

PROPOSAL PENELITIAN

**RANGKAIAN FILTER DAYA PASIF UNTUK INVERTER SATU FASA
PADA APLIKASI SISTEM LISTRIK ENERGI BARU TERBARUKAN
SKALA RUMAH**



TUGAS AKHIR

*Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan
Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik*

Universitas Hasanuddin

Makassar

DISUSUN OLEH:

Nurwanti Aprilia Ningrum (D041 17 1317)

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2021

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL.....	iv
BAB 1.....	5
1.1 Latar Belakang	5
1.2 Deskripsi atau Perumusan Masalah.....	10
1.3 Tujuan Penelitian.....	10
1.4 Batasan Masalah.....	11
1.5 Manfaat Penelitian.....	12
BAB 2.....	13
2.1 Inverter Satu Fasa.....	13
2.2 Pengontrolan dengan SPWM pada Inverter Satu-Fasa	16
2.3 Filter Daya Pasif.....	19
2.4 Transformasi Fourier.....	21
2.5 Distorsi Harmonik.....	22
2.6 Efisiensi Daya	24
2.7 Analisis Beban dalam Rangkaian PPF	25
2.8 Trafo Penaik Tegangan	27
2.9 Penelitian yang Berkaitan.....	28
BAB 3.....	32
3.1 Gambaran Umum Sistem	32
3.2 Kerangka Kerja	33
3.3 Kriteria Pengukuran Kinerja PPF.....	39
3.4 Jadwal Kegiatan Penelitian	39
DAFTAR PUSTAKA	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Biaya listrik rata-rata (LCOE) untuk proyek PV	7
Gambar 1.2 Tingkat Perkembangan Efisiensi Sel Surya.....	7
Gambar 2.1 Konfigurasi Inverter Jembatan Penuh Satu-Fasa.....	16
Gambar 2.2 Pembangkitan Sinyal SPWM	17
Gambar 2.3 Sinyal Keluaran Gelombang Kotak	18
Gambar 2.4 Konfigurasi Filter Konvensional	19
Gambar 2.5 Sinyal Keluaran dengan Performa Filter	20
Gambar 2.6 Filter Konvensional dan Filter Baru,	20
Gambar 2.7 Grafik Representasi Domain Waktu dan Frekuensi	22
Gambar 2.8 Distorsi Gelombang Akibat Harmonisa.....	23
Gambar 2.9 Delapan Konfigurasi Beban.....	26
Gambar 2.10 Transformator dan Simbolnya	27
Gambar 3.1 Topologi Sistem Secara Keseluruhan.....	33
Gambar 3.2 Diagram alir tahapan penelitian.....	34

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batas Distorsi Tegangan	24
Tabel 2.2 Penelitian yang Berkaitan.....	29
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	39

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan energi dunia modern telah meningkat pesat karena inovasi teknologi, urbanisasi yang cepat, dan populasi yang terus bertambah. Selain itu, secara signifikan dampak perubahan iklim perlu dimitigasi dan dikurangi risikonya, salah satu caranya yaitu dengan menahan laju peningkatan temperatur global hingga di bawah 2 derajat celcius dan membatasi perubahan temperatur hingga setidaknya 1,5 derajat celcius. Hal tersebut tertuang dalam Perjanjian Paris yang telah ditandatangani oleh 194 negara dan diratifikasi oleh 141 diantaranya hingga Maret 2017, termasuk Indonesia. Salah satu komitmen dalam memenuhi perjanjian tersebut adalah penyusunan target menurunkan emisi gas rumah kaca mencapai 29% pada tahun 2030 dalam skenario tanpa aksi mitigasi atau *Business as Usual* (BAU), dan dapat ditingkatkan hingga 41% dengan kerja sama internasional [1].

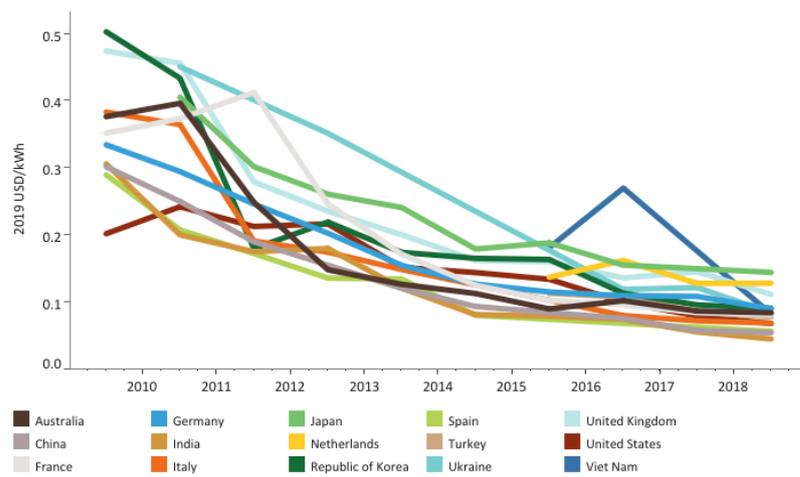
Berdasarkan target 29% dari skenario BAU 2030, sektor energi ditargetkan memiliki kontribusi sebesar 11% penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) yaitu 314 juta ton CO₂ dari total target penurunan emisi GRK 834 juta ton CO₂ [1]. Komitmen sektor energi dalam menurunkan emisi GRK dilakukan dengan menargetkan bauran energi baru terbarukan (EBT) sebesar 23% dari bauran energi primer, dan 17% efisiensi energi dari BAU energi final. Komitmen ini dituangkan pada Kebijakan Energi Nasional dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) [2].

Selanjutnya, target bauran EBT 23% pada tahun 2025 juga dituangkan dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019 – 2028. Di mana perkiraan permintaan beban listrik di Indonesia secara keseluruhan pada tahun 2019 mencapai 245 TWh dan 433 TWh pada tahun 2028 dengan pertumbuhan kebutuhan listrik mencapai 6,42%. Untuk mencapai penambahan kapasitas pembangkit yang mencapai 56.395 MW, pembangkit dengan sumber EBT ditargetkan dapat ditingkatkan hingga mencapai 30% [3].

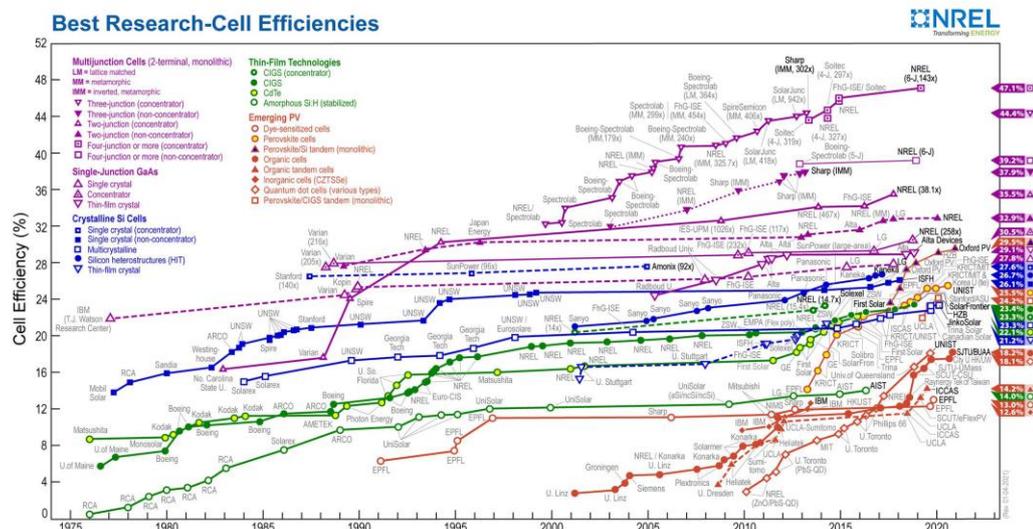
Hingga Oktober 2018, realisasi bauran energi dari EBT mengalami peningkatan 12,1% dengan realisasi 26.670,3 TWh dari total 220.817 TWh [3]. Pemerintah dan PT. PLN (Persero) dalam hal ini melakukan upaya langsung yaitu dengan membangun pembangkit listrik tenaga EBT di berbagai lokasi di Indonesia [4]. Pemerintah juga menargetkan keterlibatan masyarakat dalam peningkatan penggunaan PLT EBT skala rumah yaitu dengan utilisasi PLTS Atap (*photovoltaic rooftop*) dengan disahkannya Peraturan Menteri ESDM No. 16 Tahun 2019 tentang penggunaan sistem PLTS atap oleh konsumen PT. PLN (Persero) [5]. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan bauran EBT, dan ditargetkan pula akan terjadi penambahan penggunaan PLTS atap sekitar 3.200 MW yang setara dengan 1,6 juta pelanggan PLTS atap *on-grid* @ 2 kW [4].

Target tersebut diharapkan dapat tercapai didukung dengan harga PV *rooftop* yang diperkirakan akan semakin menurun di masa depan. Berdasarkan **Gambar 1.1**, ditunjukkan bahwa dalam kurun waktu delapan tahun biaya listrik rata-rata (*Levelised Cost of Electricity – LCOE*) dari proyek PV terus menurun menurun. Terkhusus untuk daerah Asia Tenggara, Vietnam memiliki nilai LCOE proyek PV

yang mengalami penurunan signifikan dari pertengahan tahun 2016 hingga pertengahan tahun 2018. Dari segi teknologi, sel surya menunjukkan signifikan peningkatan dari segi efisiensi sel surya yang sedang dalam proses riset, ditunjukkan pada **Gambar 1.2**. Presentasi efisiensi dari sel surya terefisien hampir mencapai 50%. Diperkirakan pada tahun ke depan, peningkatan persentase efisiensi akan semakin meningkat.



