

Optimasi Filter Bandpass Aktif untuk Sinyal Lemah Menggunakan *Quantum Particle Swarm Optimization* pada Studi Kasus Spektral Daya Sinyal Electroencephalogram

Ellys Kumala Pramartaningthyas^{1*}, Aini Lostari²

¹ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Qomaruddin, Gresik, Indonesia

² Program Studi Teknik Mesin, Universitas Qomaruddin, Gresik, Indonesia

* Korespondensi: ellys.kumala@gmail.com

Received: 1 May 2024

Accepted: 2 July 2024

Published: 7 July 2024

Citation: Pramartaningthyas, E.K. & Lostari, A. (2024). Optimasi Filter Bandpass Aktif untuk Sinyal Lemah Menggunakan Quantum Particle Swarm Optimization pada Studi Kasus Spektral Daya Sinyal Electroencephalogram. *Qomaruna Journal of Multidisciplinary Studies* 1(2), 65-73

ABSTRACT

This research focuses on using Quantum Particle Swarm Optimization to optimize active bandpass filters for weak signals. Electroencephalograph signal data obtained from other researchers was used as a case study in this research. This Electroencephalogram signal data, consisting of 1280 signal amplitudes with a sampling frequency of 256 Hz, was characterized before being fed into Quantum Particle Swarm Optimization for optimization. The optimization goal of Quantum Particle Swarm Optimization is to achieve a signal frequency range with a maximum average power value. For bandpass filter design, the frequency range obtained from Quantum Particle Swarm Optimization is used as a reference. The frequency range of 9.9 Hz to 13 Hz and 15.99 Hz to 30 Hz provides optimal conditions. The filter design is based on the frequency range of optimization results and component values R_1 , R_2 , and R_3 respectively $5.1\text{M}\Omega$, $10.2\text{M}\Omega$, and $1\text{M}\Omega$ with $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ for frequencies 9.9 Hz to 13 Hz, and a value of $1.2\text{M}\Omega$, $2.4\text{M}\Omega$, and $1\text{M}\Omega$ each with $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ for frequencies 15.99 Hz to 30 Hz. From the research that has been conducted, Quantum Particle Swarm Optimization is effectively able to optimize the active bandpass filter design process in the case study of electroencephalogram signals.

Keywords: Quantum Particle Swarm Optimization, Optimization, Average Power, Band Pass Filter, Electroencephalogram

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada penggunaan *Quantum Particle Swarm Optimization* untuk mengoptimalkan filter bandpass aktif untuk sinyal lemah. Data sinyal Electroencephalogram yang diperoleh dari peneliti lain digunakan sebagai studi kasus dalam penelitian ini. Data sinyal Electroencephalogram ini, yang terdiri dari 1280 amplitudo sinyal dengan frekuensi sampling 256 Hz, dikarakterisasi sebelum dimasukkan ke dalam *Quantum Particle Swarm Optimization* untuk optimalisasi. Tujuan optimalisasi *Quantum Particle Swarm Optimization* adalah untuk mencapai rentang frekuensi sinyal dengan nilai daya maksimum rata-rata. Untuk perancangan filter bandpass, rentang frekuensi yang diperoleh dari optimasi *Quantum Particle Swarm Optimization* ini digunakan sebagai referensi. Range frekuensi 9.9 Hz hingga 13 Hz dan 15.99 Hz hingga 30 Hz



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

memberikan kondisi optimal. Rancangan filter didasarkan pada range frekuensi hasil optimasi dan nilai komponen R_1 , R_2 , dan R_3 masing-masing $5.1\text{M}\Omega$, $10.2\text{M}\Omega$, dan $1\text{M}\Omega$ dengan $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ untuk frekuensi 9,9 Hz hingga 13 Hz, dan nilai $1.2\text{M}\Omega$, $2.4\text{M}\Omega$, dan $1\text{M}\Omega$ masing-masing dengan $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ untuk frekuensi 15,99 Hz hingga 30 Hz. Dari penelitian yang telah dilakukan ini *Quantum Particle Swarm Optimization* secara efektif mampu melakukan optimasi pada proses desain filter bandpass aktif pada studi kasus sinyal electroencephalogram.

Kata kunci: *Quantum Particle Swarm Optimization* , Optimasi, Daya rata-rata, Filter Band Pass, Electroencephalogram

1. Pendahuluan

Bidang elektronika sangat penting untuk kehidupan manusia di era teknologi seperti yang kita alami saat ini (Wulansari et al., 2016). Rangkaian elektronika adalah bagian penting dari penelitian ilmiah dalam fisika, kimia, dan biologi. Ini termasuk alat pengukuran ilmiah dalam fisika, biologi, dan kedokteran, serta alat uji kimia dalam skala laboratorium (Siuly et al., 2016). Sebagian besar perangkat elektronika ini adalah perangkat elektronika dengan sinyal lemah, yang sangat umum di instrumentasi medis. Ini karena amplitudo sinyal yang berasal dari jaringan atau organ tubuh manusia yang dapat ditangkap oleh sensor di perangkat medis (Mundy-Castle, 1957). Elektrokardiogram, elektroensefalogram, dan elektroretinogram adalah beberapa instrumen medis yang termasuk dalam kategori ini (Siuly et al., 2016).

