

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Energi listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik saat diberi tekanan adalah sinyal impuls yang tidak dapat langsung digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik, sehingga diperlukan adanya komponen lain atau sistem yang dapat menyimpan energi yang dihasilkan piezoelektrik tersebut. Dalam upaya memperoleh kestabilan keluaran energi listrik tersebut, penelitian yang dilakukan terdahulu menggunakan berbagai macam metode serta komponen lain untuk mendapatkan keluaran energi listrik yang relatif stabil, sehingga memudahkan untuk digunakan serta dianalisis energi yang dihasilkan oleh piezoelektrik. Penelitian-penelitian tersebut diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Sebuah penelitian menggunakan material piezoelektrik jenis PZT (*lead zirconate tirtanate*) yang diimplementasikan pada lantai memanfaatkan tekanan kaki menjadi input mekanik untuk mendapatkan energi listrik dari material piezoelektrik. Piezoelektrik yang digunakan adalah tipe *disc* dengan diameter 5 cm dan diparalel sebanyak 40 buah pada sebuah bidang lantai berdimensi 30x30 cm. Sebuah dioda zener yang dipasang secara paralel dengan input untuk menjaga tegangan output tetap 5 volt meski nilai tegangan inputnya tidak konstan. Terdapat juga sebuah rangkaian *low pass* filter RC untuk memfilter frekuensi input. Sistem tersebut dapat dimonitoring nilai arus outputnya pada sebuah *display* LCD berdasarkan pembacaan sensor arus LOG112 yang kemudian data pembacaannya dikirimkan pada sebuah mikrokontroler arduino. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan arus tertinggi sebesar 938 μ A dan arus terendah sebesar 641 μ A. Sedangkan tegangan tertinggi yaitu 80 volt dengan tegangan terendah 67 volt. Arus dan tegangan yang dihasilkan piezoelektrik digunakan untuk pengisian baterai. Digunakan regulator untuk membatasi

arus dan tegangan pada pengisian baterai. Besar kecil nilai arus dan tegangan yang dihasilkan piezoelektrik berbanding lurus dengan besar gaya yang diberikan, selain itu frekuensi pijakan mempengaruhi waktu pengisian baterai (Widodo, Kirom and Qurthobi, 2017).

2. Penelitian lain pada tahun 2014, meneliti sistem pemanen energi dengan sumber vibrasi atau getaran yang terdiri dari piezoelektrik, dioda penyearah dan penyimpan energi dengan super kapasitor. Piezoelektrik yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis PZT. Dioda penyearah yang diuji berupa 3 macam dioda *schottky* yaitu dioda 1N4148, 1N5822 dan BAT85. Sedangkan untuk super kapasitor yang digunakan berkapasitas 1 Farad / 5,5V. Pengujian piezoelektrik dengan rentan frekuensi yang digunakan menunjukkan beberapa titik frekuensi yang menghasilkan konversi energi tertinggi. Titik frekuensi tersebut adalah 3kHz, 10kHz, 133kHz dan 250 kHz. Berdasarkan data pengujiannya konversi energi tertinggi terjadi pada frekuensi 133kHz dengan efisiensi sebesar 22%. Nilai resistansi output piezoelektrik terhadap frekuensi yang diberikan menunjukkan bahwa semakin tinggi frekuensi maka nilai resistansi outputnya semakin menurun. Dari pengujian dioda untuk sinyal input 2 Vpp didapatkan efisiensi dioda 1N4148 sebesar 20%, dioda BAT85 sebesar 70% dan dioda 1N5822 sebesar 80% sehingga tipe yang paling cocok sebagai penyearah pemanen energi adalah dioda *schottky* 1N5822. Super kasitor 1 F/5,5V yang digunakan berdasarkan penelitian tersebut dinyatakan cocok sebagai penyimpan energi pada sistem pemanen energi tanpa baterai khusus untuk perangkat elektronika daya. Lama waktu pengisian kapasitor tidak tergantung frekuensi sumber AC yang diberikan tetapi bergantung pada besar nilai arusnya (Susilo, Firmansyah and Litasari, 2014).
3. Dari beberapa sumber diketahui sistem sederhana memanen energi terdiri atas rangkaian penyearah dan kapasitor. Untuk mencapai performa yang lebih baik, sistem penyearah dan kapasitor tersebut dihubungkan dengan

rangkaian konverter DC-DC. Metode lainnya adalah menggunakan metode *Synchronized Switch Harvesting Inductor* (SSHI) dimana terdapat beberapa jenis metode SSHI yaitu SSHI paralel, SSHI serial dan *Synchronous Electric Charge Extraction* (SECE). Metode SSHI mengimplementasikan teknik *switching* yang berdiri sendiri berbasis transistor dan dioda penyearah serta tidak memerlukan catu daya eksternal. Dilakukan pengujian performa pemanen energi berbasis penyearah gelombang penuh, SSHI serial dengan rangkaian penyearah, konverter DC-DC dan *Integrated Circuit* (IC) LTC3588-1. Hasil pengujiannya, LTC3588-1 menunjukkan performa yang baik dibanding ketiga sistem lainnya pada jumlah penggunaan piezoelektrik yang banyak. Hal tersebut dikarenakan IC LTC3588-1 memiliki kerugian sistem yang rendah. Pada LTC3588-1 terdapat penyearah jembatan dengan efisiensi yang tinggi pada aplikasi sebagai *buck converter* yang mengoptimalkan energi yang dikumpulkan dari keluaran piezoelektrik dengan impedansi output yang tinggi (Ortiz *et al.*, 2013).

4. Penelitian dengan judul *An Optimal Rapid Energy-Storing Design for the Stackable Piezoelectric Power Generation Devices* oleh Ching-Wu Wang. Menggunakan piezoelektrik tipe PZT-5H dan baterai Ni-MH 15mAh sebagai media penyimpan daya listrik. Selain LTC3588, digunakan 2 modul lain yang dibandingkan dengan performa LTC3588 yaitu modul MAX17710 dan MAX16910. Terdapat 3 sampel material piezoelektrik yang digunakan untuk pengujian dan daya maksimum yang dihasilkan adalah 4,116mWh untuk sampel pertama kemudian 5,175mWh untuk sampel ke-2 dan 2,623mWh untuk sampel ke-3. Kemudian pengujian dilanjutkan dengan menguji sampel ke-2 menggunakan ketiga jenis modul *buck converter*. Hasil pengujian dengan LTC3588 selama 2 jam pemakaian dapat mengisi penuh baterai Ni-MH 15mAh sedangkan 2 modul lainnya memerlukan waktu 2,5 jam (Wang *et al.*, 2012).

