



Aplikasi Klinis AI dalam *Treatment Planning* Radioterapi untuk *Brain Tumor*

Siti Rahmania¹, Hesty Tandibali^{1*}, Erlinda Ratnasari Putri¹

¹ Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman
Jl. Barong Tongkok No 4, Gunung Kelua, Kecamatan Samarinda Ulu, Samarinda 75242, Kalimantan Timur, Indonesia

*E-mail korespondensi: hsttb.13@gmail.com

Article Info:

Received: 09-12-2024

Revised: 18-12-2024

Accepted: 19-12-2024

Keywords:

Brain Tumor, Radiotherapy, Treatment Planning



Abstract

Artificial Intelligence (AI) has emerged as a transformative innovation in radiotherapy, particularly in treatment planning for brain tumors. Its potential to enhance the effectiveness and safety of radiotherapy has driven significant advancements in the field. AI-based techniques, such as Convolutional Neural Networks (CNN), have been increasingly integrated into Magnetic Resonance Imaging (MRI) workflows for radiotherapy planning, representing a major leap forward in precision and efficiency. Radiotherapy plays a critical role in cancer management, where accuracy and efficiency are vital to achieving optimal therapeutic outcomes while minimizing damage to healthy tissues. This review analyzed 15 scientific articles focusing on AI applications in radiotherapy treatment planning. Narrative synthesis was employed to compare and summarize the findings, providing insights into the contributions of AI in improving treatment accuracy and efficiency. The analysis highlighted the utility of AI in tasks such as automatic segmentation, functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI), and Diffusion Tensor Imaging (DTI) data processing. These technologies facilitate more accurate delineation of tumor boundaries and surrounding critical structures. Moreover, AI-driven tools optimize dose planning and reduce radiation exposure to healthy tissues, thereby improving the precision of brain cancer treatments. By enhancing both the accuracy and efficiency of radiotherapy, AI offers the potential to improve patient outcomes significantly. This review underscores the growing importance of AI as an essential tool for advancing radiotherapy, particularly for complex cases like brain tumors, where precision is paramount.

PENDAHULUAN

Artificial Intelligence (AI) muncul sebagai inovasi yang berperan penting dalam radioterapi, terutama dalam perencanaan radioterapi (RT). AI sendiri berpotensi besar dalam peningkatan efektivitas dan keamanan radioterapi. Kemampuan AI dalam melakukan segmentasi otomatis pada suatu citra, memungkinkan dokter untuk lebih mudah mengidentifikasi tumor dan jaringan sehat dengan keakuratan tinggi, sehingga dapat meningkatkan efektivitas perencanaan dosis radiasi yang akan diberikan. Dengan mengkolaborasi AI dengan modalitas yang ada, proses diagnosis dan perencanaan pengobatan dapat ditingkatkan. Modalitas pencitraan yang sering digunakan dan efektif dalam pencitraan radioterapi salah satunya adalah MRI [1].

Magnetic Resonance Imaging (MRI) adalah modalitas pencitraan pilihan untuk *brain tumor* karena dasar fisiologis dan biokimianya. Oleh karena itu, penggunaan MRI untuk perencanaan

radioterapi (RT) pada brain tumor bertujuan untuk meningkatkan penggambaran jaringan lunak dan mendefinisikan margin tumor dengan lebih akurat. Namun, beberapa kekurangan dalam penggunaan MRI untuk perencanaan RT telah menghambat penerapannya secara luas di bidang ini. Kekurangan tersebut meliputi kurangnya informasi densitas elektron yang dibutuhkan untuk perhitungan dosis serta potensi distorsi geometris pada gambar MRI, yang dapat mengakibatkan ketidakakuratan dalam penentuan posisi tumor dan jaringan sehat. Karena gambar *Computed Tomography* (CT) memiliki akurasi geometris yang sangat baik dan memberikan informasi densitas elektron secara langsung, perencanaan RT berbasis MRI biasanya diimplementasikan bersama dengan gambar CT dan dengan demikian melibatkan beberapa bentuk prosedur registrasi gambar [2].