Beberapa instrumen medis memerlukan filter untuk melewatkan sinyal dengan frekuensi tertentu. Salah satu alat medis ini adalah elektroensefalogram (EEG) (Mundy-Castle, 1957). EEG adalah alat yang digunakan untuk menangkap aktivitas listrik di otak. Dalam kedokteran, EEG antara lain digunakan untuk diagnosa penyakit yang terkait dengan kelainan otak dan kejiwaan serta untuk mengidentifikasi pola pikiran atau kondisi mental seseorang (Mundy-Castle, 1957) (Petersén & Eeg-Olofsson, 1971). Dalam proses perancangan filter untuk perangkat tersebut, untuk menentukan rentang frekuensi yang diinginkan dan menghitung nilai masing-masing komponen biasanya melakukan perancangan filter secara langsung (Subha et al., 2010). Namun, dapat dilakukan optimasi dengan melihat spektral daya sinyal untuk menentukan rentang frekuensi filter (Subha et al., 2010) (Wulansari et al., 2016). Ini dapat dilakukan dengan melihat densitas spektral daya sinyal untuk mendapatkan daya rata-rata pada rentang frekuensi tertentu, dan kemudian dapat dioptimalkan untuk mendapatkan nilai daya rata-rata sinyal yang bernilai maksimum pada rentang frekuensi yang ditentukan menggunakan optimasi Quantum Particle Swarm (Luitel & Venayagamoorthy, 2010, Flori et al., 2022).

Teknik dan ilmu pengetahuan modern didasari oleh ilmu fisika. Konsep dari mekanika kuantum dan komputasi telah memberikan inspirasi untuk metode optimisasi baru-baru ini. Salah satu teknik optimisasi yang berbasis mekanika kuantum adalah QPSO (Mikki & Kishk, 2006). Pada mekanika klasik, partikel digambarkan oleh vektor posisi dan vektor kecepatan, yang menentukan lintasan partikel (Yang et al., 2004). Namun, dalam dunia kuantum, istilah "lintasan" tidak lagi berarti karena posisi dan kecepatan partikel tidak bisa ditentukan secara bersamaan karena prinsip ketidakpastian (Otniel Windrayadi et al., 2018). Oleh karena itu, algoritma PSO dapat saling terikat untuk bekerja dengan cara yang berbeda jika masing-masing partikel dalam sistem PSO memiliki perilaku kuantum (Fang et al., 2010). Salah satu kelemahan PSO biasa adalah kecenderungan untuk konvergensi terlalu cepat di lokasi optimal. Spesifik untuk masalah yang tidak teratur (Tharwat & Hassanien, 2019), sehingga menyebabkan hasil hanya lokal optimum, bukan global optimum (Sun et al., 2005). Artinya, PSO akan berhenti pada suatu nilai lokal optimum jika yang kita inginkan adalah nilai optimum terkecil, dan optimasi PSO tidak dapat menjamin konvergensi global. Dengan parameter kontrol yang lebih sedikit, QPSO dapat menemukan nilai konvergen lebih baik daripada PSO (Zhou et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian ini akan melakukan perencanaan Filter Bandpass aktif untuk menemukan solusi terbaik untuk nilai daya rata-rata sinyal maksimum pada rentang frekuensi tertentu.

Ini akan dilakukan dengan menggunakan software matlab untuk menghasilkan rancangan filter band pass untuk sinyal lemah dengan nilai daya rata-rata maksimum pada rentang frekuensi tertentu.

2. Tinjauan Pustaka

Salah satu algoritma pencarian berbasis populasi yang paling umum digunakan untuk optimasi adalah Quatum Particle Swarm Optimization. Kennedy dan Eberhart (1995) adalah pencipta pertama algoritma ini. Algoritma ini berasal dari cara burung mencari makan. Partikel QPSO menunjukkan solusi potensial. QPSO telah banyak digunakan untuk berbagai masalah sejak diperkenalkan. Untuk melakukan optimasi pada jaringan syarat tiruan, QPSO juga dapat digunakan. Studi sebelumnya mencakup penggunaan algoritma Optimization Partikel Swarm Quatum pada aplikasi signal Electroecenpagram, antara lain sebagai berikut.