Gambar 1.1 Biaya listrik rata-rata (LCOE) untuk proyek PV skala utilitas yang baru ditugaskan menurut negara tahun 2010 – 2019 [6]



Gambar 1.2 Tingkat Perkembangan Efisiensi Sel Surya [7]

Di tahun 2018, konsumsi listrik pelanggan rumah tangga di Indonesia berkontribusi sebanyak 41,8% pada realisasi penjualan tenaga listrik Indonesia mencapai 97.035 TWh dari total penjualan 232.296 TWh. Dengan realisasi 91,8% jumlah pelanggan di Indonesia merupakan kelompok rumah tangga yaitu sebanyak 65.343.692 dari total 71.181.126 pelanggan [3]. Dengan demikian akumulasi dari adanya kebijakan yang semakin menguntungkan bagi pelanggan rumah tangga, proyeksi rata-rata pertumbuhan kebutuhan listrik mencapai 6,42% hingga tahun 2028, peningkatan kualitas sel surya, dan penurunan harga jual sel surya dapat mengimplikasikan bahwa ke depannya akan terjadi signifikansi yang besar pada realisasi peningkatan pelanggan rumah tangga yang mengutilisasi PLTS atap *on-grid*. Di mana penambahan utilisasi PLTS Atap akan berdampak langsung pada peningkatan penggunaan dan kebutuhan atas instrumen elektronika daya.

Sebagai konsekuensi bagi penetrasi hasil pembangkitan energi listrik dari sumber EBT ke dalam jaringan sistem tenaga terutama PLTS Atap, penggunaan peralatan listrik berbasis elektronika daya sudah mulai dimanfaatkan secara lebih luas di sisi beban. Teknologi semikonduktor pada industri elektronika daya menjadi dominan pada pasar peralatan rumah tangga [8]. Pemenuhan energi listrik arus bolak-balik (AC) pada beban ketika sebagian besar keluaran pembangkitan listrik dari sumber EBT merupakan tegangan arus searah (DC) menyebabkan penggunaan peralatan listrik berbasis elektronika daya sebagai pengonversi daya menjadi bagian yang sangat fundamental. Namun, penggunaan semikonduktor daya memunculkan kekhawatiran yang cukup besar terhadap isu kualitas daya pada sistem distribusi. Di mana penggunaan semikonduktor daya sebagai komponen penyaklaran pada

proses konversi merupakan sumber utama harmonisa dalam sistem tenaga listrik modern [9].

Harmonisa daya dipertimbangkan merupakan isu yang serius untuk kualitas daya sebagaimana harmonisa ini memberikan efek pada jaringan (utilitas) dan pelanggan [10]. Harmonisa pada sistem tenaga memiliki efek buruk pada sistem dan peralatan tenaga seperti kelebihan beban, pemanasan, pengurangan umur, penuaan isolator, dan banyak efek lainnya [9]. Maka dari itu, teknisi sistem tenaga harus merencanakan suatu sistem yang dapat memitigasi harmonisa yang diciptakan secara efisien untuk memenuhi standar nasional dan internasional dari level harmonisa yang telah direkomendasikan masing-masing SPLN D5.004-1: 2012 [11] dan standar IEEE-519: 2014 [12]. Berdasarkan standar tersebut, diperlukan sinyal tegangan dan arus sinusoidal yang rendah harmonisa (dengan batas 5%) pada titik pengukuran sambungan umum dari 120 V hingga 69 kV.

Salah satu pendekatan untuk memitigasi permasalahan harmonisa untuk meningkatkan kualitas daya yaitu dengan memasang rangkaian filter daya aktif atau pasif yang dirangkai baik secara seri maupun paralel (*shunt*). Rangkaian filter daya pasif merupakan rangkaian yang paling umum digunakan sebagai solusi dikarenakan keuntungannya dari segi harga komponen yang lebih ekonomis, konfigurasi yang lebih sederhana, lebih handal, dan efisien. Namun kekurangan dari PPF adalah munculnya frekuensi resonansi pada suplai AC [13].

Dari permasalahan tersebut maka dilakukan penelitian tugas akhir yang akan berfokus kepada penggunaan rangkaian filter daya pasif sebagai solusi mitigasi harmonisa pada keluaran inverter DC/AC, dengan judul “**RANGKAIAN FILTER**

DAYA PASIF UNTUK INVERTER SATU FASA PADA APLIKASI SISTEM LISTRIK ENERGI BARU TERBARUKAN SKALA RUMAH”.

1.2 Deskripsi atau Perumusan Masalah

Permasalahan pada sinyal keluaran unit inverter satu-fasa merupakan harmonisa yang muncul akibat penggunaan komponen penyaklaran. Sebagaimana harmonisa ini memberikan efek buruk pada jaringan (utilitas) dan pelanggan. Oleh karena itu dibutuhkan perangkat yang dapat memitigasi permasalahan harmonisa untuk meningkatkan kualitas daya yaitu dengan memasang rangkaian filter daya pasif yang dirangkai baik secara seri maupun paralel (*shunt*).

Adapun kriteria yang digunakan untuk menentukan keberhasilan kinerja filter daya pasif adalah *Total Harmonic Distortion* (THD) rendah, daya keluaran tinggi, efisiensi daya tinggi, dan tegangan keluaran yang dapat diterima sesuai dengan permintaan beban. Terdapat lima konfigurasi filter daya pasif yang akan dianalisis dengan melibatkan delapan konfigurasi beban yang akan dihubungkan setelah dilakukan penaikan tegangan oleh transformator.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai dari penelitian ini antara lain:

1. Menemukan rangkaian filter daya pasif baru yang dapat memenuhi kriteria kapasitas daya yang memadai, efisiensi daya lebih dari 90%, THD kurang dari 5%, dan tegangan keluaran yang sesuai dengan permintaan beban, serta memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan filter konvensional

2. Melakukan investigasi pada filter baru tersebut untuk menganalisis ketegaran filter terhadap perubahan beban sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan berupa kapasitas daya, efisiensi daya, THD, dan tegangan keluaran

1.4 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil akhir yang lebih terperinci dan terfokus, maka permasalahan yang akan dibahas akan dibatasi dengan ketentuan berikut:

1. Penelitian ini hanya memaparkan hasil pengujian, analisis, dan perancangan rangkaian filter daya pasif sesuai dengan kriteria yang ditentukan;
2. Penelitian ini hanya melakukan analisis pada level simulasi dengan *software PSpice AD Lite* [14] dan analisis dengan persamaan matematis sebagai bentuk validasi level simulasi dengan menggunakan *software MATLAB*. Dimana batasan pemodelan analisis matematis (persamaan fungsi alih dan ruang keadaan) untuk rangkaian filter menggunakan teknik *cross validation* dari hasil simulasi *PSpice* dan *MATLAB*;
3. Analisis matematis dilakukan pada rangkaian filter secara terpisah dengan analisis matematis yang dilakukan pada rangkaian beban. Selain itu analisis persamaan matematis terhadap rangkaian inverter dan transformator tidak dilakukan, melainkan hanya menggunakan *netlist* simulasi rangkaian tersebut pada *PSpice* untuk melakukan simulasi jika diperlukan bagi keluaran filter yang telah memenuhi kriteria yang ditentukan;
4. Analisis terhadap beban dilakukan dengan hanya mengambil delapan sampel konfigurasi beban yang diperkirakan dapat mewakili beban jenis lainnya.

Dalam hal ini kecendrungan pengaruh beban akan dianalisis terhadap ketegaran filter;

5. Pengujian filter pada luaran inverter hanya dilakukan untuk filter temuan baru dan minimal dua filter konvensional sebagai pembanding.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat seperti yang diuraikan berikut ini:

1. Bagi masyarakat, mahasiswa, dan staf akademik penelitian ini diharapkan kedepannya bermanfaat dalam hal pembelajaran dan sebagai bahan pra-penelitian bagi mahasiswa yang ingin melanjutkan penelitian mengenai rangkaian filter daya pasif
2. Bagi institusi Universitas Hasanuddin, penelitian ini dapat berguna sebagai referensi ilmiah dalam pengembangan perancangan dan analisis rangkaian filter daya pasif
3. Bagi peneliti terkhusus di bidang elektronika daya untuk pengolahan energi terbarukan, penelitian ini memiliki manfaat untuk menambah wawasan dan menjadi sumber acuan dalam mengembangkan rangkaian filter daya pasif dengan spesifikasi yang sesuai dengan standar industri.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Inverter Satu Fasa

Inverter adalah elemen sistem kunci yang digunakan untuk pengkondisian daya. Hampir semua sistem tata surya dalam skala apa pun menyertakan inverter dari beberapa jenis untuk memungkinkan daya digunakan di lokasi untuk peralatan bertenaga AC atau jaringan. Model inverter yang tersedia sekarang sangat efisien (efisiensi konversi daya lebih dari 95%), andal, dan ekonomis. Pada skala utilitas, tantangan utama terkait dengan konfigurasi sistem untuk mencapai operasi yang aman dan meminimalkan kerugian konversi [15].

Inverter pada pengaplikasian elektronika daya berkaitan dengan kelas rangkaian transisi daya yang dijalankan dari sumber tegangan DC atau sumber arus DC dan mengubahnya menjadi tegangan atau arus AC. Ini adalah kebalikan dari konverter AC-DC. Masukan dari inverter adalah sumber DC. Sumber utama daya masukan kemungkinan adalah sumber tegangan AC dari utilitas yang dialihkan ke DC oleh penyearah AC-DC dengan filter kapasitor dan kemudian diubah menjadi suplai AC menggunakan inverter [16]. Dengan cara ini, tegangan AC keluaran akhir memiliki perubahan amplitudo dan frekuensi daripada suplai tegangan DC masukan.

Dalam inverter sumber tegangan (*Voltage Source Inverter – VSI*), sumber tegangan merupakan suplai untuk inverter dan pada inverter sumber arus (*Current Source Inverter – CSI*), suplai ke inverter adalah sumber arus. Dalam VSI dimiliki

kendali atas 'tegangan keluaran' dan dalam CSI dimiliki kendali langsung atas 'arus keluaran'. Bentuk gelombang tegangan keluaran VSI yang ideal harus tidak bergantung pada beban yang terhubung ke inverter. Inverter DC ke AC menghasilkan bentuk gelombang keluaran AC dari sumber DC. Aplikasi VSI termasuk penggerak kecepatan yang dapat disesuaikan (*Adjustable Speed Driver – ASD*), catu daya tak terputus (*Uninterruptable Power Supplies – UPS*), filter aktif, sistem transmisi AC fleksibel (*Flexible AC Transmission System – FACTS*), kompensator tegangan, dan generator fotovoltaik [17].

