

## **Evaluasi Kinerja Demodulasi FM Berbasis RTL-SDR dan Raspberry Pi 4: Perbandingan Desain Modular dan Blok Dasar pada GNU Radio**

### ***Performance Evaluation of FM Demodulation Based on RTL-SDR and Raspberry Pi 4: A Comparison of Modular and Fundamental Block Designs in GNU Radio***

**Inka Trisna Dewi**

Program Studi Teknik Telekomunikasi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya  
Jl. Raya ITS Sukolilo Kampus PENS 60111  
Email: [inkatrisnad@pens.ac.id](mailto:inkatrisnad@pens.ac.id)

**Abstrak** - Frekuensi Modulasi (FM) masih menjadi standar utama dalam penyiaran radio karena ketahanannya terhadap derau dan interferensi. Namun, optimalisasi penerimaan sinyal FM di lingkungan urban menghadapi tantangan akibat kepadatan spektrum dan interferensi dari berbagai sumber. Kondisi tersebut belum sepenuhnya dapat diatasi oleh pendekatan demodulasi konvensional yang bersifat statis. Sebagian besar penelitian sebelumnya mengandalkan blok demodulasi bawaan pada GNU Radio, tanpa mengeksplorasi desain berbasis blok dasar yang lebih fleksibel. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem penerima sinyal FM menggunakan RTL-SDR dan GNU Radio, dengan membandingkan beberapa konfigurasi demodulasi yang dibangun dari blok dasar. RTL-SDR dipilih karena fleksibilitas dan biayanya yang terjangkau, memungkinkan penerimaan sinyal dengan konfigurasi yang lebih adaptif dibandingkan perangkat konvensional. Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan mengukur *signal-to-noise ratio* (SNR) sebagai indikator kualitas sinyal audio yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan pendekatan berbasis blok dasar mampu meningkatkan SNR sebesar 10-15 dB dibandingkan metode demodulasi standar. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan modular efektif mereduksi gangguan interferensi secara signifikan. Selain itu, pendekatan ini menjadi solusi praktis dan ekonomis bagi penerima FM modern, khususnya dalam lingkungan urban. Studi ini tidak hanya mendorong optimalisasi penerimaan sinyal FM, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan teknik pemrosesan sinyal berbasis SDR yang lebih efisien dan adaptif.

**Kata kunci** : RTL-SDR, GNU Radio, Demodulasi FM, SNR

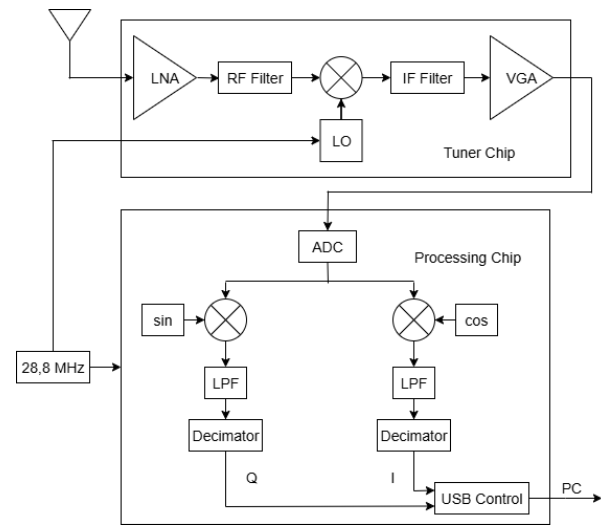
**Abstract** - Frequency Modulation (FM) is still the main standard in radio broadcasting due to its resistance to noise and interference. However, optimizing FM signal reception in urban environments faces challenges due to spectrum density and interference from various sources. These conditions have not been fully overcome by conventional static demodulation approaches. Most previous studies have relied on the built-in demodulation blocks in GNU Radio, without exploring more flexible basic block-based designs. This study aims to develop and evaluate an FM signal receiver system using RTL-SDR and GNU Radio, by comparing several demodulation configurations built from basic blocks. RTL-SDR was chosen because of its flexibility and affordable cost, allowing signal reception with more adaptive configurations than conventional devices. System performance evaluation was carried out by measuring the *signal-to-noise ratio* (SNR) as an indicator of the quality of the resulting audio signal. The test results showed that the basic block-based approach was able to improve the SNR by 10-15 dB compared to the standard demodulation method. These findings indicate that the modular approach is effective in reducing interference significantly. In addition, this approach is a practical and economical solution for modern FM receivers, especially in urban environments. This study not only promotes the optimization of FM signal reception, but also contributes to the development of more efficient and adaptive SDR-based signal processing techniques.

**Keywords** : RTL-SDR, GNU Radio, Demodulasi FM, SNR

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel mendorong transformasi signifikan dalam sistem transmisi dan penerimaan sinyal, terutama dalam bidang penerimaan sinyal radio. Pada awalnya, penerima radio berukuran besar, memiliki sensitivitas yang rendah, serta kurang tahan terhadap gangguan suara, dan harganya cukup mahal. Seiring berkembangnya teknologi, ukuran perangkat penerima menjadi lebih kecil dan kemampuan dalam menerima sinyal meningkat [1]. Salah satu inovasi penting dalam evolusi ini adalah *Software-Defined Radio* (SDR), sebuah teknologi yang memfasilitasi pemrosesan sinyal radio dilakukan secara fleksibel melalui perangkat lunak. Teknologi ini menggantikan ketergantungan terhadap perangkat keras konvensional [2]. Dengan SDR, pengguna dapat menyesuaikan parameter penerimaan sinyal secara dinamis, sehingga memungkinkan adaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan dan jenis modulasi yang digunakan. Teknologi SDR mengintegrasikan berbagai fungsi utama dalam sistem radio, seperti proses modulasi dan demodulasi, pengolahan sinyal, pemrograman, serta protokol komunikasi pada perangkat lunak. Kemampuannya untuk mengubah parameter sistem secara dinamis sangat bermanfaat dalam pengembangan perangkat lunak radio, memungkinkan penyesuaian untuk meningkatkan kualitas sinyal tanpa harus mengganti perangkat keras. Sebaliknya, pada sistem radio konvensional yang sepenuhnya berbasis perangkat keras, perubahan parameter seringkali memerlukan penggantian komponen fisik, yang tidak hanya memakan biaya, tetapi juga mengurangi fleksibilitas sistem. Dengan SDR, sistem radio dapat dikembangkan untuk mendukung berbagai protokol komunikasi serta teknik modulasi dan demodulasi, menjadikannya lebih adaptif terhadap kebutuhan teknologi yang terus berkembang [3]. Prinsip dasar SDR terlihat pada **Gambar 1**. Dalam implementasinya, SDR dapat dioperasikan melalui berbagai perangkat keras, salah satunya adalah RTL-SDR (*Register Transfer Level-Software Defined Radio*). RTL-SDR merupakan perangkat *receiver* berbasis *chipset* Realtek RTL2832U yang awalnya ditujukan sebagai tuner TV digital, namun kini diadopsi secara luas untuk keperluan edukasi, penelitian, hingga pemantauan spektrum karena biaya rendah dan kompatibilitasnya dengan perangkat lunak seperti GNU Radio. Salah satu

aplikasi RTL-SDR yang menonjol adalah dalam penerimaan sinyal radio FM, sebuah sistem yang masih digunakan secara luas dalam penyiaran publik [4].



