

Prosedur Pemeriksaan *Cardiovascular Magnetic Resonance (CMR) 4D Flow* pada Klinis *Tetralogy Of Fallot (ToF)*: Studi Kualitatif Keunggulan dan Implementasinya di Indonesia

Danil Hulmansyah¹, T.Mohd. Yoshandi², Shelly Angella³, Hagesko Jowanda⁴
^{1,2,3}Prodi DIII Teknik Radiologi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Awal Bros
⁴ Instalasi Radiologi, RS Awal Bros Pekanbaru

Corresponding author: Danil Hulmansyah
Email : danil@univawalbros.ac.id

ABSTRACT

Background: Cardiovascular Magnetic Resonance (CMR) is an imaging technique used to view blood flow in the heart and is the gold standard for measuring it. However, in its development, the CMR technique that uses 4D imaging has become a novel technique that is not only capable of visualising blood flow in 4 dimensions, but also of observing parameters such as mean/peak velocity and cardiac kinetic energy. This technique is usually used to observe several clinical conditions such as Tetralogy of Fallot (TOF).

Method: The study was conducted using qualitative methods with data collected through interviews, literature studies, and participatory observation. Respondents in this study were experienced radiographers directly involved in CMR examinations with clinical TOF using 4D flow techniques, such as radiologists and radiographers.

Results: Examination preparation included filling out consent forms, changing clothes, and removing metal objects. The radiographer attached VCG electrodes to the patient and installed a device to measure breathing. Sequences used ranged from BFFE survey, BB_SSh_Morphology, to various heart functions such as Function_NEAR2CH and others. The Q FLOW sequence for the aorta, pulmonary artery, and heart valves such as the mitral and tricuspid valves, followed by further 4D Q flow examinations. You must include the results or outcomes of the work you have done so far.

Conclusion: 4D Flow Cardiac Magnetic Resonance (4DFCMR) offers significant advantages in the diagnosis and management of Tetralogy of Fallot (TOF) compared to other imaging modalities. It provides dynamic three-dimensional visualisation and precise quantitative data, enabling more accurate assessment of the severity of pulmonary stenosis and ventricular septal defects, as well as effective post-operative monitoring. In Indonesia, this technology has great potential to improve the quality of care for TOF patients and contribute to understanding the unique characteristics of TOF in the local population.

Keywords: Cardiac; CMR; 4D Flow; MRI;

Pendahuluan

Tetralogy of Fallot (ToF) atau sering juga disebut sebagai penyakit jantung bawaan (PJB) adalah kelainan jantung atau susunan jantung dan pembuluh darah (Amelia, 2019). Kelainan struktur jantung ini seperti *ventricular septal defect*, *overriding aorta*, dan *hypertrophy* (Laksono and Tahalele, 2022). PJB ini merupakan penyakit sejak lahir yang dapat terjadi pada 8 tiap 1000 kelahiran hidup di Indonesia. Dalam diagnosa awal, *ultrasound prenatal* dapat digunakan bahkan sampai *postdelivery therapy* untuk kasus *duct-dependent pulmonary*. Namun dengan kemajuan teknologi, metode *non-invasive* seperti CT angiography dan CMR menjadi pilihan yang praktis dibandingkan dengan katerisasi kardiak (Laksono and Tahalele, 2022; Wicaksono et al., 2013).

Deteksi PJB yang umum dilakukan adalah dengan menggunakan *Echocardiography* dikarenakan ketersediaannya yang merata di seluruh Indonesia, namun CT *angiography* dan *magnetic resonance imaging* (MRI) merupakan salah satu opsi dalam melakukan diagnosa penyakit ini. Salah satu teknik yang terbaru adalah *cardiovascular magnetic resonance* (CMR) dengan menggunakan MRI. CMR adalah set teknik yang digunakan untuk menilai morfologi kardiovaskular, fungsi ventrikel, perfusi miokardium, karakterisasi jaringan, kuantifikasi arus, dan deteksi penyakit arteri koroner. CMR sendiri merupakan *gold standard* dalam penilaian peredaran darah. (Ramírez and de Isla, 2020). Tantangan dari teknik ini dibandingkan dengan teknik lain pada MRI adalah pergerakan kardiak dan pernapasan. Tantangan lainnya dari teknik ini adalah tidak

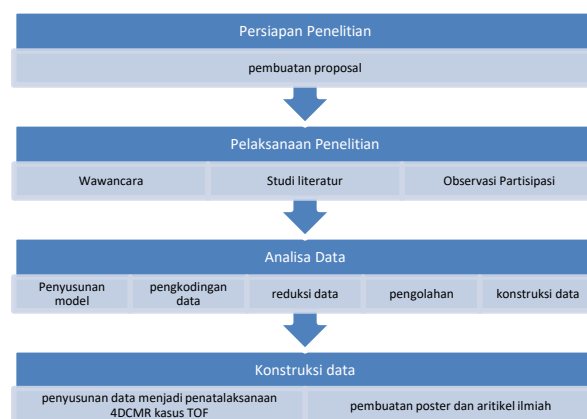
terbendungnya pengembangan teknik baru sehingga radiografer harus dapat cepat beradaptasi dengan teknik terbaru (Tseng et al., 2016).

