

Akurasi Diagnostik Radiomik CT Koroner Dibandingkan Fractional Flow Reserve (FFR) untuk Mengidentifikasi Stenosis Koroner Signifikan Secara Fungsional: Suatu Meta-Analisis

Qais Maulana Gusti¹, Shafira Nova Apsari², Ghitanisa Azzahra³

Fakultas Kedokteran Militer Universitas Pertahanan RI, Bogor, Indonesia

Corresponding Author E-mail: qaismaulana069@gmail.com

Published: January, 2026

ABSTRAK

Penyakit arteri koroner (CAD) merupakan penyebab utama morbiditas dan mortalitas kardiovaskular global, memerlukan penilaian non-invasif akurat stenosis koroner signifikan fungsional melebihi keterbatasan CCTA konvensional. Systematic review dan meta-analisis diagnostik (SRMA) mengikuti pedoman PRISMA-DTA ini bertujuan mengevaluasi akurasi diagnostik radiomik CT koroner dibandingkan fractional flow reserve (FFR). Populasi pasien dewasa CAD dari studi PubMed, Scopus, dan Embase hingga 2025; 18 studi (dari 527 rekaman awal, 60-400 pasien per studi dari Tiongkok, Jepang, AS) diinklusi pasca screening. Instrumen mencakup formulir ekstraksi data standar dan penilaian kualitas QUADAS-2; analisis menggunakan model efek acak untuk sensitivitas pooled (86%), spesifisitas (84%), AUC (0.91), uji heterogenitas I^2 , analisis subkelompok (model AI, CT 256-slice), dan Deeks' Funnel Plot ($p=0.21$). Hasil menunjukkan performa radiomik tinggi, unggul pada analisis lesi berbasis AI. Kesimpulannya, radiomik CT koroner berpotensi skrining non-invasif kuat, mengurangi ketergantungan FFR invasif, meski standarisasi multisenter diperlukan.

Kata Kunci: Stenosis Koroner, Radiomik CT, Akurasi Diagnostik, Cadangan Aliran Fraksional, Meta-Analisis

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Penyakit arteri koroner (CAD) merupakan salah satu penyebab utama morbiditas dan mortalitas kardiovaskular global dengan tren peningkatan kasus yang signifikan dalam dekade terakhir, terutama di negara berkembang dan maju (Susanti et al., 2025). Data statistik menunjukkan peningkatan insiden CAD sebesar 15% dalam lima tahun terakhir, dengan konsekuensi ekonomi dan sosial yang besar akibat komplikasi seperti infark miokard (De Maria et al., 2020). Pentingnya penilaian stenosis koroner yang signifikan secara fungsional menjadi isu global yang mendesak untuk menentukan strategi terapi yang optimal dan personalisasi pengobatan. Teori besar yang menjadi dasar adalah teori hemodinamika dan perfusi jantung yang menjelaskan hubungan antara derajat stenosis dan gangguan aliran darah (Sandoval et al., 2025).

Evolusi pemikiran teoretis dalam diagnostik CAD berkembang dari analisis struktural menggunakan angiografi konvensional menuju teknik non-invasif dengan kemampuan fungsional seperti fractional flow reserve (FFR), yang kini dianggap standar emas dalam menilai hambatan aliran darah secara langsung (Cheng et al., 2021). Namun, FFR invasif memiliki keterbatasan seperti risiko komplikasi dan biaya tinggi, sehingga mendorong pengembangan teknologi alternatif seperti computed tomography coronary angiography (CCTA) dan radiomik CT koroner (Serruys et al., 2023).

Radiomik CT koroner mengekstraksi fitur lanjutan dari citra CT yang mampu menilai jaringan adiposa peri-koroner dan karakteristik plak secara detail, sehingga dianggap memiliki potensi besar dalam mendeteksi lesi hemodinamik yang signifikan (Xu et al., 2024). Beberapa studi menunjukkan

radiomik memiliki sensitivitas dan spesifisitas yang menjanjikan, namun hasil bervariasi karena perbedaan metodologi dan teknologi CT yang digunakan (Yun et al., 2021). Oleh karena itu, meta-analisis sistematis diperlukan untuk mengevaluasi akurasi diagnostik radiomik dibandingkan FFR sebagai pembanding referensi (Peters et al., 2024).

Permasalahan utama yang diangkat adalah ketidakpastian diagnostik dalam deteksi stenosis signifikan menggunakan metode non-invasif, yang berimplikasi pada keputusan terapi. Urgensi penelitian ini didorong oleh kebutuhan klinis untuk metode yang akurat, efisien, serta minim risiko invasif (Min et al., 2021). Selain itu, terdapat kesenjangan penelitian terkait standarisasi protokol radiomik dan validasi multisenter yang masih minim dalam literatur saat ini (Li et al., 2024).

Konsep penelitian ini relevan secara khusus dalam konteks pelayanan kesehatan kardiovaskular di berbagai lokasi dengan keterbatasan fasilitas invasif, seperti di Indonesia dan negara-negara berkembang lainnya, sehingga potensi implementasi radiomik sebagai alat skrining non-invasif sangat penting (Guo et al., 2024). Karakteristik khusus populasi CAD di Asia dengan prevalensi faktor risiko berbeda juga menimbulkan kebutuhan riset spesifik yang mendukung generalisasi aplikasi teknologi ini.

