

IMPLEMENTASI TEKNOLOGI FREKUENSI *SYNTHESIZER* PLL SEBAGAI PEMBANGKIT GELOMBANG RADIO FREKUENSI 67 MHz UNTUK GENERATOR RADIO FREKUENSI SIKLOTRON

Cassia Mas Ricky Dzul Jalaali^{a,1,*}, Usman Nursusanto, M.Pd.^{a,2}

^a Departement of Electrical and Electronic Engineering, Vocational Faculty, UNY

¹ cassiamas.2021@student.uny.ac.id; ² usmannursusanto@uny.ac.id

* Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article History

Received 20 November 2025

Revised 21 December 2025

Accepted 7 January 2026

Keywords

PLL, Si5351;
Frequency Synthesizer;
RF Exciter;
Cyclotron;
67 MHz.

ABSTRACT

This research was aimed at designing and implementing a prototype of an RF wave generator (RF exciter) based on a Phase-Locked Loop (PLL) frequency synthesizer using the Si5351 module. This prototype was intended to meet the requirements of an RF signal of 67 MHz in a 30 MeV cyclotron generator system at the BRIN Accelerator Technology Research Center, which required a signal source with high frequency stability and spectral purity. The research employed the research and development (R&D) method. This consisted of stages, namely design, simulation, hardware realization, and testing. Data were obtained through direct measurements using an oscilloscope and spectrum analyzer. The system consisted of several main blocks: the Si5351 signal generator, a third-order Butterworth Band-Pass Filter, a pre-amplifier, a 10-watt power amplifier, a power supply system, and a microcontroller-based control and monitoring system using Arduino. Tests were conducted both on individual blocks and on the fully integrated system. The evaluated parameters included the frequency stability, output power, harmonic ratio, spurious components, and control system response. The testing results demonstrated that the system successfully generated a stable 67 MHz signal with a maximum output power of 7.1 watts and harmonic suppression up to -50 dBc. The control system could precisely adjust RF frequency and power while monitoring temperature, forward power, reflected power, and Standing Wave Ratio (SWR) in real time. In conclusion, the prototype performed based on its intended design and served as an efficient, economical, and applicable alternative solution for RF signal generation in particle accelerator systems. Further development can be recommended to optimize the power supply system and calibrate RF power and temperature sensors.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan prototipe pembangkit gelombang RF (exciter RF) berbasis *frequency synthesizer Phase-Locked Loop* (PLL) menggunakan modul Si5351. Prototipe ini ditujukan untuk memenuhi kebutuhan sinyal RF sebesar 67 MHz pada sistem generator siklotron 30 MeV di Pusat Riset Teknologi Akselerator BRIN, yang memerlukan sumber sinyal dengan stabilitas frekuensi dan kemurnian spektrum tinggi. Metode yang digunakan untuk implementasi prototipe adalah metode research and development (R&D). Tahapan desain, simulasi, realisasi perangkat keras, dan pengujian. Data yang diambil berdasarkan pengukuran langsung menggunakan alat ukur osiloskop dan spektrum analyzer. Sistem dirancang terdiri atas beberapa blok utama, yaitu pembangkit sinyal Si5351, *Butterworth Band-Pass Filter* orde-3, *pre-amplifier*, *power amplifier* 10 watt, sistem catu daya, serta sistem kendali dan monitoring berbasis mikrokontroler Arduino. Pengujian dilakukan secara bertahap pada setiap blok dan kemudian secara

terintegrasi. Parameter yang diuji meliputi kestabilan frekuensi, daya keluaran, rasio harmonisa, spurious, serta respon sistem kendali. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil menghasilkan sinyal 67 MHz yang stabil dengan daya keluaran maksimum 7,1 watt dan penekanan harmonisa hingga -50 dBc. Sistem kendali mampu mengatur frekuensi dan daya RF secara presisi serta memonitor parameter suhu, daya maju, daya balik, dan Standing Wave Ratio (SWR) secara real-time. Kesimpulannya, prototipe ini berfungsi sesuai desain dan dapat menjadi solusi alternatif yang efisien, ekonomis, dan aplikatif untuk pengembangan sistem pembangkit sinyal pada akselerator partikel. Pengembangan lebih lanjut untuk menyarankan optimalisasi pada sistem catu daya dan kalibrasi pembacaan daya RF serta sensor suhu.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](#) license.



1. Pendahuluan

Akselerator partikel adalah alat untuk mempercepat partikel melalui interaksi dengan medan magnet untuk pemanduan lintasan dan medan listrik untuk akselerasi, sehingga dapat meningkatkan energi kinetik partikel bermuatan [1]. Siklotron (akselerator siklik) mempercepat partikel dalam lintasan sirkular. Aplikasi utama siklotron modern adalah untuk produksi radioisotop medis yang digunakan dalam keperluan pencitraan diagnostik, seperti *Positron Emission Tomography* (PET) dan *Single Photon Emission Computed Tomography* (SPECT) [2] [3]. Komponen utama siklotron diantaranya sistem elektromagnetik, sistem radio frekuensi (RF), sistem sumber ion, sistem monitor berkas dan sistem ekstraktor berkas [4]. Catu daya RF merupakan sub sistem dari sistem RF, fungsinya sebagai sumber energi bolak-balik untuk disalurkan ke elektroda RF dee untuk mempercepat partikel. Oleh karena itu, sumber sinyal RF ini harus memiliki karakteristik frekuensi yang presisi, stabilitas tinggi, serta minim *noise* maupun *spurious signal*.

Penyediaan sinyal RF 67 MHz yang presisi untuk siklotron 30 MeV menghadapi tantangan teknis fundamental. Pertama, masalah stabilitas frekuensi, di mana *thermal drift* (fluktuasi suhu) dan *load pulling* (perubahan beban) dapat menggeser frekuensi kerja [5] [6] [7]. Kedua, masalah kualitas sinyal, di mana *phase noise* (jitter) menurunkan efisiensi akselerasi dan *harmonisa* (ketidakmurnian spektral) dapat mengeksitasi resonansi parasitik yang mengganggu stabilitas berkas. Meskipun arsitektur MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) modern mengatasi ini dengan bergantung pada *Master Oscillator (Exciter)* yang stabil, *exciter* komersial berkualitas tinggi yang dibutuhkan oleh BRIN memiliki harga puluhan ribu dolar, Sebagai contoh, sebuah *exciter/transmitter* profesional (GatesAir HARFAX10KFAX150) berharga sekitar US\$ 71.500 [8], sementara *Signal Generator Bench* (Keysight) memiliki rentang harga US\$ 7.500 hingga lebih dari US\$ 30.000, tergantung pada spesifikasinya [9]. Biaya yang sangat tinggi ini menciptakan masalah ketergantungan impor dan mendasari kebutuhan mendesak akan solusi alternatif yang lebih ekonomis.

Berdasarkan masalah dan tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang prototipe *exciter* RF 67 MHz berbiaya rendah menggunakan metode sintesis frekuensi berbasis *Phase-Locked Loop* (PLL). Prototipe ini dirancang untuk menghasilkan sinyal berkualitas tinggi yang stabil dan dapat diperkuat hingga 10 watt, yang nantinya akan diumpankan ke *sub-sistem* penguat daya berikutnya. Kontribusi utama penelitian ini adalah menyediakan alternatif *exciter* RF yang jauh lebih terjangkau untuk mengurangi ketergantungan impor dan mendukung kemandirian teknologi akselerator partikel nasional.

Metode yang digunakan untuk membangkitkan gelombang RF pada frekuensi 67 MHz adalah sintesis frekuensi berbasis *Phase-Locked Loop* (PLL). Sintesis frekuensi merupakan teknik rekayasa yang menghasilkan berbagai frekuensi radio dari satu sumber referensi tunggal. Beberapa penelitian, seperti [10] dan [11], juga menunjukkan bahwa arsitektur PLL mampu menghasilkan sinyal hingga beberapa gigahertz dengan linearitas dan stabilitas tinggi. Si5351 IC ini merupakan *synthesizer clock*

berbasis *Fractional-N* PLL yang dapat dikendalikan via antarmuka I²C. Hal ini membuka peluang untuk dievaluasi lebih lanjut pada aplikasi spesifik seperti pembangkit sinyal RF 67 MHz untuk generator RF siklotron. Meskipun demikian, implementasi Si5351 dalam praktik bukan tanpa keterbatasan. Beberapa laporan pengujian menunjukkan munculnya harmonisa dan *spurious signal*, terutama pada frekuensi VHF, akibat penggunaan arsitektur *Fractional-N* yang bersifat digital. Keluaran gelombang yang dihasilkan oleh Si5351 juga berupa gelombang kotak, sementara kebutuhan *exciter* RF pada siklotron adalah gelombang sinus murni.

Prajitno (2011) Pembuatan dan analisis *exciter* generator RF untuk siklotron proton DECY-13. Prototip *exciter* generator RF yang telah dibuat menggunakan DDS tipe AD9851 buatan *Analog Device* dengan frekuensi dasar 30 MHz. dan dikendalikan oleh mikrokontroler ATmega16. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rentang frekuensi keluaran *exciter* adalah 2 MHz dengan frekuensi tengah 77,667 MHz. dan stop band -3dB. Sedangkan keluaran daya RF 10 Watt memerlukan catu daya + 12 V dengan arus 2,9 A.

Penelitian Thuy Tran (2022) dengan judul "*Reference Radiator Design and Implementation by Using Programmable Clock Generator*" implementasikan programmable clock generator Si5351A-B-GT berbasis PLL untuk desain *reference radiator*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang radiator referensi yang dapat menghasilkan dua frekuensi keluaran dalam rentang 12 MHz hingga 50 MHz dengan ukuran langkah 1 MHz. Pengujian awal dengan breakout board Adafruit Si5351A menunjukkan waveform square wave yang presisi via osiloskop, dengan analisis *Fast Fourier Transform* (FFT) mengonfirmasi harmonics ganjil dominan yang stabil pada frekuensi seperti 12 MHz dan 18 MHz, di mana output CLK0 dan CLK1 dikonfigurasi melalui I2C untuk menghindari jitter dan memastikan akurasi tinggi.

Penelitian [14] dengan judul "*Design and Implementation of a Portable Network Analyzer for In-line Sensor Measurements*" menyajikan desain dan implementasi *portable network analyzer* yang terintegrasi dengan sensor resonansi *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR). Bekerja pada frekuensi 130 MHz, menggunakan Si5351 sebagai programmable clock generator berbasis PLL untuk menghasilkan sinyal RF stabil dalam rentang 100-160 MHz dengan pertambahan 2 MHz.

Penelitian Guzman (2024) dengan judul "*VHF Class-E Amplifier: Wireless Power Transfer for Medical Applications*" mendesain dan implementasi *amplifier Class-E diferensial* beroperasi pada frekuensi VHF 62 MHz untuk *Resonant Wireless Power Transfer* (RWPT) untuk aplikasi medis. Pembangkitan sumber sinyal menggunakan Si5351A sebagai *programmable clock generator* berbasis PLL dengan antarmuka I2C.

