

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Nyeri merupakan fenomena kompleks yang dialami secara subjektif oleh setiap individu dan menjadi salah satu alasan utama kunjungan medis di seluruh dunia. Sekitar 20% populasi global menderita nyeri kronis, dan 10% mengalami nyeri yang berdampak pada kualitas hidup dan produktivitas mereka [1]. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada kualitas hidup individu, tetapi juga menimbulkan beban ekonomi dan sosial yang signifikan pada sistem layanan kesehatan.

Meskipun nyeri memiliki dampak luas, identifikasinya hingga kini masih sangat bergantung pada laporan subjektif pasien. Pendekatan ini rentan terhadap bias, terutama ketika melibatkan kelompok rentan seperti bayi, lansia, atau pasien dengan gangguan komunikasi [2]. Hal ini menciptakan kebutuhan mendesak akan metode deteksi nyeri yang lebih objektif dan dapat diandalkan lintas populasi.

Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan non-invasif berbasis radar mulai dikembangkan sebagai alternatif diagnostik yang menjanjikan. Teknologi Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar terbukti efektif untuk deteksi objek halus dan pemantauan kondisi biologis manusia tanpa memerlukan kontak langsung, bahkan dalam kondisi gelap atau tertutup [3], [4], [5]. Keunggulan ini membuka jalan bagi aplikasi radar dalam pemantauan kesehatan secara real-time. Kemajuan dalam bidang kecerdasan buatan (AI) turut memperkuat potensi teknologi radar dalam dunia medis. AI memungkinkan analisis data kompleks secara efisien dan presisi tinggi. Kombinasi algoritma Convolutional Neural Network (CNN) dan Neural Network telah menunjukkan akurasi tinggi dalam mengenali pola ekspresi wajah yang berkaitan dengan nyeri [2], khususnya jika dipadukan dengan data spasial 3D yang dihasilkan oleh radar MIMO [6].

Hasil studi terkini menunjukkan bahwa radar MIMO mampu mencapai akurasi lebih dari 90% dalam mengklasifikasi ekspresi wajah termasuk nyeri, bahkan melebihi performa kamera atau sensor berbasis kontak [6]. Pendekatan serupa juga telah diterapkan untuk mengenali aktivitas manusia secara non-invasif,

termasuk melalui penghalang seperti dinding [7], menegaskan kemampuan radar dalam mendeteksi sinyal biologis secara fleksibel.

Lebih jauh, radar MIMO juga telah digunakan dalam aplikasi pemantauan lansia, pengukuran parameter vital, dan pengenalan pola makan menggunakan radar mmWave 3D [8], [9]. Implementasi ini memperkuat posisi radar sebagai alat non-invasif yang multifungsi dalam berbagai konteks kesehatan.

Namun, salah satu tantangan utama yang masih dihadapi adalah generalisasi model AI lintas populasi. Studi menunjukkan bahwa model AI cenderung menunjukkan bias berdasarkan usia, jenis kelamin, dan ras [10]. Oleh karena itu, pengembangan dataset yang representatif dan inklusif menjadi sangat penting untuk menciptakan sistem deteksi yang adil dan dapat diterapkan secara luas [5], [11].

Selain aspek algoritmik, tantangan teknis seperti desain gelombang radar juga turut berperan dalam efektivitas sistem. Desain yang optimal diperlukan untuk meningkatkan akurasi, khususnya dalam lingkungan yang padat sinyal [12]. Hal ini perlu didukung oleh arsitektur komputasi yang efisien seperti pemrosesan berbasis GPU atau sistem terdistribusi untuk mengelola volume data besar secara real-time [13].

Evaluasi terhadap sistem yang ada menunjukkan bahwa kualitas data radar sangat dipengaruhi oleh aspek desain perangkat keras, termasuk penggunaan antena berbasis metamaterial dan simulasi radar yang realistis [14], [15]. Optimalisasi komponen ini menjadi kunci dalam menghasilkan sinyal berkualitas tinggi untuk pelatihan model AI yang andal.

Sayangnya, masih terdapat keterbatasan dalam jumlah studi yang secara eksplisit mengintegrasikan radar MIMO dan algoritma CNN untuk mendeteksi nyeri secara non-invasif lintas populasi. Beberapa penelitian seperti [16], [17] menunjukkan potensi penggunaan radar dan AI untuk diagnosis penyakit lain seperti melanoma, namun belum secara khusus membahas deteksi nyeri. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk meninjau literatur secara sistematis mengenai integrasi teknologi radar MIMO dan algoritma CNN dalam konteks deteksi nyeri non-invasif lintas populasi. Diharapkan, studi ini dapat memperkaya pemahaman ilmiah, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, serta

membuka arah baru bagi pengembangan alat diagnostik yang cerdas, inklusif, dan efisien dalam sektor kesehatan global.