Penelitian ini bermaksud mengisi research gap dalam pemetaan akurasi diagnostik radiomik CT, khususnya dalam konteks perbandingan langsung dengan FFR invasif, sekaligus mengevaluasi variabilitas hasil terkait metode ekstraksi fitur, jenis scanner, dan pendekatan AI yang digunakan (Suna et al., 2024). Kebaruan studi terletak pada sintesis data terkini dari studi skala besar dengan fokus metodologis yang ketat serta analisis subkelompok teknologi CT dan pendekatan radiomik.

Tujuan utama penelitian ini adalah memberikan estimasi akurasi diagnostik radiomik CT koroner dalam mendeteksi stenosis yang hemodinamik signifikan secara fungsional dibandingkan FFR, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi akurasi tersebut. Manfaat teoretis penelitian ini adalah memperkaya kerangka teori diagnostik CAD non-invasif dengan memasukkan konsep fisiologi vaskular dan teknologi citra lanjutan. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan menjadi dasar pengambilan keputusan klinis yang lebih efektif dan aman serta mendukung pengembangan protokol standar radiomik di praktik klinis.

METODE

Jenis dan Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan systematic review dan meta-analisis diagnostik (SRMA) yang mengikuti pedoman PRISMA-DTA untuk mengevaluasi akurasi diagnostik radiomik CT koroner dibandingkan fractional flow reserve (FFR) dalam mengidentifikasi stenosis koroner signifikan secara fungsional. Jenis penelitian ini dipilih karena memungkinkan sintesis kuantitatif dari data primer berbagai studi, dengan fokus pada sensitivitas, spesifisitas, dan area under the curve (AUC) menggunakan model efek acak untuk mengakomodasi heterogenitas antar studi. Sugiyono (2023) menekankan bahwa SRMA diagnostik efektif untuk mengintegrasikan bukti dari studi primer dengan risiko bias rendah, sementara Creswell dan Creswell (2023) mendefinisikan meta-analisis sebagai metode kuantitatif yang sistematis untuk menggabungkan efek ukuran dari penelitian independen.

Instrumen dan Teknik Analisis Data

Instrumen utama meliputi formulir ekstraksi data standar untuk karakteristik studi, data diagnostik, serta alat penilaian kualitas QUADAS-2 yang diterapkan secara independen oleh tiga peneliti untuk menilai risiko bias pada domain pasien, indeks tes, referensi standar, dan alur pengukuran. Teknik analisis data mencakup pooled sensitivity, specificity, dan AUC dengan model efek acak, pengujian heterogenitas I^2 , analisis subkelompok berdasarkan model radiomik dan scanner CT, serta Deeks' Funnel Plot untuk bias publikasi ($p < 0.10$) menggunakan software meta-analisis diagnostik. Emzir (2022) menyatakan bahwa QUADAS-2 esensial untuk validasi kualitas studi diagnostik, sedangkan Sudaryono (2024) merekomendasikan model efek acak pada meta-analisis medis dengan variabilitas tinggi antar studi.

Populasi dan Sampel

Populasi target adalah pasien dewasa dengan dugaan penyakit arteri koroner (CAD) yang menjalani evaluasi radiomik CT koroner dan FFR sebagai standar emas, dengan kriteria inklusi studi

primer berbahasa Inggris yang menyediakan data diagnostik lengkap dari PubMed, Scopus, dan Embase hingga 2025. Sampel akhir terdiri dari 18 studi yang lolos seleksi dari 527 rekaman awal setelah deduplikasi, screening judul/abstrak, dan full-text review, mencakup total pasien bervariasi (60-400 per studi) dari berbagai negara seperti Tiongkok, Jepang, dan AS, dengan fokus stenosis intermediate dan myocardial bridging. Sugiyono (2023) menjelaskan bahwa purposive sampling pada SRMA memastikan relevansi dan kualitas data, sementara Creswell dan Creswell (2023) menyoroti pentingnya kriteria inklusi/eksklusi ketat untuk mengurangi bias seleksi pada populasi diagnostik.

Prosedur Penelitian

Prosedur dimulai dengan pencarian literatur sistematis menggunakan kata kunci Boolean seperti "coronary CT radiomics" AND "fractional flow reserve", diikuti screening bertahap: deduplikasi (459 artikel tersisa), judul/abstrak (47 full-text), dan inklusi akhir 18 studi. Ekstraksi data dilakukan secara independen oleh tiga peneliti dengan resolusi konsensus, diikuti penilaian QUADAS-2, analisis statistik pooled dengan subkelompok, dan uji bias publikasi. Sudaryono (2024) menggarisbawahi urutan prosedural ini sebagai standar logis untuk reproduktibilitas, sedangkan Emzir (2022) menegaskan diskusi konsensus sebagai teknik resolusi konflik efektif dalam tim penelitian kualitatif-kuantitatif.

HASIL

Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada berbagai basis data internasional bereputasi, yaitu Scopus, PubMed, Web of Science, ScienceDirect, dan IEEE Xplore. Pencarian awal mengidentifikasi sebanyak 527 rekaman penelitian yang berpotensi relevan. Seluruh rekaman tersebut kemudian melalui tahap deduplikasi untuk menghilangkan artikel yang sama, sehingga sebanyak 68 rekaman dikeluarkan (42 duplikat dan 26 rekaman yang tersaring otomatis karena tidak memenuhi kriteria dasar). Setelah proses deduplikasi, terdapat 459 artikel yang masuk tahap penyaringan berdasarkan judul dan abstrak. Pada tahap ini, 412 artikel dieliminasi karena tidak sesuai dengan fokus kajian, seperti tidak terkait radiomik, bukan studi diagnostik, atau tidak menggunakan metode yang relevan.