Salah satu teknik terbaru adalah penggunaan 4-dimensi (4D) *flow* yang menggunakan perangkat tambahan untuk menghasilkan citra 4D yang mampu melakukan penilaian kritikal dari kecepatan peredaran darah dari 3 arah pada volum jantung yang dinilai secara rentang waktu tertentu. Kemampuan teknik ini juga bukan hanya dalam menghasilkan visual pergerakan, namun juga mampu mengukur energi kinetik dan kecepatan dalam bentuk parameter mean/peak (Demirkiran et al., 2022). Dengan adanya teknologi ini, maka pengobatan dan monitoring penyakit jantung seperti PJB dapat dilakukan secara presisi. Namun di Indonesia, teknologi 4D flow tidak tersedia di banyak tempat, untuk saat ini pada tahun 2024, hanya RS Awal Bros Pekanbaru yang menyediakan teknik diagnosa ini. Tujuan penelitian ini untuk dapat melihat prosedur pemeriksaan yang dimulai dari persiapan, akuisisi, dan analisis teknik 4D CMR untuk kasus TOF, dikarenakan jumlah pasiennya yang sangat banyak dan sudah sering digunakan di Rumah Sakit. Pada penelitian ini juga, peneliti akan mengulas keunggulan penggunaan teknik novel ini jika dibandingkan dengan CMR biasa serta seperti apa dampaknya terhadap pasien di Indonesia.

Metode

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode kualitatif dengan data yang dikumpulkan melalui metode wawancara, studi literature, dan observasi partisipasi. Observasi partisipasi adalah peneliti terlibat langsung dalam pengambilan citra yang dipandu oleh radiografer yang berpengalaman pada 4DCMR. Subjek penelitian pada penelitian ini adalah pelaku yang terlibat dalam pemeriksaan TOF menggunakan teknik 4DCMR pada kasus TOF seperti radiolog dan radiografer. Pada penelitian ini, peneliti menentukan hanya radiolog yang pernah membaca 4DCMR dan mempunyai pengalaman 10 tahun sebagai dokter spesialis radiologi. Sedangkan untuk radiografer adalah teknologis yang telah mempunyai pengalaman menggunakan teknik ini. Objek penelitian pada penelitian ini adalah teknik pemeriksaan 4DCMR pada kasus TOF. Penelitian ini sudah mendapatkan rekomendasi persetujuan etik yang dikeluarkan oleh Komisi Etik Penelitian Kesehatan, Universitas Awal Bros Fakultas Ilmu Kesehatan dengan Nomor: 0116 / UAB1.20 / SR / KEPK / 07.24. Berikut adalah alur penelitian yang

dilakukan peneliti dalam melakukan penelitian ini, dimulai dari persiapan hingga luaran yang dihasilkan.



Gambar 1. Bagan/Alur penelitian

Hasil Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode observasi, wawancara mendalam dengan para responden, serta studi dokumentasi demi mendapatkan data yang akurat dan konferehensif. Adapun kriteria dan daftar responden dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Table 1. kriteria responden

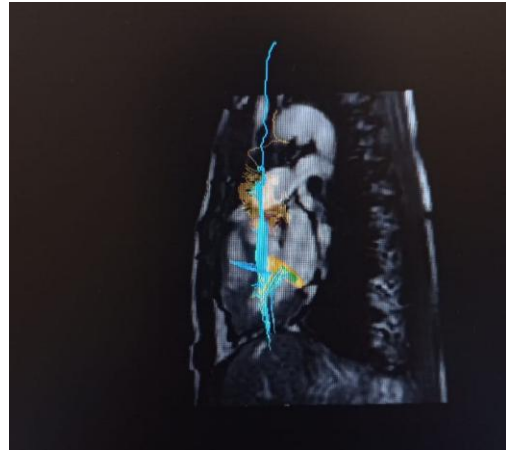
No.	Pekerjaan	Lama bekerja	Pengkodingan
1	Radiographer MRI	> 11 tahun	R1
2	Aplikasi vendor MRI	> 8 tahun	R2
3	Dokter spesialis radiologi	> 13 tahun	R3
4	Dokter spesialis jantung anak	> 18 tahun	R4

Tabel di atas menguraikan profil responden yang terlibat dalam penelitian ini, baik secara kuantitas maupun karakteristiknya. Berdasarkan kriteria yang ditetapkan, responden kemudian dikelompokkan untuk memberikan gambaran yang lebih mendalam tentang sampel penelitian. Kategorisasi ini memungkinkan analisis yang lebih terarah, mengingat karakteristik tertentu dari responden sering kali berkorelasi dengan persepsi atau hasil yang diteliti. Dengan memahami komposisi responden, temuan penelitian dapat diinterpretasikan dengan lebih akurat, memperhatikan keragaman latar belakang yang ada dalam sampel tersebut.

