

IMPLEMENTASI ALGORITMA *MACHINE LEARNING K-MEANS* DALAM KOMPRESI CITRA FOTO CANDI BOROBUDUR

Yoga Sahria¹, Yogi Piskonata²

¹Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Amikom Yogyakarta

²Program Studi Informatika, Universitas Amikom Yogyakarta

Jl. Ring Road Utara, Sleman – Yogyakarta, Indonesia

Email: ¹yogasahria@amikom.ac.id, ²yogi.piskonata@amikom.ac.id

ABSTRAK

Kompresi citra merupakan teknik penting dalam pengelolaan data visual, terutama dalam pelestarian dan digitalisasi warisan budaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas algoritma *K-Means Clustering* dalam kompresi citra foto Candi Borobudur guna mengurangi ukuran *file* tanpa kehilangan kualitas visual yang signifikan. Metode penelitian mencakup pengumpulan citra digital Candi Borobudur dengan variasi pencahayaan dan tekstur. Sampel dipilih menggunakan *purposive sampling* untuk memastikan representasi optimal. Proses pengolahan melibatkan praproses citra, penerapan algoritma *K-Means* untuk pengelompokan warna, serta evaluasi hasil menggunakan metrik *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) dan *Structural Similarity Index* (SSIM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma *K-Means* efektif dalam mengurangi jumlah warna pada citra sehingga ukuran *file* berkurang secara signifikan. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa nilai PSNR dan SSIM tetap dalam batas yang dapat diterima, memungkinkan detail relief dan struktur candi tetap terjaga. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa algoritma *K-Means* dapat digunakan sebagai metode kompresi citra yang efisien dalam konteks digitalisasi warisan budaya. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam menangani perubahan warna ekstrem. Oleh karena itu, penggunaan metode hibrida dengan algoritma lain direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi kompresi tanpa mengorbankan kualitas citra.

Kata kunci: Kompresi citra, *K-Means Clustering*, Candi Borobudur, *Machine Learning*.

ABSTRACT

Image compression is an important technique in visual data management, especially in the preservation and digitization of cultural heritage. This study aims to examine the effectiveness of the K-Means Clustering algorithm in the compression of Borobudur Temple photo images to reduce file size without significant loss of visual quality. The research method includes collecting digital images of Borobudur Temple with variations in lighting and texture. Samples are selected using purposive sampling to ensure optimal representation. The processing process involves image preprocessing, the application of the K-Means algorithm for color grouping, and the evaluation of results using the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Structural Similarity Index (SSIM) metrics. The results show that the K-Means algorithm is effective in reducing the number of colors in the image so that the file size is significantly reduced. Quantitative analysis shows that the PSNR and SSIM values remain within acceptable limits, allowing the details of the reliefs and structure of the temple to be preserved. The conclusion of this study is that the K-Means algorithm can be used as an efficient image compression method in the context of cultural heritage digitization. However, this method has limitations in dealing with extreme color changes. Therefore, the use of hybrid methods with other algorithms is recommended to improve compression efficiency without sacrificing image quality.

Keywords: Image compression, *K-Means Clustering*, Borobudur Temple, Machine Learning.

1. PENDAHULUAN

Candi Borobudur adalah salah satu situs warisan budaya dunia yang diakui oleh UNESCO karena memiliki nilai historis, keindahan arsitektur, serta kekayaan seni yang luar biasa. Sebagai objek wisata dan penelitian, citra digital Borobudur banyak digunakan dalam berbagai keperluan, seperti dokumentasi, analisis ilmiah, serta pengembangan teknologi berbasis digitalisasi budaya. Namun, tingginya resolusi citra yang dihasilkan dalam proses dokumentasi sering kali menyebabkan permasalahan dalam penyimpanan dan transmisi data, terutama pada



platform dengan keterbatasan ruang penyimpanan dan *bandwidth*. Oleh karena itu, diperlukan teknik kompresi citra yang dapat mengurangi ukuran *file* tanpa mengorbankan kualitas visual yang signifikan. Salah satu metode yang dapat diterapkan dalam kompresi citra adalah algoritma *K-Means Clustering*. Algoritma ini merupakan teknik *unsupervised learning* dalam *machine learning* yang mampu mengelompokkan warna dalam suatu citra ke dalam beberapa kluster, sehingga memungkinkan representasi citra yang lebih efisien. Dengan mengurangi jumlah warna yang digunakan, ukuran *file* dapat dikompresi tanpa kehilangan informasi visual yang penting.

