

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Setelah penulis mencari beberapa referensi yang telah di publikasikan sebelumnya, penulis menemukan beberapa referensi yang di nilai memiliki kemiripan dengan judul Tugas Akhir ini yaitu sebagai berikut:

1. Skripsi dengan berjudul “Pasteurisasi Non – *Thermal* Pada Susu Sapi Segar Untuk Inaktivasi Bakteri *Staphylococcus Aureus* Berbasis *Pulsed Electric Field* (PEF)”[6] yang disusun oleh Choirul Muslim dari Jurusan Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh dari variasi pemberian tegangan (20 – 80 kV) dengan waktu perlakuan yang konstan terhadap kematian bakteri/mikroba serta pengaruhnya terhadap perubahan sifat kimia, sifat fisik dan kandungan nutrisi pada susu. Pada perancangannya menggunakan rangkaian *flyback converter*, transformator tegangan tinggi dan ruang perlakuan. Pengujian menunjukkan bahwa pada saat tegangan 20 kV menghasilkan jumlah reduksi mikroba terendah, mencapai 27,7% dari $1,157 \times 10^3$ cfu/ml, sedangkan pada tegangan 80 kV menghasilkan reduksi terbesar, mencapai 75,2% dari $3,97 \times 10^2$ cfu/ml.
2. Skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Alat Pasteurisasi Non-*Thermal* Dengan *Pulsed Electric Field* (PEF)”[3] yang disusun oleh Ika Novia Anggraini dari jurusan Teknik elektro, Universitas Bengkulu. Tujuan dari pembuatan alat ini dilakukan untuk mengalirkan susu di antara dua elektroda yang telah diberi tegangan DC tinggi. Sebagai sumber pembangkit tegangan tinggi, digunakan transformator *flyback* dengan tegangan keluaran hingga 30 kV. Setelah susu diberi perlakuan pasteurisasi dengan *Pulsed Electric Field* (PEF) didapatkan hasil bahwa mikroorganisme pada susu berhasil di inaktivasi dengan persentase penurunan mikroba hingga 94,5% memenuhi standar mutu SNI 19 1502-1989 untuk susu pasteurisasi dan hasil menunjukkan bahwa pada susu yang telah

dipasteurisasi dengan teknologi plasma tidak terjadi perubahan warna, rasa, dan bau.

3. Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi *Impuls* Untuk Mengurangi Jumlah Bakteri Pada Cairan Susu Perah”[5] yang disusun oleh Irpan Logitra Purba dari jurusan Teknik elektro Universitas Diponegoro. Tujuan dari perancangan alat ini digunakan sebagai alternatif untuk proses pasteurisasi yang melibatkan makanan cair, seperti susu dan produk susu yang lain (*yogurt*). Alat ini dapat menghasilkan tegangan tinggi dari 3 kV hingga 7 kV dengan variasi frekuensi 4 kHz dan 7 kHz dengan menggunakan *cuk-converter* dan *flyback converter* yang di mana keluaran tegangan tinggi dihubungkan pada dua elektroda yang saling berhadapan. Dari hasil pengujian dapat diketahui setelah diberi perlakuan pulsa medan listrik pada tegangan 3,76 kV, jumlah bakteri 9×10^5 dan 2×10^5 cfu/ml. Pada tegangan 4 kV, jumlah bakteri $7,3 \times 10^5$ dan 10×10^5 cfu/ml. Pada tegangan 5,2 kV, jumlah bakteri $6,1 \times 10^5$ dan $2,3 \times 10^5$ cfu/ml. Pada tegangan 6 kV jumlah bakteri 35×10^5 dan $4,2 \times 10^5$ cfu/ml. Dan pada tegangan tertinggi 7,4 kV, jumlah bakteri 23×10^5 dan 38×10^5 cfu/ml.

2.2 Landasan Teori

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai dasar – dasar teori yang mempunyai keterkaitan dengan Tugas Akhir yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Pembangkit Tegangan Tinggi Untuk Pasteurisasi Susu Dengan Metode *Pulsed Electric Field* (PEF)”. Penjelasan ini diberikan sebagai bahan literatur dalam pemahaman untuk melakukan perancangan terhadap pembuatan suatu alat.

2.2.1 Pasteurisasi Susu

Dikutip dari laman *website* Aladokter.com, pasteurisasi susu merupakan tahap proses untuk menghilangkan atau membunuh mikroorganisme yang dapat menyebabkan penyakit bagi konsumen dengan cara dipanaskan dengan suhu tertentu, sehingga masa simpan susu pasteurisasi ini juga relatif lebih lama. Selain memperpanjang masa simpan susu, pasteurisasi juga menjaga kualitas susu dan mencegah pertumbuhan bakteri berbahaya, seperti *Salmonella* atau *E. coli* [7].

Sedangkan berdasarkan Badan Standar Nasional, susu pasteurisasi didefinisikan sebagai susu segar, susu yang dilarutkan kembali, atau susu rekombinasi yang telah dipanaskan pada temperatur 63°C hingga 66°C selama minimal 30 menit atau hingga 72°C selama minimal 15 detik. Kemudian susu tersebut segera didinginkan hingga 10°C, diolah secara aseptik, dan disimpan pada suhu maksimum 4,4°C untuk mencegah pertumbuhan bakteri yang tersisa[8]. Susu pasteurisasi terbagi menjadi 2 mutu yaitu susu pasteurisasi tanpa penyedap citra rasa dan susu pasteurisasi yang diberi penyedap citra rasa dengan syarat mutu sesuai SNI 01-3951-1995 yaitu sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Syarat mutu pasteurisasi susu sesuai SNI 01-3951-1995

Karakteristik	Syarat	
	Tanpa Citra Rasa	Dengan Citra Rasa
- Bau	Khas	Khas
- Rasa	Khas	Khas
- T.P.C. (<i>Total Plate Count</i>), cfu/ml, maks.	3×10^4	3×10^4

Berdasarkan tabel 2.1 di atas dapat dijadikan sebagai pedoman atau pembanding hasil jumlah bakteri yang terdapat pada susu setelah melalui tahap proses pasteurisasi dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF).

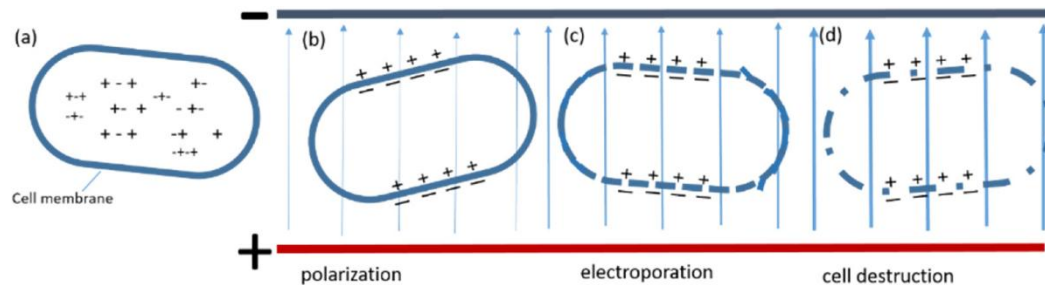
2.2.2 Metode *Pulsed Electric Field* (PEF)

Pulsed Electric Field (PEF) atau medan listrik berdenyut merupakan salah satu metode sterilisasi dalam pengolahan yang tidak melibatkan proses pemanasan (*non-thermal*), melainkan memanfaatkan medan listrik dengan tegangan tinggi. Tegangan yang di berikan pada makanan bertugas untuk menginaktivasi mikroba dan enzim dengan meminimalisir kerusakan karakteristik seperti kandungan nutrisi pada makanan. Penerapan teknologi ini efektif dalam mempertahankan kualitas sensoris dan fisik makanan, serta mengurangi perubahan yang mungkin terjadi. Secara umum, pengolahan dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) mulai berkembang di bidang pangan karena memiliki kelebihan dibanding dengan pasteurisasi atau sterilisasi pada umumnya yang memanfaatkan ruang panas dengan suhu tinggi (*thermal*). Salah satu keunggulan teknologi *Pulsed Electric Field* (PEF) adalah kemampuannya untuk menonaktifkan mikroorganisme dan enzim hanya dalam waktu singkat. Selain itu, metode ini mampu mengurangi dampak kerusakan akibat panas, sehingga karakteristik asli produk pangan seperti aroma, warna, suhu, dan nilai gizinya tetap terjaga dengan baik.

