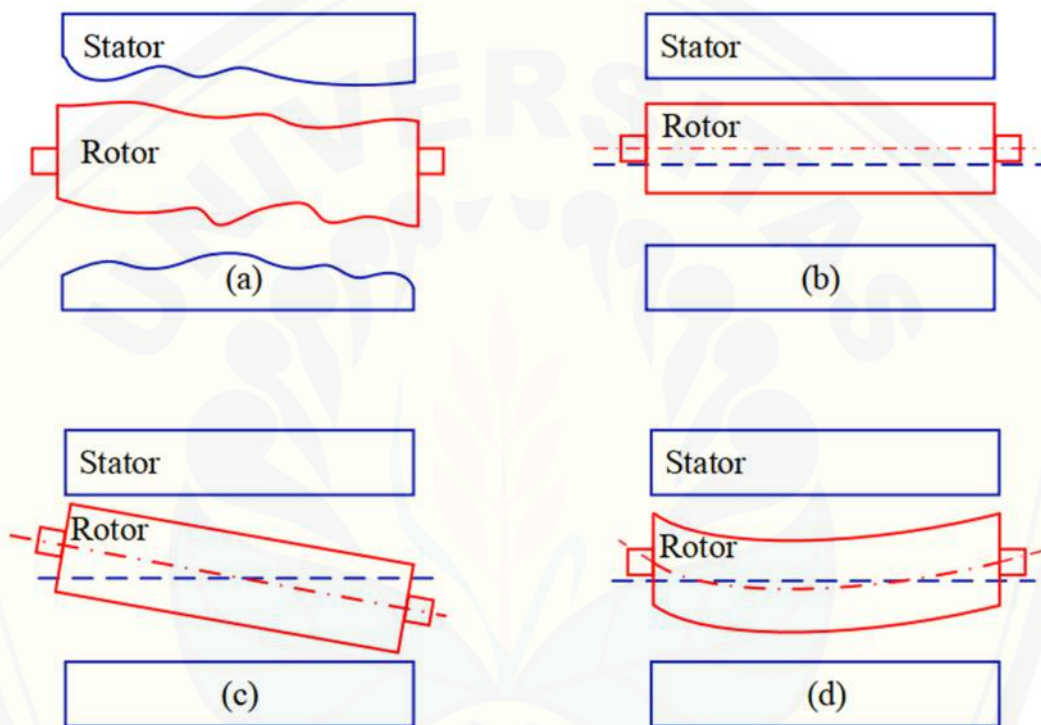


Gambar 2.6 Komponen Generator Listrik (Sumber: P. Klinge, 2001)

Getaran elektromagnetik biasanya dihasilkan oleh bagian *air gap* yang terdistorsi akibat ketidakrataannya gerak rotor akibat medan elektromagnetik dari stator (eksentrisitas). Celah udara yang tidak rata berhubungan langsung dengan eksentrisitas yang biasa terjadi pada mesin listrik yang bekerja dengan cara berputar. Eksentrisitas dapat disebabkan oleh beberapa sebab, seperti ketidaklurusan poros rotor dan stator pada *fixing stage*, ketidaklurusan sumbu beban dan poros rotor, penampang bagian dalam stator yang elips, penempatan yang salah atau gesekan pada *ball bearing*, resonansi mekanik, dan ketidakseimbangan beban.

Getaran mesin listrik dapat dibagi menjadi tiga kategori: getaran mekanis, getaran elektromagnetik dan getaran aerodinamis. Pada getaran mekanis penyebab utama dari getaran ini yaitu eksentrisitas pada *air gap* antara stator dan rotor. Sumber eksentrisitas *air gap* dapat dibagi menjadi empat kategori yaitu deviasi bentuk, eksentrisitas paralel, eksentrisitas miring, dan eksentrisitas melengkung.

Pada sumber getaran elektromagnetik dapat dibagi dalam empat kategori yaitu hubungan pendek, sirkuit terbuka, ketidakseimbangan magnetisasi dan asimetri topologi belitan. Dalam keadaan normal, fluks pada *air gap* dan distribusi gaya elektromagnetik bernilai sama dan simetris (Xu, Han, & Chu, 2018). Gambaran dari sumber getaran mekanis dapat dilihat pada gambar 2.7.



a) Deviasi Bentuk, (b) Eksentrisitas Paralel, (c) Eksentrisitas Miring, (d) Eksentrisitas Melengkung.

Gambar 2.7 Penyebab Utama Eksentrisitas Mekanik *Air Gap* ((Sumber : Xueping, 2018)

2.5 Pemanen Energi

Pemanen energi adalah suatu sistem yang berfungsi untuk mengumpulkan energi dari sumber energi mekanis dan dikonversikan menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan pada alat pemanen energi relatif kecil sehingga tidak dapat langsung dimanfaatkan. Umumnya energi yang dihasilkan disimpan terlebih dahulu dalam penyimpanan energi listrik (baterai atau konduktor). Salah satu alat pemanen energi adalah piezoelektrik yang mampu mengubah energi mekanis dari getaran

menjadi energi listrik. Saat material piezoelektrik mendapatkan suatu tekanan, maka partikel penyusun piezoelektrik akan terpolarisasi sehingga menimbulkan muatan listrik (Gamayel, 2017).

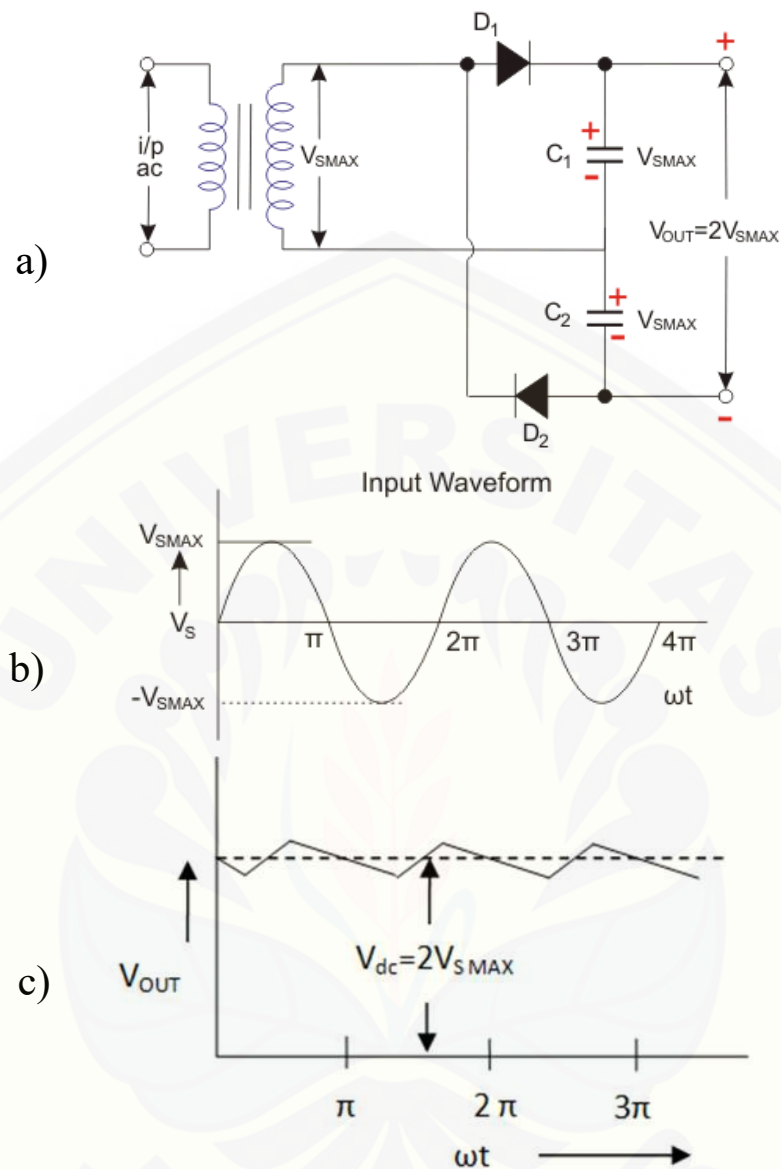
2.6 Rangkaian Voltage-Doubler (Villard Cascade)