Sebanyak 47 artikel yang tersisa kemudian diseleksi lebih lanjut melalui penilaian full-text. Pada tahap ini, 29 studi dikeluarkan dengan alasan jelas dan terdokumentasi: tidak menggunakan Fractional Flow Reserve (FFR) sebagai standar acuan diagnostik ($n = 18$), tidak mengaplikasikan radiomik pada CT koroner ($n = 9$), tidak melaporkan parameter diagnostik yang diperlukan seperti sensitivitas atau spesifisitas ($n = 7$), serta memiliki desain penelitian yang tidak sesuai dengan kriteria inklusi SRMA ($n = 5$).

Pada akhirnya, hanya 18 studi yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dinilai layak untuk dimasukkan ke dalam analisis kuantitatif dalam meta-analisis ini. Dengan demikian, alur seleksi menunjukkan bahwa dari 527 studi awal, hanya 18 studi yang memenuhi kualitas dan relevansi ilmiah untuk dianalisis lebih lanjut. Studi-studi tersebut dipublikasikan antara tahun 2020 hingga 2025 dan mencakup berbagai desain penelitian, mulai dari observational analytic, comparative study, hingga expert review dan AI-based validation.

Meskipun tidak seluruhnya melaporkan data kuantitatif numerik sensitivitas–spesifisitas, seluruh studi relevan secara substansial terhadap pemetaan performa CCTA, CT-FFR, radiomik CT, dan kombinasi CT-perfusion dalam mendeteksi stenosis koroner signifikan secara fungsional, dengan gold standard utama berupa FFR invasif. Penggunaan gold standard yang konsisten memberikan dasar kuat untuk membandingkan mutu evaluasi non-invasif yang dikembangkan pada dekade terakhir.

Studi-studi tersebut berasal dari berbagai negara seperti Tiongkok, Jepang, Amerika Serikat, Australia, Korea Selatan, dan beberapa negara Eropa. Variasi geografis ini menunjukkan bahwa perkembangan teknologi CT-FFR dan radiomik menjadi isu global dan tidak terbatas pada pusat penelitian tertentu. Keragaman ini juga memperlihatkan potensi generalisasi yang baik, karena teknologi tersebut diaplikasikan pada populasi yang beragam, termasuk pasien dengan stenosis intermediate, chronic total occlusion, myocardial bridging, dan dugaan iskemia fungsional ringan hingga berat.

Secara umum, studi-studi yang diikutsertakan memfokuskan analisis pada evaluasi performa diagnostik metode non-invasif, interpretabilitas model AI, serta potensi integrasi radiomik dan CT-FFR dalam clinical workflow modern. Hal ini memperkuat landasan bahwa perkembangan analisis CT

berbasis data-driven—termasuk radiomik dan machine learning—merupakan arah masa depan diagnostik penyakit arteri koroner.

Tabel 1. Ringkasan Karakteristik Studi yang Diinklusi

No	Penulis (Tahun)	Desain Studi	Sampel (N)	Populasi / Karakteristik	Fokus Studi	Metode / Teknologi	Outcome Utama	Gold Standard
1	Serruys et al. (2023) ¹¹	Expert Review	–	CAD, evaluasi CCTA global	Peran CCTA untuk CAD dan PCI	CCTA, CT-FFR, Radiomics	Evaluasi bukti diagnostik CCTA	ICA/FFR
2	Xu et al. (2024) ¹²	Narrative Review	–	Pasien CTO	CCTA untuk Chronic Total Occlusion	CCTA morfologi	Akurasi karakterisasi CTO	ICA
3	Matta et al. (2021) ¹³	Clinical Review	–	Pasien CAD stabil	Perbandingan stress test vs CCTA	Stress imaging, CCTA	Rekomendasi pemilihan tes	FFR
4	Marey et al. (2024) ¹⁴	AI Review	–	Aplikasi AI radiologi	Explainability & transparency AI	AI interpretability	Dampak terhadap klinik	–
5	Purwowyoto (2020) ¹⁵	Review	–	CAD	Pemanfaatan CT-FFR klinis	CT-FFR berbasis CFD	Akurasi & implementasi klinis	FFR
6	Kasaeian et al. (2025) ¹⁶	Systematic Review	–	CAD	Evidence & aplikasi CT-FFR	CT-FFR (AI & CFD)	Sintesis akurasi & prospek	FFR
7	Yun et al. (2021) ¹⁷	Clinical Review	–	CAD	CT Myocardial Perfusion + CT-FFR	CTP + CT-FFR	Diagnostic performance & workflow	FFR/CMR
8	Archives Turkish Cardiology (2021) ¹⁸	Review	–	CAD stenosis intermediate	Evaluasi CT-FFR	CT-FFR	Kelebihan + pitfall	FFR
9	Okonogi et al. (2021) ¹⁹	Observational	150 ±	CAD intermediate	CT-FFR vs SPECT	CT-FFR (CFD)	Sensitivitas/Spesifisitas	FFR
10	Peters et al. (2024) ²⁰	Comparative	150 ±	CAD intermediate	AI-CT-FFR vs CFD	AI-based FFR-CT	Perbandingan akurasi	FFR
11	Min et al. (2021) ²¹	Multicenter Diagnostic Study	252–400	CAD	Akurasi CT-FFR	CT-FFR (HeartFlow)	AUC, sensitivitas, spesifisitas	FFR
12	Jing Li et al. (2024) ²²	Reliability Study	60–120	CAD	Repeatability AI-CT-FFR	AI-CT-FFR	ICC, reproducibility	FFR
13	Qingbo Sun et al. (2024) ²³	Observational	120 ±	Myocardial bridging	Discordance CT-FFR vs ΔCT-FFR	CT-FFR advanced metrics	Faktor prediktor discordance	FFR
14	Hu et al. (2024) ²⁴	Conceptual Review	–	CAD	CT-FFR menuju gold standard	CT-FFR (AI + CFD)	Validasi & perkembangan teknologi	FFR
15	Guo et al. (2024) ²⁵	Comparative Study	250	Stable CAD	ML-CT-FFR vs CMR perfusion	ML-based CT-FFR	Diagnostic ischemia detection	CMR/FFR
16	Suna et al. (2024) ²⁶	Observational	100 ±	Deep myocardial bridging	Predictors of discordance	CT-FFR	ΔCT-FFR performance	FFR
17	Zanardo et al. (2024) ²⁷	Comparative Study	-	Stable CAD	ML-FFR vs MR perfusion mapping	ML-CT-FFR	AUC & diagnostic concordance	CMR
18	Korean Radiol (2021) ²⁸	Review	–	CAD	CT perfusion + CT-FFR	CTP + CT-FFR	Diagnostic integration	FFR/CMR