Penelitian O'Driscoll & Curran (2018) dengan judul "*Carrier Phase Tracking Considerations for Commodity SDR Hardware*" membahas pertimbangan pelacakan fase *carrier* dalam *hardware Software Defined Radio* (SDR) komoditas seperti *HackRF*. Si5351 diintegrasikan sebagai *clock generator programmable* dari [17] untuk menghasilkan *reference clocks* stabil 50 MHz untuk synthesizer RFFC5072 dan 40 MHz untuk transceiver MAX2837, dalam rentang operasi hingga 6 GHz.

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu, *frequency synthesizer* berbasis DDS maupun PLL (khususnya Si5351) telah banyak digunakan di berbagai aplikasi (SDR, sensor, *power transfer*), namun mayoritas berfokus pada kebutuhan komunikasi atau pengukuran, bukan sistem akselerator partikel. Meskipun rentang frekuensi VHF (misalnya 62 MHz atau 100-160 MHz) telah dicapai, belum ada penelitian yang secara spesifik mengimplementasikan Si5351 sebagai *exciter* RF pada frekuensi 67 MHz yang diperlukan untuk siklotron 30 MeV. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki keaslian gagasan dengan mengeksplorasi potensi Si5351 untuk menghasilkan sinyal RF 67 MHz yang stabil, presisi, dan ekonomis, serta mengevaluasi kualitas spektrum dan kemampuan penguatan hingga 10 watt sebagai solusi alternatif *exciter* RF untuk aplikasi akselerator.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Konsep Dasar PLL

PLL adalah rangkaian yang menyingkronkan keluaran sinyal (yang dihasilkan oleh osilator) dengan sinyal referensi atau masukan, baik dalam frekuensi maupun fase. Saat kondisi tersinkronisasi

(locked state) kesalahan fase, pada sinyal keluaran osilator dengan referensi sinyal adalah nol, atau tetap konstan. Jika kesalahan fase terbentuk maka mekanisme kontrol akan bekerja pada osilator agar kesalahan fase bisa diminimalkan. Mekanisme sistem kontrol seperti itu fase sinyal keluaran sebenarnya terkunci dengan sinyal referensi inilah alasan disebut phase locked loop. Blok dasar penyusun dari PLL terdiri dari *voltage control oscillator* (VCO), *phase detector* (PD), *loop filter* (LF). Ketika PLL digunakan sebagai penyintesis frekuensi, blok lain ditambahkan, pencacah bagi- N . Dengan asumsi pencacah tersebut membagi dengan faktor N , frekuensi sinyal keluaran VCO dipaksa menjadi N kali frekuensi referensi (frekuensi sinyal masukan u_i).

2.2 Frequency Synthesizer Si5351

Si5351 merupakan generator jam CMOS yang dapat dikonfigurasi melalui antarmuka I^2C , dirancang oleh *Silicon Laboratories* untuk menggantikan kristal, osilator kristal, VCXO, PLL, dan *buffer fanout* dalam aplikasi sensitif biaya, dengan kemampuan menghasilkan hingga 8 frekuensi *non-integer* terkait dari 8 kHz hingga 160 MHz pada setiap *output* dengan kesalahan 0 ppm [17].

Diagram blok penyusun Si5351 menggunakan arsitektur serbaguna yang terdiri dari tahap input, dua tahap sintesis, dan tahap output. Tahap input menerima kristal eksternal (XTAL), jam input (CLKIN), atau tegangan kontrol (VC) bergantung pada varian perangkat, sementara tahap sintesis pertama mengalikan frekuensi input menjadi jam intermediate tinggi melalui PLL A/B (dengan opsi SSC atau VCXO). Tahap sintesis kedua memanfaatkan divider fraksional MultiSynth untuk menghasilkan frekuensi output presisi, diikuti pembagian integer tambahan pada tahap output untuk rentang hingga 8 kHz.

Kekurangan dari Si5351 tidak bisa langsung digunakan untuk membuat prototipe pembangkit gelombang RF Frekuensi 67 MHz. Sinyal keluaran yang dihasilkan adalah gelombang kotak. Perlu filter agar sinyal yang dihasilkan adalah sinus murni. Karena karakteristik tersebut akan menimbulkan harmonik, dan *suprious* sinyal yang tinggi sehingga sangat membutuhkan filter. Proses kalibrasi filter eksternal, termasuk penyesuaian impedansi dan bandwidth, menjadi langkah wajib untuk memastikan kualitas sinyal sesuai spesifikasi siklotron.

2.3 Komponen Pembangkit Sinyal/Exciter RF

Pembangkit sinyal atau *exciter RF* adalah bagian penting dari sistem generator RF. Perangkat ini sebagai sumber sinyal awal yang akan diperkuat ke level daya tertentu (sesuai desain kebutuhan generator RF). Fungsinya sebagai acuan frekuensi utama dalam keseluruhan sistem generator.

Sinyal yang dihasilkan harus memenuhi syarat teknis yaitu meminimalkan atau mengurangi *spurious* (gangguan frekuensi liar) dan *harmonic* sinyal karena dapat menyebabkan interferensi dan gangguan pada sistem komunikasi lainnya [18]. Desain pembangkit sinyal RF dalam penelitian ini mempunyai komponen utama yaitu; PLL, mikrokontroler, sistem kontrol dan monitoring, filter, penguat sinyal RF dan sumber *power supply*. Komponen utama tersebut berperan dalam menunjang fasilitas agar gelombang RF yang stabil.

2.4 Radio Frekuensi

Radio frekuensi (RF) merupakan gelombang sinyal bolak-balik dengan rentang frekuensi antara 3 kHz hingga 300 GHz [19]. Gelombang RF digunakan untuk transmisi sinyal nirkabel, seperti dalam komunikasi radio, televisi, radar, sistem komunikasi seluler dan keperluan riset eksperimen. Berdasarkan spektrum elektromagnetik dapat diklasifikasikan ke dalam kelompok rentang frekuensi. Spektrum elektromagnetik yang digunakan dalam komunikasi nirkabel mencakup frekuensi dari beberapa orde *Herzt* (Hz) hingga orde ribuan *GigaHerzt* (GHz), dengan berbagai aplikasi mulai dari komunikasi radio hingga sinar gamma [19].

2.5 Prinsip Dasar Siklotron

Siklotron digunakan untuk mempercepat partikel bermuatan seperti proton, ion positif, maupun ion negatif. Sistem pemercepat partikel memanfaatkan medan listrik bolak-balik yang melewati pada elektroda bercelah (RF dee) di kondisi ruang hampa. Medan magnet digunakan untuk membelokkan lintasan partikel membentuk spiral keluar. Berkas partikel yang dihasilkan oleh sumber ion memiliki energi kinetik relatif masih rendah. Partikel ditarik kelintasan oleh medan listrik yang dipandu oleh

medan magnet agar tidak keluar lintasan. Partikel yang sudah berada dilintasan pemercepat setiap kali memasuki area percepatan maka energinya bertambah semakin besar, sehingga menyebabkan radius lintasan partikel lebih lebar. Medan magnet mengakibatkan ion bergerak melingkar, dengan jari-jari yang lebih besar setiap peningkatan energi.

2.6 Prinsip Dasar Generator RF Untuk Siklotron

Generator RF berfungsi utama untuk menghasilkan gelombang RF daya tinggi sebagai suplai medan listrik dicelah antara elektrode dee pada siklotron, guna mempercepat partikel bermuatan secara resonan. Frekuensi RF harus disesuaikan secara presisi dengan frekuensi sirkulasi partikel ($f = qB/2\pi m$) untuk mempertahankan kondisi resonansi siklotron [20]. Fungsi penguat daya adalah mengubah daya masukan DC menjadi daya keluaran RF yang amplitudo dan fasenya ditentukan oleh daya masukan RF level rendah (*low power RF*).

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development (R&D)* sebagaimana dijelaskan oleh [21] dalam Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Metode ini digunakan karena penelitian berfokus pada perancangan konsep, realisasi prototipe, dan pengujian prototipe perangkat keras berupa pembangkit gelombang RF frekuensi 67 MHz berbasis PLL untuk sistem generator RF siklotron 30 MeV. Pendekatan R&D dipilih karena memberikan ruang bagi peneliti untuk mengintegrasikan berbagai konsep teknis menjadi satu kesatuan sistem yang utuh dalam perancangan prototipe.

Prosedur penelitian disusun dalam bentuk diagram alir sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Tahapan penelitian ini mengikuti R&D yang disesuaikan untuk pengembangan prototipe pembangkit gelombang RF berbasis PLL. Model yang digunakan mengadaptasi sepuluh langkah penelitian dan pengembangan menurut [21], namun disederhanakan sesuai dengan ruang lingkup dan batasan penelitian proyek akhir ini.

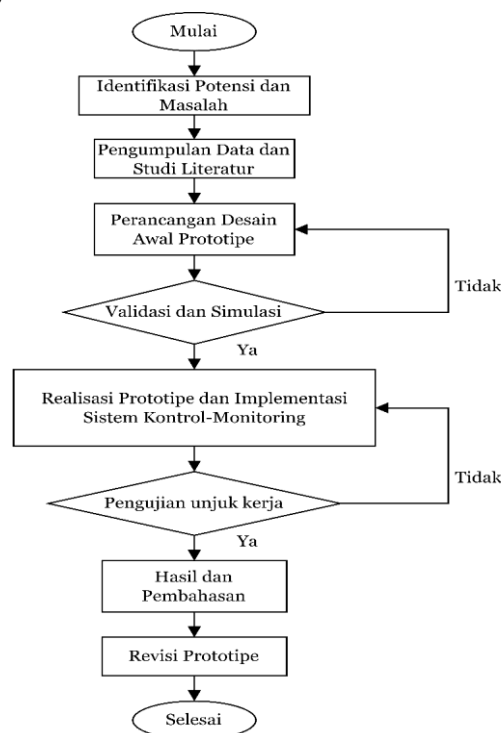


Fig. 1. Diagram alir prosedur penelitian.

3.1 Rancangan Alat

Bagian ini perangkat yang dibuat akan dipecah menjadi beberapa sub-bagian (blok-sistem) seperti pada Gambar 5 dan menganalisis setiap blok-sistem tersebut. Cara ini dipilih karena agar

meminimalkan kesalahan sistem keseluruhan dan memudahkan dalam menganalisis sumber masalah jika ada.

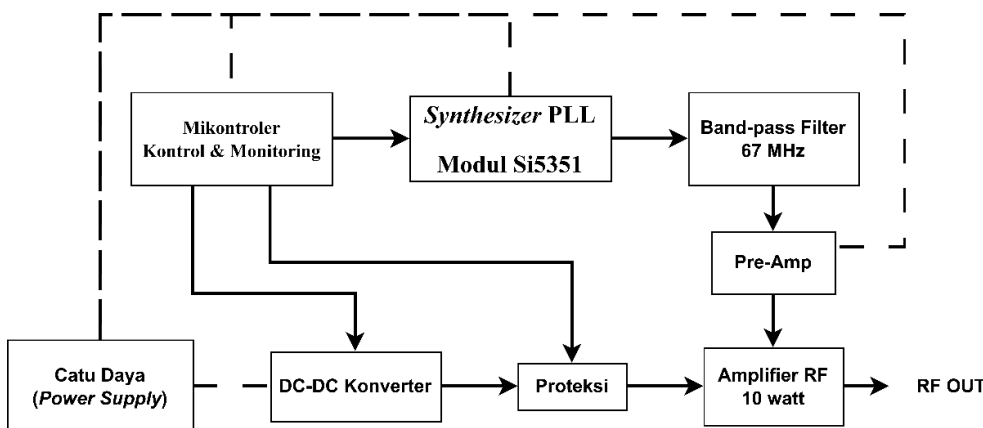


Fig. 2. . Blok diagram sistem keseluruhan.

