

BAB V

HASIL DAN ANALISIS

Pada bab V Tugas Akhir ini membahas hasil pengujian dan analisa dari sistem pembangkit tegangan tinggi yang akan digunakan untuk pasteurisasi susu dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF), untuk tahap pengujian dan analisa akan dilakukan terhadap tegangan masukan dan tegangan keluaran pada modul *Zero Voltage Switching* (ZVS) dan transformator *flyback* yang akan menghasilkan tegangan tinggi, sedangkan untuk pasteurisasi susu akan di uji di UPTD laboratorium Kesehatan kota Semarang untuk diketahui hasilnya.

5.1 Persiapan Pengukuran dan Pengujian Pada Sistem Pembangkit Tegangan Tinggi

Persiapan pengukuran dan pengujian pada sistem pembangkit tegangan tinggi berupa persiapan peralatan ukur dan maupun APD serta prosedur pelaksanaan pengukuran dan pengujian, sebagai berikut:

5.1.1 Peralatan Pengukuran dan Pengujian Sistem

Dalam pengukuran dan pengujian sistem pembangkit tegangan tinggi ini dibutuhkan alat ukur yang digunakan untuk mengukur besaran tegangan dan bentuk gelombang tegangan. Berikut adalah peralatan yang akan digunakan untuk pengukuran dan pengujian:

1. Volt & Ampere meter digital (tertanam)
2. Multimeter digital
3. Probe tegangan tinggi (1:1000)
4. Sarung tangan tegangan tinggi
5. Osiloskop
6. Probe osiloskop tegangan tinggi (1:1000)

5.1.2 Prosedur Pengukuran dan Pengujian Sistem

Pada prosedur pengukuran dan pengujian sistem pembangkit tegangan tinggi ditujukan untuk mengetahui langkah – langkah dan bagian - bagian atau titik pengukuran dan pengujiannya yaitu sebagai berikut:

1. Pastikan alat ukur yang akan digunakan berfungsi dengan baik dan lakukan kalibrasi pada osiloskop.
2. Lakukan pemeriksaan terhadap sistem pembangkit tegangan tinggi, pastikan semua kabel yang terhubung tidak ada yang putus.
3. Melakukan beberapa tahap pengukuran besar tegangan masukan dan bentuk gelombang tegangan pada modul driver *Zero Voltage Switching* (ZVS) pada pin VCC dan GND dengan variasi *duty cycle* dan frekuensi.
4. Melakukan beberapa tahap pengukuran besar tegangan keluaran dan bentuk gelombang tegangan pada modul driver *Zero Voltage Switching* (ZVS) pada pin COM dan OUT1 serta COM dan OUT2.
5. Melakukan beberapa tahap pengukuran besar tegangan keluaran dan bentuk gelombang tegangan transformator *flyback*.
6. Melakukan pengujian tegangan tinggi terhadap susu pada wadah perlakuan dan amati dalam beberapa menit lalu hasil akan diuji di UPTD laboratorium Kesehatan kota Semarang.
7. Mencatat dan mengambil dokumentasi dari hasil pengukuran dan pengujian.
8. Melakukan analisa dari hasil yang sudah tercatat dan terdokumentasi.

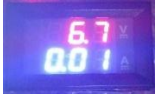
5.2 Pengukuran dan Pengujian Pada Sistem Pembangkit Tegangan Tinggi

Pengukuran dan pengujian pada sistem pembangkit tegangan tinggi ini meliputi pengukuran tegangan masukan dan keluaran serta pengujian bentuk gelombangnya pada driver *Zero Voltage Switching* (ZVS) dan pengukuran tegangan keluaran serta pengujian bentuk gelombangnya pada transformator *flyback*, dengan melakukan 3 tahap uji yang diberi variasi parameter tegangan tetap (13 V dan 24 V) dan frekuensi tetap (3 kHz dan 5 kHz) dengan 4 percobaan yang diberi variasi parameter *duty cycle* yang berbeda – beda (25%, 50%, 70% dan 100%) di setiap tahap percobaannya. Hal ini ditujukan agar dapat menemukan dan mengetahui hasil keluaran tegangan tinggi yang paling sesuai untuk kebutuhan proses pasteurisasi susu dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) berdasarkan parameter yang divariasikan tersebut. Berikut merupakan hasil pengukuran dan pengujian beserta analisisnya:

5.2.1 Hasil dan Analisis Pengukuran Tegangan Masukan *Zero Voltage Switching* (ZVS)

Pengukuran tegangan masukan pada modul ZVS dilakukan tanpa menghubungkan pada beban yaitu transformator *flyback* untuk mengetahui nilai tegangan yang ideal. Tegangan masukan ini mendapat sinyal PWM berupa parameter frekuensi dan *duty cycle* untuk dapat mengontrol daya output yang dihasilkan pada modul ZVS. Parameter yang dihasilkan dari sinyal PWM dapat diatur sehingga dapat memberikan hasil keluaran tegangan rata - rata yang bervariasi seperti yang tertampil pada tabel 5.1 – 5.3 di bawah ini:

