

Desain Dan Implementasi Inverter Satu Fasa Berbasis Teknologi Mikrokontroler Arduino Uno

Suwitno, M. Aziz, Nurhalim Dani Ali, Iswadi Hasyim Rosma, Firdaus, Noveri Lysbetti Marpaung

Fakultas Teknik, Teknik Elektro, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia
suwitno@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas desain dan implementasi inverter satu fasa berbasis mikrokontroler Arduino dengan teknik modulasi gelombang persegi. Sistem inverter dirancang untuk mengonversi sumber tegangan DC menjadi tegangan AC satu fasa dengan frekuensi 50 Hz. Arduino digunakan sebagai pembangkit sinyal kendali, sedangkan IC IR2110 berfungsi sebagai driver untuk menghubungkan sinyal logika mikro kontroler dengan piranti switching MOSFET pada rangkaian inverter. Untuk meningkatkan kualitas tegangan keluaran, diterapkan rangkaian filter kapasitor pada sisi sekunder transformator guna mereduksi komponen harmonisa yang dihasilkan oleh modulasi gelombang persegi. Pengujian dilakukan dengan variasi beban resistif berupa lampu pijar 15 W, 25 W, dan 40 W untuk mengevaluasi kestabilan tegangan dan bentuk gelombang keluaran inverter. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah pemasangan kapasitor filter, bentuk gelombang keluaran inverter mendekati sinusoidal dengan tingkat distorsi yang lebih rendah. Tegangan keluaran terukur tanpa beban sebesar 219,8 V dengan frekuensi 50 Hz, sesuai dengan standar system listrik AC. Meskipun terjadi penurunan tegangan saat beban 40W 3,1% seiring peningkatan beban, inverter tetap mampu mempertahankan kinerja yang stabil tanpa distorsi gelombang yang signifikan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa inverter satu fasa berbasis Arduino dengan modulasi gelombang persegi dan penambahan filter kapasitor dapat digunakan secara efektif untuk aplikasi daya rendah.

Kata Kunci : Inverter Satu Fasa, Arduino, Modulasi Gelombang Persegi, IR2110, Filter Kapasitor

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi elektronika daya telah mendorong peningkatan efisiensi system konversi energy listrik, terutama pada perangkat inverter (DC-AC converter). Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi elektronika mengalami kemajuan yang sangat pesat[1]. Kemajuan ini didorong oleh perkembangan ilmu pengetahuan, pendidikan, dan meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap efisiensi energi dan teknologi ramah lingkungan[2]. Inverter berfungsi mengubah tegangan DC menjadi AC dan banyak digunakan pada system *Uninterruptible Power Supply* (UPS), system tenaga surya, dan perangkat elektronik portabel. Inverter umumnya mengubah tegangan DC dari sumber seperti baterai, aki, atau panel surya menjadi tegangan AC 220V 50Hz yang dapat digunakan untuk beban listrik konvensional[3]. Konversi ini sangat penting karena banyak perangkat elektronik rumah tangga, industri, maupun system kelistrikan secara umum bekerja dengan sumber listrik arus bolak-balik[4]. Kinerja inverter sangat bergantung pada teknik modulasi pulsa yang digunakan[5].

Pada penelitian ini diterapkan, yaitu metode dasar gelombang persegi yang hanya menghasilkan satu pulsa setiap setengah siklus gelombang, sehingga sederhana namun efektif untuk aplikasi daya rendah[6]. Implementasi dilakukan dengan mikrokontroler Arduino Uno sebagai penghasil sinyal gelombang persegi, dan MOSFET IRF840N

sebagai saklar utama dalam konfigurasi *full-bridge*[7].

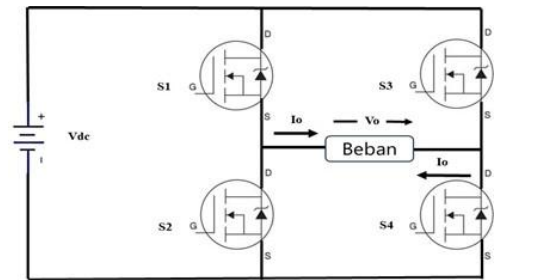
Inverter satu fasa gelombang persegi menghasilkan tegangan dengan distorsi harmonisa yang signifikan, karena bentuk gelombangnya jauh dari sinus ideal[8]. Kondisi ini menyebabkan kualitas daya menurun, timbulnya pemanasan pada peralatan, serta berkurangnya efisiensi sistem. Oleh karenanya, diperlukan desain filter kapasitor untuk meredam harmonisa dan memperhalus bentuk gelombang output agar mendekati sinusoidal[9]. Tegangan keluaran disaring oleh filter C agar menyerupai bentuk gelombang sinus murni setelah dinaikkan menjadi 220 V AC oleh transformator step-up[10]. Penelitian ini bertujuan Desain dan Implementasi Inverter Satu Fasa Berbasis Mikrokontroler Arduino dengan Teknik Modulasi Gelombang Persegi.

II. LANDASAN TEORI

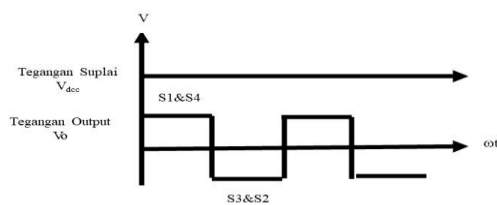
2.1. Inverter Satu Fasa Modulasi Persegi

Untuk merealisasikan rangkaian inverter satu fasa gelombang persegi seperti pada Gambar 1, diperlukan beberapa komponen utama, yaitu sumber tegangan arus searah (DC), empat buah MOSFET, serta beban resistif berupa lampu pijar. Sumber tegangan diberi nilai V_{dc} , sementara ke empat MOSFET berfungsi sebagai saklar daya yang diberi label S1, S2, S3, dan S4. Keempat saklar ini dikendalikan secara bergantian untuk menghasilkan keluaran inverter dengan frekuensi 50 Hz atau periode 0,02 detik, dan lebar pulsa

sebesar 50%. Untuk pasangan MOSFET S1 dan S4, pengaturan fase dilakukan dengan *phase delay* 0°, sedangkan saklar S3 diberi pergeseran fase sebesar 180°, sehingga besar *delay*-nya menjadi 0.01 detik. Pengaturan yang sama juga diterapkan pada saklar S2.



Gambar 1. Rangkaian inverter satu fasa full-bridge gelombang persegi[11];[12]; [13]; [14]



Gambar 2. Gelombang tegangan suplai daya dan tegangan output inverter[11];[12].