3.2 Blok pembangkit sinyal

Menggunakan module SI5351 sebagai frequency synthesizer PLL blok diagram seperti di tunjukan gambar dibawah:

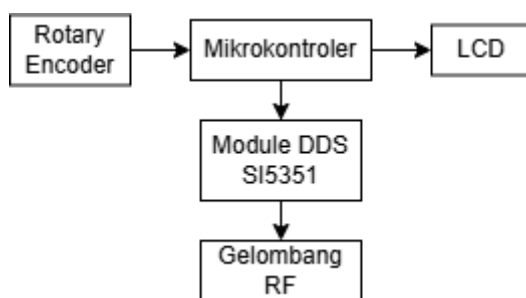


Fig. 3. Blok sistem pembangkit gelombang RF dengan Si5351.

Sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler yang menerima input dari rotary encoder sebagai kontrol frekuensi output yang diinginkan. Mikrokontroler memproses data dari encoder, kemudian mengirimkan instruksi pengaturan frekuensi ke modul Si5351 melalui komunikasi I²C agar dapat menghasilkan sinyal gelombang RF sesuai dengan frekuensi yang ditentukan. Untuk memudahkan pengguna dalam memantau dan mengontrol frekuensi, sistem dilengkapi dengan tampilan LCD sebagai antarmuka visual.

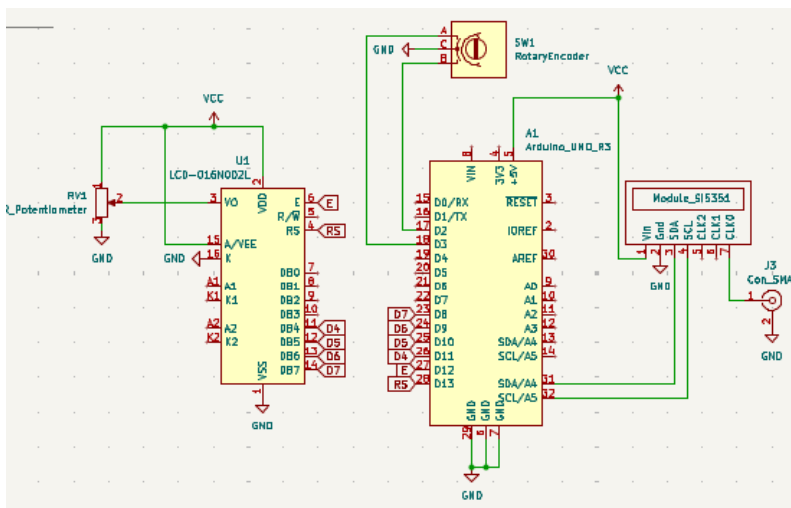


Fig. 4. Skema pembangkitan gelombang RF dengan modul Si5351.

3.3 Blok Desain Filter dan Pemurnian Sinyal

Band pass filter (BPF) adalah jenis filter yang dirancang untuk meloloskan sinyal pada rentang frekuensi tertentu, sekaligus meredam sinyal di luar rentang tersebut. Secara prinsip, BPF dapat dianggap sebagai gabungan dari filter lolos rendah (LPF) dan filter lolos tinggi (HPF). Pada penelitian ini, digunakan desain filter tipe Butterworth, karena memiliki karakteristik respon frekuensi yang relatif datar pada pita lolosnya (passband), tanpa adanya puncak resonansi atau riak, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi RF yang membutuhkan kestabilan amplitudo dalam pita frekuensi tertentu.

Desain filter yang digunakan adalah *Butterworth* orde 3 dengan kopling kapasitif, yang disesuaikan untuk bekerja pada frekuensi tengah (F_0) sebesar 67 MHz, dengan batas bawah (*cutoff* bawah) pada 63,3 MHz dan batas atas (*cutoff* atas) pada 71 MHz.

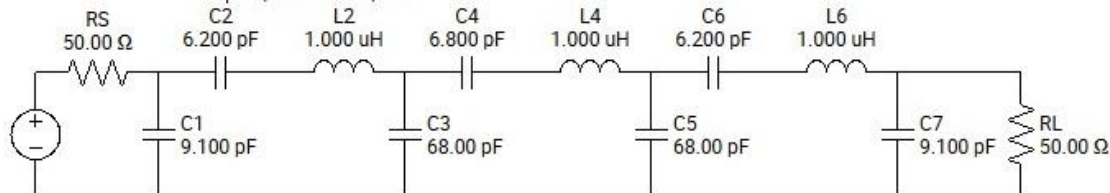


Fig. 5. Skema *Band-Pass Filter* Butterworth Orde-3.

Penentuan frekuensi redaman (attenuation) dilakukan pada dua titik utama, yaitu pada tingkat redaman -3 dB dan -40 dB. Untuk titik -3 dB, frekuensi batas bawah (*lower cutoff*) ditetapkan pada 63,3 MHz, sedangkan frekuensi batas atas (*upper cutoff*) berada pada 71 MHz. Sementara itu, untuk titik -40 dB yang menandai batas transisi atau zona penekanan yang signifikan, frekuensi batas bawah ditentukan sebesar 56,2 MHz dan batas atas sebesar 80 MHz.

Untuk menghitung frekuensi tengah (center frequency) dari band pass filter, digunakan rumus:

$$F_c = \sqrt{F_L \cdot F_H}$$

Penentuan orde dilakukan dengan menghitung rasio bandwidth, yaitu perbandingan antara lebar pita pada titik -40 dB terhadap lebar pita pada titik -3 dB, dengan menggunakan rumus:

$$\text{Rasio Bandwidth} = \frac{B_{W-40dB}}{B_{W-3dB}}$$

Nilai rasio yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan kurva respon frekuensi terhadap redaman pada filter low pass Butterworth.

Berbeda dengan BPF konvensional yang disusun menggunakan struktur LC seri-paralel secara langsung (hasil konversi dari low pass filter), desain kopling kapasitif memisahkan antar resonator dengan kapasitor, sehingga memudahkan dalam implementasi fisik dan perancangan jalur frekuensi yang lebih rapi.

Berikut ini rumus untuk resonator LC

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow C = \frac{1}{(2\pi F_0)^2 \cdot L}$$

Kapasitor Kopling

$$C_k \approx \frac{1}{\pi F_0 Z_0} \cdot \Delta$$

Dimana:

F_0 : Frekuensi tengah

Z_0 : Impedansi sistem (misalnya 50 ohm)

Δ : Lebar fraksional bandwidth (*fractional bandwidth*)

3.4 Blok *Pre-amp*

Pre-amplifier berfungsi sebagai tahap penguatan awal sinyal RF sebelum memasuki rangkaian

penguat akhir (*final amplifier*). Tujuan utama penggunaan pre-amp adalah untuk meningkatkan level sinyal yang dihasilkan oleh modul PLL setelah melewati BPF, sehingga sinyal memiliki amplitudo yang cukup untuk dikuatkan hingga mencapai daya output sebesar 10 Watt. Penelitian ini, menggunakan modul SPF5189Z sebagai *pre-amplifier*, yang merupakan modul berbasis MMIC (*Monolithic Microwave Integrated Circuit*) amplifier.

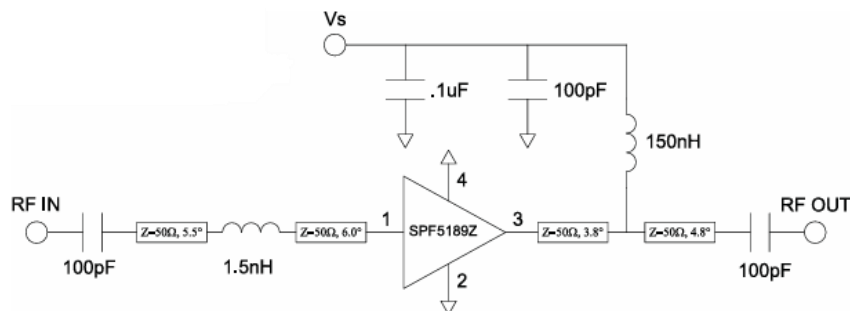


Fig. 6. Skema dari Modul Pre-Amp SPF5189Z

3.5 Blok Amplifier

Amplifier pada sistem ini dirancang menggunakan dua tingkat penguatan (*two-stage amplifier*) untuk mencapai daya output sebesar 10 Watt secara linear dan berkelanjutan. Meskipun target utamanya adalah 10 Watt, desain ini memiliki kapasitas daya maksimum hingga 25 Watt, agar memberikan margin keamanan dan performa dalam kondisi beban bervariasi atau penurunan efisiensi termal.

Konfigurasi amplifier menggunakan dua buah transistor yang masing-masing berperan sebagai *driver stage* dan *final stage*. Tahap pertama menggunakan transistor 2SC1971 untuk penguatan awal, sedangkan tahap kedua menggunakan transistor 2SC1729 sebagai penguat akhir. Kedua tahap penguat ini dikonfigurasi dalam kelas AB amplifier, yang merupakan kombinasi antara efisiensi dan linearitas, sehingga cocok digunakan dalam aplikasi penguatan sinyal RF secara kontinu. Rangkaian skema dari sistem amplifier dua tingkat ini dapat dilihat pada gambar dibawah.

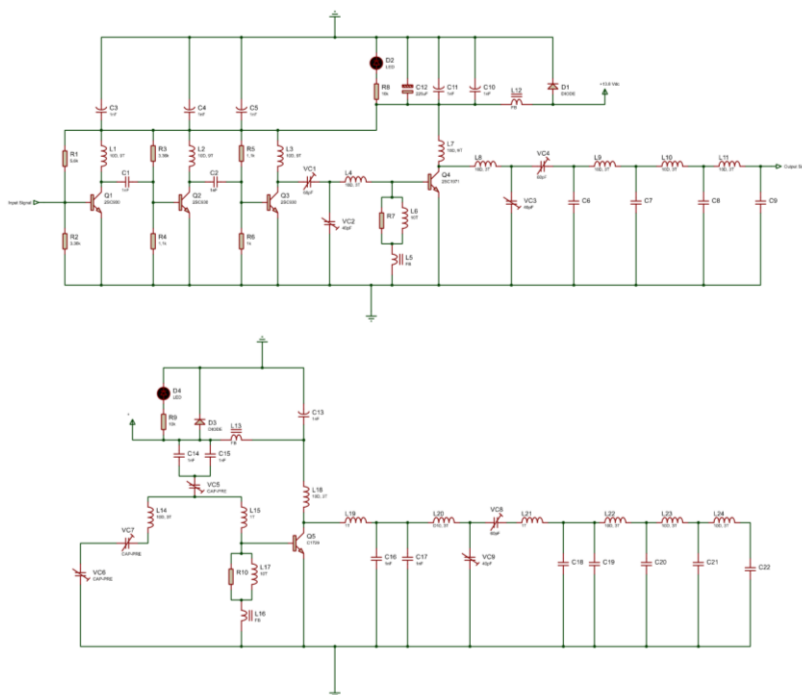


Fig. 7. Skema amAplifier 2 Stage Class AB 10 watt.

