

PERAN CARDIAC MAGNETIC RESONANCE IMAGING (C-MRI) SEBAGAI MODALITAS DIAGNOSTIK DAN PROGNOSIS PADA KARDIOMIOPATI

Muhammad Farid Khuluqi¹, Maryam Jamilah², Andi Alfian³

farid.khuluqi@gmail.com¹

Universitas Yarsi

ABSTRAK

Kardiomiopati merupakan kelompok penyakit miokard heterogen yang ditandai dengan kelainan struktural dan/atau fungsional jantung yang berkontribusi terhadap gagal jantung, aritmia, hingga kematian mendadak. Variasi karakteristik morfologi dan gejala yang seringkali non-spesifik menjadikan diagnosis dini kardiomiopati sebagai tantangan klinis. Pencitraan multimodal diperlukan untuk mengevaluasi morfologi, fungsi, serta etiologi penyakit di mana cardiac magnetic resonance imaging (C-MRI) memiliki peran penting sebagai modalitas yang mampu menggabungkan evaluasi volumetrik, fungsi jantung, serta karakterisasi jaringan miokard. Literatur ini menunjukkan bahwa C-MRI memiliki peran diagnostik tinggi dalam membedakan karakteristik morfologi kardiomiopati seperti hipertrofik, dilatasi, restriktif, maupun infiltratif, dan menilai adanya fibrosis, edema, dan infiltrasi jaringan dengan sensitivitas yang tinggi dibandingkan modalitas lain. Dari segi prognostik, keberadaan dan luas late gadolinium enhancement (LGE), peningkatan T1/T2 mapping, serta extracellular volume (ECV) yang dapat dinilai melalui C-MRI berkorelasi dengan mortalitas, aritmia ventrikel, dan kebutuhan transplantasi jantung, sehingga dijadikan dasar dalam keputusan klinis seperti pemasangan ICD atau rujukan transplantasi. C-MRI memiliki keterbatasan berupa biaya tinggi, ketersediaan terbatas, kontraindikasi kontras, serta kebutuhan keahlian interpretasi menjadi tantangan khususnya di negara berkembang. Tinjauan literatur ini menjelaskan bahwa C-MRI berperan sebagai modalitas diagnostik dan prognostik yang krusial pada kardiomiopati dan juga menjelaskan perlunya validasi data prognostik dalam konteks lokal serta penguatan infrastruktur untuk memperluas penerapan klinis penggunaan C-MRI.

Kata Kunci: Kardiomiopati, Cardiac Magnetic Resonance Imaging, Diagnostik, Prognostik.

ABSTRACT

Cardiomyopathy is a heterogeneous group of myocardial diseases characterized by structural and/or functional abnormalities of the heart that contribute to heart failure, arrhythmias, and sudden cardiac death. The wide variation in morphological characteristics and often non-specific symptoms makes early diagnosis of cardiomyopathy a clinical challenge. Multimodality imaging is required to evaluate morphology, function, and etiology, in which cardiac magnetic resonance (C-MRI) plays a pivotal role as a modality that integrates volumetric assessment, cardiac function, and myocardial tissue characterization. The literature indicates that C-MRI provides high diagnostic value in differentiating morphological characteristics of cardiomyopathies such as hypertrophic, dilated, active, and infiltrative types, as well as in detecting fibrosis, edema, and tissue infiltration with greater sensitivity compared to other modalities. From a prognostic perspective, the presence and extent of late gadolinium enhancement (LGE), elevated T1/T2 mapping, and extracellular volume (ECV) assessed by C-MRI are correlated with mortality, ventricular arrhythmias, and the need for heart transplantation, thus serving as the basis for clinical decisions such as ICD implantation or referral for transplantation. However, C-MRI has limitations, including high cost, limited availability, contraindications to contrast agents, and the need for specialized expertise in interpretation, which are significant challenges particularly in developing countries. This literature review highlights C-MRI as a crucial diagnostic and prognostic modality in cardiomyopathy, while also emphasizing the need for validation of prognostic data in local contexts and strengthening infrastructure to expand its clinical application.

Keywords: Cardiomyopathy, Cardiac Magnetic Resonance Imaging, Diagnostic, Prognostic.

PENDAHULUAN

Kardiomiopati merupakan sekelompok penyakit miokard yang ditandai dengan adanya kelainan struktural dan/atau fungsional jantung yang dapat menyebabkan gagal jantung, aritmia, dan kematian mendadak. Klasifikasi karakteristik morfologi modern menggunakan MOGEs mencantumkan mengenai hubungan genetik dalam penilaiannya. Hal ini menjelaskan bahwa penting untuk mendeskripsikan kelainan yang terjadi secara morfo-fungsional dan terintegrasi dengan aspek genetik untuk memahami heterogenitas penyakit ini dan merencanakan penatalaksanaan pasien dengan tepat (Ciarambino et al., 2021).

Salah satu karakteristik morfologi yang sering dibahas adalah Dilated Cardiomyopathy yaitu kardiomiopati yang ditandai dengan dilatasi ventrikel dan disfungsi sistolik tanpa penyebab koroner atau valvular yang jelas. Sebagian besar kasus Dilated Cardiomyopathy bersifat idiopatik dan sekitar 20–30% berkaitan dengan faktor genetik atau proses inflamasi seperti miokarditis. Penyebab lain Dilated Cardiomyopathy yang mungkin ditemukan antara lain toksin, infeksi, dan penyakit sistemik. Perubahan histologis seperti degenerasi miosit dan fibrosis interstisial/perivaskular berkontribusi dalam terjadinya remodeling ventrikel dan penurunan fungsi kontraktile pada Dilated Cardiomyopathy (Yeates & Karani, 2018).

Gejala kardiomiopati yang bervariasi, non-spesifik dan terkadang asimtomatik menjadikan diagnosis dini kardiomiopati mengalami banyak kendala. Hal ini menjadikan penggunaan modalitas pencitraan menjadi langkah penting karena dinilai mampu memberikan gambaran morfologis maupun karakter jaringan secara krusial. Pendekatan multimodal (EKG, ekokardiografi, MRI, dan pada beberapa kasus termasuk juga tes genetik atau biopsi) direkomendasikan dalam evaluasi menyeluruh untuk menentukan etiologi dan menetapkan strategi tatalaksana (Laksono & Azahra, 2022).

Cardiac Magnetic Resonance Imaging (C-MRI) menjadi evaluasi volume ejeksi jantung dan menilai fungsional jantung secara kuantitatif (cine imaging) dengan menggabungkan pengukuran kuantitatif fungsi jantung dan penilaian karakter jaringan (late gadolinium enhancement/LGE, T1/T2 mapping, ECV) sehingga memberikan informasi diagnostik dan prognostik yang lebih lengkap dibandingkan modalitas tunggal. Teknik C-MRI dewasa ini dinilai penting dalam praktik klinis karena dengan teknik ini, pemeriksa dapat menilai ukuran dan fungsi jantung serta mendeteksi perubahan jaringan (seperti fibrosis atau edema). C-MRI bahkan disebut “new gold standard” pada kondisi tertentu seperti Hypertrophic Cardiomyopathy untuk menentukan karakteristik morfologi penyakit dan menggambarkan karakteristik histologi dari miokard pasien (Ciarambino et al., 2021).