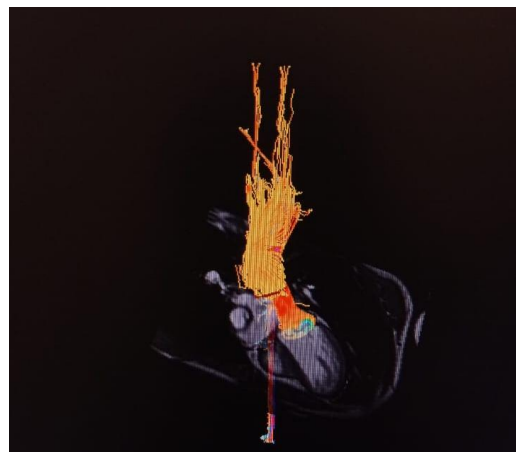
1. Prosedur Pemeriksaan CMR

Pemeriksaan 4D flow CMR dengan kasus TOF di RS Awal Bros Pekanbaru untuk pemeriksaan TOF, ada beberapa langkah-langkah yang harus diikuti untuk persiapan dan pelaksanaan pemeriksaan MRI jantung. Pertama, ada bagian persiapan pasien, kemudian ada persiapan pemeriksaan, di mana pasien harus memberikan persetujuan setelah mendapatkan informasi (*informed consent*), mengganti baju, dan melepaskan benda-benda logam lainnya. Untuk memulai pemeriksaan, radiografer akan memasang elektroda VCG kepada pasien dan memasang alat untuk mengukur pernapasan. Selanjutnya, pasien akan diarahkan untuk berbaring telentang dengan posisi kepala di depan (*head first*) untuk memastikan posisinya sudah benar saat pemeriksaan dimulai.

Setelah semua persiapan dan perlengkapan pasien selesai dilakukan selanjutnya radiographer melakukan pengaturan pasien dengan memasang *coil* yaitu dengan jenis *torso coil*. Kemudian mengatur *Slice Thickness* 3 mm, *slice gap* 0,3 mm, *matrix* 512x512 dan FOV RL (350) FH (520). Setelah itu dilakukan pengaturan *sequence* yang digunakan pada pemeriksaan CMR tanpa kontras yaitu *Survey_BFFE*, *BB_SSh_Morfologi*, *Function_NEAR2CH*, *Function_NEAR4CH*, *Function_Short Axis*, *Function_4CH*, *Function_2CH*, *Function_LVOT*, *Function_R2CH* dan *Function_RVOT*. Sedangkan pada CMR dengan kontras ada penambahan *sequence* yaitu *EGE_BH_4CH*, *EGE_BH_2CH*, *Look Locker_2beats*, *LGE_SPETIAL ENH*, *PSIR_TFE_BH_4CH*, *PSIR_TFE_BH_2CH*, dan *PSIR_TFE_BH_SA*. Ada juga pemeriksaan aliran dengan *Q FLOW* untuk aorta, arteri pulmonal, dan katup jantung seperti mitral dan trikuspid. Bahkan ada pemeriksaan yang lebih lanjut seperti 4D *Q flow*. Dengan mengikuti semua langkah ini, pemeriksaan diharapkan bisa berjalan lancar dan memberikan hasil yang akurat. Proses ini memastikan bahwa setiap detail dari persiapan dan pemeriksaan tidak terlewatkan untuk mendapatkan gambaran jantung yang jelas dan bermanfaat bagi diagnosa selanjutnya. Berikut hasil citra pemeriksaan CMR 4D *flow* pada kasus TOF yang menampilkan bagian jantung



Gambar 2. Tampilan 4DFCMR pada pasien kasus TOF dengan sekuens *RVOT Cine 4D flow technique*



Gambar 3. Tampilan 4DFCMR pada pasien kasus TOF dengan sekuens *LVOT Cine technique*

Gambar 2 menunjukkan teknik 4D Flow CMR, yang menganalisis laju atau kecepatan aliran darah di *Right Ventricular Outflow Tract* (RVOT), seperti yang terlihat pada urutan 4D *flow RVOT Cine*. Urutan ini juga dapat menganalisis regurgitasi paru secara visual. Gambar 3 menunjukkan bahwa teknik 4D Flow CMR menganalisis laju atau kecepatan aliran darah di *Left Ventricular Outflow Tract* (LVOT) dan dapat menganalisis regurgitasi secara visual di area Katup *Aorta*. Fungsi teknik 4D *flow* CMR ini adalah untuk melihat aliran atau kecepatan darah di dalam jantung. Serta untuk melihat apakah ada regurgitasi, kebocoran dan penyempitan pembuluh darah di dalam jantung.

2. Hasil Wawancara Radiografer dan Aplikasi MRI

Wawancara mengungkapkan persepsi yang sangat positif mengenai kontribusi 4D Flow CMR

pada kasus TOF, mulai dari diagnosis hingga pemantauan jangka panjang.

Tema pertama yang dibahas tentang diagnosis dini pada kasus TOF, terutama pada bayi dan anak-anak. Responden menjawab sangat membantu karna modalitas yang digunakan non-invasif dan aman yang mampu memberikan gambaran detail aliran darah jantung, sehingga sangat membantu dalam mendeteksi TOF pada bayi dan anak-anak. Berikut pernyataan lengkap dari responden radiographer.

“4D Flow CMR membantu mendeteksi TOF pada bayi dan anak-anak dengan memberikan gambaran detail aliran darah jantung. Non-invasif, aman, dan memungkinkan diagnosis dini dan perencanaan perawatan yang lebih baik.” (R1)

Kemudian tema kedua membahas tentang keunggulan 4D Flow CMR dalam mendeteksi derajat keparahan *stenosis pulmonal* dan ukuran *defek ventricular septal* pada pasien dengan kasus TOF. Responden menjawab sangat banyak keunggulan yang dimiliki dan melebihi ekspektasi yang dibayangkan, hal tersebut disampaikan responden sebagai berikut.