3.6 Blok Catu Daya

Blok catu daya terdiri dari dua sub sistem, yaitu blok sumber suplai DC yang menyediakan tegangan linear 12 VDC dan 5 VDC, serta blok DC-DC konverter. Tegangan 12 VDC digunakan untuk menyuplai penguat (amplifier) RF, sedangkan tegangan 5 VDC digunakan untuk menyuplai sistem kontrol dan monitoring. DC-DC konverter berfungsi sebagai boost converter untuk meningkatkan tegangan suplai amplifier sesuai kebutuhan, di mana proses pengaturan dilakukan oleh mikrokontroler (MCU) sehingga daya keluaran penguat RF dapat diatur hingga mencapai batas yang telah ditetapkan, yaitu sesuai desain maksimum 10 Watt.

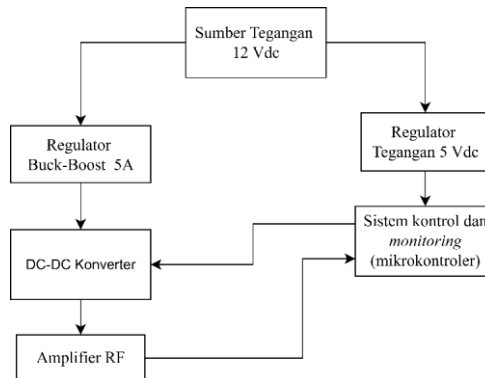


Fig. 8. Blok sistem catu daya.

Sumber tegangan 12 VDC diperoleh dari modul Switching Mode Power Supply (SMPS) yang berfungsi sebagai sumber daya utama seluruh sistem. Tegangan ini kemudian diturunkan menjadi 5 Vdc menggunakan rangkaian regulator untuk menyuplai sistem kontrol dan monitoring. Selain itu, tegangan 12 Vdc juga diolah melalui regulator Buck-Boost dengan arus minimal 5A dan keluarannya masuk ke DC-DC boost converter untuk dinaikkan sesuai kebutuhan daya penguat RF. Fungsi buck-boost regulator adalah untuk melakukan pengaturan tegangan terendah untuk mensuplai DC-DC konverter. Proses regulator tegangan pada DC-Dc konverter ini dikendalikan oleh mikrokontroler (MCU) sehingga daya keluaran amplifier RF dapat diatur secara presisi sesuai kebutuhan desain.

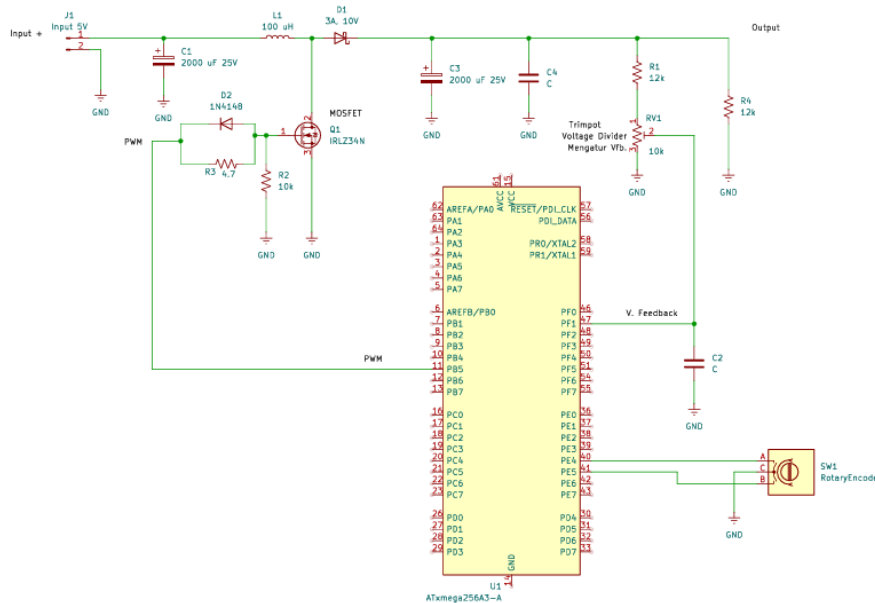


Fig. 9. Skema DC-DC Converter menggunakan pwm dan kontrol mikrokontroler.

Desain konverter DC-DC ini menggunakan topologi buck-boost non-inverting yang dikendalikan oleh sinyal PWM (Pulse Width Modulation) dari mikrokontroler. Mikrokontroler menghasilkan sinyal PWM yang duty cycle-nya dapat diatur. Sinyal ini berfungsi sebagai "pedal gas" untuk mengontrol tegangan keluaran. MOSFET (Q1) bertindak sebagai saklar elektronik berkecepatan tinggi. Saat MOSFET "ON", energi disimpan di dalam induktor (L1). Saat MOSFET

"OFF", energi tersebut dilepaskan ke kapasitor output (C2) dan beban. Sebagian tegangan keluaran (V_{out}) dibaca kembali oleh mikrokontroler melalui pembagi tegangan (R2 dan R3). Mikrokontroler membandingkan tegangan ini dengan set point yang diinginkan dan secara otomatis menyesuaikan duty cycle PWM untuk menjaga V_{out} tetap stabil, meskipun beban berubah

3.7 Blok Kontrol dan Monitoring

Sistem ini dikelola oleh mikrokontroler yang mengintegrasikan dua fungsi utama kontrol dan monitoring. Blok kontrol secara terprogram mengatur parameter inti, yaitu frekuensi kerja (dengan mengendalikan Si5351) dan daya keluaran (dengan menyesuaikan tegangan suplai amplifier). Secara simultan, blok monitoring berfungsi sebagai antarmuka pengguna, menyediakan pemantauan real-time terhadap parameter yang sedang berjalan (seperti frekuensi dan level daya) untuk memastikan operasi yang efisien dan fleksibel.

Metode pendekatan yang digunakan untuk membangun program dalam sistem ini adalah dengan menerapkan pemodelan berbasis "narasi domain". Pendekatan ini mengacu pada pemahaman sistem berdasarkan alur dan interaksi komponen dalam domain aplikasinya, yang kemudian dituangkan ke dalam bentuk logika pemrograman. Menggunakan narasi domain, proses pengembangan program menjadi lebih efisien karena alur kerjanya telah disusun secara sistematis dan logis sesuai perilaku nyata sistem. Tujuan utamanya adalah untuk mempermudah proses pemrograman, memastikan kesesuaian antara fungsi sistem dan kontrol yang diinginkan. Diagram alir berikut menunjukkan tahapan dalam membangun logika program berdasarkan pendekatan ini.

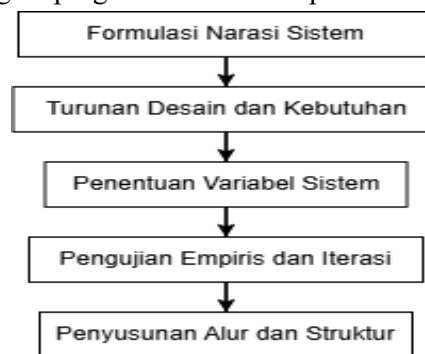


Fig. 10. Langkah-langkah membangun program kontrol dan *monitoring*.

Diagram alir pada Gambar 14 menggambarkan *loop* logika kerja utama dari pada mikrokontroler. Program dimulai dengan membaca parameter operasional secara kontinu, yaitu data dari RF meter (daya maju, mundur, dan SWR) serta data suhu. Langkah pertama dalam setiap siklus adalah melakukan pengecekan sistem proteksi; jika nilai SWR atau suhu melampaui batas aman yang telah ditentukan, maka mode proteksi akan diaktifkan untuk mencegah kerusakan. Jika kondisi aman, program akan memeriksa adanya interaksi dari pengguna melalui penekanan tombol (*push button*). Apabila tombol ditekan, program akan masuk ke dalam struktur menu utama menggunakan logika *switch-case* untuk menavigasi antara sub-menu Pengaturan Frekuensi, Pengaturan Daya RF, *Monitoring*, dan Exit.

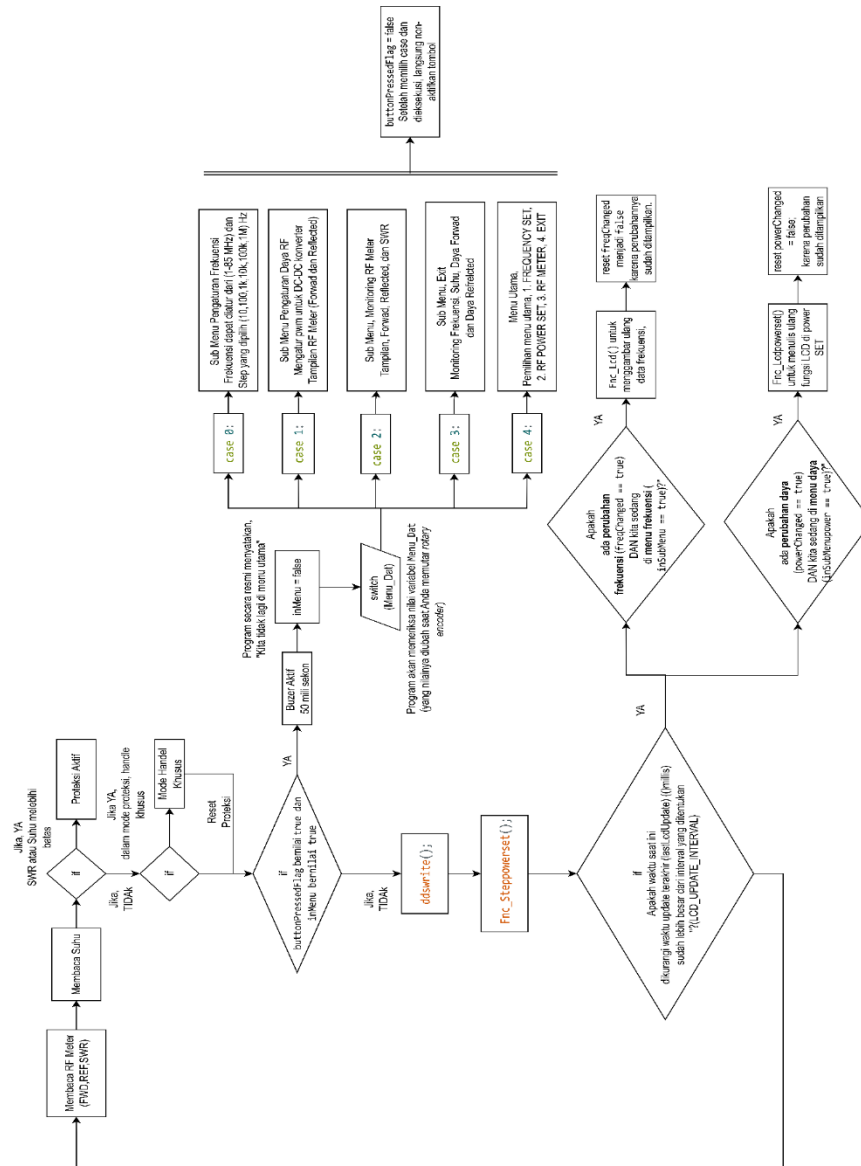


Fig. 11. Diagram alir pemrosesan program untuk kendali dan *monitoring*.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil dan Pembahasan Blok Pembangkit Gelombang RF (Si5351) Karakterisasi Sinyal Murni (Si5351).