Temuan C-MRI dinilai memiliki nilai prognostik yang kuat. Pada studi yang melibatkan 116 anak dengan Hypertrophic Cardiomyopathy, keberadaan maupun besar LGE berhubungan signifikan dengan kejadian kardiak mayor. Penelitian tersebut juga menyatakan cut off LGE $\geq 2\%$ dari massa ventrikel kiri sebagai ambang optimal untuk memprediksi hard cardiac events (Ali et al., 2022). Pada pasien non-iskemik, keberadaan atau luasnya late gadolinium enhancement (LGE) serta peningkatan parameter mapping kardiak berhubungan dengan outcome buruk termasuk mortalitas, kejadian aritmia, dan kebutuhan transplantasi. Hal ini menjadikan temuan C-MRI sering dijadikan pertimbangan untuk pemasangan ICD, evaluasi potensi respons terhadap CRT, atau rujukan transplantasi dalam konteks penilaian klinis menyeluruh (Ciarambino et al., 2021; Laksono & Azahra, 2022).

Meskipun C-MRI memiliki keunggulan dalam bidang diagnostik dan prognostik, implementasinya dalam lapangan mengalami beberapa hambatan terutama di negara berpendapatan menengah. Hambatan tersebut termasuk karena perlunya biaya yang relatif tinggi, ketersediaan scanner dan protokol yang terbatas, keterbatasan akses tenaga terlatih, serta kontraindikasi pada beberapa pasien (seperti implantable devices non-MRI compatible, gangguan fungsi ginjal sehingga membatasi penggunaan gadolinium). Banyak data prognostik C-MRI yang berasal dari pusat rujukan di negara maju sehingga validitas cut-off

(seperti LGE $\geq 2\%$) dan penerapan algoritme strata risiko belum banyak divalidasi pada populasi Indonesia. Karena itu pendekatan multimodal tetap relevan sebagai strategi rasional dalam konteks sumber daya terbatas (Fortuny et al., 2012; Laksono & Azahra, 2022).

Oleh karena itu tinjauan sistematis dan studi prospektif di konteks lokal diperlukan untuk menginformasikan kebijakan pengujian dan alur rujukan untuk menilai efektifitas penggunaan C-MRI dalam sistem kesehatan nasional (Ciarambino et al., 2021; Laksono & Azahra, 2022). Penerapan klinis yang luas dalam konteks lokal memerlukan adaptasi terhadap keterbatasan sumber daya serta validasi parameter prognostik pada populasi lokal sehingga peneliti menyusun tinjauan literatur ini untuk meninjau secara komprehensif mengenai topik terkait dalam konteks lokal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi dengan desain tinjauan dengan tujuan menilai peran Pencitraan Resonansi Magnetik Kardiovaskular (Cardiac Magnetic Resonance Imaging/C-MRI) sebagai modalitas diagnostik dan prognosis pada pasien dengan kardiomiopati. Penelitian ini disusun berdasarkan pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 (Page et al., 2021).

Kriteri Inklusi dan Eksklusi

Kriteria pemilihan literatur dalam penelitian ini dibagi menjadi kriteria inklusi dan kriteria. Dibawah ini merupakan kriteria inklusi pada penelitian ini, yaitu:

1. Merupakan original article berupa studi prospektif, retrospektif, kohort, maupun studi diagnostik observasional
2. Studi dipublikasikan dalam 5 tahun terakhir antara tahun 2020 hingga 2025.
3. Studi dipublikasikan dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris.
4. Studi meneliti pasien dengan diagnosis kardiomiopati (termasuk kardiomiopati dilatasi, hipertrofik, restriktif, atau aritmogenik)
5. Studi mengevaluasi peran C-MRI sebagai modalitas diagnostik (akurasi, sensitivitas, spesifisitas, atau identifikasi karakteristik jaringan) dan/atau modalitas prognosis

Sedangkan kriteria eksklusi yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Artikel tidak dapat diakses dalam bentuk full-text, hanya tersedia sebagai abstrak, ringkasan, atau poster konferensi
2. Jenis publikasi berupa review artikel, systematic review, meta-analisis, editorial, atau laporan kasus tunggal (case report)
3. Studi yang tidak secara spesifik meneliti hubungan antara hasil C-MRI dengan diagnosis atau prognosis kardiomiopati
4. Penelitian yang tidak menyertakan data atau hasil klinis yang relevan untuk menilai peran diagnostik atau prognostik C-MRI

Sumber Informasi

Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data elektronik yaitu PubMed dan ScienceDirect. Ketiga basis data ini dipilih karena memiliki cakupan luas terhadap literatur ilmiah internasional dan dapat diakses dengan mudah termasuk artikel dalam bahasa Indonesia dan Inggris. Pencarian artikel dilakukan hingga bulan November 2025 menggunakan kata kunci yang telah disusun berdasarkan kriteria PICO dalam penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses seleksi artikel pada penelitian ini mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020. Pencarian literatur dilakukan pada dua basis data elektronik yaitu PubMed dan ScienceDirect (Scopus) dengan menggunakan kombinasi kata kunci:

((“cardiovascular magnetic resonance” OR “cardiac magnetic resonance imaging”) AND “cardiomyopathy”)

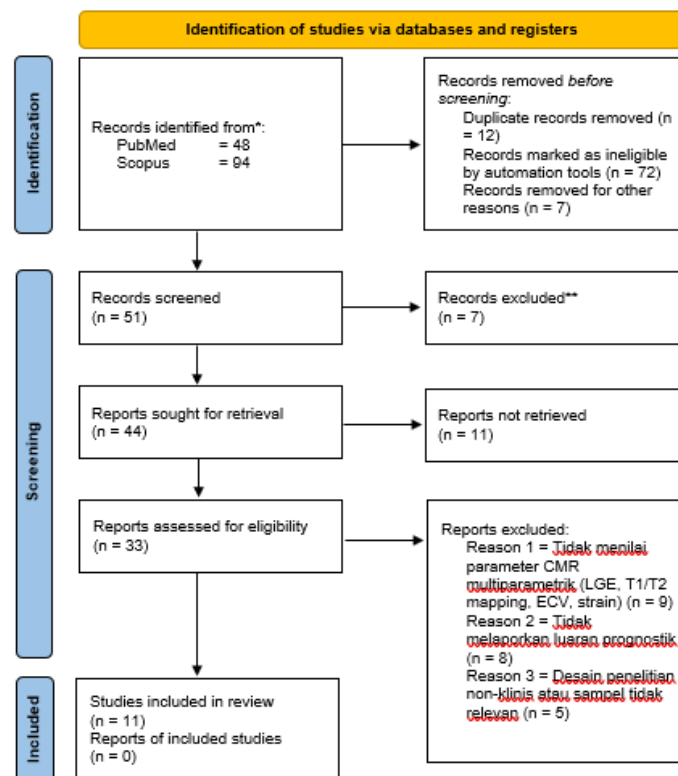
Pencarian dibatasi pada lima tahun terakhir (2020–2025), berbahasa Inggris, dan hanya mencakup penelitian klinis pada manusia dewasa.