Dalam penelitian Fadly Muhammad Kamil ini, sistem untuk memilih dan mengoptimasi kanal EEG epilepsi telah dibuat. Sebelum memulai seleksi dan optimasi kanal, klasifikasi dilakukan dengan menggunakan K-Nearest Neighbor (K-NN). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai K terbaik dari data yang dimasukkan ke dalam sistem seleksi dan optimasi kanal. Seleksi kanal EEG epilepsi ini dilakukan menggunakan metode spatial selection, dan proses optimasinya dilakukan menggunakan metode Particle Swarm Optimization. Hasil pemilihan ruang kemudian dioptimasi menggunakan PSO untuk mendapatkan kanal aktif yang paling ideal dan meningkatkan akurasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan menggunakan lima dataset, optimasi kanal EEG dengan akurasi tertinggi adalah 100%. Ada enam data latih (tiga bayi dan tiga remaja) dan empat data uji (dua bayi dan dua remaja) di masing-masing dataset. Jumlah kanal yang diperoleh juga dikurangi dari 23 kanal sebelumnya menjadi 7 kanal aktif yang paling ideal.

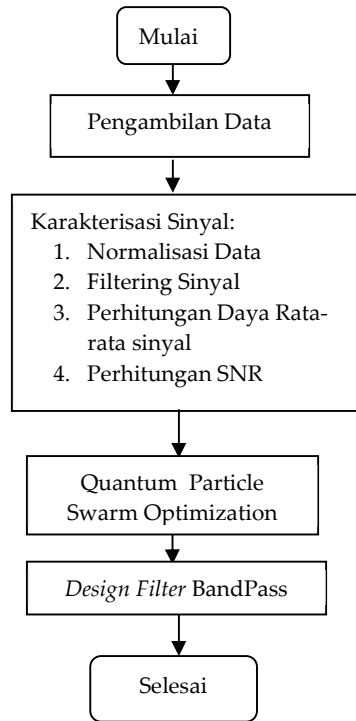
Penelitian Muhamad Fulki Firdaus ini akan menggunakan metode pemilihan ruang untuk mengolah sinyal EEG dari stroke. Dua pendekatan energi seleksi spasial digunakan: seleksi manual dan seleksi otomatis. Selain itu, ekstraksi Power Spectral Density (PSD) dan klasifikasi Extreme Learning Machine (ELM) digunakan untuk memfilter dataset menjadi ukuran yang lebih sesuai dan mendapatkan hasil komposisi kanal aktif yang relevan. Hasil menunjukkan bahwa pemilihan ruang manual dan automasi dapat meningkatkan akurasi hingga 15% dari data normal, dengan akurasi tertinggi 0,84 saat menggunakan metode perhitungan l2-norm. Metode perhitungan energi l2-norm juga mendapatkan hasil yang lebih baik daripada metode perhitungan lainnya. Metode ini juga dapat digunakan untuk memilih kanal aktif yang terkait dengan sinyal EEG dari stroke.

Sinyal EEG yang digunakan dalam penelitian Bimo Rian Tri Nugroho ini berasal dari database DEAP: A database for Emotion Analysis using physiological Signals. Sinyal EEG ini kemudian diproses menggunakan Independent Component Analysis (ICA). Data yang digunakan sudah melalui tahap pre-processing dan berasal dari database. Arousal, valence, liking, dominance, dan familiarity adalah tingkatan data database yang hanya diambil dari valence. Matriks setiap percobaan diperoleh dengan ICA, dan ekstraksi fitur dari matriks ini digunakan sebagai data latihan dan data uji. Genetic Algorithm (GA) dan Support Vector Machine (SVM) mengklasifikasikan hasil fitur untuk mengukur akurasi dan kondisi emosi saat senang atau sedih. Dalam penelitian ini, hasil klasifikasi hanya menggunakan SVM memperoleh akurasi sebesar 56,25%, dan klasifikasi menggunakan SVM yang dioptimalisasi oleh GA memperoleh akurasi sebesar 77.27%. Ini menunjukkan bahwa klasifikasi menggunakan SVM yang dioptimalisasi oleh GA memberikan hasil yang lebih akurat daripada klasifikasi hanya menggunakan SVM. Hasil akurasi yang dapat diandalkan dari klasifikasi emosi antara senang dan sedih adalah hasil yang dapat diandalkan dari klasifikasi emosi.

Penelitian- penelitian lain yang telah dilakukan tentang sinyal EEG. Penelitian EEG telah dilakukan oleh Alejandro Gonzales Isao Nambu, Haruhide, dan Yasuhiro Wada (2014). Mereka menggunakan kombinasi Fisher Disriminant Analysis (FDA) dan algoritma Multiobjective Hybrid Real-binary Particle Swarm Optimization (MPHSO) untuk mengembangkan metode untuk mengklasifikasikan potensi terkait peristiwa (ERP) P300. yang mengkalsifikasi sinyal. Lahane dan Sangiah (2015) menggunakan pendekatan emosi yang berbasis pengenalan dan klasifikasi untuk mengidentifikasi karakteristik sinyal EEG dan mengoptimalkan penggunaan memori.