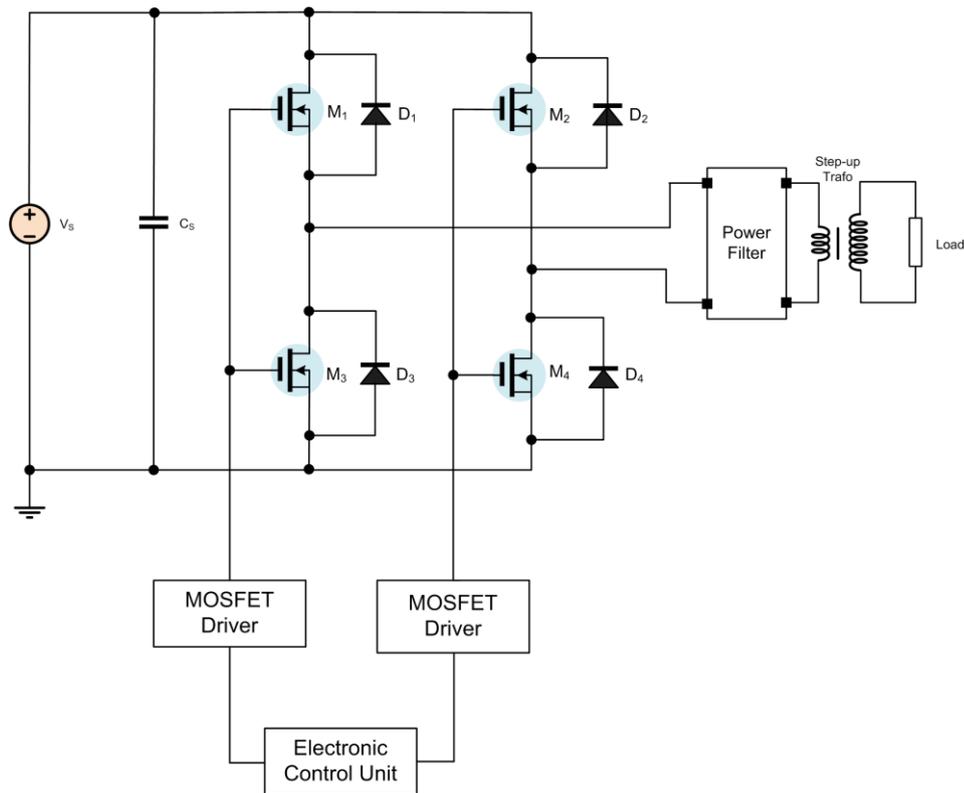
Keluaran dari inverter dapat berupa tegangan AC dengan bentuk gelombang sinus, gelombang persegi, atau modifikasi sinus. Perangkat semikonduktor yang banyak digunakan pada power inverter adalah MOSFET, IGBT, atau Thyristor. Ada dua jenis sinyal keluaran yang dapat dihasilkan oleh inverter untuk pembangkit listrik tenaga surya. Pertama, aplikasi daya rendah dan sedang dapat digunakan sinyal keluaran gelombang persegi. Kedua, aplikasi daya tinggi digunakan sinyal keluaran gelombang sinus. Keluaran dari inverter adalah tegangan AC dengan komponen nol DC. Karena itu, masih mengandung harmonik. Otak dari setiap inverter satu fasa adalah mikrokontroler sebagai pengontrol utama rangkaian dengan teknik berbeda [18].

Terdapat tiga jenis rangkaian VSI yang dikelompokkan berdasarkan keluaran tegangannya. Yaitu, inverter setengah jembatan (*half bridge*) satu-fasa, inverter jembatan penuh (*full-bridge*) satu fasa, dan inverter sumber tegangan tiga-fasa. Dalam penelitian ini, akan difokuskan untuk menggunakan inverter jembatan penuh (*full-bridge*) satu fasa. VSI jembatan penuh satu fasa ini mencakup dua konfigurasi

inverter dasar, yaitu dua inverter setengah jembatan. Bentuk gelombang keluaran adalah gelombang kotak. Ini mirip dengan bentuk gelombang keluaran dari setengah jembatan VSI. Satu-satunya perbedaan adalah tegangan keluaran. Seperti pada setengah jembatan VSI, bentuk gelombang keluaran dari jembatan penuh VSI terdiri dari harmonisa [17].

Desain dasar inverter dapat dilihat pada **Gambar 2.1**. Dalam rangkaian inverter, terdapat beberapa komponen yaitu komponen semikonduktor, komponen driver (MOSFET *driver*), dan unit pengontrolan elektronika (*electronic control unit*). M_1 - M_4 merupakan komponen semikonduktor yaitu MOSFET yang bertindak seperti perangkat penyaklaran. Penggunaan MOSFET *driver* dan *electronic control unit* dalam aplikasi elektronika daya pada inverter jembatan penuh satu-fasa digunakan sebagai rangkaian penggerak gerbang (*gate driver*) untuk menerjemahkan sinyal ON/OFF dari kontroler analog atau digital menjadi sinyal daya yang diperlukan untuk mengontrol MOSFET pada inverter [19].

Electronic control unit (ECU) berperan sebagai generator pulsa. Dilanjutkan dengan MOSFET *driver* yang berperan sebagai penguat tegangan dari ECU untuk tegangan pada gate MOSFET, sekaligus sebagai isolasi rangkaian arus lemah dan kuat. MOSFET dipilih sebagai komponen transistor yang digunakan pada rangkaian inverter dikarenakan keunggulan yang dimilikinya untuk beroperasi pada frekuensi penyaklaran yang tinggi, memiliki rugi-rugi penyaklaran dan konduksi yang cukup rendah jika dibandingkan dengan transistor lain contohnya pada IGBT, serta memiliki koefisien suhu negatif yang membuatnya semakin stabil secara termal [20].

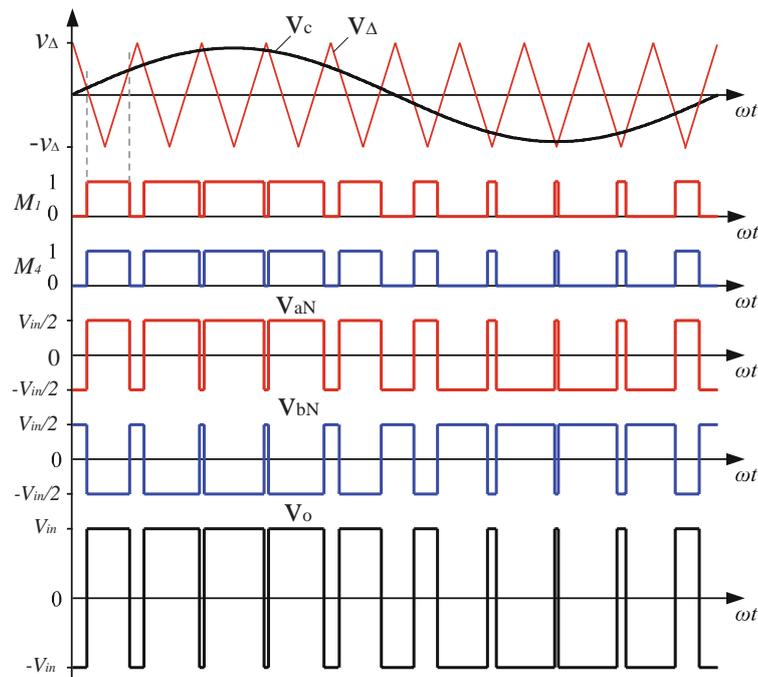


Gambar 2.1 Konfigurasi Inverter Jembatan Penuh Satu-Fasa

2.2 Pengontrolan dengan SPWM pada Inverter Satu-Fasa

Teknik PWM diadopsi dalam inverter untuk mengatur komponen semikonduktor sebagai saklar daya pada inverter dan menjaga tegangan keluaran konstan terlepas dari beban. PWM adalah proses memodifikasi lebar pulsa sehubungan dengan gelombang pembawa atau gelombang kontrol. Namun, untuk mengurangi kandungan harmonisa dari keluaran inverter, berbagai jenis PWM diuji dan diadopsi. Dalam PWM Sinusoidal (SPWM), ketika inverter sumber tegangan dinyalakan dalam mode operasi 120 derajat atau 180 derajat, bentuk gelombang keluaran yang diperoleh akan menjadi gelombang persegi. Oleh karena itu, untuk memperoleh gelombang sinus, SPWM merupakan metode yang sederhana dan efisien [21].

Dalam metode ini, gelombang sinus berperan sebagai sinyal referensi v_c dan gelombang segitiga berperan sebagai sinyal pembawa v_Δ dibandingkan untuk menghasilkan pulsa keluaran yang dibutuhkan gate pada MOSFET. Ditunjukkan oleh **Gambar 2.1**, konfigurasi inverter jembatan penuh dengan menggunakan Teknik SPWM untuk mengatur komponen semikonduktor. Prinsip dasar SPWM ditunjukkan pada **Gambar 2.2** [22].