Dalam perlakuan *Pulsed Electric Field* (PEF) bisa dikatakan sebagai peristiwa kejutan listrik. Intensitas kejutan listrik dipengaruhi oleh pengaturan pulsa serta besarnya tegangan tinggi yang diaplikasikan pada ruang perlakuan (*treatment chamber*), sementara jumlah pulsa ditentukan oleh durasi proses pengolahan. Untuk mencapai efektivitas dalam menonaktifkan mikroorganisme, perlu dilakukan penyesuaian terhadap besar kecilnya tegangan tinggi yang diberikan ke dalam ruang perlakuan (*treatment chamber*), disertai dengan pengaturan karakteristik pulsa yang digunakan.

Parameter terpenting dalam pasteurisasi dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) adalah proses pembentukan kuat medan listrik, lebar pulsa dan desain ruang perlakuan (*treatment chamber*) dengan perkiraan pemberian lebar pulsa pendek selama kurang lebih 1 μ s hingga 100 μ s dengan tegangan tinggi antara 20-80 kV/cm yang dikenakan pada bahan pangan yang ditempatkan di antara dua elektroda atau lebih. Dari medan listrik berpulsa inilah yang menginaktivasi mikroba karena dalam proses ini terjadi aktivitas metabolisme yang tidak normal kembali atau

peningkatan metabolisme sel tubuh yang sangat tajam yang membuatnya terganggu dalam hal kinerja dan fisiologis sel seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini [9] :



Gambar 2. 1 Alur metode *Pulsed Electric Field* (PEF)

(Sumber: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/5/736>)

Berdasarkan gambar di atas metode *Pulsed Electric Field* (PEF) mengakibatkan terjadinya elektroporasi di mana permeabilitas membran sel meningkat seiring dengan pemberian medan listrik terhadap sel. Efek akhir pada dinding membran sel sangat spesifik, oleh karena itu, bergantung pada kekuatan medan listrik dan intensitas perlakuan yang membuat peristiwa elektroporasi membran bersifat *reversibel* atau *ireversibel*. Fenomena ini dikatakan *reversibel* jika peningkatan permeabilitas bersifat sementara, dan dinding kembali ke kondisi awal setelah penghentian paparan medan listrik dan dapat berkembang melalui fase pembentukan pori, ekspansi, dan penutupan kembali. Sedangkan kerusakan bersifat *ireversibel* jika sel mati karena paparan medan listrik yang berkepanjangan dan tinggi [10].

2.2.1.1 Prinsip *Pulsed Electric Field* (PEF)

Perlakuan *Pulsed Electric Field* (PEF) memiliki prinsip seperti halnya konsep medan listrik yang diperkenalkan oleh *Faraday* bahwa gaya medan listrik yang bekerja di antara dua muatan, ketika muatan positif (q) yang terletak dititik tertentu dalam medan listrik dihasilkan dalam celah perlakuan (Er), dalam kondisi tersebut akan mengalami gaya (F) yang diidentifikasi oleh vektor posisi (r), maka medan listrik per satuan muatan dapat didefinisikan pada persamaan di bawah ini:

$$Er = \frac{Fqr}{q} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} Er &= \text{Celah perlakuan (cm)} & r &= \text{Vektor posisi} \\ F &= \text{Gaya (N)} & q &= \text{Muatan positif (C)} \end{aligned}$$

Ketika terdapat perbedaan potensial listrik (V) antara tegangan yang terdapat di antara dua titik yang terpisahkan oleh bahan isolator akan menimbulkan kuat medan listrik di antara kedua titik yang terpisahkan tersebut, dengan intensitas listrik (E) yang berbanding lurus dengan besarnya beda potensial (V) dan berbanding terbalik dengan jarak (d) antar titik kedua titik yang bertegangan itu, sehingga dapat ditentukan persamaan untuk menentukan kuat medan listrik sebagai berikut [11]:

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.2)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} E &= \text{Kuat medan listrik (V/cm)} \\ V &= \text{Tegangan (V)} \\ d &= \text{Jarak antar titik (cm)} \end{aligned}$$

2.2.1.2 Faktor – Faktor Yang Mempengaruhi Hasil *Pulsed Electric Field* (PEF)

Untuk menerapkan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) pada proses pasteurisasi khususnya pada susu, perlu ditinjau untuk tingkat keefektifannya terhadap mikroorganisme pada makanan. Faktor – faktor yang memengaruhi dalam efektivitas *Pulsed Electric Field* (PEF) terikat pada jenis peralatan, parameter pemrosesan, mikroorganisme target dan jenis serta kondisi media yang digunakan seperti penjelasan di bawah ini:

1. Faktor Teknologi

Faktor teknologi dalam proses pasteurisasi susu dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) yang mempengaruhi inaktivasi mikroba yaitu berupa kekuatan medan listrik, waktu pemrosesan/perlakuan, jumlah pulsa, bentuk gelombang pulsa, suhu terhadap media perlakuan dan karakteristik substrat

perlakuan. Inaktivasi mikroba ini meningkat seiring dengan meningkatnya besar intensitas kekuatan medan listrik, selain itu intensitas medan listrik harus didistribusikan secara merata di dalam ruang perlakuan (*threatment chamber*).

Salah satu faktor kunci yang membedakan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) dari metode inaktivasi mikroba lainnya adalah proses ini dilakukan secara berdenyut dengan pulsa bergelombang impuls. Pulsa pada gelombang ini jumlah dan lebar pulsanya akan mempengaruhi waktu dalam medan listrik yang diterapkan, di mana waktu pada perlakuan *Pulsed Electric Field* (PEF) dihitung dengan mengalihkan jumlah dengan durasi denyut[11].

2. Faktor Biologis

Faktor biologis dalam proses pasteurisasi susu dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) meliputi karakteristik individu mikroorganisme dan kondisi fisiologis serta pertumbuhannya. Kerentanan suatu mikroorganisme terhadap inaktivasi dengan metode ini sangat terkait dengan parameter instrinstik mikroorganisme seperti ukuran, bentuk, spesies, atau kondisi pertumbuhan. Pada umumnya, mikroorganisme terdapat sel vegetatif Gram-positif yang memiliki ketahanan terhadap *Pulsed Electric Field* (PEF) dibandingkan dengan sel vegetatif Gram-negatif, sehingga dalam konteks ini, induksi medan listrik yang masuk ke dalam membran sel lebih besar ketika sel yang lebih besar terpapar oleh perlakuan *Pulsed Electric Field* (PEF)[11].

3. Faktor Media

Karakteristik fisik dan kimia dari suatu media (produk pangan) diketahui sangat mempengaruhi efektivitas inaktivasi mikroba. Faktor ini kemungkinan besar mempengaruhi pemulihan sel mikroba yang rusak dan pertumbuhan selanjutnya setelah dilakukan proses pasteurisasi dengan metode ini dikarenakan keberadaan komponen pangan seperti lemak dan protein, telah dilaporkan memiliki efek pencegahan pada mikroorganisme terhadap perlakuan *Pulsed Electric Field* (PEF). Seperti parameter instrinstik mikroorganisme, media yang diolah memiliki faktor instrinstik seperti konduktivitas, resistivitas, sifat dielektrik, kekuatan ionik, pH dan komposisi[11].

