

Klik disini untuk menuliskan kategori naskah

Pengolahan Citra Digital Untuk Ekstraksi Fitur Pada Hybrid Model CNN-SVM Dalam Deteksi Penyakit Pneumonia Berbasis X-Ray Dada

Muhammad Aulia Irza ¹, Irvan ^{2*}

¹ Fakultas Ilmu Komputer Dan Teknologi Informasi, Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

² Fakultas Keguruan Dan Ilmu Pendidikan, Pendidikan Matematika, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 00 Januari 00
Revisi Akhir: 00 Februari 00
Diterbitkan Online: 00 Maret 00

KATA KUNCI

Pneumonia, Citra X-ray Dada, CNN, SVM, Ekstraksi Fitur, Klasifikasi Citra, Deteksi Penyakit, Machine Learning

KORESPONDENSI

Phone: +62895621044067
E-mail: aulairza566@gmail.com

A B S T R A K

Pneumonia merupakan salah satu penyakit infeksi paru-paru yang masih menjadi penyebab utama kematian, terutama pada anak-anak dan lansia. Deteksi dini dan akurat terhadap pneumonia sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan medis yang cepat dan tepat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem deteksi pneumonia berbasis citra X-ray dada dengan pendekatan hybrid yang menggabungkan Convolutional Neural Network (CNN) sebagai ekstraktor fitur dan Support Vector Machine (SVM) sebagai algoritma klasifikasi. Dataset yang digunakan berasal dari Guangzhou Women and Children's Medical Center, terdiri dari citra X-ray dada yang telah dikategorikan ke dalam dua kelas, yaitu "Normal" dan "Pneumonia". Proses pra-pemrosesan dilakukan dengan normalisasi dan augmentasi citra. Ekstraksi fitur dilakukan menggunakan arsitektur CNN dengan lima blok konvolusional dan satu lapisan GlobalAveragePooling. Fitur yang dihasilkan dari proses ini kemudian diklasifikasikan menggunakan SVM dengan parameter terbaik yang diperoleh melalui GridSearch dan validasi silang Stratified K-Fold. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model hybrid CNN-SVM mencapai akurasi sebesar 92.75% pada data pelatihan dan 81.57% pada data pengujian. Meskipun akurasi pada data validasi hanya 50%, hal ini disebabkan oleh jumlah data validasi yang sangat terbatas. Model menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap kasus pneumonia, yang merupakan metrik penting dalam deteksi penyakit. Implementasi akhir dilakukan dengan mengintegrasikan model ke dalam aplikasi antarmuka sederhana berbasis Gradio untuk memudahkan pengguna melakukan deteksi secara mandiri. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan hybrid CNN-SVM efektif digunakan untuk deteksi pneumonia berbasis citra X-ray dada dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai alat bantu diagnosis di bidang medis.

PENDAHULUAN

Pencitraan medis merupakan proses visualisasi pada bagian-bagian dan organ tubuh agar dokter dapat mendiagnosis, menganalisis, dan mengobati penyakit pada pasien. Pencitraan X atau sinar-x (X-ray) adalah salah satu jenis pencitraan medis. Dengan menggunakan teknologi ini, ahli radiologi dapat dengan cepat memastikan status internal pasien mereka. Sebagai contoh, rontgen dada dapat menunjukkan kondisi paru-paru, jantung, dan trakea, serta membantu mendeteksi infeksi paru-paru. Sinar-X dapat digunakan untuk mengklasifikasikan gangguan paru-paru secara tepat dan efisien, yang mempercepat proses diagnostik bagi ahli radiologi dan dokter. (All Allied Health Schools, n.d., 2024).

Deteksi citra untuk pneumonia adalah bidang utama yang menarik dalam pemrosesan citra medis. Pneumonia adalah salah satu penyakit yang dapat berakibat fatal bahkan dapat menyebabkan kematian. Banyak mikroorganisme menular dan tidak menular, seperti bakteri, virus, atau jamur, dapat menyebabkan pneumonia, penyakit radang parenkim paru-paru (alveoli) yang mengganggu fungsi paru-paru. (Rahman dkk., 2020) Streptococcus pneumoniae dan Haemophilus influenzae tipe B adalah penyebab pneumonia yang paling umum terjadi. Keduanya merupakan contoh flora bakteri

normal di dalam tubuh, yang mungkin muncul ketika sistem kekebalan tubuh terganggu. Mikroorganisme lain penyebab pneumonia adalah *Staphylococcus aureus*, pada golongan virus yaitu influenza, adenovirus, respiratory syncytial virus, virus Hantala, rhinovirus, virus herpes simpleks, sitomegalovirus, mikoplasma, pneumokokus, dan streptokokus. Sedangkan Aspergiosis, histoplasmosis, dan kandidiasis adalah bagian dari kelompok jamur. (Fida, 2020).

Berdasarkan laporan dari UNICEF tahun 2018 penyakit pneumonia masih menjadi penyebab utama dari kematian balita di dunia dengan banyak data yang tercatat sekitar 16% dari 5,6 juta kematian balita. Pada tahun 2016. Pneumonia tercatat menewaskan sekitar 2.400 anak setiap hari dan pada tahun tersebut total angka kematian anak karena pneumonia mencapai 880.000 anak. (WHO, 2023) Pneumonia juga dapat menyerang orang dewasa khususnya lansia yang sudah berumur diatas 65 tahun ataupun orang yang sudah memiliki masalah kesehatan sebelumnya. Seseorang yang tidak terkena pneumonia, udara akan mengisi kantung-kantung kecil yang membentuk paru-paru. Alveoli yang mengembang dengan cairan dan nanah adalah tanda ketika seseorang terkena pneumonia, yang membuatnya sulit bernapas dan menurunkan kapasitasnya untuk menyerap oksigen. Sehingga oksigen yang dihirup menjadi lebih sedikit dan terasa nyeri ketika melakukan pernapasan.

Beberapa tahun terakhir di beberapa kota terbesar di Indonesia, polusi udara telah menjadi perhatian serius. Kualitas udara yang sangat buruk dan mengancam kesehatan merupakan hasil dari tingginya polusi udara. Emisi polutan, seperti partikel halus, knalpot kendaraan bermotor, dan limbah industri, telah meningkat karena pertumbuhan penduduk yang cepat, urbanisasi yang tidak terkendali, dan industri yang berkembang pesat. Kota-kota besar di Indonesia seperti Jakarta, Tangerang Selatan, Bandung, khususnya Medan memiliki polusi dan kualitas udara yang sangat berbahaya. Kualitas udara yang tidak sehat dapat menyebabkan berbagai penyakit pernapasan dengan tingkat kematian yang tinggi, seperti pneumonia, dan konsekuensi negatif dari polusi udara cukup nyata, seperti yang terlihat dari peningkatan kejadian alergi, gangguan pernapasan, dan penyakit kronis lainnya. Menurut statistik MerceMarshBenefit, Indonesia mengalami lonjakan kasus pneumonia sebesar 56,9% pada orang dewasa dan 88,1% pada anak-anak selama Semester I tahun 2023 dibandingkan dengan Semester I tahun 2022.

Dari banyaknya kasus pneumonia dari data di atas dilakukannya tes untuk mengidentifikasi pneumonia sangat diperlukan karena banyaknya kasus penyakit yang telah dibahas sebelumnya. Rontgen dada, CT scan paru, USG dada, biopsi jarum paru, dan MRI dada adalah tes yang dilakukan untuk mendiagnosis pneumonia. Karena rontgen dada saat ini merupakan alat pencitraan diagnostik yang paling populer dan mudah diakses, maka rontgen dada merupakan salah satu cara terbaik untuk mengidentifikasi pneumonia.