Pengujian awal dilakukan terhadap sinyal keluaran modul Si5351. Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik sinyal yang dibangkitkan. Fokus pengujian dibagi menjadi dua, yakni analisis domain waktu untuk validasi bentuk gelombang dan analisis domain frekuensi untuk meninjau spektrum sinyal. Skema rangkaian pengukuran disajikan pada Gambar 15.

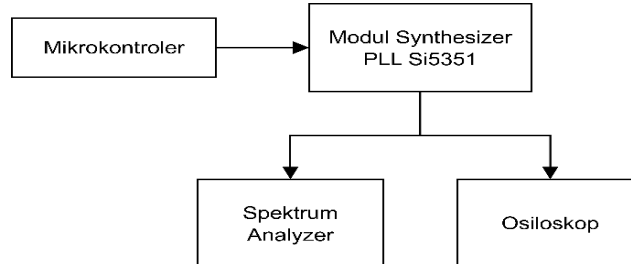


Fig. 12. Skema Pengukuran Menggunakan Osiloskop dan Spektrum *Analyzer*.



Fig. 13. Gambar 1. Bentuk Gelombang yang Dihasilkan Modul Si5351 Pada Frekuensi 67 MHz

Karakteristik bentuk gelombang yang dihasilkan modul Si5351 pada frekuensi 67 MHz tidak sepenuhnya halus terdapat sedikit distorsi. Pembacaan osiloskop menunjukkan nilai sekitar 66,85 MHz hingga 67,01 MHz. Amplitudo puncak ke puncak (V_{pp}) terukur sekitar 3,08 V_{pp}. Dari tampilan, satu periode gelombang mencakup 10 ns, yang konsisten dengan frekuensi sekitar 66–67 MHz.

Table 1. Hasil Pengukuran Menggunakan Spektrum Analyzer.

No	Prameter Ukur	Frekuensi (MHz)	Level Daya (dBm)	Level Daya (mW)	Satuan Lain	HD (%)
1	Sinyal Utama (Fundamental)	67	+2,0	1.5849	-	-
2	Harmonik ke-2	134	-24,5	0.003548	-26,5 dBc	4,73
3	Harmonik ke-3	201	-11,6	0.069183	-13,6 dBc	20,89
4	Harmonik ke-4	268	-29,7	0.001072	-31,7 dBc	2,60
5	Harmonik ke-5	335	-17	0.019953	-19 dBc	11,22
6	Harmonik ke-6	402	-34	0.000398	-36 dBc	1,58
7	Harmonik ke-7	469	-20	0.010000	-22 dBc	7,94
8	Harmonik ke-8	526	-33	0.000501	-35 dBc	1,78
9	Harmonik ke-9	603	-23,5	0.004466	-25,5 dBc	5,31
10	Harmonik ke-10	670	-34	0.000398	-36 dBc	1,58
11	Harmonik ke-11	737	-26,5	0.002238	-28,5 dBc	3,76
12	Harmonik ke-12	804	-38	0.000158	-40 dBc	1,00
13	Harmonik ke-13	871	-31,3	0.000741	-33,3 dBc	2,16

Modul Si5351 dapat menghasilkan sinyal fundamental frekuensi 67 MHz, dengan level daya +2 dBm. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa frekuensi fundamental dapat dicapai dengan modul Si5351. Distorsi harmonik adalah munculnya sinyal-sinyal yang tidak diinginkan pada frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamental ($f_n = n \times f_{fundamental}$). Adanya harmonik banyak mengindikasikan bahwa sinyal keluaran bukanlah gelombang sinus murni. Data pengukuran pada Citra dari *spectrum analyzer* menunjukkan adanya kandungan harmonik yang signifikan pada keluaran modul Si5351. Puncak harmonik tertinggi adalah di harmonik ke-3 yaitu -11,6 dBm. Karakteristik dari modul Si5351 yang mempunyai harmonik tinggi pada kelipatan ganjil dan puncaknya di harmonik ke-3. Secara teori, gelombang persegi ideal terdiri dari sinyal fundamental dan harmonik-harmonik orde ganjil.

4.2 Hasil dan Pembahasan Pemurnian Sinyal

Pada pengujian selanjutnya dilakukan karakterisasi terhadap filter BPF *Butterworth* orde-3 dengan frekuensi tengah yang ditargetkan berada di sekitar 67 MHz. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk melihat sejauh mana filter mampu mereduksi komponen harmonisa dari sinyal masukan sehingga menghasilkan gelombang sinus yang lebih murni pada frekuensi kerja tersebut.

Pengukuran dilakukan berdasarkan bentuk gelombang pada osiloskop serta spektrum frekuensi yang ditampilkan pada spectrum analyzer. Skema rangkaian dan konfigurasi masing-masing pengukuran ditunjukkan pada Gambar 17.

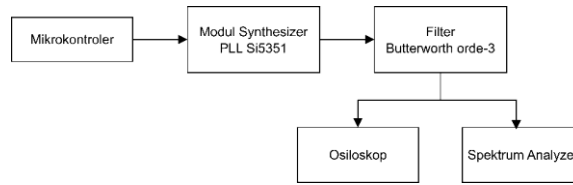


Fig. 14. Skema Pengukuran dengan Osiloskop dan Spektrum Analyzer.

Table 2. Tabel 1 Pengukuran Filter Butterworth Orde-3 Menggunakan Osiloskop.

Frequency SET (MHZ)	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55
OSILOSKOP																										
Frequency (MHz)	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55
Peak-Peak(mV)	9	10	12	14,4	16	21,4	26	36	45	59	76	100	123	140	152	154	142	132	115	94	81	67,2	53,2	44,8	38	31,2
dBm	-36,9	-36	-34,4	-32,9	-31,9	-29,4	-27,7	-24,9	-23	-20,6	-18,4	-16	-14,2	-13,1	-12,4	-12,3	-13	-13,6	-14,8	-16,6	-17,9	-19,5	-21,5	-23	-24,4	-26,1

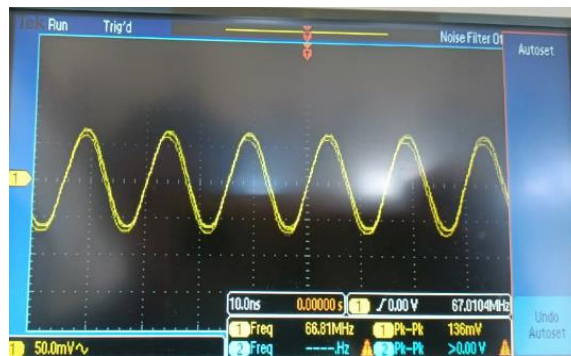


Fig. 15. Gambar 2 Hasil Bentuk Respon Filter BPF dengan Osiloskop.

Filter menunjukkan respon *low-pass/band-pass* karakteristik dengan puncak di frekuensi target 67 MHz, sesuai dengan rancangan filter Butterworth orde-3. Puncak daya di 67 MHz – 65 MHz menunjukkan bahwa filter berhasil melewati frekuensi fundamental yang diinginkan (67 MHz) dan meredam *harmonisa/spurious* di luar band. Pada frekuensi lebih jauh dari 67 MHz, daya turun cukup signifikan. Misalnya, pada 80 MHz daya –36,9 dBm, artinya sudah teredam lebih dari 24 dB dibanding puncak (–12,3 dBm). Hal ini sesuai dengan karakteristik *butterworth* yang memiliki respon halus (*maximally flat passband*) dan redaman meningkat setelah melewati *cuttoff*. Dari hasil pengukuran ini filter bekerja efektif untuk konversi keluaran sinyal dari Si5351 menjadi sinusoidal murni di frekuensi 67 MHz, dan amplitudo puncak berada di band ini. Namun level daya masih relatif sangat kecil (sekitar –12 dBm atau $\approx 60 \mu W$).

Table 3. Tabel 2 Pengukuran Filter BPF Menggunakan Spektrum Analyzer.

No	Parameter yang Diukur	Frekuensi (MHz)	Level/Daya (dBm)	Satuan Lain	Keterangan
1	Sinyal Utama (Fundamental)	67	-37,3	-	Sinyal <i>fundamental</i>
2	Harmonik ke-2	134	-58,9	-21,6 dBc	<i>Harmonic Distortion</i> (8,3 %)
3	Harmonik ke-3	201	-69,5	-32,2 dBc	<i>Harmonic Distortion</i> (2,4 %)

4	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	58	-100	-62,7 dBc	Baik
5	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	59	-59	-21,7 dBc	Baik
6	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	61	-100	-62,7 dBc	Baik
7	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	63	-82,3	-45 dBc	Baik
8	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	63,25	-95	-57,7 dBc	Baik
9	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	63,77	-100	-62,7 dBc	Baik
10	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	65,48	-93,8	-56,5 dBc	Baik
11	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	66	-85,5	-48,2 dBc	Baik
12	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	68	-88,3	-51 dBc	Baik
13	Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	69	-98	-60,7 dBc	Baik
14	Bandwidth (-3 dB)	67,012	-20	17,3 dBc	Bandwidth -3dB = 6kHz
		67,006	-20	17,3 dBc	
15	Bandwidth (-40 dB)	67,014	-60,7	-23,4 dBc	Bandwidth -40dB = 10kHz
		67,004	-60,4	-23,1 dBc	

Kemampuan redaman harmonik dari filter BPF, fungsi utamanya adalah dapat menekan harmonik yang dihasilkan oleh *synthesizer* Si5351. Berdasarkan data tabel 4.5 level harmonik ke-3 (201 MHz) dapat ditekan hingga -32 dBc. Dibandingkan sebelum filter (-13,6 dBc), hasil ini menunjukkan peningkatan redaman sebesar 18,6 dB.

Pencapaian penting dari filter ini, karena harmonik ke-3 adalah yang paling terkuat dan berpotensi mengganggu sinyal fundamental. Redaman harmonik ke-2 (134 MHz), level harmonik ini berada pada -21,6 dBc.

Kemampuan redaman sinyal palsu (*spurious*), dari hasil pengukuran dengan *spektrum analyzer* dapat diketahui untuk kemampuan menolak sinyal-sinyal palsu pada sekitar frekuensi kerja.

Sebagian besar sinyal palsu di luar pita (misalnya pada 58 MHz, 61 MHz, 66 MHz, 69 MHz) berhasil diredam dengan sangat baik, dengan level redaman berkisar antara -48 dBc hingga -62 dBc. Ini menunjukkan kemampuan *out-of-band rejection* yang kuat. Terdapat satu anomali pada frekuensi 59 MHz yang redamannya hanya -21,7 dBc.