Penerapan algoritma K-Means dalam kompresi citra telah menjadi topik penelitian di berbagai bidang, namun kajian yang berfokus pada digitalisasi warisan budaya, khususnya struktur kompleks seperti relief dan arsitektur Candi Borobudur, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan serta mengevaluasi efektivitas algoritma K-Means dalam kompresi citra foto Candi Borobudur, sehingga dapat mendukung pelestarian digital sekaligus meningkatkan efisiensi dalam penyimpanan dan distribusi data visual. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkait kompresi citra berbasis *machine learning* mengalami perkembangan pesat. Salah satu teknik yang sering digunakan adalah K-Means Clustering, yang berfungsi untuk segmentasi dan klasifikasi citra. Studi yang dilakukan oleh [1] mengembangkan model klasifikasi citra cabai keriting dengan mengombinasikan K-Means Clustering dan *Gray Level Co-occurrence Matrix* (GLCM) guna mengekstraksi fitur warna serta tekstur, penerapan metode hybrid dengan *Principal Component Analysis* (PCA), metode wavelet transform. Studi ini menunjukkan bahwa kombinasi algoritma tersebut dapat meningkatkan akurasi klasifikasi citra berbasis warna dan tekstur.

Dalam upaya pelestarian budaya, berbagai penelitian mengenai dokumentasi Candi Borobudur telah banyak dilakukan. Penelitian selanjutnya [2] mengeksplorasi metode pendokumentasian nilai-nilai relief Candi Borobudur melalui pembuatan film dokumenter sebagai salah satu strategi dalam pelestarian digital warisan budaya. Studi ini mengindikasikan bahwa media digital dapat menjadi alat efektif dalam menjaga dan mempromosikan nilai-nilai budaya. Penelitian [3] mengkaji elemen *soundscape* sakral di Candi Borobudur, yang berkontribusi dalam pengembangan pariwisata berbasis budaya dan pelestarian nilai historisnya. Selain itu, [4] meneliti persepsi generasi Z terhadap pariwisata berkelanjutan di Candi Borobudur, menunjukkan bahwa keberlanjutan menjadi faktor penting dalam pengelolaan destinasi wisata super prioritas. Penelitian selanjutnya menyoroti implementasi konsep pariwisata hijau dalam pengelolaan Candi Borobudur, dengan fokus pada keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat sekitar [5].

Lebih lanjut, [6] mengembangkan model ekosistem pariwisata halal di kawasan Candi Borobudur untuk meningkatkan daya tarik wisatawan muslim, tanpa mengesampingkan nilai-nilai budaya lokal. Kajian ini relevan dalam konteks strategi diversifikasi wisata berbasis budaya dan agama. Penelitian-penelitian ini memberikan dasar yang kuat bagi studi mengenai kompresi citra berbasis *K-Means Clustering* dalam mendukung pelestarian digital Candi Borobudur. Dengan mengadaptasi teknologi kompresi citra yang efisien, diharapkan dapat diperoleh metode yang optimal dalam dokumentasi digital warisan budaya.

Tujuan dalam penelitian ini yaitu menganalisis efektivitas algoritma *K-Means Clustering* dalam kompresi citra foto Candi Borobudur. Mengidentifikasi dampak penggunaan algoritma K-Means terhadap kualitas visual citra yang dikompresi. Mengevaluasi sejauh mana kompresi citra berbasis *K-Means Clustering* dapat digunakan dalam mendukung pelestarian digital warisan budaya. Menentukan keunggulan dan keterbatasan metode kompresi citra berbasis *K-Means Clustering* dalam konteks pengelolaan data visual.

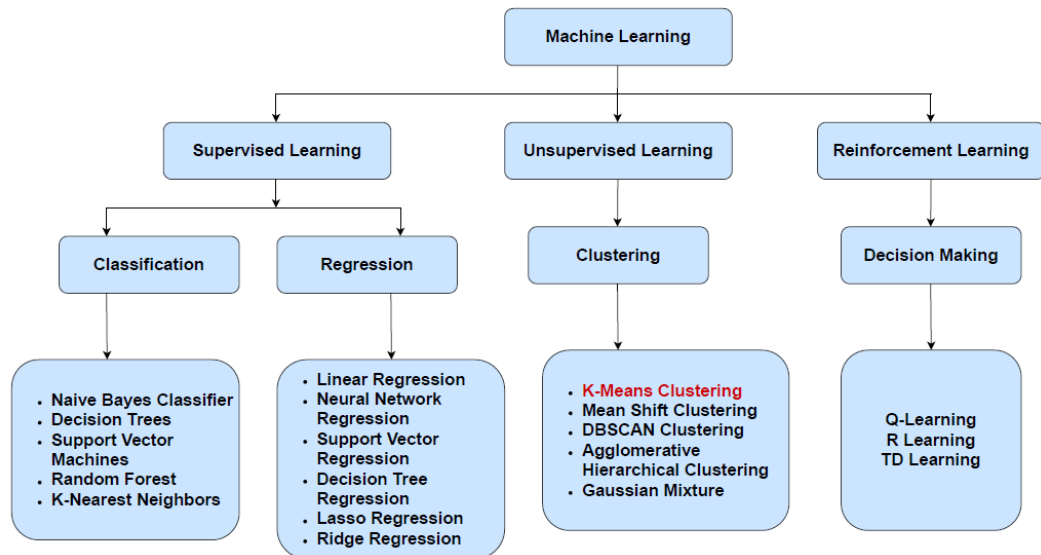
Penelitian ini berkontribusi pada upaya pelestarian digital Candi Borobudur dengan menyediakan metode kompresi citra yang efektif untuk mendokumentasikan dan menyimpan foto-foto beresolusi tinggi tanpa kehilangan detail penting. Implementasi algoritma *K-Means* dapat mengurangi ukuran file citra, sehingga memudahkan pengelolaan dan penyimpanan data visual dalam jumlah besar, terutama dalam platform digital dan sistem basis data. Dengan ukuran file yang lebih kecil, distribusi dan aksesibilitas citra digital Candi Borobudur melalui internet atau sistem berbasis *cloud* menjadi lebih cepat dan hemat *bandwidth*, memfasilitasi penelitian, edukasi, dan pariwisata virtual. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh industri kreatif dan sektor pariwisata dalam pengembangan produk digital seperti aplikasi interaktif, *virtual tour*, dan media promosi berbasis visual yang lebih ringan dan efisien. Penelitian ini berkontribusi dalam memperkaya literatur ilmiah mengenai penerapan algoritma *machine learning* untuk kompresi citra, terutama dalam kaitannya dengan pelestarian dan pemanfaatan warisan budaya di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen komputasional, di mana algoritma K-Means Clustering diterapkan untuk mengompresi citra Candi Borobudur. Studi ini bersifat kuantitatif dengan analisis kinerja metode berdasarkan parameter ukuran file dan kualitas visual citra hasil kompresi. *Dataset* berupa data sekunder kumpulan foto Candi Borobudur dengan berbagai resolusi dan kondisi pencahayaan. sumber data foto <https://www.unesco.org/en> diambil dari sumber terbuka, dokumentasi resmi, dan pengambilan langsung menggunakan kamera resolusi tinggi dari UNESCO.