Diagnosis yang cepat dan akurat sangat penting dalam menentukan campur tangan medis yang efektif. Namun, metode diagnostik konvensional seperti pemeriksaan X-ray dada masih menghadapi berbagai keterbatasan. Pemeriksaan pneumonia secara klinis memerlukan sumber daya yang besar, memakan waktu, serta sangat bergantung pada keahlian radiologi dalam menafsirkan hasil citra. Proses mendapatkan hasil foto rontgen dada bervariasi tergantung pada kebijakan dan prosedur masing-masing dari fasilitas kesehatan. Dalam kasus darurat, hasilnya dapat tersedia dalam beberapa jam, tetapi untuk situasi non-darurat, analisis dan pelaporannya bisa memakan waktu hingga beberapa hari.

Untuk mengatasi kendala tersebut, saat ini telah dikembangkan berbagai sistem berbasis Computer-Aided Diagnosis (CAD) guna membantu dokter dalam menganalisis citra medis. Dengan kemajuan teknologi kecerdasan buatan, khususnya dalam bidang Deep Learning, berbagai metode telah diterapkan untuk meningkatkan akurasi deteksi penyakit paru. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam dunia medis adalah Convolutional Neural Network (CNN), yang mampu mengekstraksi fitur penting dari citra X-ray dada secara otomatis. Namun, CNN masih memiliki keterbatasan dalam hal memprediksi dan sensitivitas terhadap variasi citra. Oleh karena itu, pendekatan Hybrid Model, seperti kombinasi CNN dengan Support Vector Machine (SVM), menjadi solusi yang potensial untuk meningkatkan akurasi deteksi pneumonia.

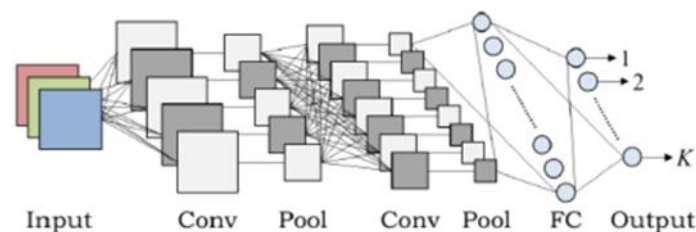
TINJAUAN PUSTAKA

Convolutional Neural Network (CNN)

Convolutional Neural Network (CNN) merupakan jenis jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network – ANN) dirancang khusus untuk mengekstrak data dari gambar dan data spasial lainnya. CNN memiliki kemampuan untuk menganalisis karakteristik citra secara otomatis, mengurangi kebutuhan rekayasa fitur manual yang biasanya diperlukan dalam metode klasik (feature engineering). CNN adalah salah satu model pembelajaran mendalam yang paling umum diterapkan dalam analisis citra medis, termasuk rontgen dada, karena akurasi yang sangat baik dalam mengidentifikasi pola yang rumit. CNN mengidentifikasi karakteristik utama seperti tepi, sudut, dan tekstur dengan menggunakan filter konvolusi yang berjalan di atas gambar. (Zhang dkk., 2021).

Arsitektur CNN

Lapisan konvolusi (convolution layer) merupakan salah satu bagian utama dalam arsitektur Convolutional Neural Network (CNN) yang berfungsi untuk mengekstraksi fitur dari data masukan. Biasanya, lapisan ini menggabungkan operasi linear dan non-linear untuk mengolah informasi. Proses konvolusi dilakukan terhadap hasil keluaran dari lapisan sebelumnya, dengan tujuan menyaring fitur penting dari data. Konvolusi sendiri adalah jenis operasi matematis satu dimensi yang digunakan secara khusus untuk proses ekstraksi fitur. Operasi ini melibatkan penerapan kernel—sebuah kumpulan nilai numerik kecil—pada input yang berbentuk array multidimensi, dikenal juga sebagai tensor. Kompleksitas dari operasi konvolusi dipengaruhi oleh dua parameter utama, yaitu ukuran filter dan jumlah kernel yang digunakan.



Gambar 1. Arsitektur CNN

Proses penentuan ukuran suatu set data dikenal sebagai pooling layer. Dalam pemrosesan citra, pooling juga bertujuan untuk meningkatkan posisi invariansi fitur. Teknik pooling yang digunakan dalam CNN terbesar adalah max pooling. Max pooling mengubah keluaran lapisan konvolusi menjadi beberapa kisi yang lebih kecil, kemudian menghitung nilai minimum setiap kisi untuk menentukan matriks citra. citra.

SVM (Support Vector Machine)

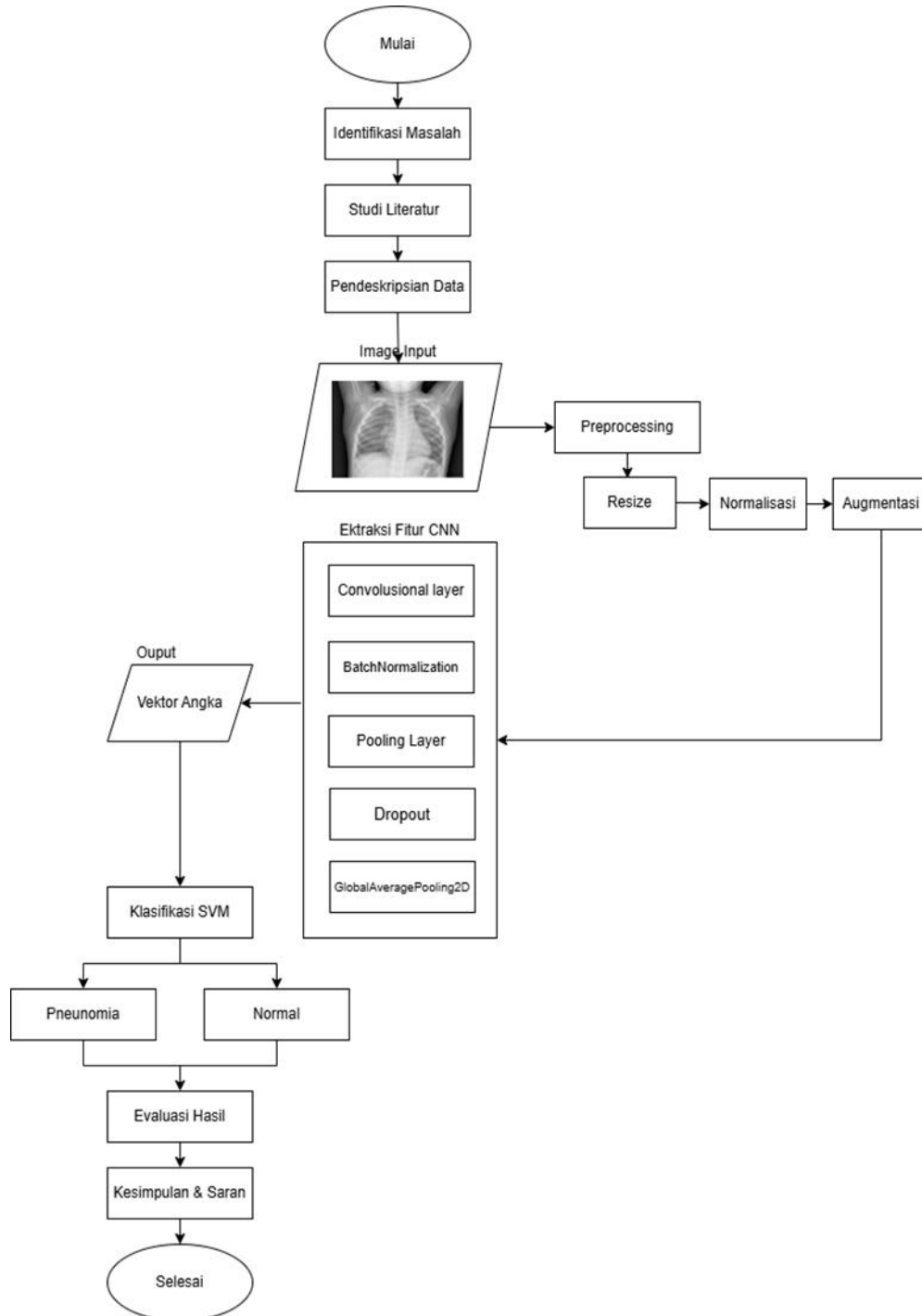
Support Vector Machine (SVM) merupakan satu dari banyak metode machine learning yang digunakan untuk klasifikasi dan regresi. SVM bekerja dengan mencari hyperplane yang optimal untuk membagi data ke dalam dua kelas yang berbeda dengan margin terbesar. Ketika dipasangkan dengan kernel yang sesuai, pendekatan ini memiliki manfaat untuk mencegah overfitting dan sangat berhasil untuk data berdimensi tinggi. SVM mampu memetakan data ke dalam ruang dengan dimensi yang lebih tinggi melalui penerapan fungsi kernel seperti linear, polinomial, dan radial basis function (RBF) untuk menemukan batas keputusan optimal yang memisahkan kelas. (Artiyati & Ahdika., 2024).