Gelombang yang ditampilkan pada Gambar 2 menunjukkan karakteristik tegangan masukan V_{dc} dan keluaran dari inverter satu fasa dengan konfigurasi *full-bridge*. Bentuk gelombang tersebut berupa pulsa persegi yang merepresentasikan pola on-off dari saklar daya. Pada saat saklar berada dalam kondisi on, arus mengalir melalui rangkaian menuju beban, sehingga menghasilkan tegangan keluaran maksimum yang mendekati V_{dc} . Sebaliknya, ketika saklar off, aliran arus terputus dan tegangan keluaran turun hingga mendekati 0 V.

Dengan sinyal modulasi yang diatur sebesar 50%, setiap siklus *switching* berlangsung selama 0,02 detik, sesuai dengan frekuensi kerja 50 Hz, di mana waktu aktif (T_{on}) dan tidak aktif (T_{off}) masing-masing sebesar 0,01 detik. Proses *switching* sepenuhnya dikendalikan oleh sinyal persegi yang dihasilkan mikrokontroler Arduino. Secara teknis, Gambar 2 memperlihatkan empat kondisi utama selama satu periode *switching*, yaitu:

1. S1–S4 aktif (on) menghasilkan tegangan + V_{dc} pada beban.
2. S2–S3 aktif (on) menghasilkan tegangan – V_{dc} (polaritas terbalik).
3. Transisi on-off setiap saklar menciptakan perubahan polaritas cepat yang menjadi ciri gelombang persegi.
4. *Dead-time* sangat kecil atau diabaikan, sehingga tegangan berpindah langsung antara + V_{dc} dan 0 V.

Pola pembangkitan tegangan ini menghasilkan bentuk gelombang persegi simetris

dengan amplitudo $\pm V_{dc}$ dan duty cycle 50%. Besarnya tegangan keluaran efektif (V_{o-rms}) untuk gelombang seperti ini dapat ditentukan melalui persamaan (2.1), [11].

$$V_{o-rms} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{dc}^2 dt = V_{dc} \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) selanjutnya dapat direpresentasikan sebagai tegangan keluaran sesaat dalam bentuk deret Fourier, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (2.2), [11].

$$v_o(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (2.2)$$

Variabel n pada persamaan tersebut menyatakan urutan harmonisa. Untuk nilai $n = 1$, Persamaan (2.2) menghasilkan komponen tegangan fundamental, yang nilai efektifnya diturunkan lebih lanjut pada persamaan (2.3) sebagai mana dijelaskan[11].

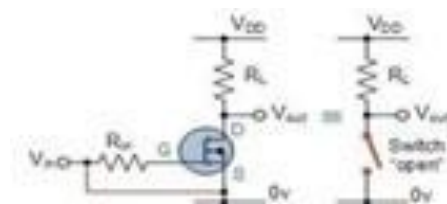
$$V_{o1} = \frac{4V_{dc}}{\pi\sqrt{2}} = 0,901V_{dc} \quad (2.3)$$

Berdasarkan Persamaan (2.3), besartegangan fundamental diperoleh sebesar $V_{o1} = 0,901 V_{dc}$, sedangkan komponen harmonisa efektif (V_h) dihitung dari selisih antara tegangan keluaran efektif total dengan komponen efektif fundamental. Hubungan tersebut dinyatakan pada persamaan berikut, sebagai mana diuraikan[11].

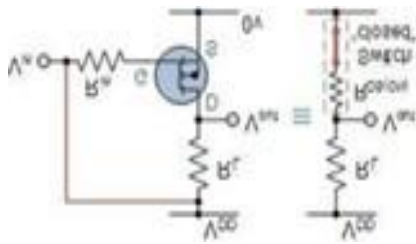
$$V_h = \sqrt{V_{o-rms}^2 - V_{o1}^2} = 0,435V_{dc} \quad (2.4)$$

2.2. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) sebagai Switch.

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) merupakan salah satu jenis transistor yang memiliki impedansi masukan (gate) sangat tinggi, sehingga dengan menggunakan MOSFET sebagai saklar elektronik (metode *switching*). Dengan menjadikan MOSFET sebagai saklar, maka dapat digunakan untuk mengendalikan beban dengan arus yang lebih tinggi. Untuk membuat MOSFET sebagai saklar, maka hanya menggunakan MOSFET pada kondisi saturasi (ON) Gambar 4 dan kondisi cut-off (OFF) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. MOSFET Dalam Kondisi Mati [15]



Gambar 4, MOSFET dalam kondisi tertutup[15]

Pada Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan rangkaian MOSFET kanal-N sebagai saklar sisi bawah (*low-side switch*) yang mengendalikan beban resistif R_L yang terhubung ke sumber tegangan searah V_{DD} . Tegangan masukan V_{in} diberikan ke terminal gerbang (*gate*) melalui resistor pembatas R_{in} , sedangkan sumber (*source*) dihubungkan ke ground (0 V) dan terminal drain terhubung ke titik keluaran V_{out} . Ketika tegangan gerbang–sumber V_{GS} dinaikkan melebihi tegangan ambang MOSFET, kanal konduksi terbentuk, sehingga resistansi drain–sumber $R_{DS(on)}$ menjadi sangat kecil; pada kondisi ini MOSFET berperilaku seperti saklar tertutup, arus mengalir dari V_{DD} melalui R_L menuju MOSFET dan V_{out} turun mendekati 0 V seperti disajikan gambar 4. Sebaliknya, ketika V_{GS} diturunkan di bawah tegangan ambang, kanal tertutup dan MOSFET berada pada kondisi cut-off sehingga arus hampir tidak mengalir, rangkaian setara dengan saklar terbuka, dan V_{out} naik mendekati V_{DD} [11]; [12];[15]. Konfigurasi ini memperlihatkan bahwa MOSFET dapat bekerja secara efektif, sebagai saklar daya berkecepatan tinggi, yang dapat dikontrol dengan sinyal masukan berlevel rendah. Sifat ini menjadi dasar pemanfaatan MOSFET dalam rangkaian inverter, converter daya, dan system elektronika lainnya yang membutuhkan control *switching* presisi dan kerugian daya yang rendah.[16];[17].

2.2.1.Kondisi OFF (cut-off)[12]

Pada MOSFET kanal-N *mode–enhancement*:

- Jika tegangan gerbang–source $V_{GS} < V_{TH}$ (tegangan ambang), kanal belum terbentuk.
- Arus drain hampir nol ($I_D = 0$) dan MOSFET ekuivalen sebagai saklar terbuka dengan resistansi yang sangat besar ($R_{DS(off)}$ nilainya sangat besar).