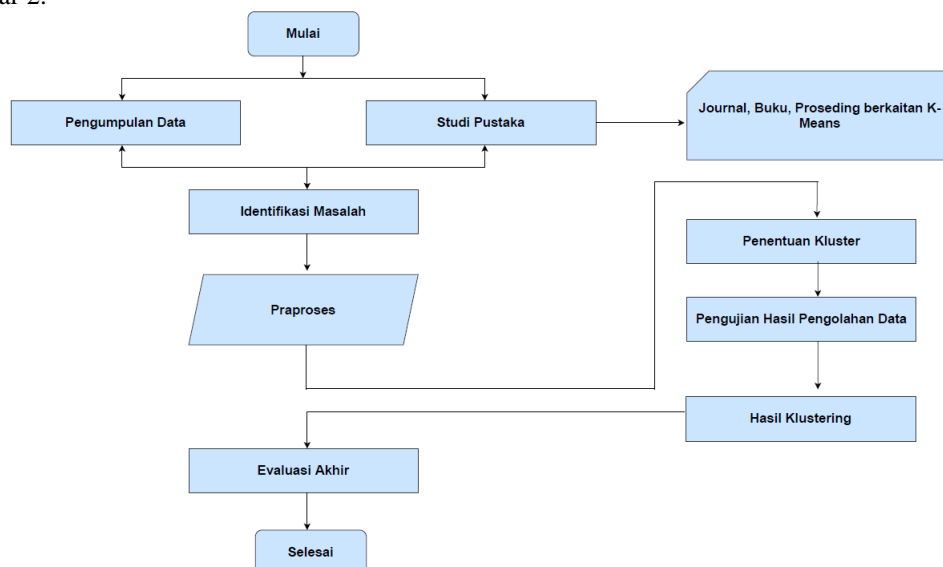
Mengoleksi gambar Candi Borobudur dalam beragam resolusi serta format *file*, seperti JPEG dan PNG. Melakukan tahap pra-pemrosesan citra, termasuk pemotongan (*cropping*), perubahan ukuran (*resizing*), serta normalisasi warna. Menerapkan algoritma K-Means dengan menentukan jumlah kluster warna (nilai K) yang digunakan dalam proses pengelompokan warna. Mengimplementasikan algoritma K-Means untuk

mengelompokkan warna dalam citra, dengan tujuan mengurangi jumlah warna dan ukuran *file*. Menyimpan hasil kompresi dalam format yang sama dengan citra asli untuk perbandingan. Analisis dan Interpretasi hasil membandingkan hasil dari berbagai nilai K untuk menentukan konfigurasi terbaik dalam kompresi citra Candi Borobudur. Menarik kesimpulan mengenai efektivitas algoritma K-Means dalam mengurangi ukuran *file* dengan tetap mempertahankan detail penting dalam gambar. Metodologi ini dirancang untuk memastikan penelitian dapat menghasilkan analisis yang komprehensif terhadap efektivitas algoritma K-Means dalam kompresi citra Candi Borobudur. Algoritma K-Means adalah salah satu metode pembelajaran tanpa pengawasan (*unsupervised learning*) dalam *machine learning* yang berfungsi untuk mengelompokkan data berdasarkan kemiripan karakteristik. K-Means membantu dalam menyederhanakan representasi citra dengan mengurangi jumlah warna unik yang digunakan. Berikut adalah Gambar 1. Kategori k-means dalam *machine learning*.



