Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 14, No. 6, November 2025, hal.644 – 652
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.14.6.644-652.2025

Open Access

Peningkatan Akurasi Interpretasi Aliran Darah pada Citra Color Doppler Echocardiography dengan Metode De-Aliasing

Shindy Yohanda[1], Sri Oktamuliani[1*]
[1]Laboratorium Fisika Medis, Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 1 Oktober 2025
Direvisi: 1 November 2025
Diterima: 30 November 2025

Kata kunci:
Aliran darah
Citra CDE
De-aliasing
Jantung
Kecepatan Nyquist

ABSTRAK

Color Doppler Echocardiography (CDE) adalah teknik pencitraan ekokardiografi yang memanfaatkan prinsip efek Doppler untuk menghasilkan gambar jantung. Citra CDE sering mengandung masalah aliasing yang dapat menghambat proses interpretasi aliran darah. Penelitian ini bertujuan untuk menghilangkan masalah aliasing pada citra CDE apical 4-chamber view dengan penerapan metode de-aliasing menggunakan *software* MATLAB R2016b dan mengevaluasi kinerja metode de-aliasing dalam meningkatkan akurasi interpretasi aliran darah di seluruh struktur jantung. Metode de-aliasing mengoreksi nilai kecepatan yang terlipat dengan memperluas rentang kecepatan Nyquist. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini yaitu nilai kecepatan maksimum setelah proses de-aliasing meningkat, menunjukkan bahwa rentang kecepatan Nyquist berhasil diperluas. Metode de-aliasing mampu merekonstruksi nilai kecepatan yang terlipat kembali ke dalam rentang kecepatan yang valid. Kesalahan visual berupa pembalikan warna pada citra berhasil diperbaiki dengan mengubah skema warna pada citra. Evaluasi terhadap kinerja metode de-aliasing menunjukkan bahwa akurasi interpretasi aliran darah diseluruh struktur jantung berhasil ditingkatkan.

Keywords:
Blood flow
CDE image
De-aliasing
Heart
Nyquist velocity

Penulis Korespondensi:
Sri Oktamuliani
Email:
srioktamuliani@sci.unand.ac.id

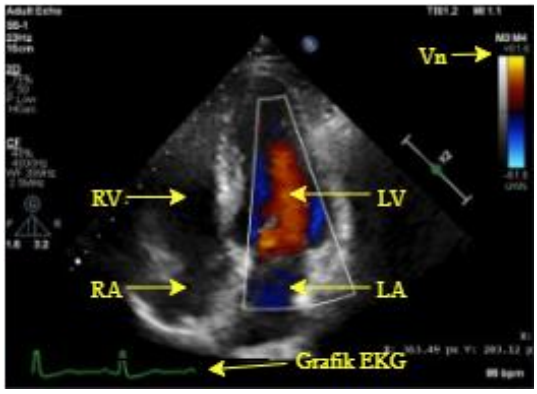
Color Doppler Echocardiography (CDE) is an echocardiographic imaging technique that utilizes the Doppler effect principle to produce images of the heart. However, CDE images often contain aliasing artifacts that can hinder the interpretation of blood flow. This study aims to eliminate aliasing in CDE images of the apical 4-chamber view through the application of a de-aliasing method using MATLAB R2016b, and to evaluate the performance of this method in improving the accuracy of blood flow interpretation across all cardiac structures. The de-aliasing method corrects folded velocity values by extending the Nyquist velocity range. The results show that the maximum velocity value increased after the de-aliasing process, indicating that the Nyquist velocity range was successfully expanded. Furthermore, the method effectively reconstructed the folded velocity values back into a valid range. Visual errors in the form of color inversion were corrected by adjusting the color scheme of the image. Evaluation of the de-aliasing method's performance demonstrated an improvement in the accuracy of blood flow interpretation throughout the cardiac structures.

Copyright©2025 Author(s)

I. PENDAHULUAN

Ekokardiografi adalah pemeriksaan non-invasif yang memanfaatkan gelombang suara ultrasonik untuk memvisualisasikan struktur dan fungsi jantung secara real-time (Novita dkk., 2022). Ekokardiografi dapat mengevaluasi aliran darah di dalam jantung dan pembuluh darah dengan mengukur kecepatan dan arah alirannya (Goolman, 2021). Informasi tentang kecepatan dan arah aliran darah diperoleh dari data kecepatan Doppler yang dihasilkan melalui mode Color Doppler Echocardiography (CDE). Data kecepatan Doppler ditampilkan pada monitor dalam bentuk citra CDE yang memetakan aliran darah menggunakan kode warna (Purwowiyoto dan Diwirya, 2021).