Gambar 2.2 Pembangkitan Sinyal SPWM [22]

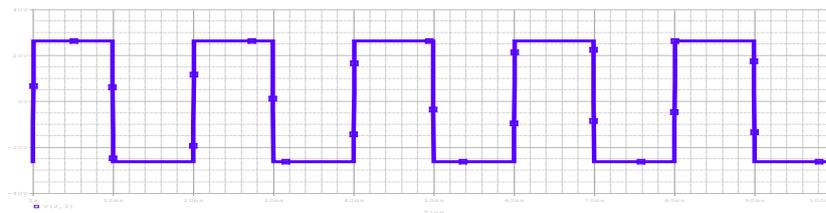
Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut: $v_c > v_\Delta = M_1, M_4$ ON. Dimana amplitudo rasio modulasi ditentukan oleh indeks modulasi m_a dengan syarat $m_a \leq 1$ [14].

$$m_a = \frac{v_c}{v_\Delta} \quad (2.1)$$

Saklar daya M_1 dan M_3 pada lengan yang sama harus memiliki keadaan yang berbeda, yaitu saat M_1 ON maka M_3 OFF. Begitu pula keadaan pada saklar daya M_2 dan M_4 . Pada saat M_1 dan M_4 ON, M_2 dan M_3 OFF tegangan keluaran $v_o = -v_i \times m_a$ ($v_{aN} = v_i/2$ dan $v_{bN} = -v_i/2$). Sebaliknya, pada saat M_2 dan M_3 ON, M_1 dan M_4 OFF tegangan keluaran $v_o = -v_i \times m_a$ ($v_{aN} = -v_i/2$ dan $v_{bN} = v_i/2$) [14]. Tegangan keluaran inverter v_o dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$v_o = (v_{aN} - v_{bN}) \cdot m_a \quad (2.2)$$

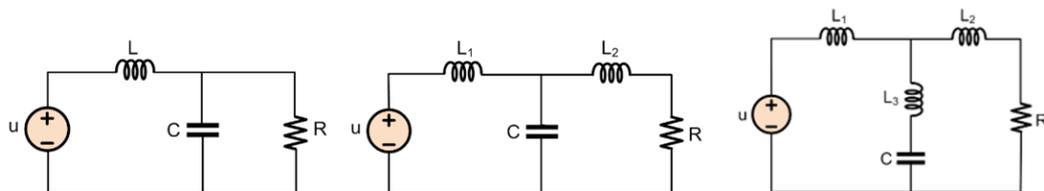
Ada beberapa pertimbangan yang harus dibuat, sebelum berangkat ke SPWM. Misalkan amplitudo gelombang sinus yang akan dimodulasi adalah A_M dan pembawa segitiga menjadi A_C . Indeks modulasi (A_M/A_C) memiliki pengaruh yang lebih besar pada tegangan keluaran. Frekuensi pembawa yang sangat tinggi memiliki keuntungan dalam mengurangi komponen harmonik karena sifatnya yang induktif. Peralihan frekuensi tinggi juga meningkatkan kerugian peralihan pada sakelar elektronik daya yang digunakan dalam inverter. Untuk alasan ini, frekuensi pembawa dipilih antara 2 kHz hingga 15 kHz yang optimal untuk digunakan [21]. Sedangkan sinyal keluaran gelombang kotak ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Sinyal Keluaran Gelombang Kotak

2.3 Filter Daya Pasif

Filter *low pass* dipasang pada keluaran inverter untuk menapis harmonik frekuensi tinggi. Harmonisa dapat menyebabkan beberapa masalah dalam keluaran inverter seperti kualitas daya, degradasi peralatan, dan kualitas bentuk gelombang sinusoidal. Ditambah lagi, sinyal keluaran inverter harus memiliki karakteristik yang baik dan dapat cocok dengan *grid*. Penapisan pasif adalah solusi konvensional yang paling sederhana. Elemen pasif seperti resistansi, induktansi dan kapasitansi digunakan oleh filter pasif untuk menapis harmonisa [23]. Jenis umum dari filter pasif dan konfigurasinya digambarkan pada **Gambar 2.4**.

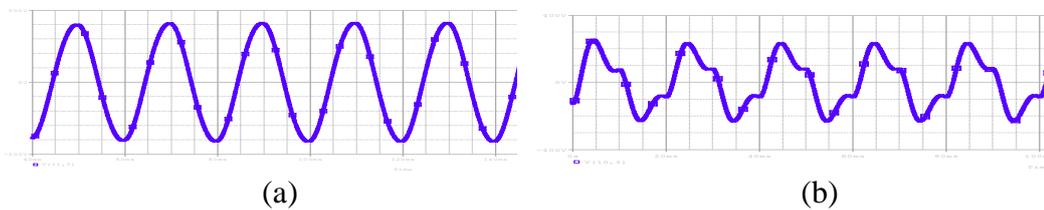


Gambar 2.4 Konfigurasi Filter Konvensional

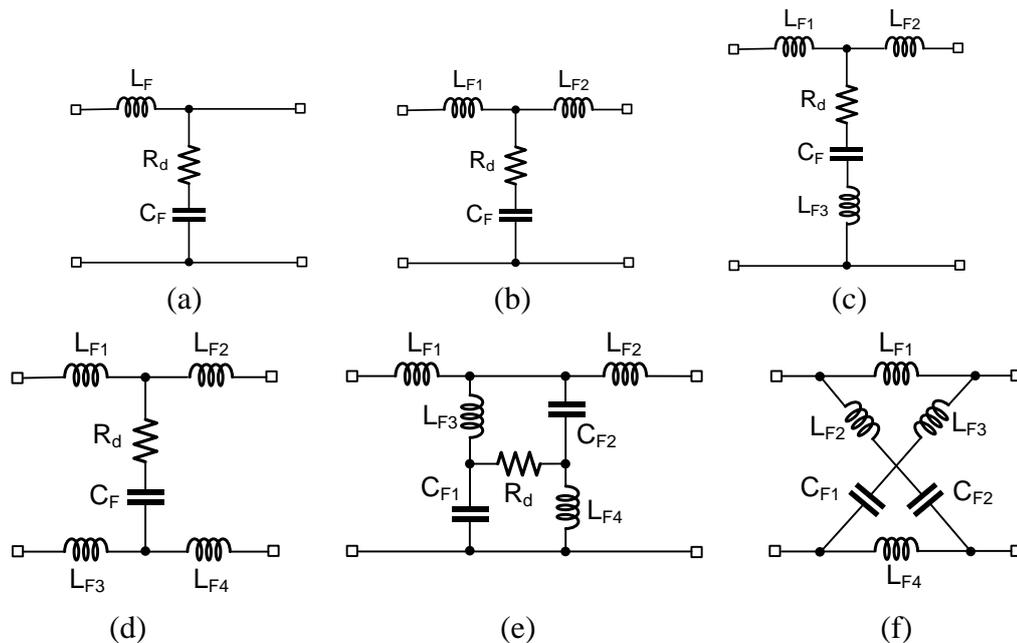
Pada penelitian ini, digunakan rangkaian filter daya pasif (PPF). Analisis terhadap filter daya pasif ini dilakukan untuk mencapai filter dengan performa baik yaitu, filter yang dapat menghasilkan sinyal keluaran berupa gelombang sinusoidal murni seperti pada **Gambar 2.5(a)** sedangkan filter dengan performa kurang baik dapat menghasilkan sinyal keluaran berupa gelombang sinusoidal yang masih memiliki distorsi harmonisa seperti pada **Gambar 2.5(b)**.

Terdapat dua parameter pada filter yang biasanya berhubungan terbalik antar satu sama lain yaitu tingkat *Total Harmonic Distortion* (THD), dan tingkat efisiensi. Jika tingkat THD rendah, tingkat efisiensinya juga rendah begitupun sebaliknya. Di

mana yang diinginkan pada keluaran modul inverter adalah tingkat THD rendah dan efisiensi yang tinggi. *Total Harmonic Distortion* (THD) adalah angka penting yang digunakan untuk mengukur tingkat harmonisa dalam bentuk gelombang tegangan atau arus. Sedangkan tingkat efisiensi merupakan nilai perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan dari filter tersebut. Apabila nilai daya keluaran suatu filter semakin mendekati nilai daya masukannya berarti tingkat efisiensinya akan semakin tinggi. Nilai THD dan efisiensi dihitung dengan menggunakan skala persentasi (%).



Gambar 2.5 Sinyal Keluaran dengan Performa Filter yang Baik dan Kurang Baik



Gambar 2.6 Filter konvensional: (a) LC, (b) *Single-tuned LCL*, (c) LLCL,

Filter Baru: (d) LLCLL, (e) LLCL *H-bridge damper*, (f) LLC-Z-Leg

Ada beberapa konfigurasi filter yang digunakan dalam berbagai aplikasi dengan distorsi harmonik, ukuran, biaya desain, dan karakteristik yang berbeda [24]. **Gambar 2.6** menunjukkan konfigurasi filter yang akan dianalisis.

2.4 Transformasi Fourier

Suatu sinyal $x(t)$ dikatakan periodik jika terdapat sebuah properti T pada seluruh variabel t seperti yang ditunjukkan pada **Pers. 2.3**. Di mana T dikenal sebagai periode dari suatu sinyal. Nilai T terkecil pada **Pers. 2.3** merupakan periode fundamental. Sinyal sinusoidal yang berarti sinyal sinus, memiliki fungsi waktu seperti yang ditunjukkan pada **Pers. 2.4**. Untuk A berupa amplitudo, f berupa frekuensi, dan ϕ berupa fasa [25].

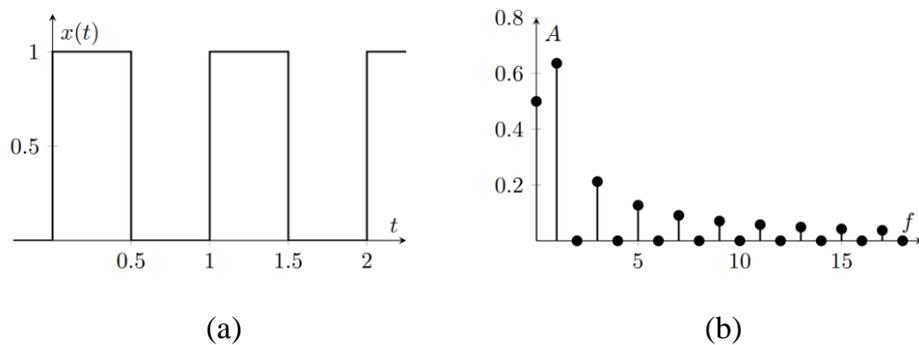
$$x(t) = x(t + T) \quad (2.3)$$

$$x(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2.4)$$

Metode transformasi digunakan untuk menyatukan pendekatan matematika dalam penelitian yang dilakukan dalam jaringan elektronika. Dengan transformasi Fourier, suatu sinyal periodik dinyatakan sebagai penjumlahan dari sinusoidal (atau yang disebut dengan total persamaan harmonisanya). Ketika $x(t)$ merupakan sinyal periodik dengan periode T , maka dapat dituliskan dalam bentuk **Pers. 2.5**. Ketika $f = 1/T$, dan untuk beberapa A_0, A_1, A_2, \dots (yang disebut dengan magnitudo), dan ϕ_1, ϕ_2, \dots (yang disebut dengan fasa). **Pers 2.5** disebut sebagai penjumlahan dari seri Fourier dari fungsi $x(t)$ [25].