Gambar 1. Blok Diagram Penerima SDR [1]

*Frequency Modulation* (FM) adalah teknik modulasi yang umum digunakan dalam penyiaran radio karena keunggulannya dalam mengurangi derau dan interferensi dibandingkan dengan *Amplitude Modulation* (AM), terutama dalam lingkungan urban yang padat spektrum seperti Kota Surabaya. FM bekerja dengan mengubah frekuensi gelombang pembawa sesuai sinyal informasi, sehingga lebih tahan terhadap gangguan eksternal dan menghasilkan kualitas suara yang lebih jernih. Namun demikian, kualitas sinyal FM tetap dapat terdegradasi akibat *multipath*, interferensi antar kanal, dan keterbatasan perangkat penerima. Menurut ITU-R, kualitas sinyal FM dapat menurun hingga 30% di lingkungan urban akibat adanya interferensi dan *fading* [5]. Data Nielsen 2024 menunjukkan bahwa sekitar 62,8% masyarakat perkotaan Indonesia masih aktif mendengarkan siaran radio setiap minggu, dengan RRI memiliki penetrasi hingga 68% pada periode yang sama. Fakta ini menunjukkan bahwa meskipun penggunaan radio masih tinggi, kualitas penerimaan sinyal yang stabil tetap menjadi tantangan, terutama di lingkungan urban. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi penerimaan sinyal FM dengan pendekatan modern berbasis SDR, menggunakan parameter *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) sebagai tolok ukur performa sistem di lingkungan nyata.

Berbagai penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk menunjukkan efektivitas penggunaan

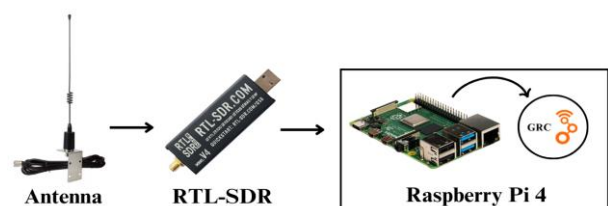
teknologi SDR dalam pengamatan dan analisis penerimaan sinyal analog seperti siaran radio FM. Misalnya, pada penelitian [6] mengkaji secara mendalam pengembangan sistem penerima FM menggunakan kombinasi antara perangkat keras RTL-SDR dan perangkat lunak GNU Radio. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa desain penerima FM berbasis GNU Radio dapat dengan akurat menerima siaran radio komersial, mendemodulasi sinyal audio, serta menampilkan spektrum frekuensi secara real-time menggunakan blok FFT sink. Sementara itu, pada penelitian [3] menunjukkan bahwa sistem yang dibangun memiliki kemampuan untuk menampilkan spektrum frekuensi secara *real-time*, serta melakukan proses demodulasi sinyal FM secara fleksibel melalui pengaturan konfigurasi blok di dalam Simulink. Kemudian pada penelitian [7] menunjukkan bahwa dengan pendekatan pemrograman berbasis GNU Radio, pengguna dapat melampaui batas lebar pita perangkat keras SDR, seperti batas 20 MHz pada HackRF One, melalui teknik pergeseran frekuensi dan penyusunan ulang (*bandwidth assembling*) secara perangkat lunak. Hal ini memungkinkan pemantauan spektrum yang jauh lebih luas dibandingkan kemampuan SDR secara *default*. Selain itu, terdapat penelitian yang berfokus pada simulasi transmisi dan penerimaan sinyal FM serta validasi performanya melalui pengukuran daya dan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) menggunakan spectrum analyzer. Validasi dilakukan pada rentang frekuensi 60–80 MHz dengan jarak antar perangkat  $\pm 1$  meter, menunjukkan performa SDR yang sangat baik untuk aplikasi monitoring sinyal secara *real-time* [8].

Meskipun teknologi SDR telah banyak dimanfaatkan dalam berbagai penelitian untuk penerimaan sinyal FM, sebagian besar pendekatan yang digunakan bergantung pada penggunaan blok demodulasi FM standar [9-12]. Selain itu, hanya sedikit penelitian yang secara sistematis melakukan evaluasi performa sistem menggunakan indikator kuantitatif seperti *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) terutama dalam kondisi lingkungan urban yang kompleks dan rentan terhadap gangguan seperti interferensi dan *multipath fading*. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan baru dengan merancang sistem penerima FM berbasis RTL-SDR dan GNU Radio yang memanfaatkan konfigurasi demodulasi dari blok-blok dasar. Sistem ini dirancang untuk

meningkatkan kualitas sinyal audio dan adaptif terhadap kondisi lingkungan urban seperti di Kota Surabaya. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini mengevaluasi kinerja masing-masing konfigurasi diagram alir melalui parameter SNR dan analisis spektral, sehingga dapat menghasilkan sistem penerima FM yang optimal dan andal. Penelitian ini menjadi penting karena dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknis sistem penerima FM berbasis SDR, sekaligus menawarkan pendekatan evaluasi kuantitatif yang lebih sistematis guna meningkatkan kualitas sinyal audio dan ketahanan terhadap gangguan.