Secara matematis dapat ditulis pada Persamaan (2.5)

$$V_{GS} < V_{TH} \text{ dan } I_D = 0, R_{DS(off)} \rightarrow \infty \quad (2.5)$$

Definisi dan pengukuran V_{TH} serta kondisi cut-off ini dapat dijumpai pada data sheet dan application note power MOSFET

2.2.2. Kondisi ON (*saturation region*)[12]

Jika tegangan gerbang cukup besar

$$V_{GS} \geq V_{GS(on)} > V_{TH} \quad (2.6)$$

Kanal konduktif terbentuk dan MOSFET bekerja seperti resistor kecil antara drain–source (saklar tertutup). Pada daerah saturasi (V_{DS} relatif kecil), resistansi on-state dapat dihampiri[12].

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_L} \quad (2.7)$$

Rugi daya konduksi saat MOSFET ON kemudian dapat dinyatakan[12]

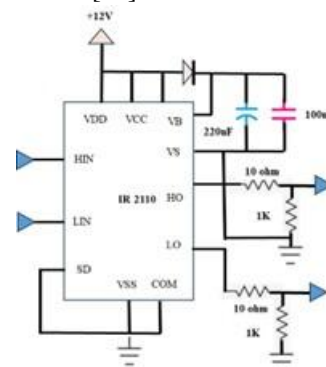
$$P_{cond} = I_D^2 R_{DS(on)} \quad (2.8)$$

Secara umum, menentukan spesifikasi arus drain Mosfet sebagai switching inverter seperti ditunjukkan Persamaan (2.9).

$$I_{D_rain} = \frac{P_{beban}}{V_{DC}} \quad (2.9)$$

2.3. Driver IR 2110

IR2110 merupakan *high- and low-side gate driver* yang dirancang untuk mengoperasikan sepasang MOSFET daya pada system dengan tegangan DC bus yang relative tinggi. Komponen ini berperan sebagai penguat sekaligus *level shifter*, yang mengubah sinyal logika berlevel rendah—seperti keluaran 5 V dari mikrokontroler Arduino—menjadi tegangan pemicu gerbang MOSFET yang lebih besar, umumnya berada pada rentang 10–12 V [18].

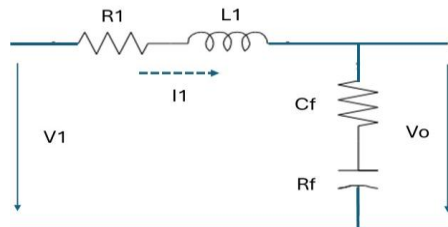


Gambar 5. Driver IR2110[18];[19];[20].

Mengacu pada Gambar 5, rangkaian driver terdiri atas dua jalur penggerak gerbang, yaitu *high-side driver* (pin HO) yang mengendalikan MOSFET sisi atas, serta *low-side driver* (pin LO) yang difungsikan untuk MOSFET sisi bawah. Selain itu, tersedia dua masukan logika (HIN dan LIN) yang telah dirancang kompatibel dengan level sinyal TTL/CMOS (sekitar 3–5V), sehingga dapat dioperasikan langsung menggunakan keluaran mikrokontroler tanpa memerlukan rangkaian penyesuaian level tambahan[19];[20].

2.4. Perancangan Filter Kapasitor (*Shunt Capacitor Filter*)

Salah satu metode sederhana dan ekonomis untuk mereduksi riak tegangan dan komponen frekuensi switching pada inverter satu fasa adalah menggunakan kapasitor shunt yang dipasang parallel dengan beban pada sisi AC inverter[21]. Gambar 6 menunjukkan diagram rangkaian ekuivalen filter LC.



Gambar 6. Diagram Rangkaian Ekuivalen filter LC[14].

dimana V_1 adalah tegangan keluaran inverter; R_1 dan L_1 adalah resistansi dan induktansi trafo; C_f dan R_f adalah kapasitansi kapasitor filter; V_o adalah tegangan output filter atau tegangan beban

Dalam makalah ini dirangkum suatu kajian mengenai perancangan filter LC. Berdasarkan rangkaian tersebut, prinsip-prinsip implementasinya diterapkan pada inverter satu fasa gelombang persegi. Dari Gambar 6 rumus filter LC dapat dituliskan[14]

$$\frac{V_o}{V_1} = \frac{\sqrt{R_f^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_f}\right)^2}}{\sqrt{(R_1 + R_f)^2 + \left(2\pi f L_1 + \frac{1}{2\pi f C_f}\right)^2}} \quad (2.10)$$

Arus riak maksimum yang muncul pada saat arus fasa melewati titik nol dapat diturunkan[14].

$$I_{riakmax} = \frac{V_{dc}}{2Lf_s} \quad (2.11)$$

Dimana $I_{riakmax}$ adalah arus riak maksimum; V_{dc} adalah tegangan DC; L adalah total induktansi filter; dan f_s adalah frekuensi pensaklaran.

Sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, berdasarkan persamaan (2.11), nilai total induktansi filter dapat ditentukan[14]

$$L = \frac{V_{dc}}{2f_s I_{riakmax}} \quad (2.12)$$

Pada penelitian ini digunakan filter kapasitor saja (*shunt capacitor filter*) yang dipasang parallel dengan beban pada sisi sekunder transformator, karena pada transformator, sudah mengandung parameter induktor L . Filter ini dipilih karena memiliki struktur yang sederhana, biaya rendah, serta efektif dalam mereduksi komponen harmonisa switching pada inverter satu fasa berdaya rendah[21];[22].

Implementasi filter kapasitor ini telah digunakan secara luas pada sistem inverter satu fasa, baik yang menggunakan metode SPWM

maupun switching gelombang persegi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kapasitor shunt dengan orde mikro farad mampu menurunkan kandungan harmonisa secara signifikan dan memperbaiki bentuk gelombang tegangan keluaran, bahkan tanpa penggunaan inductor tambahan[13];[23].

Filter kapasitor yang digunakan pada sisi sekunder transformator dirancang dengan mempertimbangkan batas arus reaktif dan daya reaktif yang masih dapat ditanggung inverter.

Dengan

P_{beban} adalah daya aktif beban (W) dan V_{rms} adalah tegangan efektif (V). Kapasitor filter C_f dapat ditentukan dengan mempertimbangkan daya reaktif yang diserap oleh C_f sebagai berikut[14]:

$$C_f = \frac{Q_c}{2\pi f V_{rms}^2} = \frac{\alpha P_{rms}}{2\pi f V_{rms}^2} \quad (2.13)$$

Dimana Q_c adalah daya reaktif yang diserap oleh kapasitor filter; P_{rms} adalah daya inverter; α adalah rasio daya (<50%); $2\pi f$ adalah frekuensi output inverter; V_{rms} adalah tegangan output efektif inverter.