2.2.3 Pembangkit Tegangan Tinggi

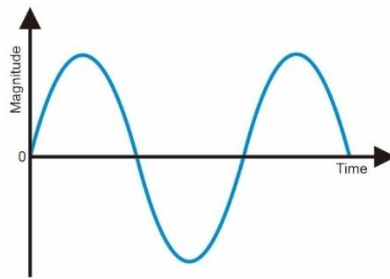
Dalam dunia kelistrikan, tegangan bisa dikatakan sebagai golongan tegangan tinggi mulai dari 0,6 kV (600 Volt) hingga ribuan volt, tetapi di setiap negara memiliki batasan pembagian jenis golongan tegangan tinggi yang sedikit berbeda, tergantung pada kemajuan sistem tenaga listrik di setiap negara, salah satu contohnya seperti di dunia barat (Eropa). Tegangan tinggi ini dibagi menjadi beberapa golongan yaitu sebagai berikut [12]:

1. Tegangan Tinggi (*High Voltage*), dengan nilai tegangan 0,6 kV/1,0 kV sampai 2,4 kV.
2. Tegangan Tinggi Menengah (*Medium High Voltage*), dengan nilai tegangan 3 kV sampai 30 kV.
3. Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*), dengan nilai tegangan 60 kV sampai 100 kV.
4. Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage*), dengan nilai tegangan 240 kV sampai 1000 kV.

Untuk menghasilkan tegangan tinggi, diperlukan sumber tegangan dengan arus bolak – balik yang nantinya dapat menghasilkan tegangan tinggi arus searah, tegangan tinggi arus impuls dan tegangan tinggi arus bolak – balik. Berikut merupakan penjelasan dari ketiga jenis tegangan tinggi:

2.2.3.1 Tegangan Tinggi AC

Pada umumnya, tegangan tinggi AC digunakan untuk keperluan transmisi energi listrik oleh penyedia listrik seperti PLN. Namun tak hanya itu, tegangan tinggi AC juga dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti percobaan ilmiah, pengujian peralatan listrik dan eksperimen teknologi tinggi. Pada percobaan ilmiah atau hanya untuk pengujian, pembangkit tegangan tinggi AC dirancang menghasilkan tegangan tinggi yang dapat menghasilkan daya yang relatif kecil. Berikut merupakan gambar bentuk gelombang AC:



Gambar 2. 2 gelombang AC sinusoidal

(Sumber: <https://www.wilsoncables.com/id/news/perbedaan-arus-ac-dan-dc>)

Tegangan tinggi AC dibedakan menjadi 2 jenis dari tingkat frekuensinya yaitu tegangan tinggi AC dengan frekuensi rendah dan tegangan tinggi AC dengan frekuensi tinggi. Tinggi rendahnya frekuensi pada tegangan tinggi AC didesain sesuai dengan kegunaan pada pengujian tertentu. Ada beberapa cara atau metode untuk meningkatkan tegangan tinggi AC:

1. Transformator Tegangan Tinggi

Tegangan tinggi AC dapat dibangkitkan dengan menggunakan trafo *step up* tegangan tinggi dengan perbandingan belitan yang tinggi, trafo ini biasanya digunakan untuk pengujian jangka pendek dengan desain trafo yang hampir sama dengan trafo tegangan yang digunakan untuk mengukur daya dan tegangan pada saluran transmisi, di mana kerapatan fluks rendah digunakan untuk mencegah harmonisa tinggi.[13]

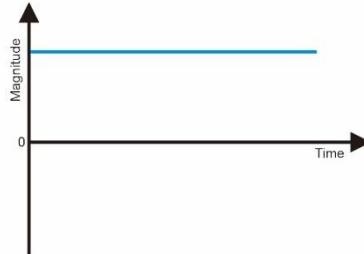
2. Transformator *Cascade*

Transformator *Cascade* merupakan susunan 2 transformator atau lebih yang dirangkai atau dihubungkan secara seri (*Cascade*) untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi atau ingin melebihi batas kemampuan dari satu transformator tegangan tinggi, tetapi dengan syarat seluruh daya pengujian harus di *supply* oleh transformator tingkat awal, sehingga akan menimbulkan total kapasitas daya dari *Cascade* yang dibuat tidak akan lebih tinggi dari kapasitas daya transformator pada tingkat yang paling rendah [14].

2.2.3.2 Tegangan Tinggi DC

Tegangan tinggi searah sering dimanfaatkan untuk penerapan fisika seperti peralatan elektromedik (*x-ray*), peralatan industri atau elektronika

komunikasi (televisi) yang umumnya memiliki bentuk gelombang garis lurus yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 3 gelombang DC murni

(Sumber: <https://www.wilsoncables.com/id/news/perbedaan-arus-ac-dan-dc>)

Pembangkit tegangan tinggi DC ini dapat dibangkitkan dengan penyearah dari tegangan tinggi bolak – balik (AC) atau dari tegangan rendah bolak balik (AC) yang disearahkan menggunakan diode, kemudian dapat dilipat gandakan tingginya. Ada beberapa macam rangkaian pelipat ganda tegangan tinggi searah (DC)[14]:

1. Rangkaian *Delon*

Rangkaian *Delon* adalah rangkaian penyearah yang dihubungkan secara *cascade* dua tingkat, sehingga mampu menghasilkan keluaran tegangan dua kali lipat dari tegangan AC pada kumparan sekunder transformator uji.

2. Rangkaian *Villard*

Rangkaian *Villard* bekerja dengan melipatgandakan tegangan keluaran tegangan AC dari kumparan sekunder transformator uji dengan membangkitkan gelombang sinusoidal dari tegangan keluaran tersebut.

3. Rangkaian *Cockcroft Walton* atau *Greinacher*

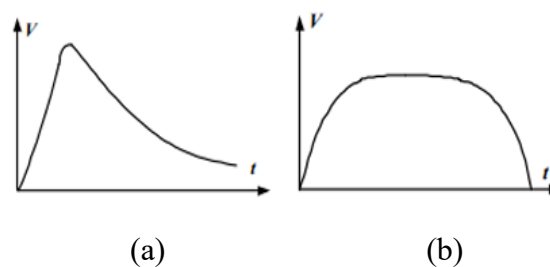
Rangkaian *Cockcroft Walton* atau *Greinacher* merupakan rangkaian pelengkap dari rangkaian *Villard* yang dapat menghasilkan keluaran berupa tegangan dan arus tinggi searah dari kumparan sekunder trafo.

4. Rangkaian Hubung *Cascade*

Pada rangkaian hubung *cascade*, biasanya digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi di atas 400 kV dengan 2 atau lebih transformator.

