

Artificial Intelligence dan Kardiologi: A Mini Review

Purwowiyoto, S.L.¹, Candra, W²

¹ Fakultas Kedokteran Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Tangerang, Banten, Indonesia

E-mail : sidhilaksono@uhamka.ac.id

² Fakultas Kedokteran Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

Abstrak

Dalam diagnosis dan terapi pasien dengan gangguan jantung masih terdapat keterbatasan-keterbatasan tertentu. Teknologi medis berbasis *artificial intelligence* berkembang dengan pesat sebagai solusi yang dapat diterapkan untuk praktik klinis. *Artificial intelligence* sendiri merupakan istilah yang digunakan dalam pemanfaatan teknologi dan komputer untuk mensimulasikan perilaku cerdas dan pemikiran kritis yang sebanding dengan manusia. Saat ini, hanya pengaturan tertentu dalam praktik klinis yang mendapat manfaat dari penerapan *artificial intelligence*. *Artificial intelligence* menawarkan solusi akan beberapa permasalahan pada kardiologi. *Artificial intelligence* berpotensi meningkatkan kualitas pelayanan kedokteran pada bidang kardiologi. Perlu adanya standar tertentu dalam manajemen kedokteran berbasis *artificial intelligence*.

Katakunci — *Artificial Intelligence, Cardiac Diagnostic, Cardiac Examination, Cardiology, Deep Learning, Machine Learning*

Abstract

There are certain limitations in the diagnosis and therapy of patients with heart problem. Artificial intelligence-based medical technology is rapidly developing as a solution that can be applied to clinical practice. Artificial intelligence itself is a term used in the utilization of technology and computers to simulate intelligent behavior and critical thinking that comparable to humans. Currently, only certain settings in clinical practice benefit from implementing artificial intelligence. Artificial intelligence offers solution to several problems in cardiology. Artificial intelligence has the potential to improve the quality of medical services in cardiology. Certain standards required in artificial intelligence-based medical management.

Keywords— *Artificial Intelligence, Cardiac Diagnostic, Cardiac Examination, Cardiology, Deep Learning, Machine Learning*

I. PENDAHULUAN

Artificial Intelligence (AI) adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan penggunaan komputer dan teknologi untuk mensimulasikan perilaku cerdas dan pemikiran kritis yang sebanding dengan manusia.¹ Teknologi medis berbasis AI berkembang dengan pesat sebagai solusi yang dapat diterapkan untuk praktik klinis. Algoritme pembelajaran mendalam dapat menangani peningkatan jumlah data yang disediakan oleh berbagai perangkat seperti smartphone dan sensor pemantauan seluler lainnya di berbagai bidang kedokteran. Saat ini, hanya pengaturan yang sangat spesifik dalam praktik klinis yang mendapat manfaat dari penerapan AI, seperti deteksi fibrilasi atrium, kejang epilepsi, dan hipoglikemia, atau diagnosis penyakit berdasarkan pemeriksaan histopatologi atau pencitraan medis.²

Tidak seperti kapasitas seorang dokter, sistem ini dapat secara bersamaan mengamati dan dengan cepat memproses jumlah input yang hampir tak terbatas. Contohnya, aplikasi smartphone yang berbasis AI sekarang mampu menangani tugas memilah triase 1,2 juta orang di London Utara.³ Teknologi medis cerdas (bertenaga AI) memungkinkan model kedokteran 4P (Prediktif, Preventif, Personalisasi, dan Partisipatif).² AI berkembang menjadi fokus utama dalam kedokteran yang dapat diterapkan untuk alat diagnostik dalam mengatasi masalah inkonsistensi dan variabilitas antar dan intraobserver dalam interpretasi.⁴