Tabel 5. 1 Hasil tahap 1 pengukuran tegangan masukan ZVS dengan variasi tegangan *supply* 13 V dan frekuensi 3 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	Tegangan masukan	Tampilan hasil ukur
1	25%	3,4 V	
2	50%	6,7 V	
3	70%	9,3 V	
4	100%	13,1 V	

Pada tabel 5.1 menunjukkan hasil pengukuran tegangan masukan modul *Zero Voltage Switching* (ZVS) yang mendapat sinyal PWM dengan parameter tegangan 13 V, frekuensi 3 kHz dan beberapa variasi *duty cycle*, maka dapat dibandingkan dengan menggunakan rumus persamaan (2.3) yaitu sebagai berikut:

- Percobaan 1, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 25\% \times 13V = 3,25 V$
- Percobaan 2, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 50\% \times 13V = 6,5 V$
- Percobaan 3, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 70\% \times 13V = 9,1 V$
- Percobaan 4, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 100\% \times 13V = 13 V$

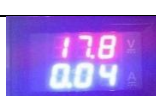
Tabel 5. 2 Hasil tahap 2 pengukuran tegangan masukan dengan variasi tegangan *supply* 24 V dan frekuensi 3 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	Tegangan masukan	Tampilan hasil ukur
1	25%	6,5 V	
2	50%	12,6 V	
3	70%,	17,5 V	
4	100%	24,3 V	

Pada tabel 5.2 menunjukkan hasil pengukuran tegangan masukan modul *Zero Voltage Switching* (ZVS) yang mendapat sinyal PWM dengan parameter tegangan 24 V, frekuensi 3 kHz dan beberapa variasi *duty cycle*, maka dapat dibandingkan dengan menggunakan rumus persamaan (2.3) yaitu sebagai berikut:

- Percobaan 1, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 25\% \times 24V = 6\ V$
- Percobaan 2, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 50\% \times 24V = 12\ V$
- Percobaan 3, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 70\% \times 24V = 16,8\ V$
- Percobaan 4, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 100\% \times 24V = 24,3\ V$

Tabel 5. 3 Hasil tahap 3 pengukuran tegangan masukan dengan variasi tegangan *supply* 24 V dan frekuensi 5 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	Tegangan masukan	Tampilan hasil ukur
1	25%	6,9 V	
2	50%,	13,0 V	
3	70%	17,8 V	

4	100%	24,3 V	
---	------	--------	---

Pada tabel 5.3 menunjukkan hasil pengukuran tegangan masukan modul *Zero Voltage Switching* (ZVS) yang mendapat sinyal PWM dengan parameter tegangan 24 V, frekuensi 5 kHz dan beberapa variasi *duty cycle*, maka dapat dibandingkan dengan menggunakan rumus persamaan (2.3) yaitu sebagai berikut:

- Percobaan 1, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 25\% \times 24V = 6 \text{ V}$
- Percobaan 2, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 50\% \times 24V = 12 \text{ V}$
- Percobaan 3, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 70\% \times 24V = 16,8 \text{ V}$
- Percobaan 4, $V_{out} = \text{Duty cycle} \times V_{in} = 100\% \times 24V = 24,3 \text{ V}$

Berdasarkan hasil dari 3 tahap pengukuran pada tabel 5.1 – 5.3 dapat di analisa bahwa:

1. Sinyal PWM sangat mempengaruhi besar keluaran tegangan yang didapat, terutama parameter *duty cycle* pada sinyal PWM. Tegangan yang mendapat sinyal PWM berupa *duty cycle* akan merespon nilai rata - rata tegangan HIGH dan LOW, semakin besar persentase *duty cycle* maka akan semakin besar waktu HIGH tegangan tersebut dan semakin kecil persentase *duty cycle* maka semakin besar waktu LOW tegangan tersebut, sehingga *duty cycle* secara langsung proporsional memberikan nilai tegangan dari hasil rata – rata HIGH dan LOW tersebut[19].
2. Hasil pengukuran menggunakan pembacaan voltmeter dan menggunakan perhitungan rumus persamaan (2.1) pada tabel 5.1 - 5.3 memiliki perbandingan hasil yang mirip dan tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan, hal ini kemungkinan disebabkan karena voltmeter yang memiliki keterbatasan tingkat akurasi dan toleransi pembacaan serta bisa disebabkan karena pengaruh dari frekuensi tinggi yang membuat hasil pembacaan nilai tegangan sedikit lebih tinggi dibanding dengan hasil menggunakan perhitungan.