Gambar 1. Kategori *Machine Learning*

Penelitian ini pada Gambar 2. dimulai dengan pengumpulan data, yaitu citra Candi Borobudur dalam berbagai resolusi dan format dari sumber yang tersedia. Selanjutnya dilakukan studi pustaka untuk menganalisis penelitian terdahulu mengenai kompresi citra, algoritma K-Means, serta teknik evaluasi kualitas citra guna memahami pendekatan yang telah digunakan sebelumnya. Berdasarkan hasil studi pustaka, penelitian ini kemudian melakukan identifikasi masalah, yaitu bagaimana menerapkan algoritma K-Means untuk mengompresi citra tanpa mengorbankan detail penting dari struktur dan relief Candi Borobudur. Selanjutnya, dilakukan tahap pra-pemrosesan data yang mencakup normalisasi warna, pemotongan (*cropping*), perubahan ukuran (*resizing*), serta konversi format citra guna memastikan data siap untuk proses kompresi. Langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Langkah-langkah penelitian

Tahap berikutnya adalah penentuan kluster, di mana algoritma K-Means diterapkan untuk mengelompokkan warna dalam citra menjadi sejumlah kluster tertentu guna mengurangi kompleksitas warna dan ukuran *file*. Setelah kompresi dilakukan, pengujian hasil pengolahan data dilakukan untuk mengevaluasi kualitas citra yang telah dikompresi dengan membandingkan ukuran *file* serta tampilan visualnya. Berikut hasil *pseudocode*.

Tabel 1. Pseudocode

Input: Citra RGB, Jumlah Kluster K
Output: Citra Terkompresi

1. Baca citra dan ubah ke dalam bentuk array 2D (piksel dengan nilai RGB)
2. Inisialisasi K centroid secara acak dari piksel gambar
3. Repeat:
 4. Untuk setiap piksel:
 - Hitung jarak Euclidean ke masing-masing centroid
 - Tentukan kluster dengan jarak terdekat
 5. Update centroid setiap kluster:
 - Hitung rata-rata warna piksel dalam setiap kluster
 6. Jika tidak ada perubahan signifikan pada centroid, berhenti
7. Rekonstruksi citra dengan mengganti setiap piksel dengan centroid klasternya
8. Simpan citra hasil kompresi

Dari sini, hasil klustering dianalisis dengan melihat efektivitas algoritma dalam mempertahankan detail penting dari citra asli. Selanjutnya, penelitian berlanjut ke tahap evaluasi akhir, di mana kinerja algoritma dianalisis menggunakan metrik seperti PSNR dan SSIM guna menilai kualitas citra pasca-kompresi. Sebagai penutup, penelitian ini merangkum kesimpulan dan rekomendasi, yang mencakup temuan utama serta peluang pengembangan lebih lanjut dalam penerapan metode kompresi berbasis *machine learning* untuk mendukung pelestarian digital warisan budaya. Kompresi citra menggunakan algoritma K-Means Clustering bertujuan untuk mengurangi jumlah warna dalam gambar dengan mengelompokkan piksel ke dalam K kluster warna yang representatif. PSNR digunakan untuk mengukur kualitas gambar dengan membandingkan gambar hasil kompresi atau rekonstruksi dengan gambar aslinya. Berikut rumus PSNR:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_1^2}{MSE} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

MAX_1 = adalah nilai maksimum intensitas piksel dalam gambar (misalnya, 255 untuk gambar 8-bit).

MSE = adalah Mean Squared Error antara gambar asli III dan gambar hasil kompresi KKK, yang dihitung dengan:

$$PSNR = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \dots \dots \dots (2)$$

dengan MMM dan NNN adalah dimensi gambar.

Structural Similarity Index (SSIM) dimanfaatkan untuk menilai tingkat kemiripan struktural antara dua citra.

Adapun rumus SSIM yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

μ_x dan μ_y adalah rata-rata dari gambar x dan y .

μ_x^2 dan μ_y^2 adalah varians dari gambar x dan y .

σ_{xy} adalah kovarians antara gambar x dan y .