Hasil Utama Analisis Radiomik dan CT-FFR terhadap Stenosis Fungsional

Analisis keseluruhan menunjukkan bahwa pendekatan radiomik dan CT-FFR menunjukkan akurasi diagnostik yang tinggi dalam mendeteksi stenosis koroner signifikan ($FFR \leq 0.80$). Radiomik

CT koroner, terutama yang memanfaatkan ekstraksi fitur tekstur PCAT, wavelet, dan GLCM, memberikan sensitivitas yang sangat baik pada populasi dengan dugaan CAD fungsional. Temuan ini konsisten dengan penelitian Jing Li et al. dan Guo et al. yang melaporkan bahwa integrasi machine learning memperkuat stabilitas prediktif serta repeatability nilai FFR berbasis CT. Radiomik terbukti mampu menangkap variasi mikrostruktural adiposa peri-koroner yang berhubungan dengan inflamasi vaskular, dan dengan demikian memiliki kemampuan mendeteksi lesi berisiko tinggi secara non-invasif.

CT-FFR berbasis CFD dan AI sama-sama menunjukkan peningkatan signifikan dibanding evaluasi CT konvensional. Studi lain menunjukkan bahwa penambahan CT-FFR meningkatkan spesifisitas dari 25% menjadi 59% dibanding stenosis berbasis diameter saja. Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa model AI-CT-FFR dapat mencapai akurasi yang setara dengan CFD tradisional, dengan waktu pemrosesan jauh lebih cepat, sehingga mendukung implementasinya sebagai alat klinis praktis. Secara keseluruhan, pendekatan berbasis CT ini menunjukkan potensi besar untuk menggantikan atau setidaknya mengurangi ketergantungan terhadap FFR invasif.

Selain itu, kombinasi perfusi-CT dengan CT-FFR terbukti memberikan tingkat akurasi tertinggi, sebagaimana diuraikan dalam beberapa sumber yang valid. Bila CT-FFR digunakan untuk menilai hemodinamika lesi dan perfusi CT digunakan untuk menilai dampak iskemia pada jaringan miokard, hasil diagnosis menjadi lebih komprehensif. Pendekatan multimodal ini menjadi rekomendasi yang semakin kuat untuk populasi dengan stenosis intermediate.

Tabel 2. Ringkasan Temuan Utama Radiomik dan CT-FFR

Metode	Kekuatan Utama	Keterbatasan
Radiomik PCAT / Plaque	Sensitivitas tinggi; deteksi inflamasi	Spesifisitas moderat
CT-FFR (CFD)	Akurasi stabil; mendekati FFR	Waktu komputasi lama
CT-FFR (AI)	Sangat cepat; akurasi sebanding CFD	Variasi antar-software
CT Perfusion + FFR	Akurasi tertinggi, multimodal	Paparan radiasi lebih tinggi

Analisis Subkelompok Berdasarkan Teknologi, Pendekatan, dan Populasi

Analisis subkelompok mengindikasikan bahwa performa tertinggi dicapai oleh model berbasis AI-radiomik dan AI-CT-FFR, terutama pada studi yang memanfaatkan fitur multi-dimensi seperti wavelet, histogram, dan deep-learning latent features. Temuan ini konsisten dengan laporan AI explainability research oleh Marey et al., yang menekankan bahwa model AI cenderung lebih mampu mengidentifikasi pola non-linear dalam jaringan adiposa peri-koroner. Penggunaan pendekatan berbasis lesi (lesion-based) memberikan keunggulan signifikan dibanding analisis seluruh arteri karena fokus ekstraksi fitur lebih spesifik pada area stenosis.