SVM juga memiliki peran khususnya dalam mengklasifikasikan sentimen publik terhadap perkembangan teknologi kecerdasan buatan di sektor pendidikan. SVM non-linear digunakan untuk memproses data teks dan berhasil memberikan hasil klasifikasi yang akurat. (Putri dkk., 2024) Kombinasi algoritma SVM dengan teknik N-gram dapat digunakan untuk membangun sistem deteksi berita palsu dalam bahasa Indonesia. Dalam penelitian tersebut, kernel linear memberikan performa terbaik dengan akurasi mencapai 97,4%, menunjukkan bahwa SVM mampu menangani masalah klasifikasi teks dengan baik. (Jollyta dkk., 2023).

Dengan kemampuannya dalam menangani berbagai jenis data dan fleksibilitas dalam pemilihan kernel, SVM menjadi algoritma yang sangat direkomendasikan digunakan dalam tugas klasifikasi, termasuk di bidang kesehatan.

METODOLOGI

Tahapan Penelitian



Gambar 2. Tahapan Penelitian

1. Identifikasi Masalah

Pada tahap awal, peneliti mengidentifikasi permasalahan yang menjadi dasar penelitian, yaitu perlunya sistem yang mampu mendeteksi penyakit pneumonia secara otomatis dan akurat berdasarkan citra X-ray dada. Identifikasi ini dilatarbelakangi oleh tingginya angka penderita pneumonia dan keterbatasan tenaga medis dalam menganalisis hasil X-ray secara cepat dan tepat, terutama di wilayah dengan fasilitas kesehatan terbatas.

2. Studi Literatur

Di tahap ini, peneliti menganalisis sejumlah literatur yang berkaitan dengan referensi ilmiah untuk mendalami teori-teori yang relevan, seperti pengolahan citra digital, pneumonia dan anatomi paru-paru, metode CNN dan SVM, serta pendekatan hybrid dalam klasifikasi citra medis. Studi literatur ini menjadi dasar dalam merancang sistem deteksi pneumonia yang sesuai dengan perkembangan teknologi terkini.

3. Pendeskripsian Data

Dataset yang digunakan adalah Chest X-ray dataset yang diperoleh dari Guangzhou Women and Children's Medical Center, berisi 5.863 gambar X-ray yang terbagi ke dalam kategori Pneumonia dan Normal. Dataset telah melewati proses quality control dan validasi oleh tim dokter ahli. Data dibagi dalam tiga folder utama: train, validation, dan test, masing-masing digunakan dalam proses pelatihan dan pengujian model. Tahap ini mencakup penjabaran mengenai dataset yang digunakan dalam penelitian, seperti sumber data, jumlah dan jenis citra X-ray (normal dan pneumonia), serta format data. Selain itu, dilakukan pula eksplorasi terhadap karakteristik data, termasuk ukuran gambar, format penyimpanan, dan distribusi kelas, guna memastikan kelayakan data dalam proses pelatihan model.

4. Preprocessing

Tahap preprocessing dilakukan untuk mempersiapkan citra X-ray dada sebelum digunakan dalam pelatihan model. Proses ini mencakup beberapa langkah penting, yaitu resize, normalisasi, dan augmentasi. Resize dilakukan untuk menyeragamkan ukuran seluruh citra menjadi 224x224 piksel agar sesuai dengan kebutuhan input arsitektur CNN, sehingga model dapat memproses data secara konsisten. Selanjutnya, dilakukan proses normalisasi dengan mengubah nilai piksel pada citra ke dalam rentang antara 0 hingga 1. Langkah ini bertujuan untuk menstabilkan distribusi data dan mempercepat proses pelatihan. Agar model tidak mengalami overfitting dan mampu mengenali pola dari berbagai kondisi citra, dilakukan augmentasi data secara artifisial. Teknik augmentasi yang digunakan meliputi rotasi, flipping horizontal, zoom, serta shifting. Dengan tahapan preprocessing ini, citra X-ray menjadi lebih siap untuk diproses pada tahap ekstraksi fitur menggunakan CNN dan tahap klasifikasi dengan SVM.

5. Ekstraksi Fitur CNN

Setelah data dipersiapkan, citra X-ray diproses melalui arsitektur Convolutional Neural Network (CNN) untuk melakukan ekstraksi fitur. CNN digunakan untuk mengekstraksi pola visual penting dari citra, seperti struktur paru-paru dan indikasi pneumonia. Proses ekstraksi fitur digunakan untuk menemukan properti pemetaan fitur asli ke fitur baru yang membedakannya dari objek lain. Arsitektur metode feature extraction layer terdiri dari beberapa lapisan. Misalnya, Lapisan Ekstraksi Fitur menggunakan Convolutional Layer, Pooling Layer, Dropout Layer, dan GlobalAveragePooling2D untuk mengekstrak fitur dari gambar, dan Lapisan Klasifikasi biasanya menggunakan Fully Connected Layer. Umumnya, proses klasifikasi dilakukan menggunakan lapisan fully-connected, namun dalam penelitian ini digunakan pendekatan alternatif dengan memanfaatkan metode SVM sebagai pengklasifikasi. Beberapa arsitektur CNN populer seperti AlexNet, GoogleNet, dan VGGNet sering dimanfaatkan dalam proses ekstraksi ciri. Akan tetapi, dalam penelitian ini, proses ekstraksi fitur dilakukan menggunakan arsitektur CNN yang terdiri atas tiga jenis lapisan, yaitu Convolutional Layer, Max Pooling Layer, dan Dropout Layer.

6. Klasifikasi SVM

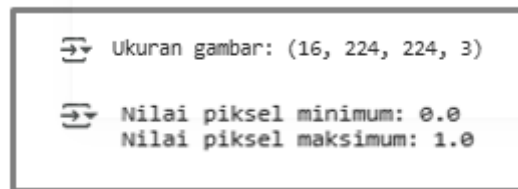
Fitur yang telah diekstraksi oleh CNN kemudian digunakan sebagai input pada algoritma klasifikasi Support Vector Machine (SVM). SVM digunakan untuk membedakan antara citra yang menunjukkan indikasi pneumonia dan citra normal. Algoritma ini dipilih karena kemampuannya dalam bekerja pada data berdimensi tinggi dan menghasilkan keputusan klasifikasi yang optimal berdasarkan margin maksimum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Preprocessing Data

Pada tahap awal, dilakukan proses preprocessing terhadap citra X-ray dada sebelum digunakan dalam pelatihan model. Tujuan dari preprocessing ini adalah untuk menyiapkan data agar sesuai dengan kebutuhan arsitektur Convolutional Neural Network (CNN), meningkatkan kualitas citra, serta membantu model dalam mengenali pola secara lebih akurat.