Karena berbagai jenis pengaplikasian peralatan listrik, permintaan untuk tegangan listrik untuk level yang lebih tinggi sangat beragam. Oleh karena itu, banyak upaya telah dilakukan untuk menemukan cara agar menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dari tegangan catu daya. Banyak metode telah digunakan untuk melakukan tantangan ini. Beberapa metode yang paling umum diterapkan untuk menghasilkan tegangan lebih besar daripada tegangan catu daya yaitu dengan rangkaian *voltage-doubler* (VD) (Toudeshki, Mariun, Hizam, & Wahab, 2014).

Rangkaian *Villard-cascade* memungkinkan peningkatan *output* tegangan melalui penambahan sejumlah tahap dari rangkaian. Dengan memilih jumlah tahap yang tepat, nilai tegangan yang diinginkan dapat dicapai. Namun, rangkaian ini terbatas pada jumlah arus yang mengalir ke dalam rangkaian. Rangkaian *villard-cascade* bekerja dengan menghasilkan tegangan pada rangkaian dari arus AC yang telah melewati kapasitor (Demon, Tamuri, & Bidin, 2010)

Rangkaian VD yang digunakan merupakan rangkaian *full wave villard cascade voltage doubler* (FWVC-VD). Rangkaian ini menggunakan dua kapasitor dan dua dioda. Selama siklus positif dari tegangan masuk berupa tegangan AC, dioda D1 *forward bias* dan mengisi kapasitor C1 ke tegangan puncak V_{smax} . Selama siklus negatif, dioda D2 melakukan bias maju dan mengisi kapasitor C2. Dengan tidak adanya beban yang terhubung ke terminal *output*, tegangan *output* akan sama dengan jumlah tegangan di seluruh kapasitor C1 dan C2 yaitu

$$V_{C2} + V_{C1} = V_{smax} + V_{smax} = 2V_{smax} \dots\dots\dots(1)$$



(a) Rangkaian *Full Wave Villard Cascade* VD; (b) gelombang *input*; (c) gelombang *output*

Gambar 2.8. Cara Kerja Rangkaian *Full Wave Villard Cascade* VD (Sumber : Voltage Multiplier, 2018)

Ketika rangkaian FWVC-VD diberi beban, tegangan jatuh dapat terjadi akibat batas tegangan dan resistansi internal dari dioda serta mekanisme saat mengisi dan melepas pada kapasitor (Kind & Feser, 2001). Untuk menghitung tegangan keluaran dari sistem FWVC-VD gelombang penuh didapatkan dengan rumus

$$V_o = 2 \times n \times V_{in} - \Delta U \dots\dots\dots(2)$$

Ketika elemen pada rangkaian bersifat ideal, tegangan jatuh dapat dihitung dengan cara

$$\Delta U = \frac{I}{f \times C} \times \frac{8n^3 + 3n^2 + n}{12} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

V_o = tegangan keluaran rangkaian (V)

n = jumlah tahap

V_{in} = tegangan masuk rangkaian (V)

ΔU = tegangan jatuh pada rangkaian (V)

I = arus (A)

f = frekuensi (Hz)

C = nilai kapasitansi kapasitor (F)

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada metodologi pelaksanaan data ini akan menjelaskan mengenai tempat dan waktu, ruang lingkup, jenis dan sumber data, serta metode pengumpulan data yang dilakukan dalam proses penelitian:

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang akan dilakukan yaitu dengan mengimplementasikan mekanisme penggetar yang akan dipasang pada motor bakar sehingga getaran dari motor bakar dapat digunakan oleh keramik piezoelektrik. Mekanisme yang digunakan berupa susunan *spring* yang dipasang tegak lurus dengan keramik piezoelektrik yang akan bergerak ketika motor bakar menyala. Ketika *spring* bergerak, *spring* akan mengenai keramik piezoelektrik sehingga menghasilkan tegangan yang akan dialirkan menuju rangkaian *voltage doubler* (VD) berupa rangkaian seri *full wave villarcd cascade voltage doubler* (FWVC-VD) dengan satu tahap. Kemudian dari rangkaian seri FWVC-VD tersebut akan diukur parameter yang dibutuhkan.

3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian

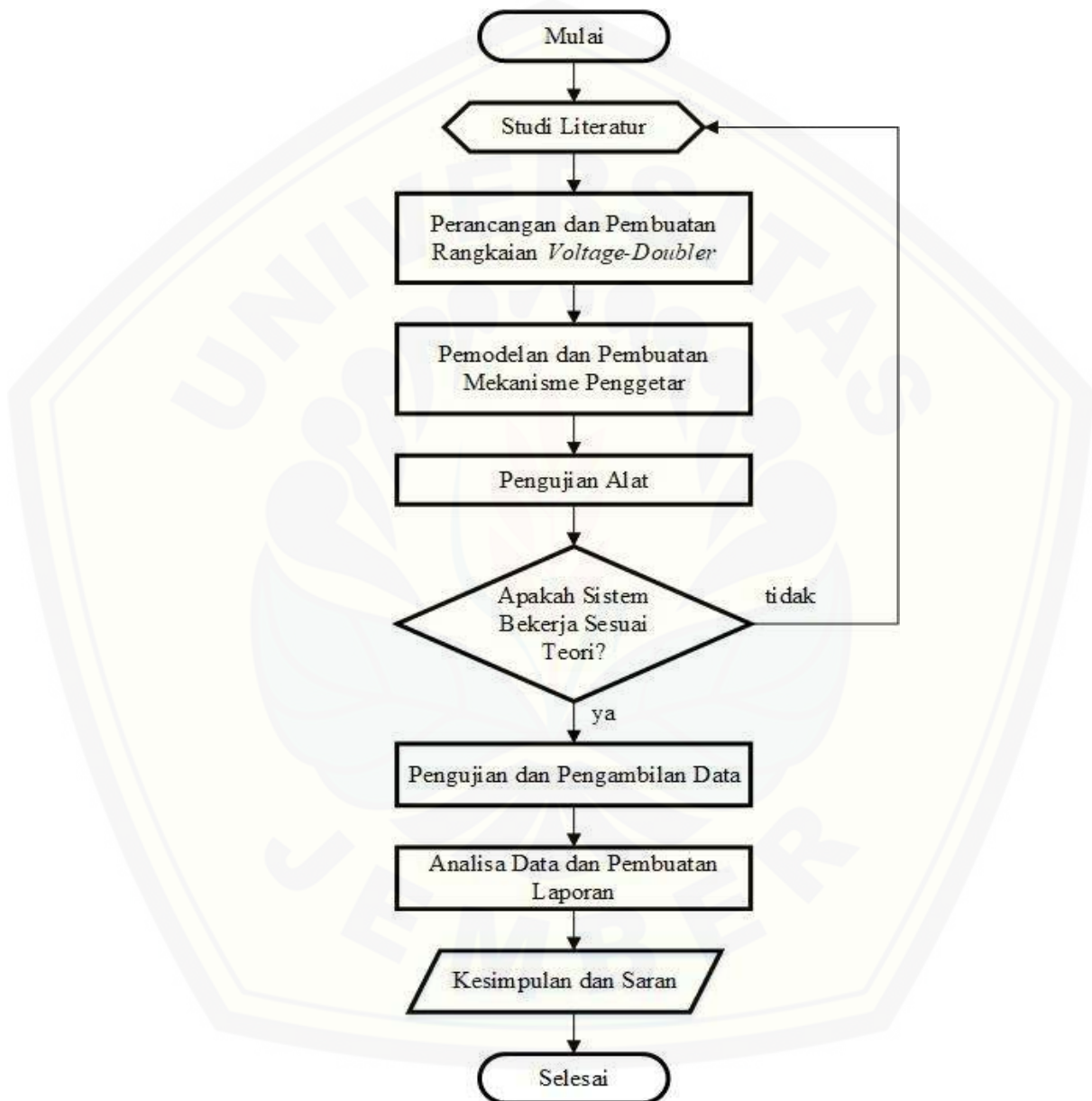
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl Slamet Riyadi No. 62 Patrang. Penelitian ini direncanakan akan dimulai pada bulan November 2019 sampai selesai dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 3.1 Rencana Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan Ke-/Minggu															
		Bulan 1				Bulan 2				Bulan 3				Bulan 4			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Studi Literatur																
2.	Penelitian																
3.	Analisis Data																
4.	Pembahasan																
5.	Pembuatan Laporan																