2.2.3.3 Tegangan Tinggi Impuls

Tegangan tinggi impuls merupakan tegangan pulsa beramplitudo besar yang memiliki karakteristik bentuk gelombang secara tiba – tiba naik dalam waktu singkat sekali, kemudian disusul dengan gelombang penurunan yang relatif lambat menuju nol. Pada tegangan tinggi impuls, terdapat dua bentuk atau jenis tegangan tinggi impuls yaitu tegangan tinggi impuls petir yang disebabkan oleh sambaran petir (*lightning*) dan tegangan tinggi impuls hubung buka yang disebabkan karena adanya operasi hubung-buka (*switching operation*) [15]. Berikut merupakan bentuk gelombang dari tiga jenis tegangan impuls yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 4 gelombang (a) impuls petir; (b) impuls hubung buka

(Sumber: <https://repository.ub.ac.id/id/eprint/12851/2/BAB%20II.pdf>)

2.2.4 Power Supply SMPS

Switch mode power supply (SMPS) adalah jenis *power supply* yang berfungsi untuk menyearahkan secara langsung dan menyaring dengan tegangan input AC 220 V dari PLN untuk menghasilkan tegangan DC. Tegangan DC yang dihasilkan terjadi karena adanya proses *switch* ON dan OFF pada frekuensi tinggi dengan rangkaian osilator dan sebuah transformator frekuensi tinggi sehingga dapat menghasilkan arus AC. Penggunaan *power supply* ini memiliki efisiensi yang lebih besar karena proses *switching* transistor daya sedikit berkurang [16]. Pada perancangan Tugas Akhir ini digunakan *power supply* SMPS dengan kemampuan 12 Volt 15 Ampere seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 5 Power Supply *Switching*

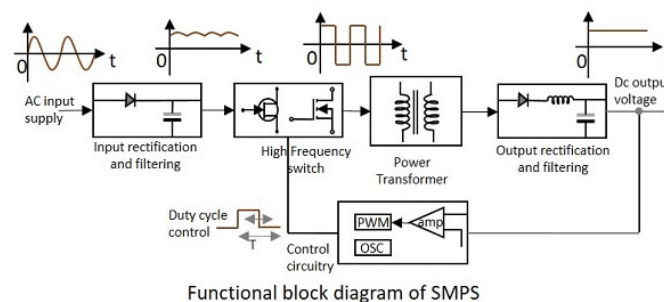
(Sumber: <https://www.rs-online.id/p/switch-mode-psu-24vdc-156w/>)

Untuk spesifikasi power *supply* SMPS dapat ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. 2 Spesifikasi power *supply* SMPS

Keterangan	Uraian
Input	: 86 – 240 V AC
Output	: 12 VDC
Arus	: 15 A
Daya	: 180 W

Secara sistem kerja, power *supply* SMPS memiliki diagram blok sebagai berikut:



Gambar 2.6 Diagram blok rangkaian SMPS

(Sumber: <https://www.omchsmmps.com/what-is-switch-mode-power-supply/>)

Pada gambar 2.6 menunjukkan bahwa power *supply* SMPS ini memiliki bagian – bagian dasar yaitu[16]:

1. Bagian Penyearah

Bagian penyearah bekerja untuk menyearahkan tegangan input AC bergelombang sinusoidal menjadi tegangan DC menggunakan komponen diode

bridge untuk penyearah dan kapasitor elektrolit (*elco*) sebagai filter untuk membuang sisa riak tegangan setelah melalui diode *bridge*.

2. Bagian Pencacah

Bagian pencacah merupakan bagian *power switching* yang digunakan untuk mencacah tegangan DC dengan *power switch* ON dan OFF sehingga dapat menghasilkan tegangan pulsa – pulsa DC berfrekuensi tinggi.

3. SMPS *Controller Driver*

SMPS controller driver digunakan sebagai pembangkit pulsa PWM (*pulsed with modulation*) yang berisikan rangkaian osilator.

4. Trafo *Switching*

Trafo *switching* digunakan untuk mengatur output tegangan dari tegangan DC yang telah dicacah.

5. Penyearah dan Filtering

Penyearah dan filtering digunakan untuk menyearahkan kembali tegangan dari trafo *switching* karena tegangan tersebut masih berupa pulsa – pulsa frekuensi tinggi.

6. *Loop* Umpan Balik

Loop umpan balik digunakan untuk menstabilkan tegangan, di mana rangkaian *loop* umpan balik dari tegangan keluaran ke bagian primer sekaligus digunakan untuk mengendalikan PWM.

7. Rangkaian Komparator

Rangkaian komparator berfungsi sebagai pendeteksi jika ada perubahan tegangan keluaran yaitu dengan cara membandingkan tegangan keluaran dengan sebuah tegangan referensi (biasanya berupa tegangan diode zener 6,8V).

2.2.5 ACCU (Akumulator)

Akumulator atau aki (*ACCU*) merupakan sebuah perangkat yang dapat menyimpan energi dalam bentuk energi kimia, umumnya energi yang disimpan adalah energi listrik dengan arus searah (DC).



Gambar 2. 7 ACCU (akumulator)

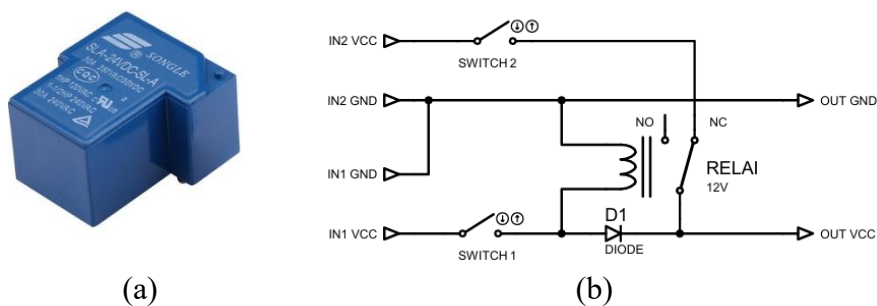
(Sumber: <https://www.tempo.co/arsip/aki-tak-menyimpan-setrum-cek-empat-hal-ini-437894>)

Secara umum, akumulator/aki bekerja dengan memanfaatkan reaksi kimia untuk menyimpan dan mentransfer arus listrik. Saat baterai digunakan, setiap elektroda secara bertahap akan berubah menjadi timbal sulfat karena reaksi kimia dengan larutan asam sulfat. Banyak elektron akan dilepaskan dari elektroda timbal selama proses ini yang menyebabkan arus listrik mengalir dari pelat timbal dioksida[17].

Kedua elektroda akan dilapisi timbal sulfat setelah penggunaan yang lama. Akibatnya, perbedaan potensial antara kedua elektroda menghilang. Keadaan ini disebut sebagai baterai basah atau mati.

2.2.6 Automatic Transfer Switch (ATS)

Automatic transfer switch merupakan saklar peralihan otomatis yang terdiri dari 2 sumber energi listrik masukan yang dialihkan menjadi 1 sumber keluaran yang digunakan untuk menjaga ketersediaan sumber masukan tetap dapat difungsikan walaupun salah satu dari kedua sumber tersebut mengalami gangguan atau mati. Pada contoh sederhananya komponen yang dapat digunakan sebagai ATS adalah relai. Relai memiliki 2 kontak NC (*normaly close*) dan NO (*normaly open*) serta memiliki koil yang akan mengaktifkan kedua kontak tersebut seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



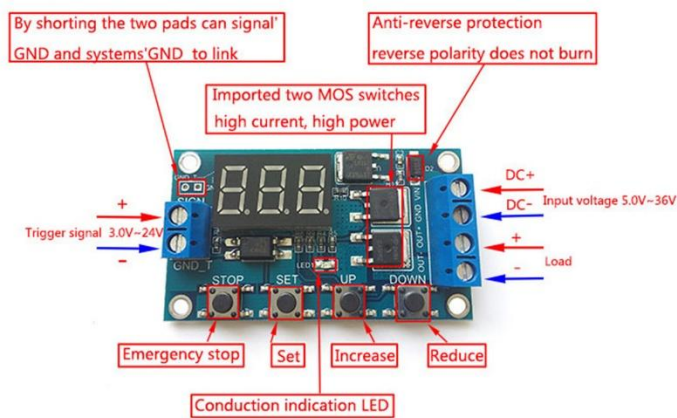
Gambar 2. 8 (a) Relai 12 V; (b) Wiring skematik modul ATS dengan relai
(sumber: <https://robu.in/product/sla-24vdc-sl-a-4pin-30a-power-relay/>)

Cara kerja relai yang akan digunakan sebagai ATS dapat dijelaskan seperti yang ada di bawah ini:

1. Sumber listrik utama akan dihubungkan pada koil relai di mana koil ini jika diberi tegangan akan menghasilkan medan magnet sehingga mengakibatkan *commom/switch* yang semula terhubung ke NC beralih ke kontak NO.
2. Sedangkan untuk sumber listrik cadangan akan dihubungkan pada kontak NC, ketika sumber tegangan yang berasal dari sumber listrik utama mengalami gangguan atau padam, maka kontak akan beralih kembali ke kontak NC yang mengakibatkan sumber listrik cadangan akan aktif secara otomatis.