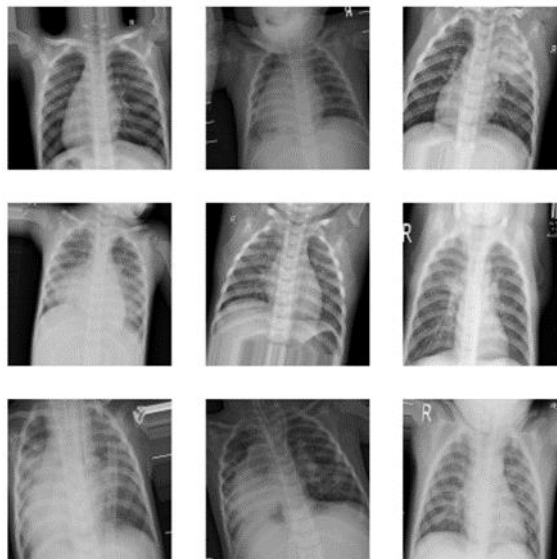
Berikut adalah hasil pemeriksaan bentuk data setelah dilakukan preprocessing :



Gambar 3. Hasil Resize dan Normalisasi

Berdasarkan gambar 3 hasil ini menunjukkan bahwa satu batch data pelatihan terdiri atas 16 gambar (batch size = 16), masing-masing dengan resolusi 224×224 piksel dan memiliki 3 channel warna (RGB), meskipun data aslinya berupa citra grayscale. Hal ini terjadi karena proses augmentasi atau konversi otomatis oleh ImageDataGenerator, yang mengubah format citra menjadi tiga channel agar kompatibel dengan arsitektur model CNN seperti yang digunakan dalam penelitian ini.

Nilai piksel yang berada pada rentang 0.0 hingga 1.0 menunjukkan bahwa data citra telah melalui proses normalisasi, yaitu dengan membagi nilai piksel asli (0–255) menjadi skala 0 hingga 1. Proses normalisasi ini penting dilakukan agar mempercepat konvergensi selama pelatihan model dan mencegah dominasi nilai piksel yang besar terhadap fungsi loss dan pembaruan bobot pada jaringan saraf. Setelah di resize dan normalisasi dilakukan juga proses augmentasi pada citra



Gambar 4. Hasil Augmentasi

Gambar 4 menunjukkan beberapa contoh citra hasil dari proses augmentasi yang diterapkan pada dataset pelatihan. Augmentasi dilakukan untuk meningkatkan keragaman data dan membantu model dalam mengenali pola yang lebih general sehingga dapat mengurangi risiko overfitting.

Beberapa teknik augmentasi yang diterapkan meliputi rotasi acak, translasi (pergeseran), zoom, dan horizontal flipping. Hal ini dapat diamati dari variasi posisi dan orientasi dada dalam gambar-gambar tersebut. Meskipun berasal dari dataset yang sama, setiap citra hasil augmentasi memiliki sedikit perbedaan dari bentuk aslinya, namun tetap mempertahankan struktur utama organ paru-paru.

Arsitektur dan Hasil Ekstraksi Fitur CNN

Arsitektur Convolutional Neural Network (CNN) yang digunakan dalam penelitian ini dirancang sebagai feature extractor. Model ini dibangun untuk mengekstraksi fitur dari citra X-ray dada dan menghasilkan representasi numerik yang berguna untuk proses klasifikasi menggunakan Support Vector Machine (SVM).

Model CNN menerima input berupa citra berwarna (RGB) dengan ukuran 224×224 piksel. Arsitektur terdiri dari lima blok konvolusi, dan setiap blok terdiri dari beberapa layer: Conv2D, BatchNormalization, MaxPooling2D, dan Dropout. Layer Conv2D bertugas mengekstraksi fitur spasial dari citra, sedangkan BatchNormalization berfungsi untuk menormalkan output layer sebelumnya sehingga proses pelatihan menjadi lebih stabil dan cepat. MaxPooling2D digunakan untuk melakukan downsampling guna mengurangi dimensi

spasial fitur, dan Dropout digunakan sebagai teknik regularisasi untuk mencegah overfitting dengan menilai sejumlah besar neuron secara akurat selama pelatihan.

Setelah melewati lima blok konvolusi, hasil akhir diproses menggunakan layer GlobalAveragePooling2D. Layer ini berfungsi untuk mereduksi fitur dari dimensi tiga menjadi vektor satu dimensi dengan cara menghitung rata-rata dari setiap filter. Hasil dari layer ini adalah vektor fitur berdimensi 512, yang kemudian digunakan sebagai input ke dalam algoritma SVM untuk klasifikasi antara kondisi paru-paru normal dan pneumonia.

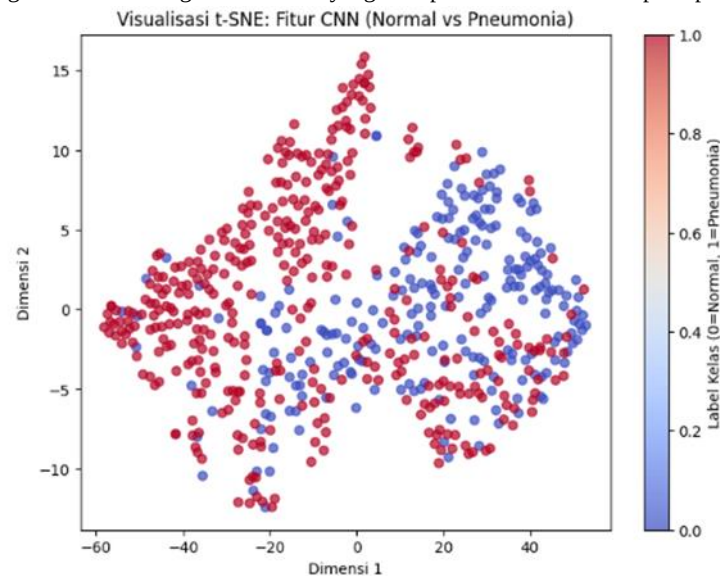
Tabel 1. Arsitektur CNN

No	Layer (Tipe)	Output Shape	Jumlah Parameter
1	Input Layer	(None, 224, 224, 3)	0
2	Conv2D	(None, 224, 224, 32)	896
3	BatchNormalization	(None, 224, 224, 32)	128
4	MaxPooling2D	(None, 224, 224, 32)	0
5	Dropout	(None, 112, 112, 32)	0
6	Conv2D_2	(None, 112, 112, 64)	18496
7	BatchNormalization_2	(None, 112, 112, 64)	256
8	MaxPooling2D_2	(None, 56, 56, 64)	0
9	Dropout_2	(None, 56, 56, 64)	0
10	Conv2D_3	(None, 56, 56, 128)	73856
11	BatchNormalization_3	(None, 56, 56, 128)	512
12	MaxPooling2D_3	(None, 28, 28, 128)	0
13	Dropout_3	(None, 28, 28, 128)	0
14	Conv2D_4	(None, 28, 28, 256)	295168
15	BatchNormalization_4	(None, 28, 28, 256)	1024
16	MaxPooling2D_4	(None, 14, 14, 256)	0
17	Dropout_4	(None, 14, 14, 256)	0
18	Conv2D_5	(None, 14, 14, 512)	1180160
19	BatchNormalization_5	(None, 14, 14, 512)	2048
20	MaxPooling2D_5	(None, 7, 7, 512)	0
21	Dropout_5	(None, 7, 7, 512)	0
22	GlobalAveragePooling2D	(None, 512)	0
Total Parameter			1572544

Setelah lima blok konvolusi, digunakan GlobalAveragePooling2D, yang mengubah matriks fitur menjadi vektor fitur berdimensi 512. Layer ini mengambil rata-rata dari setiap fitur map dan cocok digunakan sebagai input bagi model klasifikasi lain, seperti Support Vector Machine (SVM) dalam penelitian ini.