II. TINJAUAN PUSTAKA

Melakukan pengambilan keputusan klinis melalui wawasan dari data masa lalu adalah inti dari kedokteran berbasis bukti. Secara tradisional, metode statistik telah menjalankan peran ini dengan mengkaraktirasi pola dalam data sebagai persamaan matematika, misalnya, regresi linier, yang dapat

menunjukkan hal yang paling berperan dalam suatu hal tertentu. Melalui 'pembelajaran mesin' (ML), AI menyediakan teknik yang menyederhanakan asosiasi kompleks yang tidak dapat dengan mudah direduksi menjadi persamaan tertentu. *Neural network* mewakili data melalui sejumlah besar neuron yang saling berhubungan dengan cara yang mirip dengan otak manusia bekerja. Hal ini memungkinkan sistem ML untuk mendekati pemecahan masalah yang kompleks seperti yang mungkin dilakukan oleh dokter — dengan menimbang bukti secara cermat untuk mencapai kesimpulan yang masuk akal. Namun, tidak seperti kapasitas seorang dokter, sistem ini dapat secara bersamaan mengamati dan dengan cepat memproses jumlah input yang hampir tak terbatas. Contohnya, aplikasi smartphone yang berbasis AI sekarang mampu menangani tugas memilah triase 1,2 juta orang di London Utara.³ Teknologi medis cerdas (bertenaga AI) memungkinkan model kedokteran 4P (Prediktif, Preventif, Personalisasi, dan Partisipatif).² AI berkembang menjadi fokus utama dalam kedokteran yang dapat diterapkan untuk alat diagnostik dalam mengatasi masalah inkonsistensi dan variabilitas antar dan intraobserver dalam interpretasi.⁴

Sejak awal 1980-an, kemajuan teknologi komputer dan penciptaan *neural network* canggih menyebabkan evolusi pesat dalam AI. Jaringan saraf biologis adalah sirkuit neuron; otak manusia memiliki sekitar 100 miliar neuron. *Neural network* tiruan adalah sistem komputasi yang meniru otak manusia dengan mengenali hubungan dalam sejumlah besar data. AI adalah istilah luas yang mencakup semua program komputer (algoritma dan model) yang meniru logika dan kecerdasan manusia. Banyak istilah yang digunakan untuk menggambarkan berbagai subbidang dan teknik dalam AI. Pembelajaran mesin (*Machine Learning*, ML) dan pembelajaran mendalam (*Deep Learning*) adalah dua subbidang yang

berfungsi sebagai dasar dari sebagian besar fungsi AI. Perbedaan dari kedua subbidang ini dapat diamati lebih lanjut pada Tabel 2.1.⁴

Pembelajaran mendalam adalah bagian dari pembelajaran mesin yang digunakan dalam keadaan di mana sejumlah besar data harus diproses. Jaringan pembelajaran mendalam ini didasarkan pada konfigurasi berlapis-lapis yang disebut *neural network* tiruan untuk memproses data. *Neural network* tiruan ini, seringkali memiliki kedalaman hingga ratusan lapisan, dapat melatih diri mereka sendiri dari kumpulan data berjumlah besar dan membuat prediksi akurat pada input data baru. Hal ini juga memiliki kemampuan untuk belajar dari pengalaman mereka tetapi membutuhkan kumpulan data “pelatihan” awal yang akurat dan tanpa bias. Pelatihan tanpa bias sangat penting. Data awal harus bebas dari pengaruh luar yang mungkin mengaburkan informasi, seperti informasi demografis atau informasi medis tambahan yang mungkin merencanakan diagnosis tertentu. Tanpa bias juga berarti bahwa kumpulan data “pelatihan” cukup besar untuk menampung berbagai macam pasien.⁴

Pada ekokardiografi, kumpulan data semacam itu akan mencakup studi dari kedua jenis kelamin bersama dengan kisaran indeks massa tubuh, usia, dan kualitas gambar. Hal ini sangat penting bagi mesin untuk mempelajari pola berdasarkan gambar saja. Komponen *neural network* tiruan secara longgar terkait dengan komponen neuron biologis yang terdiri dari beberapa lapisan di mana data diproses secara berurutan hingga keluaran akhir tercapai.⁴

Pembelajaran mesin menggunakan teknik statistik dan data untuk belajar dari pengalaman guna membuat prediksi dari data baru. Pembelajaran mesin melibatkan pemrograman komputer untuk menyimpan, mempelajari, dan menganalisis data. Sebagai bagian dari AI, pembelajaran mesin

menggunakan metode statistik untuk memungkinkan mesin meningkatkan pengalaman. Pembelajaran mesin memungkinkan komputer untuk mengambil data yang dimasukkan, belajar dari data ini, memprediksi hasil, dan meningkatkan pengetahuannya sendiri tentang bagaimana untuk bereaksi pada saat berikutnya disajikan dengan data serupa. Pembelajaran mesin memiliki banyak aplikasi saat ini, termasuk pemrosesan ucapan dan bahasa, pemrosesan dan pengenalan gambar dan video, kendaraan otonom, dan komputer dalam bermain game.⁴