3.3 Kerangka Pemecahan Masalah

Dalam kerangka pemecahan masalah pada penelitian kali ini merupakan tahap-tahap dalam penelitian dan penyusunan penelitian secara keseluruhan sebagaimana dapat dinyatakan dalam diagram alir yang terdapat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan pada implementasi rangkaian VD keramik piezoelektrik untuk pemanenan energi getaran motor bakar adalah:

- a) Menentukan alat dan bahan yang akan digunakan.
- b) Membuat rangkaian seri *full wave villarcd cascade voltage doubler* FWVC-VD satu tahap.
- c) Membuat mekanisme penggetar keramik piezoelektrik menggunakan dua plat datar berukuran 14cm x 15cm dan diberi *spring* diantara kedua plat.
- d) Untuk pengambilan data dapat dilakukan saat rangkaian FWVC-VD dan mekanisme penggetar bekerja. Hasil data yang diperoleh saat pengujian akan dibahas dalam pembahasan serta dapat menganalisa untuk membuat kesimpulan dari mekanisme dan rangkaian tersebut.

3.4 Alat Dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

Alat :

- a) Solder
- b) Avometer
- c) *Tachometer*
- d) *Oscilloscope*
- e) Bor
- f) Gerinda
- g) *Automatic voltage regulator*
- h) *Double tape*

Bahan :

- a) Keramik piezoelektrik Murata 7BB-35-3
- b) Motor bakar HIROCHI HC338
- c) *Spring*
- d) Plat PCB
- e) Timah
- f) Jumper
- g) Baut
- h) Mur

- i) Kapasitor 10uF 50V
- j) Dioda 2A200
- k) *Jumper banana*
- l) *Socket banana*

3.5 Alur Perancangan Rangkaian FWVC-VD

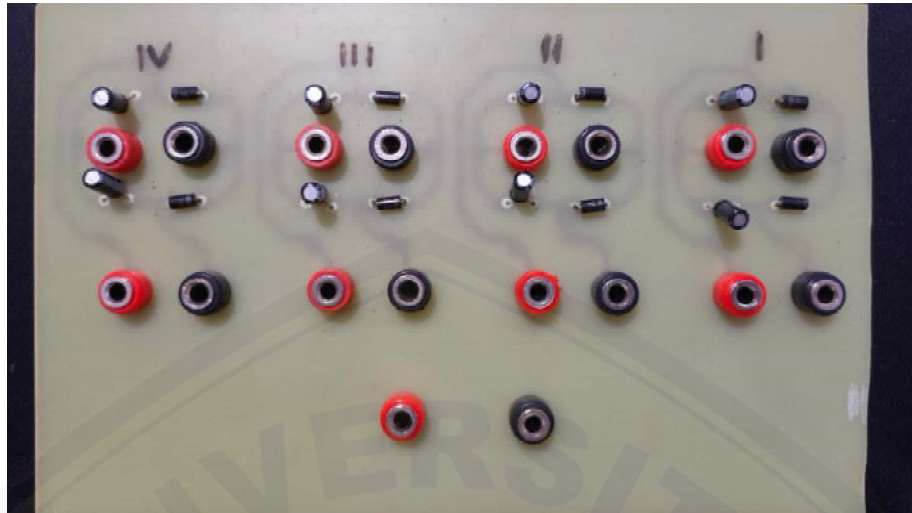
Pada bagian ini akan membahas tentang alur yang digunakan untuk memulai perancangan rangkaian dan mekanisme penggetar.

3.5.1 Membuat Simulasi Rangkaian

Pembuatan simulasi rangkaian seri FWVC-VD ini menggunakan aplikasi Proteus. Rangkaian yang digunakan yaitu empat buah VD yang nantinya akan dirangkai secara seri. Keramik piezoelektrik yang digunakan juga berjumlah empat buah sehingga satu keramik piezoelektrik akan disambungkan ke satu VD. Rangkaian VD terdiri atas dua buah dioda dengan arus maju 2A dan tegangan maksimal 200V dan dua buah kapasitor dengan kapasitansi 10 μ F. Jumlah dioda dan kapasitor yang digunakan yaitu delapan buah kapasitor dan delapan buah dioda dengan spesifikasi yang sama. Kemudian simulasi akan dicoba hingga mencapai hasil yang diinginkan.

3.5.2 Pembuatan Rangkaian FWVC-VD

Ketika rangkaian pada simulasi berjalan lancar dan tidak ada kesalahan, maka rangkaian akan dicetak dan membuat rangkaian dengan cara *PCB etching*. Setelah rangkaian telah jadi maka dilanjutkan dengan pemasangan komponen dioda dan kapasitor menggunakan timah dan solder. Hasil dari perangkaian rangkaian FWVC-VD dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Hasil Rangkaian FWVC-VD

3.5.3 Perhitungan Rangkaian

Ketika rangkaian telah dirangkai langkah terakhir yaitu menghitung nilai arus dan tegangan pada rangkaian sehingga sesuai dengan teori. Perhitungan dimulai dari pengujian dioda untuk mencari resistansi dioda menggunakan sumber DC 5V dan resistansi $100\text{K}\Omega$ yang dirangkai seri dengan dioda. gambar rangkaian dapat dilihat pada gambar 3.3. Dioda yang digunakan merupakan tipe silikon dengan V_d bernilai $0,7\text{V}$. Sehingga nilai resistansi dioda adalah :

$$I_d = \frac{V_s - V_d}{R} = 43\mu\text{A}$$

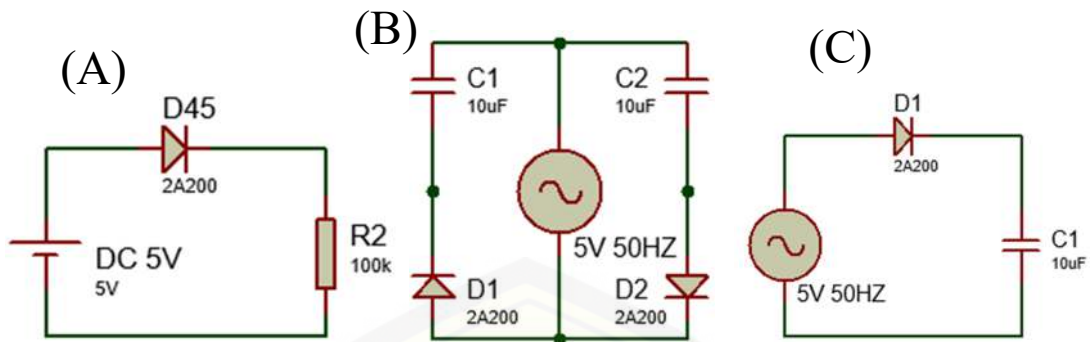
Sehingga R_d :

$$R_d = \frac{V_d}{I_d} = 16.279\Omega$$

Langkah selanjutnya yaitu menghitung nilai arus yang dihasilkan pada rangkaian FWVC-VD sehingga dapat mengukur nilai tegangannya. Pertama-tama perhitungan dimulai dari menghitung reaktansi kapasitif (X_c) dari kapasitor yaitu :

$$X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}$$

$$X_c = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 10\mu} = 318,47\Omega$$