Dari tabel tersebut, diketahui bahwa total parameter dalam arsitektur ini berjumlah 1.572.544, dengan 1.570.560 parameter dapat dilatih (trainable) dan 1.984 parameter tidak dapat dilatih (non-trainable), yang sebagian besar berasal dari layer normalisasi.

Arsitektur ini dirancang untuk menyeimbangkan antara kedalaman model dan kemampuan generalisasi, serta mampu menangani kompleksitas pola citra X-ray medis yang sering kali memiliki karakteristik visual yang halus dan tidak eksplisit. Model CNN ini telah menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengekstraksi fitur yang merepresentasikan kondisi paru-paru secara signifikan.



Gambar 5. Visualisasi Fitur Ekstraksi CNN Menggunakan t-SNE

Gambar 5 merupakan hasil visualisasi dua dimensi dari fitur-fitur yang telah diekstraksi oleh model CNN menggunakan teknik t-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE). Visualisasi ini bertujuan untuk menggambarkan sejauh mana fitur-fitur yang diekstraksi dari citra X-ray dada mampu membedakan antara dua kelas, yaitu Normal (biru) dan Pneumonia (merah).

Setiap titik pada grafik mewakili satu citra dari data uji yang telah diproyeksikan ke dalam ruang berdimensi dua. Warna biru merepresentasikan kelas Normal, sedangkan warna merah merepresentasikan kelas Pneumonia. Hasil ini menunjukkan bahwa model CNN mampu menghasilkan representasi fitur yang dapat memisahkan antara dua kelas tersebut dengan cukup baik. Meskipun terdapat beberapa tumpang tindih (overlap) antar kelas, sebagian besar titik dari masing-masing kelas membentuk kelompok (cluster) yang terpisah, menandakan bahwa fitur yang diekstraksi oleh CNN mengandung informasi diskriminatif yang relevan.

Evaluasi Performa Model

Jumlah data validasi yang sangat terbatas menyebabkan evaluasi pada data tersebut tidak cukup representatif untuk mengukur performa model secara objektif. Dalam statistik, ukuran sampel yang terlalu kecil dapat menghasilkan estimasi performa yang bias dan tidak stabil. Oleh karena itu, penurunan akurasi pada data validasi ini bukan disebabkan oleh buruknya kemampuan generalisasi model, melainkan lebih kepada keterbatasan kuantitas data validasi yang tersedia.

Untuk meningkatkan performa dalam mendeteksi pneumonia, terutama dalam mengurangi false negative (kasus pneumonia yang salah terdeteksi sebagai normal), dilakukan penyesuaian threshold pada skor prediksi SVM. Threshold disesuaikan ke nilai 0.6 agar model lebih sensitif terhadap kemungkinan adanya pneumonia. Setelah penyesuaian threshold, diperoleh hasil evaluasi sebagai berikut:

⇒ Accuracy: 0.8157051282051282

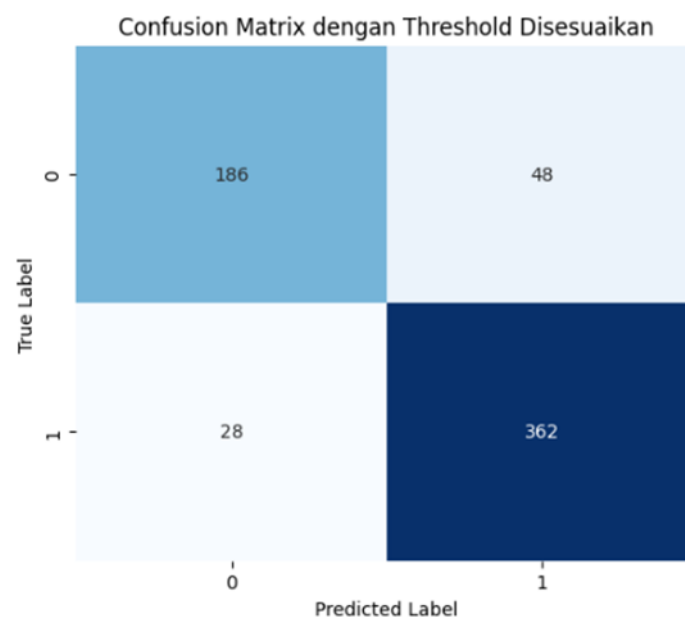
Classification Report dengan threshold disesuaikan:

	precision	recall	f1-score	support
Normal	0.87	0.79	0.83	234
Pneumonia	0.88	0.93	0.91	390
accuracy			0.88	624
macro avg	0.88	0.86	0.87	624
weighted avg	0.88	0.88	0.88	624

Gambar 6. Hasil Evaluasi Dengan Threshold

Model menunjukkan recall yang sangat tinggi untuk kelas Pneumonia, yaitu sebesar 93%, yang berarti model mampu mendeteksi hampir semua kasus pneumonia secara benar. Hal ini penting dalam konteks medis, karena kesalahan dalam mendeteksi pasien yang sebenarnya terinfeksi pneumonia (false negative) dapat berakibat fatal.

Namun, peningkatan sensitivitas ini diiringi dengan sedikit penurunan precision pada kelas Normal menjadi 87%, karena model cenderung sedikit "over-detect" kasus pneumonia, menyebabkan beberapa gambar normal diklasifikasikan sebagai pneumonia. Strategi ini dinilai tepat karena lebih baik menghasilkan false positive dibandingkan false negative dalam aplikasi medis. Hasil tersebut juga didukung oleh confusion matrix berikut:



Gambar 7. Visualisasi Heatmap Hasil Ealuasi

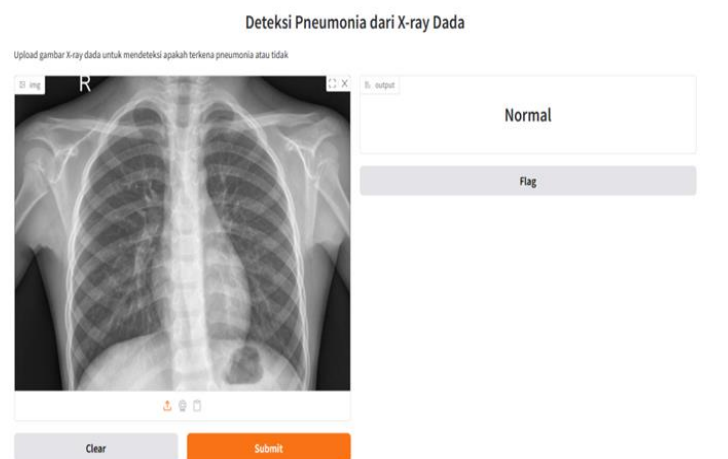
Berdasarkan confusion matrix, terdapat 48 citra normal yang salah diklasifikasikan sebagai pneumonia, dan hanya 28 citra pneumonia yang salah diklasifikasikan sebagai normal. Hal ini menunjukkan bahwa model sangat efektif dalam mendeteksi pneumonia, meskipun terdapat beberapa kesalahan dalam mendeteksi citra normal.

Secara keseluruhan, model hybrid CNN-SVM yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki performa yang baik dalam klasifikasi citra X-ray dada. Dengan akurasi tinggi, recall yang sangat baik untuk kelas pneumonia, dan tingkat overfitting yang rendah, model ini dapat diandalkan dalam membantu proses deteksi dini penyakit pneumonia berbasis citra medis.