“Keunggulan utama 4DFCMR terletak pada kemampuannya tidak hanya memvisualisasikan, tetapi juga menyajikan data secara kuantitatif. Teknologi ini memberikan visualisasi lebih detail aliran darah yang membantu menentukan tingkat keparahan stenosis pulmonal serta besar dan lokasi defek septum ventrikel (VSD). Presisi dalam mengukur kecepatan aliran dan volume menjadi nilai tambah yang signifikan.” (R1)

Selanjutnya tema pertanyaan tentang 4D Flow CMR dapat digunakan untuk memantau efektivitas tindakan bedah koreksi TOF dan mendeteksi komplikasi jangka panjang. Jawaban dari responden adalah sebagai berikut.

“Evaluasi Pasca Operasi memberikan gambaran detail jantung dan pola aliran darah untuk mendeteksi keberhasilan tindakan operasi. Analisis Aliran Darah 4D Flow CMR mengukur kecepatan dan volume aliran diseluruh area yang diperbaiki. Deteksi Komplikasi dan Identifikasi residu masalah seperti recurrent pulmonary stenosis, obstruksi ventricular outflow tract atau sisa septal defects sangat jelas tampak. Kemudian Long Term memantau komplikasi pulmonary regurgitation yang mungkin berkembang bertahun-tahun pasca

operasipun jelas terlihat. Pada Guiding Future Care membantu dokter dalam rencana perawatan jangka panjang.” (R1)

Pada tema pertanyaan tentang 4D Flow CMR dapat membantu dalam mengevaluasi ventrikel kanan pasca bedah dan risiko obstruksi jalan keluar ventrikel kanan. Responden menjawab dengan lugas sebagai berikut:

“Ya, 4D Flow CMR sangat membantu estimasi abnormalitas struktur dan penyempitan yang mungkin terjadi pasca bedah. 4DFCMR digambarkan sebagai alat yang powerful untuk memvisualisasikan dan memahami anatomi kompleks jantung pada TOF. Ia memberikan visualisasi dinamika aliran darah secara komprehensif melalui pembuluh dan ruang jantung, yang sangat membantu dalam memahami hubungan anatomis antar struktur.” (R1)

Tema pertanyaan tentang prevalensi kasus TOF di Indonesia kemudian sekuen 4D Flow CMR dapat berkontribusi dalam memahami karakteristik unik TOF pada populasi Indonesia. Apakah ada potensi untuk mengembangkan *registry* nasional TOF berbasis 4D Flow CMR untuk meningkatkan kualitas perawatan. Bagaimana sekuen 4D Flow CMR dapat membantu dalam meningkatkan akses pasien TOF ke perawatan yang berkualitas, terutama di daerah terpencil. Pertanyaan ini dijawab langsung oleh aplikasi MRI yang sudah sangat berpengalaman, adapun jawabannya sebagai berikut.

“Tantangan pertama adalah tantangan Infrastruktur atau modalitas MRI sendiri, kemudian pemasangan dan pemeliharaan mesin MRI memerlukan infrastruktur yang signifikan, seperti sumber listrik yang stabil dan sistem pendingin, yang mungkin tidak tersedia di daerah terpencil. Memerlukan Biaya Tinggi, ini juga menjadi PR bagi fasilitas kesehatan terpencil seringkali memiliki anggaran terbatas, sehingga sulit untuk membeli teknologi pencitraan yang canggih. Kemudian perlunya pelatihan dan keahlian dalam mengoperasikan mesin MRI dan menafsirkan hasilnya memerlukan pelatihan khusus. Daerah terpencil mungkin kekurangan akses terhadap personel yang berkualifikasi, sehingga menimbulkan tantangan dalam penggunaan yang efektif. Sehingga dapat disimpulkan agak sulit untuk dikembangkan sekuen 4D flow ini menyebar keseluruh Indonesia dalam waktu dekat” (R2)

3. Hasil Wawancara Dokter Spesialis Radiologi

Pertanyaan pertama membahas tema tentang peranan pemeriksaan *Cardiovaskular MR* dalam membantu menegakkan diagnosa. Responden memberikan pernyataan bahwa modalitas ini sangat bagus memberikan informasi jantung yang komprehensif dalam satu kali pemeriksaan dapat mencakup anatomi, fungsi, perfusi, dan karakterisasi jaringan jantung bisa terlihat, berikut hasil wawancaranya.

"CMR merupakan modalitas pencitraan yang sangat serbaguna dan informatif dalam kardiologi. Kemampuannya untuk memberikan informasi yang komprehensif mengenai anatomi, fungsi, perfusi, dan karakterisasi jaringan jantung menjadikannya alat yang sangat berharga dalam diagnosis dan manajemen berbagai penyakit kardiovaskular. Dengan terus berkembangnya teknik dan aplikasi CMR, perannya dalam praktik klinis dan penelitian kardiologi diperkirakan akan semakin meningkat di masa mendatang, sehingga hal ini perlu ditingkatkan lagi".(R3)

Kemudian tema pertanyaan berikutnya adalah tentang keunggulan pemeriksaan *Cardiovaskular MR* dibandingkan dengan pemeriksaan radiologi lainnya (seperti *Echocardiografi*, *CT Cardiac / Cathlab*). Pernyataan responden menyebutkan bahwa CMR memberikan keunggulan yang baik untuk memvisualisasikan anatomi yg komprehensif, evaluasi jantung yang detail serta tanpa terkena efek radiasi.

