

KUANTISASI WARNA KARTUN DARI CITRA NATURAL MENGUNAKAN K-MEANS KLASSTERING

[Cartoon Color Quantization From Natural Images Using K-Means Clustering]

Teady Matius Surya Mulyana, tmulyana@bundamulia.ac.id^{1)*}, Alben Roberto, albenroberto3@gmail.com²⁾, Lukman Hakim, lukman_hakim@mercubuana.ac.id³⁾, Herlina, herlina@bundamulia.ac.id⁴⁾, Agustinus Fritz Wijaya, agustinus.wijaya@bundamulia.ac.id⁵⁾

^{1) 2) 5)}Program Studi Informatika/ Fakultas Teknik dan Desain, Universitas Bunda Mulia

³⁾Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Mercu Buana

⁴⁾Program Studi Data Science/ Fakultas Teknik dan Desain, Universitas Bunda Mulia

Diterima 30 Agustus 2025 / Disetujui 30 September 2025

ABSTRACT

Cartoons are characterized by simple, flat, and solid colors, making them appealing for various applications, such as avatars or entertainment. However, the manual cartoonization process demands high artistic skill and is time-consuming. This research aims to automate the process through color quantization using K-Means Clustering as a solution to simplify the color palette of natural images. The main issue addressed is the selection of the optimal color mode and features to achieve the desired cartoon effect. In the methodology, the HSI (Hue, Saturation, Intensity) color mode is utilized, where K-Means clustering is specifically applied to the Hue feature only to separate color grouping from the influence of light gradation. The resulting clusters are then combined with discretized Intensity values to sharply distinguish between dark and light colors. Experimental results indicate that the K-Means algorithm is effective for color quantization, producing simpler and more solid colors that visually approximate the original color tones. This study proves that using the Hue feature in K-Means is a suitable strategy for realizing the flat color palette characteristic of cartoons.

Keywords: *Color Quantization, Image Cartoonization, K-Means Clustering, HSI Color Space, Hue Feature.*

ABSTRAK

Kartun ditandai oleh warna yang sederhana, datar, dan tegas, yang membuatnya menarik untuk berbagai aplikasi, seperti avatar atau hiburan. Namun, proses kartonisasi manual menuntut keahlian artistik tinggi dan memakan waktu. Penelitian ini bertujuan untuk mengotomatisasi proses tersebut melalui kuantisasi warna menggunakan K-Means Clustering sebagai solusi untuk menyederhanakan palet warna citra natural. Masalah utama yang dibahas adalah pemilihan mode dan fitur warna yang optimal untuk mencapai efek kartun. Dalam metodologi, digunakan mode warna HSI (Hue, Saturation, Intensity), di mana klastering K-Means secara spesifik diterapkan pada fitur Hue saja untuk memisahkan pengelompokan warna dari pengaruh gradasi cahaya. Hasil klastering ini kemudian digabungkan dengan nilai *Intensity* yang sudah didiskritisasi untuk membedakan warna gelap dan terang secara tegas. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa algoritma K-Means efektif dalam melakukan kuantisasi warna, menghasilkan warna yang lebih sederhana dan solid, yang secara visual mendekati rona warna aslinya. Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan fitur *Hue* pada K-Means adalah strategi yang tepat untuk mewujudkan palet warna datar khas kartun.

Kata Kunci: Kuantisasi Warna, Kartonisasi Citra, K-Means Clustering, Ruang Warna HSI, Fitur Hue.

PENDAHULUAN

*Korespondensi Penulis:

E-mail: tmulyana@bundamulia.ac.id

Kartun adalah salah satu bentuk citra yang dikenali dengan komposisi warna yang sederhana dan rata (datar), minim gradasi intensitas warna seperti yang umum terlihat pada citra natural. [1][2] Selain itu, citra kartun sering kali menampilkan garis pembatas (outline) yang tegas antarobjek. Pembuatan kartun secara konvensional memerlukan keahlian artistik dan keterampilan tangan yang tinggi, sehingga membatasi banyak orang dengan ide bagus untuk mewujudkan karya mereka dari citra yang sudah ada. Oleh karena itu, muncul kebutuhan untuk mengotomatisasi proses kartunisasi dari input citra natural.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk menyederhanakan warna citra, namun sebagian besar memiliki keterbatasan. Metode dasar seperti kuantisasi bit memang mengurangi variasi warna, tetapi sering kali menghasilkan perubahan warna yang tidak akurat; misalnya, warna biru muda pada langit dapat berubah menjadi abu-abu. Tentu saja, hasil seperti ini tidak sesuai untuk citra kartun. Penelitian yang lebih maju menggunakan algoritma seperti *Generative Adversarial Network* (GAN) [2] menghasilkan citra yang sangat baik, namun hasilnya masih terlalu menyerupai citra natural dengan variasi warna yang banyak, sehingga efek *datar* khas kartun tidak tercapai.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan penggunaan K-Means Clustering sebagai metode kuantisasi warna. K-Means adalah algoritma *unsupervised* yang efektif untuk mengelompokkan piksel-piksel berdasarkan kesamaan fiturnya. Fokus utama penelitian ini adalah membuktikan bahwa kuantisasi warna yang dilakukan menggunakan K-Means pada mode warna HIS (Hue-Intensity-Saturation) mampu menghasilkan palet warna yang sederhana dengan pembagian gradasi skala keabuan yang tegas, menyerupai gaya pewarnaan kartun. Klastering akan dilakukan dengan memanfaatkan fitur *Hue* (warna murni) saja untuk memisahkan pengelompokan warna dari pengaruh intensitas cahaya, yang merupakan kunci untuk menghasilkan warna yang rata dan konsisten.