## II. METODOLOGI

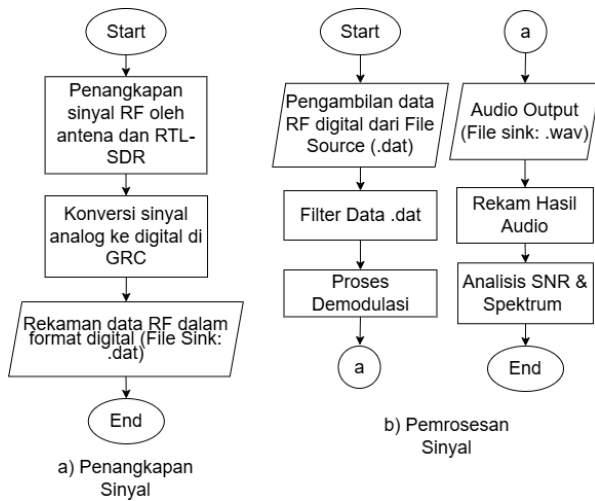
Sistem penerima sinyal FM pada penelitian ini dibangun dengan mengintegrasikan komponen perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras yang digunakan meliputi antenna *dual-band* dengan rentang frekuensi  $150 \pm 20$  MHz dan  $430 \pm 20$  MHz untuk menangkap sinyal radio frekuensi (RF), *dongle* RTL-SDR (Realtek RTL2832U) yang memiliki rentang frekuensi 500 kHz hingga 1.7 GHz dengan lebar pita maksimum 3.2 MHz sebagai *front-end* penerima, serta Raspberry Pi 4 yang menjalankan sistem operasi Linux sebagai unit pemrosesan. Sedangkan pada sisi perangkat lunak, digunakan GNU Radio Companion (GRC) yang menyediakan blok-blok pemrosesan sinyal untuk merancang diagram alir penerima dan demodulasi sinyal FM secara fleksibel. Rancangan sistem penerima sinyal FM ditunjukkan pada **Gambar 2**, yang mencakup komponen perangkat keras dan lunak.



Gambar 2. Rancangan Sistem Penerima Sinyal FM

Prosedur penelitian ini terdiri dari dua tahap utama, yaitu proses penangkapan sinyal dan pemrosesan sinyal digital. Tahapan pengambilan data diawali dari penangkapan sinyal FM menggunakan antenna *dual-band* yang dihubungkan ke perangkat RTL-SDR. Antena berfungsi untuk menangkap sinyal dari berbagai stasiun radio yang beroperasi pada frekuensi FM, yaitu 88–108 MHz. Sinyal informasi analog yang diterima oleh RTL-SDR kemudian dikonversi menjadi data digital dan dikirimkan ke unit Raspberry Pi 4 untuk diproses

lebih lanjut menggunakan beberapa diagram alir pada GRC. Diagram alir keseluruhan proses tersebut ditunjukkan pada **Gambar 3**.



**Gambar 3.** Diagram Alir Perekaman dan Pemrosesan Sinyal RF Menjadi Audio

Sinyal analog RF direkam dan disimpan untuk dilakukan proses demodulasi. Sinyal yang tersimpan inilah yang akan diproses untuk membandingkan performa dari masing-masing konfigurasi diagram alir. Analisis dilakukan dengan menggunakan parameter *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) untuk menilai sejauh mana sinyal audio terbebas dari gangguan *noise* setelah melalui beberapa tahap pemrosesan. Selain pengukuran SNR, dilakukan pula analisis spektrum baseband untuk mengamati kemungkinan terjadinya distorsi. Melalui berbagai diagram alir demodulasi FM ini, dapat disimpulkan hasil perbandingan diagram alir yang memberikan hasil demodulasi terbaik, ditinjau dari aspek kejernihan audio maupun ketahanan terhadap interferensi yang umum terjadi di lingkungan urban.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian diperoleh melalui implementasi dan pengujian terhadap empat variasi konfigurasi blok diagram penerima sinyal FM menggunakan perangkat RTL-SDR dan GNU Radio Companion (GRC). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana perbedaan struktur pemrosesan sinyal—termasuk tahapan *filtering*, teknik demodulasi, dan metode peredaman noise—mempengaruhi kualitas sinyal hasil demodulasi. Parameter utama yang digunakan untuk menilai performa sistem adalah *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), yang merepresentasikan kejernihan sinyal audio yang diperoleh.

Setiap konfigurasi dirancang dan diimplementasikan secara terpisah di GRC, kemudian hasil sinyal audio dari proses demodulasi disimpan dalam format *.wav*. Untuk memperoleh hasil yang lebih representatif, proses perekaman dilakukan sebanyak 5 kali pada waktu yang berbeda untuk setiap konfigurasi. Seluruh berkas audio tersebut kemudian dianalisis menggunakan skrip *Python* untuk menghitung nilai SNR secara kuantitatif. Rata-rata nilai SNR dari kelima rekaman digunakan sebagai acuan dalam membandingkan performa masing-masing sistem.

Pembahasan mencakup deskripsi singkat setiap konfigurasi, penyajian hasil pengukuran SNR, serta analisis perbandingan antar konfigurasi untuk menentukan sistem penerima yang paling optimal berdasarkan kualitas sinyal yang dihasilkan.

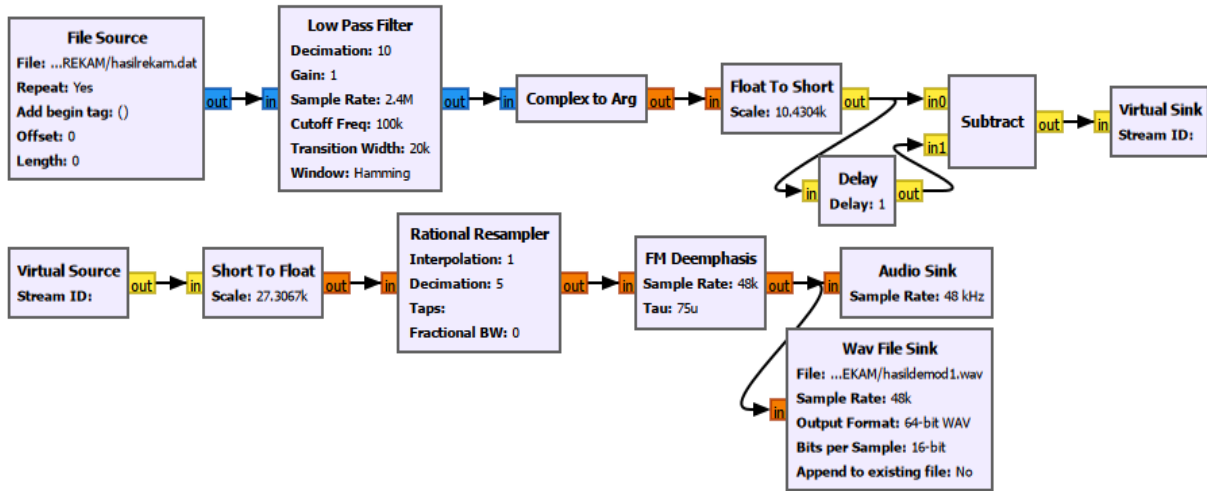
#### A. *Arctan-and-Derivative Method*

Metode *arctan-and-derivative* bekerja dengan menghitung perubahan fase sinyal kompleks (*I/Q*) keluaran RTL-SDR yang telah melalui proses *downconversion*. **Gambar 4** menunjukkan diagram alir metode *arctan-and-derivative* pada GRC. Dalam diagram alir tersebut, sinyal kompleks yang telah difilter terlebih dahulu diproses menggunakan blok *Complex to Arg* untuk memperoleh nilai fase tiap-tiap sampel (dalam satuan radian) dengan rentang  $\pm\pi$  dan dinormalisasi sehingga nilainya berada di rentang  $\pm 1$ . Nilai tersebut dikonversi dari tipe float menjadi short menggunakan blok *Float to Short* dengan tujuan agar proses perbedaan fase berikutnya dapat memanfaatkan *integer wrap-around arithmetic*. Selanjutnya, perbedaan fase sampel dihitung menggunakan blok *Delay* dan *Subtract*, yang merepresentasikan derivatif fase terhadap waktu. Nilai selisih ini kemudian dikonversi kembali ke floating point oleh blok *Short to Float* untuk proses lebih lanjut. Nilai tersebut kemudian diskalakan dengan *Multiply Const* untuk menyesuaikan level amplitudo audio sebelum dikirim ke blok *Audio Sink*.