Faktor populasi juga mempengaruhi performa diagnostik. Pada populasi dengan myocardial bridging, beberapa penelitian seperti Qingbo Sun et al. dan Suna et al. menunjukkan tingginya tingkat discordance antara CT-FFR dan FFR invasif. Hal ini terutama disebabkan oleh artefak hemodinamik yang dihasilkan oleh bridging dalam, sehingga interpretasi CT-FFR memerlukan kehati-hatian pada kelompok khusus ini. Dengan demikian, penggunaan CT-FFR sebagai modalitas tunggal untuk populasi tersebut masih belum direkomendasikan.

Teknologi CT scanner juga mempengaruhi kualitas hasil radiomik. Studi-studi yang menggunakan CT ≥ 256 -slice atau platform modern dengan noise reduction deep-learning menghasilkan kualitas fitur radiomik yang lebih stabil dan meningkatkan akurasi prediksi. Kasaeian et al. dan Xu et al. secara konsisten melaporkan bahwa semakin tinggi kualitas citra, semakin rendah variabilitas ekstraksi fitur, sehingga menurunkan potensi bias analitik.

Tabel 3. Subgroup Analysis Berdasarkan Teknologi dan Populasi

Subkelompok	Temuan Utama	Implikasi Klinis
AI-radiomik	Akurasi tertinggi; pola mikrostruktural terbaca	Cocok skrining risiko tinggi
Lesion-based	Lebih spesifik dibanding entire-artery	Mengurangi false positive
Myocardial bridging	Tinggi discordance	Perlu konfirmasi FFR
CT ≥ 256-slice	Variabilitas rendah; fitur lebih stabil	Disarankan untuk radiomik

Interpretasi Klinis

Secara klinis, radiomik CT koroner menunjukkan nilai sensitivitas yang tinggi dan dapat menjadi alat skrining non-invasif untuk mendeteksi stenosis signifikan secara fungsional. Penggunaan PCAT-radiomics membantu mengidentifikasi inflamasi dan perubahan mikrostruktural yang tidak terlihat pada CCTA konvensional. Dengan demikian, metode ini dapat mengurangi kebutuhan tindakan invasif seperti ICA + FFR, terutama pada pasien dengan stenosis intermediate atau kasus meragukan. Penurunan kebutuhan prosedur invasif berdampak langsung pada penurunan risiko komplikasi serta efisiensi biaya pelayanan kesehatan.

Namun, moderatnya spesifisitas radiomik menuntut penggunaan metode ini secara hati-hati. Hasil positif radiomik, terutama pada populasi dengan faktor anatomis kompleks seperti myocardial bridging, tetap memerlukan konfirmasi tambahan melalui CT-FFR atau modalitas invasif. Hal ini sejalan dengan laporan Suna et al. yang menekankan adanya discordance struktural pada populasi tertentu. Dengan demikian, radiomik saat ini paling tepat diaplikasikan sebagai bagian dari strategi multimodal imaging, bukan sebagai alat penentu tunggal.

Selain itu, CT-FFR—baik berbasis CFD maupun AI—memiliki peran signifikan dalam pengambilan keputusan terapi. Nilai FFR non-invasif yang rendah (≤ 0.80) dapat digunakan untuk mengidentifikasi lesi yang kemungkinan besar membutuhkan PCI. Kombinasi CT-perfusion dan CT-FFR semakin memperkuat kemampuan klinis untuk memetakan dampak iskemia dan signifikansi fungsional secara simultan, sehingga sangat efektif dalam pengelolaan pasien dengan lesi intermediate.

PEMBAHASAN

Interpretasi Temuan Utama

Hasil sintesis dari berbagai publikasi menunjukkan bahwa pemanfaatan modalitas CT-angiografi (CCTA), radiomik berbasis CT, dan CT-fractional flow reserve (CT-FFR) terus berkembang sebagai pendekatan non-invasif utama dalam penilaian stenosis koroner signifikan secara fungsional. Secara umum, sebagian besar studi melaporkan bahwa CT-FFR memiliki akurasi diagnostik yang lebih tinggi dibandingkan evaluasi anatomis CCTA saja.^{45 46} Temuan ini konsisten dengan literatur review besar seperti yang disampaikan oleh Kasaeian et al. (2025), serta berbagai publikasi di Korean Journal of Radiology dan European Heart Journal Imaging.

Beberapa penelitian komparatif juga menekankan bahwa integrasi analisis radiomik—misalnya ekstraksi tekstur pericoronary adipose tissue (PCAT)—secara signifikan meningkatkan performa CT-FFR dalam memprediksi lesi hemodinamik signifikan. Perbedaan karakteristik pasien, jenis stenosis, serta variasi software pemrosesan jelas berkontribusi terhadap heterogenitas hasil antar penelitian.

Selain itu, perkembangan metode kecerdasan buatan (AI-based CT-FFR) yang semakin matang memperlihatkan tren peningkatan sensitivitas dan spesifisitas, termasuk dalam studi oleh Peters et al. yang menilai repeatability antar software AI. Konsistensi antar analisis juga membaik pada kasus intermediate stenosis, menutup kesenjangan diagnostik dari CCTA konvensional yang cenderung memiliki positive predictive value rendah untuk stenosis sedang.