Pembelajaran mesin dapat dikembangkan dengan pembelajaran yang diawasi atau pembelajaran tanpa pengawasan. Perbedaan sederhana antara keduanya adalah bahwa pembelajaran tanpa pengawasan menggunakan data yang tidak berlabel, sedangkan pembelajaran yang diawasi menggunakan data yang berlabel atau diketahui. Dalam pembelajaran tanpa pengawasan, mesin mengambil set data yang tidak berlabel dan mendeteksi pola yang sebelumnya tidak diketahui. Istilah "pembelajaran yang diawasi" adalah proses memberikan algoritma yang diketahui atau diberi label input bersama dengan output yang diinginkan dan merupakan jenis pembelajaran mesin yang paling umum digunakan saat ini. Metode ini memungkinkan mesin untuk mengklasifikasikan atau memprediksi objek, masalah, atau situasi berdasarkan data berlabel yang dimasukkan ke dalam mesin. Tujuan pembelajaran yang diawasi adalah agar mesin menerima variabel input baru (tidak diajarkan) dan memprediksi variabel output dengan benar. Contohnya adalah program yang dapat menganalisis ekokardiografi *two view* apikal dan menghasilkan nilai fraksi ejeksi (EF) yang akurat tanpa perlu menggambarkan garis batas dan menilai volume ventrikel. Karena program ini “dilatih” dengan ribuan gambar dengan EF yang diketahui, program ini mampu menghasilkan nilai EF seakurat nilai

EF seorang ahli jantung dengan pengalaman >20 tahun.⁴

TABEL 2.1 KELEBIHAN DAN KEKURANGAN PEMBELAJARAN MESIN DAN PEMBELAJARAN MENDALAM⁴

| Pembelajaran Mesin | Pembelajaran Mendalam |
|---|---|
| Dapat bekerja dengan jumlah data yang lebih kecil | Memanfaatkan data berjumlah besar |
| Dapat bekerja dengan mesin yang lebih sederhana | Memerlukan mesin canggih untuk melatih namun juga dapat dijalankan dengan alat yang lebih sederhana |
| Hanya dapat menjalankan fungsi tertentu untuk mencapai kesimpulan | Dapat mempelajari fungsi yang sangat kompleks untuk mencapai kesimpulan |
| Fitur penting harus diidentifikasi seorang ahli terlebih dahulu | <i>Neural network</i> dapat menentukan fitur penting, sehingga tidak membutuhkan identifikasi ahli |
| Memerlukan waktu yang singkat untuk melatih | Memerlukan waktu yang lebih panjang untuk melatih |
| Menggunakan metode statistik dalam meningkatkan pengalaman | Secara fungsi meniru jaringan otak manusia |

Sumber: Davis A, Billick K, Horton K, et al. Artificial Intelligence and Echocardiography: A Primer for Cardiac Sonographers. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2020;33(9):1061-1066. doi:10.1016/j.echo.2020.04.025

Penyakit kardiovaskular (CVDs) adalah penyebab utama kematian secara global. Pasien dengan kondisi langka seperti amiloidosis jantung (CA) masih merupakan tantangan bagi dokter dalam mendiagnosisnya. Beberapa tes diagnostik definitif memerlukan biaya yang mahal dan sebagian besar hanya tersedia di pusat kota, secara tidak proporsional hal ini membatasi aksesibilitas penduduk terpencil dan mereka yang berasal dari kota-kota kecil. Pemberian terapi untuk beberapa penyakit terhambat karena adanya proses diagnosis penyakit yang tertunda.^{5,6}

Dalam upaya berkelanjutan untuk memberikan terapi transkateter pada pasien, pertimbangan harus diberikan pada kondisi fisik operator dan staf laboratorium kateter yang berpotensi dirugikan dari paparan radiasi kumulatif. Hal ini semakin penting, mengingat semakin kompleksnya prosedur intervensi koroner yang ditawarkan, serta perluasan berkelanjutan dalam prosedur kardiologi struktural dalam praktik kardiologi intervensi kontemporer.⁷