5. Penelitian lain dengan penggunaan LTC3588-1 yaitu pada Perancangan dan Implementasi Karpet Piezoelektrik untuk Pemanenan Energi oleh Yundi Supriandani, dkk. Menggunakan piezoelektrik audio yang disusun dengan lapisan karet dan resin untuk memperkuat strukturnya agar tidak mudah rusak. Sebagai pemanen energi, digunakan LTC3588 dan sebuah kapasitor berkapasitas 100uF serta dimonitoring dengan modul *Human Machine Interface* (HMI). Piezoelektrik disusun dalam bentuk matriks berukuran 16x10 keping dan dihubung secara paralel. Dari pengujian yang dilakukan, besar tegangan kapasitor eksternal adalah 1,1 V pada uji jalan dan lompat selama 5 menit dan energi tersebut setara 60,5 μ Joule. Pada penelitian tersebut, LTC3588-1 berfungsi sebagai penyerah dan penguat arus dari piezoelektrik yang kemudian disalurkan ke kapasitor eksternal (Supriandani and Ekawati, 2015).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Energi

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

1. Energi Mekanik

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

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

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

2. Energi Potensial

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

- a. Energi Potensial Gravitasi merupakan energi yang dimiliki benda berdasarkan ketinggian benda tersebut. Dalam energi potensial gravitasi didapatkan persamaan 2.2 sebagai berikut

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

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

- b. Sedangkan Energi Potensial Pegas merupakan energi potensial yang dimiliki sebuah pegas saat ditarik oleh suatu gaya (F) sehingga bertambah panjang (x). Besar energi potensial pegas sama dengan besar usaha gaya pegas, sehingga persamaan energi potensial pegas adalah sebagai berikut:

$$E_p = 1/2 \cdot k \cdot \Delta x^2, \dots\dots\dots (2.3)$$

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

3. Energi Kinetik

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

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2, \dots\dots\dots(2.4)$$

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

4. Energi Listrik

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

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

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

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

$$W = (I.t). V,$$

$$W = V.I.t \dots\dots\dots(2.6)$$

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

$$W = I.R.I.t$$

$$W = I^2.R .t \dots\dots\dots(2.7)$$

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

Pesatnya perkembangan teknologi saat membuat penggunaan energi listrik semakin besar. Pemenuhan kebutuhan energi listrik di dunia dan Indonesia gencar dilakukan. Mulai dari pemenuhan dengan metode konvensional seperti penggunaan bahan bakar fosil sebagai energi primer pembangkit listrik namun dampaknya sangat luar biasa terhadap lingkungan. Metode konvensional sedikit demi sedikit mulai dikesampingkan. Perkembangan teknologi pembangkit energi listrik yang ramah lingkungan serta memanfaatkan energi dari alam gencar dilakukan riset serta penelitiannya. Beberapa diantara adalah panas bumi atau geothermal, *photovoltage* atau panel surya, turbin angin, gelombang laut dan masih banyak lagi.

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

Tabel 2.1. Sumber energi mekanik disekitar kita yang dapat dipanen menjadi energi listrik (Kong *et al.*, 2014)

Tubuh Manusia/Gerakan	Transportasi	Infrastruktur	Industri	Lingkungan
Menarik nafas, mengeluarkan nafas, aliran/tekanan darah, berjalan, gerakan tangan, gerakan jari, jogging, talking	Pesawat, mobil, kereta, roda, track, pedal, rem, mesin turbin, getaran, noise	Jembatan, jalanan, terowongan, kebun, struktur rumah, kendali saklar, pipa gas / air, sistem AC	Motor, kompresor, chiller, pompa, kipas, getaran, pemotong, <i>dicing</i> , noise	Angin, arus/ ombak laut, gelombang akustik

Tabel 2.2. Amplitudo akselerasi dan frekuensi getaran yang potensial sebagai berbagai sumber getaran (Kong *et al.*, 2014)

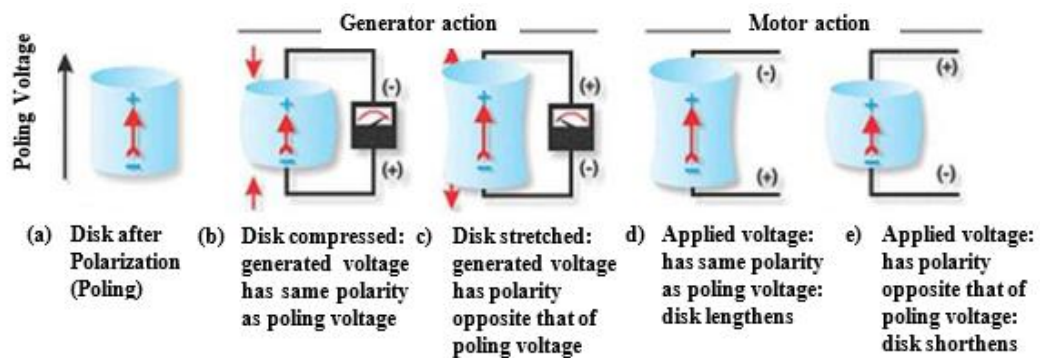
Sumber Getaran	A (m s⁻²)	F_{peak} (Hz)
Mesin Mobil	12.0	200
Dasar mesin 3-axis	10.0	70
Casing Blender	6.4	121
Pengering Pakaian	3.5	121
Orang gugup yang menghentakkan tumitnya	3.0	1
Panel Instrumen Mobil	3.0	13
Frame Pintu saat pintu ditutup	3.0	125
Oven Mikrowave kecil	2.5	121
Ventilasi HV AC di gedung perkantoran	0.2 - 1.5	60
Jendela di tepi jalan yang ramai	0.7	100
CD di komputer notebook	0.6	75
Lantai di kantor yang sibuk	0.2	100