2.2.7 Modul *Digital Delay Timer*

Digital delay timer merupakan sebuah modul kontrol waktu tunda yang dapat memutus sumber listrik secara otomatis berdasarkan *setting* waktu yang ditetapkan. Dalam perancangan ini digunakan *timer* dengan komponen MOSFET yang terdapat komponen kontrol di dalam rangkaiannya, berbeda dengan *timer* yang biasa menggunakan relai yang bekerja dengan menggunakan prinsip mekanis. Dengan menggunakan *delay controller* MOSFET sebagai *timer*, beban dapat dikontrol hingga 15 Ampere. Berikut merupakan gambar dan pin out modul *digital delay timer*:



Gambar 2. 9 Modul *digital delay timer*

(Sumber: <https://dsindustrie.com/produit/ddc-432-relais-de-temporisation-12v-24v-maroc/>)

Untuk spesifikasi modul *digital delay timer* dapat ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. 3 Spesifikasi modul *digital delay timer*

Keterangan	Uraian
Tegangan Operasi	: 5 – 30 VDC
Sumber Pemicu	: 3 – 24 VDC
Output Tegangan	: 5 – 36 VDC
Arus Maksimal	: 30 A
Daya maksimal	: 400 Watt
Arus operasi	: 50 mA
Suhu Kerja	: -40 – 85 °C

MOSFET dapat mengontrol waktu tunda dengan memberikan sinyal tegangan HIGH atau LOW ke Gate MOSFET sesuai dengan waktu tunda yang diatur, MOSFET bertindak sebagai sakelar elektronik yang dapat menghubungkan atau memutus arus ke beban. Jika diberikan sinyal HIGH (tegangan lebih dari 0), MOSFET akan aktif dan mengalirkan arus ke beban, jika sinyal LOW (tegangan nol), MOSFET akan mati dan memutus arus ke beban.

2.2.8 *Boost Converter 15 A 400 Watt*

Boost converter atau *converter step up* merupakan sebuah modul daya yang digunakan untuk menaikkan (membangkitkan) tegangan ke tegangan yang lebih tinggi dari tegangan *power supply* SMPS. *Boost converter* ini termasuk jenis *converter* daya *switching* sama seperti SMPS dengan memanfaatkan frekuensi tinggi untuk membangkitkan tegangan output yang lebih tinggi dari tegangan inputnya[18]. Pada perancangan Tugas Akhir ini digunakan *boost converter* yang mampu menaikkan tegangan DC hingga 60 Volt dengan kemampuan arus 15 Ampere seperti pada gambar berikut:



Gambar 2. 10 Modul *boost converter*

(Sumber: <https://www.indiamart.com/proddetail/400w-dc-dc-step-up-boost-converter-module-2852168963173.html>)

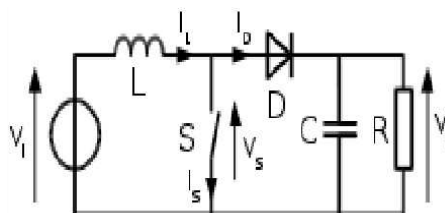
Dari gambar 2.10 di atas tentunya modul *boost converter* ini memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. 4 Spesifikasi *boost converter* 15 A

Keterangan	Uraian
Daya Maksimal	: 400 W
Tegangan Input	: 8.5 – 50 VDC
Tegangan Output	: 10 – 60 VDC
Rentang Konstan	: 0,2 – 12 A
Suhu	: - 40 hingga + 85 °C
Frekuensi Operasi	: 150 kHz
Efisiensi Konversi	: 96%

Secara sederhana, *boost converter* memiliki prinsip kerja dengan memanfaatkan kecenderungan induktor untuk melawan perubahan arus yang menciptakan dan menghilangkan medan magnet.

1. Pada kondisi saklar tertutup, arus listrik mengalir melewati induktor dengan arah searah jarum jam. Dalam kondisi ini, induktor menyimpan sebagian energi dalam bentuk medan magnet, di mana sisi kiri induktor memiliki polaritas positif.
2. Pada saat kondisi saklar terbuka, arus akan menjadi berkurang dan impedansi menjadi lebih tinggi. Untuk menjaga aliran arus listrik tetap stabil menuju beban, medan magnet yang sebelumnya terbentuk pada induktor akan dihilangkan. Akibatnya, polaritas pada induktor mengalami pembalikan, sehingga sisi kirinya menjadi bermuatan negatif. Kondisi ini membuat kedua sumber tegangan tersusun secara seri, yang menghasilkan tegangan lebih besar untuk mengisi kapasitor melalui diode, seperti pada gambar 2.11 di bawah ini [18]:

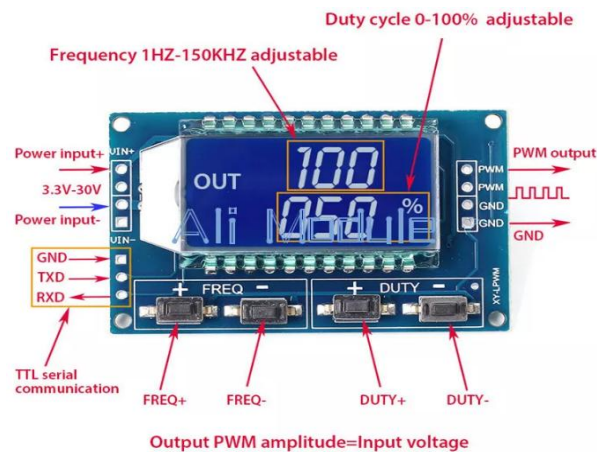
**Gambar 2. 11** Rangkaian sederhana *boost converter*

(Sumber: <https://abdulelektro.blogspot.com/2019/05/prinsip-dasar-boost-converter-konverter.html>)

Apabila siklus buka tutup saklar cukup cepat, tegangan yang dihasilkan akan semakin tinggi dan terus bertambah sesuai dengan batas kemampuan kerja rangkaian, kemudian tegangan yang dihasilkan tersebut tersimpan pada kapasitor melalui diode yang digunakan untuk mencegah umpan balik tegangan. Ketika saklar dalam kondisi tertutup dan sisi kanan terhubung langsung dengan sisi kiri, kapasitor akan menyalurkan tegangan dan energi ke beban. Pada saat ini, diode *blocking* berfungsi mencegah kapasitor mengalirkan muatan kembali melalui saklar. Oleh karena itu, saklar perlu segera dibuka untuk menghindari terjadinya pelepasan muatan dari kapasitor. [18].