3. Metode Penelitian

Diagram alir penelitian ini dapat ditunjukkan pada gambar 1 dibawah ini :



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Data sinyal EEG pada penelitian ini merupakan data sekunder yang dilakukan peneliti lain. Data sinyal EEG ini diambil dengan menggunakan instrumen Sigma PL Pro yang ada di RS Jiwa Bandung. Pengukuran dilakukan terhadap 5 mahasiswa usia 20-30 tahun, yang sehat jasmani serta menyatakan dirinya tidak mempunyai tekanan psikologis apapun. Setiap anggota populasi dapat dinilai melalui fungsi fitness. Pada masalah optimasi, jika solusi yang dicari adalah memaksimalkan fungsi h , nilai fitness yang digunakan adalah nilai fungsi h , yaitu $f = h$, di mana f adalah nilai fitness. Pada penelitian ini, fungsi fitness yang digunakan adalah $f =$ daya rata-rata sinyal dengan batas iterasi daya rata-rata yang ditargetkan dan jumlah generasi yang diberikan. Dalam domain frekuensi, spektral daya berturut-turut adalah representasi informasi daya sinyal dalam domain frekuensi. Densitas daya spektral, juga dikenal sebagai densitas daya spektral, adalah jumlah daya spektral yang dihitung per satuan frekuensi. Berikut ini adalah definisi matematis dari padatan spektral daya (PSD) dari proses x_n acak stasioner yang dikaitkan dengan urutan korelasi oleh transformasi Fourier waktu diskrit:

$$P_{xx}(m) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx}(m) e^{-j\omega m} \quad (1)$$

Pada sinyal yang sering dijumpai dalam berbagai aplikasi misalnya sinyal EEG, daya $P_{xx}(\omega)$ dari $0 \leq \omega \leq \pi$ sudah cukup untuk mengkarakterisasi densitas spektral sinyal. Daya rata-rata sinyal pada rentang frekuensi tertentu $[\omega_1, \omega_2]$ $0 \leq \omega_1 \leq \omega_2 \leq \pi$ ditunjukkan dengan persamaan berikut ini:

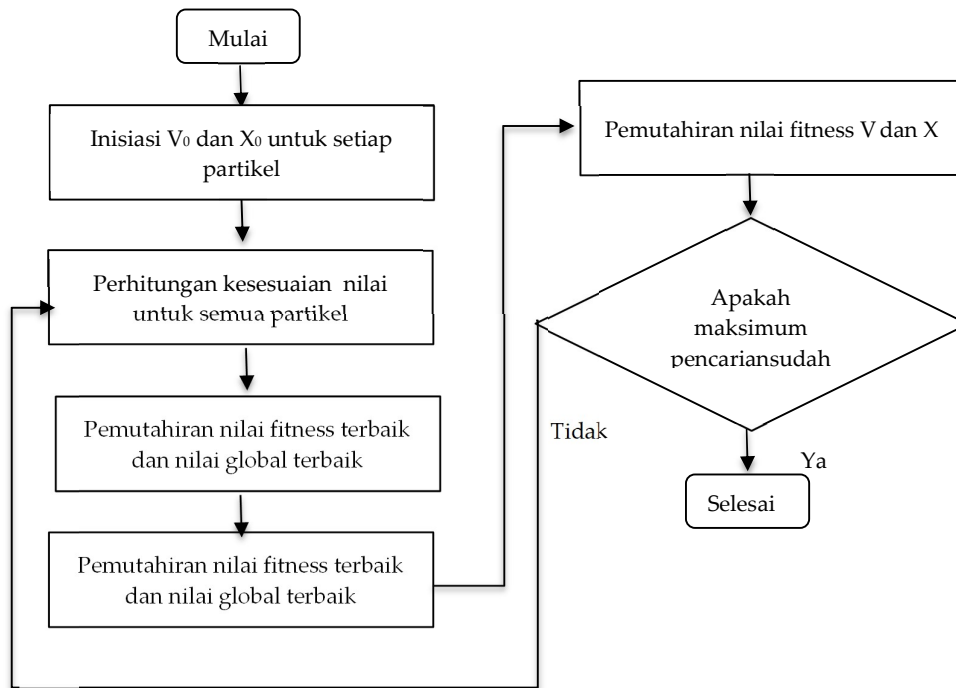
$$\bar{P}_{[\omega_1, \omega_2]} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} P_{xx}(\omega) d\omega \quad (2)$$

Daya rata-rata sinyal dalam hal ini dalam domain frekuensi sehingga daya rata-rata dituliskan dalam bentuk *power* per unit frekuensi. Dalam bentuk satuan dB daya rata-rata dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\bar{P} \text{ (dB)} = 10 \log (\text{Power_domain frekuensi}) \quad (3)$$

Untuk daya rata-rata (domain frekuensi) yang sangat kecil $\bar{P}$ (dB) akan bernilai negatif.