Teknik MRI yang canggih dapat menghasilkan pencitraan biomarker fungsional dan kuantitatif untuk menilai secara mikroskopis perluasan infiltrasi tumor, sehingga meningkatkan akurasi dalam penentuan target volume. Beberapa teknik MRI fungsional, termasuk *Diffusion Weighted Imaging* (DWI), *Diffusious Tensor Imaging* (DTI), *Perfusion-Weighted Imaging* (PWI), pencitraan spektroskopi MR (MRSI) dan MRI fungsional tergantung tingkat oksigenasi darah (BOLD-fMRI) digunakan secara luas dalam penilaian *brain tumor* dan juga dapat diintegrasikan ke dalam perencanaan RT. MRI multiparametrik (mpMRI) adalah teknik yang mengintegrasikan lebih dari dua jenis pencitraan MRI, baik fungsional maupun anatomis, untuk mengkarakterisasi heterogenitas tumor secara lebih mendalam. Teknik ini memanfaatkan berbagai parameter, seperti difusi, perfusi, dan spektroskopi, untuk memberikan gambaran yang rinci tentang struktur, fungsi, dan metabolisme tumor. Pendekatan ini meningkatkan akurasi dalam diagnosis, perencanaan perawatan, dan evaluasi respons terhadap terapi. Teknik MRI yang canggih ini dapat menghasilkan biomarker MRI kuantitatif yang berpotensi meningkatkan deteksi tepi TV otak dan akurasi penggambaran [2].

Karena ketergantungannya yang besar pada pencitraan, pengobatan dan tindak lanjut tumor otak adalah bagian yang sangat membutuhkan panduan dokter dengan AI. Sebagai contoh, glioblastoma (GBM) adalah bentuk kanker otak yang parah dengan rata-rata kelangsungan hidup 15-16 bulan. Pengobatan standar untuk GBM pertama-tama memerlukan reseksi tumor yang meningkatkan kontras sebanyak mungkin pada MRI dengan kontras yang ditingkatkan T1 (CE-T1w). Tumor yang tersisa diobati dengan kemoterapi *temozolomide* *ajuvan* ditambah dengan terapi radiasi yang menargetkan radiasi dosis tinggi pada sisa tumor yang meningkat pada CE-T1w dan dosis yang lebih rendah pada edema hiperintens pada *T2-weighted fluid-attenuated inversion recovery* (T2w/FLAIR) MRI. Glioblastoma multiforme (GBM) adalah brain tumor agresif yang memerlukan perencanaan pengobatan yang tepat dan efisien. Mengingat tantangan dalam diagnosis dan pengobatan, tinjauan ini penting untuk mengevaluasi peran AI dalam meningkatkan akurasi dan kecepatan pengobatan. Setiap langkah perawatan bergantung pada interpretasi pencitraan, dan alat AI dapat membantu dokter merawat pasien GBM dengan lebih tepat dan cepat [3].

Brain Tumor

Brain Tumor adalah pertumbuhan sel-sel otak yang tidak biasa. Tumor ini dapat berupa non-kanker (jinak) atau kanker (ganas), dengan gejala yang bervariasi tergantung pada ukuran dan lokasi tumor di otak. Tumor ganas dapat bermula di otak atau menyebar ke sana dari bagian tubuh lainnya. Semua jenis *brain tumor* dapat menyebabkan gejala yang berbeda, tergantung pada bagian otak mana yang terkena. Gejala-gejala ini dapat berupa sakit kepala, kejang, masalah penglihatan, mual, dan gangguan mental. *Brain tumor* adalah salah satu kondisi paling mematikan yang dapat menyerang orang dari segala usia dan jenis kelamin. *Brain tumor* menjadi lebih umum terjadi pada anak-anak, mungkin karena meningkatnya penggunaan teknologi seperti ponsel, tablet, dan perangkat lainnya. Namun, penting untuk diperhatikan, bahwa gejala-gejala ini juga dapat berasal dari masalah medis lainnya. Ada lebih dari 120 jenis *primary brain tumors* yang berbeda. *Brain tumor* primer, dengan glioma sebagai jenis brain tumor yang paling

umum. Deteksi dini brain tumor, terutama glioma, sangat penting untuk memilih pengobatan yang paling efektif dan memperpanjang kehidupan pasien. Teknik pencitraan yang akurat, dengan bantuan AI, dapat meningkatkan akurasi diagnosis dan treatment planning, sehingga mendukung pengobatan yang lebih tepat. Salah satu metode yang digunakan untuk mendeteksi kelainan pada otak adalah melalui MRI dan CT scan, yang dapat mengidentifikasi perubahan dalam bentuk, ukuran, atau lokasi tumor. MRI lebih sering digunakan karena memberikan informasi yang lebih terperinci mengenai struktur otak. Namun, proses mengklasifikasikan tumor otak secara manual dari hasil pemindaian MRI memakan waktu, yang dapat memperlambat diagnosis dan pengambilan keputusan pengobatan. Hal ini dapat berdampak pada keterlambatan dalam perencanaan terapi yang tepat waktu, yang pada akhirnya mempengaruhi hasil pengobatan dan prognosis pasien [4].