2.2.9 PWM Generator

Pada tegangan DC murni dihasilkan bentuk gelombang yaitu berupa garis lurus, yang artinya tidak memiliki perubahan tegangan terhadap waktu. Modul ini akan menghasilkan gelombang kotak untuk mengontrol daya yang akan dibangkitkan serta agar tegangan yang dihasilkan menjadi lebih efisien. Berikut merupakan gambar dan pin out dari modul PWM generator:



Gambar 2. 12 Modul PWM generator

(Sumber: <https://www.ebay.co.uk/itm/254713769255>)

Dari gambar 2.12 di atas modul PWM Generator ini memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. 5 Spesifikasi modul PWM generator

Keterangan	Uraian
VCC	: 3 – 30 V (tipe 3.3 atau 5V)
Frekuensi	: 0 – 150 kHz
<i>Duty Cycle</i>	: 0 – 100%
<i>PWM Pulse Amplitude</i>	: = V_{in} +

PWM (*pulsed with modulation*) atau modulasi lebar pulsa merupakan suatu teknik yang dapat mengubah lebar pulsa dari high ke low dalam 1 periode dan mengatur frekuensi yang tetap pada tegangan DC. Dari siklus PWM akan dihasilkan gelombang berbentuk persegi yang menunjukkan terjadinya *switching* ON – OFF atau high – low pada tegangan dan periode lamanya waktu di mana sinyal berada kondisi high – low, sehingga dapat diketahui 2 parameter pada PWM yaitu *duty cycle* dan besar frekuensinya[19]. Berdasarkan pengaturan frekuensi dan *duty cycle*-nya, maka dapat diketahui lebar pulsa (*pulse width*) dan besar tegangan keluaran dari sinyal PWM dengan rumus persamaan di bawah ini:

Untuk menghitung tegangan keluaran:

$$V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} \quad (2.3)$$

Untuk menghitung lebar pulsa:

$$t_{on} = Duty\ cycle \times \frac{1}{Frekuensi} \quad (2.4)$$

Keterangan:

t_{on} = Lebar pulsa (s)

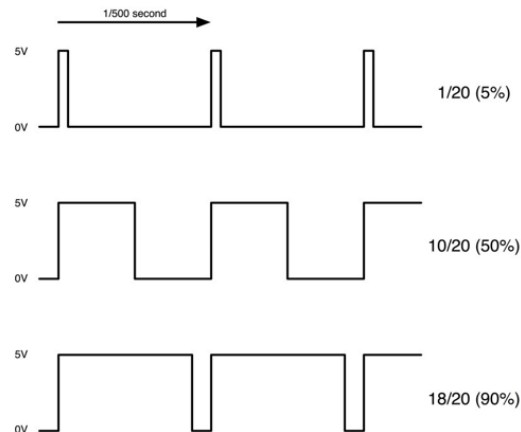
V_{out} = Tegangan keluaran (V)

V_{in} = Tegangan masukan (V)

Duty cycle (%)

Frekuensi (Hz)

Selain dari rumus persamaan di atas, *duty cycle* juga mempengaruhi bentuk gelombang pulsa seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 13 Bentuk gelombang *duty cycle*

(Sumber: <https://sorayakit.blogspot.com/2016/12/apa-itu-pwm.html>)

Dari gambar 2.13 di atas, maka dapat dijelaskan prinsip kerja sinyal PWM sebagai berikut:

- Prinsip kerja *duty cycle* dilihat pada bentuk gelombang pada gambar di atas. Pada waktu tertentu sinyal akan ke rendah yang disebut OFF atau low, atau berubah ke tinggi yang disebut ON atau high. PWM dapat mempertahankan kondisi ON-nya, yakni dengan mengendalikan *duty cycle*. Ketika sinyal bertahan dalam posisi ON, saat itulah siklus kerja 100% atau dikenal juga dengan *duty cycle* 100%. Sebaliknya, ketika sinyal selalu OFF, dikenal dengan *duty cycle* 0%.
- Prinsip kerja dari frekuensi sinyal PWM menentukan seberapa cepat PWM menyelesaikan satu periode. Satu periode adalah waktu ON dan OFF penuh dari sinyal PWM[19].

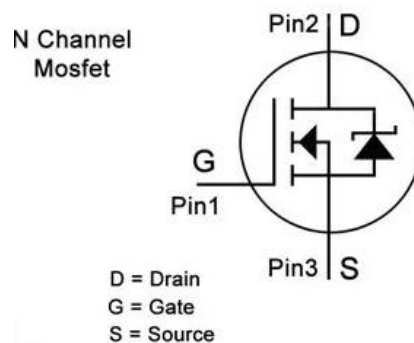
2.2.10 Modul Dual MOSFET D4184

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) merupakan sebuah komponen semikonduktor yang berfungsi untuk mengontrol arus yang di *trigger* oleh tegangan. Komponen ini memiliki banyak manfaat atau kegunaan yaitu seperti sebagai saklar elektronik, sebagai pembangkit dan sebagai penguat sinyal, hal ini karena MOSFET memiliki keunggulan dalam hal kecepatan, efisiensi, dan daya tahan yang baik. Dalam segi fungsi dan penggunaannya,

MOSFET memiliki 2 mode di mana pada masing – masing mode terdapat tipe N - *channel* dan P - *channel*, sehingga secara keseluruhan terdapat 4 jenis MOSFET yaitu[20]:

- a. N – *Channel cut off* mode MOSFET
- b. P – *Channel cut off* mode MOSFET
- c. N – *Channel saturasi* mode MOSFET
- d. P – *Channel saturasi* mode MOSFET

Pada perancangan Tugas Akhir ini menggunakan modul *driver* MOSFET dengan tipe N – *channel*, sehingga dapat di jelaskan prinsip kerjanya sebagai berikut:



Gambar 2. 14 Konfigurasi kaki/pin MOSFET

(Sumber: <https://panduanteknisi.com/pengertian-mosfet-adalah.html>)

Pada MOSFET tipe N - *channel*, jika diberi tegangan bias di kaki *Gate* – *Source* (V_{GS}), arus listrik akan mengalir dari kaki *Source* ke kaki *Drain*. Besar tegangan bias tersebut harus besar dari tegangan ambang batas (V_{TH}).

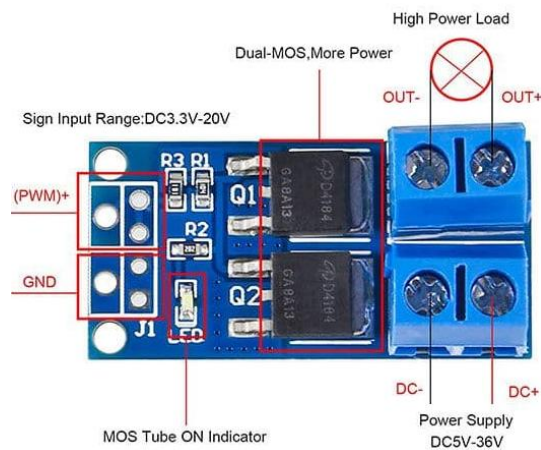
- a. Kondisi MOSFET sebagai area saturasi

Jika tegangan bias di terminal *Gate* lebih besar dari V_{TH} , maka muncul aliran listrik dengan resistansi yang rendah di antara kaki *Source* dan *Drain*, sehingga mengakibatkan arus listrik mengalir melalui kedua kaki tersebut.

- b. Kondisi MOSFET dalam area *cut - off*

Jika tegangan bias di kaki *Gate* lebih kecil dari V_{TH} , maka MOSFET akan berada dalam kondisi tidak aktif. Pada kondisi ini, resistansi yang ada pada kaki *Source* – *Drain* sangat besar sehingga tidak memungkinkan arus listrik untuk mengalir[20].