Karakteristik lolos-pita (Pass-Band) ini mendefinisikan bagaimana filter melewati sinyal yang diinginkan, yaitu 67 MHz. Pengukuran pada *bandwidth* -3dB, terukur sebesar 6 kHz (dari 67,006 MHz hingga 67,012 MHz).

4.3 Hasil dan Pembahasan Blok *Pre-amp*

Analisis ini akan berfokus pada dua karakteristik utama *pre-amp* penguatan (gain) pada frekuensi kerja dan respons frekuensi secara keseluruhan. Blok ini didesain untuk meningkatkan daya keluaran dari filter BPF agar gelombang RF bisa dikuatkan untuk tahap berikutnya. Harapannya blok ini bisa menguatkan sinyal masukan dan minimal noise, harmonik, dan *spurious*. Skema pengukuran berdasarkan Gambar 19.

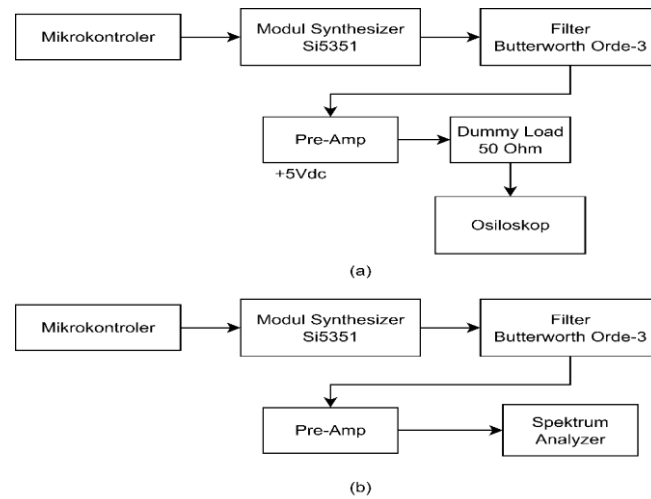


Fig. 16. Gambar 3 Konfigurasi Pengukuran (a) Menggunakan Osiloskop, dan (b) Menggunakan Spktrum Analyzer.

Table 4. Hasil Pengukuran *Pre-Amp* Menggunakan Osiloskop.

Frekuensi SET	Frekuensi (MHz)	Pk-Pk (mV)	RMS (mV)	dBm
75	75	168	59,40	-11,51
74	74	224	79,20	-9,02
73	73	296	104,65	-6,59
72	72	384	135,76	-4,33
71	71	456	161,22	-2,84
70	70	584	206,48	-0,69
69	69	696	246,07	+0,83
68	68	768	271,53	+1,69
67	67	856	302,64	+2,63
66	66	872	308,30	+2,79
65	65	896	316,78	+3,03
64	64	880	311,13	+2,87
63	63	840	296,98	+2,46
62	62	766	270,82	+1,66
61	61	664	234,76	+0,42
60	60	560	197,99	-1,06
59	59	440	155,56	-3,15
58	58	368	130,11	-4,70
57	57	280	98,99	-7,08
56	56	232	82,02	-8,71
55	55	192	67,88	-10,35

Pada frekuensi kerja 67 MHz, *pre-amp* menghasilkan tegangan 856 mV Pk-Pk. Ini setara dengan keluaran daya sebesar +2,63 dBm. Hasil pengukuran ini ada peningkatan dari daya masukan atau keluaran dari filter BPF (140 mV Pk-Pk, -13,1 dBm) meningkatkan tegangan sebesar 716 mV atau setara dengan 15,7 dBm daya kenaikannya. Data pada kolom Pk-Pk menunjukkan bahwa kenaikan tegangan Pk-Pk amplifier tidak datar di semua frekuensi. Responnya variatif dan puncak tertinggi

pada frekuensi 67-63 MHz, dan mulai menurun drastis diluar frekuensi tersebut. Hasil ini juga pengaruh besar dari filter BPF pada blok sebelum ini.

Table 5. Tabel 3 Hasil Pengukuran *Pre-Amp* dengan Spektrum *Analyzer*.

Parameter yang Diukur	Frekuensi (MHz)	Level/Daya (dBm)	Satuan Lain (Δ FC)	Keterangan
Sinyal Utama (Fundamental)	67	-3,5	-	Sinyal carrier terlihat jelas dan stabil.
Harmonik ke-2	134	-48,6	-45,1 dBc	Penekanan harmonik baik.
Harmonik ke-3	201	-60	-56,5 dBc	Penekanan harmonik baik.
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	82	-75	-71,5 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	71	-74,1	-70,6 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	68	-54,2	-50,7 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	66	-53,4	-49,4 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	52	-82,5	-79 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	49	-82,5	-79 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	47	-80,4	-76,9 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	38	-74,4	-70,9 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	29	-35,9	-31,4 dBc	Baik
Bandwidth (-3 dB)	67,0088	-6,5	-3 dBc	Bandwidth sebesar 2,8 kHz
	67,0116	-6,5	-3 dBc	
Bandwidth (-40 dB)	67,004	-43,5	-40 dBc	Bandwidth sebesar 12 kHz
	67,016	-44,5	-40 dBc	

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa frekuensi *carrier* adalah 67 MHz puncak daya -3,5 dBm. Terdapat peningkatan dari input sebesar -13,1 dBm menjadi -3,5 dBm sehingga naik 10 dBm. Harmonik ke-2 dan ke-3 diredam sangat baik -48,6 dBm (134 MHz) dan -60 dBm (201 MHz). Palsu (*Spurious*) diredam sangat baik namun di frekuensi 29 MHz hanya diredam -35,9dBm.

Harmonik ke-2 (134 MHz) level -48.6 dBm, relatif terhadap *carrier*: -48.6 dBm - (-3.5 dBm) = -45.1 dBc (seperti tercantum di tabel). Ini menunjukkan penekanan yang baik, di mana harmonik hanya 45.1 dB di bawah *carrier*. Tidak mengganggu sinyal utama karena levelnya rendah. Harmonik ke-3 (201 MHz) level -60 dBm, relatif: -60 dBm - (-3.5 dBm) = -56.5 dBc. Penekanan lebih baik lagi (56.5 dB), mendekati level yang direkomendasikan untuk transmitter radio.

Kebanyakan *spurious* diredam sangat baik, dengan level di bawah -70 dBm dan relatif kurang dari -60 dBc (misalnya, 82 MHz: -75 dBm / -71.5 dBc; 52 MHz: -82.5 dBm / -79 dBc). Ini menunjukkan filter bekerja efektif untuk menekan noise atau sinyal tidak diinginkan di sekitar *carrier*. Namun, *spurious* pada 29 MHz: -35.9 dBm, relatif: -35.9 dBm - (-3.5 dBm) = -32.4 dBc. Ini adalah yang tertinggi (paling kurang diredam) di antara *spurious*.

Pengukuran pada *bandwidth* -3dB, terukur sebesar 2,8 kHz (dari 67,0088MHz hingga 67,0116 MHz). Ini adalah *bandwidth* yang sangat sempit, menunjukkan bahwa respon frekuensi memiliki selektivitas yang sangat tinggi (faktor-Q atau *Q-factor* yang tinggi). *Bandwidth* pada -40dB pada frekuensi 67,004 MHz- 67,016 MHz besar lebar *bandwidth* 12 kHz.

4.4 Hasil dan Pembahasan Blok Daya Amplifier

Amplifier ini dirancang untuk meningkatkan daya keluaran sinyal *fundamental* dari modul SI5351, yang awalnya memiliki level daya -3,5 dBm (*output* dari *pre-amp*), menjadi daya target *output* sekitar 10 watt. Pengukuran menggunakan 3 instrumen alat ukur yaitu, osiloskop, RF meter dan, *spektrum analyzer*. Skema penggunaan alat ukur dapat dilihat pada Gambar 20. Pengujian ini untuk mengkarakterisasi unjuk kerja tahap akhir dari sistem, yaitu amplifier daya.

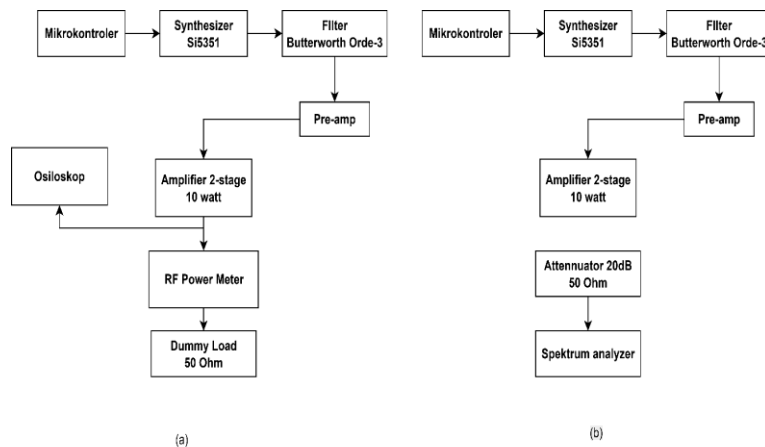


Fig. 17. Skema Pengukuran (a) Menggunakan Osiloskop dan RF Meter dan, (b) Pengukuran Menggunakan Spektrum Analyzer.

Table 6. Hasil Pengukuran Amplifier Menggunakan Osiloskop dan RF Meter.

Frekuensi (MHz)	Tegangan Vpp (V)	Daya (W)	Ratio SWR	Konversi level Daya (dBm)	Tegangan PSU Amplifier (Vdc)	Arus input PSU Amplifier (A)
67	32,8	1	1,1	+34,30	4,33	0,8
67	41,6	2	1,1	+36,36	5,58	0,95
67	48,4	3	1,1	+37,68	6,69	1,33
67	55,2	4	1,2	+38,82	7,52	1,2
67	60,4	5	1,2	+39,60	8,41	1,35
67	67,2	6	1,2	+40,53	9,31	1,5
67	70,4	7	1,2	+40,93	10	1,6
67	74,4	8	1,2	+41,41	10,68	1,7
67	80	9	1,2	+42,04	11,6	1,8
67	81,6	10	1,2	+42,21	12,12	1,9
67	86,4	11	1,2	+42,71	13,15	2
67	92	12	1,2	+43,26	14,03	2,1



Fig. 18. Bentuk Gelombang Pengukuran Amplifier yang Terbaca Pada Osiloskop.

Amplifier berhasil diuji hingga mencapai daya keluaran 12 Watt, melebihi target desain 10 Watt dan, masih bisa naik lagi jika input tegangan diperbesar lagi. Untuk mencapai daya 10 Watt, diperlukan tegangan suplai (tegangan PSU Amplifier) sebesar 12,12 Vdc dan arus *input* (Arus *input* PSU) sebesar 1,9 A. Terdapat hubungan linear yang jelas antara tegangan PSU dengan daya (W) yang dihasilkan. Jika sinyal *input* dari *pre-amplifier* adalah -3,5 dBm, maka gain dari amplifier daya ini adalah:

$$\text{Gain (dB)} = P_{\text{out}} \text{ (dBm)} - P_{\text{in}} \text{ (dBm)}$$

$$\text{Gain (dB)} = 42,21 \text{ dBm} - (-3,5 \text{ dBm}) = 45,71 \text{ dBm}$$

Efisiensi sebesar 43,3% adalah nilai yang cukup baik untuk amplifier RF pada frekuensi VHF pada kelas AB. Efisiensi ini penting karena sisa daya (23,03 W - 10 W = 13,03 W) akan diubah menjadi panas, sehingga manajemen termal (penggunaan *heatsink*) menjadi sangat krusial.