Pada tahap identifikasi awal, diperoleh total 142 artikel (PubMed = 48, Scopus = 94). Sebanyak 12 artikel duplikat dihapus, 72 artikel dieliminasi oleh sistem penyaringan otomatis karena tidak memenuhi kriteria dasar (misalnya bukan penelitian manusia, bukan artikel asli, atau tidak tersedia full text), dan 7 artikel dihapus karena termasuk kategori narrative review atau conference abstract.

Setelah proses tersebut, 51 artikel diseleksi berdasarkan judul dan abstrak (title and abstract screening). Dari jumlah tersebut, 7 artikel dikeluarkan karena tidak relevan dengan topik penelitian (misalnya berfokus pada teknik pencitraan C-MRI tanpa membahas kardiomiopati). Sebanyak 44 artikel kemudian diperoleh untuk tahap penilaian kelayakan full-text (eligibility assessment). Pada tahap ini, 33 artikel dinilai secara menyeluruh dan 22 di antaranya dikeluarkan dengan rincian alasan sebagai berikut:

- Tidak menilai parameter C-MRI multiparametrik seperti Late Gadolinium Enhancement (LGE), T1/T2 mapping, Extracellular Volume (ECV), atau strain (n = 9)
- Tidak melaporkan luaran prognostik seperti mortalitas, major adverse cardiac events (MACE), atau pemulihan fungsi ventrikel (n = 8)
- Desain penelitian bersifat non-klinis atau melibatkan sampel yang tidak relevan (n = 5)

Setelah proses seleksi menyeluruh, diperoleh 11 artikel akhir yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dimasukkan ke dalam analisis kualitatif (systematic review). Artikel-artikel ini mewakili berbagai sub tipe kardiomiopati (hipertrofik, dilatasi, infiltratif, inflamasi, dan peripartum) serta menggunakan pendekatan C-MRI multiparametrik dengan luaran diagnostik dan prognostik yang terukur. Diagram alur proses seleksi artikel ditampilkan pada Gambar 1



Gambar 1 PRISMA Flow Diagram

Tabel 1 Hasil Penelitian

Penulis , Tahun	Desain Studi	Negara	Populasi	Metode Penelitian	Hasil Utama
(Hamm ersley et al., 2024)	Prospekti f observasi onal	Inggris/ China (multise nter)	355 pasien <i>DILATED</i> <i>CARDIOMYOPAT</i> <i>HY</i> dengan LVEF $\geq$ 40% (<i>DILATED</i> <i>CARDIOMYOPAT</i> <i>HY</i> mrEF), median follow-up 7,8 th	C-MRI multiparametr ik: feature- tracking (LV- GLS) & LGE	GLS memprediksi kejadian HF (per-% HR 1,10; p=0,045); LGE berasosiasi dengan risiko SCD/aSCD; LVEF tidak terkait HF/SCD.
(Liang et al., 2020)	Kohort prospekti f	Tiongk ok	21 pasien peripartum cardiomyopathy (PPCM)	C-MRI dgn T1/T2 mapping, ECV, LGE; follow-up 2,5 th	ECV lebih rendah & T2 lebih rendah pada kelompok dengan pemulihan LVEF; ECV independen memprediksi pemulihan (OR 0,58 per 1% kenaikan; p=0,032).
(Ge et al., 2020)	Kohort	USA	Pasien dengan HF/HFrEF rujukan perfusi	Stress- perfusion MRI	Temuan perfusi & LGE memiliki nilai prognostik terhadap kejadian kardiovaskular mayor; nilai tambah di atas faktor klinis.
(Earl et al., 2025)	Kohort longitudi nal	Inggris	225 pria Duchenne (tanpa & dengan kardiomiopati)	4D-C-MRI strain regional (basal septal/inferola teral)	Strain regional 4D- C-MRI memprediksi awal/progresi kardiomiopati dan mengklasifikasi status penyakit lebih baik dibanding metrik global.
(Bernha rd et al., 2023)	Kohort	Austria/ Euro	Pasien dengan dugaan miokarditis menjalani C-MRI	C-MRI fungsi RV, LGE	Parameter fungsi RV pada C-MRI digunakan untuk stratifikasi risiko/prediksi luaran pada miokarditis.

Penulis , Tahun	Desain Studi	Negara	Populasi	Metode Penelitian	Hasil Utama
(Clerc et al., 2024)	Kohort prospekti f (AL)	AS (pusat amiloid)	AL-amyloidosis (dengan/ CMP)	C-MRI ECV, GLS, LGE, serial follow- up	ECV & GLS adalah penanda prognostik kuat di atas staging Mayo; sensitif mendeteksi keterlibatan jantung & memonitor respons terapi.
(Nakam ori et al., 2020)	Kohort NICM	—	Non-ischaemic cardiomyopathy	Indeks heterogenitas T1-mapping	Heterogenitas jaringan (T1) pada C- MRI menandai substrat aritmia & berpotensi memprediksi kejadian aritmia/luaran buruk.
(Berga maschi et al., 2024)	Multisent er prospekti f	Eropa	198 pasien MINOCA iskemik : (C-MRI ≤7 hari)	C-MRI komprehensif : LGE + T1/T2 mapping	LGE (HR 1,123) & T2 mapping (HR 1,190) memprediksi MACE; LGE+/mapping+ berisiko MACE 20,7% vs 2,7% bila C-MRI normal.
(Adhya pak et al., 2021)	Kohort prospekti f	India	165 pasien ischemic CM	Echo serial; (artikel membahas implikasi terhadap peran C-MRI)	Relative wall thickness (RWT) rendah → mortalitas & readmisi HF lebih tinggi; temuan mendukung penggunaan C-MRI untuk karakterisasi remodeling/viabilitas ke depan.
(Sheikh et al., 2024)	Potong- lintang komparat if	Iran	30 pasien <i>DILATED CARDIOMYOPAT HY</i>	3D-Echo (HeartModel AI) vs C-MRI	C-MRI tetap standar rujukan; korelasi kuat, namun 3D-AI cenderung under/over- estimate—implikasi prognosis: penilaian volume/EF berbasis C-MRI paling akurat untuk stratifikasi risiko.