Adapun flowchart algoritma *Quantum Particle Swarm Optimization* (QPSO) pada matlab yang di jalankan ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut ini



Gambar 2. Flowchart Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO)

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Optimasi Quantum Particle Swarm Optimization

Untuk penskalaan sinyal, data penelitian ini telah dilakukan normalisasi. Normalisasi ini dilakukan sebelum data tersebut dimasukkan ke dalam *Quantum Particle Swarm Optimization*. Untuk mendapatkan range frekuensi dengan nilai daya rata-rata terbaik, *Quantum Particle Swarm Optimization* melakukan fitering sinyal pada loopingnya. Dengan demikian, masalah penelitian ini adalah optimalisasi swarm partikel quantum, yang bertujuan untuk mendapatkan range frekuensi dengan nilai daya rata-rata maksimum. Nilai daya rata-rata sinyal berfungsi sebagai fungsi fitness. Daya rata-rata yang ditargetkan dan jumlah generasi yang diberikan adalah faktor-faktor yang menentukan batas iterasi algoritma *Quantum Particle Swarm Optimization* ini. *Contraction-expansion coefficient* adalah salah satu parameter pembeda yang digunakan dalam QPSO. Kecepatan konvergensi partikel ditentukan oleh parameter ini. Pencarian awal yang lebih dinamis dan di seluruh dunia dapat diterima dengan menggunakan nilai awal $\beta_{\max} = 1$. Nilai kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai nilai $\beta_{\min} = 0,4$. Ini digunakan untuk menyelesaikan pencarian algoritma QPSO menggunakan pencarian lokal yang lebih baik. Persamaan dibawah ini menunjukkan persamaan nilai beta (β).

$$\beta(t) = \beta_{\max} - \left(\frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{\text{itermax}} \right) * \text{iter}(t) \quad (4)$$

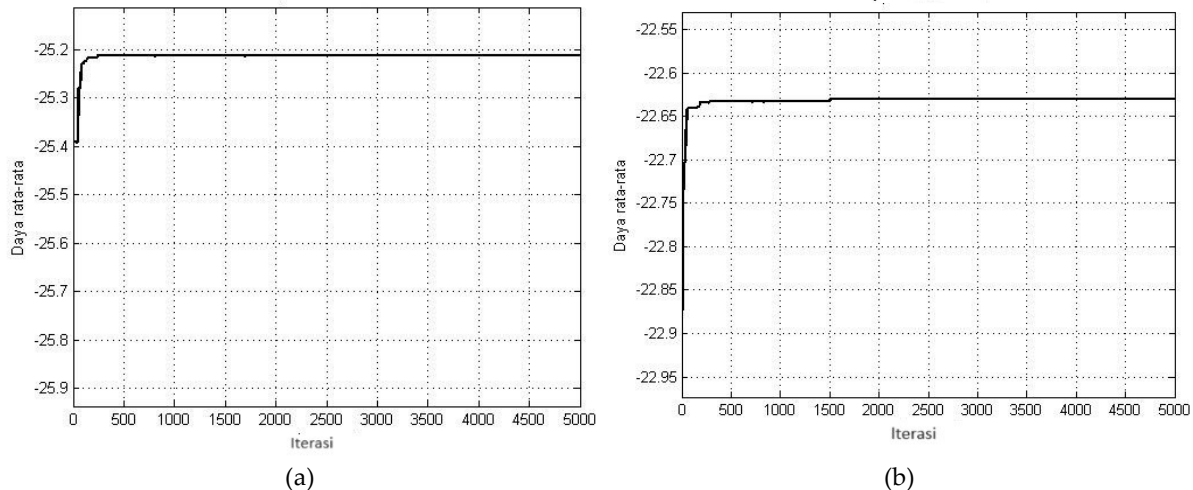
Di mana:

$\beta(t)$ = contraction-expansion coefficient (beta).

$\beta_{\max}(t)$ = nilai awal contraction-expansion coefficient

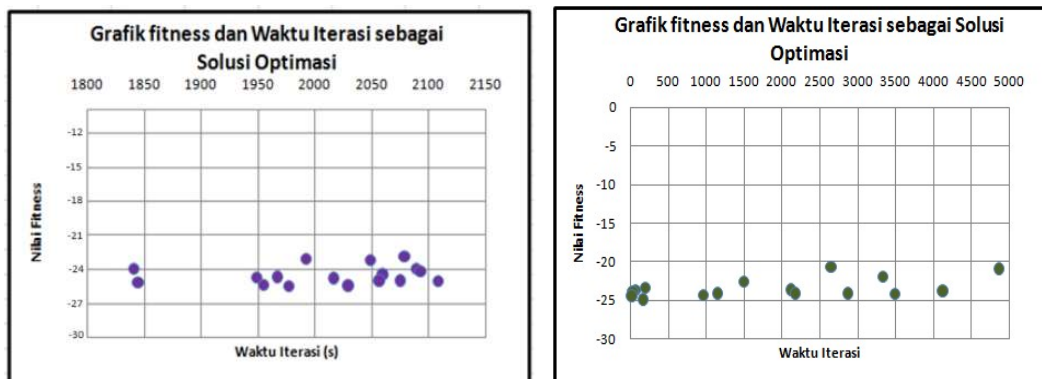
$\beta_{\min}(t)$ = nilai akhir *contraction-expansion coefficient*
 iter max = Iterasi maksimum
 iter(t) = Iterasi

Hasil optimasi *Quantum Particle Swarm Optimization* dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. (a) Hasil optimasi pada range frekuensi sinyal 8-13 Hz. (b) Hasil optimasi pada range frekuensi 14-30 Hz.