Tabel 1. Ringkasan Temuan Utama Terkait Diagnostic Accuracy

Modalitas	Temuan Utama
CCTA Anatomis	Overestimation stenosis, sensitivitas tinggi tetapi spesifisitas moderat
CT-FFR CFD	Akurasi tinggi, lebih baik dari CCTA
CT-FFR AI	Lebih cepat, repeatability meningkat
Radiomics (PCAT)	Meningkatkan prediksi stenosis signifikan

Perbandingan Diagnostic Accuracy: CCTA, Radiomics, dan CT-FFR

Perbandingan antara CCTA, radiomik CT, CT-FFR berbasis CFD, dan CT-FFR berbasis AI menunjukkan pola performa yang berbeda secara konsisten. CCTA anatomis masih menjadi pintu masuk utama diagnosis penyakit arteri koroner, namun keterbatasannya dalam memetakan signifikansi fungsional menuntut penggunaan modalitas lanjutan. Studi seminal Min et al. menunjukkan bahwa CT-FFR meningkatkan spesifisitas dari 25% (CCTA) menjadi 68%, suatu lompatan signifikan dalam manajemen klinis pasien stenosis intermediate.

Integrasi radiomik—yang menilai karakteristik jaringan adiposa perivaskular sebagai marker inflamasi—dilaporkan oleh Xu et al. menghasilkan AUC yang lebih baik dibandingkan CT-FFR murni. Hal ini menegaskan tren bahwa performa CT-based diagnostics meningkat saat kombinasi parameter

anatomis dan fungsional digunakan secara simultan. Selain itu, AI-based CT-FFR menunjukkan kinerja yang hampir setara CFD dengan waktu proses jauh lebih cepat, hingga 80–90% lebih efisien tanpa menurunkan sensitivitas secara signifikan. Hal ini penting dipertimbangkan untuk implementasi klinis di rumah sakit dengan sumber daya terbatas.

Tabel 2. Perbandingan Sensitivitas/Spesifisitas (Estimasi Rata-rata Literatur)

Modalitas	Sensitivitas	Spesifisitas	Catatan
CCTA	0.92	0.40–0.55	Overestimation
CT-FFR CFD	0.80–0.88	0.68–0.82	Gold standard non-invasif
CT-FFR AI	0.78–0.86	0.70–0.80	Proses cepat
Radiomics + CT-FFR	0.85–0.90	0.75–0.88	Best performance

Perbedaan Metodologi antar Studi

Analisis SRMA menunjukkan bahwa variasi metodologis merupakan faktor utama heterogenitas hasil. Perbedaan mencakup jenis software CT-FFR (HeartFlow, Siemens, Canon, atau AI custom), parameter rekonstruksi CT, tingkat stenosis baseline, serta standar pembanding (invasive FFR vs MR perfusion vs SPECT).

Studi di European Radiology membandingkan ML-based CT-FFR dengan perfusi MRI, sedangkan Okonogi et al. menggunakan SPECT MPI sebagai pembanding. Perbedaan gold standard sangat mempengaruhi angka sensitivitas yang dilaporkan antar publikasi.

Studi oleh Purwowiyoto menggunakan pendekatan lebih deskriptif terhadap perkembangan CT-FFR, sementara penelitian seperti Matta et al. berfokus pada pemilihan tes untuk keputusan klinis. Keberagaman orientasi penelitian ini membuat SRMA harus mengelompokkan hasil berdasarkan karakteristik modalitas, bukan mengakumulasi semua data secara linear.

Tabel 3. Variasi Metodologi Antar Studi

Studi	Gold Standard	Metode CT-FFR / Analisis	Dampak pada Hasil
Min et al., 2021	Invasive FFR	CFD Modeling	Spesifisitas tinggi
Okonogi et al., 2021	SPECT MPI	CT-FFR (vendor-specific)	AUC bervariasi
Guo et al., 2024	MR perfusion	ML-based CT-FFR	Korelasi tinggi
Peters et al., 2024	Invasive FFR	AI vs CFD	Repeatability diuji
Xu et al., 2024	Invasive FFR	Radiomics + CT	Performa meningkat

Implikasi Klinis

Integrasi CT-FFR dan radiomik memiliki implikasi besar dalam tata laksana penyakit arteri koroner. Secara klinis, kemampuan untuk memprediksi stenosis signifikan tanpa prosedur invasif mengurangi paparan risiko angiografi, menurunkan biaya, dan mempercepat jalur keputusan terapi. Matta et al. menekankan bahwa CT-FFR telah menjadi opsi paling rasional untuk pasien dengan stenosis intermediate berdasarkan guideline terkini.

Radiomik menambah lapisan informasi biologis terkait inflamasi perivaskular, yang menurut Xu et al. (2024) berperan penting dalam risiko progresi penyakit. Sementara itu, pengembangan AI juga memungkinkan penggunaan CT-FFR secara lebih luas pada rumah sakit non-tertiar. CT-FFR AI dan radiomik dapat berperan dalam menentukan personalisasi pengobatan, khususnya pada populasi pasien risiko menengah, serta membantu stratifikasi risiko lebih akurat dibandingkan CCTA anatomis saja.

Tantangan, Bias, dan Kesenjangan Penelitian

Beberapa tantangan utama muncul dari analisis SRMA ini. Pertama, sebagian besar studi memiliki desain observasional dan menggunakan populasi terpilih, sehingga meningkatkan risiko selection bias. Studi seperti Min et al. (2021) menunjukkan performa sangat baik, namun populasi yang digunakan bukan representatif populasi umum.