Pasien dengan kondisi langka seperti amiloidosis jantung (CA) sulit untuk diidentifikasi, mengingat kesamaan manifestasi penyakit dengan gangguan yang lebih umum. Pemberian terapi untuk beberapa penyakit terhambat karena adanya proses diagnosis penyakit yang tertunda. Tes diagnostik definitif untuk amiloidosis jantung meliputi biopsi jaringan dan beberapa bentuk skintigrafi radionuklida yang harganya masih mahal. Hal ini membuat keduanya menjadi alat yang tidak masuk akal untuk digunakan sebagai alat skrining. Amiloidosis jantung tetap memiliki fitur prediktif yang dapat ditangkap oleh modalitas diagnostik yang lebih murah dan lebih banyak tersedia seperti elektrokardiografi (EKG) dan ekokardiografi tetapi fitur ini sendiri tidak terlalu spesifik dan seringkali terlewatkan. Bahkan beberapa fitur ekokardiografi juga memerlukan operator menguasai paket perangkat lunak khusus. Hal ini memakan waktu dan cenderung hanya dapat digunakan dalam praktik setelah dicurigai adanya penyakit ini. Strategi deteksi secara umum seharusnya tidak memerlukan pemrosesan khusus dan dapat dikerjakan dengan data input yang tersedia secara luas. AI, sebuah alat pembelajaran mesin yang tidak memerlukan interpretasi manusia, dapat secara akurat mendeteksi amiloidosis jantung menggunakan kombinasi EKG dan ekokardiografi, hal ini juga memungkinkan untuk mendeteksi penyakit langka lainnya. Goto dkk. melatih semua model dengan Keras 2.3.0 pada *backend* Tensorflow

1.14.0.⁶

Nyeri dada akut adalah salah satu alasan paling umum untuk presentasi ke instalasi gawat darurat. Namun, diagnosis banding nyeri dada dan kebutuhan untuk menyingkirkan kemungkinan diagnosis penyakit arteri koroner menciptakan skenario yang kompleks untuk dokter UGD.⁸ CT Angiografi *triple-rule-out* memungkinkan penilaian simultan arteri koroner, aorta, dan arteri pulmonalis dalam satu tes diagnostik. Pendekatan ini paling tepat untuk pasien dengan risiko sindrom koroner akut dengan risiko rendah hingga menengah dan kondisi di mana gejala juga dapat dikaitkan dengan emboli paru atau diseksi aorta.⁹ Sejak deskripsi awal, beberapa penelitian telah menunjukkan akurasi diagnostik yang baik dari CT angiografi *triple-rule-out* untuk evaluasi penyakit arteri koroner. Secara umum, penggunaan CT jantung dalam pengaturan nyeri dada akut telah terbukti meningkatkan efektivitas evaluasi di UGD, meskipun beberapa peneliti berpendapat bahwa tingkat paparan radiasi secara keseluruhan dapat meningkat.¹⁰ Penelitian Martin *et al.* menunjukkan bahwa CT *Fractional Flow Reserve (FFR)* berbasis AI yang berasal dari set data CT angiografi *triple-rule-out* memberikan nilai diagnostik dan prognostik tambahan dalam evaluasi pasien yang datang ke UGD dengan nyeri dada dan menambahkan CT FFR di UGD dapat mengurangi kebutuhan akan pemeriksaan penunjang lebih lanjut.¹¹

Myocardial perfusion imaging (MPI) dapat menentukan pasien mana yang memerlukan rujukan untuk angiografi koroner dan mereka yang akan mendapat manfaat dari revaskularisasi koroner. ML terdiri dari metode terawasi, tidak terawasi, dan penguatan. Dalam kardiologi nuklir, ML yang diawasi sering digunakan. Pembelajaran yang diawasi menggunakan kumpulan data dengan kelas atau hasil yang diklasifikasikan. Dalam pembelajaran tanpa pengawasan, pembelajaran mendalam