Filter LC dapat dilengkapi dengan sebuah resistor peredam untuk mencegah terjadinya fenomena resonansi. Nilai resistansi tersebut sebaiknya sebesar seperti ga dari impedansi kapasitor filter[14].

$$R_f = \frac{1}{3 \times 2\pi f_c C_f} \quad (2.14)$$

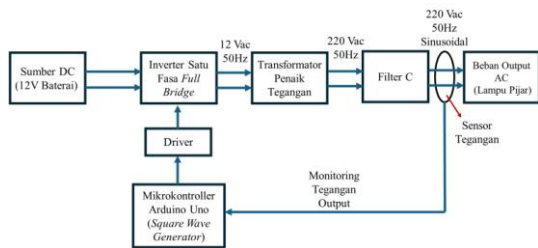
III. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan tahapan sistematis yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penelitian dan mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Bab ini menjelaskan metodologi penelitian yang meliputi penyusunan blok diagram kerja perancangan system inverter satu fasa. Tahapan utama menentukan teknik modulasi yang digunakan pada inverter.

Menentukan spesifik alat switching pada inverter, penentuan driver untuk alat *switching*, penentuan nilai induktor (L) dan kapasitor (C) pada inverter sebagai filter..Seluruh proses dirancang secara runtun berdasarkan diagram blok sistem inverter satu fasa *full-bridge* berbasis Arduino Uno.

3.1. Desain Sistem Keseluruhan

Sistem inverter yang dirancang terdiri dari beberapa blok utama seperti pada Gambar 7, yaitu sumber catu daya arus searah (DC), pengendali Arduino untuk membangkitkan gelombang persegi dan sebagai monitoring tegangan output inverter, rangkaian driver, MOSFET sebagai *switching*, *inverter full-bridge*, transformator step-up, filter LC, dan sensor tegangan serta beban.



Gambar 7. Diagram blok sistem inverter satu fasa full-bridge berbasis Arduino Uno.

3.2. Desain Rangkaian Switching MOSFET

Perancangan inverter satu fasa membutuhkan daya sebesar 100W, tegangan catu daya 12 V_{dc} dan tegangan output 220 V_{ac} , 50 Hz.

Berdasarkan Persamaan (2.9) arus input inverter adalah

$$I_{input} = \frac{100W}{12V} = 8,33A$$

Berdasarkan perhitungan numerik, pemilihan komponen saklar daya diarahkan pada MOSFET yang mampu menghantarkan arus drain minimal 10 A.

Pada penelitian ini digunakan MOSFET tipe IRF840, dengan spesifikasi utama yaitu $V_{GS} = 10 V$, $V_{GS(TH)} = 4 V$, dan $R_{DS(on)} = 0,85 \Omega$. Dengan suplai DC sebesar 12 V, arus yang mengalir melalui MOSFET pada kondisi konduksi dapat dihitung menggunakan persamaan: sumber DC 12 V, maka MOSFET mengalirkan arus sebesar:

$$I_D = \frac{V_{DS(on)}}{R_{DS(on)}} = \frac{12V}{0,85 \Omega} = 14,12 A$$

Nilai arus tersebut melebihi kemampuan maksimum IRF840 yang hanya mencapai $\pm 8 A$. Secara praktis, kondisi ini berpotensi menyebabkan kenaikan temperatur yang signifikan, sehingga MOSFET dapat mengalami kerusakan apabila dipaksakan bekerja pada arus 14A.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, konfigurasi dua buah MOSFET IRF840 disusun secara paralel digunakan, sehingga kapasitas arus total meningkat menjadi sekitar 16 A, yang lebih sesuai dengan kebutuhan sistem inverter yang dirancang.

3.3. Pemilihan Driver untuk Penggerak Switching IRF840

Pada sistem inverter berbasis mikrokontroler, sinyal modulasi yang dihasilkan oleh Arduino Uno berupa gelombang persegi dengan level logika +5 V dan -5 V. Tegangan ini hanya sesuai sebagai sinyal kendali digital, namun tidak memadai untuk mengaktifkan MOSFET daya. Pada MOSFET tipe IRF840, tegangan gate-to-source (V_{GS}) yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *fully ON* berada pada rentang 10–12 V,

sehingga sinyal keluaran Arduino tidak mampu menggerakkan MOSFET secara efisien.

Selain itu, perbedaan level tegangan antara sinyal modulasi mikrokontroler dan kebutuhan tegangan gerbang MOSFET dapat menyebabkan MOSFET beroperasi pada wilayah transisi (*linear region*), yang berpotensi menimbulkan rugi-rugi daya tinggi dan kenaikan temperatur.

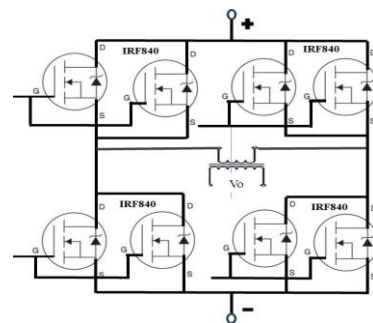
Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, diperlukan suatu rangkaian penguat sinyal atau driver gate yang mampu melakukan *level shifting* sekaligus menyediakan arus gerbang yang cukup.

Pada penelitian ini dipilih driver IR2110, yang merupakan driver *high-side* dan *low-side* berkecepatan tinggi, dirancang untuk mengendalikan MOSFET daya. Driver ini mampu menerjemahkan sinyal masukan gelombang persegi dari Arduino Uno yang berlevel $\pm 5 V$ menjadi tegangan gerbang sekitar 10–12 V, sehingga MOSFET IRF840 dapat beroperasi pada kondisi saklar penuh (*saturated switching state*).

Dengan demikian, penggunaan IR2110 tidak hanya memastikan kompatibilitas level tegangan, tetapi juga meningkatkan keandalan dan efisiensi proses pensaklaran pada sistem inverter gelombang persegi yang dikembangkan.

3.4 Desain Rangkaian Inverter Full-Bridge

Rangkaian *full-bridge* MOSFET, Pola *switching* S1–S4 (*H-bridge*), dimana setiap satu *switching* menggunakan dua paralel Mosfet untuk dapat mengatasi arus input inverter sebesar 14,12 A, sementara satu mosfet hanya mampu 8 A dan Teknik modulasi menggunakan gelombang persegi dengan frekuensi 50 Hz Adapun rangkain inverter tersebut ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Rangkaian Inverter Full-Bridge Menggunakan MOSFET.