"CMR menawarkan kombinasi unik antara visualisasi anatomi yang komprehensif, evaluasi fungsi jantung yang mendetail, dan tanpa paparan radiasi. Keunggulan ini menjadikan CMR sebagai modalitas pencitraan yang sangat berharga dalam diagnosis dan manajemen berbagai penyakit kardiovaskular. Meskipun memiliki beberapa keterbatasan seperti waktu pemindaian yang relatif lama dan biaya yang lebih tinggi dibandingkan ekokardiografi, CMR tetap menjadi pilihan utama untuk kasus-kasus tertentu di mana informasi yang detail dan akurat sangat dibutuhkan saat ini"(R3)

Tema pertanyaan berikutnya tentang kesulitan yang dihadapi pada pemeriksaan *Cardiovaskular MR*. Adapun jawaban responden sebagai berikut.

"Pemeriksaan CMR, khususnya 4D Flow, membutuhkan kolaborasi yang baik antara radiolog, radiografer, dan pasien. Penguasaan

anatomi dan teknik CMR oleh radiolog dan radiographer sangat dibutuhkan, kerjasama pasien yang baik, dan pertimbangan sedasi yang tepat sangat penting untuk mendapatkan hasil citra yang optimal. CMR 4D Flow memiliki aplikasi klinis yang penting dalam mengevaluasi kondisi pasca perbaikan atau intervensi pada jantung dan pembuluh darah, membantu mengidentifikasi komplikasi dan memantau kondisi pasien dalam jangka Panjang."(R3)

Adapun tema pertanyaan selanjutnya tentang apa yang dapat ditawarkan pada pemeriksaan CMR 4D flow dengan kasus TOF. Responden menjawab dengan lugas sebagai berikut.

"CMR 4D Flow merupakan alat yang sangat penting dalam evaluasi pasca perbaikan jantung dan pembuluh darah. Kemampuannya untuk memvisualisasikan anatomi dan mengukur parameter hemodinamik secara non-invasif memberikan informasi yang krusial untuk identifikasi komplikasi dan penentuan tatalaksana pasien. Dengan menggunakan CMR 4D Flow, tim klinis dapat membuat keputusan yang lebih tepat dan meningkatkan hasil klinis pasien pasca intervensi, kemudian dapat dengan tepat dan cepat dalam mengambil keputusan untuk tindakan selanjutnya."(R3)

4. Hasil Wawancara Dokter Spesialis Jantung

Wawancara menggarisbawahi bahwa 4D Flow CMR bukan sekadar alat konfirmasi, melainkan alat yang mampu mengungkap dimensi diagnostik baru pada kasus TOF. Tema pertama pertanyaan tentang Peranan Pemeriksaan CMR dengan teknik 4D flow dalam menegakkan diagnosa bagi dokter spesialis jantung. Responden menyatakan bahwa teknik ini memungkinkan visualisasi aliran darah secara dinamis dan tiga dimensi. Kemampuan ini memberikan gambaran lebih jelas yang tidak statis, melainkan merepresentasikan fungsi jantung dalam ruang dan waktu. Hal ini menjadi dasar untuk memahami kompleksitas TOF secara holistic, berikut hasil wawancara.

"Teknik 4D Flow CMR memainkan peran penting dalam menegakkan diagnosis yang lebih akurat dan komprehensif untuk kasus Tetralogy of Fallot (TOF). Teknik ini memungkinkan visualisasi aliran darah secara dinamis dan tiga dimensi, yang memberikan gambaran lebih jelas tentang anatomi

dan fungsi jantung. Dengan kemampuan untuk mengukur parameter hemodinamik secara kuantitatif, seperti *ejection fraction* dan volume ventrikel, teknik 4D Flow CMR membantu dalam mengidentifikasi abnormalitas struktural dan fungsional yang mungkin tidak terdeteksi dengan teknik pencitraan konvensional. Ini sangat penting dalam memahami kompleksitas kasus TOF dan merencanakan intervensi yang tepat.”(R4)

Tema pertanyaan kedua yaitu tentang keunggulan pemeriksaan 4D Flow CMR dengan pemeriksaan lainnya bagi dokter spesialis jantung. Jawaban responden Keunggulan diagnostik kunci terletak pada kemampuannya mengukur parameter hemodinamik secara kuantitatif (seperti *ejection fraction*, volume ventrikel). Data kuantitatif ini bersifat objektif dan memungkinkan identifikasi abnormalitas struktural dan fungsional yang mungkin tidak terdeteksi dengan teknik pencitraan konvensional.

“Keunggulan utama 4D Flow CMR dibandingkan dengan pemeriksaan lainnya adalah kemampuannya untuk memberikan data kuantitatif yang presisi dan visualisasi aliran darah yang lebih detail. Tidak seperti echocardiography atau CT scan, 4D Flow CMR dapat menilai aliran darah melalui berbagai struktur jantung secara real-time dan dalam tiga dimensi, yang sangat berguna untuk menilai derajat keparahan stenosis pulmonal dan defek septal ventrikel. Selain itu, teknik ini non-invasif dan tidak menggunakan radiasi, menjadikannya pilihan yang lebih aman untuk pasien anak.”

Pertanyaan terakhir tentang tema potensinya jika diimplementasikan di Indonesia teknik 4D flow CMR ini untuk kasus TOF. Responden melihat potensi besar 4DFCMR untuk meningkatkan diagnosis dan manajemen TOF di Indonesia. Dengan menyediakan data yang lebih akurat dan komprehensif, teknologi ini memberdayakan dokter untuk merencanakan perawatan yang lebih efektif dan tepat waktu, yang secara langsung berdampak pada *outcome* pasien. Sebagaimana hasil wawancara sebagai berikut.