5.2.2 Hasil dan Analisis Pengukuran Tegangan Keluaran *Zero Voltage Switching* (ZVS)

Hasil pengukuran tegangan keluaran pada ZVS ditujukan untuk mengetahui dan memahami bagaimana pemberian variasi *duty cycle* dan frekuensi dan tegangan input dapat mempengaruhi pada kedua tegangan keluaran driver ZVS. Dengan memberikan variasi tersebut didapat hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.4 – 5.6 di bawah ini:

Tabel 5. 4 Hasil pengukuran tegangan keluaran ZVS dengan variasi tegangan *supply* 13 V dan frekuensi 3 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	V _{in} ZVS	V _{out 1} ZVS	V _{out 2} ZVS	Tampilan 1 hasil ukur	Tampilan 2 hasil ukur
1	25%	3,4 V	7,08 V	7,13 V		
2	50%	6,7 V	8,39 V	8,41 V		
3	70%	9,3 V	7,49 V	7,49 V		
4	100%	13,1 V	2,45 V	2,43 V		

Tabel 5. 5 Hasil pengukuran tegangan keluaran ZVS dengan variasi tegangan *supply* 24,3 V dan frekuensi 3 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	V _{in} ZVS	V _{out 1} ZVS	V _{out 2} ZVS	Tampilan 1 hasil ukur	Tampilan 2 hasil ukur
1	25%	6,5 V	12,47 V	12,46 V		
2	50%	12,6 V	15,30 V	15,27 V		
3	70%	17,5 V	13,39 V	13,32 V		

4	100%	24,3 V	3,26 V	3,18 V		
---	------	--------	--------	--------	--	---

Tabel 5. 6 Hasil pengukuran tegangan keluaran ZVS dengan variasi tegangan *supply* 24,3 V dan frekuensi 5 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	V _{in} ZVS	V _{out 1} ZVS	V _{out 2} ZVS	Tampilan 1 hasil ukur	Tampilan 2 hasil ukur
1	25%	6,9 V	13,68 V	13,67 V		
2	50%	13,0 V	16,50 V	16,45 V		
3	70%	17,8 V	14,48 V	14,37 V		
4	100%	24,3 V	3,24 V	3,25 V		

Hasil pengukuran pada ketiga tabel di atas menunjukkan bahwa hasil keluaran tegangan driver ZVS tertinggi rata - rata pada saat *duty cycle* 50% dari 4 percobaan di setiap tabelnya. Hal ini menunjukkan terjadinya keseimbangan antara waktu *switching* ON dan OFF sehingga dapat mengoptimalkan transfer energi yang dapat menghasilkan amplitudo tegangan yang tinggi. Ketika *duty cycle* terlalu kecil maupun terlalu besar (jauh dari 50%) akan terjadi ketidakseimbangan antara waktu *switching* ON dan OFF sehingga membuat tegangan lebih kecil dibanding pada saat *duty cycle* 50% dan hal ini akan mempengaruhi keluaran tegangan tinggi yang dihasilkan oleh transformator *flyback*.

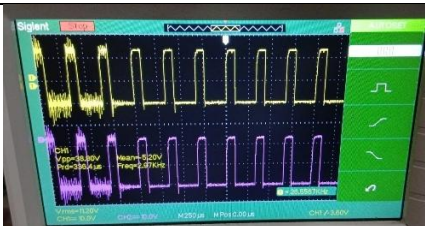
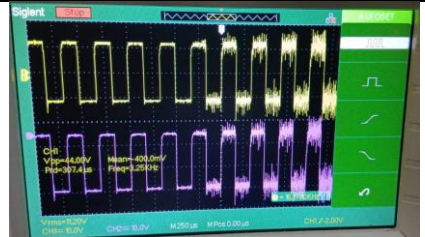
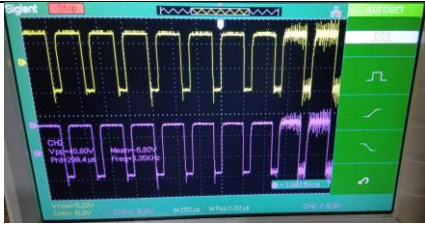
Selain itu frekuensi juga mempengaruhi besar keluaran tegangan yang dihasilkan, di mana pada tabel 5.5 dan tabel 5.6 digunakan tegangan masukan yang sama namun dengan frekuensi yang berbeda, terlihat bahwa pada saat frekuensi 3 kHz menunjukkan hasil keluaran tegangan lebih tinggi dibanding dengan frekuensi

5 kHz, hal ini menunjukkan tegangan keluaran berbanding terbalik dengan frekuensi yang diterapkan[22].