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2\pi nft + \phi_n) \quad (2.5)$$

Diketahui bahwa respon dari suatu sistem pada harmonisa masukan itu sendiri merupakan harmonisa, pada frekuensi yang sama, pada dua kondisi: yaitu linieritas dan waktu yang berbeda-beda pada suatu karakteristik sistem. Kondisi seperti itu, tentunya sering ditemui. Oleh karena itu analisis Fourier dianggap penting, untuk menentukan penjelasan bagaimana variasi harmonisa terjadi di mana-mana. Transformasi Fourier digunakan untuk menerjemahkan suatu fungsi domain waktu menjadi fungsi domain frekuensi [26]. Ketika sinyal periodik direpresentasikan menjadi sebuah deret Fourier menggunakan magnitudo dan fasa, maka selanjutnya disebut dengan sinyal representasi domain frekuensi. Deret Fourier digambarkan dalam grafik stem, dengan frekuensi sebagai sumbu x, dengan hal tersebut direpresentasikan sebagai fungsi frekuensi. Ditunjukkan pada **Gambar 2.7(a)** merupakan representasi domain waktu yang ekuivalen terhadap **Gambar 2.7(b)** yang merupakan representasi domain frekuensinya setelah melalui transformasi Fourier [25].

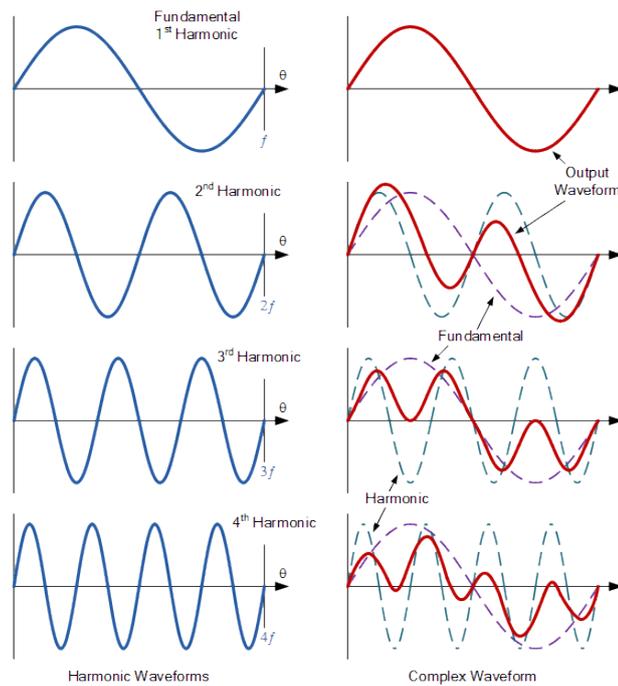


Gambar 2.7 Grafik Representasi Domain Waktu dan Frekuensi [25]

2.5 Distorsi Harmonik

Harmonisa adalah pembentukan gelombang-gelombang yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya. Gelombang tegangan maupun arus yang

awalnya berupa sinusoidal murni akan terdistorsi menjadi tidak sinusoidal murni lagi. **Gambar 2.8.** Distorsi gelombang akibat harmonisa. Harmonisa tegangan dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan *core-loss* (rugi besi). Sedangkan harmonisa arus dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan rugi-rugi tembaga. Secara keseluruhan rugi-rugi yang timbul akibat harmonisa merujuk pada terjadinya pemanasan berlebih (*overheating*) pada transformator [27].



Gambar 2.8 Distorsi Gelombang Akibat Harmonisa [28]

Distorsi harmonik total, atau THD, adalah penjumlahan dari semua komponen harmonik dari bentuk gelombang tegangan atau arus dibandingkan dengan komponen dasar gelombang tegangan atau arus:

$$THD_V = \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2)}}{V_1} \times 100\% \quad (2.6)$$

Hasil akhir dari **Pers. 2.6** adalah persentase yang membandingkan komponen harmonik dengan komponen dasar sinyal. Semakin tinggi persentasenya, semakin banyak distorsi yang muncul pada sinyal listrik. Berdasarkan standar oleh IEEE 519: 2014 [12], distorsi harmonik tegangan dan arus pada suatu sistem memiliki batasannya, yang bergantung pada setiap standar yang dipakai setiap negara. **Tabel 2.1** menunjukkan batas distorsi tegangan yang lebih detail sesuai dengan standar IEE – 519: 2014 [12]. Dalam hal ini batasan harmonik tegangan yang berlaku adalah nilai THD di bawah 5% dan batas harmonik individunya yaitu 3% dikarenakan sistem tenaga yang digunakan di bawah 69kV.

Tabel 2.1 Batas Distorsi Tegangan [12]

Tegangan Sistem	Distorsi Harmonik Individu (IHD) (%)	Distorsi Harmonik Total (THD) (%)
< 69 kV	3,0	5,0
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
> 161,00 kV	1,0	1,5

2.6 Efisiensi Daya

Efisiensi daya merupakan salah satu kriteria keberhasilan suatu filter. Dengan mempertimbangkan nilai daya keluaran dan masukan. Dalam penelitian ini, terdapat tiga titik penilaian efisiensi daya yaitu (1) pada keluaran filter terhadap masukan filter, (2) pada keluaran filter terhadap masukan inverter, dan (3) keluaran beban terhadap masukan beban. Adapun persamaan dari efisiensi daya yang dimaksudkan adalah sebagai berikut.

$$PE = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.7)$$

2.7 Analisis Beban dalam Rangkaian PPF

Beban memiliki besaran dan konfigurasi komponen yang variatif pada aplikasi rumah tangga. Dalam penelitian ini dilakukan analisis matematis dengan dua pendekatan yaitu persamaan fungsi alih dan ruang keadaan. Pada fungsi alih, kalkulasi dilakukan secara manual oleh peneliti yang selanjutnya kalkulasi persamaan ruang keadaan akan dilakukan dengan bantuan MATLAB. Di mana persamaan fungsi alih ($V_{OUT}(s)/V_{IN}(s)$) filter LC dengan beban yang direpresentasikan dengan Z dan damper ditunjukkan pada **Pers. 2.8**. Sebagai contoh, jika disubstitusikan dengan nilai pada spesifikasi komponen yaitu induktansi filter (L_F) bernilai 100uF, kapasitansi filter (C_F) bernilai 80mH, beban (R_L) bernilai 220 Ω , dan resistansi damper (R_D) bernilai 1 Ω akan menghasilkan **Pers. 2.9**.

$$H(s) = \frac{sC_F R_D Z_L + Z_L}{s^2(L_F C_F (R_D + Z_L)) + s(C_F R_D Z_L + L_F) + Z_L} \quad (2.8)$$

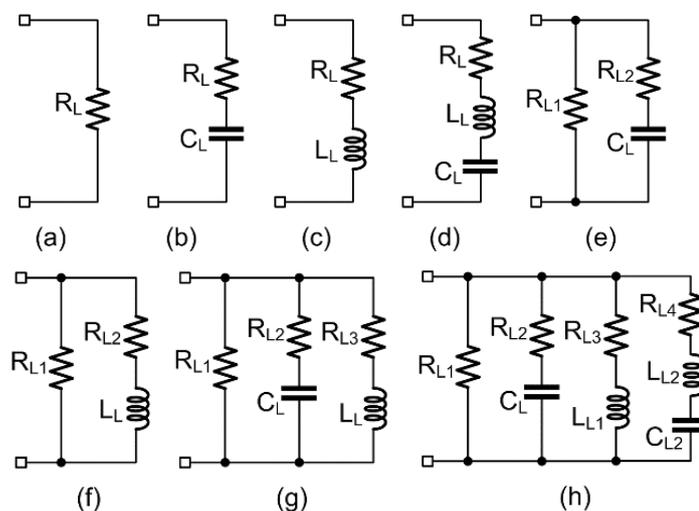
$$H(s) = \frac{17.6s + 220}{0.001768s^2 + 17.6001s + 220} \quad (2.9)$$

Melalui **Pers 2.8**, analisis matematis dengan beban akan berlangsung lebih praktis, yaitu dengan mengubah Z_L menjadi persamaan konfigurasi beban yang sesuai, ditunjukkan pada **Gambar 2.9**. Di mana dalam penelitian ini terdapat delapan jenis konfigurasi beban yang akan dianalisis sebagai berikut:

- a) Beban resistif (R)
- b) Beban resistif (R) dan kapasitif (C) yang dihubung-serikan
- c) Beban resistif (R) dan induktif (L) yang dihubung-serikan
- d) Beban resistif (R), kapasitif (C), dan induktif (L) yang dihubung-serikan dengan besaran nilai komponen yang sama

- e) Beban resistif (R_1) yang dihubung-paralelkan dengan beban resistif (R_2) dan kapasitif (C) yang dihubung-serikan
- f) Beban resistif (R_1) yang dihubung-paralelkan dengan beban resistif (R_2) dan induktif (L) yang dihubung-serikan dengan besaran nilai komponen yang sama
- g) Beban resistif (R_1) yang dihubung-paralelkan dengan beban resistif (R_2) dan kapasitif (C) yang dihubung-serikan; dan dengan beban resistif (R_3) dan induktif (L) yang dihubung-serikan
- h) Beban resistif (R_1) yang dihubung-paralelkan dengan beban resistif (R_2) dan kapasitif (C) yang dihubung-serikan; dan dengan beban resistif (R_3) dan induktif (L) yang dihubung-serikan; serta beban resistif (R_4), kapasitif (C_2), dan induktif (L_2) yang dihubung-serikan

Dimana untuk nilai pada pembebanan ditentukan berdasarkan nilai komponen yang ada di pasaran dan dipilih secara acak untuk menjadi parameter dalam simulasi.