Penulis , Tahun	Desain Studi	Negara	Populasi	Metode Penelitian	Hasil Utama
(Chatzantonis et al., 2021)	Multisenter (perbandingan dengan EMB)	Jerman	160 pasien dicurigai CA	LVH C-MRI + T1/ECV biopsi	Walau fokus diagnostik, temuan LGE/T1/ECV yang akurat memetakan amiloid—penstratifikasian risiko & jalur terapi; sensitivitas 95%, spesifisitas 98% untuk CA.

Peran Cardiovascular Magnetic Resonance (C-MRI) Dalam Diagnosis Kardiomiopati

C-MRI memiliki peran sebagai modalitas pencitraan non-invasif yang mampu menggambarkan anatomi, fungsi, dan karakteristik jaringan jantung dengan presisi. Berdasarkan hasil tinjauan terhadap sebelas studi yang diinklusi didapatkan hasil bahwa C-MRI terbukti dapat mengidentifikasi berbagai tipe kardiomiopati melalui pendekatan multiparametrik yang mencakup Late Gadolinium Enhancement (LGE), T1/T2 mapping, Extracellular Volume (ECV), dan analisis strain miokard (Raphael et al., 2021; Yang et al., 2025).

C-MRI pada kardiomiopati infiltratif seperti amyloidosis menunjukkan kemampuan diagnostik hampir setara dengan biopsi endomiokardial. Studi oleh Chatzantonis et al., (2021) melaporkan sensitivitas 95% dan spesifisitas 98% dibandingkan hasil histopatologi dengan pola LGE global subendokardial dan nilai ECV tinggi sebagai ciri khas. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Clerc et al., (2024) yang menyatakan bahwa kombinasi ECV dan global longitudinal strain (GLS) dapat membedakan AL dan ATTR amyloidosis serta memprediksi risiko MACE.

Pada kardiomiopati inflamasi (miokarditis) Bernhard et al., (2023) menyatakan bahwa pemeriksaan C-MRI dapat mendeteksi keterlibatan ventrikel kanan dan derajat fibrosis yang tidak tampak pada echocardiography. Penurunan RVEF dan RV-GLS berperan sebagai indikator awal keparahan penyakit dan prognosis buruk (Bernhard et al., 2023). Sedangkan pada peripartum cardiomyopathy (PPCM), Liang et al. (2020) menjelaskan bahwa peningkatan ECV dan nilai native T1 menjadi indikator keterlibatan difus miokard dan berhubungan dengan kegagalan pemulihan fungsi ventrikel kiri (Liang et al., 2020).

C-MRI jika dibandingkan dengan ekokardiografi dan CT dapat memberikan informasi jaringan miokard yang lebih lengkap sehingga mampu menegaskan diagnosis etiologi kardiomiopati secara spesifik, bahkan pada fase subklinis (Stankowski et al., 2023; Yang et al., 2025).

Kontribusi Parameter C-MRI (LGE, T1/T2 Mapping, ECV) Dalam Menentukan Prognosis Kardiomiopati

Mayoritas studi dalam tinjauan ini menjelaskan bahwa parameter kuantitatif C-MRI memiliki nilai prognostik independen terhadap kejadian kardiovaskular mayor (Major Adverse Cardiac Events/MACE) dan kematian jantung mendadak (Sudden Cardiac Death/SCD).

Fibrosis fokal yang diukur dengan LGE merupakan prediktor paling konsisten terhadap mortalitas dan risiko aritmia ventrikular. Studi Hammersley et al., (2024) menemukan bahwa beban LGE >15% massa ventrikel kiri secara signifikan meningkatkan risiko SCD pada pasien dilated cardiomyopathy dengan Mildly Reduced Ejection Fraction (mrEF). Fibrosis

diffus yang dinilai dengan T1 mapping dan ECV juga memberikan makna prognostik kuat. Penelitian oleh Clerc et al., (2024) dan Liang et al., (2020) menunjukkan bahwa peningkatan ECV berkorelasi dengan mortalitas dan kegagalan pemulihan LV. Selain itu, (Nakamori et al., 2020) ditemukan sebagai biomarker baru untuk memprediksi aritmia ventrikular pada kardiomiopati non-iskemik (Hammersley et al., 2024; Liang et al., 2020).

Strain miokard (GLS dan 4D strain) memperkuat nilai prognostik fungsional. Earl et al., (2025) melaporkan bahwa parameter 4D strain terutama late diastolic strain rate dapat memprediksi progresi dini kardiomiopati pada pasien Duchenne Muscular Dystrophy (DMD) meskipun belum terjadi penurunan LVEF (Earl et al., 2025).

Penelitian-penelitian ini mengonfirmasi bahwa parameter multiparametrik C-MRI bukan hanya alat diagnostik tetapi juga instrumen prediksi jangka panjang terhadap luaran klinis pasien kardiomiopati.

Perbandingan Keunggulan Dan Keterbatasan C-MRI Dengan Modalitas Pencitraan Lain

Beberapa penelitian dalam konteks diagnostik dan prognostik yang dibahas dalam penelitian ini membandingkan secara langsung C-MRI dengan pemeriksaan histopatologis (biopsi endomiokardial) dan modalitas pencitraan lain. Penelitian oleh Chatzantonis et al. (2021) menunjukkan bahwa C-MRI memiliki akurasi diagnostik yang hampir setara dengan biopsi pada cardiac amyloidosis tetapi jauh lebih aman karena tidak invasif. Penelitian lain oleh Han et al. (2021) melaporkan bahwa T2 mapping C-MRI memiliki AUC 0,92 untuk mendeteksi rejeksi jantung pasca-transplantasi lebih tinggi dibanding biopsi konvensional (Han et al., 2021). Penelitian Liu et al. (2020) juga menjelaskan bahwa nilai ECV dari C-MRI berkorelasi signifikan dengan collagen volume fraction (CVF) hasil biopsi meskipun biopsi cenderung underestimasi karena bersifat lokal (Liu et al., 2020a).

Studi Utilization and Impact of C-MRI Roifman et al. (2022) membuktikan bahwa 49% pasien gagal jantung mengalami perubahan diagnosis atau terapi setelah C-MRI dilakukan, angka yang jauh lebih tinggi dibandingkan bila hanya menggunakan ekokardiografi. Dengan begitu, C-MRI dinilai sebagai modalitas paling komprehensif dalam menilai struktur, fungsi, dan karakter jaringan, meskipun masih memiliki keterbatasan seperti durasi pemeriksaan lama, biaya tinggi, serta perbedaan standar nilai T1/ECV antar vendor (Roifman et al., 2022).

Implikasi Klinis dan Nilai Prognostik C-MRI terhadap Manajemen Kardiomiopati

Hasil kajian literatur pada penelitian ini menunjukkan bahwa temuan C-MRI memiliki dampak klinis terhadap pengambilan keputusan terapeutik dan stratifikasi risiko pasien kardiomiopati. Penelitian oleh Roifman et al., (2022) menyatakan bahwa hasil C-MRI mengubah diagnosis atau rencana terapi pada hampir setengah populasi pasien terutama dalam menentukan apakah pasien perlu menjalani terapi invasif, ICD, atau hanya perawatan konservatif. Selain itu, penggunaan C-MRI serial (follow-up) seperti pada penelitian Clerc et al., 2025 memperlihatkan bahwa perubahan nilai ECV dari baseline dapat digunakan sebagai indikator respon terapi terhadap penyakit infiltratif (amyloidosis) (Clerc et al., 2024; Roifman et al., 2022).