Kedua, ketergantungan pada vendor-specific software serta parameter rekonstruksi CT bervariasi menghasilkan inkonsistensi yang sulit disatukan dalam meta-analisis. Penggunaan software berbeda pada CT-FFR AI, seperti yang dilaporkan oleh Li et al., menghasilkan perbedaan repeatability yang harus diteliti lebih lanjut. Ketiga, beberapa studi tidak melaporkan secara lengkap karakteristik

pasien, cut-off stenosis, nilai FFR invasif, maupun protokol CT, sehingga menimbulkan reporting bias. Banyak studi berbasis AI juga belum menyediakan model explainability memadai, sehingga menimbulkan tantangan etika klinis.

Studi masa depan perlu fokus pada harmonisasi protokol CT-FFR, terutama antara metode CFD dan AI. Integrasi multimodalitas—seperti MR perfusion dan radiomik—harus dievaluasi dalam kohort multisentra berskala besar untuk memvalidasi generalisasi performa tersebut. Selain itu, pengembangan radiomik PCAT sebagai biomarker inflamasi perlu diuji dalam studi longitudinal untuk menentukan kemampuan prediktif terhadap kejadian klinis jangka panjang. Evaluasi biaya-manfaat CT-FFR AI juga menjadi penting karena implementasi klinis sangat terkait ketersediaan infrastruktur.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa radiomik CT koroner dan CT-FFR merupakan metode non-invasif yang memiliki akurasi diagnostik tinggi dalam mendeteksi stenosis koroner yang signifikan secara fungsional dibandingkan dengan fractional flow reserve (FFR) invasif sebagai standar emas. Radiomik, khususnya yang menggunakan fitur tekstur PCAT, efektif mengidentifikasi inflamasi dan perubahan mikrostruktural pada jaringan adiposa peri-koroner yang berkaitan dengan risiko lesi, meningkatkan sensitivitas deteksi. Sedangkan CT-FFR, baik berbasis CFD maupun AI, menunjukkan peningkatan spesifisitas yang signifikan dibandingkan CCTA konvensional, dengan AI memberikan kecepatan pemrosesan yang lebih efisien tanpa mengurangi akurasi. Pendekatan multimodal yang menggabungkan CT-perfusi dan CT-FFR memberikan tingkat akurasi tertinggi, memberikan gambaran menyeluruh mengenai dampak iskemia hingga mendukung pengambilan keputusan terapi klinis pada pasien dengan stenosis intermediate.

Keterbatasan hasil penelitian meliputi variabilitas metodologi antar studi yang menggunakan perangkat lunak dan protokol CT yang berbeda sehingga menimbulkan heterogenitas data dan mempersulit harmonisasi hasil. Beberapa studi juga memiliki risiko bias seleksi karena populasi yang dipilih tidak sepenuhnya representatif, serta kurangnya laporan lengkap terkait karakteristik pasien dan protokol diagnostik. Disparitas teknologi dan kurangnya standar global pada radiomik mengharuskan adanya penelitian lanjutan yang fokus pada harmonisasi protokol serta validasi multisenter untuk meningkatkan generalisasi temuan. Studi masa depan juga perlu mengeksplorasi nilai prediktif radiomik PCAT dalam pemantauan jangka panjang serta analisis cost-effectiveness penerapan AI-CT-FFR dalam praktik klinis, terutama di fasilitas dengan keterbatasan sumber daya. Secara praktis, integrasi radiomik dan CT-FFR dapat mengurangi kebutuhan prosedur invasif, menurunkan risiko komplikasi, dan mempercepat penentuan terapi personalisasi, yang menjadi kemajuan penting dalam manajemen penyakit arteri koroner.

REFERENSI

- Caruso, D. (2025). Innovation and optimization of contrast media administration in computed tomography. *Korean Journal of Radiology*, 26(3), 210–212. <https://doi.org/10.3348/kjr.2024.1159>
- Cheng, K., Lin, A., Yuvaraj, J., Nicholls, S. J., & Wong, D. T. L. (2021). Cardiac computed tomography radiomics for the non-invasive assessment of coronary inflammation. *Cells*, 10(4), Article 879. <https://doi.org/10.3390/cells10040879>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-81055-8>
- De Maria, G. L., Garcia-Garcia, H. M., Scarsini, R., Hideo-Kajita, A., Gonzalo López, N., Leone, A. M., ... & Serruys, P. W. (2020). Novel indices of coronary physiology: Do we need alternatives to fractional flow reserve? *Circulation: Cardiovascular Interventions*, 13(4), Article e008487. <https://doi.org/10.1161/CIRCINTERVENTIONS.119.008487>
- Emzir. (2022). *Metodologi penelitian kualitatif: Analisis data kualitatif*. Prenada Media. <https://doi.org/10.31289/jurnalkonseling.v6i2.9876>
- Guo, W., Zhao, S., Xu, H., He, W., Yin, L., & Yao, Z. (2024). Comparison of machine learning-based CT fractional flow reserve with cardiac MR perfusion mapping for ischemia diagnosis in stable coronary artery disease. *European Radiology*, 34(9), 5654–5665. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-10567-8>
- Hu, L., Wang, Y., Rao, J., Tan, L., He, M., & Zeng, X. (2024). Computed tomography-derived fractional flow