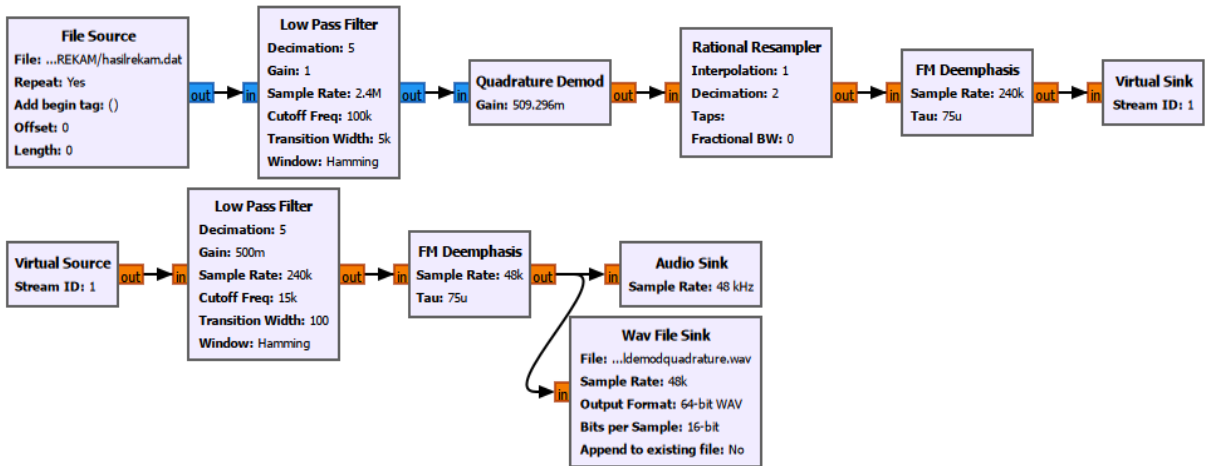
#### B. *Polar Discriminator Method*

Metode *polar discriminator* menggunakan blok *Quadrature Demod* pada GRC sebagai inti dari pemrosesan demodulasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5**. Blok ini memanfaatkan prinsip bahwa frekuensi deviasi dari sinyal FM dapat diperoleh melalui turunan fasa dari sinyal kompleks. Nilai Gain pada blok *Quadrature Demod* dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Gain = \text{samp\_rate} / 10 / (2\pi \times \text{deviation}) \dots (1)$$



Gambar 4. Diagram Alir Metode *Arctan-and-Derivative*



Gambar 5. Diagram Alir Metode *Polar Discriminator*

Pada dasarnya, blok *Quadrature Demod* menggabungkan fungsi-fungsi dasar seperti *Delay*, *Complex Conjugate*, *Multiply*, dan *Complex to Arg* untuk mengekstraksi informasi frekuensi dari perubahan fasa sinyal kompleks. Proses dimulai dengan pemberian *delay* pada sinyal kompleks untuk memungkinkan perbandingan antara dua sampel berturut-turut. Selanjutnya, sampel yang tertunda dikonjugasi dan dikalikan dengan sampel aslinya, sehingga menghasilkan perubahan fasa. Blok *Complex to Arg* kemudian digunakan untuk mengekstraksi nilai sudut fase dari hasil perkalian kompleks. Metode ini dapat merepresentasikan pemrosesan demodulasi berbasis *polar discriminator*, karena menggunakan representasi polar dari sinyal kompleks untuk mengekstraksi informasi frekuensi. Dengan pendekatan ini, blok *Quadrature Demod* dapat menyederhanakan implementasi demodulasi FM berbasis perbedaan fase menjadi satu blok tunggal namun tetap mempertahankan akurasi fungsi demodulasi.

### C. *Differentiator and Envelope Detector Method*

Gambar 6 menunjukkan diagram alir metode *Differentiator and Envelope Detector* pada GRC. Dalam metode ini, proses demodulasi FM diawali dengan pergeseran frekuensi sinyal kompleks menjauh dari 0 Hz agar spektrum tidak terpotong saat dikonversi ke sinyal real. Sinyal yang berada di sekitar frekuensi yang lebih tinggi diproses menggunakan blok *Complex to Real* untuk membuang komponen imajiner dan hanya mengambil komponen real dari sinyal tersebut. Komponen real inilah yang kemudian diproses untuk mengekstrak informasi audio. Selanjutnya adalah proses diferensiasi dimana sinyal diproses menggunakan blok *Delay* dan *Subtract*. Blok *Delay* menggeser sinyal satu sampel ke belakang, lalu sinyal asli dikurangi dengan sinyal yang tertunda, menghasilkan perbedaan antar sampel. Sinyal hasil diferensiasi tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *envelope detector*, yang terdiri dari dua bagian, yaitu blok *Abs*

(*Absolute*), yang mengambil nilai mutlak dari sinyal hasil diferensiasi serta blok *Low Pass Filter*, yang berfungsi sebagai filter untuk mengurangi komponen frekuensi tinggi, sehingga menghasilkan bentuk gelombang audio yang lebih jernih.