Dengan kemampuan penilaian jaringan secara komprehensif menjadikan C-MRI memiliki nilai tambah dalam monitoring jangka panjang sehingga dapat membantu dokter menentukan prognosis serta rencana manajemen personal berbasis data objektif.

Sintesis

Dari seluruh studi yang diinklusi, dapat disimpulkan bahwa:

- C-MRI adalah modalitas paling komprehensif untuk diagnosis dan penilaian prognosis kardiomiopati
- LGE, T1/ECV, dan strain merupakan parameter utama yang terbukti berhubungan dengan mortalitas, MACE, dan progresi penyakit

- Dibandingkan biopsi, C-MRI memiliki keunggulan non-invasif dengan akurasi setara, serta mampu menilai keseluruhan jaringan miokard
- Hasil C-MRI terbukti mengubah manajemen klinis pasien dan berkontribusi langsung pada peningkatan luaran jangka panjang

Pembahasan

Cardiac Magnetic Resonance Imaging (C-MRI) merupakan modalitas pencitraan non-invasif yang memiliki kemampuan unggul untuk menilai anatomi, fungsi, perfusi, serta karakteristik jaringan jantung secara komprehensif. Keunggulan utama C-MRI dibandingkan modalitas pencitraan lain seperti ekokardiografi atau CT-scan adalah kemampuannya untuk mendeteksi perubahan jaringan miokard baik secara fokal maupun difus melalui parameter seperti Late Gadolinium Enhancement (LGE), T1/T2 mapping, dan Extracellular Volume (ECV). Secara teori, LGE mencerminkan keberadaan fibrosis atau nekrosis miokard yang bersifat ireversibel sedangkan T1/ECV menunjukkan ekspansi ruang ekstraseluler akibat fibrosis difus atau infiltrasi protein patologis dan T2 menjadi indikator edema serta inflamasi aktif. Kombinasi dari ketiga parameter ini memungkinkan deteksi dini perubahan mikroskopik pada miokard yang tidak dapat diidentifikasi melalui pemeriksaan lain (Han et al., 2021; Liang et al., 2020; Liu et al., 2020b; Nakamori et al., 2020; Roifman et al., 2022).

Hasil penelitian dari berbagai artikel yang diinklusi dalam penelitian ini memperkuat peran C-MRI dalam diagnosis berbagai bentuk kardiomiopati. Pada Hypertrophic Cardiomyopathy, Sakamoto et al. (2023) menunjukkan bahwa beban LGE lebih dari 15% massa ventrikel kiri dan peningkatan nilai T1 memiliki hubungan signifikan dengan risiko sudden cardiac death (SCD) menandakan nilai diagnostik sekaligus prognostik C-MRI. Temuan serupa pada Dilated Cardiomyopathy oleh Mor-Avi et al. (2021) memperlihatkan bahwa global longitudinal strain (GLS) yang diukur dengan feature tracking C-MRI berkorelasi kuat dengan mortalitas dan angka rawat inap gagal jantung independen dari LVEF. Sedangkan pada Cardiac Amyloidosis (CA), Chatzantonis et al. (2021) menjelaskan bahwa kombinasi T1 dan ECV dapat membedakan antara amyloidosis tipe AL dan ATTR dengan sensitivitas 95% dan spesifisitas 98% dibanding biopsi endomiokardial yang selama ini dianggap sebagai standar emas diagnostik.

Penelitian oleh Bernhard et al. (2023) menjelaskan bahwa disfungsi ventrikel kanan terutama penurunan RVEF dan RV-GLS yang merupakan prediktor independen terhadap kejadian kardiovaskular mayor ditemukan pada pasien dengan myocarditis (Bernhard et al., 2023). Selain itu, Liang et al. (2020) menjelaskan bahwa peningkatan ECV pada Peripartum Cardiomyopathy (PPCM) berkorelasi dengan kegagalan pemulihan fungsi ventrikel kiri sedangkan Bergamaschi et al. (2024) menunjukkan bahwa LGE dan nilai T2 tinggi pada Myocardial Infarction with Nonobstructive Coronary Arteries (MINOCA) berkaitan erat dengan kejadian Major Adverse Cardiac Events (MACE). Secara keseluruhan, bukti ini memperlihatkan bahwa C-MRI dapat membedakan etiologi kardiomiopati dengan presisi sejalan dengan nilai prediktif yang kuat terhadap prognosis klinis (Bergamaschi et al., 2024; Liang et al., 2020).

Beberapa penelitian juga memperkuat bukti ilmiah ini. Han et al. (2021) dalam meta-analisis pasien pasca-transplantasi jantung menyatakan bahwa T2 mapping memiliki akurasi tertinggi (AUC 0,92) dalam mendeteksi episode penolakan. Hal ini menunjukkan kemampuan parameter C-MRI dalam menilai aktivitas inflamasi miokard secara non-invasif (Han et al., 2021). Penelitian lain oleh Subbaraman et al. (2021) menjelaskan bahwa pada Takotsubo cardiomyopathy, C-MRI menunjukkan gambaran khas berupa apical ballooning tanpa adanya LGE yang membedakannya dari iskemia atau miokarditis dan menandakan prognosis yang baik.

Pada pemeriksaan Hypertrophic Cardiomyopathy, penelitian oleh Raphael et al. (2021) menjelaskan bahwa LGE dan peningkatan LVESVI merupakan prediktor kuat gagal jantung

sehingga memperkuat pendapat alasan penggunaan C-MRI dalam evaluasi struktur dan fungsi jantung. Clerc et al. (2025) juga menunjukkan bahwa kombinasi ECV dan GLS berfungsi sebagai penanda prognostik yang kuat dalam AL amyloidosis yang keakuratannya dinilai lebih dibandingkan skor klinis Mayo yang konvensional (Clerc et al., 2024; Subbaraman et al., 2021).

Dari segi prognostik, seluruh parameter C-MRI terbukti memiliki kontribusi yang bermakna. Hammersley et al. (2024) membuktikan bahwa LGE dan GLS merupakan prediktor independen terhadap risiko heart failure dan sudden cardiac death pada pasien Dilated Cardiomyopathy dengan LVEF menengah. Penelitian lain oleh Liang et al. (2020) menemukan bahwa ECV yang tinggi memprediksi kegagalan pemulihan fungsi ventrikel kiri pada PPCM sedangkan Clerc et al. (2025) menunjukkan bahwa perubahan ECV serial dapat menjadi biomarker dinamis untuk menilai keberhasilan terapi pada amyloidosis. Earl et al. (2025) pada pasien Duchenne Muscular Dystrophy (DMD) melaporkan bahwa regional 4D strain khususnya late diastolic strain rate yang mampu memprediksi progresi dini kardiomiopati bahkan sebelum penurunan LVEF terjadi. Bukti ini memperlihatkan bahwa C-MRI bukan hanya mendeteksi kelainan struktural tetapi juga berfungsi sebagai alat prediksi yang kuat terhadap luaran klinis (Clerc et al., 2024; Earl et al., 2025; Hammersley et al., 2024; Liang et al., 2020).