Kondisi optimum untuk data sinyal EEG pada optimasi pada range frekuensi 8-13 Hz dan 14-30 Hz masing-masing sebesar diperoleh pada $F_1 = 9.9238$ Hz dan $F_2 = 13$ Hz dengan daya rata-rata -25.243 dB dan pada $F_1 = 16$ Hz dan $F_2 = 30$ Hz dengan nilai daya rata-rata sinyal -22.632dB. Optimasi pada range frekuensi 8-13 Hz pada data pertama sampai data ke-48, hampir seluruhnya menunjukkan nilai maksimum daya rata-rata diperoleh pada saat $F_1 = 9,9$ Hz dan $F_2 = 13$ Hz sedangkan pada optimasi pada range frekuensi 14-30 Hz nilai maksimum daya rata-rata diperoleh pada saat $F_1 = 16,99$ Hz dan $F_2 = 30$ Hz. Nilai F_1 dan F_2 ini akan menjadi frekuensi *cut off* pada perancangan filter band pass. Berikut grafik hubungan antara fitness dengan generasi dan waktu pada range frekuensi 8-14 Hz dan 14-30 Hz.

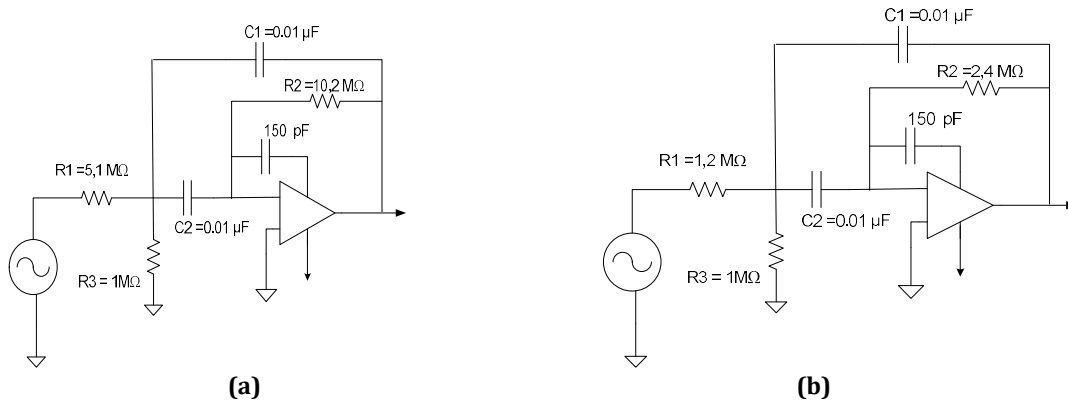


Gambar 4. (a) Hasil optimasi pada range frekuensi sinyal 8-13 Hz. (b) Hasil optimasi pada range frekuensi 14-30 Hz.

Berdasarkan Gambar 4 diatas, dipilih kandidat solusi hasil optimasi pada range 14-30 Hz. Pemilihan kandidat solusi ini dilakukan dengan mencari titik-titik hasil optimasi yang berada $\pm 25,8\%$ dengan fitness target yang telah diberikan yaitu dari -20 dB. Pemilihan range $\pm 25,8\%$ ini disebabkan persebaran titik-titik pada daerah tersebut lebih rapat serta range ini dianggap paling mendekati dengan fitness target.

1.1 Perancangan Filter Band Pass

Range frekuensi optimasi *Quantum Particle Swarm Optimization* menjadi dasar perancangan filter *band pass*. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan filter band pass antara lain sebagai berikut : penentuan frekuensi tengah (f_{center}), lebar pita (*bandwidth*) dan perhitungan faktor kualitas Q serta nilai komponen-komponen filter. Kondisi optimum terjadi pada range frekuensi 9.9 Hz sampai 13 Hz dan range frekuensi 15.99 Hz sampai 30 Hz. Rancangan filter yang dibuat berdasarkan range frekuensi hasil optimasi dengan nilai komponen R_1, R_2 , dan R_3 masing-masing sebesar $5.1\text{M}\Omega$, $10.2\text{M}\Omega$, dan $1\text{M}\Omega$ dengan nilai $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ untuk frekuensi 9,9 Hz sampai 13 Hz dan nilai R_1, R_2 , dan R_3 masing-masing sebesar $1.2\text{M}\Omega$, $2.4\text{M}\Omega$, dan $1\text{M}\Omega$ dengan nilai $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ pada range frekuensi 15,99 Hz sampai 30 Hz. Dengan gambar rangkaian sebagai berikut :