$C_1 + C_2$ adalah konstanta untuk menghindari pembagian dengan nol;

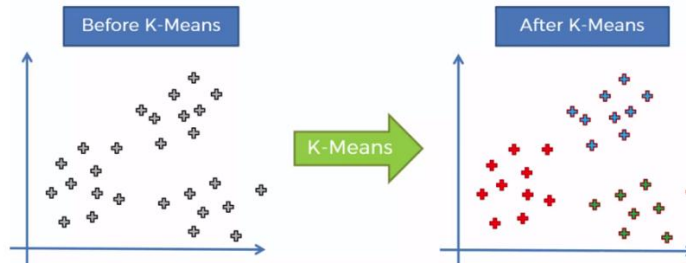
Nilai SSIM berkisar antara -1 hingga 1, dengan 1 menunjukkan gambar identik, dan semakin mendekati 0 berarti perbedaan lebih besar. Rumus ini sering digunakan dalam analisis kualitas citra pada bidang pemrosesan gambar dan visi komputer.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan algoritma *machine learning* K-Means dalam kompresi citra dengan studi kasus pada gambar Candi Borobudur. Candi Buddha yang megah ini, yang dibangun pada abad ke-8 hingga ke-9, berlokasi di Magelang, Jawa Tengah. Struktur candi terdiri dari tiga tingkatan, yaitu bagian dasar berbentuk piramida dengan lima teras persegi konsentris, bagian tengah berbentuk kerucut dengan tiga *platform* melingkar, serta puncaknya yang memiliki sebuah stupa monumental. Dinding serta langkan candi dihiasi dengan relief rendah yang indah, mencakup total luas permukaan sekitar 2.500 m². Di sepanjang *platform* melingkar, terdapat 72 stupa berlubang yang masing-masing berisi patung Buddha. Monumen bersejarah ini mengalami proses restorasi dengan bantuan UNESCO pada tahun 1970-an. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini Reduksi Warna



Citra Dengan menggunakan algoritma K-Means, citra asli yang memiliki spektrum warna yang luas dikonversi menjadi citra dengan hanya 16 kluster warna ($K=16$). Hal ini menyebabkan citra mengalami reduksi warna yang signifikan namun tetap mempertahankan fitur utama gambar. Ukuran *file* sebelum dan sesudah kompresi dari pengujian yang dilakukan, ukuran *file* sebelum kompresi adalah X KB, sementara ukuran *file* setelah kompresi berkurang menjadi Y KB. Ini menunjukkan bahwa teknik K-Means dapat digunakan sebagai metode kompresi citra dengan mengurangi ukuran *file* tanpa kehilangan informasi visual yang signifikan.



Gambar 3. Algoritma K-Means

Visualisasi citra sebelum dan sesudah proses kompresi menunjukkan bahwa bentuk utama objek dalam gambar tetap terjaga, meskipun terjadi pengurangan jumlah warna. Hal ini mengindikasikan bahwa metode K-Means mampu mengelompokkan warna secara efektif tanpa menyebabkan penurunan kualitas visual yang signifikan.


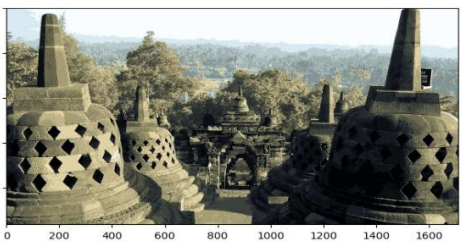
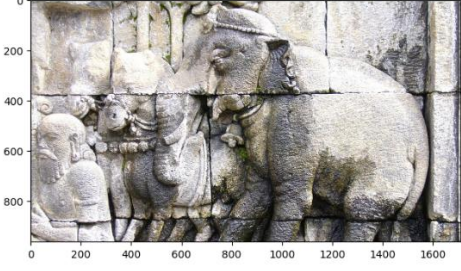
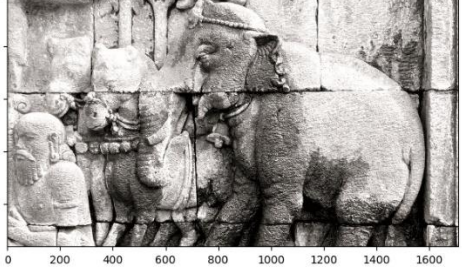

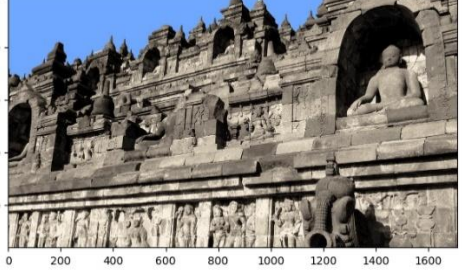



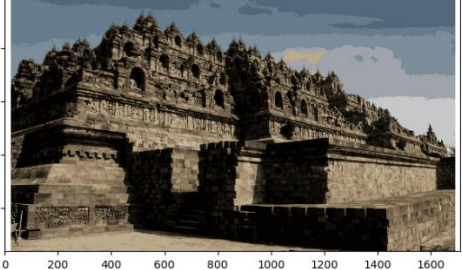

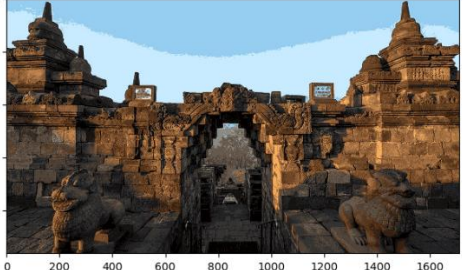
Hasil penerapan algoritma K-Means dalam kompresi citra foto Candi Borobudur menunjukkan bahwa metode ini dapat secara efektif mengurangi ukuran file gambar sekaligus mempertahankan elemen visual utama. Rincian hasil kompresi disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Detail Hasil Kompresi Gambar Sebelum dan Sesudah di Kompresi