Berdasarkan prinsip kerja yang telah dijelaskan, pada umumnya MOSFET dengan tipe N – *Channel* memiliki keunggulan untuk bekerja pada arus yang lebih besar, sehingga itulah alasan perancangan Tugas Akhir ini menggunakan modul MOSFET dengan tipe tersebut yang ditunjukkan seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 15 Modul dual MOSFET D4184

(Sumber: <https://kuriosity.sg/products/mosfet-driver-module>)

Dari gambar 2.15 di atas, modul dual MOSFET D4184 ini memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

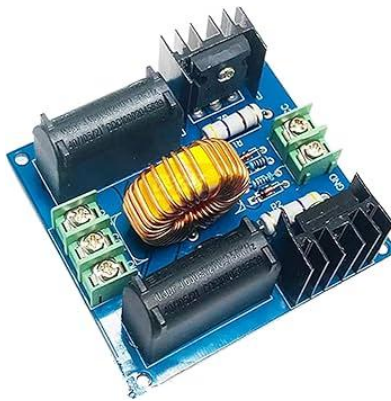
Tabel 2. 6 Spesifikasi modul dual MOSFET D4184

Keterangan	Uraian
V max	: 40 V
I max	: 15 A
$R_{DS(ON)}$	: 8.5m Ω / 4.25m Ω
Daya	: 50W

Modul ini menggunakan MOSFET N-*channel* D4184 yang memiliki resistansi $R_{ds(on)}$ rendah sebesar 8,5m Ω ketika digerakkan dengan sinyal logika 4,5V. Modul ini menempatkan dua perangkat ini secara paralel untuk mengurangi $R_{ds(on)}$ menjadi 4,25m Ω dan menggandakan kemampuan penanganan daya tanpa menggunakan *heat - sink* yang besar. Modul - modul ini paling sering digerakkan menggunakan logika 5V yang mendukung arus kontinu sekitar 15A. Jika digerakkan dengan PWM, arus puncak maksimumnya bisa lebih besar hingga 40A atau lebih.

2.2.11 Modul Zero Voltage Switching (ZVS)

Zero voltage switching (ZVS) merupakan jenis *converter* daya untuk mengurangi kehilangan energi dengan menerapkan teknik *switching* pada saat kondisi tegangan nol selama *switching*. Konsep ZVS ini memanfaatkan momen tegangan pada saat saklar turun ke nol sebelum terjadi perubahan kondisi, yang membantu meminimalkan puncak tegangan mendadak pada komponen *switching*[21]. Gambar di bawah ini merupakan modul ZVS yang akan digunakan pada perancangan Tugas Akhir ini:



Gambar 2. 16 Modul ZVS

(Sumber: <https://www.amazon.com/DC12-30V-Induction-Heating-Driver-Inductive/dp/B0D7VWTRM6>)

Dari gambar 2.16 di atas, modul ZVS ini memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. 7 Spesifikasi modul ZVS

Keterangan	Uraian
Input Tegangan	: 12 – 30 V
Kemampuan Arus	: 5 – 20 A
Daya	: 1000 W
Frekuensi	: 30 – 50 kHz

Konsep ZVS pada dasarnya untuk menjamin bahwa sebuah saklar, biasanya transistor atau MOSFET, aktif atau *non-aktif* hanya ketika tegangan pada terminalnya mendekati nol atau tepatnya nol. Hal ini dicapai dengan

menggabungkan elemen resonansi, termasuk induktor dan kapasitor, untuk menghasilkan osilasi tegangan yang selaras dengan siklus peralihan (*switching*). Pendekatan ZVS ini meminimalkan rugi-rugi daya dan meningkatkan efisiensi daya yang biasa terjadi ketika peralihan terjadi pada tegangan tinggi. Untuk menghitung efisiensi daya dapat menggunakan rumus persamaan di bawah ini:

Untuk menghitung daya:

$$P = V \times I \quad (2.5)$$

Untuk menghitung efisiensi daya:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Keterangan:

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (V)

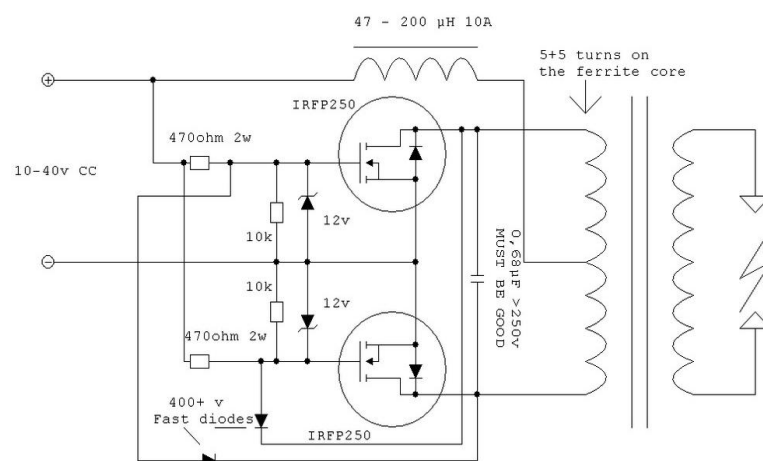
I = Arus (A)

H = Efisiensi daya (%)

P_{out} = Daya keluar (Watt)

P_{in} = Daya Masuk (Watt)

Dengan menghitung efisiensi daya menggunakan persamaan di atas dapat di analisa kerugian daya yang akan digunakan sebagai driver transformator *flyback*. Dari fungsi *zero voltage switching* ini dapat dijelaskan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 17 Rangkaian modul ZVS

(Sumber: <https://eecs.blog/zvs-flyback-driver/>)

Berdasarkan gambar rangkaian driver ZVS diatas terdapat komponen utama yaitu 2 MOSFET IRFP250N yang bertindak sebagai saklar dan 2 kapasitor yang dirangkai secara paralel. Saat modul pertama kali menerima tegangan, tegangan pada kapasitor akan meningkat ketika MOSFET dalam kondisi OFF dan bernilai nol ketika MOSFET dalam kondisi ON[22]. Berikut merupakan rincian cara kerja modul driver ZVS:

1. Ketika tidak ada tegangan pada saklar, saklar mulai aktif. Dengan tegangan nol, tidak ada energi yang hilang sebagai panas.
2. Tegangan mulai naik ketika arus mengalir melalui induktor dan kapasitor.
3. Ketika tegangan mencapai tingkat tertentu, saklar di *non*-aktifkan ketika tegangan kembali ke nol karena resonansi antara induktor dan kapasitor.
4. Siklus ini berlanjut pada frekuensi yang ditetapkan oleh pengguna untuk mempertahankan efisiensi *switching* yang tinggi[21].

2.2.12 Transformator *Flyback* 6174V-6006E

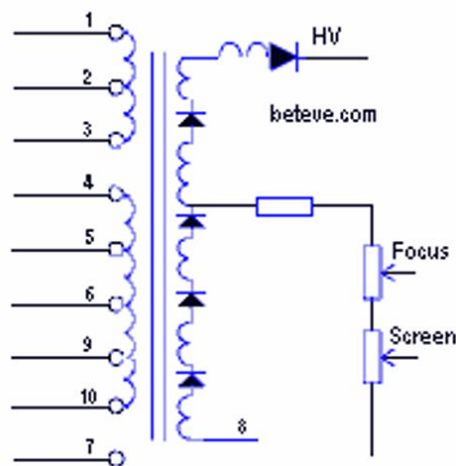
Transformator *flyback* atau TFB merupakan transformator khusus digunakan untuk menghasilkan tegangan tinggi hingga puluhan ribu volt dengan efisien, serta memiliki volume ruang dan bobot yang jauh lebih kecil di banding dengan transformator konvensional yang pada umumnya memakan ruang dan bobot yang besar. Transformator *flyback* juga di desain untuk dapat membangkitkan frekuensi tinggi, sehingga dari segi fungsinya transformator *flyback* banyak digunakan dalam pengoperasian *Cathoda Ray Tube* (CRT) seperti televisi (TV) tabung dan komputer CRT seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini[23]:



Gambar 2. 18 Transformator *flyback* 6174V-6006E

(Sumber: <https://m.media-amazon.com/images/I/81Fv6vQpPvL.SY500.jpg>)