Table 7. Hasil Pengukuran Spektrum Analyzer dari Output Amplifier 10 Watt.

Parameter yang Diukur	Frekuensi (MHz)	Level/Daya (dBm)	Satuan Lain	Keterangan
Sinyal Utama (Fundamental)	67	+9,4	-	Sinyal fundamental stabil di frekuensi 67 MHz
Harmonik ke-2	134	-42,2	-51,6 dBc	Teredam sangat baik
Harmonik ke-3	201	-46,3	-55,7 dBc	Teredam sangat baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	119	-36	-45,4 dBc	Teredam sangat baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	82	-24	-33,4 dBc	Baik
Sinyal Palsu (<i>Spurious</i>)	52	-32	-41,4 dBc	Baik
Bandwidth (-3 dB)	67,0088	+6,4	-3 dBc	Bandwidth sebesar 2,8 kHz
	67,0116	+6,8	-3 dBc	
Bandwidth (-40 dB)	67,004	-33,7	-42,0 dBc	Bandwidth sebesar 12 kHz
	67,016	-31,8	-39,5dBc	

Amplifier ini menerima input dari tahap sebelumnya (*pre-amplifier* dari analisis sebelumnya, dengan output -3.5 dBm pada 67 MHz) dan menghasilkan output yang ditargetkan sekitar 10 watt (+40 dBm, asumsi impedansi 50 Ω). Namun, level daya carrier yang terukur pada tabel adalah +9.4 dBm, yang jauh lebih rendah dari 10 watt (\approx +40 dBm). Karena pengukuran menggunakan attenuator eksternal (20 dB) untuk melindungi *input spektrum analyzer* dari daya tinggi.

Bandwidth -3 dB terukur sebesar 2,8 kHz. Ini adalah bandwidth yang sangat sempit, menandakan sinyal pembawa (*carrier*) yang sangat stabil dan memiliki *phase noise* yang rendah. Kualitas ini merupakan desain filter BPF yang sangat selektif. Bandwidth -40 dB terukur sebesar 12 kHz. *Shape factor* (rasio BW -40dB / BW -3dB) yang rendah menunjukkan dinding sinyal yang sangat curam, yang berarti energi sinyal sangat terkonsentrasi di frekuensi 67 MHz.

Level penekanan harmonik menunjukkan sangat baik. Bahwa hasil pengukuran sinyal asli dari Si5351 memiliki harmonik ke-3 hanya di -13,6 dBc. Hasil akhir -55,7 dBc membuktikan bahwa kombinasi BPF, *pre-amp*, dan amplifier daya telah bekerja sama secara efektif untuk menekan sinyal yang tidak diinginkan ini lebih dari 42 dB (55,7 - 13,6).

Sinyal palsu non-harmonik pada frekuensi 52 MHz, 82 MHz, dan 119 MHz juga berhasil ditekan dengan baik, dengan level terendah di -45,4 dBc. Hasil ini menunjukkan tidak ada osilasi liar atau produk sinyal lain yang signifikan yang dihasilkan oleh tahap akhir penguatan.

4.5 Hasil dan Pembahasan Blok DC-DC Konverter

Pengukuran DC-DC konverter mengkonfirmasi untuk tegangan yang dapat dikontrol untuk suplai amplifier pada rentang berapa saja. Parameter yang diukur adalah tegangan keluaran yang dihasilkan, *duty cycle* dari pwm arduino, tegangan *feedback* untuk kontrol *loop* sistem. Alat ukur yang digunakan multi tester untuk mengukur tegangan, osiloskop untuk mengukur *duty cyle*, dan RF meter digunakan untuk pengukuran dengan beban. Kinerja dari konverter DC-DC sangat mempengaruhi daya maksimal yang sanggup dikeluarkan oleh amplifier akhir.

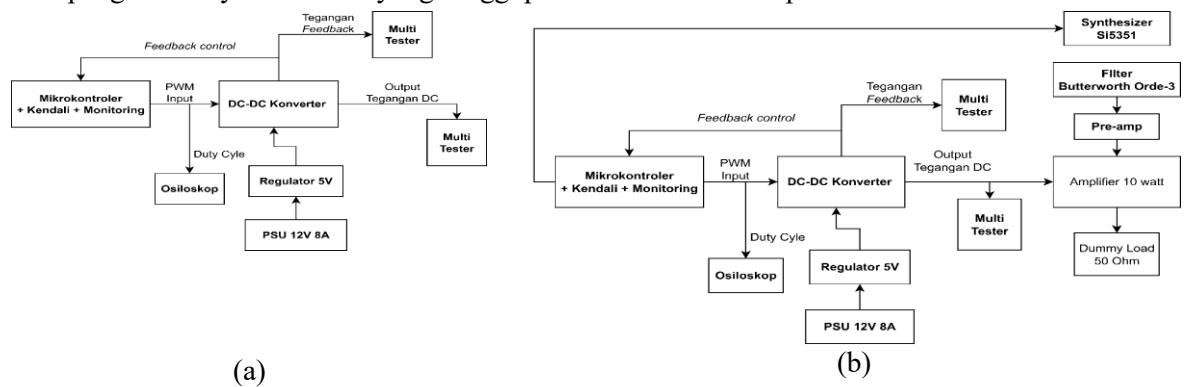


Fig. 19. Skema pengukuran (a) tanpa beban dan, (b) menggunakan beban amplifier 10 watt.

Table 8. Tabel 4 Hasil Pengukuran Beban Kosong pada Konverter DC-DC

Tegangan SET (%)	Vout (Vdc)	Vfb (Vdc)	Duty Cycle (%)
0	5,19	1,079	4,2
5	5,68	1,1727	6,99
10	6,264	1,29	9,6
15	6,999	1,4267	12,74
20	7,85	1,5668	15,1
25	8,289	1,7116	17,85
30	9,002	1,8795	20,6
35	9,824	2,02	23,73
40	10,439	2,155	26,08
45	11,155	2,308	28,81
50	11,868	2,45	31,54
55	12,581	2,597	34,27
60	13,287	2,742	36,99
65	13,986	2,88	39,74
70	14,691	3,032	42,48
75	15,486	3,196	45,89
80	16,06	3,314	47,95
85	16,847	3,476	51,08

90	17,457	3,601	53,42
95	18,092	3,73	56,18
100	18,725	3,855	58,87

Analisis pertama berfokus pada hubungan antara tegangan masukan/pengaturan (Tegangan *SET*) terhadap *Duty Cycle* dan tegangan keluaran (*Vout*). Data menunjukkan hubungan yang sangat linear antara Tegangan *SET* (yang diatur dari 0% hingga 100% dengan langkah 5% kenaikan) dengan *Vout* yang dihasilkan. Pada *SET* 0%, *Vout* terukur 5,19 Vdc dan pada *SET* 100%, *Vout* terukur 18,725 Vdc. Kenaikan tegangan keluaran hampir sepenuhnya sebanding dengan kenaikan persentase pengaturan.

Table 9. Tabel 5 Hasil Pengukuran Beban Amplifier 10 Watt pada Konverter DC-DC

SET (%)	Vout (Vdc)	Vfb (Vdc)	Duty Cycle (%)	RF Meter (Watt)
0	-	-	-	-
5	4,675	-	7,5	-
10	4,828	-	9,953	1,5
15	4,990	1,0312	13,07	1,8
20	5,159	1,0657	15,01	1,9
25	5,344	1,1036	18,5	2
30	5,562	1,1481	21,17	2,001
35	5,734	1,1832	25,53	
40	5,948	1,2278	27,97	2,3
45				
50	6,427	1,3266	-	3
55	6,698	1,3825	-	3
60	6,983	1,4411	-	3,2
65	7,288	1,5044	-	3,8
70	7,629	1,5749	-	4
75	7,985	1,6486	-	4,1
80	8,374	1,7288	-	5
85	8,878	1,8230	-	5,4
90	9,284	1,9016	-	6
95	9,791	1,986	-	6,5
100	10,331	2,0689	-	7,1

Sistem berhasil menunjukkan kemampuan kontrol daya keluaran RF yang dapat diatur. Dengan menaikkan Tegangan *SET* dari 5% hingga 100%, *Vout* meningkat dari 4,675 V menjadi 10,331 V, yang secara proporsional menaikkan daya keluaran RF dari nilai minimum (tidak terukur) menjadi 7,1 Watt. Pada Tegangan *SET* 100% (dengan *Vout* 10,33 V), daya keluaran RF maksimum yang terukur adalah 7,1 Watt. Angka ini sedikit di bawah target desain 10 Watt. Karena tegangan suplai untuk amplifier kurang.

Program kontrol umpan balik (*Vfb*) belum bekerja maksimal, dari data pengukuran tersebut loop umpan balik tidak dapat mengoreksi tegangan *Vout*. Program ini belum sempurna untuk mengkompensasi suplai yang dibutuhkan amplifier 10 watt. Asumsi lain selain belum optimalnya program kontrol, regulator 5 Vdc pada *input* DC-DC konverter menjadi alasan utama, karena arus yang dibutuhkan oleh amplifier besar sehingga regulator 5 Vdc tidak mampu. Sehingga menjadi penyebab tegangan *Vout drop* secara drastis, dibandingkan pengujian tanpa beban.





Pembacaan *Duty Cycle* terganggu oleh interferensi dari sinyal RF 67 MHz, terutama pada tegangan *SET* 50% ke atas. Radiasi medan elektromagnetik (EMI - *Electromagnetic Interference*) dari jalur output RF dengan daya tinggi dapat menginduksi derau (*noise*) pada jalur pengukuran *duty cycle*. Meskipun pembacaan *Duty Cycle* terganggu, hal ini tidak berarti sistem kontrolnya gagal. Buktinya adalah *Vout* dan daya RF tetap naik secara stabil dan terkendali.

Konverter DC-DC mampu menyuplai amplifier RF dengan tegangan dan daya yang terkontrol hingga 7,1 W pada *Vset* maksimum. Walaupun belum mencapai 10 W penuh, sistem ini sudah terbukti stabil, linier, dan siap dioptimalkan pada tahap berikutnya melalui perbaikan regulator. Titik berat yang menjadi landasan optimalisasi adalah tegangan keluaran dari *Vout* agar meminimalkan tegangan jatuh, supaya mampu mensuplai amplifier 10 watt.