3.5 Desain Filter Output (Jika digunakan)

Cara aman untuk inverter 100 W dalam hal membatasi arus reaktif kapasitor di 50 Hz supaya harmonisa gelombang persegi teredam, maka dipasang kapasitor paralel dengan beban dengan frekuensi *cutoff* mendekati 50 Hz sesuai Persamaan (2.13)

$$C_f = \frac{0,3 \times 100W}{2\pi \times 50Hz \times (220V)^2} = 1,974\mu F$$

Hasil perancangan, menetapkan penggunaan kapasitor dengan nilai kapasitansi sebesar 2 μF dan tegangan kerja minimum 400 VAC atau lebih.

Selanjutnya, untuk menghindari terjadinya fenomena resonansi pada rangkaian, diperlukan penambahan resistor peredam yang ditentukan berdasarkan Persamaan (2.14).

$$R_f = \frac{1}{3 \times 2\pi \times 50 \times 2 \times 10^{-6}} = 530 \text{ ohm}$$

Berdasarkan analisis rangkaian, arus yang melewati kombinasi C_f dan R_f dapat dituliskan sebagai berikut.

$$I = \frac{220V}{\sqrt{500^2 + \left(\frac{1}{100 \times 3,14 \times 2 \times 10^{-6}}\right)^2}} = 0,439A$$

Oleh karena itu, daya disipasi pada resistor 500 Ω dapat dinyatakan sebagai W_R .

$$W_R = 0,439^2 \times 500 = 8,688W$$

Berdasarkan hasil perancangan, ditetapkan penggunaan resistor peredam dengan nilai resistansi 500 Ω dan daya nominal 10 W.

3.7. Implementasi Perangkat Keras (*Hardware Implementation*)

Gambar 9 menunjukkan arsitektur perangkat keras inverter satu fasa yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno sebagai sumber sinyal modulasi. Sistem ini dirancang untuk mengonversi tegangan 12 VDC menjadi 220 VAC, 50 Hz menggunakan topologi *full-bridge inverter* dengan teknik modulasi gelombang persegi.

Arduino Uno berfungsi sebagai pusat kendali yang menghasilkan sinyal logika berupa gelombang persegi 0–5 V pada pin digital 10 dan 13. Sinyal ini merupakan pensinyalan modulasi gelombang persegi, yang dipakai untuk mengaktifkan pasangan MOSFET secara bergantian pada jembatan penuh (*full bridge*) guna menghasilkan keluaran AC.

Arduino juga terintegrasi dengan: LCD 16 $\times$ 2 untuk menampilkan informasi kerja inverter. Sensor tegangan untuk memonitor tegangan beban dan menampilkan nilai tegangan output pada LCD. Rangkaian driver IR2110 digunakan karena sinyal keluaran Arduino tidak mampu secara langsung meng-drive MOSFET daya IRF840. IR2110 melakukan: *Level shifting* sinyal 5 V Arduino menjadi tegangan gerbang 10–12 V yang dibutuhkan MOSFET.

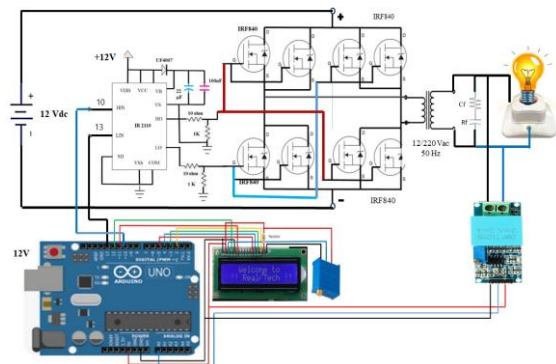
Topologi inverter menggunakan konfigurasi *full-bridge* empat MOSFET IRF840, yaitu: Dua MOSFET *high-side* dan Dua MOSFET *low-side*. MOSFET IRF840 dipilih karena: Mampu menangani tegangan drain-source hingga 500 V.

dan cocok untuk inverter berbasis transformator dengan step-up output ke 220 VAC.

Sisi primer transformator menerima sinyal gelombang persegi ± 12 V dari jembatan MOSFET. Transformator kemudian menaikkan tegangan menjadi 220 VAC pada sisi sekunder.

Keluaran sekunder transformator dihubungkan ke beban berupa lampu AC 220 V, 50m Hz. Beban ini digunakan untuk menguji kemampuan inverter dalam menghasilkan daya keluaran serta kestabilan tegangan AC.

Sensor tegangan terhubung pada sisi keluaran AC untuk mengukur nilai tegangan beban dan menyampaikan data ke Arduino untuk keperluan monitoring yang ditampilkan pada LCD.



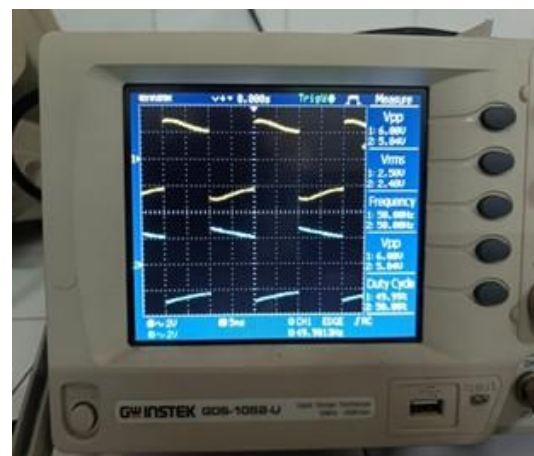
Gambar 9. Skema Keseluruhan Inverter Satu Fasa Modulasi gelombang Persegi berbasis Arduino UNO.

3.8. Metode Pengujian dan Pengambilan Data

3.8.1 Pengujian tegangan output Arduino

Pengujian sinyal kendali berupa teknik modulasi gelombang persegi dilakukan dengan mengamati keluaran pin digital Arduino menggunakan osiloskop. Probe osiloskop dihubungkan langsung ke output Arduino yang telah deprogram menghasilkan gelombang persegi 5 V pada frekuensi 50 Hz.

Pengujian ini bertujuan memverifikasi kestabilan dan kesesuaian sinyal logika yang diperlukan untuk mengendalikan rangkaian inverter. Hasil pengukuran bentuk gelombang ditampilkan pada Gambar 10.