Salah satu tampilan penting dalam ekokardiografi adalah Apical 4-chamber view yang menampilkan 4 ruang jantung, yaitu atrium kanan (Right Atrium/RA), atrium kiri (Left Atrium/LA), ventrikel kanan (Right Ventricle/RV) dan ventrikel kiri (Left Ventricle/LV). Pada tampilan ini, aliran darah antar ruang jantung mengikuti pola fisiologis tertentu yang dapat dianalisis secara visual menggunakan citra CDE (Mukherjee dkk., 2025). Contoh citra CDE dengan tampilan apical 4-chamber view ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Citra CDE apical 4-chamber view yang menunjukkan aliran darah di dalam jantung

Namun demikian, salah satu kendala utama dalam interpretasi citra Doppler adalah munculnya artefak aliasing, yaitu distorsi visual yang terjadi akibat pelipatan nilai kecepatan aliran darah (Shabrina dkk., 2024). Fenomena ini menyebabkan perubahan warna pada citra sehingga arah aliran tampak berlawanan dari kondisi sebenarnya. Aliasing muncul ketika kecepatan aliran darah yang diukur melebihi batas kecepatan Nyquist, yakni kecepatan maksimum yang dapat dideteksi secara akurat oleh sistem tanpa menghasilkan distorsi (Poree dkk., 2021). Ketika batas ini terlampaui, sistem secara otomatis memetakan kembali nilai kecepatan ke dalam rentang yang tersedia, menyebabkan terjadinya lipatan kecepatan (*velocity folding*). Akibatnya, interpretasi arah aliran darah menjadi tidak akurat dan dapat menimbulkan kesalahan dalam analisis hemodinamik.

Terdapat dua jenis kesalahan aliasing pada citra, yaitu aliasing merah dan aliasing biru (Otto dkk., 2019). Aliasing merah terjadi ketika aliran darah bergerak dengan kecepatan negatif menjauhi transduser, berubah menjadi warna merah dengan kecepatan positif. Sedangkan aliasing biru terjadi ketika aliran darah bergerak dengan kecepatan positif mendekati transduser, berubah menjadi warna biru dengan kecepatan negatif. Hal ini bukan representasi nyata dari perubahan arah atau kecepatan aliran, melainkan akibat dari aliasing. Penelitian yang dilakukan oleh Okada dkk. (2023) menemukan bahwa, penggunaan sudut ganda pada pengukuran Doppler dapat mengakibatkan data aliran darah pada jantung rentan terjadi masalah aliasing. Aliasing dalam data kecepatan Doppler perlu dihilangkan agar hasil pencitraan lebih akurat. Jeon dkk. (2023) memperkenalkan kerangka kerja baru menggunakan jaringan saraf konvolusional, yaitu *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk analisis menyeluruh gambar Doppler spektral dan jaringan Doppler. Hasil empiris menunjukkan bahwa kerangka kerja ini dapat mencegah terjadinya aliasing.

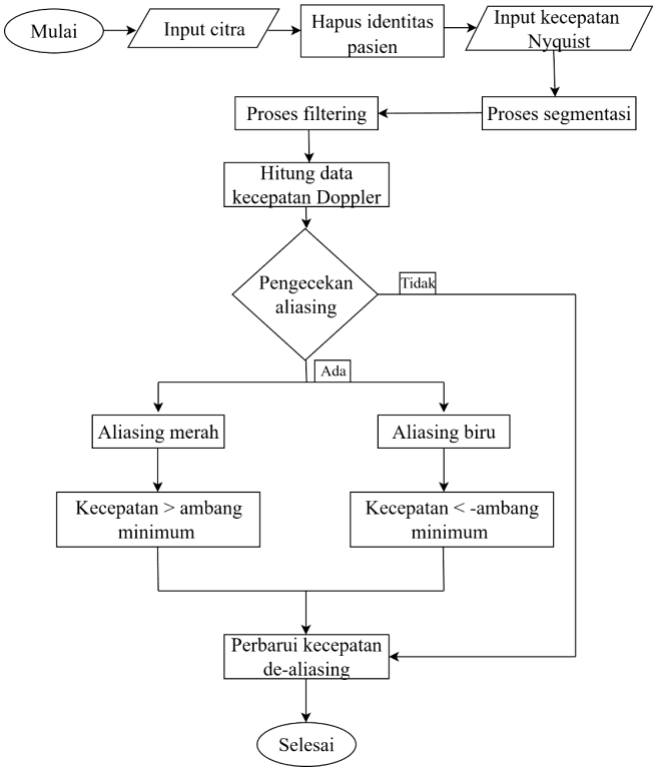
Penelitian Oktamuliani dkk. (2021) telah berhasil menerapkan metode de-aliasing untuk rekonstruksi data kecepatan Doppler pada citra CDE apical 3-chamber view, yang mencakup atrium kiri, ventrikel kiri dan aorta. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode de-aliasing efektif dalam merekonstruksi aliran darah pada jantung. Namun, penerapannya masih terbatas pada analisis 3 ruang