2.2.2 Piezoelektrik

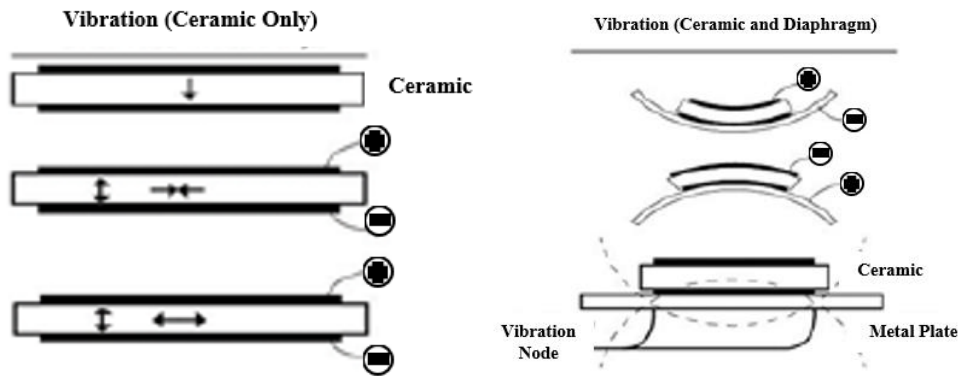


Gambar 2.1. Elemen Piezoelektrik

Piezoelektrik adalah salah satu material yang memiliki sifat unik dibanding material lain. Efek piezoelektrik ditemukan oleh Jacques dan Pierre Curie pada tahun 1880. Penemuan tersebut menunjukkan beberapa jenis kristal yang mengalami regangan mekanik menjadi terpolarisasi secara elektrik (*Direct Piezoelectric Effect*). Tingkat polarisasi sebanding dengan regangan yang diterapkan. Selain itu terdapat efek piezoelektrik terbalik (*Indirect Piezoelectric Effect*), material piezoelektrik berubah bentuk (dimensi) saat diterapkan tegangan listrik. *Direct* dan *indirect piezoelectric effect* dapat diamati pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. *Direct & Indirect Piezoelectric Effect* saat material piezoelektrik menghasilkan potensial listrik dan diberi potensial listrik (Patel, 2011).



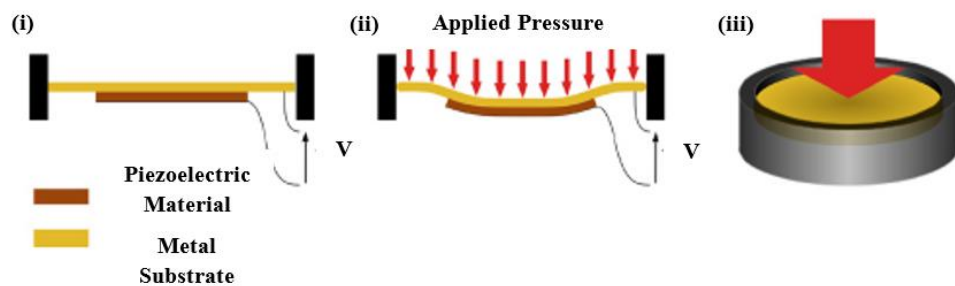
Gambar 2.3. Hubungan Beban terhadap Output Tegangan Piezoelektrik (Hidayatullah, Syukri and Syukriyadin, 2016)

Bahan piezoelektrik digunakan dalam berbagai aplikasi seperti sensor tekanan, penyimpanan data, aktuasi mekanik, gelombang ultrasonik dan pemanenan energi. Karena berbagai aplikasi ini, sejumlah besar material telah dikembangkan. Klasifikasi berikut mencakup bentuk bahan piezoelektrik yang paling banyak tersedia (Blokhina *et al.*, 2016):

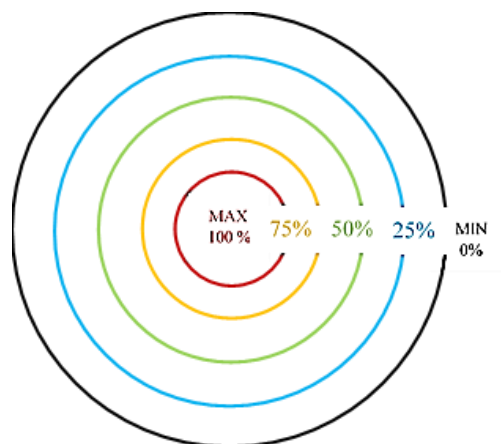
1. Kristal: Kuarsa (SiO_2), Berlinite (AlPO_4), Gallium Orthophosphate (GaPO_4), Turmalin, dll.
2. Keramik polikristalin: Barium titanat (BaTiO_3), Lead Zirconate Titanate (PZT)
3. Bahan *Thin Film Non-feroelectric*: *Sputtered zinc oxide* (ZnO), Aluminium Nitrida (AlN).
4. Bahan polimer: *Polyvinylidene fluoride* (PVDF).
5. *Screen printable thick-films* yang dapat dicetak berdasarkan bubuk *piezoceramic* dan komposit seperti *polivinilidena-trifluoroetilena*-PZT (PVDF-TrFE).
6. Kristal organik: *single-crystal diisopropylammonium chloride* (DIPAC) dan *diisopropylammonium bromide* (DIPAB).

Piezoelektrik yang digunakan pada laporan ini serta cukup banyak tersedia dipasaran Indonesia adalah jenis *Lead Zirconate Titanate* (PZT) yang berwujud kepingan logam seperti pada gambar 2.1 serta bekerja seperti pada gambar

ilustrasi 2.3. Terdapat beberapa variasi ukuran elemen yang dapat digunakan antara lain elemen yang berukuran diameter 15mm, 25 mm, 35mm hingga 50mm. Implementasi penggunaan elemen piezoelektrik tersebut nampak pada gambar 2.4. Berdasarkan penelitian Patil pada tahun 2015, piezoelektrik tersebut memiliki karakteristik energi optimal yang dihasilkan berdasarkan letak tekanan yang diterima seperti pada gambar 2.5. Daya tertinggi yang dapat dihasilkan diperoleh pada saat tekanan berada pada titik tengah elemen piezoelektrik.



Gambar 2.4. (i) Piezoelektrik saat tidak dikenai tekanan, (ii) Piezoelektrik saat menerima tekanan, (iii) Piezoelektrik nampak 3 dimensi (Deterre, Lefeuvre and Dufour-Gergam, 2012)



Gambar 2.5. Daya yang dihasilkan Piezoelektrik PZT terhadap letak tekanan yang diberikan (Patil *et al.*, 2015).