Magnetic Resonance Imaging (MRI)

MRI adalah teknologi tanpa pengion menggunakan medan magnet yang kuat untuk memberikan informasi anatomi beresolusi tinggi dengan kontras jaringan lunak yang sangat baik. Dengan menggunakan teknik MRI yang spesifik, informasi fungsional seperti permeabilitas pembuluh darah perfusi tumor, tortuositas ruang ekstraseluler, status metabolik dan hipoksia juga dapat diperoleh [5].

MRI semakin banyak digunakan dalam perencanaan Radioterapi (RT) karena kontras jaringan lunaknya yang lebih unggul dibandingkan dengan CT [6]. Keuntungan MRI dibandingkan dengan CT scan untuk perencanaan radioterapi adalah kontras jaringan lunak yang sangat baik [6]. Penggabungan gambar set data CT dan MRI bersama dengan perhitungan dosis berbasis CT telah menjadi prosedur treatment planning pengobatan standar [7].

Computed Tomography (CT)

CT adalah alat diagnostik sinar-X yang digunakan tenaga medis untuk menampilkan atau menggambarkan tubuh berdasarkan sinar-X pada irisan tubuh yang akan ditampilkan pada komputer. CT-scan (*Computed Tomography Scan*) adalah prosedur untuk mendapatkan gambaran berbagai area kecil dalam tulang termasuk tengkorak kepala dan otak manusia. Citra hasil akuisisi atau rekaman CT-scan dapat membantu memperjelas adanya dugaan yang kuat tentang kelainan yang terjadi pada otak, misalnya : gambaran lesi dari tumor, hematoma dan abses, pendarahan pada otak serta perubahan vaskuler berupa malformasi, naik turunnya vaskularisasi dan infark. CT-Scan terdiri dari tiga bagian, pertama: Sistem Akuisisi Citra, Sistem Komputer dan Kendali, kedua: Stasiun Operasi, dan ketiga: Stasiun Pengamat. CT-Scan bekerja dalam sistem akuisisi citra terdapat dalam frame pipa dari mesin dan merupakan bagian sistem yang langsung berhadapan dengan pasien. Scanner terdiri atas sumber sinar-x, collimator, detektor, dan bagian akuisisi data. Akuisisi citra CT Scan otak umumnya dilakukan dalam bentuk 2 dimensi (2D) yang direkam dalam bentuk slice (iris) dengan jarak tertentu antara slice satu terhadap slice lainnya [8].

Treatment Planning

Integrasi teknik berbasis AI dalam MRI untuk *treatment planning* radioterapi (RT) merupakan kemajuan yang signifikan dalam bidang ini, meningkatkan ketepatan dan efektivitas pengobatan kanker. Metode akuisisi gambar memanfaatkan algoritma *machine learning* untuk mengoptimalkan MRI secara dinamis, sehingga menghasilkan gambar yang berkualitas lebih tinggi dan/atau mengurangi waktu akuisisi. Selain akuisisi, pasca-pemrosesan gambar MRI menggunakan AI juga memiliki potensi untuk merevolusi bidang ini. Selain itu, algoritma yang digerakkan oleh AI dapat secara otomatis menyegmentasikan jaringan, mengidentifikasi tumor, dan menggambarkan organ yang berisiko dengan akurasi yang luar biasa. Ketersediaan segmentasi otomatis, pada gilirannya, mengurangi beban kerja pada ahli onkologi radiasi dan

dokter, meminimalkan kesalahan manusia dan variabilitas, sambil memastikan bahwa struktur kritis dipetakan secara akurat untuk terapi yang ditargetkan. Selain itu, dapat menggunakan segmentasi citra untuk mengetahui area tumor dan non tumor pada suatu citra [1].

Segmentasi

Segmentasi citra merupakan proses membagi suatu citra menjadi wilayah wilayah yang homogen berdasarkan kriteria keserupaan tertentu antara tingkat keabuan suatu piksel dengan tingkat keabuan piksel-piksel tetangganya. Salah satu metode segmentasi ialah *Active contour* yang merupakan metode segmentasi menggunakan model kurva tertutup yang dapat bergerak melebar ataupun menyempit. Metode segmentasi *active contour* dapat diaplikasikan untuk segmentasi kanker pada citra medis, proses penentuan volume kanker dan organ lain yang berisiko, dinamakan proses *contouring*. Segmentasi citra menggunakan metode *active contour* dapat memberikan hasil yang lebih presisi, namun teknik ini sering digabungkan dengan pendekatan berbasis pembelajaran mendalam seperti, *Convolutinal Neural Network* (CNN) untuk aplikasi medis termasuk deteksi kanker dan klasifikasi. Metode ini menjadi lebih efisien dan akurat karena CNN dapat mengidentifikasi area target secara global dan memberikan prediksi awal yang baik, sementara *Active Contour* menyempurnakan batas area tersebut dengan lebih detail. Kombinasi ini memungkinkan segmentasi yang lebih presisi dan mampu menangani variasi bentuk dan ukuran objek secara lebih baik [9].