5.2.3 Hasil dan Analisis Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran *Zero Voltage Switching (ZVS)*

Pada pengujian bentuk gelombang keluaran *Zero Voltage Switching (ZVS)* dilakukan untuk mengetahui karakteristik modul ini sebagai penggerak transformator *flyback* nantinya. Dalam hasil pengujian ini dilakukan dengan menggunakan acuan parameter pada tabel 5.5 yaitu dengan menggunakan tegangan masukan 24V dan frekuensi 3 kHz seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.7 di bawah ini:

Tabel 5. 7 Bentuk gelombang keluaran driver ZVS

Percobaan	<i>Duty Cycle</i>	V _{out1} ZVS (V)	V _{out2} ZVS (V)	Bentuk Gelombang
1	25%	12,47	12,46	
2	50%	15,30	15,27	
3	70%	13,39	13,32	

4	100%	3,26	3,18	
---	------	------	------	--

Dari hasil pengujian bentuk gelombang pada kedua keluaran modul ZVS didapatkan bentuk gelombang yang seragam. Terlihat bahwa sinyal PWM yang diberikan mempengaruhi pensaklaran (*switching*) terhadap MOSFET saat kondisi ON dan OFF di dalam modul ZVS. Seperti yang di tunjukkan pada gambar 2.17 bahwa di dalam modul ZVS terdapat komponen utama yaitu 2 MOSFET IRFP250N 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. Ini terjadi karena, saat MOSFET ON, arus listrik cenderung mengalir melalui MOSFET saja dan tidak melalui kapasitor. Hal ini disebabkan resistansi MOSFET yang jauh lebih rendah dari pada kapasitor. Sebaliknya, saat MOSFET OFF, kapasitor akan terisi tegangan oleh kumparan primer transformator *flyback*. Oleh karena itu, prose *Zero Voltage Switching* (ZVS) terjadi saat MOSFET mati (*turn off*) [22].

5.2.4 Hasil dan Analisis Pengukuran Tegangan Keluaran Transformator *Flyback*

Transformator *flyback* merupakan trafo yang memiliki sifat tidak ideal dan cenderung tidak diketahui jumlah belitan di sisi sekundernya, sehingga pada perancangan ini penulis tidak dapat menghitung besaran keluaran tegangan di sisi sekundernya seperti pada persamaan 2.7. Oleh karena itu, penulis akan melakukan eksperimen/percobaan dengan memberikan belitan di sisi primer sebanyak 10 belitan, dan memberikan variasi tegangan yang telah mendapat sinyal PWM di sisi primernya.

Hasil keluaran dari driver ZVS yang terhubung pada sisi primer transformator *flyback* akan menginduksi dengan cara menghasilkan medan magnet yang mentransfer energi ke sisi sekunder yang diperkirakan memiliki ribuan lilitan pada trafo ini[25]. Dengan menggunakan probe tegangan tinggi (1:1000) didapat hasil ukur seperti yang ditunjukkan dalam beberapa tabel 5.8 – 5.10 di bawah ini:

Tabel 5. 8 Hasil pengukuran tegangan keluaran transformator *flyback* dengan variasi tegangan *supply* 13 V dan frekuensi 3 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	$V_{out\ 1}$ ZVS	$V_{out\ 2}$ ZVS	V_{out} <i>flyback</i>	Tampilan hasil ukur
1	25%	7,08 V	7,13 V	12,32 kV	
2	50%	8,39 V	8,41 V	12,85 kV	
3	70%	7,49 V	7,49 V	12,34 kV	
4	100%,	2,45 V	2,43 V	10,98 kV	

Tabel 5. 9 Hasil pengukuran tegangan keluaran transformator *flyback* dengan variasi tegangan *supply* 24,3 V dan frekuensi 3 kHz

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	$V_{out\ 1}$ ZVS	$V_{out\ 2}$ ZVS	V_{out} <i>flyback</i>	Tampilan hasil ukur
1	25%	12,47 V	12,46 V	22, 97 kV	
2	50%	15,30 V	15,27 V	24,87 kV	

3	70%	13,39 V	13,32 V	24,15 kV	
4	100%,	3,26 V	3,18 V	20,95 kV	

Tabel 5. 10 Hasil pengukuran tegangan keluaran transformator *flyback* dengan variasi tegangan *supply* 24,3 V dan frekuensi 5 kHz