“Implementasi 4D Flow CMR di Indonesia memiliki potensi besar untuk meningkatkan diagnosis dan manajemen kasus TOF. Mengingat prevalensi TOF di Indonesia, teknologi ini dapat membantu dalam memahami karakteristik unik dari kondisi ini pada populasi lokal. Dengan data yang lebih akurat dan komprehensif, dokter dapat merencanakan perawatan yang lebih efektif dan

tepat waktu. Namun, tantangan seperti infrastruktur dan biaya perlu diatasi untuk memastikan akses yang lebih luas ke teknologi ini, terutama di daerah terpencil. Dengan dukungan yang tepat, 4DFCMR dapat menjadi alat yang sangat berharga dalam meningkatkan kualitas perawatan kardiovaskular di Indonesia.”

Pembahasan

1. Prosedural Pemeriksaan 4DFLOW pada kasus TOF

Prosedur pemeriksaan 4DFLOW CMR yang diterapkan pada kasus *Tetralogy of Fallot* (TOF). TOF adalah kelainan jantung bawaan yang kompleks, dan pemahaman aliran darah yang tepat sangat penting untuk diagnosis dan manajemen yang efektif. Prosedur yang kami ikuti mencakup persiapan pasien dan pemeriksaan yang teliti, yang sejalan dengan teori dan praktik yang ada dalam literatur medis.

Persiapan pasien jika menggunakan kontras, seperti puasa dan pembatasan kafein, adalah langkah penting yang didukung oleh penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kondisi tubuh yang stabil dapat meningkatkan kualitas gambar MRI (Smith et al., 2018). Selain itu, pelepasan benda feromagnetik dan penggunaan pakaian khusus adalah standar dalam prosedur MRI untuk menghindari artefak gambar dan risiko keselamatan (Jones & Brown, 2017).

Pemasangan elektroda VCG dan alat pernapasan membantu dalam sinkronisasi gambar dengan siklus jantung dan pernapasan, yang merupakan teknik yang diakui untuk meningkatkan resolusi temporal dan spasial dalam pencitraan jantung (Taylor et al., 2019). Posisi pasien yang telentang dengan kepala di depan juga merupakan praktik umum yang memfasilitasi akses optimal ke area jantung yang akan diperiksa.

Dalam hal *sequence*, penggunaan 4DFLOW CMR memberikan keuntungan signifikan dalam memvisualisasikan aliran darah tiga dimensi secara dinamis, yang sangat berguna dalam kasus TOF di mana ada gangguan aliran yang kompleks (Petersen et al., 2020). *Sequence* ini memungkinkan analisis mendalam tentang aliran darah melalui aorta, arteri pulmonal, dan katup jantung, memberikan wawasan yang lebih baik dibandingkan metode konvensional.

Interpretasi menunjukkan bahwa prosedur ini, meskipun kompleks, memberikan data yang sangat

berharga untuk penilaian hemodinamik pada pasien dengan TOF. Dengan mengikuti langkah-langkah yang terstruktur dan memanfaatkan teknologi *4DFLOW*, kami dapat memperoleh gambaran yang lebih komprehensif tentang dinamika aliran darah, yang dapat memandu intervensi klinis yang lebih tepat.

2. Keunggulan penggunaan teknik *4DFLOW* pada kasus TOF

Prosedur *4D Flow Cardiac Magnetic Resonance* (4DFCMR) menawarkan sejumlah keunggulan signifikan dibandingkan dengan modalitas pencitraan jantung lainnya, terutama dalam konteks diagnosis dan manajemen *Tetralogy of Fallot* (TOF). Salah satu keunggulan utama dari 4DFCMR adalah kemampuannya untuk memberikan visualisasi tiga dimensi yang dinamis dari aliran darah jantung. Ini memungkinkan dokter untuk memahami anatomi kompleks dan mekanika jantung pada pasien TOF dengan lebih baik, yang sangat penting untuk perencanaan strategi pengobatan yang lebih efektif. Dengan visualisasi yang lebih detail, 4DFCMR dapat membantu menentukan tingkat keparahan stenosis pulmonal dan ukuran serta lokasi defek septal ventrikel, memberikan data kuantitatif yang presisi dalam menentukan kecepatan aliran dan volume.

Dalam hal pemantauan pasca bedah, 4DFCMR dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas tindakan bedah koreksi TOF dan mendeteksi komplikasi jangka panjang. Prosedur ini memberikan gambaran detail jantung dan pola aliran darah, mengukur kecepatan dan *volume* aliran di seluruh area yang diperbaiki, serta mendeteksi masalah residu seperti stenosis pulmonal berulang atau obstruksi jalan keluar ventrikel. Ini juga membantu dalam memantau komplikasi seperti regurgitasi pulmonal yang mungkin berkembang bertahun-tahun setelah operasi, dan memandu perawatan jangka panjang.