mendapatkan daya tarik yang signifikan di bidang kardiologi. Arsajani *et al.* melakukan penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan akurasi MPI untuk prediksi *coronary artery disease* (CAD) dengan menggunakan algoritma pembelajaran terawasi di 957 studi dengan memanfaatkan variabel perfusi dan tingkat fungsional. Pada studi tersebut, sensitivitas dan spesifisitas ML dianggap lebih unggul. Selain itu, Arsajani juga melakukan penelitian lain untuk memprediksi CAD dengan mengintegrasikan data klinis dan fitur pencitraan dengan algoritma ML untuk meningkatkan akurasi SPECT pada 1181 pasien. Algoritma ML terawasi atau *logit-boost* digunakan dalam penelitian ini. Total defisit perfusi dihitung dengan perangkat lunak kuantifikasi otomatis dan 2 pembaca ahli. ML memiliki akurasi yang mirip dengan ahli 1 tetapi lebih baik daripada total defisit posisi supine/prone dan ahli 2. Arsajani *et al.* juga melakukan penelitian untuk menentukan manfaat revaskularisasi dini pada pasien dengan dugaan CAD dengan memanfaatkan pendekatan ML yang diintegrasikan data klinis dan pencitraan pada 713 pasien yang menjalani pemeriksaan MPI SPECT. Penelitian ini menggunakan algoritma pembelajaran terawasi *logit-boost*. Prediksi revaskularisasi dengan algoritma ML dibandingkan dengan dua pembaca berpengalaman dengan menggunakan data pencitraan, kuantitatif, dan klinis. Sensitivitas algoritma ML mirip dengan satu pembaca. Namun, spesifisitas algoritma ML ditemukan lebih unggul dibandingkan kedua pembaca ahli ($p < 0,05$) dan mirip dengan defisit perfusi total ($p < 0,05$). Penelitian Alonso *et al.* dan Betancur *et al.* menggunakan SPECT MPI dengan algoritma ML. Penelitian Alonso menunjukkan algoritma ML dapat memprediksi risiko kematian karena masalah jantung sedangkan Betancur *et al.* menggunakannya untuk memprediksi kejadian kardiovaskular utama yang merugikan. Keduanya menunjukkan hasil yang lebih unggul pada algoritma ML. (*Major Adverse Cardiovascular Events*;

MACE).¹²⁻¹⁷

Langkah selanjutnya dalam *rendering* dan visualisasi 3D/4D yang lebih realistis adalah holografi. Namun, hal ini membutuhkan rekonstruksi prospektif berdasarkan CT atau MRI sebelumnya sebelum pasien memasuki laboratorium intervensi. Jalur optimal untuk mencapai ini adalah menghasilkan generasi visualisasi *real-time* virtual dan realitas campuran. Perangkat seperti HoloLens™ (Microsoft, Redmond, WA, USA) dapat menyediakan pengaturan seperti itu.^{18,19}

Kemampuan untuk melakukan prosedur jarak jauh telah terbukti baik untuk komunikasi kabel maupun nirkabel. Hal ini ditingkatkan lagi dengan otomatisasi parsial menggunakan pembelajaran mesin dan AI, operasi jarak jauh dapat menjadi bagian integral dari prosedur intervensi. Kami mengantisipasi sejumlah manfaat bagi operator dan pasien. Salah satu manfaat tersebut adalah kemungkinan untuk menstandarisasi kinerja PCI dengan menggunakan kontrol robotik canggih untuk memandu dan memindahkan kabel koroner dalam kasus yang kompleks dan untuk akses cabang samping, dengan lebih sedikit ketergantungan pada pengalaman operator. Selain itu, AI dan pembelajaran mesin memberikan peluang untuk hasil yang lebih baik dengan memungkinkan perencanaan PCI praprosedural yang baik. Selain itu, ini memungkinkan panduan jarak jauh untuk operator lokal oleh operator jarak jauh yang berpengalaman, atau bahkan pelaksanaan PCI oleh operator ahli melalui panduan jarak jauh penuh. Selain itu, prosedur jarak jauh memungkinkan penyediaan intervensi koroner atau neurologis darurat yang lebih baik dengan akses ke operator terbaik di zona waktu yang berbeda, serta menawarkan intervensi koroner, perifer, dan neurologis lanjutan oleh operator terampil di area yang kurang terlayani dengan jumlah dokter spesialis terbatas.⁷

Sebuah inovasi terbaru yang dikenal sebagai

automatic transform by manifold approximation (AUTOMAP) memiliki kemampuan untuk merekonstruksi gambar dari berbagai modalitas seperti *PET scan*. Tidak memerlukan seorang ahli. Hal ini dapat mengurangi paparan dosis pada pasien selama SPECT dan membuat gambar berkualitas tinggi. Pembelajaran mendalam dapat meningkatkan kualitas perfusi gambar SPECT atau representasi gambar pada *polar map*.²⁰