4.6 Hasil dan Pembahasan Sistem Kontrol dan Monitoring



Pengujian unjuk kerja dilakukan untuk memastikan sistem berjalan sesuai rancangan, dengan fokus pada aspek utama. Pertama, kemampuan pengguna dalam memberi perintah kepada sistem dan respon sistem yang ditampilkan melalui LCD sebagai indikator. Kedua, kemampuan sistem dalam merespons perintah dengan parameter terukur berupa frekuensi keluaran (blok pembangkit sinyal), *duty cycle* PWM dan tegangan keluaran *DC-DC converter* (blok *DC-DC konverter*), daya maju (*forward*), daya balik (*reflected*), nilai SWR, temperatur.

Table 10. Hasil Tampilan Antar Muka Pengguna dengan LCD 20x2.

Program	Tampilan LCD
Menu 1	
Menu 2	
Menu 3	
Menu 4	

Antarmuka pengguna (UI) yang ditampilkan pada layar LCD berfungsi sebagai jembatan interaksi antara operator dengan sistem generator RF. Tujuannya adalah menyediakan cara yang intuitif dan presisi untuk mengatur parameter kunci, yaitu frekuensi kerja. Tampilan menu utama terdapat 4 pilihan, Menu 1 pengaturan frekuensi (MENU FREQUENCY SET), Menu 2 pengaturan daya RF (MENU RF POWER SET), Menu 3 monitoring RF meter (MENU RF METER), dan Menu 4 (EXIT). Untuk masuk ke menu yang dipilih tekan tombol push di *rotary encoder*, sedangkan untuk menggeser pilihan menu 1-4 dengan memutar *rotary encoder*.

Table 11. Pengaturan *Step* Perubahan Frekuensi.

Program	Tampilan LCD
<i>Step</i> 1MHz	
<i>Step</i> 10 Hz	

Step 100 Hz	
Step 1 kHz	
Step 10 kHz	
Step 100 kHz	

hasil pengujian program untuk mengatur langkah (*STEP*) perubahan frekuensi. Perubahan ini menggunakan tombol *enter/push rotary encoder* untuk memilih langkah yang digunakan. Sistem ini menyediakan fitur pengaturan langkah (*STEP*) yang hierarkis dan sangat fleksibel. Operator dapat memilih resolusi penyesuaian mulai dari yang paling kasar hingga yang paling halus. Step Kasar: 1 MHz, 100 kHz, 10 kHz, step Menengah: 1 kHz, 100 Hz, step Halus: 10 Hz.

Table 12. Pengaturan Frekuensi Terendah dan Tertinggi.

Program	Tampilan LCD
Frekuensi Terendah	
Frekuensi Tertinggi	

Rentang operasional yang terukur (1 MHz hingga 85 MHz) menunjukkan bahwa sistem kontrol digital berfungsi dengan andal di seluruh spektrum yang luas. Meskipun perangkat ini dirancang spesifik untuk 67 MHz, rentang yang lebar ini menunjukkan fleksibilitas dan potensi perangkat untuk digunakan dalam berbagai aplikasi atau eksperimen lain yang memerlukan frekuensi dalam rentang HF (*High Frequency*) hingga VHF (*Very High Frequency*). Tapi frekuensi semakin jauh dari 67 MHz level daya sinyal semakin menurun, karena pengaruh dari filter BPF.

Table 13. Hasil Pengujian RF Power Set.



Program	Tampilan LCD
Pengaturan daya RF SET Point 0%	
Pengaturan daya RF SET Point 100%	

hasil pengujian RF power set untuk mengatur set point 0% - 100%. Nilai *forwad* dan nilai *reflected* diabaikan, karena belum di kalibrasi. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi fungsionalitas antarmuka pengguna (UI) pada layar LCD dalam mengatur *set point* daya RF, yang berkisar dari 0% hingga 100%. Layar LCD secara efektif menampilkan parameter-parameter kunci yang relevan. Sistem berhasil merespons perintah pengguna. Saat program diatur pada SET Point 0%, tampilan LCD juga menunjukkan SET: 0%. Demikian pula, saat diatur pada SET Point 100%, tampilan menunjukkan SET: 100%. Ini mengonfirmasi bahwa input dari pengguna (*rotary encoder*)

berhasil dibaca oleh mikrokontroler dan ditampilkan dengan benar.

Hasil pengaturan set point daya RF dapat dilihat pada pengujian DC-DC konverter Tabel 14. Data menunjukkan bahwa perubahan *duty cycle* PWM dari mikrokontroler berbanding lurus dengan tegangan keluaran konverter, yang selanjutnya menjadi tegangan masukan bagi amplifier RF. Respon ini konsisten dengan rancangan sistem, di mana kenaikan set point menghasilkan kenaikan tegangan keluaran secara proporsional. Fungsi pengaturan daya melalui modul DC-DC telah tervalidasi dan dapat digunakan untuk mengendalikan level daya masukan amplifier secara efektif.

Table 14. Hasil pengujian Menu 3 dan Menu 4.

Program	Tampilan LCD
Menu 3, <i>monitoring</i> RF meter	
Menu 4, EXIT	

Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi fungsi tampilan informasi pada Menu 3 (Monitoring RF Meter) dan Menu 4 (Menu Keluar/Status Utama). Monitoring RF Meter, menu ini dirancang sebagai layar utama saat RF sedang beroperasi, memberikan informasi vital secara real-time. Layar ini berhasil menampilkan parameter-parameter operasional kunci:

F (*Forward Power*) : Menunjukkan daya maju.
R (*Reflected Power*) : Menunjukkan daya pantul.
SWR (*Standing Wave Ratio*): Menampilkan rasio SWR yang dihitung dari daya maju dan pantul.

Menu 4: EXIT, menu ini berfungsi sebagai layar siaga (*standby*) atau layar ringkasan informasi. Layar ini menampilkan kombinasi informasi yang berbeda, memberikan gambaran umum status sistem:

F (Frequency) : Menampilkan frekuensi kerja saat ini (67.000.000 Hz)
T (Temperature) : Menampilkan suhu yang terdeteksi oleh sensor
F (Forward Power) : Menampilkan daya maju terakhir atau saat ini
SWR : Menampilkan SWR terakhir atau saat ini

Status Kalibrasi Suhu:, sensor suhu belum dibandingkan dengan termometer yang akurat. Sama seperti RF meter, nilai T: 24C menunjukkan bahwa sensor suhu dan program untuk membacanya sudah berfungsi. Langkah selanjutnya adalah melakukan komparasi dan kalibrasi untuk memastikan akurasi pembacaan suhu tersebut.

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengimplementasikan prototipe generator RF yang fungsional, mampu membangkitkan sinyal 67 MHz dengan presisi dan stabilitas tinggi menggunakan IC *frequency synthesizer* Si5351 yang dikendalikan mikrokontroler. Kemurnian sinyal, yang merupakan syarat krusial siklotron, dicapai melalui realisasi filter *band-pass Butterworth* orde-3. Filter ini terbukti sangat efektif, berhasil meredam *spurious signal* dan menekan sinyal harmonik (dari -13,6 dBc) hingga ke level di bawah -50 dBc, sehingga menghasilkan gelombang sinus murni. Pada sisi penguatan, sistem catu daya dan amplifier berhasil dikonfigurasi untuk menghasilkan daya keluaran yang dapat diatur, mencapai maksimum 7,1 Watt dengan efisiensi 43,4% dan stabilitas SWR 1,2. Keseluruhan sistem ini dikoordinasikan secara fungsional oleh sistem kendali dan monitoring berbasis mikrokontroler, yang memungkinkan pengaturan frekuensi (1-85 MHz) dan daya (0-100%), sekaligus menyediakan fitur monitoring (daya, SWR, suhu) dan proteksi SWR melalui antarmuka LCD.

References

- [1] Darsono, *DASAR FISIKA AKSELERATOR*. Yogyakarta: PUSDIKLAT DAN PTAPB BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, 2007.
- [2] O. Barbalat, "Spin-Off from Particle Physics Prepared for the ICFA Panel on ORGANISATION EUR01>EENNE POUR LA RECHERCHE NUCLEAIRE EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH," 1994.
- [3] International Atomic Energy Agency, "Cyclotron Produced Radionuclides: Guidelines for Setting Up a Facility," 2009.
- [4] E. Mulyani, Taufik, and Suryo Darmawan, "DESAIN AWAL KOMPONEN CENTRAL REGION SIKLOTRON PROTON 13 MEV," Jul. 2011.
- [5] P. K. Sigg, "RF for cyclotrons".
- [6] C. Bieth, "Critical Features of RF Systems for Large Cyclotrons," 1984.
- [7] L. Yu, J. Bin, L. Peng-zhan, Y. Lin, A. Shi-zhong, and Y. Meng, "Research of stability between Driven Stage and Final Stage for RF Power Source of High Intensity Proton Cyclotron," 2016.
- [8] SCMS Inc, "GatesAir HARFAX10KFAX150 Flexiva 10kW solid-state transmitter with Flexiva 150W exciter," <https://www.scmsinc.com/gatesair-harfax10kfax150-flexiva-10kw-solid-state-transmitter-w-flexiva-150w-exciter.html>.
- [9] TEquipment, "Keysight RF & Microwave Signal Generators," <https://www.tequipment.net/keysight/rf-microwave-emi/rf-signal-generators/>.
- [10] Ching-Lung, Yao-Hong Liu, and Tsung-Hsien Lin, *A 2.4-GHz Fractional-N PLL with a PFD/CP Linearization and an Improved CP Circuit*. I E E E, 2008.
- [11] Maturazova T. V., Starovoitova O. V., Tikhmirov N. M., and Shatalov E. V., "The Use of PLL Principle in High-Power Broadband with Frequency Modulation Transmitter of VHF Radio Stations," 2019.
- [12] Prajitno, "Pembuatan dan Analisis Exciter Generator RF Untuk Siklotron Proton DECY-13," Apr. 2011.
- [13] H. X. Thuy Tran, "REFERENCE RADIATOR DESIGN AND IMPLEMENTATION BY USING PROGRAMMABLE CLOCK GENERATOR," 2022.
- [14] C. Mysorekar, R. Srivastava, H. Sharma, and S. Kale, "Design and Implementation of a Portable Network Analyzer for In-line Sensor Measurements," in *2023 2nd International Conference on Futuristic Technologies, INCOFT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/INCOFT60753.2023.10425222.
- [15] S. Guzman, "VHF Class-E Amplifier: Wireless Power Transfer for Medical Applications," CALIFORNIA STATE UNIVERSITY, NORTHRIDGE, NORTHRIDGE, 2024.
- [16] C. O'Driscoll and J. T. Curran, "Carrier phase tracking considerations for commodity SDR hardware," in *Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS+ 2018*, Institute of Navigation, 2018, pp. 4182–4196. doi: 10.33012/2018.16117.
- [17] Silicon Labs, "Si5351A/B/C I 2 C-PROGRAMMABLE ANY-FREQUENCY CMOS CLOCK GENERATOR + VCXO Features Applications Description," 2011.
- [18] B. Razavi, "RF MICROELECTRONICS Second Edition."
- [19] D. M. Pozar, "Microwave Engineering Fourth Edition," 2012.
- [20] J. J. Livingood, "PRINCIPLES OF CYCLIC PARTICLE ACCELERATORS ?," 1960.
- [21] Sugiyono, *METODE PENELITIAN KUANTITATIF KUALITATIF DAN R&D*. 2017.