Interpretasi hasil *expertise* dokter radiologi dari citra 4DFCMR menunjukkan keunggulan teknik ini dalam mendiagnosis dan mengevaluasi kasus *Tetralogy of Fallot* (TOF) dibandingkan dengan teknik CMR biasa. Dengan menggunakan 4DFCMR, observasi rinci seperti hipoplasia ventrikel kanan (RV) dan ukuran besar ventrikel kiri (LV) dapat dilakukan secara tepat, mengidentifikasi abnormalitas struktural seperti atresia trikuspid dan *hypoplasia* RV monipartite. Teknologi ini juga efektif dalam evaluasi fungsi hemodinamik, seperti mengukur *ejection fraction* (LVEF 55%), serta

volume end-diastolic dan *end-systolic ventrikel*. Tidak adanya efusi perikardium, serta *wall motion* LV yang normokinetik, menunjukkan kemampuan 4DFCMR dalam memberikan gambaran fungsional yang akurat tanpa penyangatan atau late enhancement, yang sering kali menjadi keterbatasan pada CMR biasa. Selain itu, teknik ini mampu menilai anatomi aliran darah dan struktur vaskular, seperti mengidentifikasi conduit IVC-RPA-SVC dengan fenestrasi dan status patensi PDA dan stenosis RPA. Dengan informasi yang komprehensif dan presisi yang tinggi, 4DFCMR menyediakan data penting untuk perencanaan perawatan yang lebih tepat dan dapat diandalkan dalam mengarahkan intervensi klinis pada pasien dengan TOF.

Penggunaan *4D Flow Cardiac Magnetic Resonance* (4DFCMR) dalam diagnosis dan manajemen *Tetralogy of Fallot* (TOF) menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan dengan teknik pencitraan konvensional. Sebagai alat diagnostik, 4DFCMR memberikan visualisasi tiga dimensi yang dinamis dari aliran darah, memungkinkan identifikasi yang lebih akurat dari abnormalitas struktural dan fungsional jantung. Ini termasuk kemampuan untuk mendeteksi hipoplasia ventrikel kanan, atresia trikuspid, dan defek septal ventrikel dengan presisi yang lebih tinggi. Keunggulan ini sangat penting dalam menilai derajat keparahan kondisi dan merencanakan intervensi yang tepat.

Selain itu, 4DFCMR menawarkan data kuantitatif yang presisi mengenai parameter hemodinamik, seperti *ejection fraction* dan volume ventrikel, yang tidak dapat dicapai dengan *echocardiography* atau CT scan. Teknik ini juga *non-invasif* dan bebas radiasi, menjadikannya pilihan yang lebih aman untuk pasien anak. Dalam konteks Indonesia, implementasi 4DFCMR dapat meningkatkan kualitas perawatan pasien TOF dengan memberikan informasi yang lebih komprehensif dan akurat, meskipun tantangan infrastruktur dan biaya perlu diatasi untuk memastikan akses yang lebih luas.

Di Indonesia, penerapan teknologi ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas perawatan pasien TOF. Mengingat prevalensi TOF di Indonesia, 4DFCMR dapat berkontribusi dalam memahami karakteristik unik TOF pada populasi lokal. Ada potensi untuk mengembangkan *registry* nasional TOF berbasis 4DFCMR, yang dapat meningkatkan kualitas perawatan dan penelitian

lokal. Namun, tantangan infrastruktur dan biaya tinggi menjadi hambatan utama dalam penerapan teknologi ini di daerah terpencil. Pemasangan dan pemeliharaan mesin MRI memerlukan infrastruktur yang signifikan, seperti sumber listrik yang stabil dan sistem pendingin, yang mungkin tidak tersedia di daerah terpencil. Selain itu, fasilitas kesehatan terpencil seringkali memiliki anggaran terbatas, sehingga sulit untuk membeli teknologi pencitraan yang canggih.

Untuk mengatasi tantangan ini, pengembangan protokol pencitraan yang lebih sederhana dan cepat, serta peningkatan pelatihan dan keahlian tenaga kesehatan, sangat penting. Terdapat potensi yang signifikan dalam mengembangkan protokol pencitraan yang lebih sederhana dan scan time lebih cepat untuk 4D *Flow Cardiac* MRI dengan inovasi peningkatan *hardware* yang lebih efisien, *workflow* yang lebih otomatis, dan *user-friendly*. Dengan dukungan pemerintah dan kolaborasi internasional, Indonesia dapat mengatasi tantangan ini dan memanfaatkan teknologi 4DFCMR untuk meningkatkan hasil pengobatan pasien TOF secara signifikan.

Simpulan

Sekuen 4D Flow Cardiac Magnetic Resonance (4DFCMR) menawarkan keunggulan signifikan dalam diagnosis dan manajemen Tetralogy of Fallot (TOF) dibandingkan dengan modalitas pencitraan lainnya. Dengan kemampuan untuk memberikan visualisasi tiga dimensi yang dinamis dan data kuantitatif yang presisi, 4DFCMR memungkinkan penilaian yang lebih akurat terhadap keparahan stenosis pulmonal dan defek septal ventrikel, serta pemantauan pasca bedah yang efektif.

Teknologi ini memiliki potensi besar di Indonesia untuk meningkatkan kualitas perawatan pasien TOF dan berkontribusi pada pemahaman karakteristik unik TOF dalam populasi lokal. Namun, tantangan infrastruktur dan biaya tinggi menjadi hambatan utama, terutama di daerah terpencil. Oleh karena itu, pengembangan protokol yang lebih sederhana dan cepat, serta peningkatan pelatihan tenaga kesehatan, sangat penting untuk memaksimalkan manfaat 4DFCMR. Dengan dukungan pemerintah dan kolaborasi internasional, Indonesia dapat mengatasi tantangan ini dan memanfaatkan teknologi 4DFCMR untuk meningkatkan hasil pengobatan pasien TOF secara signifikan.