C-MRI jika dibandingkan dengan modalitas lain dinilai lebih baik dalam penilaian akurasi diagnostik dan kemampuan menilai jaringan secara menyeluruh. Hal ini didukung oleh penelitian Chatzantonis et al. (2021) yang menunjukkan bahwa C-MRI mampu menggantikan biopsi endomiokardial pada amyloidosis dengan sensitivitas 95% dan spesifisitas 98%, sehingga mengurangi risiko komplikasi dari tindakan invasif. Penelitian lain oleh Han et al. (2021) menunjukkan bahwa T2 mapping memiliki spesifisitas lebih tinggi dibanding biopsi dalam mendeteksi inflamasi aktif sedangkan penelitian Sheikh et al. (2024) menemukan bahwa meskipun teknologi 3D-Echo AI dan C-MRI menunjukkan korelasi baik, C-MRI tetap menjadi gold standard untuk pengukuran volume ventrikel dan fraksi ejeksi yang akurat. Selain itu, Subbaraman et al. (2021) juga menjelaskan bahwa hanya C-MRI yang dapat memastikan tidak adanya fibrosis ireversibel pada Takotsubo cardiomyopathy yang menjadi faktor penting untuk memprediksi pemulihan sempurna dalam beberapa bulan.

Secara umum, keunggulan C-MRI terletak pada kemampuannya memberikan gambaran menyeluruh dan kuantitatif tentang kondisi miokard meskipun terdapat beberapa keterbatasan seperti waktu pemeriksaan yang relatif panjang, biaya tinggi, dan perbedaan standar nilai T1/ECV antar vendor. Dari seluruh hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa C-MRI multiparametrik memiliki peran yang sangat besar dalam diagnosis dan prognosis kardiomiopati berbagai etiologi. Parameter seperti LGE, T1/T2 mapping, ECV, dan strain memberikan informasi mengenai derajat fibrosis, aktivitas inflamasi, serta potensi pemulihan fungsi jantung. C-MRI memberikan gambaran global yang non-invasif dengan akurasi yang setara dengan biopsi. Sedangkan C-MRI jika dibandingkan dengan echocardiography, memiliki keunggulan dalam karakterisasi jaringan dan prediksi luaran jangka panjang (Liang et al., 2020; Nakamori et al., 2020; Roifman et al., 2022). Penelitian lain oleh Roifman et al. (2022) melaporkan bahwa hasil C-MRI mengubah diagnosis dan manajemen klinis hampir separuh pasien gagal jantung dan kardiomiopati, menegaskan dampak langsung pemeriksaan ini terhadap praktik klinik.

Dengan penjelasan diatas, C-MRI dalam penelitian ini disimpulkan menjadi modalitas utama yang tidak hanya digunakan untuk menegakkan diagnosis tetapi juga menjadi alat penting dalam stratifikasi risiko, pemantauan respons terapi, dan prediksi prognosis pada seluruh spektrum kardiomiopati. Kombinasi parameter multiparametrik berbasis jaringan menjadikan C-MRI sebagai sarana penting menuju pengelolaan kardiomiopati yang lebih personal, akurat, dan berbasis bukti ilmiah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dari tinjauan sistematis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pencitraan Resonansi Magnetik Kardiovaskular (Cardiac Magnetic Resonance Imaging/C-MRI) merupakan modalitas diagnostik yang paling komprehensif dalam menilai struktur, fungsi, serta karakteristik jaringan jantung pada pasien dengan kardiomiopati. C-MRI mampu mendeteksi fibrosis, edema, dan infiltrasi miokard dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan modalitas pencitraan lain seperti ekokardiografi atau CT jantung. Selain itu, C-MRI dapat membedakan berbagai sub tipe kardiomiopati (hipertrofik, dilatasi, inflamasi, dan infiltratif) secara non-invasif dengan sensitivitas dan spesifisitas yang tinggi.
2. Parameter multiparametrik C-MRI seperti Late Gadolinium Enhancement (LGE), T1/T2 mapping, Extracellular Volume (ECV), dan Global Longitudinal Strain (GLS) memiliki nilai prognostik yang signifikan dalam memprediksi kejadian jantung mayor (Major Adverse Cardiac Events/MACE), gagal jantung, serta risiko sudden cardiac death (SCD) pada berbagai jenis kardiomiopati. LGE berhubungan dengan beban fibrosis fokal dan risiko aritmia sedangkan T1/ECV menggambarkan fibrosis difus yang berkorelasi dengan mortalitas. T2 mapping dan strain berperan dalam menilai inflamasi aktif serta progresi penyakit lebih awal sebelum penurunan fungsi ventrikel terjadi.
3. Perbandingan C-MRI dengan modalitas lain dan pemeriksaan invasif menunjukkan bahwa C-MRI memiliki akurasi diagnostik setara bahkan melebihi biopsi endomiokardial dengan sensitivitas hingga 95% dan spesifisitas 98% pada kasus amyloidosis serta lebih superior dibanding ekokardiografi dalam menilai jaringan miokard dan fungsi ventrikel. Keunggulan ini menjadikan C-MRI sebagai gold standard dalam karakterisasi miokard yang mampu menggambarkan kondisi secara global dan kuantitatif tanpa risiko invasif.
4. Integrasi teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam analisis data C-MRI dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, dan konsistensi interpretasi hasil. Tetapi C-MRI konvensional tetap menjadi standar utama (gold standard) dalam evaluasi miokard.