jantung, sehingga belum memberikan representasi lengkap mengenai anatomi dan fungsi jantung. Penelitian ini bertujuan untuk menghilangkan masalah aliasing dengan menerapkan metode de-aliasing pada citra CDE apical 4-chamber view. Metode ini dipilih karena mampu merekonstruksi kecepatan aliran darah secara menyeluruh pada citra. Penerapan metode de-aliasing melibatkan pemodelan matematis dan simulasi serta berbagai teknik pemrosesan citra guna mengoptimalkan kualitas citra hasil.

II. METODE

Penelitian ini telah memperoleh persetujuan etik dari Komite Etik Penelitian Fakultas Kedokteran Universitas Andalas (450). Data yang digunakan merupakan data sekunder dalam format DICOM, berupa citra CDE dengan tampilan apical 4-chamber view, yang diambil dari hasil pemeriksaan ekokardiografi di Rumah Sakit Universitas Andalas.

Metode de-aliasing yang diterapkan dalam penelitian ini dikembangkan secara komputasional menggunakan algoritma berbasis MATLAB (Matrix Laboratory). Metode ini dilengkapi dengan beberapa tahapan pemrosesan citra digital, meliputi segmentasi untuk menentukan area relevan (*Region of Interest / ROI*) dan filtering untuk mengurangi *noise* serta meningkatkan kualitas visual citra. Alur kerja lengkap penerapan metode de-aliasing ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram alir proses de-aliasing citra CDE

Berdasarkan diagram alir tersebut, proses dimulai dengan input citra Doppler yang telah melalui penghapusan identitas pasien dan pemberian nilai kecepatan Nyquist sebagai parameter batas sistem. Selanjutnya dilakukan segmentasi untuk memisahkan wilayah aliran darah dari struktur jaringan sekitar, kemudian filtering awal diterapkan guna menekan *noise* dan menyiapkan citra agar berada dalam kondisi optimal sebelum pengolahan utama.

Tahap berikutnya adalah perhitungan data kecepatan Doppler melalui konversi informasi warna menjadi nilai kecepatan numerik (*velocity mapping*). Nilai ini kemudian dievaluasi untuk mendeteksi kemungkinan aliasing, yaitu kondisi ketika kecepatan aliran melampaui batas Nyquist. Jika aliasing terdeteksi, algoritma mengklasifikasikannya menjadi aliasing merah (kecepatan melebihi ambang positif) atau aliasing biru (kecepatan berada di bawah ambang negatif).

Setelah jenis aliasing teridentifikasi, sistem melakukan pembaruan nilai kecepatan de-aliasing dengan menambahkan atau mengurangkan kelipatan kecepatan Nyquist sesuai arah lipatan yang terjadi. Proses ini dilakukan secara iteratif hingga semua piksel pada area aliasing terkoreksi dengan benar.

Hasil akhirnya berupa citra Doppler yang bebas artefak aliasing, dengan representasi arah dan kecepatan aliran darah yang lebih akurat serta fisiologis.

Untuk mengoreksi kesalahan tersebut, dilakukan perluasan rentang kecepatan Nyquist dengan cara menambahkan atau mengurangkan nilai kecepatan Nyquist terhadap kecepatan yang terlipat. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan nilai kecepatan ke dalam rentang fisiologis yang benar. Pemilihan operasi penambahan atau pengurangan bergantung pada arah lipatan aliasing: jika kecepatan terlipat ke sisi positif, maka algoritma mengurangkan nilai kecepatan Nyquist. Sebaliknya, jika terlipat ke sisi negarif, algoritma menambahkan nilai kecepatan Nyquist. Dengan cara ini, nilai kecepatan aliran darah yang semula salah akibat aliasing dapat dikoreksi secara akurat. Hubungan antara kecepatan terukur dan kecepatan terkoreksi dinyatakan dalam Persamaan (1) berikut:

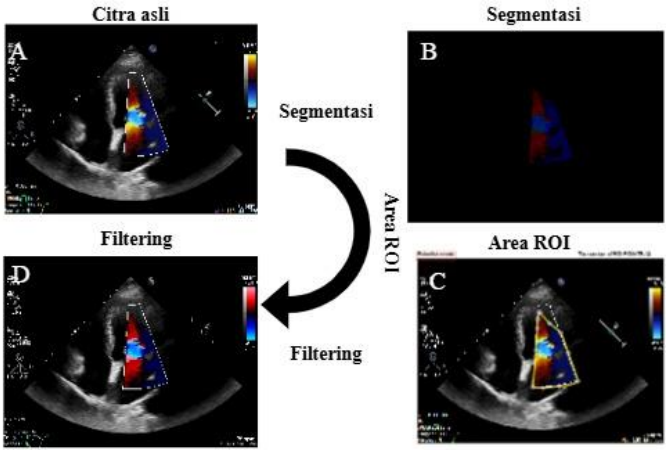
$$V_{t=}V_0 \pm 2k \times V_n \quad (1)$$

Dimana V_t merupakan kecepatan aliran darah yang telah dikoreksi (m/s), V_0 adalah kecepatan aliasing yang akan dikoreksi (m/s), V_n adalah kecepatan Nyquist (m/s), dan k adalah bilangan bulat yang merepresentasikan jumlah pelipatan kecepatan akibat aliasing (0, ±1, ±2,...).

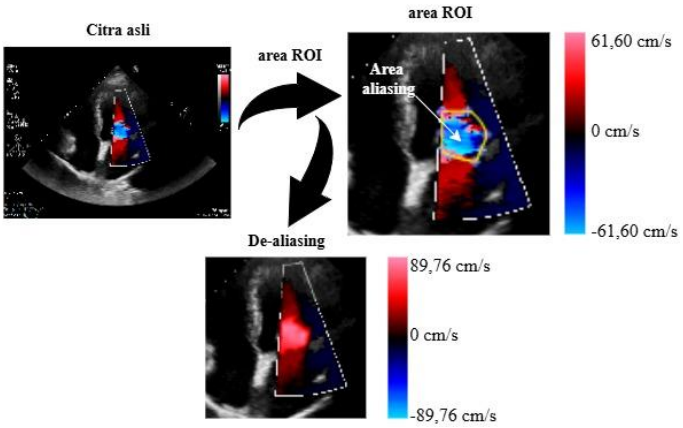
III. HASIL DAN DISKUSI

III.1 Penerapan Metode De-aliasing

Metode de-aliasing diterapkan untuk merekonstruksi kecepatan aliran darah yang melampaui batas Nyquist. Sebanyak 20 citra Doppler digunakan dalam penelitian ini. Gambar 3 menunjukkan tahapan proses segmentasi dan filtering pada citra CDE dengan tampilan apical 4-chamber view. Pada Gambar 3A ditampilkan citra asli hasil akuisisi Doppler yang memperlihatkan pola aliran darah di dalam ruang jantung. Proses segmentasi dilakukan untuk memisahkan area yang relevan, sehingga hanya wilayah aliran darah yang dipertahankan. Hasil segmentasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 3B, di mana area non-relevan telah dihilangkan. Kemudian, area hasil segmentasi ditampilkan kembali pada citra penuh sebagai *Region of Interest (ROI)*, sebagaimana terlihat pada Gambar 3C. Tahap selanjutnya adalah penerapan teknik filtering yang berfungsi untuk mengurangi *noise* dan meningkatkan kejernihan pola aliran darah, menghasilkan citra yang lebih halus dan informatif sebagaimana diperlihatkan pada panel Gambar 3D. Proses segmentasi dan filtering ini berperan penting dalam memastikan bahwa analisis de-aliasing hanya dilakukan pada wilayah aliran darah yang relevan, sehingga meningkatkan akurasi perhitungan kecepatan dan interpretasi visual citra Doppler.



Gambar 3 Tahapan segmentasi dan filtering pada proses de-aliasing citra Color Doppler Echocardiography (CDE) apical 4-chamber view



Gambar 4 Proses de-aliasing pada citra Color Doppler Echocardiography (CDE) tampilan apical 4-chamber view.

Gambar 4 memperlihatkan tahapan proses de-aliasing pada citra Color Doppler Echocardiography (CDE) tampilan apical 4-chamber view. Citra asli (panel kiri atas) menampilkan pola aliran darah di dalam ruang jantung dengan skala kecepatan antara –61,60 hingga 61,60 cm/s. Setelah dilakukan proses segmentasi, area aliran darah yang relevan dipertahankan sebagai Region of Interest (ROI) (panel kanan atas). Pada area ROI tersebut tampak adanya aliasing, yang ditandai dengan perubahan warna mendadak antara merah dan biru pada pola aliran darah, menunjukkan bahwa kecepatan aliran telah melampaui batas kecepatan Nyquist.