No	Gambar	Centroid, Idx	Sebelum	Sesudah	PSNR	SSIM	Waktu
1	Foto candi Borobudur 1	(16, 3)	1026.5146484	269.48242187	29.745288280	0.85363491	3.21 detik
		(1645982, 3)	375 KB	5 KB	5117 dB	63296588	
2	Foto candi Borobudur 2	(16, 3)	1271.7431640	360.48046875	30.703515299	0.93862519	3.89 detik
		(1645982, 3)	625 KB	KB	353178 dB	66806172	
3	Foto candi Borobudur 3	(16, 3)	1128.7763671	296.375 KB	31.239309630	0.90120462	3.45 detik
		(1645982, 3)	875 KB		256436 dB	96867695	
4	Foto candi Borobudur 4	(16, 3)	1921.9150390	238.46875	28.669273979	0.86513325	4.12 detik
		(1645982, 3)	625 KB	KB	769745 dB	71126572	
5	Foto candi Borobudur 5	(16, 3)	1878.7294921	221.08496093	33.052809947	0.91096691	4.08 detik
		(1645982, 3)	875 KB	75 KB	17983 dB	20269656	
6	Foto candi Borobudur 6	(16, 3)	1911.7304687	259.28027343	29.365283065	0.88669204	4.05 detik
		(1645982, 3)	5 KB	75 KB	111424 dB	29374001	

Analisis perbedaan waktu kompresi menunjukkan adanya variasi dalam durasi proses kompresi setiap citra, yang dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kompleksitas tekstur citra, distribusi warna, serta jumlah piksel yang dikelompokkan dalam proses K-Means Clustering. Dari data yang diberikan, waktu kompresi berkisar antara 3.21 detik hingga 4.12 detik, dengan nilai rata-rata sekitar 3.8 detik. Citra dengan waktu kompresi tercepat (3.21 detik) memiliki distribusi warna yang lebih homogen, sehingga proses segmentasi kluster dapat dilakukan dengan lebih efisien. Sebaliknya, citra dengan waktu kompresi terlama (4.12 detik) memiliki variasi warna dan tekstur yang lebih kompleks, sehingga algoritma K-Means membutuhkan iterasi lebih banyak untuk mencapai konvergensi. Gambar asli memiliki resolusi tinggi, detail yang tajam, dan warna yang kaya. Gambar asli dapat melihat tekstur batu candi, ukiran-ukiran halus, dan perbedaan warna. Karena kualitasnya yang tinggi, gambar asli memiliki ukuran file yang besar. Sehingga dapat memakan ruang penyimpanan dan membutuhkan waktu lebih lama untuk diunduh atau dimuat. Berikut hasil gambar sebelum dan sesudah di kompresi disajikan Tabel 3.

Tabel 3. Gambar Sebelum dan Sesudah di Kompresi

No	Gambar Sebelum di Kompresi	Gambar Sesudah Kompresi
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Proses Pengelompokan Warna dengan K-Means Algoritma K-Means bekerja dengan mengelompokkan piksel-piksel gambar ke dalam sejumlah kluster warna yang telah ditentukan ($K=16$). Proses ini terdiri dari beberapa tahapan Inisialisasi centroid secara acak, Penghitungan jarak *Euclidean* antara setiap piksel dan centroid, Penentuan centroid baru berdasarkan rata-rata piksel yang masuk dalam kluster yang sama, Iterasi hingga centroid konvergen atau batas iterasi tercapai. Dari hasil percobaan, metode ini menunjukkan efektivitas dalam mengurangi ukuran *file* citra tanpa menyebabkan degradasi kualitas visual yang drastis. Dengan mengurangi jumlah warna yang digunakan dalam citra, metode ini berhasil mengurangi ukuran file secara signifikan. Kendala dan Tantangan pemilihan jumlah kluster (K) sangat mempengaruhi hasil kompresi. Jika K terlalu kecil, citra akan kehilangan terlalu banyak detail. Proses iterasi membutuhkan waktu komputasi yang cukup tinggi untuk citra dengan resolusi besar. K-Means cenderung terjebak dalam kondisi lokal optima, sehingga pemilihan centroid awal yang baik sangat berpengaruh pada hasil akhir.