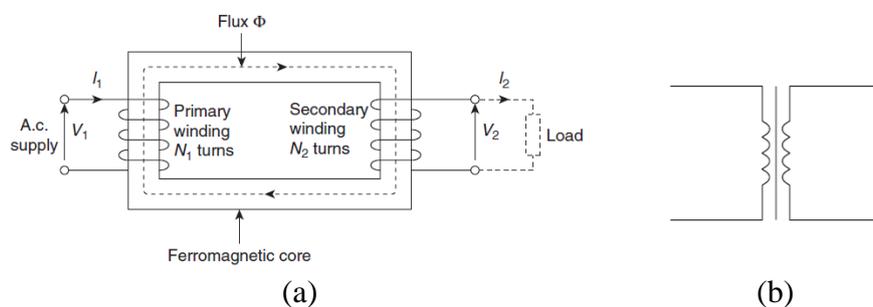


Gambar 2.9 Delapan Konfigurasi Beban

2.8 Trafo Penaik Tegangan

Transformator (atau yang biasa disebut dengan Trafo) adalah perangkat yang menggunakan fenomena induksi timbal balik untuk mengubah nilai tegangan dan arus bolak-balik. Faktanya, salah satu keunggulan utama AC transmisi dan distribusi adalah kemudahan dimana tegangan bolak-balik dapat dinaikkan atau diturunkan oleh transformator. Kerugian pada trafo umumnya rendah dan dengan demikian efisiensinya tinggi. Karena statis, trafo memiliki umur panjang dan sangat stabil. Ukuran transformator beragam, mulai dari unit miniatur yang digunakan dalam aplikasi elektronik hingga transformator daya besar yang digunakan di pembangkit listrik; prinsip operasinya sama untuk masing-masing [29].

Transformator diwakili pada **Gambar 2.10(a)** terdiri dari dua rangkaian listrik yang dihubungkan oleh inti feromagnetik bersama. Satu kumparan disebut lilitan primer yang dihubungkan ke suplai listrik, dan kumparan lainnya disebut lilitan sekunder, yang dapat dihubungkan ke beban. Simbol diagram sirkuit untuk transformator ditunjukkan pada **Gambar 2.10(b)**.



Gambar 2.10 Transformator dan Simbolnya [29]

Jika sekunder adalah rangkaian terbuka dan tegangan bolak-balik V_1 diterapkan ke belitan primer, arus kecil — disebut arus tanpa beban I_0 — mengalir,

yang membentuk fluks magnet di inti. Fluks bolak-balik ini terhubung dengan kumparan primer dan sekunder dan menginduksi di dalamnya ggl dari E_1 dan E_2 masing-masing dengan induksi timbal balik.

$$\varepsilon = -N \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (2.10)$$

Gaya gerak listrik E dalam kumparan N ternyata diberikan oleh **Pers. 2.10**, dalam satuan Volt, di mana $d\phi/dt$ adalah laju perubahan fluks. Dalam transformator yang ideal, laju perubahan fluks sama untuk primer dan sekunder.

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \quad (2.11)$$

Dengan demikian **Pers. 2.11** yaitu gaya gerak listrik yang diinduksi per belokan konstan. Dengan asumsi tidak ada kerugian, $E_1 = V_1$ dan $E_2 = V_2$. (V_1/V_2) disebut rasio tegangan dan (N_1/N_2) rasio lilitan, atau 'rasio transformasi' dari transformator. Transformator step up adalah transformator yang dapat menaikkan tegangan akibat N_2 lebih besar dibandingkan N_1 sehingga dihasilkan V_2 yang lebih besar dibandingkan V_1 [29].

2.9 Penelitian yang Berkaitan

Penelitian terkait filter konvensional dan pengembangannya banyak bermunculan terutama terkait filter LCL yang memiliki kemungkinan pengembangan yang lebih besar di masa depan. Selain itu, pengembangan pada filter LC, LLCL juga mengalami perkembangan. Bagian ini merupakan studi literatur untuk melihat keterbaruan proses penelitian dan pengembangan dari filter konvensional. Diharapkan peneliti dapat membuat suatu penelitian yang dapat

memunculkan unsur kebaruan jika dibandingkan dengan penelitian yang terkait. Dari sejumlah penelitian yang telah dibaca dan dipahami, pada **Tabel 2.2** diuraikan hasil dari beberapa penelitian mengenai filter konvensional dengan melampirkan metode yang digunakan dalam melakukan penelitian dan hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut.

Tabel 2.2 Penelitian yang Berkaitan

No	Peneliti	Judul	Thn	Metode	Hasil
[30]	Remus Beres, Xiongfei Wang, Frede Blaabjerg, Claus Leth Bak, Marco Liserre	A Review of Passive Filters For Grid-Connected Voltage Source Converters	2014	Dengan enam konfigurasi damping pasif untuk topologi Filter LCL dan Filter orde tinggi yang dapat atenuasi yang lebih tinggi untuk daya rendah dan daya tinggi	Filter LCL damping pasif dengan parameter efektivitas, tahanan, rugi-rugi damping. Evaluasi rugi-rugi damping didapatkan untuk daya rendah terbesar pada <i>case 1</i> dengan 2.89 W, terkecil pada <i>case 6</i> dengan 0.17 W. Nilai TDD di bawah 5% terbesar pada <i>case 5</i> , 3.4% dan terkecil pada <i>case 3</i> , 2.7%
[31]	Min Huang, Xiongfei Wang, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg	LLCL-Filtered Grid Converter With Improved Stability and Robustness	2015	Simulasi untuk menampilkan bode plot, dan menampilkan sinyal keluaran, dan spektrum frekuensi Dilakukan pula pengujian dengan alat di laboratorium dengan konverter grid 5kW, 400 V, dan 50-Hz	<ul style="list-style-type: none"> • Filter LLCL sederhana memunculkan resonansi pada grid. Diperkenalkan model filter LLCL baru dapat menjamin ketahanan dan stabilitas grid. Terdapat limitasi yang mengakibatkan kerugian pada sistem masih dapat diatasi • Tidak membutuhkan damper • Model baru ini dapat diaplikasikan pada filter LCL dengan melakukan sedikit modifikasi

No	Peneliti	Judul	Thn	Metode	Hasil
[32]	Mehmet Büyük, Adnan Tan, Mehmet Tümay, K. Çağatay Bayınd	Topologies, generalized designs, passive and active damping methods of switching ripple filters for voltage source inverter: A comprehensive review	2016	Review simulasi dan analisis matematis topologi SPF (filter LC, LCL, LLCL, multi-branch), damping pasif (seri, paralel, dan kompleks), damping aktif (single-loop, multi-loop, complex controller)	Pemilihan metode damping dilakukan bergantung pada beberapa parameter berdasarkan kompleksitas, performa, dan biayanya. Metode damping digunakan sebagai solusi terhadap penggunaan filter orde tinggi LC, LCL, dan LLCL yang memunculkan resonansi yang dapat membuat sistem menjadi tidak stabil.
[33]	Vinícius A. Lacerda, Denis V. Cury, Renato M. Monaro	LCL filter design for VSC-HVDC systems supplying passive grids	2017	Filter LCL dengan empat metode damping yaitu series R, shunt RC, shunt RLC, dan series RLC dengan algoritma kalkulasi multi-pair dan algoritma pilihan (<i>Selection Algorithm</i>) dan simulasi untuk menunjukkan grafik frekuensi v. impedansi, faktor kualitas daya	Dalam simulasi diperhatikan tiga kondisi operasi sistem pada beban ringan, rata-rata, dan berat. Pada kalkulasi algoritma multi-pair ditemukan 7648 pasangan solusi yang memenuhi dari segi frekuensi resonansi, atenuasi, dan regulasi tegangan. Namun solusi tersebut masih memerlukan evaluasi. Kemudian dipilih solusi global dengan algoritma pilihan. THD mencapai 2.6% pada tegangan keluaran yang telah terfilter dari awal THD 117.6% pada tegangan masukannya.

No	Peneliti	Judul	Thn	Metode	Hasil
[34]	Mohammad Hossein Mahlooji, Hamid Reza Mohammadi, Mohsen Rahimi	A review on modeling and control of grid-connected photo-voltaic inverters with LCL filter	2018	Penggunaan <i>low pass filter</i> dengan empat strategi pengontrolan PI yaitu kontrol langsung dengan umpan balik arus induktor sisi grid, dan sisi inverter, kontrol kaskade dengan umpan balik arus induktor sisi inverter sebagai loop dalam, dan arus kapasitor sebagai loop dalam. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software Matlab/Simulink	Untuk nilai THD pada kondisi tegangan grid sinusoidal berurutan adalah 4,8%; 3,3%; 1,6%; dan 2,1%. THD terendah 1,6% terjadi pada kontrol kaskade dengan umpan balik arus induktor sisi inverter sebagai loop dalam dan THD terbesar 4,8% terjadi pada kontrol langsung dengan umpan balik arus induktor sisi grid. Untuk nilai THD pada kondisi tegangan grid non-sinusoidal berurutan adalah 8,1%; 5,9%; 3,45%; dan 4,65%. THD terendah 3,45% terjadi pada kontrol kaskade dengan umpan balik arus induktor sisi inverter sebagai loop dalam dan THD terbesar 8,1% terjadi pada kontrol langsung dengan umpan balik arus induktor sisi grid.

BAB 3

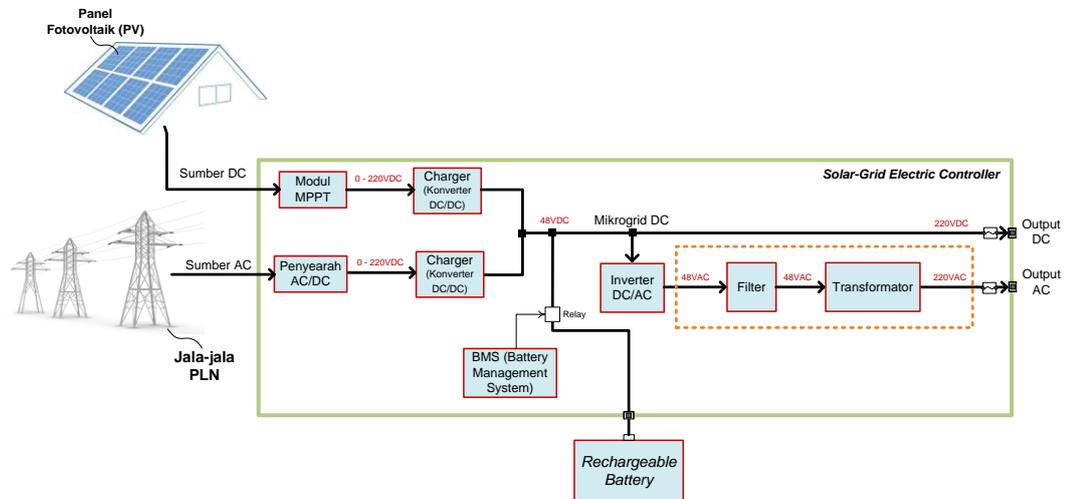
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Gambaran Umum Sistem

Sistem listrik hibrid merupakan kombinasi dari dua atau lebih perangkat konversi energi (seperti generator listrik atau perangkat penyimpanan), atau dua atau lebih bahan bakar dari perangkat yang sama, yang bila terintegrasi, dapat mengatasi keterbatasan yang mungkin terdapat pada keduanya [35]. Sistem yang digunakan dalam implementasi dari penelitian ini merupakan sistem listrik hibrid seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1**. Dalam penelitian ini, sistem secara keseluruhan yang digunakan adalah sistem listrik hibrid yang merupakan kombinasi dari sumber listrik yang berasal dari sistem jala-jala PLN dan panel fotovoltaik (PV). Sistem listrik hibrid ini dipilih untuk menanggulangi limitasi yang dimiliki oleh masing-masing sistem. Yaitu jala-jala PLN yang memiliki keterbatasan saat terjadi pemadaman listrik, dan sistem PV yang memiliki keterbatasan pada intermitensi radiasi matahari.