Implementasi Model Ke Aplikasi

Setelah selesainya proses evaluasi dan pelatihan model, langkah selanjutnya adalah memvisualisasikan model yang dikembangkan ke dalam aplikasi berbasis web untuk membantu pengguna dalam melakukan prediksi pneumonia dari X-ray. Implementasi ini bertujuan agar model dapat digunakan oleh pengguna non-teknis secara praktis dan interaktif.

Aplikasi ini dibangun menggunakan pustaka Gradio, yang memungkinkan pembuatan antarmuka pengguna grafis (GUI) secara cepat dan mudah diakses melalui web. Pengguna cukup mengunggah citra X-ray dada, lalu sistem akan secara otomatis melakukan proses prediksi berdasarkan model hybrid CNN-SVM yang telah dilatih sebelumnya.



Gambar 8. Interface Model

Berdasarkan hasil evaluasi performa model yang telah dilakukan, model hybrid CNN-SVM menunjukkan kemampuan yang cukup baik dalam mendeteksi pneumonia berdasarkan citra X-ray dada. Model ini mampu mencapai akurasi sebesar 92,75% pada data latih dan 81,57% pada data uji, yang menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan generalisasi yang memadai terhadap data baru.

Meskipun akurasi pada data validasi tercatat hanya 50%, hal ini tidak serta-merta menandakan bahwa model mengalami overfitting secara signifikan. Rendahnya akurasi pada data validasi lebih disebabkan oleh jumlah data validasi yang sangat terbatas, yaitu hanya 16 gambar. Jumlah ini tidak cukup untuk memberikan estimasi performa yang stabil dan representatif, sehingga hasil validasi dianggap kurang dapat dijadikan tolak ukur utama. Sebagai gantinya, performa pada data uji dijadikan acuan utama karena mencerminkan kemampuan model terhadap data yang benar-benar belum pernah dilihat sebelumnya.

Proses ekstraksi fitur menggunakan CNN telah berhasil mereduksi dimensi data citra menjadi fitur-fitur numerik yang informatif dan relevan, yang kemudian diklasifikasikan menggunakan algoritma Support Vector Machine (SVM). Penggunaan metode GridSearchCV dan Stratified K-Fold Cross Validation dalam pelatihan SVM juga telah membantu dalam menemukan parameter model terbaik yang mampu mengoptimalkan kinerja klasifikasi.

Hasil evaluasi lebih lanjut menggunakan metrik seperti precision, recall, f1-score, dan confusion matrix menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan deteksi yang tinggi terhadap kelas pneumonia (recall mencapai 93%). Hal ini sangat penting dalam konteks deteksi penyakit, karena kesalahan dalam mendeteksi kasus pneumonia (false negative) dapat berakibat serius. Oleh karena itu, penyesuaian threshold prediksi dilakukan secara manual untuk mengurangi risiko false negative, yang terbukti mampu meningkatkan sensitivitas model terhadap kasus pneumonia.

Visualisasi menggunakan t-SNE terhadap hasil prediksi dan label asli juga menunjukkan pemisahan yang cukup jelas antara kelas Normal dan Pneumonia, baik berdasarkan prediksi model maupun berdasarkan label asli. Hal ini memberikan indikasi tambahan bahwa fitur yang diekstraksi oleh CNN cukup efektif dalam memisahkan kedua kelas tersebut di ruang fitur berdimensi rendah.

Namun, selama proses penelitian ini, terdapat beberapa tantangan yang harus dihadapi. Salah satu tantangan utama adalah jumlah data validasi yang sangat terbatas, yakni hanya terdiri dari 16 gambar, yang menyebabkan hasil evaluasi pada data validasi menjadi tidak stabil dan kurang representatif. Hal ini menyulitkan dalam menilai performa model secara obyektif di tahap validasi, sehingga analisis lebih difokuskan pada hasil uji.

Selain itu, integrasi antara model CNN sebagai feature extractor dan SVM sebagai classifier juga memerlukan penanganan teknis yang kompleks, mulai dari proses normalisasi fitur, penyimpanan antar tahap, hingga pengujian performa akhir. Di sisi lain, keterbatasan perangkat komputasi seperti keterbatasan memori dan waktu sesi pada platform Google Colab menjadi kendala teknis yang cukup menyita waktu, terutama saat proses pelatihan model dan ekstraksi fitur dalam jumlah besar. Terakhir, implementasi model ke dalam aplikasi menggunakan Gradio juga menuntut konversi pipeline dan penyesuaian input gambar secara real time, sehingga memerlukan perhatian ekstra dalam menjaga keakuratan hasil prediksi dan kenyamanan pengguna. Meskipun berbagai tantangan tersebut dihadapi, penelitian ini tetap dapat diselesaikan dengan baik dan menghasilkan model yang berfungsi dengan optimal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut: Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem deteksi pneumonia berbasis citra X-ray dada menggunakan pendekatan hybrid CNN-SVM, di mana CNN digunakan untuk ekstraksi fitur dan SVM untuk klasifikasi dua kelas, yaitu “Normal” dan “Pneumonia”. Model hybrid CNN-SVM menunjukkan performa yang baik dengan akurasi sebesar 92.75% pada data latih dan 81.57% pada data uji. Meskipun akurasi validasi hanya 50%, hal ini disebabkan oleh jumlah data validasi yang sangat terbatas, bukan karena overfitting. Evaluasi lanjutan menunjukkan model memiliki sensitivitas tinggi terhadap kasus pneumonia, dengan recall mencapai 93% dan f1-score sebesar 91% untuk kelas Pneumonia. Tantangan dalam penelitian ini meliputi keterbatasan jumlah data validasi, kompleksitas dalam proses ekstraksi fitur dan optimasi parameter, serta integrasi model ke dalam aplikasi berbasis Gradio. Namun, hasil implementasi menunjukkan bahwa model dapat diterapkan secara praktis dalam aplikasi sederhana untuk mendukung diagnosis awal pneumonia.

DAFTAR PUSTAKA

Referensi Cetak:

Buku

- [1] Andi Zulherri, Muhammad Basri, Muhammad Haris, Ferdy Riza, Zuli Agustina Gultom, Farid Akbar Siregar, Okvi Nugroho, Mahardika Abdi Prawira Tanjung. Komunikasi Data dan Jaringan Komputer. Medan: UMSU Press, 2025, pp. 202.
- [2] Indah Purnama Sari. Algoritma dan Pemrograman. Medan: UMSU Press, 2023, pp. 290.
- [3] Indah Purnama Sari. Buku Ajar Pemrograman Internet Dasar. Medan: UMSU Press, 2022, pp. 300.
- [4] Indah Purnama Sari. Buku Ajar Rekayasa Perangkat Lunak. Medan: UMSU Press, 2021, pp. 228.
- [5] Janner Simarmata Arsan Kumala Jaya, Syarifah Fitrah Ramadhani, Niel Ananto, Abdul Karim, Betrisandi, Muhammad Ilham Alhari, Cucut Susanto, Suardinata, Indah Purnama Sari, Edson Yahuda Putra. Komputer dan Masyarakat. Medan: Yayasan Kita Menulis, 2024, pp.162.
- [6] Mahdianta Pandia, Indah Purnama Sari, Alexander Wirapraja Fergie Joanda Kaunang, Syarifah Fitrah Ramadhani Stenly Richard Pungus, Sudirman, Suardinata Jimmy Herawan Moedjahedy, Elly Warni, Debby Erce Sondakh. Pengantar Bahasa Pemrograman Python. Medan : Yayasan Kita Menulis, 2024, pp.180
- [7] Zelvi Gustiana Arif Dwinanto, Indah Purnama Sari, Janner Simarmata Mahdianta Pandia, Supriadi Syam, Semmy Wellem Taju Fitrah Eka Susilawati, Asmah Akhriana, Rolly Junius Lontaan Fergie Joanda Kaunang. Perkembangan Teknologi Informatika. Medan: Yayasan Kita Menulis, 2024, pp.158