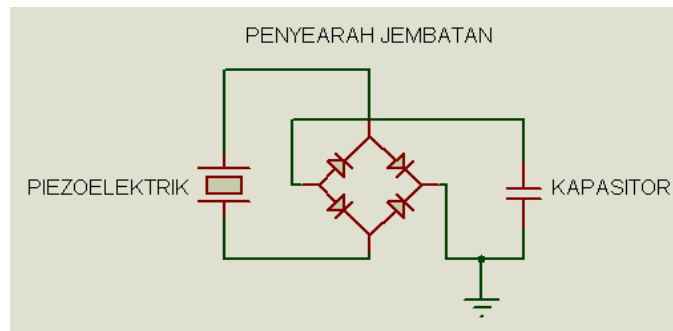
2.2.3 Sistem Pemanen Energi

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

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

1. Metode *Rectifier* dan Kapasitor

Keluaran piezoelektrik yang bersifat impuls serta adanya *direct* dan *indirect effect* pada piezoelektrik mengharuskan keluaran tersebut diubah menjadi lebih stabil agar dapat disimpan pada media penyimpanan sekunder seperti baterai atau kapasitor. Sistem penyearah yang biasanya digunakan mengubah listrik AC menjadi DC dapat juga digunakan untuk upaya menstabilkan keluaran piezoelektrik tersebut seperti pada gambar 2.6. Keluaran piezoelektrik dapat bersifat positif (+) dan negatif (-), dengan sistem penyearah maka keluaran yang dihasilkan hanya bersifat tegangan positif atau DC positif yang kemudian baru dapat disimpan atau digunakan pada rangkaian listrik DC.



Gambar 2.6. Skema Sederhana Metode Pemanen Energi Piezoelektrik dengan Penyerah Jembatan Dan Kapasitor

a. *Rectifier* atau Penyearah

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

1) ***Half Wave Rectifier***

Half Wave Rectifier atau Penyearah Setengah Gelombang secara sederhana menggunakan 1 buah dioda sebagai komponen utama dalam menyearahkan gelombang AC. Prinsip kerja dari penyearah setengah gelombang ini adalah mengambil sisi sinyal positif dari gelombang AC. Pada saat sumber memberikan output sisi positif dari gelombang AC maka dioda dalam keadaan *forward bias* sehingga sisi positif dari gelombang AC tersebut dilewatkan dan pada saat sumber memberikan sinyal sisi negatif gelombang AC maka dioda dalam posisi *reverse bias*, sehingga sinyal sisi negatif tegangan AC tersebut ditahan seperti terlihat pada gambar 2.7.

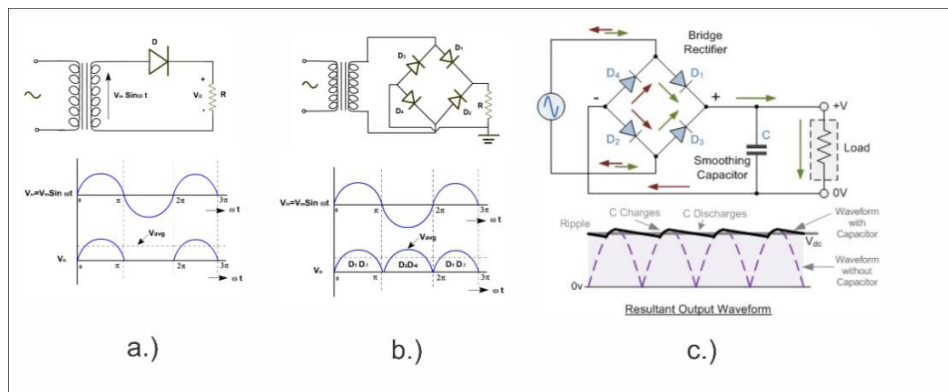
2) ***Full-Wave Rectifier***

Full-wave rectifier menggunakan 2 atau 4 dioda untuk menyearahkan gelombang AC. *Full-wave rectifier* dengan 4 dioda yang paling sering digunakan. Prinsip kerjanya dimulai pada saat output

sumber memberikan level tegangan sisi positif, maka D1, D4 pada posisi *forward bias* dan D2, D3 pada posisi *reverse bias* sehingga level tegangan sisi puncak positif tersebut akan di lewatkan melalui D1 ke D4. Kemudian pada saat output sumber memberikan level tegangan sisi puncak negatif maka D2, D4 pada posisi *forward bias* dan D1, D2 pada posisi *reverse bias* sehingga level tegangan sisi negatif tersebut dialirkan melalui D2, D4. Penjelasan lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2.7.

3) Full-Wave Rectifier dengan Kapasitor.

Pada gambar 2.7 untuk *full-wave rectifier* didapatkan *ripple* yang cukup besar. Sehingga di pasang kapasitor untuk mengurangi besar *ripple* tersebut. Hasil dari pengurangan *ripple* bergantung pada kapasitas kapasitor yang digunakan.



Gambar 2.7. a.) *Half-Wave Rectifier*, b.) *Full-Wave Rectifier*, c.) *Full-Wave Rectifier* dengan Kapasitor beserta gelombang output

b. Kapasitor

Kapasitor adalah salah satu jenis komponen elektronika yang memiliki kemampuan dapat menyimpan muatan arus listrik di dalam medan listrik selama batas waktu tertentu dengan cara mengumpulkan ketidakseimbangan internal dari muatan arus listrik tersebut. Kapasitor juga memiliki sebutan lain, yakni kondensator dan dikategorikan

sebagai komponen elektronika pasif. Fungsi dari kapasitor sendiri bermacam-macam diantaranya adalah:

- 1) Sebagai Penyimpan sebuah arus atau tegangan listrik
- 2) Sebagai konduktor yang bisa melewatkan arus AC (*Alternating Current*)
- 3) Sebagai isolator yang bisa menghambat arus DC (*Direct Current*)
- 4) Sebagai filter (penyaring) dalam rangkaian *power supply* (Catu Daya)
- 5) Sebagai pembangkit frekuensi dalam rangkaian osilator
- 6) Sebagai penggeser fasa.
- 7) Sebagai pemilih gelombang frekuensi (Kapasitor Variabel yang digabungkan dengan Spul Antena dan Osilator)
- 8) Sebagai kopling.