Gambar 3.3 Perhitungan Rangkaian : A) Rangkaian untuk menghitung R_d . B) Rangkaian FWVC-VD. C) Rangkaian FWVC-VD ketika satu siklus

Nilai-nilai pada tiap komponen dapat dilihat pada gambar 3.3. Ketika X_c ditemukan, selanjutnya mengukur impedansi sehingga dapat mengukur arus pada rangkaian FWVC-VD yaitu :

$$z = \sqrt{X_c^2 + R_d^2}$$

$$z = \sqrt{318,47^2 + 16.279^2} = 16.282,11 \Omega$$

Sehingga nilai arusnya adalah:

$$I = \frac{V}{z} = 0,307mA$$

Keterangan :

- R_d : Resistansi dioda
- I_d : Arus dioda
- V_s : Tegangan sumber
- V_d : Tegangan dioda
- R : Resistansi resistor
- X_c : Reaktansi kapasitif
- f : Frekuensi
- C : Kapasitor

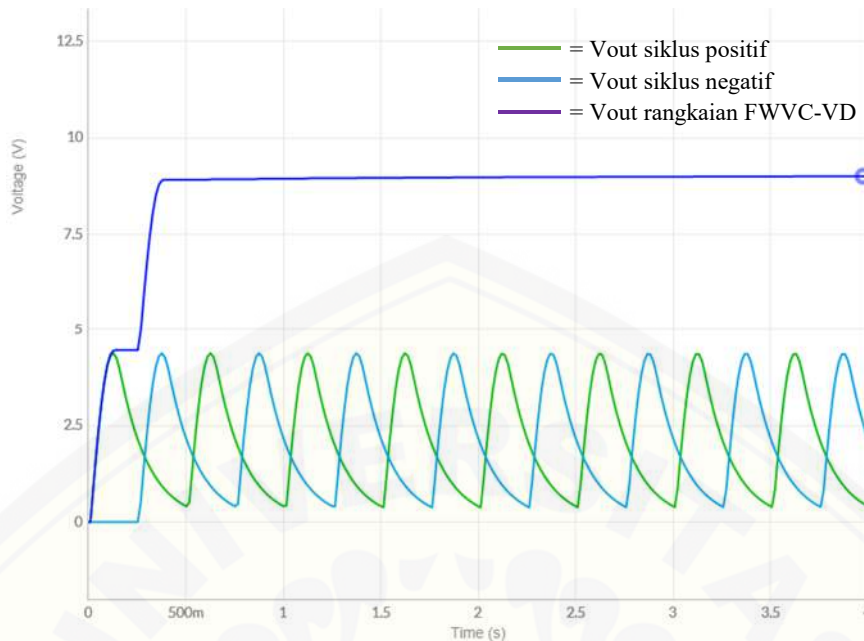
Dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa nilai tegangan yang akan dihasilkan rangkaian ketika satu siklus positif pada rangkaian FWVC-VD yaitu 4,998V. Nilai ini akan sama ketika pada siklus negatif karena terdapat dioda yang menyearahkan rangkaian. Selanjutnya menghitung nilai tegangan yang dihasilkan rangkaian FWVC-VD ketika dua kapasitor dihubungkan. Untuk menghitung nilai tegangan keluaran rangkaian FWVC-VD pertama-tama mencari dahulu nilai ΔU . Dimana untuk mencari ΔU dapat menggunakan persamaan ketiga pada bab sebelumnya. Sehingga nilai ΔU adalah :

$$\frac{0,307mA}{50 \times 10\mu F} \times \frac{8(1)^3 + 3(1)^2 + (1)}{12} = 0,614V$$

Dari nilai ΔU yang telah ditemukan dapat mencari V_o menggunakan persamaan kedua. Sehingga nilai V_o adalah :

$$V_o = 2 \times 1 \times 5V - 0,614V = 9,386V$$

Dari hasil perhitungan diatas dapat dibuat grafik hasil keluaran pada kapasitor. Gambar grafik dapat dilihat pada gambar 3.4. Pada gambar terlihat terdapat tiga grafik yaitu grafik tegangan ketika siklus positif, grafik tegangan ketika siklus negatif dan grafik tegangan FWVC-VD. Terlihat pada gambar bahwa grafik pada tegangan keluaran FWVC-VD bernilai dua kali nilai tegangan pada siklus positif dan negatif dikarenakan kedua kapasitor pada rangkaian dirangkai seri. Sehingga rangkaian yang telah dibuat sesuai dengan teori yang ada.



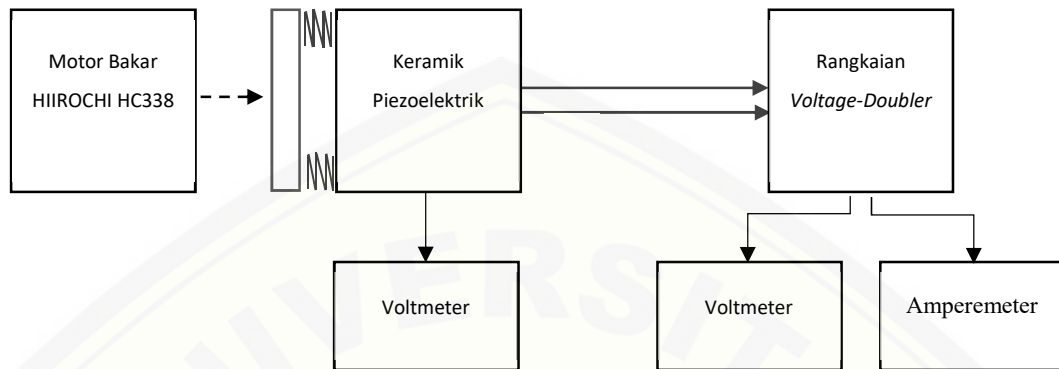
Gambar 3.4 Grafik Tegangan berdasarkan Perhitungan

3.6 Alur Perancangan Sistem Mekanisme Penggetar

Setelah rangkaian selesai dibuat, selanjutnya membuat sistem mekanisme penggetar keramik piezoelektrik. Mekanisme penggetar ini terdiri dari dua plat bagian atas dan bawah. Plat bagian bawah terdiri dari empat buah keramik piezoelektrik yang ditempel menggunakan *double tape*. Bagian positif dan negatif dari keramik piezoelektrik akan disambungkan ke jalur *socket* agar mempermudah menyambungkan ke rangkaian. Pada plat bagian atas terdapat *spring* yang akan mengenai keramik piezoelektrik. Pada baut plat bagian atas diberi jarak 1,5cm agar plat bagian atas dapat bergerak keatas dan kebawah ketika terdapat getaran.