Convolutinal Neural Network (CNN)

Convolutinal Neural Network (CNN) adalah jaringan saraf manusia dan hewan (neuron). CNN terdiri dari tumpukan lapisan konvolusional dengan parameter berbeda (filter, *padding*, *stride*, dll). Setiap *input* disusun dalam bentuk matriks tiga dimensi: tinggi, lebar, dan kedalaman. Secara umum nilai tinggi sama dengan nilai lebar. Untuk matriks masukan RGB, nilai salurannya adalah 3, dan saluran mewakili nilai kedalaman matriks. Pada akhir rangkaian lapisan CNN, model kernel dihasilkan, setelah itu melanjutkan proses koneksi penuh. CNN merupakan evolusi dari jaringan saraf manusia dan terinspirasi oleh persepsi multilayer untuk mengklasifikasikan atau mengenali suatu objek atau penyakit yang direkam sebagai gambar, yang kemudian diproses. Penggunaan CNN sering dikombinasikan dengan algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN) untuk meningkatkan akurasi klasifikasi fitur yang diekstraksikan dari citra [10].

K-Nearest Neighbor (K-NN)

K-NN termasuk kelompok *instance-based learning*. Algoritma ini juga merupakan salah satu teknik *lazy learning*. K-NN dilakukan dengan mencari kelompok k objek dalam data *training* yang paling dekat (mirip) dengan objek pada data baru atau data *testing*. Diperlukan suatu sistem klasifikasi sebagai sebuah sistem yang mampu mencari informasi. Dalam ilmu kesehatan menggunakan metode KNN juga dapat digunakan untuk mencari solusi dari pasien baru berdasarkan kedekatan kasus pasien lama[11].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis untuk mengevaluasi penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) dalam perencanaan radioterapi (RT) untuk tumor otak. Proses pengumpulan data dimulai dengan mencari artikel di berbagai *database* ilmiah seperti Google Scholar, PubMed, Scopus, Embase, dan Web of Science dengan menggunakan kata kunci terkait AI, radioterapi, MRI, segmentasi otomatis, dan tumor otak. Tinjauan ini hanya mencakup mengenai bukti klinis tentang penggunaan teknik AI dalam perencanaan pengobatan radiasi, dengan fokus pada *treatment planning*, segmentasi *brain tumor* dan optimalisasi distribusi dosis radiasi.

Penelitian yang dipilih menggunakan berbagai teknik pencitraan, termasuk MRI, CT, dan PET, untuk membantu perencanaan pengobatan pasien tumor otak. Data yang diperoleh dari artikel-artikel ini dianalisis melalui sintesis naratif untuk membandingkan dan mengabstraksikan hasil setiap penelitian guna memberikan gambaran komprehensif tentang kontribusi AI dalam meningkatkan akurasi radioterapi. Artikel-artikel yang disertakan dikelompokkan berdasarkan teknik AI yang digunakan, seperti segmentasi otomatis, pemrosesan gambar, dan fusi gambar, serta hasil yang dicapai dengan penerapan AI pada setiap penelitian.

Dalam penelitian ini, AI didefinisikan sebagai penggunaan algoritma dan metode *machine learning* untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi segmentasi gambar, analisis data medis, dan *Treatment Planning*, dan terapi radiasi digunakan untuk mengobati *brain tumor* dengan fokus pada definisi sebagai penggunaan radiasi untuk pengobatan, perencanaan dosis dan fraksinasi untuk pengobatan yang efektif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan kemajuan signifikan dalam pengintegrasian AI untuk meningkatkan akurasi, efisiensi, dan ketepatan dalam perencanaan radioterapi.