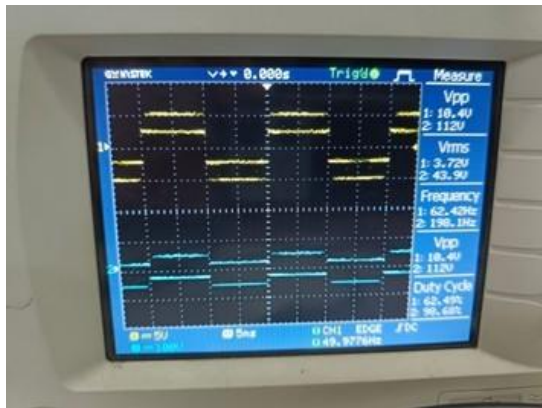


Gambar 10. Gelombang Persegi Arduino

3.8.2 Pengujian Tegangan keluaran Drive

Pada penelitian ini, IC IR2110 digunakan sebagai driver untuk menghubungkan sinyal kendali yang dihasilkan oleh Arduino dengan piranti switching MOSFET pada rangkaian inverter.

Hasil pengamatan pada keluaran IR2110 menunjukkan bahwa bentuk gelombang persegi tetap terpelihara dengan baik, dengan tegangan keluaran driver sebesar 10,4 V pada frekuensi 50 Hz, sebagai mana ditunjukkan oleh gelombang berwarna kuning pada Gambar 11.



Gambar 11. Gelombang Keluaran IR2110.

3.8.3. Pengujian Tegangan keluaran Transformator Sebelum Filter

Pengamatan gelombang keluaran inverter disisi transformator sekunder sebelum filter menghasilkan gelombang sinusoidal yang cacat. Berikut merupakan tampilan gelombang pada keluaran sekunder transformator sebelum filter hasil pengukuran menggunakan osiloskop yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Gelombang Keluaran Transformator Sebelum Filter

Pengukuran bentuk gelombang keluaran inverter pada sisi sekunder transformator sebelum proses filter menunjukkan bahwa sinyal yang dihasilkan masih mengandung distorsi harmonisa yang signifikan. Hal ini tampak pada hasil tampilan osiloskop, di mana bentuk gelombang belum menyerupai sinusoidal murni dan masih terdapat komponen gelombang tajam akibat modulasi gelombang persegi dari rangkaian *full-*

bridge. Pengamatan ini mengonfirmasi bahwa tanpa adanya rangkaian filter, keluaran inverter masih berada dalam kondisi gelombang terdistorsi dan belum layak untuk digunakan sebagai suplai beban sensitif.

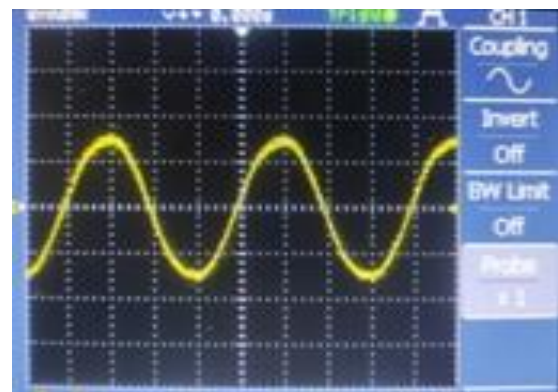
3.8.4. Pengujian Tegangan keluaran Transformator Setelah Filter

Pengujian tegangan keluaran pada sisi sekunder transformator setelah penambahan kapasitor filter menunjukkan adanya peningkatan kualitas bentuk gelombang yang signifikan dibandingkan kondisi tanpa filter.

Hasil pengamatan menggunakan osiloskop memperlihatkan bahwa gelombang keluaran telah mendekati karakteristik sinusoidal dengan tingkat distorsi yang jauh lebih rendah.

Tegangan keluaran terukur sebesar 219,8 V dengan frekuensi 50 Hz, yang sesuai dengan standar frekuensi system listrik AC. Temuan ini menunjukkan bahwa kapasitor filter berfungsi secara efektif dalam mereduksi komponen harmonisa yang dihasilkan oleh modulasi gelombang persegi pada inverter.

Bentuk gelombang hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 13.

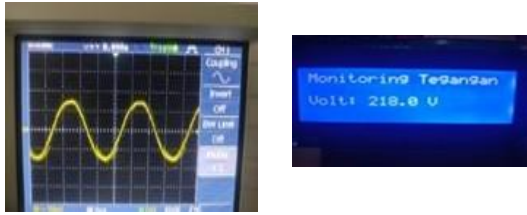


Gambar 13. Gelombang Keluaran Transformator Setelah Filter

3.8.5 Pengujian dilakukan terhadap tegangan keluaran inverter yang dilengkapi dengan rangkaian filter menggunakan beban resistif.

Pengujian inverter dilakukan dengan memberikan variasi beban berupa lampu pijar berdaya 15 W, 25 W, dan 40 W guna menilai kestabilan tegangan serta kualitas bentuk gelombang keluaran ketika inverter menyuplai beban resistif.

Hasil pengukuran yang diamati melalui oscilloscope serta tampilan LCD, sebagai mana ditunjukkan pada Gambar 14 untuk beban 15 W, Gambar 15 untuk beban 25 W, dan Gambar 16 untuk beban 40 W, memperlihatkan bahwa bentuk gelombang keluaran inverter tetap stabil dan tidak mengalami perubahan yang berarti pada setiap kondisi pembebanan.

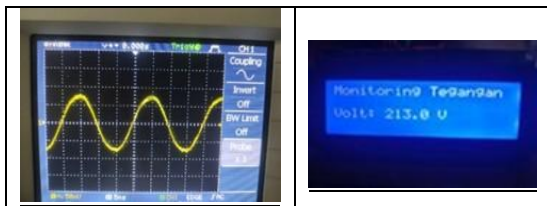


Gambar 14. Hasil output inverter+ Filter beban resistif 15 W

Bentuk gelombang keluaran tetap menunjukkan karakteristik sinusoidal sebagai hasil kerja rangkaian filter, meskipun terjadi penurunan amplitudo yang relative kecil seiring dengan bertambahnya daya beban.



Gambar 15. Hasil output inverter+ Filter beban resistif 25 W



Gambar 16. Hasil output inverter+ Filter beban resistif 40 W

Bentuk dan amplitudo gelombang pada Gambar 13, 14 dan 15, menunjukkan bahwa inverter mampu menjaga kinerja yang stabil dalam menyuplai energy listrik pada berbagai variasi beban resistif tanpa menimbulkan distorsi gelombang yang signifikan.