3.6.1 Blok Diagram Sistem

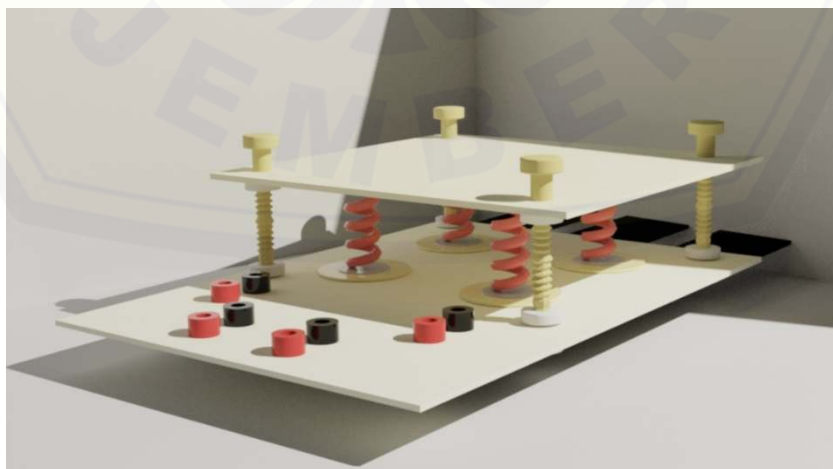
Prinsip kerja dari penelitian ini dapat digambarkan pada blok diagram seperti dibawah. Motor bakar mula-mula akan menyala dan akan menggetarkan mekanisme penggetar keramik piezoelektrik. Kemudian dari keramik piezoelektrik akan masuk ke rangkaian VD yang akan dikonfigurasi seri dan paralel pada tiap keluaran keramik piezolektrik. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui cara pemanenan energi menggunakan keramik piezoelektrik



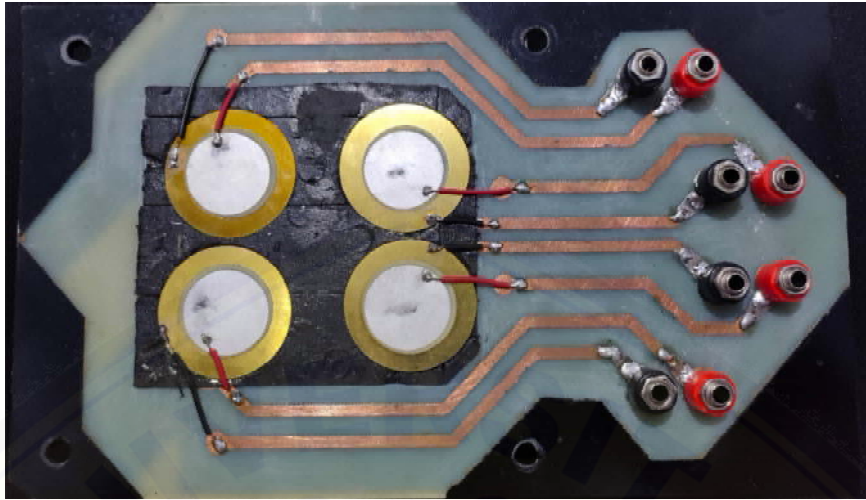
Gambar 3.5 Blok Diagram Sistem

3.6.2 Desain Dan Mekanisme Penggetar Keramik Piezoelektrik

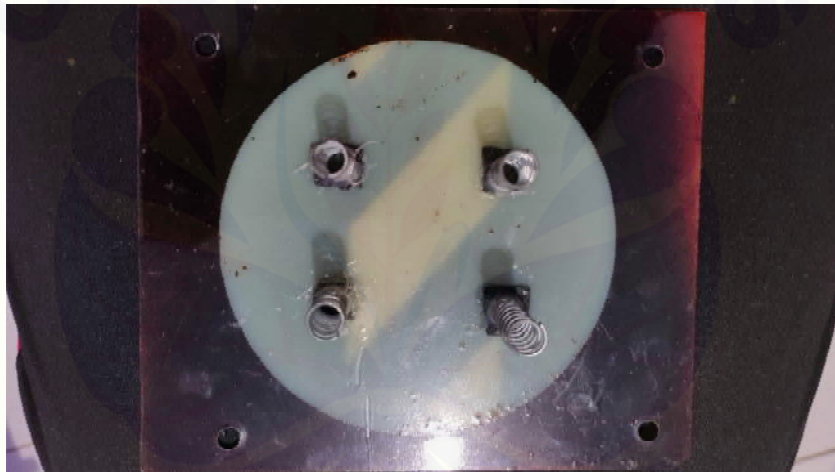
Perancangan mekanisme penggetar keramik piezoelektrik ini menggunakan empat *spring* untuk menggetarkan empat keramik piezoelektrik. Tiap *spring* nantinya akan menyentuh keramik piezoelektrik ketika diberi getaran yang berasal dari motor bakar. Motor bakar akan dipasang penyangga yang tersambung dengan mekanisme penggetar. Mekanisme penggetar hanya akan bergerak satu arah saja karena terdapat baut yang menjaga posisi mekanisme penggetar. Dibawah ini adalah desain mekanisme penggetar :



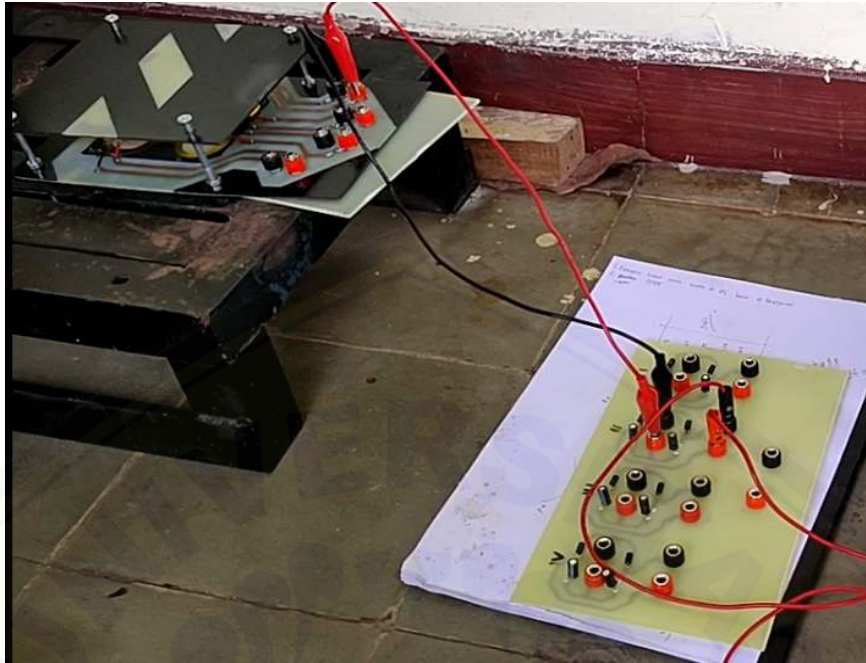
Gambar 3.6 Desain Perancangan Keseluruhan Mekanisme Penggetar