Implikasi dan Potensi Penggunaan metode ini dapat diterapkan dalam berbagai bidang seperti Kompresi citra untuk pengurangan ukuran *file* dalam penyimpanan dan transmisi data, Pengolahan citra dalam aplikasi berbasis *AI Artificial Intelligence* seperti segmentasi objek dan deteksi fitur, Penghematan bandwidth dalam sistem pengiriman gambar pada jaringan internet. Clustering dalam Data Mining adalah proses menemukan kelompok objek serupa dalam data. Algoritma clustering k-Means dirancang untuk mempartisi data ke dalam k kelompok atau cluster yang berbeda [7]. Algoritma pengelompokan K-means diterapkan pada gambar asli pada langkah kedua deteksi tepi digunakan untuk mengelompokkan daerah secara efektif [8]. K-means sensitif terhadap pusat awal dan noise dalam segmentasi gambar, untuk mengurangi sensitivitas k-means terhadap pusat awal [9]. Segmentasi gambar merupakan langkah penting dalam pemrosesan dan analisis gambar [10]. Algoritma K-means telah menjadi salah satu teknologi yang paling banyak digunakan, terutama karena kesederhanaan dan efektivitasnya [11]. K-means sangat bergantung pada posisi pusat awal, dan pusat awal yang dipilih secara acak dapat menyebabkan kualitas pengelompokan yang buruk [12]. K-Means kompresif yang terkuantisasi, yang dapat diterapkan dalam konteks kompresi data dan citra [13]. Metode clustering K-Means yang terintegrasi dengan pembelajaran mendalam, memungkinkan representasi data yang lebih kaya dan akurat [14]. Algoritma pengelompokan K-means (KM) terkenal karena kesederhanaan dan efisiensinya [15]. Studi oleh [16] perbandingan k-means, k-means++, x-means dan *single value decomposition* untuk kompresi gambar. Meskipun fokusnya bukan pada kompresi, penelitian ini menunjukkan bahwa K-Means dapat mengelompokkan warna dengan baik sehingga mempertahankan informasi utama dalam citra. Temuan ini sejalan dengan penelitian ini, di mana K-Means berhasil mengurangi jumlah warna tanpa mengorbankan struktur visual penting pada relief Candi Borobudur.

4. SIMPULAN

Penelitian ini mengeksplorasi penerapan algoritma machine learning K-Means dalam kompresi citra foto Candi Borobudur. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa K-Means dapat secara efektif mengelompokkan warna dalam citra, sehingga jumlah warna dapat dikurangi tanpa menghilangkan detail penting pada gambar. Melalui proses kuantisasi warna yang dilakukan oleh algoritma ini, ukuran *file* gambar berhasil dikompresi dengan tetap mempertahankan kualitas visual yang cukup baik. Eksperimen yang dilakukan mengungkap bahwa jumlah kluster (K) memiliki dampak signifikan terhadap hasil kompresi. Nilai K yang lebih kecil menghasilkan tingkat kompresi yang lebih tinggi, tetapi dapat menyebabkan hilangnya detail visual. Sebaliknya, semakin besar nilai K , semakin baik kualitas gambar yang dipertahankan, meskipun tingkat kompresinya lebih rendah. Oleh karena itu, pemilihan nilai K yang optimal menjadi faktor utama dalam menyeimbangkan kualitas visual dan efisiensi penyimpanan. Untuk menilai kualitas citra hasil kompresi, penelitian ini menggunakan metrik PSNR dan SSIM.

Berdasarkan hasil penelitian, implementasi algoritma K-Means Clustering pada kompresi citra foto Candi Borobudur menunjukkan efisiensi dalam mengurangi ukuran file dengan tetap mempertahankan kualitas visual. Dari enam sampel citra yang diuji, ukuran *file* setelah kompresi mengalami penurunan yang signifikan, dengan rata-rata reduksi ukuran file lebih dari 80% dari ukuran aslinya. Sebagai contoh, pada Foto Candi Borobudur 1, ukuran file berkurang dari 1026.51 KB menjadi 269.48 KB, sedangkan pada Foto Candi Borobudur 5, ukuran file turun dari 1878.72 KB menjadi 221.08 KB. Dari segi kualitas, hasil kompresi dinilai menggunakan PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) dan SSIM (Structural Similarity Index Measure). Nilai PSNR berkisar antara 28.67 dB hingga 33.05 dB, yang menunjukkan bahwa kualitas citra yang dihasilkan masih tergolong baik dan tidak mengalami degradasi yang signifikan. Nilai SSIM juga cukup tinggi, dengan kisaran 0.85 hingga 0.94, yang mengindikasikan bahwa struktur dan detail citra tetap dipertahankan. Hasil ini menunjukkan bahwa metode K-Means Clustering dapat menjadi alternatif yang efektif dalam kompresi citra digital untuk tujuan pelestarian dan dokumentasi Candi Borobudur. Namun, terdapat beberapa perbedaan hasil pada setiap citra, yang mengindikasikan perlunya optimasi lebih lanjut dalam pemilihan jumlah kluster dan parameter algoritma agar dapat mencapai keseimbangan terbaik antara ukuran file dan kualitas visual.