Kesimpulan penelitian ini secara keseluruhan menyampaikan bahwa C-MRI berperan penting tidak hanya sebagai alat diagnostik tetapi juga sebagai alat stratifikasi risiko dan pemantauan terapi yang dapat mendukung penerapan personalized medicine dalam manajemen pasien dengan berbagai jenis kardiomiopati.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat diajukan adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan penelitian lanjutan dengan desain prospektif multicenter dan jumlah sampel yang lebih besar untuk menilai nilai prognostik jangka panjang dari parameter C-MRI pada berbagai sub tipe kardiomiopati. Penelitian ini diharapkan dapat memperkuat bukti antara temuan C-MRI dengan luaran klinis pasien
2. Perlu dilakukan standarisasi global terhadap parameter kuantitatif C-MRI khususnya nilai referensi T1/T2 mapping dan Extracellular Volume (ECV) agar hasil antar-institusi dapat dibandingkan secara konsisten
3. Diperlukan pengembangan dan validasi lebih lanjut terhadap algoritma kecerdasan buatan (AI) untuk interpretasi otomatis C-MRI.
4. Bagi praktisi klinik dan institusi kesehatan, disarankan agar C-MRI dimasukkan sebagai bagian integral dalam algoritma diagnostik dan penilaian prognosis pasien dengan kardiomiopati.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan kebijakan dan praktik klinis berbasis bukti yang menempatkan C-MRI sebagai modalitas utama dalam

evaluasi diagnostik dan prognostik kardiomiopati serta mendorong penerapan pemeriksaan ini secara luas dalam praktik kardiologi modern.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhyapak, S. M., Parachuri, V. R., Thomas, T., & Varghese, K. (2021). Left ventricular function and survival in ischemic cardiomyopathy: Implications for surgical ventricular restoration. *JTCVS Open*, 7, 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.xjon.2021.03.001>
- Ali, L. A., Marrone, C., Martins, D. S., Khraiche, D., Festa, P., Martini, N., Santoro, G., Todiere, G., Panaioli, E., Bonnet, D., Boddaert, N., Aquaro, G. D., & Raimondi, F. (2022). Prognostic factors in hypertrophic cardiomyopathy in children: An MRI based study. *International Journal of Cardiology*, 364, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2022.06.043>
- Bergamaschi, L., Foà, A., Paolisso, P., Renzulli, M., Angeli, F., Fabrizio, M., Bartoli, L., Armillotta, M., Sansonetti, A., Amicone, S., Stefanizzi, A., Rinaldi, A., Niro, F., Lovato, L., Gherbesi, E., Carugo, S., Pasquale, F., Casella, G., Galiè, N., ... Pizzi, C. (2024). Prognostic Role of Early Cardiac Magnetic Resonance in Myocardial Infarction With Nonobstructive Coronary Arteries. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 17(2), 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2023.05.016>
- Bernhard, B., Schnyder, A., Garachemani, D., Fischer, K., Tanner, G., Safarkhanlo, Y., Stark, A. W., Schütze, J., Pavlicek-Bahlo, M., Greulich, S., Johner, C., Wahl, A., Benz, D. C., Kwong, R. Y., & Gräni, C. (2023). Prognostic Value of Right Ventricular Function in Patients With Suspected Myocarditis Undergoing Cardiac Magnetic Resonance. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 16(1), 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2022.08.011>
- Braunwald, E. (2017). Cardiomyopathies: An overview. In *Circulation Research* (Vol. 121, Issue 7, pp. 711–721). Lippincott Williams and Wilkins. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.117.311812>
- Chatzantonis, G., Bietenbeck, M., Elsanhoury, A., Tschöpe, C., Pieske, B., Tauscher, G., Vietheer, J., Shomanova, Z., Mahrholdt, H., Rolf, A., Kelle, S., & Yilmaz, A. (2021). Diagnostic value of cardiovascular magnetic resonance in comparison to endomyocardial biopsy in cardiac amyloidosis: a multi-centre study. *Clinical Research in Cardiology*, 110(4), 555–568. <https://doi.org/10.1007/s00392-020-01771-1>
- Cheng, T. (2023). Understanding the Pathogenesis of Cardiomyopathy. *Journal of Clinical & Experimental Cardiology*, 14(03). <https://doi.org/10.35248/2155-9880.23.14.781>
- Ciarambino, T., Menna, G., Sansone, G., & Giordano, M. (2021). Cardiomyopathies: An overview. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 22, Issue 14). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijms22147722>
- Clerc, O. F., Cuddy, S. A. M., Jerosch-Herold, M., Benz, D. C., Katznelson, E., Canseco Neri, J., Taylor, A., Kijewski, M. F., Bianchi, G., Ruberg, F. L., Di Carli, M. F., Liao, R., Kwong, R. Y., Falk, R. H., & Dorbala, S. (2024). Myocardial Characteristics, Cardiac Structure, and Cardiac Function in Systemic Light-Chain Amyloidosis. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 17(11), 1271–1286. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2024.05.004>
- Earl, C. C., Jauregui, A. M., Prado, M. A., Lin, G., Hor, K. N., Markham, L. W., Soslow, J. H., & Goergen, C. J. (2025). Regional 4D Cardiac Magnetic Resonance Strain Predicts Cardiomyopathy Progression in Duchenne Muscular Dystrophy. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 101950. <https://doi.org/10.1016/j.jocmr.2025.101950>
- Fortuny, E., Fernandez-Golfin, C., Viliani, D., & Zamorano, J. L. (2012). Multimodality imaging in pericardial diseases. In *Journal of Cardiovascular Echography* (Vol. 22, Issue 1, pp. 1–10). Medknow Publications. <https://doi.org/10.1016/j.jcecho.2011.09.004>
- Ge, Y., Antiochos, P., Steel, K., Bingham, S., Abdullah, S., Chen, Y. Y., Mikolich, J. R., Arai, A. E., Bandettini, W. P., Shanbhag, S. M., Patel, A. R., Farzaneh-Far, A., Heitner, J. F., Shenoy, C., Leung, S. W., Gonzalez, J. A., Shah, D. J., Raman, S. V., Ferrari, V. A., ... Kwong, R. Y. (2020). Prognostic Value of Stress CMR Perfusion Imaging in Patients With Reduced Left Ventricular Function. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 13(10), 2132–2145. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2020.05.034>
- Groeneweg, J. A., van Dalen, B. M., Cox, M. P. G. J., Heymans, S., Braam, R. L., Michels, M., & Asselbergs, F. W. (2025). 2023 European Society of Cardiology guidelines on the management