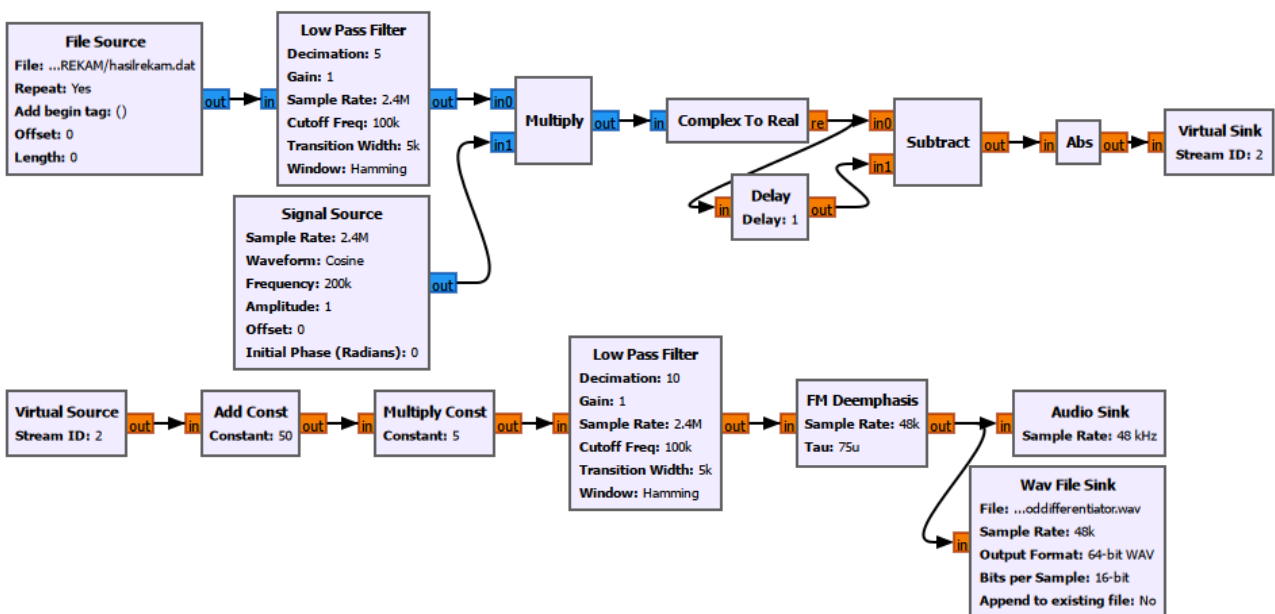
**D. Zero Crossing Method**

Metode *zero crossing* bekerja berdasarkan prinsip dasar frekuensi modulasi, di mana informasi audio sinyal FM dapat diambil dari kecepatan perubahan tanda dari sinyal *real*. **Gambar 7** merupakan diagram alir metode *zero crossing* pada GRC yang dibagi menjadi tiga bagian blok utama. Blok pertama berfungsi untuk mengonversi sinyal FM kompleks menjadi sinyal *real*. Proses ini diawali dengan penyaringan sinyal menggunakan *Low Pass Filter* untuk menghilangkan gangguan frekuensi lain, kemudian dilakukan pergeseran frekuensi ke *Intermediate Frequency* (IF) sebesar 120 kHz. Setelah itu, bagian *real* dan imajiner dari sinyal kompleks dijumlahkan untuk menghasilkan sinyal *real*. Proses pendeteksian *zero crossing* pada blok kedua dilakukan melalui perkalian antara sinyal asli dan sinyal yang tertunda. Hasil perkalian ini akan bernilai negatif tepat pada titik *zero crossing*, karena perbedaan tanda antara dua sampel berturutan. Blok ketiga mengubah polaritas sinyal sehingga nilai negatif (yang menandai *zero crossing*) menjadi positif, dan nilai positif menjadi negatif menggunakan blok *Multiply*. Selanjutnya blok *Binary Slicer* digunakan untuk mengubah nilai positif menjadi 1 dan nilai negatif menjadi 0,

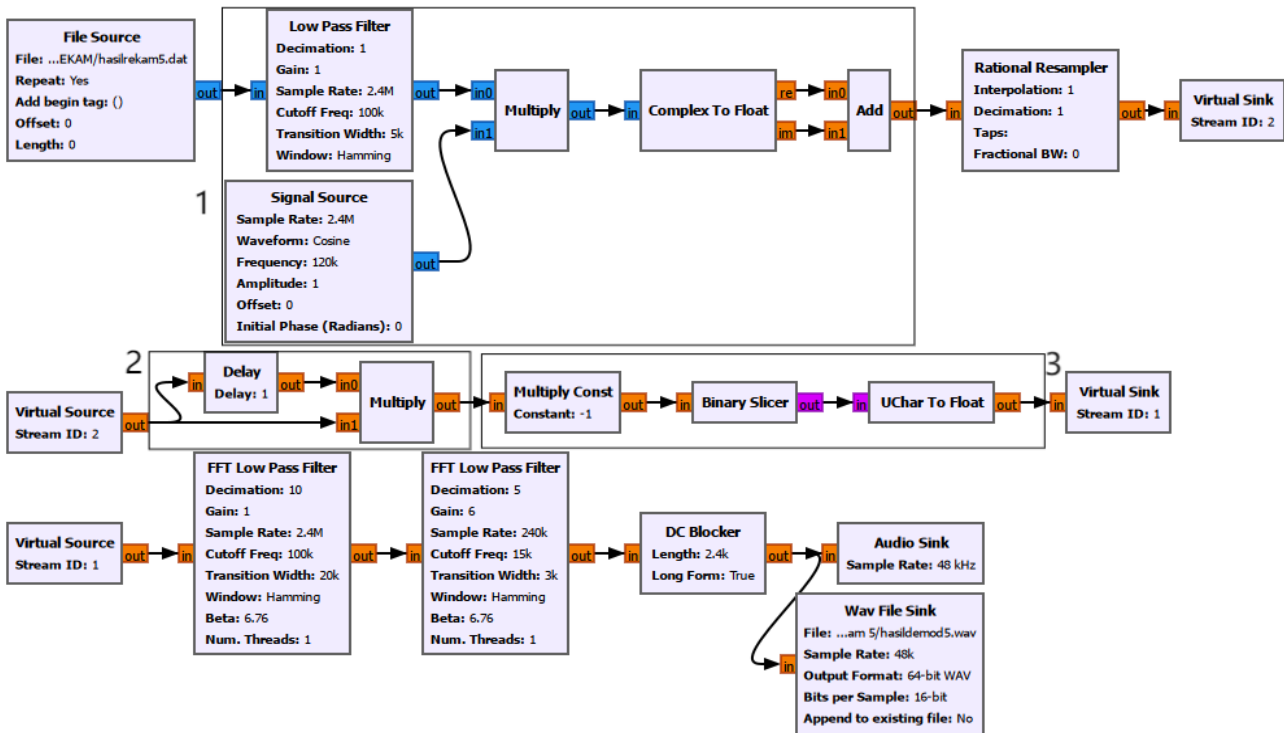
sehingga hanya impuls-impuls *zero crossing* yang dipertahankan. Tahap akhir merupakan proses penyaringan menggunakan untuk merekonstruksi sinyal *baseband*.