Hasil pemantauan tegangan keluaran melalui tampilan LCD menunjukkan bahwa terjadi penurunan tegangan inverter seiring dengan peningkatan daya beban resistif. Pada kondisi pembebanan menggunakan lampu pijar 15 W, tegangan keluaran tercatat sebesar 218 V. Ketika daya beban ditingkatkan menjadi 25 W, tegangan menurun menjadi 215 V, sedangkan pada pembebanan 40 W tegangan kembali berkurang hingga 213 V.

Pola penurunan tegangan ini menunjukkan adanya pengaruh pembebanan terhadap kemampuan inverter dalam mempertahankan kestabilan tegangan, yang merupakan karakteristik umum pada inverter dengan kapasitas daya yang terbatas.

IV. HASIL DAN PEMBEHASAN

4.1. Pengujian Sinyal Kendali Arduino

Pengujian awal dilakukan pada sinyal kendali yang dihasilkan oleh mikrokontroler Arduino Uno.

Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan osiloskop (Gambar 10), sinyal keluaran Arduino berbentuk gelombang persegi dengan level tegangan 0–5 V dan frekuensi 50 Hz.

Bentuk gelombang yang stabil dan simetris ini menunjukkan bahwa Arduino mampu menghasilkan sinyal modulasi gelombang persegi sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan untuk mengendalikan rangkaian inverter satufasa.

Stabilitas frekuensi dan duty cycle sebesar 50% menjadi factor penting dalam memastikan proses switching MOSFET berlangsung secara seimbang pada kedua setengah siklus gelombang.

4.2. Pengujian Tegangan Keluaran Driver IR2110

Hasil pengujian pada keluaran driver IR2110 menunjukkan bahwa sinyal gelombang persegi dari Arduino berhasil diperkuat dan mengalami level shifting dari 5 V menjadi sekitar 10,4 V dengan frekuensi tetap 50 Hz (Gambar 11).

Tegangan ini telah memenuhi syarat minimum tegangan *gate-to-source* (V_{GS}) MOSFET IRF840 agar dapat beroperasi pada kondisi saklar penuh (ON).

Penggunaan driver IR2110 terbukti efektif dalam meningkatkan keandalan switching serta mencegah MOSFET bekerja pada wilayah linear yang berpotensi menimbulkan rugi daya tinggi.

4.3. Pengujian Tegangan Keluaran Transformator Sebelum Filter

Pengamatan pada sisi sekunder transformator sebelum pemasangan filter menunjukkan bahwa bentuk gelombang keluaran masih mengalami distorsi harmonisa yang signifikan (Gambar 12). Gelombang belum menyerupai sinusoidal murni dan masih mengandung sudut tajam akibat karakteristik modulasi gelombang persegi dari inverter *full-bridge*.

Kondisi ini menegaskan bahwa tanpa rangkaian filter, tegangan keluaran inverter belum layak digunakan untuk mensuplai beban sensitif, terutama peralatan elektronik rumah tangga.

4.4. Pengujian Tegangan Keluaran Setelah Filter Kapasitor

Setelah pemasangan kapasitor filter pada sisi sekunder transformator, bentuk gelombang keluaran mengalami perbaikan yang signifikan (Gambar 13). Gelombang keluaran mendekati bentuk sinusoidal dengan distorsi yang jauh lebih rendah dibandingkan kondisi sebelum filtrasi.

Frekuensi keluaran tetap stabil pada 50 Hz, yang menunjukkan bahwa filter kapasitor berfungsi efektif dalam meredam harmonisa frekuensi tinggi tanpa mengganggu komponen fundamental tegangan AC.

4.5. Pengujian Inverter dengan Variasi Beban

Pengujian lanjutan dilakukan dengan variasi beban resistif berupa lampu pijar 15 W, 25 W, dan 40 W. Hasil pengamatan osiloskop dan LCD

(Gambar 14, 15, dan 16) menunjukkan bahwa bentuk gelombang keluaran inverter tetap konsisten dan tidak mengalami distorsi signifikan pada seluruh variasi beban.

Pengukuran tegangan menggunakan LCD menunjukkan adanya penurunan tegangan seiring meningkatnya beban, yaitu:

- 218 V pada beban 15 W ($\Delta V_o = 0,8\%$)
- 215 V pada beban 25 W ($\Delta V_o = 2,1\%$)
- 213 V pada beban 40 W ($\Delta V_o = 3,1\%$)

Jatuh tegangannya adalah 0,8%, 2,1% dan 3,1% dari inverter tanpa beban. Penurunan ini disebabkan oleh keterbatasan daya inverter serta rugi-rugi pada transformator dan MOSFET, namun masih berada dalam batas toleransi untuk aplikasi daya rendah.

4.6. Analisis Kinerja Sistem

Secara keseluruhan, inverter satu fasa berbasis Arduino dengan modulasi gelombang persegi ini mampu bekerja sesuai dengan tujuan perancangan. Penggunaan filter kapasitor terbukti meningkatkan kualitas gelombang keluaran secara signifikan, meskipun tidak sepenuhnya menghasilkan sinus murni.

Sistem ini cocok diaplikasikan pada perangkat berdaya rendah yang tidak terlalu sensitive terhadap distorsi harmonisa, seperti lampu pijar dan beban resistif sederhana.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Riau yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Yaozong Zhong, Jinwei Zhang, Shan Wu, Lifang Jia, Xuelin Yang, Yang Liu, Yun Zhang, Qian Sun. 2022, *A Review On The Gan-On-Si Power Electronic Devices*. Fundamental Research 2 (2022): 462–475. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.11.028>.
- [2]. Niravkumar Dhameliya, 2022, *Power Electronics Innovations: Improving Efficiency And Sustainability In Energy Systems*. Asia Pacific Journal of Energy and Environment. Volume 9. Number 2. Pp.71-80.
- [3]. Prof. A. A. Patil, Gouri Chougale, Sakshi Dawar, Trupti Jadhav, Samiksha More, Pratiksha Khot, Prof. B. M. Pati, 2025, *Design and Fabrication of Solar Power Inverter*. IJRSET, Volume 14, Issue 4, Pp. 10589-10592, April.
- [4]. Kunnu Purwanto, Aditya Agus Wijayanto, Yudhi Ardiyanto, Karisma Trinanda Putra. 2023, *Electrical Design of a Portable Pure Sine Wave Inverter Using Ferrite Core Transformer and Double Stage Technique*,

Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY), Vol. 7, No. 1, June 2023:1-8.