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

$$C = \frac{Q}{V}, \dots\dots\dots (2.8)$$

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

2. Metode Konverter DC-DC

Konverter DC-DC atau lebih dikenal sebagai DC *Chopper* biasa digunakan untuk mengkonversi energi listrik DC ke DC lain dengan nilai tertentu (menaikkan atau menurunkan) tanpa mengubah polaritasnya. DC *Chopper* memanfaatkan mekanisme *charging* dan *discharging* pada lilitan atau

induktor dengan metode *switching*. *Switch* yang digunakan adalah semikonduktor yang beroperasi pada frekuensi tinggi seperti transistor BJT dan FET. Aplikasi konverter DC-DC ini cukup luas, aplikasi diantaranya catu daya dengan *switching*, konversi tegangan dan arus dc (regulator), pengendalian motor listrik, dll.

Jenis konverter DC-DC dibagi menjadi *direct* dan *indirect*. Masing-masing terdapat beberapa macam pengaplikasian sebagai berikut:

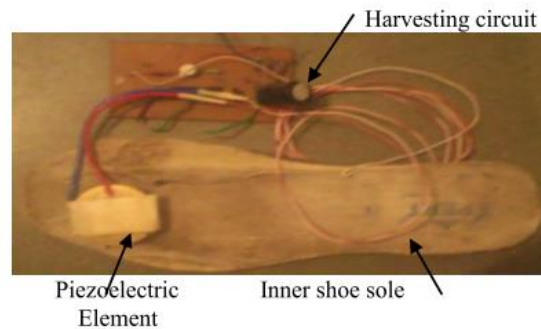
- a. Direct converters:
 - 1) Step-down (Buck)
 - 2) Step-up (Boost)
 - 3) Up-Down (Buck-Boost)
 - 4) Cuk
 - 5) SEPIC

- b. Indirect converters:
 - 1) Flyback
 - 2) Forward
 - 3) Center-tap
 - 4) Half-bridge
 - 5) Full bridge

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

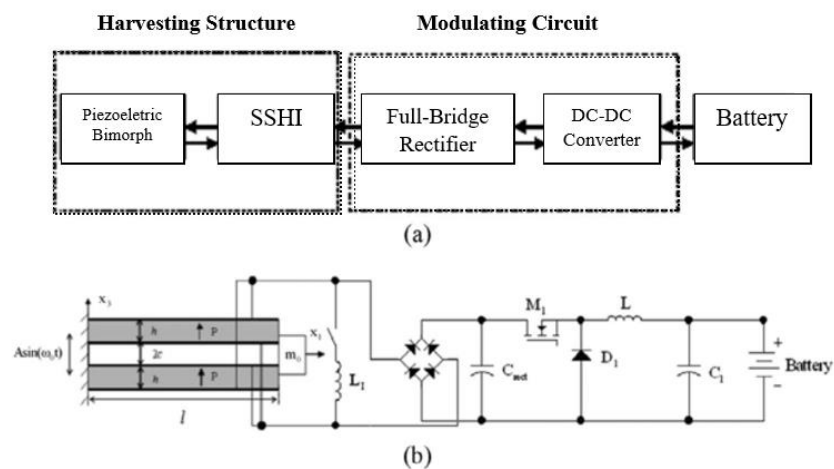
Beberapa penelitian mengenai penggunaan konverter DC-DC sebagai pemanen energi piezoelektrik juga banyak dilakukan. Diantaranya penelitian Ashish Gupta pada tahun 2015 juga meneliti sistem pemanen energi piezoelektrik yang diimplementasikan pada sol sepatu. Elemen piezoelektrik dipasang pada bagian sol sepatu yang nampak pada gambar 2.8. Penelitian tersebut memanfaatkan penyearah dan konverter DC-DC *step-up*. Penyearah yang digunakan terdiri atas 4 buah dioda *schottky* dengan jatuh tegangan yang rendah saat *forward bias*. Selain itu, DC-DC *step-up* yang digunakan adalah tipe *switching* menggunakan transistor. Sebuah induktor 100mH juga

digunakan dan dirangkai secara seri dengan rangkaian penyearah. Tegangan yang dihasilkan elemen piezoelektrik jika hanya dihubungkan dengan penyearah adalah 1,0 V. Sedangkan percobaan dengan DC-DC *step-up* yang inputnya 0,4 V dihasilkan tegangan 2,45 V dan efisiensi sistem mencapai 80% (Gupta and Sharma, 2015).



Gambar 2.8. Pemanen Energi Piezoelektrik Yang Diimplementasikan Pada Sol Sepatu (Gupta and Sharma, 2015)

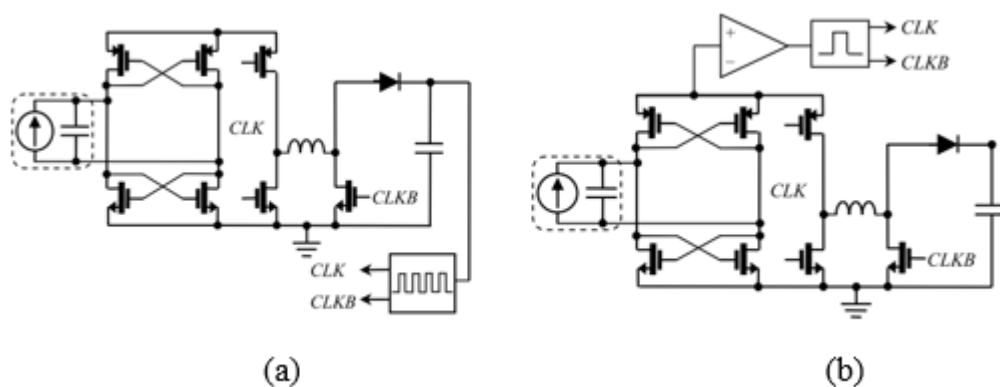
Metode menggunakan penyearah dan konverter DC-DC (DDC) juga dilakukan oleh Yuntai Hu, dkk untuk memanen energi dari piezoelektrik bimorph dan disimpan pada *electrochemical battery* (ECB) dengan skema dan blok diagram seperti pada gambar 2.9. Sebuah *synchronized switch harvesting inductor* (SSHI) diparalel dengan sistem pemanen energi untuk membalikkan tegangan melalui transfer muatan antara elektroda keluaran pada momen transisi dari sirkuit tertutup ke terbuka.