Tahapan selanjutnya adalah penerapan algoritma de-aliasing pada area ROI tersebut. Hasilnya ditunjukkan pada panel bawah, di mana skala kecepatan diperluas menjadi –89,76 hingga 89,76 cm/s. Setelah koreksi dilakukan, pola aliran darah tampak lebih kontinu dan transisi warna menjadi lebih halus, menandakan bahwa nilai kecepatan yang semula terlipat telah berhasil dikembalikan ke rentang fisiologis yang benar. Proses ini memperbaiki representasi visual kecepatan aliran darah dan meningkatkan akurasi interpretasi hemodinamik pada citra Doppler.

Secara kuantitatif, hasil koreksi menunjukkan adanya perluasan rentang kecepatan Nyquist dari ±61,60 cm/s menjadi ±89,76 cm/s. Perluasan ini menandakan bahwa nilai kecepatan aliran darah yang sebelumnya tidak dapat direpresentasikan secara benar kini telah dikembalikan ke dalam batas pengukuran sistem. Peningkatan kontinuitas warna pasca-de-aliasing memperlihatkan berkurangnya distorsi akibat lipatan kecepatan, menghasilkan citra yang lebih fisiologis dan informatif untuk analisis arah serta intensitas aliran darah di dalam jantung.

Koreksi dilakukan dengan memperluas rentang kecepatan Nyquist dengan cara menambahkan atau mengurangkan nilai kecepatan Nyquist terhadap kecepatan yang terlipat. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan nilai kecepatan ke dalam rentang fisiologis yang benar (Sumeet dan Bhargava, 2019). Pemilihan operasi penambahan atau pengurangan bergantung pada arah lipatan aliasing: jika kecepatan terlipat ke sisi positif, maka algoritma mengurangkan nilai kecepatan Nyquist. Sebaliknya, jika terlipat ke sisi negarif, algoritma menambahkan nilai kecepatan Nyquist.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan jarak koreksi akibat aliasing untuk menentukan sejauh mana kecepatan telah terlipat melewati kecepatan Nyquist. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, algoritma menambahkan nilai kecepatan Nyquist untuk menggeser nilai kecepatan yang terlipat agar kembali ke rentang fisiologis yang sebenarnya. Proses koreksi ini diterapkan secara berulang (*iterative correction*) pada setiap piksel dalam wilayah aliasing hingga pola aliran darah menunjukkan kontinuitas yang stabil dan tidak lagi menampilkan perubahan warna mendadak.

Tabel 1 menyajikan perbandingkan nilai kecepatan aliran darah sebelum dan sesudah proses de-aliasing. Sebelum dilakukan koreksi, seluruh citra menunjukkan nilai kecepatan yang dibatasi oleh kecepatan Nyquist sebesar ±0,6160 m/s. Pada kondisi ini, sistem ekokardiografi hanya mampu mendeteksi kecepatan yang berada dalam rentang tersebut, sehingga aliran darah dengan kecepatan di luar batas Nyquist akan terlipat dan ditampilkan dengan warna yang tidak sesuai arah sebenarnya. Setelah penerapan algoritma de-aliasing, nilai kecepatan pada setiap titik piksel mengalami peningkatan yang signifikan. Nilai-nilai kecepatan yang semula negatif berubah menjadi positif dan meningkat

hingga melampaui batas Nyquist awal. Kondisi ini menunjukkan bahwa metode yang diterapkan berhasil mengoreksi nilai kecepatan aliran darah yang lebih realistis.

Tabel 1 Perbandingan nilai kecepatan aliran darah sebelum dan setelah proses de-aliasing

Citra	Citra 1	Citra 2	Citra 3	Citra 4	Citra 5
Kecepatan sebelum de-aliasing V_o (m/s)					
V_n	-0,6160	-0,6160	-0,6160	-0,6160	-0,6160
Titik 1	-0,3960	-0,4767	-0,6013	-0,4913	-0,4840
Titik 2	-0,4767	-0,5720	-0,5280	-0,5133	-0,4987
Titik 3	-0,3813	-0,4767	-0,5353	-0,5133	-0,4693
Titik 4	-0,4400	-0,5720	-0,5353	-0,5720	-0,4347
Titik 5	-0,5573	-0,5060	-0,4987	-0,4767	-0,5720
Kecepatan setelah de-aliasing V_t (m/s)					
V_{max}	0,8976	0,9093	0,9020	0,8873	0,8727
Titik 1	0,7307	0,7773	0,7433	0,7847	0,7773
Titik 2	0,6837	0,7920	0,7040	0,6673	0,6478
Titik 3	0,7027	0,8714	0,7480	0,7040	0,8678
Titik 4	0,6879	0,7160	0,8287	0,6820	0,8131
Titik 5	0,6527	0,7260	0,7187	0,7773	0,6295