- [5]. Reyes-Severiano Yesenia, Aguayo -Alquicira Jesús, De León-Aldaco Susana Estefany, Carrillo-Santos Luis Mauricio. 2020, *Comparative analysis of PD-PWM technique in the set: Multilevel Inverter-Induction motor*. Ingenieria Invest. Igación y tecnología volumen XXI (número 1), enero-marzo. 1-8. <https://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/v21n1-07.php>.
- [6]. Suyog Hiray, Vaibhav Raulwar, Durgesh Nikam. 2019, *Design and Implementation of Pure Square Wave Single Phase Inverter*. JASC, Volume VI, Issue V, May 2019. <https://www.scribd.com/document/488699506/91-may-2781>.
- [7]. Dimas Nur Prakoso, Nur Asyik Hidayatullah, Budi Triyono, Muhammad Edy Hidayat, 2022, *Desain Perancangan Inverter 1 Fasa Pada Pompa Submersibel Menggunakan Sumber Hybrid Solar Cell Dan Microhydro*. Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM). Volume 4 Nomor 2 Agustus 2022 :138-144. DOI : 10.32528/elkom.v4i2.7850; <https://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/ELKOM/article/download/7850/4056>.
- [8]. Faizal Arya Samman, Rizkiyanti Ahmad, Mutiah Mustafa. 2015, *Perancangan, Simulasi dan Analisis Harmonisa Rangkaian Inverter Satu Fasa*. JNTETI, Vol.4, No.1, Februari 2015: 62-70. <https://journal.ugm.ac.id/v3/JNTETI/article/view/3036/1015>.
- [9]. M. Azriand N.A. Rahimb. 2011, *Design Analysis Of Low-Pass LC Passive Filter In Single-Phase Grid-Connected Transformerless Inverter*. International Journal of Renewable Energy Research 1 :25-31
- [10]. Muhammad Endra Eko Yulianto, Adhi Kusmantoro, Muh. Amiruddin. “Desain Inverter 12VDC To 220VAC Dengan Frekuensi 50Hz”. Science And Engineering National Seminar 7 (SENS7)-Semarang, 15 Desember 2022. <https://conference.upgris.ac.id/index.php/sens/article/view/3477/2158>.
- [11]. Power Electronics Circuits, Devices, and Applications Second edition Muhammad H. Rashid Prentice-Hall International, Inc. 1998.
- [12]. MOSFET as a Switch, *Electronics Tutorials*, diakses 2025. (Menjelaskan prinsip dasar MOSFET kanal-N sebagai saklar on/off dan konfigurasi low-side). Tersedia di: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html Basic Electronics Tutorials

- [13]. H. Liu, 2016, *Control Design of a Single-Phase DC/AC Inverter for PV Applications*, Master Thesis, University of Arkansas.
- [14]. Hanju Cha, Trung-Kien Vu. 2009, *Study and Design of C-L Filter for Single-Phase Grid - Connected PV Inverter*. Conference: The Korean Institute of Electrical Engineers' Conference, 4 : 228-230. https://www.researchgate.net/publication/329714403_Study_and_Design_of_L-C-L_Filter_for_Single-Phase_Grid-Connected_PV_Inverter
- [15]. *Power Semiconductor Devices – Lecture Notes*, Sathyabama University, bab “Power MOSFET”. https://sist.sathyabama.ac.in/sist_coursematerial/uploads/SEEA1401.pdfSathyabama University
- [16]. Microchip Technology Inc., 2022, *AN3343 – Low-Side MOSFET Gate Drivers in Power Conversion Applications*, Application Note, (Membahas penggunaan MOSFET sisi bawah sebagai saklar pada aplikasi konver terdaya). PDF: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/ProductBrief/AN3343-Application-Note-DS90003343.pdfMicrochip>
- [17]. Toshiba Electronic Devices & Storage Corp., 2018, *MOSFET Gate Driver Circuit*, Application Note, 2018. <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=59460Toshiba Semiconductors>
- [18]. R. Baharom, K. S. Muhammad, M. N. Seroji and M. K. M. Salleh. 2015, *Development Of A Gate Drive With Overcurrent Protection Circuit Using IR2110 For Fast Switching Half Bridge Converter*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 10, NO. 23, DECEMBER 2015 : 17463- 17467.
- [19]. Indra Ferdiansyah and Tsuyoshi Hanamoto. 2024, *Design and Implementation of Improved Gate Driver Circuit for Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Control*. World Electric Vehicle Journal, 15, 106. <https://doi.org/10.3390/wevj15030106>
- [20]. Maksum Agung Praptomo, Iwan Setiawan dan Denis, 2020, *Perancangan Rangkaian Bootstrap Dengan IC IR2110 dan Sistem Inverter Satu Fasa Topologi H-Bridge Berbasis IGBT IRG4PC50WD*. Transient, Vol. 9, No. 1, Maret 2020.67-72.
- [21]. Tirthajyoti Sarkar, Sudip K. Mazumder. 2015, *Analysis of Input Current Ripple and Optimum Filter Capacitor for Fuel-Cell-Based Single-Phase Inverter*. Journal of Fuel Cell Science and Technology. December 2015, Vol.12 / 061005-1. https://mazumder.lab.uic.edu/wp-content/uploads/sites/504/2021/03/fc_012_06_061005.pdf.
- [22]. K. S. Sureshkumar, 2016, *Single-Phase Shunt and Series Active Harmonic Filter for Power Quality Improvement*. Technical Report.
- [23]. Effendi, Intan Nurul Fajri, 2022, *Desain dan Implementasi Inverter Satu Fasa Menggunakan SPWM Berbasis Arduino*, Jurnal J-Innovation Vol.11, No.1, Juni
- [24]. Effendi, Intan Nurul Fajri, 2022, *Desain dan Implementasi Inverter Satu Fasa Dengan Output Sinusoidal Menggunakan Metode Modulasi SPWM*, Jurnal J-Innovation Vol.11, No.1, Juni 2022:17-22.
- [25]. Gurhan Ertasgin and David M. Whaley. 2024, *Analysis and Optimization of Output Low-Pass Filter for Current-Source Single-Phase Grid-Connected PV Inverters*. Appl. Sci., 14, 10131. <https://doi.org/10.3390/app142210131>
- [26]. Ale Ahmad, Adib Abrishamifar, Mohammad Farzi. 2010, *A New Design Procedure for Output LC Filter of Single Phase Inverters*. 2010 3rd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System.
- [27]. Tuan Q Duong, Linh TT Nguyen, 2023, *Output LC Filter Design for the PWM Inverters*. Int. j. adv. multidisc. res. stud. 3(3):827-829
- [28]. Habib Muhammad Usman, Muhammad Mahmud, Sani Saminu, Salihu Ibrahim, 2024, *Harmonic Mitigation in Inverter Circuits Through Innovative LC Filter Design Using PSIM*. Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI). Vol. 10, No. 1, March 2024:138-153