Gambar 2.9. (a) Komponen Primer Pemanen Energi. (b) Skematik Pemanen Energi (Yuntai Hu *et al.*, 2008)

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

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

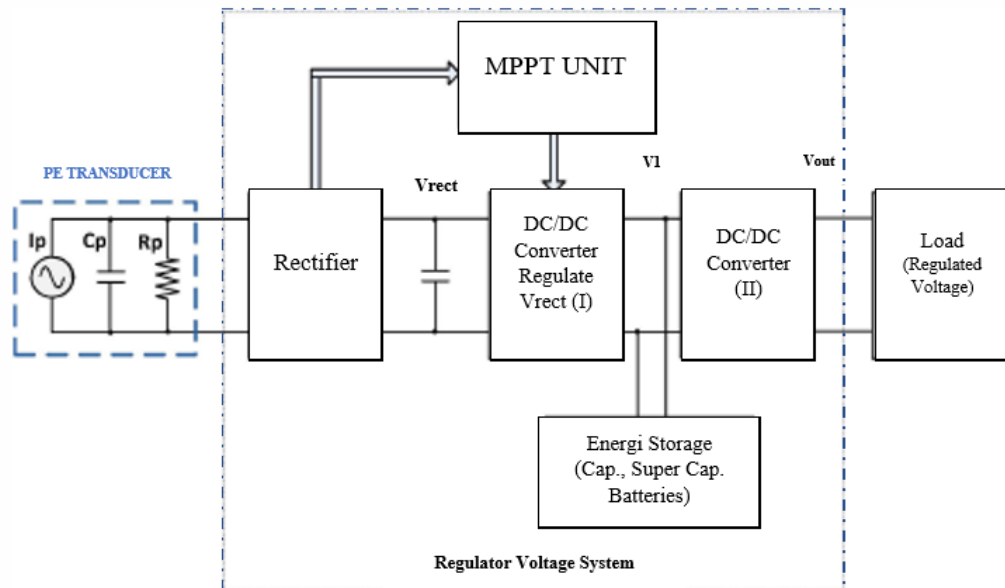


Gambar 2.10. (a) Rangkaian Modifikasi *Buck Boost* Sebagai Pemanen Energi Linear. (b) Rangkaian Modifikasi *Buck Boost* Sebagai Pemanen Energi Non-Linear (Darmayuda *et al.*, 2013).

Modifikasi linear menambahkan kontroler sederhana yaitu sebuah cincin osilator dengan frekuensi dan *duty cycle* yang tetap seperti nampak pada gambar 2.10a. Pada sistem linear tidak membutuhkan catu daya eksternal serta tidak dapat bekerja jika kedua *clock* yaitu CLK dan CLKB mendapat sinyal 0 (nol) bersamaan. Sedangkan pada modifikasi non-linear ditambahkan sensor tegangan untuk mendeteksi tegangan puncak setelah output transduser melewati penyearah dan *adjustable pulse generator* sebagai pengatur durasi pemanenan energi dengan skema seperti pada gambar 2.10b. Modifikasi sistem non-linear mampu menghasilkan output energi lebih besar dibanding sistem linear. Namun, sistem modifikasi non-linear tidak absolut digunakan pada kondisi output yang dihasilkan terlalu kecil serta keadaan tidak ada atau tidak diperlukannya catu daya eksternal sistem (Darmayuda *et al.*, 2013).

3. Metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

MPPT atau *Maximum Power Point Tracking* adalah algoritma yang termasuk dalam sistem pengendali. MPPT umumnya digunakan untuk mengekstraksi daya maksimum pada sistem panel surya. Daya maksimum yang dihasilkan panel surya bervariasi dengan radiasi matahari, suhu lingkungan dan suhu sel surya. Prinsip utama MPPT adalah mengekstrak daya maksimum yang tersedia dari modul panel surya dengan membuatnya beroperasi pada tegangan paling efisien (*power point maksimum*). MPPT memeriksa output modul panel surya dan membandingkannya dengan tegangan baterai kemudian memperbaikinya untuk mencapai titik daya terbaik modul panel surya untuk mengisi baterai dan mengubahnya menjadi tegangan optimum untuk mendapatkan arus maksimum ke baterai. Hal ini juga dapat memasok daya ke beban DC yang terhubung langsung ke baterai. Salah satu penelitian mengenai MPPT membahas tentang penerapan metode ini pada pemanenan energi piezoelektrik seperti nampak pada gambar 2.9.



Gambar 2.11. Penerapan Metode MPPT pada Sistem Pemanen Energi Piezoelektrik (Do, Han and Lee, 2014)

Penelitian Xuan-Dien Do, dkk pada tahun 2014 menggunakan sebuah penyearah jembatan (*full-bridge rectifier*) yang digabungkan dengan unit MPPT seperti nampak pada gambar 2.11. Unit MPPT yang digunakan adalah MCU-TI ez430-RF2500, bertujuan untuk mendapatkan daya output yang lebih besar dengan mengendalikan konverter DC-DC yang diseri dengan penyearah jembatan sebelumnya. Unit MPPT tersebut digunakan untuk mendeteksi titik keluaran maksimum dan mengendalikan penyearah untuk tetap bekerja pada titik maksimum tersebut. Selain itu, MPPT tersebut juga digunakan untuk pengaturan *duty cycle* konverter DC-DC. MPPT membantu transduser mencapai titik output tertinggi dengan efisiensi lebih dari 80%. Sedangkan untuk sistem piezoelektrik, metode ini sederhana dan efisiensinya mencapai 64% (Do, Han and Lee, 2014).

4. Metode *Integrated Circuit* (IC) – LTC3588

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

a) LTC3588-1

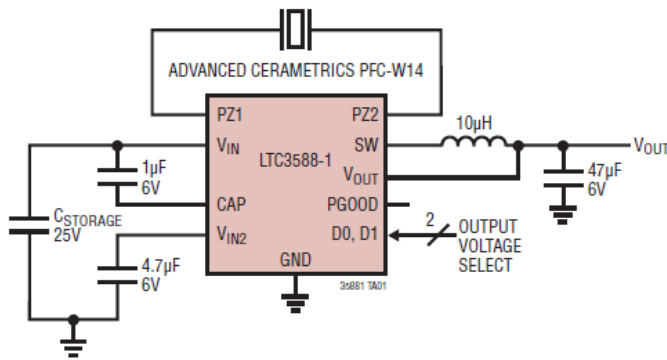


Gambar 2.12. LTC3588-1 *Energy Harvester Module*

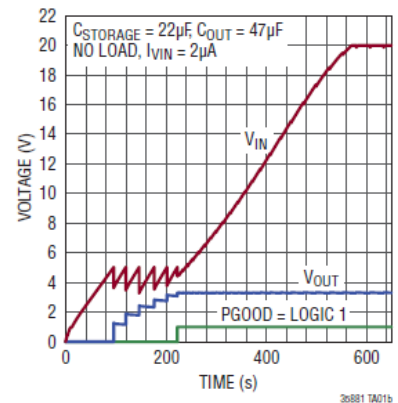
LTC3588-1 mengintegrasikan jembatan penyearah gelombang penyearah dengan resolusi rendah dengan konverter buck efisiensi tinggi untuk menghasilkan pemanenan energi untuk sumber energi impedansi keluaran tinggi seperti transduser piezoelektrik. Mode *ultralow quiescent current undervoltage lockout* (UVLO) terdapat celah histeresis yang lebar memungkinkan muatan menumpuk pada kapasitor input sampai konverter buck secara efisien mentransfer sebagian muatan yang tersimpan ke output.