Tabel 1. Penerapan AI dalam *Treatment Planning* untuk *Brain Tumor*

Nama Author (Tahun)	Modalitas	Aplikasi AI	Metode	Hasil
Tsang dkk., (2022) [12]	CT	CNN	Segmentasi otomatis menggunakan <i>machine learning</i> untuk menghasilkan rencana perawatan radioterapi.	Rencana otomatis menunjukkan kesesuaian yang baik dengan rencana manual, dengan nilai median D95% sebesar 95,2%.
Razek dk., (2021) [13]	MRI	CNN	Segmentasi otomatis menggunakan <i>machine learning</i> untuk mendiagnosis dan membedakan glioma dari lesi non-neoplastik.	Akurasi mencapai 92% dalam membedakan glioma dari lesi inflamasi.
Liu dkk., (2019) [14]	MRI	CNN	Segmentasi otomatis untuk menghasilkan <i>pseudo CT</i> menggunakan	<i>DeepMTP pseudo CT</i> menghasilkan dengan koefisien Dice tinggi dan kesalahan absolut rata-rata 75 ± 23 HU. Tidak ada perbedaan signifikan pada parameter

			deep learning pada gambar MRI	dosimetri antara deepMTP dan kVCT.
Putz., dkk (2023) [15]	MRI	CNN	Segmentasi otomatis <i>brain tumor</i> menggunakan <i>masker oracle (ground truth)</i>	Akurasi segmentasi otomatis <i>brain tumor</i> glioma menunjukkan <i>mbIoU</i> terbaik 0,762, dengan peningkatan DSC 3D rata-rata menjadi 0,919 saat menggabungkan masker aksial, sagital, dan koronal.
Ramesh., dkk (2023) [3]	MRI dan <i>BrICS-LIT Web Application</i>	CNN	Segmentasi tumor pasca-bedah untuk perencanaan radioterapi menggunakan model <i>deep learning</i> (Unet, ResUnet, Swin-Unet, 3D Unet, Swin-UNETR)	Model 3D Unet menunjukkan performa terbaik dengan skor Dice rata-rata 0,72 untuk GTV1 dan 0,73 untuk GTV2 pada dataset uji.
Wang dkk., (2024) [16]	CT	CNN	Segmentasi otomatis GTV pada CT pasien metastasis otak menggunakan U-Net dengan modul perhatian posisi (PAM)	Model segmentasi otomatis dengan PAM mencapai DSC $0,753 \pm 0,172$, lebih baik dari U-Net standar (DSC $0,691 \pm 0,142$), menghasilkan segmentasi yang lebih akurat dan mendekati <i>ground truth</i> .
LaBella et al. (2024) [17]	MRI (T1w post-kontras)	CNN	Segmentasi Otomatis dengan <i>nnUNet</i> , <i>Manual Correction</i> , <i>Dice Coefficient</i> , <i>Hausdorff Distance</i> .	Model segmentasi otomatis menunjukkan akurasi tinggi dengan <i>Dice Similarity Coefficient</i> dan 95% <i>Hausdorff distance</i> , memfasilitasi perencanaan radioterapi meningioma.
Hoof dkk., (2013) [18]	IMRT/V MAT dan CT	CNN	Evaluasi dosis SmART-Plan vs RCF	Kesesuaian perencanaan terapi SmART-Plan berhasil mencapai akurasi perencanaan dosis dengan deviasi kurang dari 5% untuk aplikasi radioterapi, sedangkan menggunakan film respons radiasi

				(RCF) enunjukkan akurasi prediksi dosis dengan penyimpangan rata-rata di bawah 3%.
Trusheim dkk., (2016) [19]	MRI, CT dan Software NovoTAL	CNN	Perencanaan terapi <i>TTFields</i> berdasarkan <i>neuro imaging</i>	Penggunaan <i>tumor treating fields (TTFields)</i> dapat meningkatkan median kelangsungan hidup pasien glioblastoma hingga 5,5 bulan dibandingkan dengan perawatan standar, dengan 43% pasien yang menerima <i>TTFields</i> mengalami peningkatan kualitas hidup yang signifikan
Kearney dkk., (2018) [20]	IMRT	CNN	Penerapan algoritma <i>machine learning</i> untuk mengotomatiskan segmentasi target, optimasi distribusi dosis, dan evaluasi kualitas rencana dalam proses perencanaan terapi IMRT untuk kanker kepala dan leher.	Pendekatan berbasis AI dalam perencanaan IMRT untuk kanker kepala dan leher mampu mengurangi waktu hingga lebih dari 50% sambil mencapai akurasi prediksi komplikasi jaringan sehat hingga 90%, dengan kualitas rencana yang setara atau lebih baik dibanding metode konvensional.
Ardan dan Indraswari dkk., (2024) [21]	MRI 3D	CNN	Penerapan teknik <i>deep learning</i> yang komprehensif untuk menganalisis citra MRI 3D.	Model segmentasi mencapai nilai dice sebesar 82%, sementara model klasifikasi keganasan tumor mencapai akurasi, presisi, <i>recall</i> , dan F1-score sebesar 97%. Model klasifikasi harapan hidup pasien, yang mempertimbangkan tingkat keganasan dan usia pasien, mencapai akurasi, presisi, <i>recall</i> , dan F1-score sebesar 77%.