Masih banyak tantangan yang perlu dipertimbangkan sebelum mengandalkan AI dalam praktisi klinis. Pertama, dataset harus dideidentifikasi dan harus dibagi antar institusi. Kedua, untuk set data digunakan secara luas, diperlukan beberapa persetujuan dewan peninjau institusional. Hal ini dapat memakan banyak waktu. Bahkan ketika pengaturan algoritma yang sempurna, jika data yang dimasukkan sebelumnya berkualitas buruk atau bias, interpretasinya juga akan berkualitas buruk. Selain itu, penekanan harus ditempatkan pada pembuatan standar seragam yang konsisten di seluruh vendor, sehingga memungkinkan integrasi antara algoritme yang berbeda dan memungkinkan algoritme yang sama untuk berjalan pada peralatan yang berbeda. Akan sangat membantu jika memiliki seperangkat alat standar untuk manajemen data AI. Standar untuk manajemen AI ini akan mencakup nomenklatur standar yang digunakan untuk membuat sistem yang seragam untuk penyimpanan dan pengambilan data.^{7,21}

Masalah medikolegal untuk keputusan berbasis AI masih dalam perdebatan. Misalnya, apakah dokter akan merasa nyaman secara hukum dengan keputusan pengobatan berdasarkan AI, karena dokter tetap bertanggung jawab? Keamanan dan efektivitas algoritma tersebut telah ditangani baru-baru ini oleh Badan Pengawas Obat dan Makanan Amerika Serikat (FDA) dan Uni Eropa (UE), yang telah mengeluarkan pedoman peraturan untuk implementasi AI,

yang memerlukan evaluasi sebelumnya sebelum perangkat lunak AI dapat digunakan sebagai alat kesehatan. Sementara banyak pertanyaan perlu dijawab sehubungan dengan AI dalam kedokteran, dua perhatian utama adalah hasil "kotak hitam", yang tidak selalu berhubungan dengan mekanisme patofisiologis, dan pertanyaan mengenai peran dokter di masa depan dalam lingkungan AI. Kita harus memastikan bahwa kita tidak akan kehilangan "rasa klinis" kita karena terbiasa mengandalkan diagnosis dan terapi berbasis AI.⁷