**E. WBFM Receive Method**

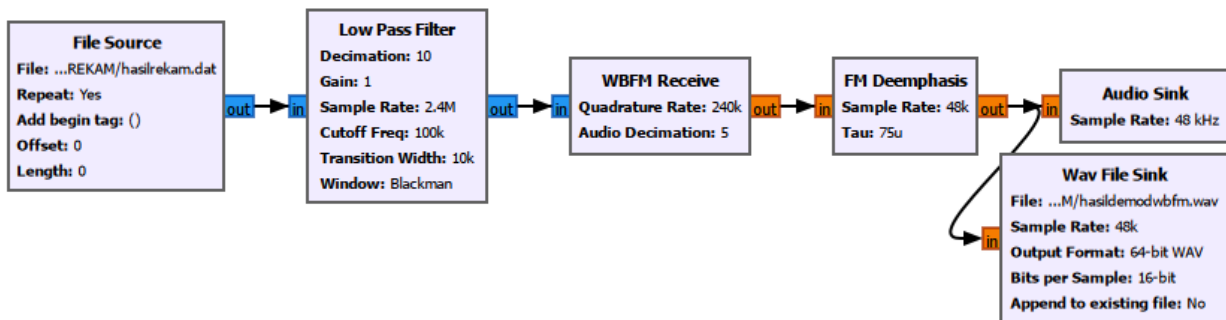
Metode *WBFM Receive* merupakan demodulasi FM yang memanfaatkan blok demodulator bawaan GRC, yaitu *WBFM Receive*. Blok ini dirancang khusus untuk menangani sinyal *Wideband Frequency Modulation* (WBFM), seperti yang digunakan dalam penyiaran radio FM komersial. **Gambar 8** menunjukkan diagram alir metode *WBFM Receive* pada GRC. Blok *WBFM Receive* pada GRC memerlukan parameter *Quadrature Rate*, yang merujuk pada laju sampel input ke blok tersebut—yaitu laju sampel sinyal kompleks (I/Q) setelah melewati tahap *low-pass filtering* dan *decimation* awal. Dalam implementasi ini, input SDR diatur pada laju 2,4 MHz. Setelah melalui proses *decimation* oleh faktor 10 di blok LPF sebelumnya, laju sampel yang masuk ke blok *WBFM Receive* menjadi 240 kHz, sehingga nilai ini digunakan sebagai *Quadrature Rate*. Untuk menghasilkan sinyal audio yang kompatibel dengan perangkat audio standar, seperti *sound card* komputer, diperlukan laju keluaran sebesar 48 kHz. Oleh karena itu, blok *WBFM Receive* selanjutnya melakukan *decimation* tambahan, dalam hal ini dengan faktor 5 ( $240 \text{ kHz} / 5 = 48 \text{ kHz}$ ). Pendekatan ini dipakai sebagai pembanding dalam eksperimen pengukuran kualitas sinyal, terhadap metode-metode lain yang memiliki struktur pemrosesan lebih manual dan modular.



Gambar 6. Diagram Alir Metode *Differentiator and Envelope Detector*



Gambar 7. Diagram Alir Metode Zero Crossing



Gambar 8. Diagram Alir Metode WBFM

## F. Evaluasi Kinerja Demodulasi Sinyal FM untuk Masing-masing Metode

Setelah seluruh metode berhasil diimplementasikan, sinyal hasil demodulasi disimpan dalam format *.wav* untuk dianalisis lebih lanjut dalam rangka menghitung nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Hasil pengukuran SNR digunakan sebagai indikator kuantitatif dalam mengevaluasi kualitas sinyal audio yang dihasilkan oleh masing-masing metode. Nilai SNR dihitung berdasarkan pendekatan distribusi spektral, di mana spektrum sinyal dianalisis terlebih dahulu menggunakan transformasi *Fourier*. Kemudian, 30% komponen spektrum dengan amplitudo terkecil diasumsikan sebagai *noise*, sedangkan sisanya diasumsikan sebagai sinyal. Perbandingan antara energi sinyal terhadap noise inilah yang digunakan untuk menghitung nilai SNR. Pengujian dilakukan terhadap lima metode demodulasi sinyal FM pada dua frekuensi berbeda, yaitu 100 MHz

(Suara Surabaya) dan 90,1 MHz (Media FM). Hasil pengukuran nilai SNR dari masing-masing metode ditunjukkan pada Tabel I dan Tabel II. Masing-masing nilai SNR (SNR 1, SNR 2, dan SNR 3, SNR 4, SNR 5) mewakili hasil proses perekaman yang dilakukan pada lima waktu berbeda untuk memastikan konsistensi dan reliabilitas pengujian. Dari hasil yang diperoleh, terlihat perbedaan yang cukup signifikan dalam performa masing-masing metode yang ditunjukkan melalui nilai rata-rata SNR masing-masing.

Metode *Polar Discriminator* menunjukkan performa paling unggul di kedua frekuensi dibandingkan keempat metode demodulasi lainnya. Pada frekuensi 100 MHz, metode ini menghasilkan rata-rata SNR sebesar 74,08 dB, dan pada frekuensi 90,1 MHz sebesar 73,87 dB. Perbedaan yang sangat kecil antara keduanya menunjukkan bahwa metode ini sangat stabil dan efektif dalam mengekstraksi informasi audio dari

sinyal FM, bahkan di tengah kemungkinan adanya variasi kualitas sinyal akibat faktor propagasi atau interferensi lingkungan.

Metode *Zero Crossing* juga menunjukkan performa yang cukup baik dan stabil, dengan rata-rata SNR sebesar 68,38 dB pada 100 MHz dan 68,62 dB pada 90,1 MHz. Terjadi sedikit peningkatan performa pada frekuensi 90,1 MHz. Hal ini menunjukkan bahwa metode ini memiliki ketahanan yang baik terhadap perubahan karakteristik sinyal dan mampu mempertahankan kualitas demodulasi dalam berbagai kondisi lingkungan. Meskipun metode ini secara prinsip hanya mendeteksi titik nol pada sinyal *real* untuk memperoleh informasi frekuensi, hasilnya terbukti cukup andal. Selain itu, metode *Zero Crossing* juga lebih unggul dibanding dengan metode *Arctan-and-Derivative* maupun *Differentiator and Envelope Detector*.

Metode *Arctan-and-Derivative* memberikan hasil yang relatif stabil di kedua frekuensi dengan rata-rata SNR sebesar 46,99 dB pada 100 MHz dan 48,00 dB pada 90,1 MHz. Walaupun performanya tidak setinggi dua metode sebelumnya, hasilnya tetap berada pada tingkat yang dapat diterima.

Metode *Differentiator and Envelope Detector*, meskipun memberikan hasil yang cukup baik pada frekuensi 100 MHz dengan rata-rata SNR sebesar 46,97 dB, mengalami penurunan performa yang cukup drastis pada frekuensi 90,1 MHz dengan rata-rata SNR hanya sebesar 39,66 dB. Penurunan ini menunjukkan bahwa metode ini lebih sensitif terhadap kualitas sinyal dan kurang cocok untuk digunakan pada frekuensi dengan kondisi propagasi atau interferensi yang lebih dinamis.