- of cardiomyopathies: Statement of endorsement by the NVVC. *Netherlands Heart Journal*, 33(5), 148–156. <https://doi.org/10.1007/s12471-025-01955-2>
- Hammersley, D. J., Mukhopadhyay, S., Chen, X., Jones, R. E., Ragavan, A., Javed, S., Rajabali, H., Androulakis, E., Curran, L., Mach, L., Khalique, Z., Baruah, R., Guha, K., Gregson, J., Zhao, S., De Marvao, A., Tayal, U., Lota, A. S., Ware, J. S., ... Halliday, B. P. (2024). Precision prediction of heart failure events in patients with dilated cardiomyopathy and mildly reduced ejection fraction using multi-parametric cardiovascular magnetic resonance. *European Journal of Heart Failure*, 26(12), 2553–2562. <https://doi.org/10.1002/ejhf.3425>
- Han, D., Miller, R. J. H., Otaki, Y., Gransar, H., Kransdorf, E., Hamilton, M., Kittelson, M., Patel, J., Kobashigawa, J. A., Thomson, L., Berman, D., & Tamarappoo, B. (2021). Diagnostic Accuracy of Cardiovascular Magnetic Resonance for Cardiac Transplant Rejection: A Meta-Analysis. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 14(12), 2337–2349. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2021.05.008>
- Huang, S., Li, J., Li, Q., Wang, Q., Zhou, X., Chen, J., Chen, X., Bellou, A., Zhuang, J., & Lei, L. (2024). Cardiomyopathy: pathogenesis and therapeutic interventions. In *MedComm* (Vol. 5, Issue 11). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/mco2.772>
- Hussien, M., Bermudez, F., Bering, P. T., Weissman, G., Hays, A. G., & Sheikh, F. H. (2025). Cardiac Magnetic Resonance Imaging in the Evaluation and Prognosis of Infiltrative Cardiomyopathies. In *Journal of Cardiovascular Development and Disease* (Vol. 12, Issue 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcdd12040154>
- Laksono, S., & Azahra, H. (2022). Diagnosis and Management of Dilated Cardiomyopathy: a Systematic Review. *Smart Medical Journal*, 4(3), 154. <https://doi.org/10.13057/smj.v4i3.55123>
- Liang, Y. D., Xu, Y. W., Li, W. H., Wan, K., Sun, J. Y., Lin, J. Y., Zhang, Q., Zhou, X. Y., & Chen, Y. C. (2020). Left ventricular function recovery in peripartum cardiomyopathy: A cardiovascular magnetic resonance study by myocardial T1 and T2 mapping. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12968-019-0590-z>
- Liu, B., Neil, D. A. H., Premchand, M., Bhabra, M., Patel, R., Barker, T., Nikolaidis, N., Billing, J. S., Treibel, T. A., Moon, J. C., González, A., Hodson, J., Edwards, N. C., & Steeds, R. P. (2020a). Myocardial fibrosis in asymptomatic and symptomatic chronic severe primary mitral regurgitation and relationship to tissue characterisation and left ventricular function on cardiovascular magnetic resonance. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12968-020-00674-4>
- Liu, B., Neil, D. A. H., Premchand, M., Bhabra, M., Patel, R., Barker, T., Nikolaidis, N., Billing, J. S., Treibel, T. A., Moon, J. C., González, A., Hodson, J., Edwards, N. C., & Steeds, R. P. (2020b). Myocardial fibrosis in asymptomatic and symptomatic chronic severe primary mitral regurgitation and relationship to tissue characterisation and left ventricular function on cardiovascular magnetic resonance. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12968-020-00674-4>
- Maron, B. J., Desai, M. Y., Nishimura, R. A., Spirito, P., Rakowski, H., Towbin, J. A., Rowin, E. J., Maron, M. S., & Sherrid, M. V. (2022). Diagnosis and Evaluation of Hypertrophic Cardiomyopathy: JACC State-of-the-Art Review. In *Journal of the American College of Cardiology* (Vol. 79, Issue 4, pp. 372–389). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2021.12.002>
- Mensah, G. A., Fuster, V., Murray, C. J. L., Roth, G. A., Mensah, G. A., Abate, Y. H., Abbasian, M., Abd-Allah, F., Abdollahi, A., Abdollahi, M., Abdulah, D. M., Abdullahi, A., Abebe, A. M., Abedi, A., Abedi, A., Abiodun, O. O., Ali, H. A., Abu-Gharbieh, E., Abu-Rmeileh, N. M. E., ... Roth, G. A. (2023). Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risks, 1990–2022. *Journal of the American College of Cardiology*, 82(25), 2350–2473. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2023.11.007>
- Nakamori, S., Ngo, L. H., Rodriguez, J., Neisius, U., Manning, W. J., & Nezafat, R. (2020). T1 Mapping Tissue Heterogeneity Provides Improved Risk Stratification for ICDs Without Needing Gadolinium in Patients With Dilated Cardiomyopathy. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 13(9), 1917–1930. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2020.03.014>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M.,

- Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Raphael, C. E., Mitchell, F., Kanaganayagam, G. S., Liew, A. C., Di Pietro, E., Vieira, M. S., Kanapeckaitė, L., Newsome, S., Gregson, J., Owen, R., Hsu, L. Y., Vassiliou, V., Cooper, R., Mrcp, A. A., Ismail, T. F., Wong, B., Sun, K., Gatehouse, P., Firmin, D., ... Prasad, S. K. (2021). Cardiovascular magnetic resonance predictors of heart failure in hypertrophic cardiomyopathy: the role of myocardial replacement fibrosis and the microcirculation. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12968-021-00720-9>
- Roifman, I., Hammer, M., Sparkes, J., Dall'Armellina, E., Kwong, R. Y., & Wright, G. (2022). Utilization and impact of cardiovascular magnetic resonance on patient management in heart failure: insights from the SCMR Registry. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12968-022-00890-0>
- Setti, M., De Luca, A., Paldino, A., Del Mestre, E., Bassetto, G., Perotto, M., Radesich, C., Merro, E., Rossi, M., Girotto, G., Gigli, M., Dal Ferro, M., Benfari, G., Ribichini, F. L., Merlo, M., & Sinagra, G. (2025). Fenotypic expressions and clinical manifestations of arrhythmogenic cardiomyopathy. *European Heart Journal, Supplement*, 27(Supplement_3), iii143–iii149. <https://doi.org/10.1093/eurheartjsupp/suaf033>
- Sheikh, M., Fallah, S. A., Moradi, M., Jalali, A., Vakili-Basir, A., Sahebjam, M., Ashraf, H., & Zoroufian, A. (2024). Comparing HeartModelAI and cardiac magnetic resonance imaging for left ventricular volume and function evaluation in patients with dilated cardiomyopathy. *BMC Cardiovascular Disorders*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12872-024-04355-3>
- Stankowski, K., Figliozzi, S., Lisi, C., Catapano, F., Panico, C., Cannata, F., Mantovani, R., Frontera, A., Bragato, R. M., Stefanini, G., Monti, L., Condorelli, G., & Franccone, M. (2023). Solving the Riddle of Sudden Cardiac Death in Hypertrophic Cardiomyopathy: The Added Role of Cardiac Magnetic Resonance. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/jcdd10060226>
- Subbaraman, S., Rajan, S. C., Veeraiyan, S., & Natarajan, P. (2021). Takotsubo cardiomyopathy: Role of cardiac MRI. *Journal of Radiology Case Reports*, 15(6), 26–32. <https://doi.org/10.3941/jrcr.v15i6.4138>
- Yang, K., Cui, C., Teng, F., Yin, G., An, J., Yang, X., Li, J., Bi, X., Pang, J., Chow, K., Zhao, S., & Lu, M. (2025). Full Free-Breathing Cardiac MRI: Enhancing Efficiency and Image Quality in Clinical Practice. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 101955. <https://doi.org/10.1016/j.jocmr.2025.101955>
- Yeantesa, P., & Karani, Y. (2018). Etiologi dan Patofisiologi Kardiomiopati Dilatasi. In *Jurnal Kesehatan Andalas* (Vol. 7). <http://jurnal.fk.unand.ac.id>.