Gambar 3.8 Mekanisme Penggetar Bagian Bawah



Gambar 3.7 Mekanisme Penggetar Bagian Atas



Gambar 3.9 Hasil Perangkaian Mekanisme Penggetar dan Rangkaian FWVC-VD

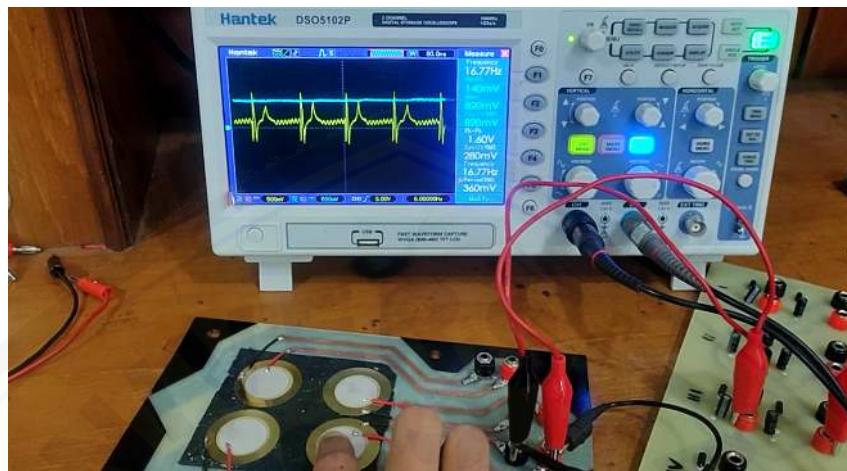
3.7 Metode Pengujian

Dalam Penelitian ini terdapat beberapa metode pengujian yang dilakukan. Dimana pengujian-pengujian tersebut meliputi pengujian sensor-sensor hingga pengujian sistem secara keseluruhan. Berikut ini adalah metode pengujian yang dilakukan pada penelitian ini.

3.7.1 Pengujian Karakteristik Tegangan *Output*

Pada pengujian karakteristik tegangan *output* ini terdiri dari dua macam pengujian yaitu pengujian karakteristik tegangan keluaran dari keramik piezoelektrik dan rangkaian FWVC-VD serta pengujian pengaruh frekuensi terhadap tegangan *output*. Pengujian menggunakan satu keramik piezoelektrik dan satu rangkaian FWVC-VD. Kemudian *Oscilloscope* juga digunakan pada pengujian ini untuk melihat grafik yang dihasilkan oleh pengujian. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik tegangan pada keramik piezoelektrik ketika diberi ketukan dan hasil yang dikeluarkan oleh rangkaian FWVC-VD serta pengujian ini

bertujuan untuk mengetahui pengaruh frekuensi yang diterima oleh keramik piezoelektrik terhadap tegangan yang dihasilkan

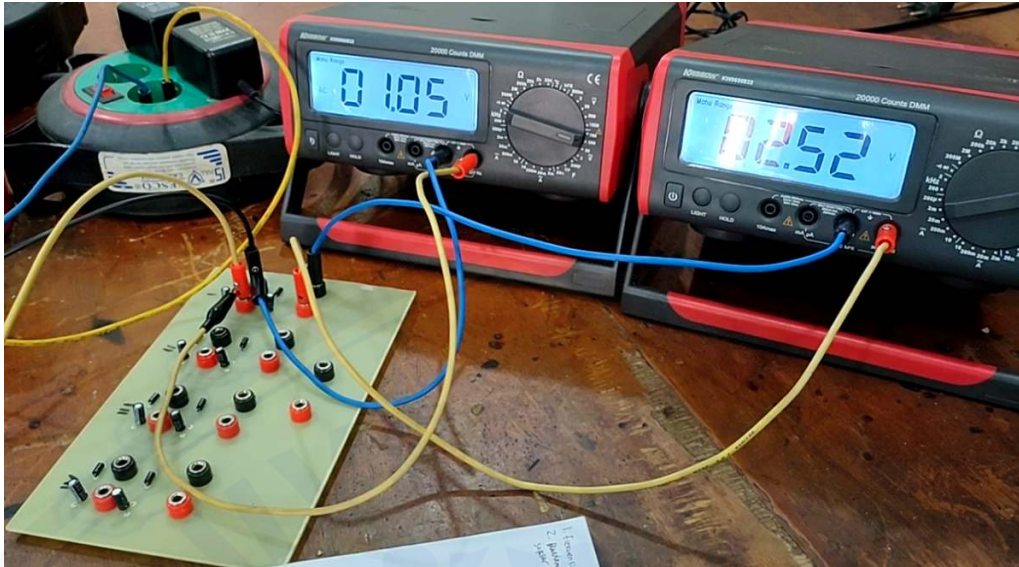


Gambar 3.10 Pengujian Karakteristik Tegangan Output

3.7.2 Pengujian Rangkaian FWVC-VD

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan masuk, tegangan keluar, tegangan keluar secara teori, serta *voltage gain* yang dihasilkan dari keempat rangkaian FWVC-VD dengan sumber *voltage regulator* (VR) dan sumber mekanisme penggetar. Pada pengujian rangkaian FWVC-VD ini terdapat dua macam pengujian yang akan dilakukan. Pengujian pertama yaitu ketika rangkaian FWVC-VD diberi tegangan *input* yang berasal dari VR. Keempat rangkaian diuji semua untuk mendapatkan nilai *voltage gain* tanpa dirangkai seri ataupun dirangkai paralel. Nilai tegangan *input* dari VR bervariasi yaitu mulai dari 1 Volt sampai 5 Volt. Kemudian untuk pengujian kedua dilakukan pada rangkaian FWVC-VD yang diberi tegangan *input* yang berasal dari satu keramik piezoelektrik yang digetarkan menggunakan mekanisme penggetar. Mekanisme penggetar akan dipasang pada motor bakar dan motor bakar akan dinyalakan selama 20 detik untuk mendapatkan data tegangan keluaran dari rangkaian FWVC-VD. Untuk mencari *voltage gain* menggunakan rumus

$$\text{voltage gain} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \dots\dots\dots(4)$$



Gambar 3.11 Pengujian Rangkaian FWVC-VD

3.7.3 Pengujian Korelasi Antara Kecepatan Putaran Motor Bakar dengan Tegangan *Output*

Pengujian ini menggunakan alat pengukur tachometer untuk mengukur kecepatan putaran motor bakar. Motor bakar akan menggetarkan satu mekanisme penggetar dan tegangan *output* akan diukur menggunakan avometer bersamaan dengan tachometer yang mengukur putaran motor bakar. Mekanisme penggetar akan menekan keramik piezoelektrik dan kemudian akan diukur nilai yang dihasilkan. Selanjutnya menghitung nilai korelasi menggunakan koefisien korelasi Pearson. Pengambilan data pengujian korelasi antara kecepatan putaran motor bakar dengan tegangan *output* ini bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat hubungan antara tegangan yang dihasilkan oleh mekanisme penggetar ketika kecepatan putaran motor bakar bervariasi. Rumus koefisien korelasi Pearson adalah:

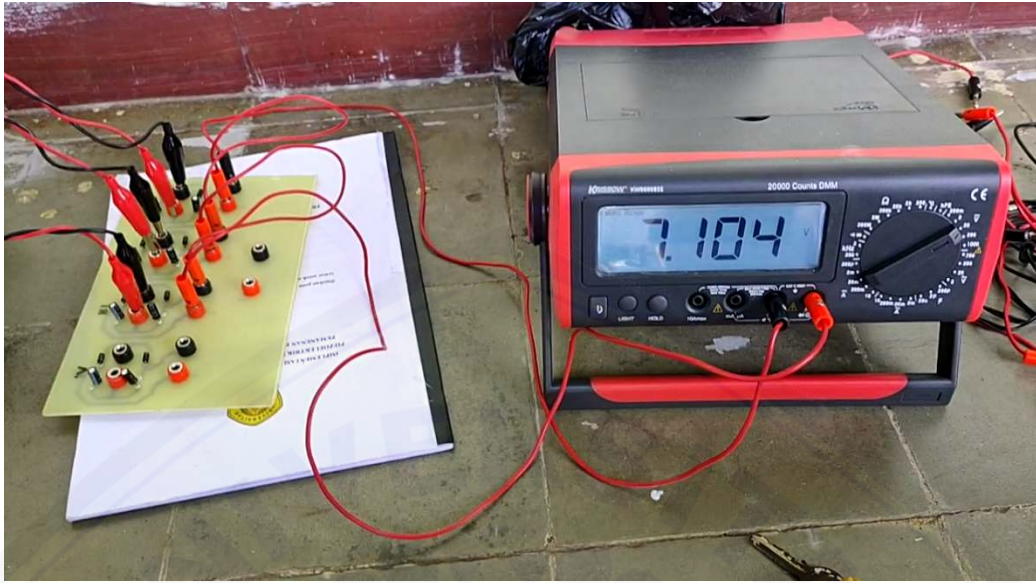
$$r = \frac{\Sigma xy - \frac{\Sigma x \Sigma y}{n}}{\sqrt{(\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n})(\Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n})}} \dots\dots\dots(5)$$



Gambar 3.12 Pengujian Korelasi Antara Kecepatan Putaran Motor Bakar dengan Tegangan Output

3.7.4 Pengujian Konfigurasi Seri Rangkaian FWVC-VD

Pengujian konfigurasi seri ini menggunakan keempat rangkaian FWVC-VD dan keempat keramik piezoelektrik. Pada pengujian ini terdapat total empat kali pengujian. Pengujian pertama menggunakan satu rangkaian FWVC-VD. Pengujian kedua menggunakan rangkaian FWVC-VD nomor satu dan dua kemudian dirangkai diseri. Pengujian selanjutnya menggunakan tiga rangkaian FWVC-VD untuk diseri. Dan pengujian yang terakhir menggunakan empat rangkaian FWVC-VD kemudian dirangkai seri. Pengambilan data pengujian konfigurasi rangkaian FWVC-VD ini bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan yang dihasilkan ketika keramik piezoelektrik yang disambung ke rangkaian FWVC-VD dirangkai secara seri. Selain itu tujuan dari pengujian konfigurasi rangkaian FWVC-VD ketika diseri ini yaitu untuk mengaplikasikan mekanisme penggetar dan membuktikan bahwa rangkaian seri FWVC-VD dapat meningkatkan tegangan yang dihasilkan oleh mekanisme penggetar.



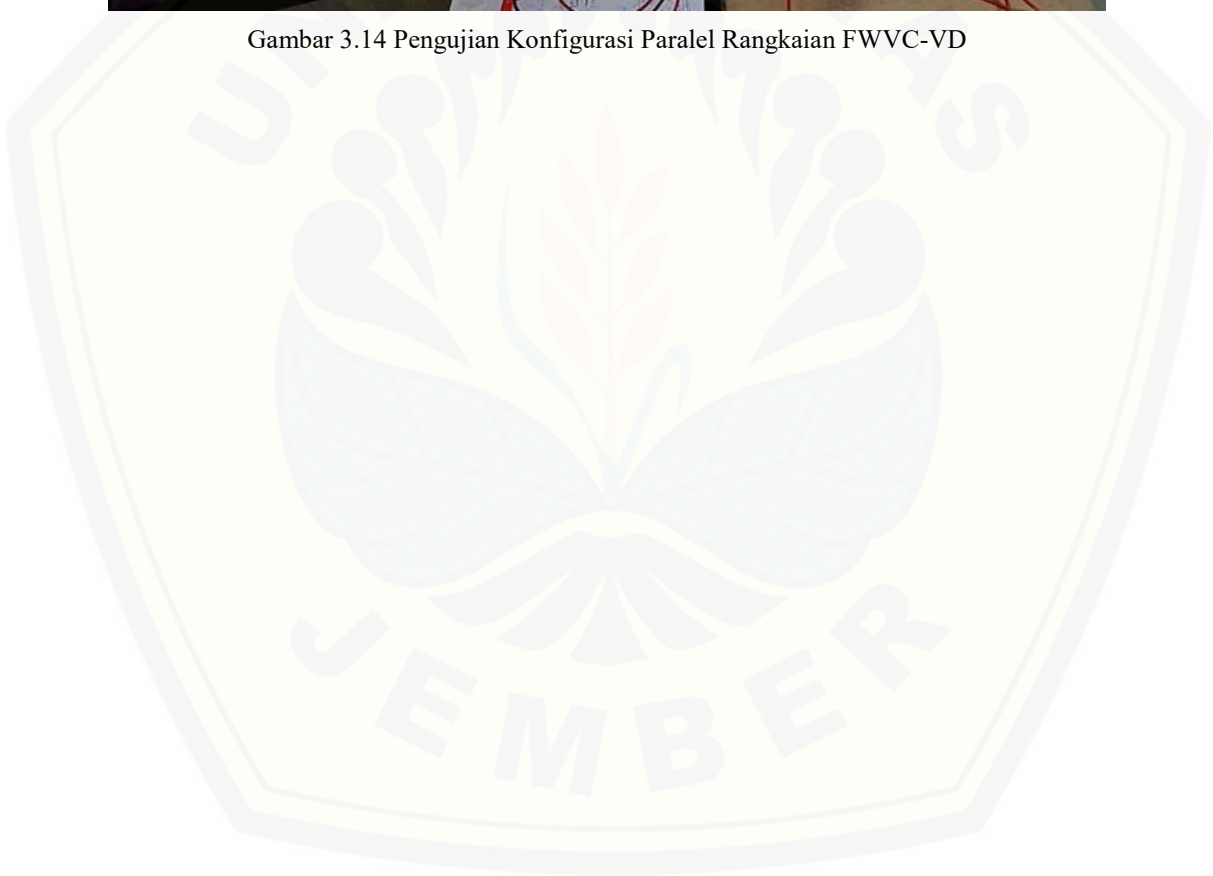
Gambar 3.13 Pengujian Konfigurasi Seri Rangkaian FWVC-VD

3.7.5 Pengujian Konfigurasi Paralel Rangkaian FWVC-VD

Pengujian rangkaian FWVC-VD dengan konfigurasi paralel ini bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan, arus serta daya yang dihasilkan ketika keramik piezoelektrik yang disambungkan ke rangkaian FWVC-VD yang dirangkai secara paralel. Selain itu tujuan dari pengujian konfigurasi rangkaian FWVC-VD ketika diparalel ini yaitu untuk mengaplikasikan mekanisme penggetar dan membuktikan bahwa rangkaian paralel FWVC-VD dapat meningkatkan daya yang dihasilkan oleh mekanisme penggetar. Pengujian terdiri dari empat pengujian menggunakan keempat rangkaian FWVC-VD yang dirangkai paralel. Pada dasarnya pengujian ini hampir sama dengan pengujian sebelumnya yaitu keempat rangkaian paralel secara bertahap. Kemudian data yang dihasilkan yaitu berupa tegangan, arus serta daya.