LTC3588-1 memasuki keadaan *sleep* dimana arus input dan output minimal. Konverter buck menyala dan mati sesuai kebutuhan untuk menjaga regulasi. Empat tegangan keluaran yaitu 1.8V, 2.5V, 3.3V dan 3.6V (*selectable*) serta arus keluaran kontinyu mencapai hingga 100mA; Namun, kapasitor output mungkin berukuran untuk melayani ledakan arus keluaran yang lebih tinggi. *Shunt* pelindung masukan yang dipasang pada 20V memungkinkan energi lebih besar.

100mA Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-1 3.3V Regulator Start-Up Profile



Gambar 2.13. Skematik rangkaian LTC3588-1 dan Grafik karakteristik Input-Output rangkaian (Datasheet).

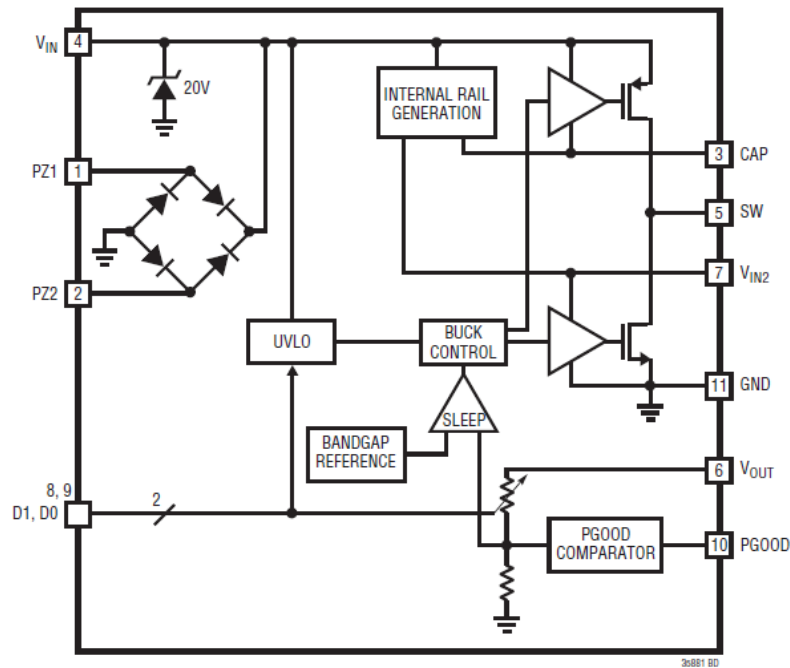
FEATURES

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



Gambar 2.14. LTC3588-1 beserta fiturnya (Datasheet)

Seperti yang telah dijelaskan diatas bahwa LTC3588 juga dikategorikan *buck converter*. Rangkaian equivalen dari IC LTC3588 dapat diamati pada gambar 2.15. Tiap pin kaki memiliki fungsi masing-masing dan dapat diamati pada tabel 2.3.



Gambar 2.15. Blok Diagram Rangkaian Equivalen dari LTC3588 (Datasheet).

Tabel 2.3. Fungsi Masing-masing Pin pada LTC3588

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

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

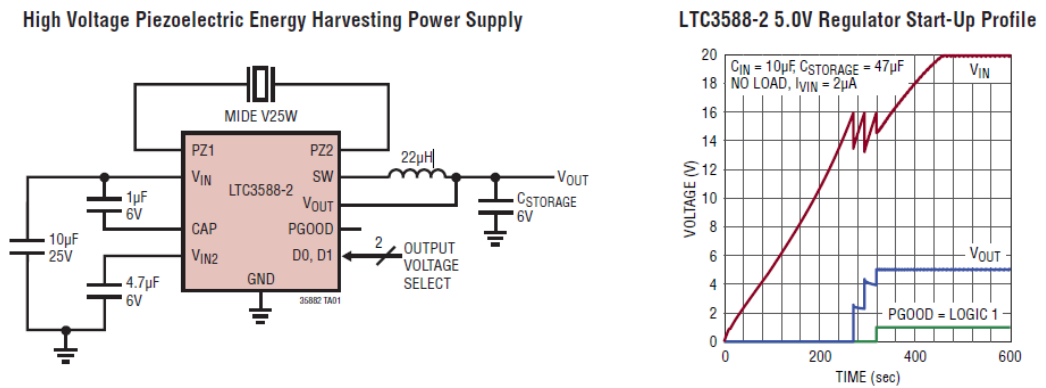
Sedangkan pengaturan tegangan output atau pemilihan mode output dapat dilakukan dengan mengubah logika D0 dan D1 dengan menghubungkannya ke VIN2 untuk mendapat logika 1 (HIGH) atau GND untuk mendapat logika 0 (LOW). Adapun mode keluaran tersebut dapat diamati pada tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4. Mode Output LTC3588-1

D1	D0	Vout	Vout Quiescent Current (Ivout)
0	0	1.8V	44nA
0	1	2.5V	64nA
1	0	3.3V	81nA
1	1	3.6V	89nA

b) LTC3588-2

LTC3588-2 adalah versi lanjutan dari LTC3588-1. Sehingga sistem kerjanya tidak jauh berbeda dengan LTC3588-1 begitupun skematiknya yang dapat diamati pada gambar 2.16. Sama seperti LTC3588-1, terdapat juga mode *ultralow quiescent current undervoltage lockout* (UVLO) dengan tegangan 16 V. Terdapat empat tegangan keluaran yang dapat diatur yaitu 3.45, 4.1V, 4.5V dan 5.0V (*selectable*) serta arus keluaran kontinyu mencapai hingga 100mA. Hal tersebut yang membedakan LTC3588-2 dengan vesri sebelumnya, output tegangan dan arus yang dihasilkan cocok untuk baterai Li-Ion dan Li-Fe serta sama baiknya dengan penggunaan super-kapasitor.