Jurnal

- [8] What Is Medical Imaging? | All Allied Health Schools. (n.d.). Retrieved November 15, 2024, from <https://www.allalliedhealthschools.com/blog/what-is-medical-imaging/>
- [9] Rahman, A. K., Purdy, A. G., & Ender, P. T. (2020). COVID-19 pneumonia in patients on chronic hydroxychloroquine therapy: Three cases of COVID-19 pneumonia. *Case Reports in Infectious Diseases*, 2020, Article ID 8822753. <https://doi.org/10.1155/2020/8822753>
- [10] Fida, W. N. R. (2020). Studi ekologi gambaran faktor pejamu dan faktor lingkungan fisik hunian dengan kejadian pneumonia pada balita di Provinsi Jawa Barat tahun 2014–2017 (Skripsi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta). Fakultas Ilmu Kesehatan, Program Studi Kesehatan Masyarakat.
- [11] Sari, I.P., Hariani, P.P., Al-Khowarizmi, A., Ramadhani, F., Sulaiman, O.K., Satria, A, & Manurung, A.A. (2024). CLUSTERING HIV/AIDS DISEASE USING K-MEANS CLUSTERING ALGORITHM. *Proceeding International Seminar on Islamic Studies* 5 (1), 1668-1676
- [12] A Zulherri (2023) Decision making for network security with simple additive weighting method. *Journal of Intelligent Decision Support System (IDSS)* 6 (3), 155-159
- [13] A Zulherri, FA Siregar, ZA Gultom, EA Raihan (2023). Optimalisasi Website untuk Monitoring Jaringan OPD di Dinas Kominfo Kota Medan dengan Metode Triangulasi. *Bulletin of Computer Science Research* 3 (5), 357-363
- [14] A Zulherri, TS Gunawan, W Wanayumini (2021). Analisis Hasil Pendukung Keputusan Mendapatkan Rumah Dinas Perusahaan Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dan Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). *JURNAL MEDIA INFORMATIKA BUDIDARMA*, 2021

- [15] Sari, I.P., Ramadhani, F., Satria, A., & Sulaiman, O.K. Leukocoria Identification: A 5-Fold Cross Validation CNN and Adaboost Hybrid Approach. 2023 6th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), 486-491
- [16] Manurung, A.A., Nasution, M.D., & Sari, I.P. (2023). Implementation of Fuzzy K-Nearest Neighbor Method in Dengue Disease Classification. 2023 11th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM), 1-4
- [17] World Health Organization. (2023). Pneumonia to kill nearly 11 million children by 2030. Save the Children. <https://www.savethechildren.net/news/pneumonia-kill-nearly-11-million-children-2030>
- [18] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2022). Pneumonia menjadi ancaman kesakitan dan kematian di dunia. Direktorat Jenderal Pencegahan dan Pengendalian Penyakit. <https://p2p.kemkes.go.id/pneumonia-menjadi-ancaman-kesakitan-dan-kematian-di-dunia/>
- [19] Mercer Marsh Benefits. (2023). Health on Demand 2023: Mengungkap Manfaat Kesejahteraan yang Paling Bernilai bagi Karyawan di Indonesia. Marsh. <https://www.marsh.com/id/en/services/employee-health-benefits/insights/health-on-demand.html>
- [20] Azzahrah, A., & Sari, I.P. (2024). Perbandingan Sistem Prediksi Menggunakan Metode Monte Carlo dengan Metode K-NN pada Nilai Peserta Didik Uji Kompetensi Kejuruan. Sudo Jurnal Teknik Informatika 3 (3), 127-135
- [21] Alsharif, R., Al-Issa, Y., Alqudah, A. M., Abu Qasmieh, I., Mustafa, W. A., & Alquran, H. (2021). PneumoniaNet: Automated detection and classification of pediatric pneumonia using chest X-ray images and CNN approach. Electronics, 10(23), 2949. <https://doi.org/10.3390/electronics10232949>
- [22] Jawaz, I., & Rahmadewi, R. (2024). Sistem deteksi pneumonia paru-paru dengan pengolahan citra digital dan machine learning. Electron: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, 5(1), 138-146. <https://doi.org/10.33019/electron.v5i1.114>
- [23] Safira, R., & Sari, I.P. (2025). Model Prediksi Perkembangan Tumbuh Kembang Anak untuk Pencegahan Risiko Gizi Buruk Menggunakan Support Vector Machine (SVM) dengan Feature Selection Backward Elimination. Blend Sains Jurnal Teknik 4 (1), 1-11
- [24] Rahmawati, A., Yulianti, I., Nurajizah, S., Hidayatulloh, T., & Sari, A. O. (2025). Analisis Performa Model ResNet-50 Pada Diagnosis Pneumonia Balita Berdasarkan Citra Radiografi Thorax. Computer Science (CO - SCIENCE), 5(1), 42-48. <https://doi.org/10.31294/coscience.v5i1.7618>
- [25] Sari, I.P., Ramadhani, F., Satria, A., & Apdilah, D. (2023). Implementasi Pengolahan Citra Digital dalam Pengenalan Wajah menggunakan Algoritma PCA dan Viola Jones. Hello World Jurnal Ilmu Komputer 2 (3), 146-157
- [26] AT Bisono, A Zulherry (2025). Analisis Sentimen Game Genshin Impact untuk Mengetahui Reaksi dan Harapan Pemain Menggunakan Metode Naïve Bayes. sudo Jurnal Teknik Informatika 4 (2), 183-193
- [27] M Basri, A Zulherry (2025). Analysis of the Impact of Gambling and Online Loans in the Perspective of Informatics, Islam, and Kemuhammadiyah. AR-RASYID: Jurnal Pendidikan Agama Islam 5 (1)
- [28] Erlangga, F., & Sari, I.P. (2024). Perancangan Sistem Untuk Merekomendasikan Produk Skincare Menggunakan Metode NLP. Portal Riset dan Inovasi Sistem Perangkat Lunak 2 (4), 1-11
- [29] A Ichsan, A Zulherry, TA Lubis, BAZ Shahnaz (2025). Utilization of Mobile Applications to Speed Up The Search for Android-Based Index Places. IJATCoS: Indonesian Journal of Applied Technology, Computer and Science 2 (1)
- [30] Sari, I.P., Al-Khowarizmi, A, Sulaiman, O.K., & Apdilah, D. (2023). Implementation of Data Classification Using K-Means Algorithm in Clustering Stunting Cases. Journal of Computer Science, Information Technology and Telecommunication Engineering 4 (2), 402-412
- [31] Sulaiman, O.K & Batubara, I.H. (2021). Implementation Data Mining For Level Analysis Traffic Violation By Algorithm Association Rule. Al'adzkiya International of Computer Science and Information Technology (AIoCSIT) Journal 2 (2), 128-135
- [32] Sharma, M., & Parveen, R. (2021). The application of image processing in liver cancer detection. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 12(10). 10.14569/IJACSA.2021.0121050
- [33] Sari, L., & Tampubolon, M. S. (2022). Deteksi Pneumonia Menggunakan Convolutional Neural Network. Repository Institut Teknologi Indonesia. <https://repository.iti.ac.id/handle/123456789/1124>
- [34] Aqta, D.P., & Sari, I.P. (2025). Evaluasi Keefektifan Teknik Morfologi dan Histogram Citra Digital pada Minyak RON 92 di SPBU Pertamina Medan Tembung. Hello World Jurnal Ilmu Komputer 3 (4), 161-170
- [35] Rahman, S., Sarker, S., Miraj, M. A. A., Nihal, R. A., Haque, A. K. M. N., & Noman, A. A. (2021). Deep learning-driven automated detection of COVID-19 from radiography images: A comparative analysis. Cognitive Computation, 13(5), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s12559-020-09779-5>
- [36] Sari, I.P., Batubara, I.H., & Al-Khowarizmi, A. (2021). Sensitivity Of Obtaining Errors In The Combination Of Fuzzy And Neural Networks For Conducting Student Assessment On E-Learning. International Journal of Economic, Technology and Social Sciences (Injects) 2 (1), 331-338