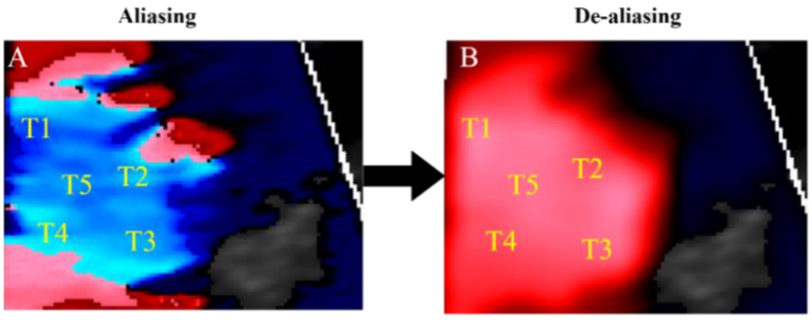
Berdasarkan hasil pada Tabel 1, nilai kecepatan setelah de-aliasing (V_t) memiliki kesesuaian dengan hasil perhitungan teoretis menggunakan Persamaan 1. Selain itu, nilai V_{max}, yaitu kecepatan maksimum yang terdeteksi setelah proses de-aliasing, menunjukkan peningkatan konsisten pada semua citra dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan kecepatan Nyquist. Hal ini menandakan bahwa penerapan metode de-aliasing telah memperluas rentang deteksi kecepatan sistem Doppler. Dengan demikian, kecepatan aliran darah yang sebelumnya tidak dapat terdeteksi akibat keterbatasan Nyquist kini dapat direkonstruksi dengan lebih akurat dan fisiologis. Hasil ini sejalan dengan temuan Poree dkk. (2021) yang melaporkan bahwa penerapan teknik de-aliasing mampu memperluas batas kecepatan Nyquist sehingga nilai kecepatan aliran darah dapat dikembalikan ke rentang yang valid. Dengan demikian, metode ini tidak hanya meningkatkan akurasi estimasi kecepatan Doppler, tetapi juga memperbaiki representasi visual aliran darah pada citra CDE.

Setelah nilai kecepatan dikoreksi, citra diperbarui dengan pewarnaan yang disesuaikan dengan skala kecepatan Doppler. Proses ini menggunakan Cmapdop (*Color Map Doppler*) standar pewarnaan citra Doppler untuk memastikan interpretasi visual yang sesuai dengan arah dan besar kecepatan aliran darah. Terdapat dua opsi utama dalam perbaikan warna piksel yang mengalami aliasing yaitu: (1) mengganti warna merah menjadi biru, atau (2) mengganti warna biru menjadi merah. Pemilihan opsi tersebut bergantung pada jenis kesalahan aliasing yang terjadi pada citra.

Gambar 5 menunjukkan perbandingan antara citra asli yang mengandung aliasing (Gambar 5A) dan citra hasil koreksi setelah proses de-aliasing (Gambar 5B). Pada citra asli, tampak perubahan warna mencolok dari merah terang ke biru terang, yang memberikan kesan seolah aliran darah berbalik arah. Padahal, perubahan mendadak ini merupakan artefak akibat lipatan kecepatan yang melebihi batas Nyquist. Setelah dilakukan koreksi, perubahan warna ekstrem tersebut tidak lagi terlihat. Jenis aliasing yang teridentifikasi pada penelitian ini adalah aliasing biru, di mana aliran yang seharusnya ditampilkan dengan warna merah (menunjukkan kecepatan positif) terlipat menjadi berwarna biru (menunjukkan kecepatan negatif). Oleh karena itu, proses koreksi difokuskan pada pengembalian warna piksel biru menjadi merah, sesuai dengan arah aliran darah yang sebenarnya.

Perubahan ini juga terlihat pada nilai komponen warna RGB (*Red-Green-Blue*) pada beberapa titik piksel representatif. Sebagai contoh, pada citra aliasing, piksel dengan koordinat (392, 274), (432, 292), (422, 319), (397, 308), dan (411, 294) memiliki nilai RGB masing-masing [0 231 255], [0 135 255], [0 231 255], [0 175 255], dan [0 147 255]. Setelah proses de-aliasing diterapkan, piksel-piksel tersebut mengalami perubahan nilai warna menjadi [255 69 91], (432, 292): [255 112 147], (422, 319): [255 41 53], (397, 308): [255 74 97] dan (411, 294): [255 112 147]. Perubahan komponen warna dari dominan biru menjadi dominan merah ini menunjukkan bahwa proses de-aliasing tidak hanya mengoreksi nilai kecepatan numerik, tetapi juga memperbaiki representasi warna visual agar kembali sesuai dengan arah aliran darah yang fisiologis. Dengan demikian, Gambar 5 memperlihatkan secara

jelas perbedaan antara citra aliasing dan hasil de-aliasing, baik dari segi warna maupun nilai piksel. Proses ini menegaskan bahwa metode de-aliasing yang digunakan tidak hanya memperluas rentang kecepatan Nyquist, tetapi juga mengembalikan integritas visual citra Doppler untuk interpretasi hemodinamik yang lebih akurat.