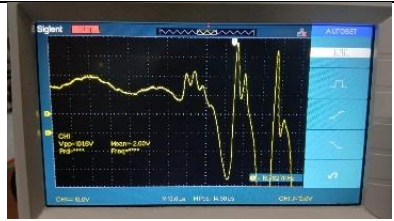
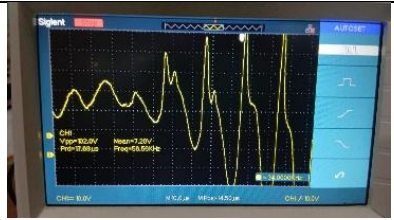
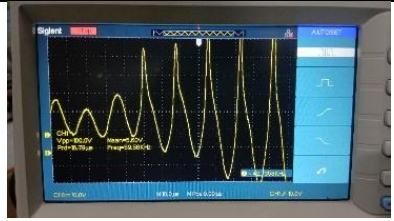
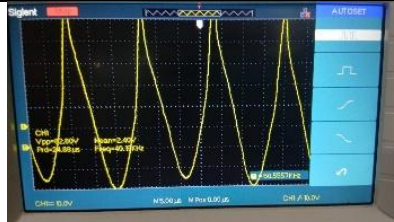
Percobaan	<i>Duty cycle</i>	V _{out 1} ZVS	V _{out 2} ZVS	V _{out} <i>flyback</i>	Tampilan hasil ukur
1	25%	13,68 V	13,67 V	20, 89 kV	
2	50%	16,50 V	16,45 V	22,43 kV	
3	70%	14,48 V	14,37 V	22,39 kV	
4	100%,	3,24 V	3,25 V	17,45 kV	

Dari hasil tegangan keluaran transformator *flyback* menunjukkan bahwa tegangan masukan dari driver ZVS mempengaruhi besar keluaran tegangan tinggi pada transformator *flyback*, semakin besar nilai tegangan masukan dari driver ZVS akan semakin tinggi pula tegangan keluaran yang dihasilkan oleh transformator *flyback*. Hal ini menunjukkan bahwa besar tegangan pada kumparan primer akan menambah energi yang akan disimpan pada inti ferit trafo dan menghasilkan medan magnet, kemudian kuat medan magnet yang disimpan ini akan menginduksi pada kumparan sekunder setelah kumparan primer mati, sehingga tegangan sisi sekunder trafo berbanding lurus dengan tegangan pada sisi primer transformator *flyback* [26].

5.2.5 Hasil dan Analisis Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran Transformator *Flyback*

Pengujian bentuk gelombang keluaran transformator *flyback* ditujukan untuk mengetahui jenis tegangan yang dihasilkan untuk pasteurisasi susu dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF). Pada pengujian gelombang, penulis akan menggunakan hasil percobaan seperti pada tabel 5.8, dikarenakan probe tegangan tinggi osiloskop memiliki kemampuan maksimal tegangan hingga 15 kV, maka dengan menggunakan tegangan masukan 13 V akan menghasilkan tegangan tinggi tidak sampai 15 kV, seperti ditunjukkan pada tabel 5.11 di bawah ini:

Tabel 5. 11 Hasil pengujian bentuk gelombang keluaran transformator *flyback*

Percobaan	Frekuensi	Duty cycle	Tegangan keluaran terukur	Bentuk gelombang
1	3kHz	25%	12,32 kV	
2	3kHz	50%	12,85 kV	
3	3kHz	70%	12,34 kV	
4	3kHz	100%	10,98 kV	

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan osiloskop pada tabel 5.10, didapat bentuk gelombang keluaran transformator *flyback* yaitu pada percobaan 1 – 3 dihasilkan bentuk gelombang menyerupai impuls petir sesuai pada gambar 2.4 (a) di mana tegangan naik dengan cepat ke nilai puncak, kemudian secara tiba-tiba sebelum mencapai bagian ekor gelombang yang panjang, terlihat tegangan mengalami penurunan yang curam secara tiba-tiba dari tegangan puncak. Sedangkan pada percobaan 4 tidak mendefinisikan gelombang impuls di mana bentuk gelombang pada percobaan 4 tidak memiliki puncak tunggal, berbeda dengan gelombang impuls (petir atau hubung buka) yang hanya memiliki satu lonjakan tegangan tunggal yang tajam, gelombang ini memiliki banyak puncak dan lembah yang berulang. Gelombang impuls, Jika diamati gelombang naik dalam waktu singkat sekali, kemudian disusul dengan penurunan yang relatif lambat menuju nol[15].

Tegangan impuls yang dihasilkan oleh transformator *flyback* ini disebabkan karena prinsip kerja antara driver ZVS dengan prinsip kerja transformator *flyback* yang mengalirkan arus secara cepat dan memutusnya secara tiba – tiba yang menyebabkan medan magnet runtuh di dalam inti trafo. Proses ini terus berulang dan terjadi sangat cepat sesuai dengan frekuensi *switching* rangkaian driver ZVS, sehingga menghasilkan lonjakan tegangan tinggi yang singkat pada keluaran transformator *flyback* seperti bentuk gelombang yang terlihat pada tabel 5.11 pada percobaan 1 – 3[26].