- [37] Naibaho, R.F., & Sari, I.P. (2024). Implementasi Metode Gray Level Co-Occurrence Matrix Menganalisis Tekstur Kulit Wajah. *sudo Jurnal Teknik Informatika* 3 (4), 172-182
- [38] Sari, I.P., Al-Khowarizmi, A., & Batubara, I.H. (2021). Cluster Analysis Using K-Means Algorithm and Fuzzy C-Means Clustering For Grouping Students' Abilities In Online Learning Process. *Journal of Computer Science, Information Technology and Telecommunication Engineering* 2 (1), 139-144
- [39] Apdilah, D., & Sari, I.P. (2021). Optimization Of The Fuzzy C-Means Cluster Center For Credit Data Grouping Using Genetic Algorithms. *Al'adzkiya International of Computer Science and Information Technology (AIoCSIT) Journal* 2 (2), 156-163
- [40] Khairullah, I. K., Yusa, A., Hartanto, A. D., Hartatik, H., & Kusnawi, K. (2020). Deteksi citra digital menggunakan algoritma CNN dengan model normalisasi RGB. *INTECHNO Journal*, 2(2), 1–10. <https://doi.org/10.24076/intechnojournal.2020v2i2.1545>
- [41] Hall, J. E., & Guyton, A. C. (2020). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th ed.). Elsevier.
- [42] Zhang, K., Yao, E., Aung, T., & Chuang, P.-T. (2024). The alveolus: Our current knowledge of how the gas exchange unit of the lung is constructed and repaired. *UCSF Cardiovascular Research Institute*. <https://cvri.ucsf.edu/publications/alveolus-our-current-knowledge-how-gas-exchange-unit-lung-constructed-and-repaired>
- [43] Ou, X., Meng, J., Ma, C., Wan, H., Chen, Y., & Luo, F. (2025). Numerical simulation of voluntary respiration in a model of the whole human airway tree. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. <https://doi.org/10.1007/s10237-025-01932-z>
- [44] Häder, J., Meiners, S., & Mühlfeld, C. (2023). *Imaging of infectious lung diseases*. Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/174_2024_554
- [45] Chen, B., Liu, W., Chen, Y., She, Q., Li, M., Zhao, H., Zhao, W., Peng, Z., & Wu, J. (2021). Effect of Poor Nutritional Status and Comorbidities on the Occurrence and Outcome of Pneumonia in Elderly Adults. *Frontiers in Medicine*, 8, 719530. <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.719530>
- [46] Fauziyah, A. H. (2020). Deteksi Pneumonia pada Anak-Anak dari Citra X-Ray Berbasis Convolutional Neural Network. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. <http://repository.its.ac.id/id/eprint/80480>
- [47] Mishra, A. (2024). A comprehensive review of Artificial Intelligence and Machine Learning: Concepts, trends, and applications. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 11(5), 126–142. <https://doi.org/10.32628/IJSRST2411587>
- [48] Harahap, M., Laia, E. M., Sitanggang, L. S., Sinaga, M., Sihombing, D. F., & Husein, A. M. (2022). Deteksi Penyakit Covid-19 Pada Citra X-Ray Dengan Pendekatan Convolutional Neural Network (CNN). *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, 6(1), 70–77. <https://doi.org/10.29207/resti.v6i1.3373>
- [49] Mardianto, M. F. F., Yoani, A., Soewignjo, S., Putra, I. K. P. K. A., & Dewi, D. A. (2024). Classification of Pneumonia from Chest X-ray images using Support Vector Machine and Convolutional Neural Network. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 15(6). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.01506104>
- [50] Zhang, D., Ren, F., Li, Y., Na, L., & Ma, Y. (2021). Pneumonia Detection from Chest X-ray Images Based on Convolutional Neural Network. *Electronics*, 10(13), 1512. <https://doi.org/10.3390/electronics10131512>
- [51] Artiyati, N., & Ahdika, A. (2024). Implementation of the Support Vector Machine (SVM) Method for Classification of Underdeveloped Areas in Indonesia. *Jurnal Media Informatika Budidarma*, 8(1), 36–43. <https://doi.org/10.30865/mib.v8i2.7598>
- [52] Putri, A. N., Aryanti, A., & Soim, S. (2024). Implementasi algoritma SVM non-linear pada klasifikasi analisis sentimen perkembangan AI di sektor pendidikan. *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)*, 6(2), 703–711. <https://paperity.org/p/356546961/implementasi-algoritma-svm-non-linear-pada-klasifikasi-analisis-sentimen-perkembangan-ai>
- [53] Jollyta, D., Gusrianty, G., Prihandoko, P., & Sukrianto, D. (2023). N-gram and kernel performance using Support Vector Machine algorithm for fake news detection system. *ILKOM Jurnal Ilmiah*, 15(3), 398–404. <https://doi.org/10.33096/ilkom.v15i3.1770.398-404>
- [54] Alfarizi, M. R. S., Al-Farish, M. Z., Taufiqurrahman, M., Ardiansah, G., & Elgar, M. (2023). Penggunaan Python sebagai bahasa pemrograman untuk machine learning dan deep learning. *Karimah Tauhid*, 2(1). <https://paperity.org/p/342223681/penggunaan-python-sebagai-bahasa-pemrograman-untuk-machine-learning-dan-deep-learning>
- [55] DigitalOcean. (2025). Best Python libraries for machine learning in 2025. *DigitalOcean*. <https://www.digitalocean.com/community/conceptual-articles/python-libraries-for-machine-learning>

- [56] Hermanto, K., Salim, D., Wu, B., Salim, O. R., & Gunadi, R. B. (2023). Penggunaan Python untuk menganalisis pola penyebaran COVID-19 di masa pandemi. *Journal of Student Development Information System (JoSDIS)*, 3(2), 62–75. <https://jurnal.ulb.ac.id/index.php/JoSDIS/article/view/4548>
- [57] J. Mohajon, “Confusion Matrix for Your Multi-Class Machine Learning Model,” <https://towardsdatascience.com/>, 2020. <https://towardsdatascience.com/confusion-matrix-for-your-multi-class-machine-learning-model-ff9aa3bf7826>
- [58] Hidayat, T. (2021). Penerapan Algoritma Convolutional Neural Network Dalam Identifikasi Citra Daging Merah Konsumsi Jenis Lokal (Tesis, Universitas Nusa Mandiri). <https://repository.nusamandiri.ac.id/repo/17071/Penerapan-Algoritma-Convolutional-Neural-Network-Dalam-Identifikasi-Citra-Daging-Merah-Konsumsi-Jenis-Lokal>
- [59] Yopento, J., Ernawati, E., & Coastera, F. F. (2021). Identifikasi pneumonia pada citra X-ray menggunakan metode convolutional neural network (CNN) berdasarkan ekstraksi fitur Sobel. *Rekursif: Jurnal Informatika*, 9(2), 45-52. <https://doi.org/10.33369/rekursif.v10i1.17247>
- [60] Khoirunisa, F. E., & Charibaldi, N. (2024). Effect of using GLCM and LBP+HOG feature extraction on SVM method in classification of human skin disease type. *Inform: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 9(2), 145–150. <https://doi.org/10.25139/inform.v9i2.8275>
- [61] Christopher S. Goldenstein, et. al. “Infrared laser-absorption sensing for combustion gases.” *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 60, May 2017, Pages 132-176, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.002>.