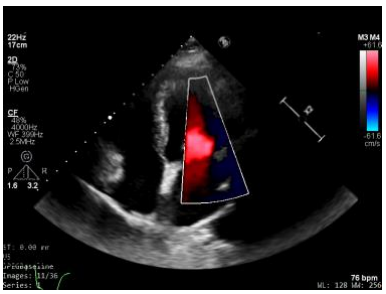
Gambar 5 Perbandingan citra sebelum dan setelah proses de-aliasing berdasarkan warna Doppler dan komponen RGB (a) citra aliasing, (b) citra hasil de-aliasing.

III.2 Analisis Efektivitas Teknik Pemrosesan Citra

Efektivitas teknik pemrosesan citra dievaluasi melalui analisis perbandingan antara citra sebelum dan setelah proses de-aliasing. Teknik pemrosesan citra dilakukan secara bertahap, mulai dari segmentasi citra untuk menfokuskan analisis pada area yang relevan, hingga tahap filtering untuk meningkatkan kualitas citra. Setiap tahapan dievaluasi berdasarkan dampaknya terhadap kualitas citra hasil. Teknik segmentasi merupakan tahap awal dalam pemrosesan citra. Segmentasi ini dilakukan untuk memilih wilayah aliran darah dan area yang mengalami aliasing. Kemudahan dalam segmentasi didukung oleh pemilihan titik-titik ROI, yang memberikan kontrol terhadap area yang dianalisis. Teknik pemrosesan citra selanjutnya adalah filtering, yang dilakukan sebelum dan setelah proses de-aliasing.

Penerapan filtering sebelum proses de-aliasing berfungsi untuk memastikan bahwa citra masukan berada dalam kondisi optimal, dengan tingkat *noise* yang minimal, sehingga algoritma de-aliasing dapat bekerja secara lebih efisien dan akurat. Sementara itu, filtering pasca-de-aliasing dilakukan untuk menyempurnakan hasil koreksi dengan menstabilkan pola distribusi kecepatan aliran darah pada citra akhir. Tahapan ini menghasilkan tampilan citra yang lebih halus, seragam, dan mudah diinterpretasikan secara visual.

Kombinasi penerapan filter sebelum dan sesudah proses de-aliasing terbukti memberikan peningkatan signifikan terhadap kualitas citra yang dihasilkan. Citra akhir menunjukkan pola aliran darah yang lebih jelas, bebas artefak aliasing, dan memiliki representasi kecepatan yang lebih stabil dalam rentang fisiologis yang benar. Hasil akhir dari proses ini ditunjukkan pada Gambar 6, yang menampilkan citra Doppler dengan kualitas visual optimal untuk analisis hemodinamik.



Gambar 6 Citra hasil de-aliasing yang telah melalui proses filter

III.3 Analisis Akurasi Interpretasi Aliran Darah

Analisis terhadap akurasi interpretasi aliran darah setelah penerapan proses de-aliasing menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan dalam kejelasan arah dan kontinuitas aliran darah pada citra. Hasil visualisasi memperlihatkan bahwa metode ini mampu menghasilkan representasi pola aliran yang lebih fisiologis dan realistis, sehingga interpretasi terhadap arah serta kecepatan aliran menjadi lebih akurat.

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Oktamuliani dkk. (2018), yang menyatakan bahwa pendekatan rekonstruksi kecepatan berbasis batas Nyquist dapat meningkatkan ketepatan interpretasi citra Doppler. Pada hasil citra penelitian ini, aliran darah tampak lebih konsisten dengan arah fisiologis aliran di dalam ruang jantung, menunjukkan kesesuaian antara hasil koreksi citra dengan struktur anatomi dan fungsi kardiovaskular sebenarnya. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode de-aliasing pada citra CDE tampilan apical 4-chamber view berhasil meningkatkan akurasi interpretasi aliran darah diseluruh struktur jantung.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai peningkatan akurasi interpretasi aliran darah menggunakan metode de-aliasing, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode ini pada citra CDE tampilan apical 4-chamber view berhasil mengatasi permasalahan aliasing secara efektif. Metode de-aliasing terbukti mampu merekonstruksi nilai kecepatan aliran darah yang terlipat akibat aliasing menjadi kecepatan yang berada dalam rentang fisiologis yang valid.