Secara khusus, penelitian ini merupakan salah satu bagian dari perangkat *Solar Grid Electric Controller* yang mengolah keluaran yang berasal dari *charger* (konverter DC/DC) atau yang berasal dari *Battery Management System* (BMS) bernilai 48 VDC, dengan tujuan untuk mencapai keluaran sistem 220 VAC untuk menyuplai beban berupa perangkat rumah tangga. Dalam sistem ini dilakukan konversi dua level, dimulai dari 48 VDC dikonversi oleh rangkaian inverter DC/AC

dan rangkaian filter menjadi 48 VAC dilanjutkan dengan konversi melalui transformator penaik tegangan menjadi 220 VAC.



Gambar 3.1 Topologi Sistem Secara Keseluruhan

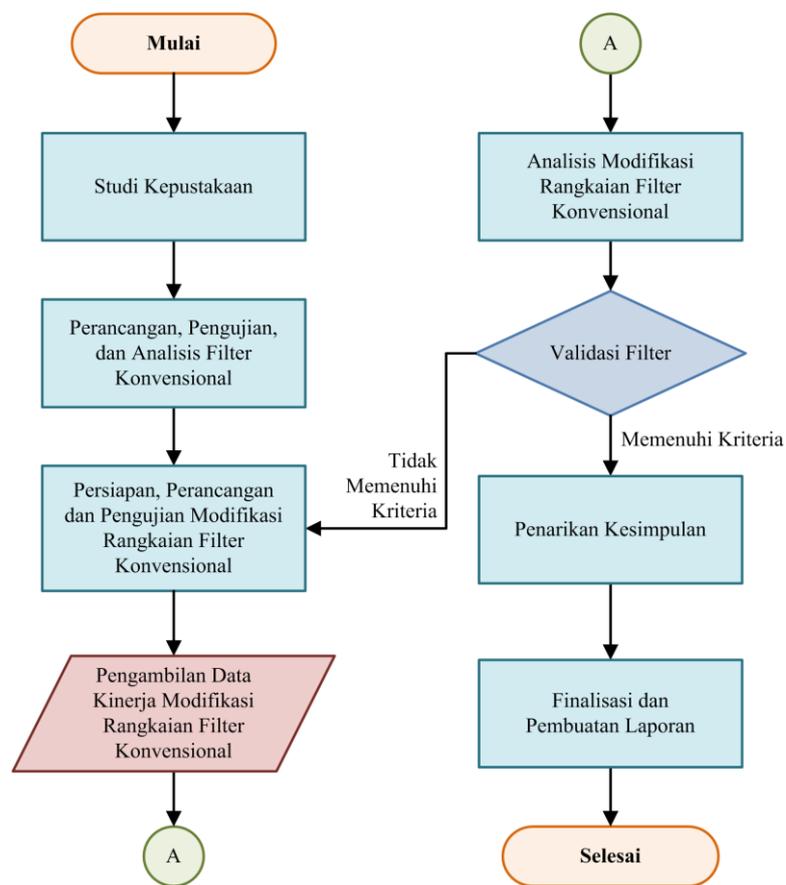
3.2 Kerangka Kerja

Keluaran utama yang ingin dicapai pada penelitian ini yaitu ditemukannya konfigurasi filter daya pasif baru yang dapat memenuhi kriteria pengukuran yang telah ditentukan. Untuk mencapai tujuan tersebut, dilakukan berbagai langkah – langkah yang sesuai dengan kerangka kerja pelaksanaan penelitian yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2**. Kerangka kerja tersebut lalu dijabarkan sebagai berikut.

3.2.1 Studi Kepustakaan

Penelitian kepustakaan dilakukan untuk membentuk landasan teori yang konkrit berdasarkan literatur terkait, sebelum melakukan perancangan, pengujian, dan analisis. Pada metode ini dilakukan untuk memahami dasar teori sebagai acuan dasar dalam menyelesaikan tugas akhir. Dasar teori yang dimaksud merujuk pada referensi berupa buku, jurnal penelitian nasional dan internasional, prosiding

konferensi, dan sumber lainnya yang dapat dipercaya terkait topik yang dibahas. Dari berbagai referensi tersebut diketahui berbagai konfigurasi filter daya pasif yang sering digunakan yang bersesuaian dengan kriteria yang telah ditentukan. Selain itu, didapatkan pula perbandingan dari rangkaian *Active Power Filter* (APF) dan *Passive Power Filter* (PPF), hingga pengaruh penggunaan resistor sebagai damper terhadap luaran dari rangkaian filter daya.



Gambar 3.2 Diagram alir tahapan penelitian

3.2.2 Perancangan, Pengujian, dan Analisis Rangkaian Filter Konvensional

Kegiatan perancangan dan analisis beberapa konfigurasi PPF dan beban melalui simulasi dengan *software PSpice AD Lite* dimaksudkan untuk memperoleh data-data aktual yang merupakan hasil pengujian. Model simulasi yang digunakan

dalam bentuk *netlist* dengan merangkaikan rangkaian simulasi dengan menggunakan *software Microsoft Visio*. Simulasi dilakukan dengan mengamati keluaran dari sinyal pada tanggapan frekuensi dan tanggapan waktu. Berikut merupakan beberapa langkah-langkah yang dilakukan dalam proses perancangan dan analisis rangkaian PPF:

a. Simulasi tanggapan frekuensi PPF tanpa beban

Pengamatan pertama dilakukan dengan simulasi terpisah antara inverter satu-fasa dengan PPF. Pengamatan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh komponen pasif (R, L, dan C) terhadap frekuensi. Dimana Setelah itu dilakukan simulasi tanggapan frekuensi pada inverter satu-fasa dengan menggunakan PPF dengan membandingkan hasil dari simulasi pada pengamatan pertama untuk mengetahui pengaruh PPF terhadap besar THD, tegangan luaran, efisiensi daya, dan daya luaran. Dengan itu dilakukan eksplorasi untuk menemukan induktansi, resistansi, dan kapasitansi yang terbaik. Analisis yang selanjutnya dilakukan adalah dengan persamaan matematis berupa fungsi alih dari masing-masing filter yang disimulasikan. Kemudian dikonversi dalam bentuk persamaan ruang keadaan dengan menggunakan *MATLAB*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik luaran dari rangkaian filter tanpa beban.

b. Simulasi tanggapan frekuensi PPF dengan beban

Pengamatan ini dilakukan bersesuaian dengan tujuan penelitian yang mengidentifikasi bahwa beban akan secara tidak langsung berperan menjadi filter, yang berarti bahwa beban juga mempengaruhi sinyal keluaran, baik itu dapat memitigasi harmonisa yang terjadi, mempertahankan nilai tegangan luaran, dan

sebagainya. Setelah pengamatan melalui simulasi dengan tanggapan waktu dan tanggapan frekuensi dilakukan pada rangkaian PPF dengan delapan konfigurasi beban di atas, akan dilakukan analisis dengan persamaan matematis yaitu fungsi alih yang juga akan dikonversi menjadi persamaan ruang keadaan dengan *MATLAB* dan selanjutnya dianalisis sebagai bentuk validasi dari luaran hasil simulasi dengan *Pspice AD Lite*. Data hasil simulasi akan disajikan dalam bentuk grafik dengan bantuan *software MATLAB*.

3.2.3 Persiapan, Perancangan, dan Pengujian Modifikasi Rangkaian Filter Konvensional

Dalam kegiatan ini, rangkaian filter konvensional dimodifikasi konfigurasinya bersesuaian dengan hasil analisis yang mengidentifikasi kecenderungan pengaruh tiap komponen pada rangkaian filter konvensional terhadap keluarannya sesuai dengan parameter pada kriteria yang telah ditentukan. Proses modifikasi dapat dilakukan dengan menambahkan komponen pasif yang ada, mengubah nilai komponen pasif yang telah disimulasikan, mengubah konfigurasi hubung seri menjadi hubung *shunt* (paralel), dan modifikasi lainnya yang dapat ditemukan ketika proses ini dilakukan.

Proses simulasi yang dilakukan akan melalui langkah-langkah yang sama dengan rangkaian filter konvensional di mana untuk menganalisis pengaruh beban akan dilakukan simulasi tanpa beban dan dengan beban, dengan melakukan analisis pada rangkaian beban sesuai pada **Gambar 2.9** dan menggunakan modifikasi rangkaian filter konvensional seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.

3.2.4 Pengambilan Data Kinerja Modifikasi Rangkaian Filter Konvensional

Berdasarkan kriteria pengukuran kinerja PPF yang dipaparkan pada **Subbab 3.3**, hasil pengujian yang telah dilakukan pada rangkaian yang telah dimodifikasi akan ditindaklanjuti dengan memperhatikan kinerjanya. Dengan proses modifikasi yang dilakukan, pengambilan data dilakukan untuk melihat kecenderungan yang terjadi akibat proses modifikasi terhadap kinerja keluaran rangkaian.