Aldawsari dkk., (2023) [22]	MRI	CNN	CNN dengan arsitektur AlexNet, yang diterapkan untuk klasifikasi citra MRI tumor otak, menggunakan dataset sebanyak 7,022 citra MRI yang terbagi dalam empat kategori: glioma, meningioma, pituitary, dan non tumor.	Algoritma <i>Convolutional Neural Network</i> (CNN) dalam klasifikasi tumor otak berbasis citra MRI menghasilkan akurasi sebesar 95%, dengan presisi 86%, recall 90%, dan <i>F1-score</i> 88%, mengatasi keterbatasan diagnosis konvensional dan melampaui referensi utama yang mencapai akurasi 0,9068.
Andre dkk., (2021) [24]	MRI	CNN	CNN dengan arsitektur EfficientNet-B3 serta melakukan <i>hyper-parameter optimization</i> untuk membangun model terbaik yang diterapkan dalam bentuk sistem.	Pengujian model dengan <i>confusion matrix</i> , mendapatkan akurasi tertinggi pada eksperimen dengan skenario learning rate 0,02 dan neuron pada <i>dense layer</i> berjumlah 256 yang menghasilkan akurasi mencapai 99,7% dan mendapatkan nilai F1-Score tertinggi mencapai 99,6%.

Hasil penelitian yang disajikan dalam tabel 1, yang memuat penerapan AI dalam perencanaan pengobatan tumor otak, menunjukkan bahwa berbagai modalitas pencitraan medis memiliki efektivitas yang beragam dalam segmentasi dan klasifikasi *brain tumor*. Pembahasan berikut akan membandingkan berbagai aplikasi AI dan pendekatan segmentasi atau klasifikasi *brain tumor* yang telah diterapkan pada modalitas seperti CT, MRI, dan lainnya.

Dalam perencanaan radioterapi, penelitian oleh Tsang dkk., (2022) [12] dan Liu dkk., (2019) [14] berfokus pada modalitas yang berbeda namun memiliki tujuan serupa: meningkatkan akurasi dan efisiensi segmentasi untuk mendukung terapi. Tsang dkk., (2022) [12] menggunakan CNN pada pencitraan CT untuk segmentasi otomatis, menghasilkan median D95% sebesar 95,2%, yang sebanding dengan rencana manual. Sedangkan, Liu dkk., (2019) [14] mengembangkan *DeepMTP* untuk menghasilkan *pseudo CT* dari MRI, dengan koefisien Dice yang tinggi dan kesalahan absolut rata-rata sebesar 75 ± 23 HU. Kedua penelitian ini menunjukkan bagaimana AI dapat mengoptimalkan proses delineasi dan dosimetri, meskipun penggunaan *pseudo CT* lebih relevan dalam situasi di mana modalitas CT tidak tersedia atau tidak ideal.

Dalam aplikasi diagnostik, Razek dkk., (2021) [13] dan Ardan dan Indraswari dkk., (2024) [21] menggunakan CNN untuk membedakan jenis lesi dan melakukan prediksi klinis. Razek dkk., (2021) [13] mencatat akurasi 92% dalam membedakan glioma dari lesi inflamasi menggunakan MRI, yang menunjukkan keunggulan AI dalam menangani tantangan diagnostik. Sedangkan penelitian, Ardan dan Indraswari dkk., (2024) [21] lebih menekankan pada pendekatan 3D untuk segmentasi dan klasifikasi tumor, mencapai akurasi segmentasi 82% dan klasifikasi hingga 97%. Hasil ini menunjukkan bagaimana integrasi data spasial tambahan (seperti 3D MRI) dapat memberikan manfaat diagnostik dan prediksi yang lebih luas.

Pada segmentasi *brain tumor*, penelitian seperti Putz dkk., (2023) [15], Ramesh dkk., (2023) [3], dan Wang dkk., (2024) [16] berfokus kepada pentingnya inovasi dalam arsitektur model. Putz dkk., (2023) [15] menunjukkan bahwa kombinasi data multi-sudut (aksial, sagital, dan koronal) pada MRI meningkatkan akurasi segmentasi, dengan mIoU 0,762 dan DSC 3D rata-rata 0,919. Ramesh dkk., (2023) [3] menggunakan arsitektur *deep learning* modern, seperti 3D U-Net dan Swin-UNETR, yang menghasilkan skor Dice 0,72–0,73 untuk delineasi tumor pasca-operasi. Sedangkan penelitian, Wang dkk., (2024) [16] menambahkan modul perhatian posisi (PAM) pada U-Net, meningkatkan performa dengan DSC rata-rata $0,753 \pm 0,172$ dibandingkan U-Net standar. Penemuan ini menunjukkan bagaimana inovasi dalam arsitektur dapat secara signifikan mempengaruhi performa segmentasi.