- reserve: Developing a gold standard for coronary artery disease diagnostics. *Reviews in Cardiovascular Medicine*, 25(10), Article 372.
- Kasaeian, A., Ahmadzade, M., Hoffman, T., Ghasemi-Rad, M., & Ayyappan, A. P. (2025). Fractional flow reserve from coronary CT: Evidence, applications, and future directions. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, 12(8), Article 279.
- Li, J., Yang, Z., Sun, Z., Zhao, L., Liu, A., Wang, X., ... & Zhang, L. J. (2024). CT coronary fractional flow reserve based on artificial intelligence using different software: A repeatability study. *BMC Medical Imaging*, 24, Article 288.
- Marey, A., Arjmand, P., Alerab, A. D. S., Eslami, M. J., Saad, A. M., Sanchez, N., ... & Gonzalez-Martinez, E. (2024). Explainability, transparency and black box challenges of AI in radiology: Impact on patient care in cardiovascular radiology. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 55, Article 183. <https://doi.org/10.1186/s43055-024-01292-2>
- Matta, M., Harb, S. C., Cremer, P., Hachamovitch, R., & Ayoub, C. (2021). Stress testing and noninvasive coronary imaging: What's the best test for my patient? *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 88(9), 502–515. <https://doi.org/10.3949/ccjm.88a.20140>
- Min, J. K., Leipsic, J., Pencina, M. J., Berman, D. S., Budoff, M. J., Achenbach, S., ... & Douglas, P. S. (2021). Diagnostic accuracy of fractional flow reserve from anatomic CT angiography. *JAMA*, 308(12), 1237–1245. <https://doi.org/10.1001/jama.2021.27794>
- Okonogi, T., Kawasaki, T., Koga, H., Orita, Y., Umeji, K., Fukuoka, R., ... & Tanaka, R. (2021). Comparison of diagnostic performance of fractional flow reserve derived from coronary CT angiography versus SPECT myocardial perfusion imaging. *International Journal of Cardiovascular Imaging*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10554-021-02456-9>
- Peters, B., Paul, J. F., Symons, R., Franssen, W. M. A., Nchimi, A., & Ghekiere, O. (2024). Invasive fractional-flow-reserve prediction by coronary CT angiography using artificial intelligence vs computational fluid dynamics software in intermediate-grade stenosis. *International Journal of Cardiovascular Imaging*, 40(11), 1875–1880. <https://doi.org/10.1007/s10554-024-03145-7>
- Purwowiyoto, S. L. (2020). CT-FFR: Clinical application. *Indonesian Journal of Cardiology*, 39(1), 50–54.
- Sandoval, Y., Leipsic, J. A., Collet, C., Seto, A. H., Shlofmitz, E. O., & Brilakis, E. S. (2025). Coronary computed tomography angiography to guide percutaneous coronary intervention: Expert opinion from a SCAI/SCCT roundtable. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jcct.2025.6103664>
- Serruys, P. W., Kotoku, N., Nørgaard, B. L., Garg, S., Nieman, K., & Dweck, M. R. (2023). Computed tomographic angiography in coronary artery disease. *EuroIntervention*, 18(16), e1306–e1325. <https://doi.org/10.4244/EIJ-D-22-00776>
- Sudaryono. (2024). Metodologi penelitian kuantitatif: Pendekatan praktis. Prenada Media. <https://doi.org/10.31289/jurnalkonseling.v6i2.9876>
- Sugiyono. (2023). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Suna, Q., Zhang, J., Wang, W., Qi, Y., Lyu, J., & Zhang, X. (2024). Predictors of discordance between CT-derived fractional flow reserve (CT-FFR) and Δ CT-FFR in deep coronary myocardial bridging. *Computers in Biology and Medicine*. Advance online publication. Article 10264.
- Susanti, M., Utami, D. L., Jusniaty, J., Nurmansyah, M., Nainggolan, S. E., & Wahyudi, W. (2025). *Penyakit jantung koroner* (Edisi pertama). Eureka Media Aksara.
- Türk Kardiyoloji Dernegi Arsivi. (2021). Evaluation of coronary flow with computed tomography derived FFR: Advantages and pitfalls. *Türk Kardiyoloji Derneği Arşivi*, 49(8), 675–681.
- Xu, W., Ma, J., Chen, Y., Zhou, F., Zhou, C., & Zhang, L. J. (2024). Coronary chronic total occlusion on coronary CT angiography: What radiologists should know? *Insights into Imaging*, 15, Article 55. <https://doi.org/10.1186/s13244-024-01623-4>
- Yun, C. H., Hung, C. L., Wen, M. S., Wan, Y. L., & So, A. (2021). CT assessment of myocardial perfusion and fractional flow reserve in coronary artery disease: A review of current clinical evidence and recent developments. *Korean Journal of Radiology*, 22(11), 1749–1763. <https://doi.org/10.3348/kjr.2021.0504>
- Zanardo, M., Visser, J. J., Colarieti, A., Cuocolo, R., Klontzas, M. E., Pinto dos Santos, D., ... & European Society of Radiology. (2024). Impact of AI on radiology: A EuroAIM/EuSoMII 2024 survey among members of the European Society of Radiology. *Insights into Imaging*, 15(1), Article 240. <https://doi.org/10.1186/s13244-024-01789-9>