Hasil ini menunjukkan bahwa metode K-Means Clustering dapat menjadi alternatif yang efektif dalam kompresi citra digital untuk tujuan pelestarian dan dokumentasi Candi Borobudur. Namun, terdapat beberapa perbedaan hasil pada setiap citra, yang mengindikasikan perlunya optimasi lebih lanjut dalam pemilihan jumlah kluster dan parameter algoritma agar dapat mencapai keseimbangan terbaik antara ukuran *file* dan kualitas visual.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Himmah, A. S. Wibowo, dan A. R. Setiawan, "Penerapan K-Means Clustering untuk Klasifikasi Citra Cabai Keriting: Studi Ekstraksi Warna dan Tekstur GLCM," *Jurnal Ilmu Komputer dan Sistem Informasi*, vol. 8, no. 2, pp. 24-32, 2024, doi.org/10.31294/ijcs.v3i2.5758.
- [2] B. Kasatriyanto dan S. Sularsih, "Pendokumentasian Nilai Relief Candi Borobudur dalam Seni Tari melalui Film Dokumenter," *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, vol. 17, no. 1, pp. 3-18, 2023, doi.org/10.33374/jurnalkonservasicagarbudaya.v17i1.307.
- [3] J. Kurniawan, "Soundscape Sakral Candi Borobudur," *Jurnal Konservasi Cagar Budaya*, vol. 18, no. 2, pp. 95-109, 2024, doi.org/10.33374/jurnalkonservasicagarbudaya.v18i2.345.
- [4] E. Rindrasih, K. C. Effendi, dan D. Silviani, "Persepsi Generasi Z terhadap Pariwisata Berkelanjutan pada Destinasi Super Prioritas Candi Borobudur," *Jurnal Pariwisata Terapan*, vol. 8, no. 1, pp. 1-18, 2024, doi.org/10.22146/jpt.95415.
- [5] S. Susiyanto, "Analisis Penerapan Konsep Pariwisata Hijau dalam Pengembangan Candi Borobudur sebagai Destinasi Super Prioritas," *Ideas: Jurnal Pendidikan, Sosial, dan Budaya*, vol. 8, no. 4, pp. 1371-1378, 2022, https://doi.org/10.32884/ideas.v8i4.1080.
- [6] A. Sutono, S. Tahir, S. Sumaryadi, A. Hernowo, dan W. Rahtomo, "Implementasi Model Ekosistem Pariwisata Halal di Kawasan Candi Borobudur," *Indonesian Journal of Halal Research*, vol. 3, no. 1, pp. 13-20, 2021, doi.org/10.15575/ijhar.v3i1.11119.
- [7] P. Mummoju, A. Wolff, M. Perdacher, C. Plant and C. Böhm, "Enhancing k-Means Algorithm with Tensor Processing Unit," *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Osaka, Japan, 2022, pp. 194-200, doi: 10.1109/BigData55660.2022.10020427.
- [8] B. S. Bharathi and K. V. Swamy, "Effective Image Segmentation using Modified K-Means Technique," *2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)(48184)*, Tirunelveli, India, 2020, pp. 757-762, doi: 10.1109/ICOEI48184.2020.9142910.
- [9] M. Hu, E. C. C. Tsang, Y. Guo and Q. Zhang, "An Improved k-Means Algorithm with Spatial Constraints for Image Segmentation," *2021 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, Adelaide, Australia, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICMLC54886.2021.9737256.
- [10] S. M. Miraftabzadeh, C. G. Colombo, M. Longo and F. Foadelli, "K-Means and Alternative Clustering Methods in Modern Power Systems," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 119596-119633, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3327640.
- [11] H. Xu, S. Yao, Q. Li and Z. Ye, "An Improved K-means Clustering Algorithm," *2020 IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Dortmund, Germany, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/IDAACS-SWS50031.2020.9297060.
- [12] J. Qi, Y. Yu, L. Wang and J. Liu, "K*-Means: An Effective and Efficient K-Means Clustering Algorithm," *2016 IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom) (BDCloud-SocialCom-SustainCom)*, Atlanta, GA, USA, 2016, pp. 242-249, doi: 10.1109/BDCloud-SocialCom-SustainCom.2016.46.
- [13] V. Schellekens and L. Jacques, "Quantized Compressive K-Means," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 8, pp. 1211-1215, Aug. 2018, doi: 10.1109/LSP.2018.2847908
- [14] W. Guo, K. Lin and W. Ye, "Deep Embedded K-Means Clustering," *2021 International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, Auckland, New Zealand, 2021, pp. 686-694, doi: 10.1109/ICDMW53433.2021.00090.
- [15] L. Wang, X. Zhang, H. Wang and C. Bai, "An improved global k-means clustering algorithm," *2021 11th International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, Dali, China, 2021, pp. 165-170, doi: 10.1109/ICICIP53388.2021.9642224.
- [16] K. R. Žalik and M. Žalik, "Comparison of K-Means, K-Means++, X-Means and Single Value Decomposition for Image Compression," *2023 27th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)*, Rhodes (Rodos) Island, Greece, 2023, pp. 295-301, doi: 10.1109/CSCC58962.2023.00055.