Secara keseluruhan, penerapan CNN pada berbagai modalitas pencitraan, baik untuk segmentasi maupun klasifikasi, menunjukkan potensi yang sangat menjanjikan dalam meningkatkan efisiensi, akurasi, dan konsistensi di bidang radioterapi dan diagnostik tumor. Namun, masalah seperti variabilitas bentuk tumor, keterbatasan modalitas tunggal, dan *noise* pada data masih menjadi hambatan. Untuk mengatasi masalah tersebut, diperlukan modalitas gabungan seperti kombinasi CT, MRI dan eksplorasi arsitektur inovatif seperti model hybrid CNN-transformer. Metode ini dapat meningkatkan deteksi dini, segmentasi yang akurat, dan klasifikasi tumor terutama pada tumor yang kompleks. Selain itu, penggunaan AI yang lebih presisi dapat membantu penyesuaian pengobatan, pengambilan keputusan klinis, dan menjamin diagnosis yang konsisten. Langkah ini tidak hanya meningkatkan kualitas terapi dan prognosis pasien, tetapi juga meningkatkan potensi AI untuk mengoptimalkan pengobatan *brain tumor* di masa depan.

KESIMPULAN

Dalam perencanaan radioterapi tumor otak, penggunaan AI sangat memengaruhi akurasi, efisiensi, dan ketepatan pengobatan. Teknik segmentasi otomatis yang menggunakan metode berbasis kecerdasan buatan, seperti *Convolutional Neural Networks* (CNN) dan *Fuzzy C-Means*, dapat membantu dokter mengidentifikasi tumor dengan lebih tepat dan jaringan sehat dengan lebih cepat. Pengurangan dosis radiasi pada area fungsional dan jalur serat telah ditunjukkan dalam pengobatan dengan teknik fMRI dan DTI. Ini meningkatkan hasil terapeutik dan mengurangi efek samping pasien. Selain itu, untuk perencanaan dosis, konversi gambar MRI 3T menjadi gambar CT yang relevan memberikan hasil yang hampir sama dengan perencanaan berbasis CT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecerdasan buatan dapat meningkatkan pencitraan dan pengolahan data, yang memungkinkan perencanaan terapi yang lebih sesuai dan menyesuaikan dengan kebutuhan pasien.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada para peneliti sebelumnya dan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Mulawarman. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Erlinda Ratnasari Putri, M.Si dan Ibu Fatimah Kunti Hentihu, M.Si yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan jurnal penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. De Pietro *et al.*, "The role of MRI in radiotherapy planning: a narrative review 'from head to toe,'" *Insights Imaging*, vol. 15, no. 1, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1186/s13244-024-01799-1.
- [2] A. W. Beavis, P. Gibbs, R. A. Dealey, and V. J. Whitton, "Radiotherapy treatment planning of brain tumours using MRI alone," *Br. J. Radiol.*, vol. 71, no. MAY, pp. 544–548, 1998, doi: 10.1259/bjr.71.845.9691900.