5.3 Persiapan Pasteurisasi Susu dengan Metode *Pulsed Electric Field* (PEF)

Pada langkah persiapan proses pasteurisasi dengan metode PEF ini berupa penentuan besar tegangan tinggi pasti dan wadah perlakuan (*treatment chamber*) yang akan digunakan serta melakukan perhitungan terhadap lebar pulsa dan kuat medan listrik yang akan diterapkan[11]. Karena pada dasarnya langkah persiapan tersebut merupakan bagian terpenting pada proses pasteurisasi dengan metode PEF yang akan diuraikan sebagai berikut:

- **Parameter Besar Tegangan**

Berdasarkan beberapa percobaan pada pengujian dan pengukuran yang telah dilakukan pada sub – sub bab 5.2.3 dengan melibatkan variasi besar tegangan

input, pengaturan *duty cycle* dan frekuensi, maka dapat diamati besar tegangan keluaran yang dihasilkan yang memenuhi untuk proses pasteurisasi susu dengan metode PEF tercatat pada tabel 5.9 dan 5.10. Terlihat bahwa hasil percobaan pada tabel 5.9 dengan menggunakan variasi tegangan input 24,3 Volt dan frekuensi 3 kHz mendapat hasil keluaran tegangan yang paling tinggi. Maka dalam parameter besar tegangan tinggi yang akan digunakan untuk proses PEF akan digunakan hasil keluaran tegangan tinggi pada tabel 5.9, karena semakin tinggi tegangan, maka semakin kuat medan listrik yang dihasilkan untuk mampu menginaktivasi bakteri pada susu.

- **Parameter Lebar Pulsa**

Pada tabel 5.9 Terdapat 4 percobaan dengan menggunakan variasi *duty cycle* yang berbeda – beda namun menggunakan besar frekuensi yang sama (3 kHz) dan didapat hasil keluaran tegangan tinggi yang berbeda juga. Parameter lebar pulsa dipengaruhi oleh modul PWM generator yang memberikan sinyal PWM pada tegangan input driver ZVS berupa *duty cycle* dan frekuensi tersebut yang dapat divariasikan. Berdasarkan variasi *duty cycle* dan frekuensi yang divariasikan, sehingga dapat dihitung lebar pulsa untuk perlakuan pasteurisasi susu dengan metode PEF dengan persamaan (2.4) sebagai berikut:

$$t_{on} = \text{duty cycle} \times \frac{1}{\text{frekuensi}}$$

$$\text{Percobaan 1: } t_{on} = 25\% \times \frac{1}{3000} = 0,000083 \text{ s} = 83 \mu\text{s}$$

$$\text{Percobaan 2: } t_{on} = 50\% \times \frac{1}{3000} = 0,00016 \text{ s} = 160 \mu\text{s}$$

$$\text{Percobaan 3: } t_{on} = 70\% \times \frac{1}{3000} = 0,00023 \text{ s} = 230 \mu\text{s}$$

$$\text{Percobaan 4: } t_{on} = 100\% \times \frac{1}{3000} = 0,00033 \text{ s} = 330 \mu\text{s}$$

Berdasarkan hasil perhitungan lebar pulsa dengan ke empat variasi *duty cycle* di atas dapat diketahui lebar pulsa yang paling cocok digunakan untuk pasteurisasi susu dengan metode PEF adalah percobaan 1 yang menghasilkan lebar pulsa singkat 83 μs , karena pada dasarnya pemberian pulsa yang efektif memiliki rentang antara 1 μs hingga 100 μs [9].

- **Desain Ruang Perlakuan (*Treatment Chamber*)**

Desain wadah perlakuan (*treatment chamber*) untuk proses pasteurisasi ini juga sangat dipertimbangkan, di mana wadah ini didesain sedemikian rupa agar dalam menghantarkan medan listrik pada susu dapat terdistribusi medan listriknya secara optimal. Wadah perlakuan milik Bapak Dr. Ir. Abdul Syakur S.T., M.T., IPU yang akan penulis gunakan yaitu berupa botol plastik yang di dalamnya terdapat 5 cabang batang elektroda dengan jarak antar elektroda 1 cm sebagai penghantar tegangan tinggi, sedangkan untuk penghantar *ground* dihubungkan pada gelas aluminium sebagai wadah botol tersebut.

- **Parameter Kuat Medan Listrik**

Dari hasil keluaran tegangan tinggi yang dihasilkan oleh transformator *flyback* nantinya akan didistribusikan melalui sebuah penghantar yaitu dengan 5 batang elektroda yang akan dikenakan pada susu. Jarak antar elektroda ini akan mempengaruhi kuat medan listrik yang dihasilkan, di mana pada desain ini memiliki jarak 1 cm antar elektroda, sehingga dengan menggunakan rumus persamaan 2.2, dapat dihitung kuat medan listrik pada tegangan keluaran transformator *flyback* dengan mengacu hasil pada tabel 5.9 yang akan digunakan untuk proses pasteurisasi susu dengan metode PEF sebagai berikut:

$E = \frac{V}{d}$, di mana V besar tegangan keluaran trafo *flyback* yang dihubungkan pada elektroda dan d jarak antar elektroda, sehingga:

$$\text{Pada } \textit{duty cycle} 25\% E = \frac{22.970}{1} = 22,9 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Pada } \textit{duty cycle} 50\% E = \frac{24.870}{1} = 24,8 \text{ kV/cm}$$

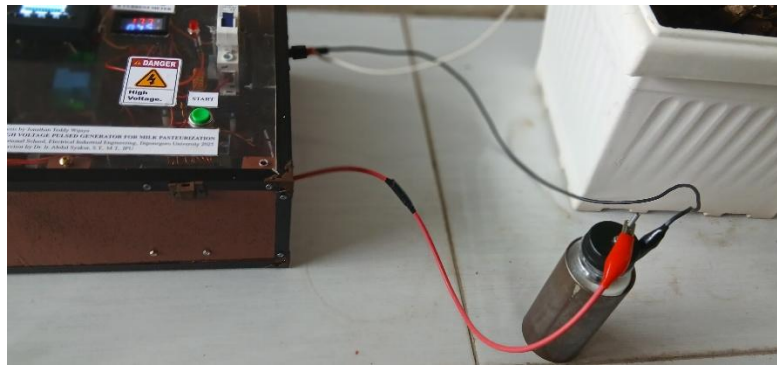
$$\text{Pada } \textit{duty cycle} 70\% E = \frac{24.150}{1} = 24,1 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Pada } \textit{duty cycle} 100\% E = \frac{20.950}{1} = 20,9 \text{ kV/cm}$$

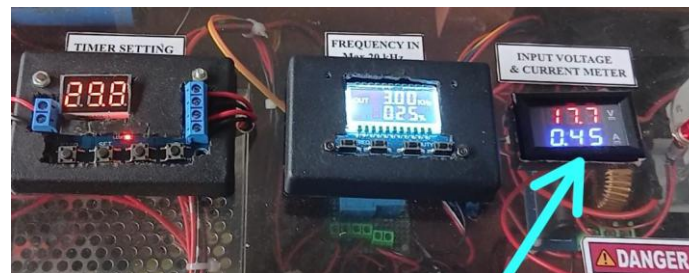
5.4 Proses Pasteurisasi Susu dengan Metode *Pulsed Electric Field* (PEF)

Proses pasteurisasi susu dengan metode PEF merupakan tahap di mana hasil keluaran tegangan tinggi diaplikasikan pada susu sapi segar yang bertujuan untuk mengurangi jumlah bakteri pada susu tersebut. Pada tahap ini perlu memperhatikan

beberapa parameter utama yang telah diperhitungkan dan disesuaikan dengan penelitian terdahulu yaitu parameter lebar pulsa dan besar tegangannya, pada proses ini digunakan hasil keluaran tegangan pada tabel 5.9 percobaan 1 karena dalam perhitungan nilai tegangan dan nilai lebar pulsa mencukupi untuk kebutuhan pasteurisasi dengan metode PEF yaitu dengan keluaran tegangan tinggi dan kuat medan listrik 22,9 kV, frekuensi 3 kHz dan lebar pulsa 83 μ s. Sesuai dengan wiring perencanaan pada gambar 3.14 maka proses pasteurisasi dapat dilakukan seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 5. 1 Proses pasteurisasi susu PEF



Gambar 5. 2 Pengukuran arus pada sisi primer transformator *flyback*

Berdasarkan gambar 5.2 di atas, selama proses pasteurisasi susu didapat arus terukur 0,45 A yang nantinya dihitung untuk efisiensi dayanya dan dalam proses ini dibagi ke dalam 2 percobaan di mana pada percobaan 1 dilakukan selama 1 menit, dan percobaan ke 2 dilakukan selama 5 menit, hal ini dilakukan agar dapat membandingkan hasil percobaan yang optimal dengan waktu proses yang berbeda.

5.5 Hasil Pasteurisasi Susu dengan Metode *Pulsed Electric Field* (PEF)

Setelah melakukan proses, kemudian susu diserahkan ke UPTD Laboratorium Semarang untuk dilakukan pemeriksaan jumlah bakteri/angka lempeng total (TPC) selama 10 hari dan didapatkan hasil proses pemeriksaan susu setelah di pasteurisasi dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) yaitu sebagai berikut:



Gambar 5. 3 Proses pemeriksaan sampel susu

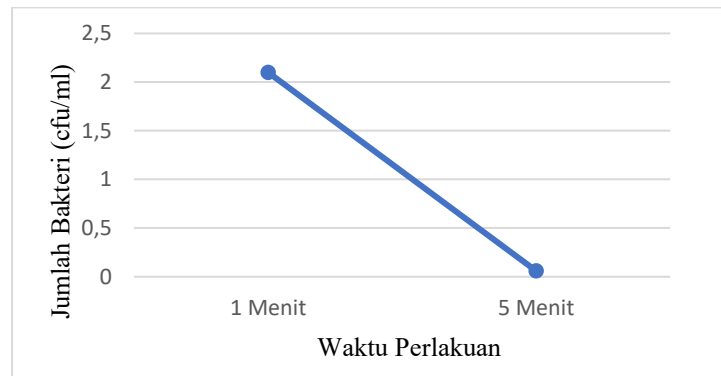
Gambar di atas merupakan proses pemeriksaan sampel susu yang dilakukan di UPTD Laboratorium Semarang dengan metode CM Fifth Ed, Chapter 6, 2015 dan didapat jumlah bakteri seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 5. 12 Hasil pemeriksaan jumlah bakteri pada susu

Percobaan	Waktu perlakuan	Suhu Susu	Tampilan hasil ukur	Jumlah bakteri Teruji	Jumlah bakteri SNI
1	1 menit	28,2°C		210.000 x 10 ⁴ cfu/gram	3 x 10 ⁴ cfu/gram
2	5 menit	28,2°C		6.400 x 10 ⁴ cfu/gram	

Pada hasil percobaan proses pasteurisasi susu dengan metode PEF didapatkan bahwa pada proses ini tidak menimbulkan panas pada susu, karena suhu yang terukur masih termasuk suhu ruang yaitu 28,2°C, sehingga kandungan nutrisi dan protein pada susu tersebut tetap terjaga[3].

Hasil pemeriksaan jumlah bakteri pada susu yang disajikan pada tabel 5.12 dapat dilihat dengan grafik hubungan antara jumlah bakteri dan waktu perlakuan pada susu sebagai berikut:



Gambar 5. 4 Grafik hubungan jumlah bakteri dan waktu perlakuan

Dari hasil pemeriksaan uji mikrobiologi (TPC) di UPTD Laboratorium Semarang yang disajikan pada tabel dan gambar diatas, pada perlakuan awal 1 menit didapat hasil pemeriksaan jumlah bakteri 210.000×10^4 cfu/gram dan pada waktu perlakuan 5 menit jumlah bakteri turun mencapai 6.400×10^4 cfu/gram, sehingga menunjukkan bahwa jumlah bakteri pada susu yang telah dipasteurisasi dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) masih jauh dengan ketentuan jumlah bakteri sesuai standar mutu SNI 01-3951-1995 yaitu 3×10^4 cfu/ml, namun dapat diketahui bahwa dalam metode 5 menit mampu mengurangi jumlah bakteri yang signifikan.

5.6 Hasil dan Analisa Perhitungan Efisiensi Daya Driver *Zero Voltage Switching* (ZVS)

Selama proses pasteurisasi susu dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF) perlu diketahui efisiensi daya yang dihasilkan dengan membandingkan daya masukan pada sisi primer dengan daya keluaran pada sisi sekunder transformator *flyback*, karna keterbatasan alat ukur daya untuk tegangan tinggi, maka dengan menggunakan persamaan 2.7 dapat dihitung terlebih dahulu arus pada sisi sekunder transformator *flyback* sebagai berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Dapat diketahui pada gambar 5.2, pada proses ini didapatkan hasil arus di sisi primer yaitu 0,45 A dengan tegangan masukan dari driver ZVS sebesar 16,9 V dan tegangan keluaran dari transformator *flyback* 22,97 kV, maka dapat dihitung:

$$\begin{aligned}\frac{17,7}{22.970} &= \frac{I_s}{0,45} \\ 22.970 I_s &= 7,965 \\ I_s &= 0,00034\text{A}\end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan arus pada sisi sekunder 0,00034 A, maka dengan persamaan 2.5 untuk daya pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}P_{in} &= V \times I = 17,7 \times 0,45 = 7,9 \text{ W} \\ P_{out} &= V \times I = 22.970 \times 0,00034 = 7,786 \text{ W}\end{aligned}$$

Maka dapat dihitung efisiensi daya selama proses pasteurisasi susu dengan menggunakan persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \\ \eta &= \frac{7,786}{7,9} \times 100\% \\ \eta &= 98,5\%\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan efisiensi daya 98,5%, hal ini menunjukkan bahwa modul *Zero Voltage Switching* (ZVS) bekerja secara optimal untuk mengantisipasi kerugian daya akibat *switching* dari transformator *flyback* yang digunakan sebagai beban pasteurisasi susu dengan metode *Pulsed Electric Field* (PEF). Penggunaan modul ZVS ini meminimalkan rugi-rugi daya dan meningkatkan efisiensi daya yang biasa terjadi ketika peralihan terjadi pada tegangan tinggi[21].