Gambar 2.16. Skematik rangkaian LTC3588-2 dan Grafik karakteristik Input-Output rangkaian (Datasheet).

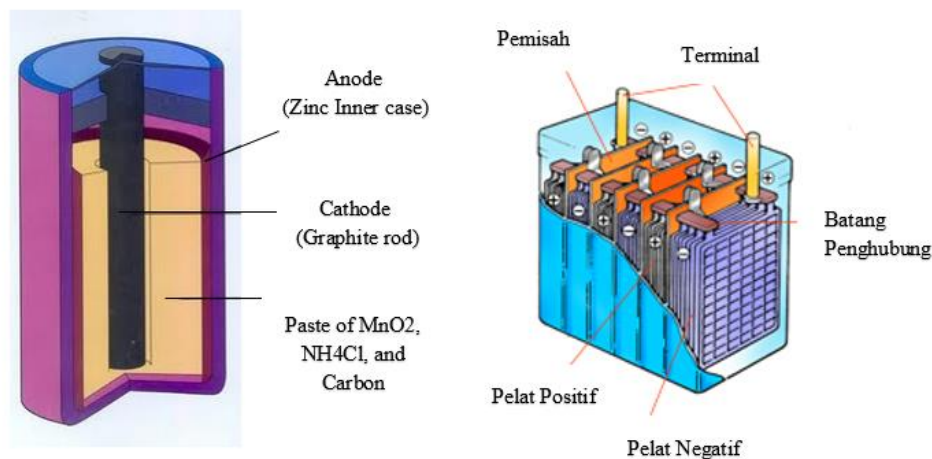
Jumlah pin kaki, konfigurasi pin kaki dan rangkaian ekuivalen yang dimiliki LTC3588-2 sama seperti LTC3588-1. Begitupun untuk pengaturan tegangan output atau pemilihan mode output dapat dilakukan dengan mengubah logika D0 dan D1 dengan menghubungkannya ke VIN2 untuk mendapat logika 1 (HIGH) atau GND

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

Tabel 2.5. Mode Output LTC3588-2

D1	D0	Vout	Vout Quiescent Current (Ivout)
0	0	3.45V	86nA
0	1	4.1V	101nA
1	0	4.5V	111nA
1	1	5.0V	125nA

2.2.4 Baterai



Gambar 2.17. Baterai Ni-Cd dan Baterai *Lead Acid*

Baterai (*Battery*) adalah sebuah alat atau media penyimpanan energi listrik sekunder seperti halnya kapasitor. Namun, baterai mengubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi listrik. Umumnya, setiap Baterai terdiri dari Terminal Positif (Katoda) dan Terminal Negatif (Anoda) serta Elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar. Output Arus Listrik dari Baterai adalah Arus DC (*Direct Current*). Baterai terdiri dari 2 Jenis yakni Baterai Primer yang hanya dapat sekali pakai (*single use battery*) dan Baterai Sekunder yang dapat diisi ulang (*rechargeable battery*).

Jenis baterai primer saat ini masih digunakan namun penggunaannya tidak sepopuler jenis baterai *rechargeable* karena menimbulkan limbah setelah

selesai digunakan. Beberapa macam baterai yang tergolong baterai primer adalah sebagai berikut:

1. Baterai *Zinc-Carbon* (Seng-Karbon)

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

2. Baterai Alkaline (Alkali)

Baterai Alkaline ini memiliki daya tahan yang lebih lama dengan harga yang lebih mahal dibanding dengan Baterai *Zinc-Carbon*. Elektrolit yang digunakannya adalah *Potassium hydroxide* yang merupakan Zat Alkali (Alkaline) sehingga namanya juga disebut dengan Baterai Alkaline.

3. Baterai *Lithium*

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

4. Baterai *Silver Oxide*

Baterai *Silver Oxide* merupakan jenis baterai yang tergolong mahal dalam harganya. Hal ini dikarenakan tingginya harga Perak (*Silver*). Baterai *Silver Oxide* dapat dibuat untuk menghasilkan Energi yang tinggi tetapi dengan bentuk yang relatif kecil dan ringan. Baterai jenis *Silver Oxide* ini sering dibuat

dalam bentuk Baterai Koin (*Coin Battery*). Baterai jenis Silver Oxide ini sering dipergunakan pada Jam Tangan, Kalkulator maupun aplikasi militer.

Macam- Macam Baterai Primer



Gambar 2.18. Jenis-Jenis Baterai Primer

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

1. *Lead Acid* (Asam Timbal)



Gambar 2.19. Baterai *Lead Acid* atau Aki

Baterai ini biasa dikenal dengan nama baterai aki (*accumulator*). Biasa digunakan untuk sistem kelistrikan kendaraan bermotor. Memiliki kapasitas baterai yang cukup besar tergantung pada penggunaannya. Level tegangannya pun bervariasi antara 12V hingga 24V bahkan ada yang berukuran kecil dengan

tegangan 4V hingga 6V. Namun secara struktur memiliki kesamaan yaitu terdapat 2 plat elektroda dengan elektroda positif terbuat dari logam timbal (Pb) dan elektroda negatif terbuat dari logam timbal oksida (PbO₂) dan terdapat larutan elektrolit H₂SO₄.

2. *Nickle Cadmium (Ni-Cd)*



Gambar 2.20. Baterai Ni-Cd

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

3. *Nickel Metal Hydride (Ni-MH)*



Gambar 2.21. Baterai Ni-MH

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

4. *Lithium Ion (Li-ion)*



Gambar 2.22. Baterai Li-Ion

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

Walaupun memiliki banyak kelebihan, baterai jenis ini tetap memiliki kelemahan seperti sensitif terhadap suhu tinggi sehingga umur baterai cepat

berkurang. Membiarkan baterai ini hingga habis juga akan mengurangi kapasitasnya. Bahaya lain dari Li-Ion adalah rawan meledak jika kemasan pada baterai rusak.

5. *Lithium Ion Polymer (Li-Po)*



Gambar 2.23. Baterai Li-Po

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

6. *Lithium Iron Phosphate (Li-Fe)*



Gambar 2.24. Baterai Li-Fe

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