Daftar Pustaka

- Amelia, P., 2019. Tetralogy Fallot (TOF). Medan.
- Attalla, R.A., Helmy, I.M., Nassar, I.A., Elbarbary, A.A., Elshafey, K.E., 2022. CMR parameters and CMR-FT in repaired tetralogy of Fallot. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine* 53. <https://doi.org/10.1186/s43055-022-00775-3>
- Bissell, M.M., Raimondi, F., Ait Ali, L., Allen, B.D., Barker, A.J., Bolger, A., Burris, N., Carhäll, C.J., Collins, J.D., Ebberts, T., Francois, C.J., Frydrychowicz, A., Garg, P., Geiger, J., Ha, H., Hennemuth, A., Hope, M.D., Hsiao, A., Johnson, K., Kozerke, S., Ma, L.E., Markl, M., Martins, D., Messina, M., Oechtering, T.H., van Ooij, P., Rigsby, C., Rodriguez-Palomares, J., Roest, A.A.W., Roldán-Alzate, A., Schnell, S., Sotelo, J., Stuber, M., Syed, A.B., Töger, J., van der Geest, R., Westenberg, J., Zhong, L., Zhong, Y., Wieben, O., Dyverfeldt, P., 2023. 4D Flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement: 2023 update. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*. <https://doi.org/10.1186/s12968-023-00942-z>
- Demirkiran, A., van Ooij, P., Westenberg, J.J.M., Hofman, M.B.M., van Assen, H.C., Schoonmade, L.J., Asim, U., Blanken, C.P.S., Nederveen, A.J., van Rossum, A.C., Götte, M.J.W., 2022. Clinical intra-cardiac 4D flow CMR: acquisition, analysis, and clinical applications. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeab112>
- Dyverfeldt, P., Bissell, M., Barker, A.J., Bolger, A.F., Carhäll, C.J., Ebberts, T., Francios, C.J., Frydrychowicz, A., Geiger, J., Giese, D., Hope, M.D., Kilner, P.J., Kozerke, S., Myerson, S., Neubauer, S., Wieben, O., Markl, M., 2015. 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance* 17. <https://doi.org/10.1186/s12968-015-0174-5>
- Hulmansyah, D., & Marido, B. (2025). Prosedur Pemeriksaan Magnetic Resonance Imaging Lumbal Dengan Kasus Hernia Nukleus Pulposus. *Jurnal Mitra Sehat*, 15(2), 886–892.
- Hulmansyah, D., Santoso, B., & Budiarti, T. A. (2023). Implementation of MRI (Magnetic

- resonance imaging) information system to improve service quality in radiology room Arifin Achmad general hospital. *International Journal of Radiology and Diagnostic Imaging*, 6(3), 87–92. <https://doi.org/10.33545/26644436.2023.v6.i3.b.346>
- Isorni, M., Cinqualbre, A., Ben Moussa, N., Tortigue, M., Monnot, S., Hascoët, S., 2019. 4D flow CMR analysis in repaired tetralogy of Fallot: Where we are and where we are going. *Archives of Cardiovascular Diseases Supplements* 11, 137. <https://doi.org/10.1016/j.acvdsp.2018.10.305>
- Laksono, G., Tahalele, P.L., 2022. CYANOTIC HEART DISEASE: AN OVERVIEW OF TETRALOGY OF FALLOT. *Journal of Widya Medika Junior* 4, 87–98. <https://doi.org/10.33508/jwmj.v4i2.3816>
- Ramírez, S.C.J., de Isla, P.L., 2020. Tetralogy of Fallot: cardiac imaging evaluation. *Ann Transl Med* 8, 966–966. <https://doi.org/10.21037/atm.2020.02.18>
- Tseng, W.Y.I., Su, M.Y.M., Tseng, Y.H.E., 2016. Introduction to cardiovascular magnetic resonance: Technical principles and clinical applications. *Acta Cardiol Sin* 32, 129–144. <https://doi.org/10.6515/ACS20150616A>
- Warmerdam, E.G., Neijzen, R.L., Voskuil, M., Leiner, T., Grotenhuis, H.B., 2022. Four-dimensional flow CMR in tetralogy of fallot: current perspectives. *Br J Radiol* 95. <https://doi.org/10.1259/bjr.20210298>
- Wicaksono, S.H., Syamsul, D.S., Primasari, C., Gayatri, A., Permana, A.R., 2013. MRI Kardiak untuk Gagal Jantung akibat Kardiomiopati. *Jurnal Kardiologi Indonesia* • 34, 280–288.
- Wilson, R., Ross, O., Griksaitis, M.J., 2019. Tetralogy of Fallot. *BJA Educ*. <https://doi.org/10.1016/j.bjae.2019.07.003>
- Zhao, X., Hu, L., Leng, S., Tan, R.S., Chai, P., Bryant, J.A., Teo, L.L.S., Fortier, M. V., Yeo, T.J., Ouyang, R.Z., Allen, J.C., Hughes, M., Garg, P., Zhang, S., van der Geest, R.J., Yip, J.W., Tan, T.H., Tan, J. Le, Zhong, Y., Zhong, L., 2022. Ventricular flow analysis and its association with exertional capacity in repaired tetralogy of Fallot: 4D flow cardiovascular magnetic resonance study. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance* 24. <https://doi.org/10.1186/s12968-021-00832-2>