Gambar 3.14 Pengujian Konfigurasi Paralel Rangkaian FWVC-VD



BAB 5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis penelitian yang berjudul “Implementasi Rangkaian Voltage Doubler Piezoelektrik Keramik MURATA 7BB-35-3 Untuk Pemanenan Energi Getaran Motor Bakar” didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Pemanenan energi menggunakan keramik piezoelektrik dapat dilakukan dengan menggunakan sistem penggetar yang bersumber dari getaran motor bakar. Berdasarkan percobaan rangkaian FWVC-VD dapat diketahui bahwa mekanisme penggetar dapat menghasilkan tegangan yang berkisar antara 0,74 V sampai 0,84 V.
2. Meskipun tegangan keluaran yang dihasilkan oleh mekanisme penggetar kecil, namun pemanenan energi menggunakan sistem penggetar ini terbukti memiliki *voltage gain* yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan menggunakan VR sebagai tegangan sumber. Dimana ketika menggunakan mekanisme penggetar *voltage gain* dapat mencapai 3,70 kali. Hal ini dikarenakan pemanenan energi dengan sistem penggetar dapat menghasilkan frekuensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tegangan masukan VR
3. Berdasarkan percobaan rangkaian FWVC_VD juga dapat diketahui bahwa penggunaan rangkaian FWVC-VD dapat menghasilkan *voltage gain* sampai 2,61 kali jika menggunakan tegangan masukan VR serta *voltage gain* sampai 3,70 kali saat menggunakan tegangan masukan dengan sumber mekanisme penggetar. Sehingga perancangan dan penggunaan rangkaian FWVC-VD ini sangat mambantu untuk mengoptimalkan tegangan yang dihasilkan oleh keramik piezoelektrik.
4. Berdasarkan data pengujian konfigurasi seri rangkaian FWVC-VD, ketika rangkaian FWVC-VD dirangkai seri nilai tegangan akan naik mengikuti jumlah seri yang dirangkai. Hal ini juga dapat menjadi salah satu cara mengoptimalkan tegangan keluaran menggunakan rangkaian FWVC-VD.

5.2. Saran

Setelah melakukan penelitian ini, ada beberapa saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian yang selanjutnya. Beberapa saran tersebut antara lain sebagai berikut :

1. Jenis keramik piezoelektrik yang digunakan masih memiliki tegangan dan arus yang sangat kecil, sehingga disarankan pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan keramik piezoelektrik dengan tipe yang berbeda dan dengan material yang lebih bagus untuk mendapatkan tegangan dan arus yang lebih tinggi.
2. Kekurangan dari pemanenan menggunakan energi getaran dari motor bakar adalah getaran yang dihasilkan dari motor bakar sangat tidak stabil. Sehingga untuk penelitian selanjutnya apabila ingin menghasilkan energi getaran yang lebih stabil dapat menggunakan generator yang berukuran besar atau mesin-mesin motor yang memiliki kestabilan getaran yang bagus.
3. Sistem mekanisme penggetar pada penelitian ini masih belum dapat memanen energi dari motor bakar secara optimal. Sehingga untuk menghasilkan sistem pemanenan yang lebih baik pada penelitian selanjutnya, dapat melakukan desain ulang pada mekanisme penggetar.
4. Tegangan dan arus yang dihasilkan pada penelitian ini sangat kecil sehingga belum dapat dimanfaatkan secara langsung. Maka dari itu untuk penelitian selanjutnya diharapkan untuk dapat menambah hasil keluaran tegangan dan arus. Agar dapat dimanfaatkan secara langsung ataupun disimpan ke dalam baterai.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, N. A., Nayan, N. M., Azizan, M. M., & Ali, A. (2018). *Analysis of Voltage Multiplier Circuit Simulation for Rain Energy Harvesting Using Circular Piezoelectric*. Perlis: Mechanical System and Signal Processing.
- Demon, S. Z., Tamuri, A. R., & Bidin, N. (2010). *HIGH VOLTAGE SWITCH MODE POWER SUPPLY FOR LASER SYSTEM*. Johor: Research Gate.
- Gamayel, A. (2017). *PANEN ENERGI MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK SISTEM KANTILEVER DENGAN PENAMBAHAN BLUFF BODY*. Jakarta: Sekolah Tinggi Teknologi Jakarta.
- Kind, D., & Feser, K. (2001). *High Voltage Test Techniques*. Chennai: Newnes.
- Klinge, P., & Hynninen, A. (2001). *VIBRATION RESPONSE OF AN ELECTRIC*. Espoo: TEKES SMART/MASI technology programme.
- Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. Derby: Springer.
- Moheimani, S. O., & Fleming, A. J. (2006). *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Callaghan: springer.
- Murata Manufacturing. (2002). *Murata Catalouge*. Tokyo: Murata Manufacturing.
- Pacis, M. C., & Bersano Jr., R. (2017). A Study on Vibration Energy Harvesting in Electric Generators. *TENCON*. Iligan City: IEEE.
- PIceramic. (2016). *Piezoelectric Solutions*. Lederhose: PIceramic.
- Sharma, M. (2006). *STUDIES ON STRUCTURAL, DIELECTRIC AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF DOPED PCT CERAMICS*. Punjab: Thapar Institute Of Engineering And Technology.
- Toudeshki, A., Mariun, N., Hizam, H., & Wahab, N. I. (2014). *Development of a New Cascade Voltage-Doubler for Voltage Multiplication*. Selangor: Hindawi Publishing Corp.
- Voltage Multiplier*. (2018, Agustus 3). Retrieved from Electrical4U: <https://www.electrical4u.com/voltage-multiplier>
- Xu, X., Han, Q., & Chu, F. (2018). *Review of Electromagnetic Vibration in Electrical Machines*. Beijing: MDPI.

LAMPIRAN

Datasheet MuRata Ceramic Piezoelectric 7BB-35-3

Piezoelectric Sound Components

Piezoelectric Diaphragms

Features

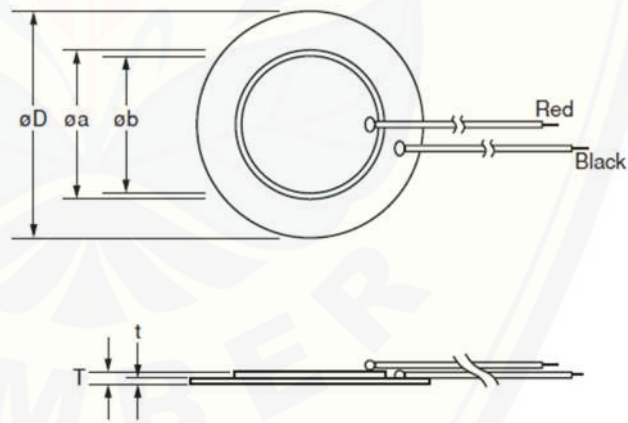
1. Clear sound
2. Ultra thin and lightweight
3. No contacts; therefore, noiseless and highly reliable
4. Low power consumption for voltage type

Applications

*Clocks/Calculators/Digital camera/Various alarms
(Burglar alarms, etc.)*



DIMENSION



<i>Plate Size dia. D (mm)</i>	<i>Element Size dia. a (mm)</i>	<i>Electrode Size dia. b (mm)</i>	<i>Thickness T (mm)</i>	<i>Plate Thickness T (mm)</i>
35,0	25,0	23,0	0,53	0,3

EXTERNAL DRIVES TYPE

<i>Part Number</i>	7BB-35-3
<i>Resonant Frequency (kHz)</i>	2.8 ± 0.5 kHz 200 max.
<i>Resonant Impedance (ohm)</i>	200 max.
<i>Capacitance (nF)</i>	$30.0 \pm 30\%$ [1kHz]
<i>Plate Size dia. D (mm)</i>	35,0
<i>Element Size dia. a (mm)</i>	25,0
<i>Electrode Size dia. b (mm)</i>	23,0
<i>Thickness T (mm)</i>	0,53
<i>Plate Thickness T (mm)</i>	0,3