3.2.5 Analisis Modifikasi Rangkaian Filter Konvensional

Analisis matematis ini dilakukan sebagai tindak lanjut dari pengambilan data dan dengan melihat kembali hasil analisis yang dilakukan pada rangkaian filter konvensional yang telah dilakukan pada tahap awal. Hipotesis pada tahap ini adalah analisis matematis akan lebih sulit dilakukan pada modifikasi rangkaian filter konvensional akibat proses modifikasi yang dilakukan yang menyebabkan persamaan matematis menjadi semakin rumit. Maka pada tahapan ini, analisis matematis dilakukan hanya untuk sampel dari konfigurasi rangkaian filter modifikasi dan beban yang paling sederhana untuk melihat korelasi antara analisis sebelumnya dengan kecenderungan yang terjadi pada pengambilan data.

3.2.6 Validasi Filter

Rangkaian yang telah dimodifikasi dan dianalisis akan melalui proses validasi dengan menguji secara langsung rangkaian filter tersebut pada peralatan inverter satu fasa dan melihat keluarannya dengan menggunakan osiloskop. Selanjutnya akan dilakukan perbandingan keluarannya dengan keluaran dari rangkaian filter konvensional yang digunakan pada peralatan inverter satu fasa. Validasi ini dilakukan juga sebagai bentuk pembuktian dan pengambilan pengetahuan yang

lebih dalam terkait hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan jika dilakukan pengujian langsung. Hipotesis untuk tahap ini adalah akan dilakukan proses validasi yang berulang untuk menemukan keselarasan dari hasil simulasi dan analisis dengan hasil validasi filter.

3.2.7 Penarikan Kesimpulan

Pada tahap ini telah diperoleh hasil yang diharapkan merupakan solusi dari permasalahan dari subjek yang diteliti, sehingga hasil ini ditetapkan sebagai simpulan dari penelitian. Simpulan ini bertujuan untuk menyempurnakan laporan tugas akhir dari hasil yang telah diperoleh.

3.2.8 Finalisasi dan Pembuatan Laporan

Finalisasi dilakukan dengan merefleksikan hasil yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya dan akhirnya melakukan penyempurnaan pada buku laporan tugas akhir yang akan menjadi keluaran utama dari penelitian ini. Selain itu, ditargetkan pula terdapat keluaran berupa *paper* yang dapat dipublikasikan oleh jurnal nasional maupun internasional.

Serangkaian kegiatan penelitian yang telah disusun akan dirangkaikan dengan dialog secara luar jaringan (*luring*) dan dalam jaringan (*daring*) bersama pembimbing satu dan pembimbing dua dan pihak-pihak yang berkompeten di bidang terkait untuk mendapatkan pengetahuan lebih lanjut mengenai penelitian yang dilakukan. Selain itu, diskusi tersebut juga diperlukan untuk melaporkan kemajuan dan jika terdapat kendala, hambatan, maupun kesulitan selama penelitian berlangsung.

3.3 Kriteria Pengukuran Kinerja PPF

Terdapat empat kriteria pengukuran keberhasilan kinerja rangkaian filter daya pasif yang akan ditampilkan dalam grafik, yaitu:

- 1) Nilai distorsi harmonik total (*Total Harmonic Distortion – THD*) yang kurang dari 5%. Nilai ini dipilih berdasarkan standar IEEE dan SPLN.
- 2) Nilai daya keluaran yang tinggi, dalam hal ini kapasitas daya yang memadai bagi beban rumah tangga, yaitu sekitar 800 – 1.5kW
- 3) Nilai efisiensi daya yang tinggi yang hampir mencapai 100%.
- 4) Nilai tegangan keluaran yang dapat diterima sesuai dengan permintaan beban. Di mana dalam konteks pada gambaran umum sistem dijelaskan bahwa beban dalam hal ini adalah beban rumah tangga yang memiliki permintaan tegangan AC berkisar 230 – 220 Volt.

3.4 Jadwal Kegiatan Penelitian

Adapun rincian jadwal kegiatan penelitian yang akan dilakukan sesuai dengan rencana dan diagram alir penelitian ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

Agenda	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agus
Studi Kepustakaan								
Perancangan, Pengujian, dan Analisis Rangkaian Filter Konvensional								
Persiapan, Perancangan, dan Pengujian Modifikasi Rangkaian Filter Konvensional								

Agenda	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agus
Pengambilan Data Kinerja Modifikasi Rangkaian Filter Konvensional								
Analisis Modifikasi Rangkaian Filter Konvensional								
Validasi Filter								
Penarikan Kesimpulan								
Finalisasi dan Pembuatan Laporan								
Menulis Paper								

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Masripatin, E. Rachmawaty, Y. Suryanti, H. Setyawan, F. and N. Iskandar, "Strategi Implementasi NDC (Nationally Determined Contribution)," Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim, KLHK, Jakarta, 2017.
- [2] Humas EBTKE, "Upaya Pencapaian Target Penurunan Emisi GRK dari Sektor Energi," 3 Oktober 2019. [Online]. Available: ebtke.esdm.go.id/post/2019/10/08. [Accessed 18 Maret 2021].
- [3] PT. PLN (Persero), RUPTL PT. PLN (Persero) 2019 - 2028, 2019.
- [4] PT. PLN (Persero), "Diseminasi RUPTL 2019-2028 PT. PLN (Persero), Keputusan Menteri ESDM No. 39K/20/MEM/2019 Tanggal 20 Februari 2019," 2019.
- [5] Menteri ESDM Republik Indonesia, "Peraturan Menteri ESDM No. 16 Tahun 2019 tentang penggunaan sistem PLTS atap oleh konsumen PT. PLN (Persero)".
- [6] IRENA (International Renewable Energy Agency), "Renewable Power Generation Costs in 2019," Juni 2020. [Online]. Available: irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019. [Accessed 22 Maret 2021].
- [7] NREL, "Photovoltaic Research," [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. [Accessed 22 Maret 2021].
- [8] A. K. Erenoglu, A. Cicek, O. Arıkan, O. Erdinc and J. P. S. Catalao, "A New Approach for Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System Sizing Considering Harmonic Contents of Smart Home Appliances," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 3941, 2019.
- [9] M. S.F., A. Y. Abdelaziz and S. M. Ismael, "Design Practices in Harmonic Analysis Studies Applied to Industrial Electrical Power Systems," *ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 3, pp. 467-472, 2013.
- [10] B. Alamri, C. Marouchos and M. Darwish, "Optimum Design of Passive Power Filter (PPF) at the Output of 5-Level CHB-MLI Using Genetic Algorithm (GA)," in *52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Heraklion, 2017.
- [11] PT. PLN (Persero), *Power Quality (Regulasi Harmonisa, Flicker dan Ketidakseimbangan Tegangan)*, SPLN D5.004-1:2012, 2012.

- [12] IEEE 519 Working Group, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standards, 519 - 2014.
- [13] M. Izhar, C. M. Hadzer, S. M, S. Taib and S. Idris, "Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in the Distribution System," in *National Power & Energy Conference (PECon) 2004*, Kuala Lumpur, 2004.
- [14] M. H. Rashid, *SPICE for Power Electronics*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [15] A. Ahmad and S. Maqbool, "Square Wave Inverters – A performance Comparison with Pure Sine wave Inverters," in *International Journal of Research in Electronics and Computer Engineering (IJRECE)*, 2019.
- [16] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Application*, New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- [17] S. Kharjule, "Voltage Source Inverter," in *International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015)*, Pune, 2015.
- [18] D. Istardi, B. Hali and A. J. Febriansyah, "High Efficiency Single Phase Inverter Design," in *4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI 2017)*, Yogyakarta, 2017.
- [19] J. Jana and H. Saha, "Design of a High-Speed Power MOSFET Driver and Its Use in Bridge Configuration," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 428-433, 2014.
- [20] S. Pimpalkar, A. Yergude, P. Dhoke and P. Kasulkar, "Single Phase Inverter using MOSFET," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 3, pp. 4922-4926, 2020.
- [21] M. R. Ashokkumar, R. Elangovan, V. K and V. S, "Analysis of SPWM Technique for Solar Inverter," in *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 2018.
- [22] M. Rusdi, *Pembangkit Pulsa Berbasis FPGA Untuk DC/AC Inverter Satu Fasa*, Makassar: Universitas Hasanuddin, 2019.
- [23] M. Azril and N. A. Rahim, "Design Analysis of Low-Pass Passive Filter in Single-Phase Grid-Connected Transformerless Inverter," in *IEEE First Conference on Clean Energy and Technology CET*, Kuala Lumpur, 2011.
- [24] M. S. Almutairi and S. Hadjiloucas, "Harmonics Mitigation Based on the Minimization of Non-Linearity Current in a Power System," *Designs*, vol. 3, no. 29, 2019.

- [25] C.-Z. Lee, "Signals and the Frequency Domain, ENGR 40M Lecture Notes," Stanford University, 2017.
- [26] R. N. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed., Singapore: McGraw-Hill International Editions, 2000.
- [27] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, *Electrical Power System Quality-Second Edition*, The McGraw-Hill, 2004.
- [28] "Electronics Tutorials," [Online]. Available: electronics-tutorials.ws/accircuits/harmonics.html. [Accessed 17 Maret 2021].
- [29] J. Bird, *Electrical and Electronic Principles and Technology*, Oxford: Elsevier, 2007.
- [30] R. Beres, X. Wang, F. Blaabjerg, C. L. Bak and M. Liserre, "A Review of Passive Filters for Grid-Connected Voltage Source Converters," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2208-2215, 2014.
- [31] M. Huang, X. Wang, P. C. Loh and F. Blaabjerg, "LLCL-Filtered Grid Converter with Improved Stability and Robustness," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3958 - 3967, 2016.
- [32] M. Buyuk, A. Tan, M. Tumay and K. C. Bayindir, "Topologies, generalized designs, passive and active damping methods of switching ripple filters for voltage source inverter: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 47-69, 2016.
- [33] V. A. Lacerda, D. V. Coury and R. M. Monaro, "LCL filter design for VSC-HVDC systems supplying passive grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 152, pp. 160-167, 2017.
- [34] M. H. Mahlooji, H. R. Mohammadi and M. Rahimi, "A review on modeling and control of grid-connected photovoltaic inverters," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 563-578, 2018.
- [35] J. F. Manwell, "Hybrid Energy Systems," *Encyclopedia of Energy*, p. 215–229, 2004.