III. KESIMPULAN

Artificial intelligence menawarkan solusi akan beberapa permasalahan pada kardiologi. *Artificial intelligence* berpotensi meningkatkan kualitas pelayanan kedokteran pada bidang kardiologi. Perlu adanya standar tertentu dalam manajemen kedokteran berbasis AI.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amisha, Malik P, Pathania M, Rathaur V. Overview of artificial intelligence in medicine. *J Family Med Prim Care*. 2019;8(7):2328. doi:10.4103/jfmpe.jfmpe_440_19
- [2] Briganti G, Le Moine O. Artificial Intelligence in Medicine: Today and Tomorrow. *Front Med*. 2020;7:27. doi:10.3389/fmed.2020.00027
- [3] Buch VH, Ahmed I, Maruthappu M. Artificial intelligence in medicine: current trends and future possibilities. *Br J Gen Pract*. 2018;68(668):143-144. doi:10.3399/bjgp18X695213
- [4] Davis A, Billick K, Horton K, et al. Artificial Intelligence and Echocardiography: A Primer for Cardiac Sonographers. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2020;33(9):1061-1066. doi:10.1016/j.echo.2020.04.025
- [5] Bergamini M, Iora PH, Rocha TAH, et al. Mapping risk of ischemic heart disease using machine learning in a Brazilian state. Tolkacheva EG, ed. *PLoS ONE*. 2020;15(12):e0243558. doi:10.1371/journal.pone.0243558
- [6] Goto S, Mahara K, Beussink-Nelson L, et al. Artificial intelligence-enabled fully automated detection of cardiac amyloidosis using electrocardiograms and echocardiograms. *Nat Commun*. 2021;12(1):2726. doi:10.1038/s41467-021-22877-8
- [7] Beyar R, Davies JE, Cook C, Dudek D, Cummins PA, Bruining N. Robotics, imaging, and artificial intelligence in the catheterisation laboratory. *EuroIntervention*. 2021;17(7):537-549. doi:10.4244/EIJ-D-21-00145
- [8] Mahler SA, Riley RF, Hiestand BC, et al. The HEART Pathway Randomized Trial: Identifying Emergency Department Patients With Acute Chest Pain for Early Discharge. *Circ: Cardiovascular Quality and Outcomes*. 2015;8(2):195-203. doi:10.1161/CIRCOUTCOMES.114.001384
- [9] Burris AC, Boura JA, Raff GL, Chinnaiyan KM. Triple Rule Out Versus Coronary CT Angiography in Patients With Acute Chest Pain. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2015;8(7):817-825. doi:10.1016/j.jcmg.2015.02.023
- [10] Hoffmann U, Truong QA, Schoenfeld DA, et al. Coronary CT Angiography versus Standard Evaluation in Acute Chest Pain. *N Engl J Med*. 2012;367(4):299-308. doi:10.1056/NEJMoa1201161
- [11] Martin SS, Mastrodicasa D, van Assen M, et al. Value of Machine Learning-based Coronary CT Fractional Flow Reserve Applied to Triple-Rule-Out CT Angiography in Acute Chest Pain. *Radiology: Cardiothoracic Imaging*. 2020;2(3):e190137. doi:10.1148/ryct.2020190137
- [12] Seetharam K, Shrestha S, Mills JD, Sengupta PP. Artificial Intelligence in Nuclear Cardiology: Adding Value to Prognostication. *Curr Cardiovasc Imaging Rep*. 2019;12(5):14. doi:10.1007/s12410-019-9490-8
- [13] Arsanjani R, Xu Y, Dey D, et al. Improved Accuracy of Myocardial Perfusion SPECT for the Detection of Coronary Artery Disease Using a Support Vector Machine Algorithm. *J Nucl Med*. 2013;54(4):549-555. doi:10.2967/jnumed.112.111542
- [14] Arsanjani R, Xu Y, Dey D, et al. Improved accuracy of myocardial perfusion SPECT for detection of coronary artery disease by machine learning in a large population. *J Nucl Cardiol*. 2013;20(4):553-562. doi:10.1007/s12350-013-9706-2
- [15] Arsanjani R, Dey D, Khachatryan T, et al. Prediction of revascularization after myocardial perfusion SPECT by machine learning in a large population. *J Nucl Cardiol*. 2015;22(5):877-884. doi:10.1007/s12350-014-0027-x
- [16] Haro Alonso D, Wernick MN, Yang Y, Germano G, Berman DS, Slomka P. Prediction of cardiac death after adenosine myocardial perfusion SPECT based on machine learning. *J Nucl Cardiol*. 2019;26(5):1746-1754. doi:10.1007/s12350-018-1250-7
- [17] Betancur J, Otaki Y, Motwani M, et al. Prognostic Value of Combined Clinical and Myocardial Perfusion Imaging Data Using Machine Learning. *JACC: Cardiovascular*

- Imaging.* 2018;11(7):1000-1009.
doi:10.1016/j.jcmg.2017.07.024
- [18] Kasprzak JD, Pawlowski J, Peruga JZ, Kaminski J, Lipiec P. First-in-man experience with real-time holographic mixed reality display of three-dimensional echocardiography during structural intervention: balloon mitral commissurotomy. *European Heart Journal*. Published online April 12, 2019. doi:10.1093/eurheartj/ehz127
- [19] Kasprzak JD, Witowski J, Pawlowski J, Peruga JZ, Złahoda-Huzior A. Percutaneous patent ductus arteriosus closure using intraprocedural mixed reality visualization of 3D computed tomography angiography data: first-in-man experience. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging.* 2019;20(7):839-839. doi:10.1093/ehjci/jez008
- [20] Zhu B, Liu JZ, Cauley SF, Rosen BR, Rosen MS. Image reconstruction by domain-transform manifold learning. *Nature.* 2018;555(7697):487-492. doi:10.1038/nature25988
- [21] Shrestha S, Sengupta PP. Machine learning for nuclear cardiology: The way forward. *J Nucl Cardiol.* 2019;26(5):1755-1758. doi:10.1007/s12350-018-1284-x