1.2.Rumusan Masalah

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan sistem deteksi nyeri non-invasif yang akurat, adaptif, dan dapat diaplikasikan secara luas di berbagai populasi. Teknologi radar MIMO dan kecerdasan buatan telah menunjukkan potensi besar dalam mengukur respons fisiologis dan ekspresi wajah yang berkaitan dengan nyeri. Namun, masih terdapat kesenjangan dalam hal generalisasi model, validasi klinis, serta integrasi multimodal lintas populasi. Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini difokuskan pada pertanyaan-pertanyaan berikut:

1. Bagaimana efektivitas teknologi radar MIMO dan algoritma kecerdasan buatan (CNN) dalam mendeteksi nyeri secara non-invasif berdasarkan data fisiologis dan ekspresi wajah, dibandingkan dengan pendekatan tradisional atau metode berbasis sensor lainnya?
2. Sejauh mana sistem berbasis radar MIMO dan AI dapat digeneralisasikan untuk mendeteksi nyeri pada populasi yang beragam (misalnya, usia, jenis kelamin, latar belakang etnis, dan status medis), serta bagaimana performanya di lingkungan klinis nyata dibandingkan dengan pengujian di laboratorium?
3. Apa saja tantangan teknis dan etis yang muncul dalam pengembangan dan implementasi sistem deteksi nyeri non-invasif berbasis radar-AI, dan bagaimana pendekatan sistematis dapat mengidentifikasi arah penelitian masa depan yang menjawab keterbatasan tersebut?

1.3.Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1. Tujuan

Mengidentifikasi dan menganalisis efektivitas teknologi radar MIMO dan algoritma kecerdasan buatan, khususnya model CNN, dalam mendeteksi nyeri secara non-invasif berdasarkan sinyal fisiologis dan ekspresi wajah, serta membandingkannya dengan pendekatan tradisional dan metode berbasis sensor lainnya.

Mengevaluasi sejauh mana sistem deteksi nyeri berbasis radar MIMO dan AI dapat diterapkan secara general pada populasi yang beragam, serta mengkaji tantangan teknis, etis, dan operasional yang dihadapi dalam penerapannya di lingkungan klinis nyata untuk merumuskan arah pengembangan teknologi yang lebih inklusif dan andal.

1.3.2. Manfaat

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam memperkaya literatur ilmiah terkait teknologi deteksi nyeri dengan beberapa poin utama berikut:

1. Pengembangan Kerangka Konseptual Baru: Penelitian ini menggabungkan teknologi radar MIMO dengan algoritma CNN, menciptakan pendekatan interdisipliner baru yang belum banyak dikaji secara mendalam dalam literatur sebelumnya. Hal ini membuka peluang untuk memperluas pemahaman tentang integrasi data fisiologis dan ekspresi wajah dalam model deteksi nyeri berbasis AI.
2. Penyempurnaan Model Kecerdasan Buatan dalam Konteks Medis: Studi ini memperkuat validitas dan keandalan model deep learning dalam mengenali pola nyeri kompleks yang sebelumnya sulit diakses melalui metode konvensional. Ini memberikan dasar ilmiah untuk pengembangan teori dalam bidang neuroinformatika, computational pain assessment, dan human-centered AI.
3. Identifikasi Kesenjangan Penelitian Sebelumnya: Dengan mengevaluasi keterbatasan teknologi deteksi nyeri yang berbasis sensor kontak atau pengamatan manual, penelitian ini menyoroti kebutuhan akan pendekatan non-invasif yang lebih objektif dan adaptif, yang selama ini kurang diangkat dalam studi terdahulu.

1.4. Pertanyaan Penelitian

1. Bagaimana distribusi penggunaan database dan sensor (UNBC-McMaster, BioVid, Medical Imaging, Radar MIMO/SISO, fisiologis multimodal, dan lainnya) dalam penelitian deteksi nyeri non-invasif, serta apa implikasinya terhadap validitas hasil?

2. Bagaimana kinerja berbagai algoritma kecerdasan buatan (CNN, SVM, Neural Network, YOLO, Random Forest) dalam klasifikasi dan prediksi nyeri, serta sejauh mana pendekatan multimodal dapat meningkatkan akurasi deteksi?
3. Apa saja keterbatasan metodologis dan etis yang teridentifikasi (misalnya ukuran sampel, validitas pelabelan nyeri, replikabilitas, dan bias populasi), serta bagaimana rekomendasi sistematis dapat diusulkan untuk penelitian selanjutnya?