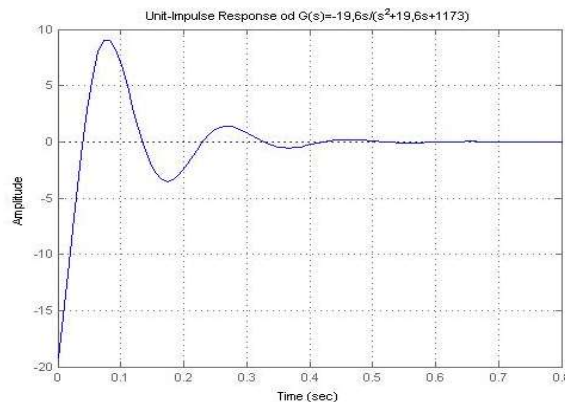


Gambar 5. Rangkaian Filter Band Pass untuk optimasi pada (a) range frekuensi 8-13 Hz dan (b) range frekuensi 14-30 Hz

Fungsi transfer pada rangkaian (a) sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{-19,6 s}{s^2 + 19,6 s + 1,173 \cdot 10^3} \quad (5)$$

Dengan karakteristik respon unit impulse sebagai berikut :

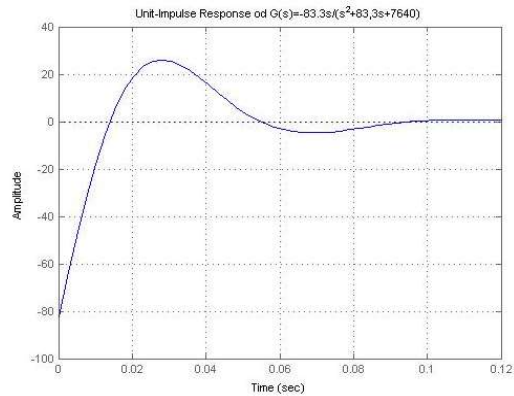


Gambar 6. Karakteristik respon pada rangkaian (a)

Fungsi transfer pada rangkaian (b) sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{-83,3 s}{s^2 + 83,3 s + 7,64 \cdot 10^3} \quad (6)$$

Dengan karakteristik respon unit impulse sebagai berikut :



Gambar 7. Karakteristik respon pada rangkaian (b)

Untuk menentukan karakteristik respon transien sistem dengan input unit impulse, pada umumnya perlu dilakukan pengamatan terhadap waktu tunda (time delay) t_d , waktu naik (rise time) t_r , waktu puncak (peak time) t_p , maximum (percent) overshoot, dan settling time t_s . Waktu tunda (time delay) merupakan waktu yang dibutuhkan agar respons mencapai setengah dari nilai puncak kurva respons transien dimulai dari kondisi mula-mula. Berdasarkan Gambar 4.8 (a) dan (b), pada rangkaian filter hasil optimasi pada range frekuensi 8-13 Hz dan 14-30 Hz diperoleh waktu tunda (*time delay*) masing-masing sebesar 0,0183 s dan 0,00636 s. Parameter lain dalam penentuan karakteristik respon transien ini adalah waktu naik (*rise time*) t_r , waktu naik (*rise time*) ini adalah waktu yang diperlukan agar respons sistem naik dari 10% menjadi 90%, 5% menjadi 95%, atau dari 0 % menjadi 100%. Nilai waktu naik (*rise time*) pada masing-masing rangkaian adalah 0,377 s untuk rangkaian filter hasil optimasi pada range frekuensi 8-13 Hz dan 0,0137 s untuk rangkaian filter hasil optimasi pada range frekuensi 14-30 Hz. Waktu puncak (*peak time*) t_p merupakan waktu pada saat respons sistem mencapai puncak kurva respons transien. Waktu puncak (*peak time*) pada rangkaian filter untuk optimasi pada range frekuensi 8-13 Hz dan 14-30 Hz diperoleh waktu masing-masing sebesar 0,0826 s dan 0,028 s. *Maximum (percent) overshoot*. M_p , adalah presentase maksimum nilai puncak kurva respon diukur dari kesatuan nilai pada saat keadaan stabil (*steady state*). *Maximum (percent) overshoot* rangkaian filter untuk optimasi pada range frekuensi 8-13 Hz dan 14-30 Hz masing-masing diperoleh sebesar 1,97% dan 4,6%. *Settling time* t_s merupakan waktu yang diperlukan agar respon mencapai nilai akhir (mendekati keadaan stabil) atau tetap berada dalam range nilai akhir pada toleransi error yang ditentukan dengan presentase absolut (2% atau 5%) dari keadaan stabil (*steady state*). Pada masing-masing kurva respon transien diperoleh nilai settling time sebesar 0,394 s untuk kurva (a) dan 0,0814 s untuk kurva (b). Berdasarkan kurva respon pada masing-masing rangkaian dapat disimpulkan bahwa karakteristik respon pada semua rangkaian menunjukkan respon sistem orde 2. Sistem akan mencapai kestabilan dalam merespon input yang diberikan pada setelah 0,394 s untuk rangkaian hasil optimasi range frekuensi 8-13 Hz dan 0,0814 s pada rangkaian hasil optimasi pada range frekuensi 14-30 Hz.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah

1. Kondisi daya rata-rata maksimum untuk optimasi menggunakan *Quantum Particle Swarm Optimization* pada range frekuensi 8-13 Hz terjadi pada range frekuensi 9.9 Hz sampai 13 Hz.
2. Kondisi daya rata-rata maksimum untuk optimasi menggunakan *Quantum Particle Swarm Optimization* range frekuensi 14-30 Hz terjadi pada rentang frekuensi 16 Hz sampai 30 Hz.
3. Rancangan filter yang dibuat berdasarkan range frekuensi hasil optimasi terlihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 dengan nilai komponen-komponennya sebagai berikut diperoleh nilai R_1, R_2 , dan R_3 masing-masing sebesar 5.1 M Ω , 10,2 M Ω , dan 1 M Ω dengan nilai $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ untuk optimasi pada range frekuensi 8-13 Hz. Sedangkan pada optimasi pada range frekuensi 14-30 Hz diperoleh nilai R_1, R_2 , dan R_3 masing-masing sebesar 1,2 M Ω , 2,4 M Ω , dan 1M Ω dengan nilai $C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$.

4. Berdasarkan kurva respon transien, karakteristik respon pada masing-masing rangkaian menunjukkan respon sistem orde 2. Sistem akan mencapai kestabilan dalam merespon input yang diberikan pada setelah 0,394 s untuk rangkaian hasil optimasi range frekuensi 8-13 Hz dan 0,0814 s pada rangkaian hasil optimasi pada range frekuensi 14-30 Hz

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan tidak ada potensi konflik kepentingan terkait dengan penelitian, penulisan, dan/atau publikasi dari artikel ini.

Daftar Pustaka

- Fang, W., Sun, J., Ding, Y., Wu, X., & Xu, W. (2010). A review of quantum-behaved particle swarm optimization. *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)*, 27(4), 336–348. <https://doi.org/10.4103/0256-4602.64601>
- Flori, A., Oulhadj, H., & Siarry, P. (2022). Quantum Particle Swarm Optimization: an auto-adaptive PSO for local and global optimization. *Computational Optimization and Applications*, 82(2), 525–559. <https://doi.org/10.1007/S10589-022-00362-2/METRICS>
- Luitel, B., & Venayagamoorthy, G. K. (2010). Particle swarm optimization with quantum infusion for system identification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(5), 635–649. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2010.01.022>
- Mikki, S. M., & Kishk, A. A. (2006). Quantum particle swarm optimization for electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(10), 2764–2775. <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.882165>
- Mundy-Castle, A. C. (1957). The electroencephalogram and mental activity. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 9(4), 643–655. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(57\)90085-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(57)90085-8)
- Otniel Windrayadi, F., Rahmatullah, D., Winarno, I., Teknik Elektro, J., & Hang Tuah, U. (2018). Optimasi Power System Stabilizer (PSS) pada Generator Multi Mesin Untuk Mengurangi Osilasi Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO). *SinarFe7*, 1(1), 154–163. <https://journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/164>
- Petersén, I., & Eeg-Olofsson, O. (1971). The development of the electroencephalogram in normal children from the age of 1 through 15 years. Non-paroxysmal activity. *Neuropädiatrie*, 2(3), 247–304. <https://doi.org/10.1055/S-0028-1091786/BIB>
- Siuly, S., Li, Y., & Zhang, Y. (2016). *Electroencephalogram (EEG) and Its Background*. 3–21. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47653-7_1
- Subha, D. P., Joseph, P. K., Acharya U, R., & Lim, C. M. (2010). EEG signal analysis: a survey. *Journal of Medical Systems*, 34(2), 195–212. <https://doi.org/10.1007/S10916-008-9231-Z/METRICS>
- Sun, J., Xu, W., & Liu, J. (2005). Parameter Selection of Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization. *Lecture Notes in Computer Science*, 3612(PART III), 543–552. https://doi.org/10.1007/11539902_66
- Tharwat, A., & Hassanien, A. E. (2019). Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization for Parameter Optimization of Support Vector Machine. *Journal of Classification*, 36(3), 576–598. <https://doi.org/10.1007/S00357-018-9299-1/METRICS>
- Wulansari, R., Contesa Dajamal, E., Darmanto Jurusan Informatika, T., Mipa, F., & Jenderal Achmad Yani Jl Terusan Sudirman, U. (2016). Klasifikasi Sinyal EEG terhadap Rangsangan Suara Menggunakan Power Spectral Density dan Multilayer Perceptron. *Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi*, 1(1). <https://doi.org/10.36499/PSNST.V1I1.1521>
- Yang, S., Wang, M., & Jiao, L. (2004). A quantum particle swarm optimization. *Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, CEC2004*, 1, 320–324. <https://doi.org/10.1109/CEC.2004.1330874>
- Zhou, N. R., Xia, S. H., Ma, Y., & Zhang, Y. (2022). Quantum particle swarm optimization algorithm with the truncated mean stabilization strategy. *Quantum Information Processing*, 21(2), 1–23. <https://doi.org/10.1007/S11128-021-03380-X/METRICS>