Sementara itu, metode *WBFM Receive* secara konsisten menunjukkan performa paling rendah di antara semua metode yang diuji. Pada frekuensi 100 MHz, rata-rata SNR yang diperoleh hanya sebesar 28,21 dB, dan menurun lagi menjadi 23,25 dB pada 90,1 MHz. Hasil ini menunjukkan bahwa metode ini tidak mampu menangani variasi *noise* dan distorsi dengan baik, meskipun merupakan metode standar yang tersedia di GRC. Hal ini mencerminkan keterbatasan dari blok bawaan GRC dalam menangani sinyal dengan kualitas yang rendah atau dalam kondisi lingkungan urban yang kompleks. Meskipun metode ini dirancang untuk kesederhanaan dan kemudahan implementasi, performanya tidak cukup optimal terutama dalam kondisi sinyal yang memiliki banyak *noise* atau interferensi. Nilai seluruh SNR sangat rendah dan relatif tidak berubah secara signifikan, yang menegaskan keterbatasannya dalam meningkatkan kualitas audio hasil demodulasi.

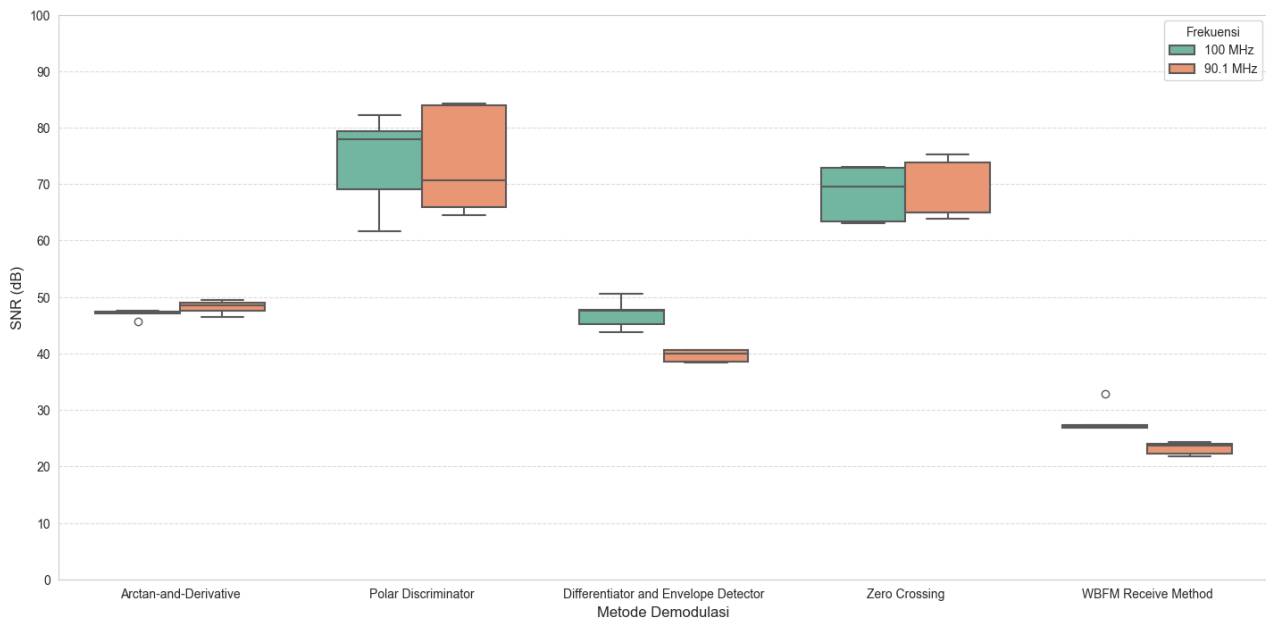
Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemilihan metode demodulasi memiliki dampak besar terhadap kualitas sinyal FM yang diterima, terutama dalam konteks penggunaan SDR di lingkungan urban. Metode *Polar Discriminator* terbukti menjadi metode demodulasi yang paling efektif, dengan performa SNR tertinggi dan kestabilan yang baik dalam berbagai kondisi. Di sisi lain, Sementara itu, metode *Zero Crossing* juga menunjukkan kinerja yang kompetitif, namun memerlukan rangkaian blok yang lebih kompleks dan pengolahan sinyal yang lebih rumit, sehingga implementasinya lebih menantang dibanding *Polar Discriminator*.

Tabel I. Tabel hasil pengukuran SNR pada Frekuensi 100 MHz

Metode Demodulasi	SNR 1 (dB)	SNR 2 (dB)	SNR 3 (dB)	SNR 4 (dB)	SNR 5 (dB)	Rata-rata SNR (dB)
<i>Arctan-and-Derivative</i>	45,65	47,41	47,24	47,60	47,06	46,99
<i>Polar Discriminator</i>	79,39	78,02	82,22	61,70	69,09	74,08
<i>Differentiator and Envelope Detector</i>	50,62	43,72	45,17	47,75	47,57	46,97
<i>Zero Crossing</i>	63,36	72,99	72,92	69,54	63,08	68,38
<i>WBFM Receive</i>	26,88	32,94	27,34	26,99	26,88	28,21

Tabel II. Tabel hasil pengukuran SNR pada Frekuensi 90,1 MHz

Metode Demodulasi	SNR 1 (dB)	SNR 2 (dB)	SNR 3 (dB)	SNR 4 (dB)	SNR 5 (dB)	Rata-rata SNR (dB)
<i>Arctan-and-Derivative</i>	48,56	47,55	49,41	48,97	46,52	48,00
<i>Polar Discriminator</i>	70,61	65,95	84,23	64,56	83,99	73,87
<i>Differentiator and Envelope Detector</i>	40,68	39,97	40,66	38,55	38,45	39,66
<i>Zero Crossing</i>	65,05	63,93	73,87	64,91	75,32	68,62
<i>WBFM Receive</i>	24,05	24,29	23,74	22,32	21,86	23,25



Gambar 9. Boxplot Distribusi SNR pada Frekuensi 100 MHz dan 90,1 MHz

Boxplot pada Gambar 9 menggambarkan variasi nilai SNR dari masing-masing metode demodulasi sinyal FM yang diuji pada frekuensi 100 MHz dan 90,1 MHz. Visualisasi ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai sebaran data, kestabilan performa, serta outlier yang mungkin muncul pada setiap metode. Metode *Polar Discriminator* tampak mendominasi dengan nilai median yang tinggi pada kedua frekuensi, terutama pada frekuensi 90,1 MHz. Rentang interkuartil cukup lebar, terutama pada frekuensi 100 MHz, namun nilainya tetap berada di kisaran atas dibanding metode lain. Hal ini menunjukkan bahwa metode ini tidak hanya mampu menghasilkan SNR tinggi secara konsisten, tetapi juga memiliki fleksibilitas yang baik terhadap perubahan frekuensi.