Nilai kecepatan maksimum hasil koreksi menunjukkan peningkatan konsisten melebihi batas kecepatan Nyquist, yang menandakan bahwa rentang kecepatan Nyquist berhasil diperluas melalui proses de-aliasing. Selain itu, kesalahan visual berupa pembalikan warna pada citra berhasil dikoreksi dengan tepat melalui penyesuaian skema warna Doppler, sehingga arah aliran darah dapat ditampilkan dengan benar.

Penerapan teknik pemrosesan citra, termasuk segmentasi dan filtering, turut berkontribusi dalam meningkatkan kualitas visualisasi citra hasil. Secara keseluruhan, metode de-aliasing memberikan peningkatan signifikan terhadap akurasi interpretasi hemodinamik, menghasilkan citra aliran darah yang lebih representatif terhadap kondisi fisiologis jantung, baik dari segi arah maupun kecepatan aliran.

DAFTAR PUSTAKA

Goolman, G., 2021, *Panduan Pemeriksaan Ekokardiografi di Klinik*, Angewandte Chemie International Edition, Jakarta.

Jeon, J., Jang, Y., Jeong, D., Lee, S., Health, O., Korea, S., 2023, A Unified Approach for Comprehensive Analysis of Various Spectral and Tissue Doppler Echocardiography, *Ontact Health*, Hal. 1–5, DOI: 2311.08439v1.

Mukherjee, M., Rudski, L.G., Addetia, K., Afilalo, J., D'Alto, M., Freed, B.H., Friend, L.B., Gargani, L., Grapsa, J., Hassoun, P.M., Hua, L., Kim, J., Mercurio, V., Saggar, R., Vonk-Noordegraaf, A., 2025, Guidelines for the Echocardiographic Assessment of the Right Heart in Adults and Special Considerations in Pulmonary Hypertension: Recommendations from the American Society of Echocardiography, *Journal of the American Society of Echocardiography*, Vol. 38, Hal. 141–186, DOI: 10.1016/j.echo.2025.01.006.

Novita, ND, F.M., Hadi, T.F., 2022, Hubungan Kualitas Hidup dengan Gambaran Ekokardiografi Tenaga Kesehatan dengan Long COVID, *Journal of Medical Science*, Vol. 3, Hal. 39–45, DOI: 10.55572/jms.v3i1.52.

Okada, Y., Kanno, N., Bhatti, A., Ishii, T., Saijo, Y., 2023, Robust Flow Vector Estimation for Echocardiography with Extended Nyquist Velocity Using Dual-PRF Approach: A Flow Phantom Study, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 62, DOI: 10.35848/1347-4065/acbda6.

Oktamuliani, S., Fitriyani, D., Adrial, R., Sparzinanda, E., Saijo, Y., 2021, De-Aliasing Method for Doppler Velocity Data of Echocardiography in Echodynamography, *AIP Conference*, Vol. (2346), DOI: 10.1063/5.0047738.

Oktamuliani, S., Hasegawa, K., Saijo, Y., 2018, Blood Flow Patterns in the Left Ventricle by Echodynamography Method, *2018 International Conference on Orange Technologies, ICOT 2018*, Vol. 0, Hal. 1–3, DOI: 10.1109/ICOT.2018.8705826.

Otto, C.M., Freeman, R. V, Schwaegler, R.G., Linefsky, J., 2019, *Echocardiography Review Guide: Companion to the Textbook of Clinical Echocardiography*, Elsevier Health Sciences.

Poree, J., Goudot, G., Pedreira, O., Laborie, E., Khider, L., Mirault, T., Messas, E., Julia, P., Alsac, J.-M., Tanter, M., 2021, Dealiasing High-Frame-Rate Color Doppler Using Dual-Wavelength Processing, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 68, Hal. 2117–2128, DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3056932.

Purwowiyoto, S.L., Diwirya, W.C., 2021, Peran Ekokardiografi dalam Unit Perawatan Intensif, *JAI (Jurnal Anestesiologi Indonesia)*, Vol. 13, Hal. 137–147, DOI: 10.14710/jai.v0i0.43150.

Shabrina, H., Setyowati, E., Ahmayani, I., Putri, K.A.E., 2024, Analisis Efek Aliasing Pada Sinyal Audio Dengan Variasi Frekuensi Sampling Pada Lagu 'Terhebat,' *ELECTRA : Electrical Engineering Articles*, Vol. 5, Hal. 1–11, DOI: 10.25273/electra.v5i1.21265.

Sumeet, Bhargava, S.K., 2019, *Textbook of color doppler imaging*, Jaypee Brothers Medical Publishers, New Delhi, India.