Transformator *flyback* memiliki banyak seri sesuai dengan tipe TV yang digunakan, mulai dari merk TV, ukuran layar TV dan lain sebagainya. Dari perbedaan seri tersebut, transformator *flyback* memiliki *output* tegangan tinggi (HV) yang tidak beda jauh antar serinya, dalam pembuatan Tugas Akhir ini digunakan transformator *flyback* dengan seri 6174V-6006E yang mampu menghasilkan tegangan tinggi hingga 24,6 kV[24]. Pada transformator *flyback* 6174V-6006E memiliki 10 pin atau kaki pada bagian bawah transformator yang di mana tiap pin tersebut memiliki fungsi yang berbeda – beda. Berikut adalah gambar skema dan tabel fungsi dari setiap pin transformator *flyback* 6174V-6006E:



Gambar 2. 19 Konfigurasi pin transformator *flyback* 6174-6006E

(Sumber: <https://datasheet4u.com/datasheet/ETC/6174V-6006E-1402514>)

Tabel 2. 8 Konfigurasi pin transformator *flyback* 6174-6006E

No Pin	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fungsi	H+	180	B+110	GND	12	26	NC	ABL	HT	AFC

Berdasarkan gambar skema dan tabel fungsi pin transformator *flyback* 6174V-6006E dapat diketahui bahwa terdapat pin di bagian lilitan primer yaitu pin no 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10 dan 7, sedangkan pada bagian lilitan sekunder yaitu pin no 8 pengatur *focus*, *screen* dan kabel penghasil tegangan tinggi yang akan dimanfaatkan untuk pembangkit tegangan tingginya.

Pada umumnya transformator *step - up* konvensional berbeda dengan transformator *flyback*, namun memiliki prinsip kerja yang mirip yaitu berdasarkan terjadinya induksi elektromagnetik akibat timbulnya medan magnet, sehingga energi dari belitan primer akan mentransferkan ke belitan sekunder secara terus menerus (*continue*). Terjadinya induksi elektromagnetik tersebut dipicu oleh rasio jumlah belitan antara belitan primer dan belitan sekunder dengan tegangan primernya. Perbandingan antara tegangan dan belitan primer sekundernya dapat dirumuskan pada persamaan di bawah ini[25]:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.7)$$

Keterangan:

V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan Sekunder

N_p = Lilitan Primer

N_s = Lilian Sekunder

I_s = Arus Sekunder

I_p = Arus Primer

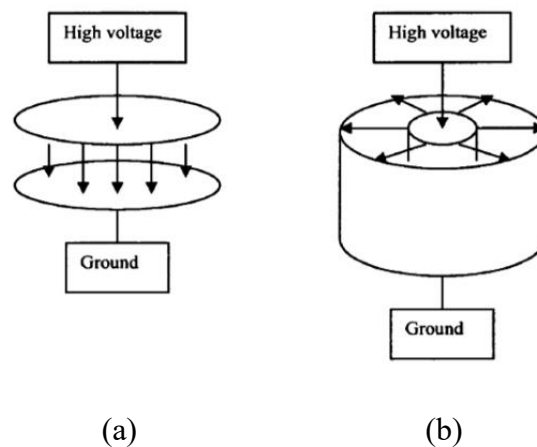
Pada transformator *flyback* tetap sama bekerja berdasarkan terjadinya induksi elektromagnetik namun pada tahap awal energi disimpan di tahap utama (di dalam inti ferit trafo). Operasi transformator *flyback* yang dikendalikan oleh driver ZVS dimulai ketika saklar di sisi primernya aktif, memicu aliran arus yang membangun medan magnet dan menyimpan energi di dalam inti ferit. Selama fase ini, diode pada keluaran sekunder umumnya tidak aktif, mencegah transfer energi langsung ke beban.

Selanjutnya, pemutusan arus primer yang mendadak oleh saklar yang mati menyebabkan medan magnet runtuh dengan cepat, sehingga semakin besar tegangan induksi yang menghasilkan lonjakan tegangan tinggi di sisi sekunder. Konfigurasi polaritas kumparan sekunder dan diode memungkinkan transfer energi yang tersimpan di inti menuju kapasitor keluaran dan beban saat ini terjadi. Siklus penyimpanan dan pelepasan energi ini berulang seiring dengan pergantian status saklar[26].

2.2.13 Ruang Perlakuan (*Treatment Chamber*)

Ruang perlakuan (*Treatment chamber*) merupakan sebuah wadah yang digunakan untuk pemrosesan pasteurisasi susu yang sedang berlangsung. Pada perancangan Tugas Akhir ini digunakan ruang perlakuan berbahan aluminium yang di mana permukaan gelas ini terhubung pada *ground* sedangkan susu yang sudah berada di dalam ruang perlakuan ini diberi tegangan tinggi dengan medan listrik berdenyut (*pulsed electric field*) melalui penghantar yaitu beberapa pasang elektroda baik berbentuk batang maupun berbentuk pelat dengan batas waktu yang sudah ditentukan.

Sistem ruang perlakuan dikategorikan dalam dua jenis yaitu paralel dan koaksial. Sistem ruang perlakuan paralel biasanya digunakan dalam metode *batch* sedangkan sistem ruang perlakuan koaksial digunakan dalam metode kontinu. Ruang koaksial yang digunakan mampu menghasilkan tingkat inaktivasi yang lebih tinggi dibanding dengan sistem *batch*, karena distribusi medan listrik yang seragam pada media (susu) yang mengalir secara kontinu, berikut merupakan gambar sistem perlakuan *batch* dan sistem perlakuan koaksial[11]:



Gambar 2. 20 ruang perlakuan dengan sistem (a) *batch*; (b) koaksial

(Sumber: https://www.researchgate.net/publication/288922778_Pulsed_Electric_Fields_for_Food_Processing_Technology)

2.2.14 Batang Elektroda

Elektroda merupakan sebuah konduktor yang berperan untuk menghantarkan medan listrik bertegangan tinggi yang terhubung dengan larutan elektrolit dari sebuah rangkaian listrik. Elektroda dapat berupa bahan yang terdiri dari material seperti logam, karbon, perunggu, nikel, tembaga, *stainless steel*, titanium yang mampu menghantarkan listrik atau panas cepat. Dalam sebuah sel elektrokimia, elektroda memiliki peran ganda yaitu sebagai anode (tempat terjadinya oksidasi, yaitu pelepasan elektron) atau sebagai katode (tempat terjadinya reduksi, yaitu penangkapan elektron). Penentuan apakah suatu elektroda berfungsi sebagai anode atau katode bergantung pada tegangan listrik yang diterapkan pada sel tersebut. Elektroda-elektroda ini dapat terhubung melalui berbagai media, seperti semikonduktor, elektrolit, atau bahkan hampa udara.

Pada perancangan Tugas Akhir ini digunakan batang elektroda dengan bahan *stainless steel* karena bahan ini memiliki keunggulan yaitu tahan terhadap korosi dalam cairan pangan, aman untuk makanan (tidak bereaksi dengan zat dalam produk), serta daya tahan yang tinggi terhadap panas dan tegangan listrik tinggi. Batang elektroda tersebut ditunjukkan seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 21 Batang elektroda

(Sumber: <https://www.tokopedia.com/ditan-elektrik/elektrode-stick-stainless-stick-elektroda-water-level-1-meter>)

Pada penggunaannya sebagai proses pasteurisasi dengan metode PEF, berikut merupakan peran batang elektroda sebagai penghantar tegangan tinggi pada susu:

1. Sumber tegangan tinggi dari rangkaian pembangkit tegangan tinggi memberikan pulsa listrik ke batang elektroda.
2. Elektroda yang sudah terkena pulsa listrik menciptakan kuat medan listrik dalam suatu wadah atau ruang perlakuan.
3. Cairan yang mengenai batang elektroda tersebut akan terkena medan listrik ini.
4. Medan listrik menyebabkan terbentuknya pori – pori membran sel mikroba dan mengalami kerusakan permanen.