Metode *Zero Crossing* memiliki sebaran data yang relatif stabil di kedua frekuensi. Meskipun terdapat sedikit variasi pada frekuensi 100 MHz, rentang nilai SNR tetap berada pada level yang cukup tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa metode ini mampu mengimbangi kinerja metode *Polar Discriminator*, terutama dalam kondisi sinyal yang bersih dan stabil.

Sementara itu, metode *Arctan-and-Derivative* menunjukkan distribusi SNR yang sangat sempit dan stabil di kedua frekuensi, dengan median berada di kisaran 47–48 dB. Konsistensi yang tinggi ini terlihat dari box yang kecil dan minim outlier, menandakan bahwa metode ini mampu memberikan performa yang dapat diprediksi meskipun bukan yang tertinggi.

Metode *Differentiator and Envelope Detector* memiliki distribusi yang cukup lebar, terutama

pada frekuensi 100 MHz. Median SNR terlihat lebih rendah dibanding metode lainnya, dengan nilai-nilai yang terkonsentrasi di kisaran 40–45 dB. *Boxplot* juga menunjukkan adanya beberapa variasi signifikan, yang mengindikasikan bahwa metode ini lebih rentan terhadap fluktuasi noise.

*WBFM Receive* secara visual tampak memiliki nilai median paling rendah dan distribusi paling sempit. Meskipun grafik menunjukkan beberapa nilai yang sedikit lebih tinggi pada frekuensi 100 MHz, posisi median yang rendah pada kedua frekuensi menegaskan bahwa metode ini secara umum memiliki kualitas sinyal paling buruk. *Boxplot* ini membantu menegaskan bahwa meskipun WBFM merupakan metode yang praktis, hasilnya secara statistik jauh di bawah metode lainnya.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode demodulasi sinyal FM berbasis GNU Radio dan RTL-SDR tanpa menggunakan blok *WBFM Receive* bawaan mampu menghasilkan kualitas sinyal yang lebih baik, sebagaimana dibuktikan oleh nilai SNR yang lebih tinggi pada metode berbasis blok dasar. Pendekatan ini terbukti tidak hanya efektif dalam mengekstraksi informasi audio, tetapi juga adaptif terhadap kondisi interferensi di lingkungan urban. Metode *Polar Discriminator* menunjukkan kinerja terbaik secara konsisten, dengan rata-rata SNR tertinggi pada kedua frekuensi pengujian, menjadikannya metode yang paling direkomendasikan. Metode *Zero Crossing* juga menunjukkan kinerja yang baik,

meskipun implementasinya lebih kompleks. Di sisi lain, metode *Arctan-and-Derivative* serta *Differentiator and Envelope Detector* menghasilkan SNR yang lebih rendah namun tetap dapat diterima dalam kondisi sinyal yang relatif bersih. Sementara itu, metode *WBFM Receive*, walaupun implementasinya paling sederhana, mencatatkan nilai SNR terendah di kedua frekuensi dan menunjukkan ketidakstabilan performa, sehingga kurang direkomendasikan untuk aplikasi di lingkungan dengan banyak gangguan. Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat potensi penggunaan GNU Radio Companion dan RTL-SDR sebagai platform penelitian dan pengembangan sistem penerima FM yang fleksibel, efisien, dan hemat biaya.

Untuk pengembangan selanjutnya, sistem ini dapat diuji dalam kondisi kanal yang lebih dinamis atau berinterferensi tinggi. Selain itu, integrasi dengan algoritma *machine learning* untuk penyesuaian parameter demodulasi secara otomatis dapat menjadi strategi lanjutan guna meningkatkan ketahanan dan kualitas penerimaan sinyal secara adaptif dalam berbagai kondisi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Panchenko and A. Cheranev, "Interception Wideband FM Signals with RTL-SDR", *IEEE USBEREIT*, 2021.
- [2] H. Wijayanto, B. Herdiana, dan Y. E. Bimantoro, "Rancang Bangun Software Defined Radio Frekuensi Multiband untuk Sistem Penerima Audio berbasis Raspberry Pi", *TELEKONTRAN*, vol. 7, no. 2, hlm. 179-184, 2019.
- [3] R. K. Nadia dan I. G. P. Astawa, "Implementasi Receiver Sistem Komunikasi Radio FM menggunakan RTL-SDR", *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, vol. 7, no. 1, hlm. A-101 - A-106, 2024.
- [4] M. H. Rahman dan M. M. Islam, "A Practical Approach to Spectrum Analyzing Unit using RTL-SDR", *International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering*, hlm. 185-188, 2016.
- [5] S. Meshram dan N. Kolhare, "The Advent Software Defined Radio: FM Receiver with RTL-SDR and GNU Radio", *Second International Conference on Smart Systems and Inventive Technology*, hlm. 230-235, 2019.
- [6] ITU-R Recommendation P.1407-8, "Multipath propagation and parameterization of its characteristics," Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, Sep. 2021. [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/rec/p/R-REC-P.1407-8-202109-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/rec/p/R-REC-P.1407-8-202109-1!!PDF-E.pdf)
- [7] M. B. Perotoni dan K. M. G. Santos, "SDR-Based Spectrum Analyzer Based in Open-Source GNU Radio", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 20, no. 3, hlm. 542-555, 2021.
- [8] B. B. Harianto, M. Rifai, A. Irfansyah, Y. Suprpto, "Design Indoor FM Communication Based on SDR and GNU Radio Using Validated Spectrum Analyzer", *Journal of Physics: Conference Series*, 2020.
- [9] A. Athiroh, N. F. A. Hakim, dan I. Kustiawan, "Penerima AM/FM Kompak Reconfigurable Berbasis Software Defined Radio", *SNETO*, hlm 130-137, 2021.
- [10] M. Gummineni dan T. R. Polipalli, "Implementation of Reconfigurable Transceiver using GNU Radio and HackRF One". *Wireless Personal Communication*, hlm. 889-905, 2020.
- [11] R. M. Martins, "SDR-WBFM Receiver as an Alternative to Replace Equipment in FM Extended", *SET International Journal of Broadcasting Engineering*, vol. 2, hlm. 56-58, 2016.
- [12] K. Vachhani dan R. A. Mallari, "Experimental Study on Wide Band FM Receiver using GNU Radio and RTL-SDR", *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, hlm. 1810-1814, 2015.