- [3] K. K. Ramesh *et al.*, "A Fully Automated Post-Surgical Brain Tumor Segmentation Model for Radiation Treatment Planning and Longitudinal Tracking," *Cancers (Basel)*, vol. 15, no. 15, 2023, doi: 10.3390/cancers15153956.
- [4] K. V. Shiny, "Brain Tumor Segmentation and Classification Using Optimized U-Net," *J. Mech. Med. Biol.*, vol. 24, no. 1, 2024, doi: 10.1142/S0219519423500501.
- [5] P. Metcalfe *et al.*, "The potential for an enhanced role for MRI in radiation-therapy treatment planning," *Technol. Cancer Res. Treat.*, vol. 12, no. 5, pp. 429–446, 2013, doi: 10.7785/tcrt.2012.500342.
- [6] M. A. Schmidt and G. S. Payne, "Radiotherapy planning using MRI," *Phys. Med. Biol.*, vol. 60, no. 22, pp. R323–R361, 2015, doi: 10.1088/0031-9155/60/22/R323.
- [7] T. Stanescu, J. Hansson, P. Stavrev, and B. G. Fallone, "3T MR-based treatment planning for radiotherapy of brain lesions," vol. 40, no. 2, pp. 125–132, 2006.
- [8] S. Wahyuni and L. Amalia, "Perkembangan Dan Prinsip Kerja Computed Tomography (CT Scan)," *Galen. J. Kedokt. dan Kesehat. Mhs. Malikussaleh*, vol. 1, no. 2, p. 88, 2022, doi: 10.29103/jkkmm.v1i2.8097.
- [9] F. Basyid and K. Adi, "Segmentasi Citra Medis Untuk Pengenalan Objek Kanker Menggunakan Metode Active Contour," *Youngster Phys. J.*, vol. 3, no. 3, pp. 209–216, 2014.
- [10] M. Hasan Fadlun and U. Hayati, "Jurnal Informatika dan Rekayasa Perangkat Lunak Klasifikasi Tumor Otak menggunakan Convolutional Neural Network dan Transfer Learning," vol. 6, no. 1, pp. 289–295, 2024.
- [11] Hasran, "Klasifikasi Penyakit Jantung Menggunakan Metode K-Nearest Neighbor," *Indones. J. Data Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 6–10, 2020, [Online]. Available: <http://bit.ly/datasetcardio>.
- [12] D. S. Tsang *et al.*, "A pilot study of machine-learning based automated planning for primary brain tumours," *Radiat. Oncol.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1186/s13014-021-01967-3.
- [13] A. A. K. Abdel Razek *et al.*, "Clinical applications of artificial intelligence and radiomics in neuro-oncology imaging," *Insights Imaging*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s13244-021-01102-6.
- [14] F. Liu, P. Yadav, A. M. Baschnagel, and A. B. McMillan, "MR-based treatment planning in radiation therapy using a deep learning approach," *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, vol. 20, no. 3, pp. 105–114, 2019, doi: 10.1002/acm2.12554.
- [15] F. Putz *et al.*, "The Segment Anything foundation model achieves favorable brain tumor autosegmentation accuracy on MRI to support radiotherapy treatment planning," *arXiv Prepr.*, pp. 1–13, 2023, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2304.07875v1>
- [16] Y. Wang *et al.*, "Improved automatic segmentation of brain metastasis gross tumor volume in computed tomography images for radiotherapy: a position attention module for U-Net architecture," *Quant. Imaging Med. Surg.*, vol. 14, no. 7, pp. 4475–4489, 2024, doi: 10.21037/qims-23-1627.
- [17] D. LaBella *et al.*, "Brain Tumor Segmentation (BraTS) Challenge 2024: Meningioma Radiotherapy Planning Automated Segmentation," pp. 1–13, 2024, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2405.18383v2>

- [18] S. J. Van Hoof, P. V. Granton, and F. Verhaegen, "Development and validation of a treatment planning system for small animal radiotherapy: SmART-Plan," *Radiother. Oncol.*, vol. 109, no. 3, pp. 361–366, 2013, doi: 10.1016/j.radonc.2013.10.003.
- [19] J. Trusheim *et al.*, "A state-of-the-art review and guidelines for tumor treating fields treatment planning and patient follow-up in glioblastoma," *CNS Oncol.*, vol. 6, no. 1, pp. 29–43, 2017, doi: 10.2217/cns-2016-0032.
- [20] V. Kearney, J. W. Chan, G. Valdes, T. D. Solberg, and S. S. Yom, "The application of artificial intelligence in the IMRT planning process for head and neck cancer," *Oral Oncol.*, vol. 87, no. October, pp. 111–116, 2018, doi: 10.1016/j.oraloncology.2018.10.026.
- [21] I. S. Ardan and R. Indraswari, "Sistem Berbasis Deep Learning untuk Segmentasi dan Klasifikasi Tingkat Keganasan Tumor Otak Menggunakan Citra MRI 3D," vol. 6, no. 2, pp. 1–10, 2024.
- [22] A. M. Aldawsari, B. Al-Qaisieh, D. A. Broadbent, D. Bird, L. Murray, and R. Speight, "The role and potential of using quantitative MRI biomarkers for imaging guidance in brain cancer radiotherapy treatment planning: A systematic review," *Phys. Imaging Radiat. Oncol.*, vol. 27, no. July, p. 100476, 2023, doi: 10.1016/j.phro.2023.100476.
- [23] F. Citra R, F. Indriyani, and I. R. Rahadjeng, "Klasifikasi Tumor Otak Berbasis Magnetic Resonance Imaging Menggunakan Algoritma Convolutional Neural Network," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 918–924, 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3469.
- [24] R. Andre, B. Wahyu, and R. Purbaningtyas, "Klasifikasi Tumor Otak Menggunakan Convolutional Neural Network Dengan Arsitektur Efficientnet-B3," *J. IT*, vol. 11, no. 3, pp. 55–59, 2021, [Online]. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/just-it/index>