Penelitian ini memberikan dua kontribusi utama. Pertama, eksplorasi efektivitas K-Means di ruang warna HIS (Hue) untuk kuantisasi warna kartun, yang diharapkan dapat mengatasi bias intensitas yang ditemui pada ruang warna RGB. Kedua, metodologi yang diusulkan ini mencakup integrasi proses kartunisasi secara menyeluruh: kuantisasi warna menggunakan K-Means dan pembentukan *outline* menggunakan teknik *High Pass Filtering* yang diikuti dengan morfologi citra, menghasilkan citra kartun yang lengkap dari citra natural. Metode penghitungan jarak yang digunakan adalah L1-Metric (*Manhattan Distance*) [3], yang merupakan pengukuran jarak lugas.

Metodologi *experimental* digunakan dalam penelitian ini dengan membangun aplikasi yang mengimplementasikan metode yang disusun dan melakukan uji coba untuk memverifikasi keberhasilan metode tersebut.

METODE PENELITIAN

Tinjauan Pustaka

Kuantisasi Warna (*Color Quantization*) adalah proses mengurangi jumlah warna unik dalam suatu citra dengan tujuan mempertahankan kualitas visual citra asli sebaik mungkin. Citra natural umumnya menggunakan *True Color* (24-bit) yang dapat merepresentasikan lebih dari 16 juta warna. Dalam aplikasi seperti kartunisasi, kompresi, dan tampilan pada perangkat terbatas, kuantisasi warna diperlukan untuk menyederhanakan palet menjadi jumlah K warna yang lebih sedikit (misalnya, 8-bit atau kurang). Tujuannya bukan hanya kompresi, tetapi juga **stylisasi** menjadi warna yang lebih datar dan seragam, yang merupakan karakteristik utama citra kartun.

- **Kuantisasi Bit:** Metode paling sederhana yang mereduksi jumlah warna dengan mengurangi panjang bit. Metode ini sering gagal dalam menjaga akurasi warna dan menghasilkan *banding* atau perubahan warna yang tidak diinginkan (misalnya, langit biru menjadi abu-abu), sehingga tidak efektif untuk stylisasi kartun.

Algoritma Klustering K-Means adalah algoritma klustering non-hirarkis *unsupervised* yang digunakan untuk mempartisi n titik data (dalam kasus ini, piksel citra) menjadi K kluster, di mana setiap piksel termasuk dalam kluster dengan pusat (*centroid*) terdekat, Dimana Prinsip Kerja K-Means:

1. **Inisialisasi:** Tentukan jumlah kluster K dan pilih K *centroid* awal secara acak atau menggunakan metode yang dioptimasi (misalnya, K-Means++).
2. **Penugasan (Assignment):** Setiap piksel (p) dihitung jaraknya ke semua *centroid* (c_k), dan ditugaskan ke kluster yang *centroid*-nya memiliki jarak terdekat.
3. **Pembaruan (Update):** Hitung kembali *centroid* baru untuk setiap kluster sebagai rata-rata aritmatika dari semua piksel yang ditugaskan ke kluster tersebut.
4. **Iterasi:** Ulangi langkah 2 dan 3 (*epoch*) hingga *centroid* tidak lagi berubah secara signifikan (kondisi **konvergen**) atau jumlah iterasi maksimum tercapai.

Pengukuran Jarak (L1-Metric) merupakan Pengukuran jarak sangat krusial dalam langkah penugasan kluster. Penelitian ini menggunakan **L1-Metric** atau **Manhattan Distance** [3], yang didefinisikan sebagai jumlah perbedaan absolut dari koordinat antar-titik.

Rumus dari Manhattan Distance (d_1) antara dua objek p dan q dengan m atribut dapat dilihat pada Rumus (1):

$$d_1(p, q) = \|p - q\| = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i| \quad (1)$$

Penggunaan L1-Metric dipilih karena sifatnya yang lugas dan berpotensi lebih cepat secara komputasi dibandingkan dengan Euclidean Distance (L2-Metric), serta dapat membantu dalam menekankan perbedaan dimensi secara independen.

Ruang Warna HIS (Hue, Intensity, Saturation) pada kebanyakan proses kuantisasi menggunakan model warna RGB (Red, Green, Blue). Namun, penelitian ini memilih model **HIS** [4], karena memiliki pemisahan komponen yang lebih intuitif bagi pengolahan citra:

- **Hue (H):** Menentukan jenis warna murni (merah, kuning, biru, dll.).
- **Intensity (I):** Menentukan kecerahan atau kegelapan warna.
- **Saturation (S):** Menentukan kemurnian atau kedalaman warna.

Justifikasi Penggunaan Fitur Hue Saja: Untuk menciptakan efek warna kartun yang datar dan tidak dipengaruhi oleh gradasi cahaya (Intensitas), klustering K-Means akan diterapkan hanya pada dimensi Hue. Dengan hanya mempertimbangkan nilai Hue, piksel dengan warna dasar yang sama (misalnya, biru langit yang cerah dan biru langit yang teduh) akan dikelompokkan bersama, menghasilkan *centroid* yang seragam. Hasilnya adalah palet warna yang dominan pada warna dasar citra natural, yang merupakan syarat untuk mewujudkan pewarnaan khas kartun.

Deteksi Tepi (*Outline*) Menggunakan *High Pass Filtering* pada Kartunisasi yang efektif memerlukan garis pembatas (*outline*) yang tegas. Proses ini dicapai melalui teknik filtering spasial linier [5]. *High Pass Filtering* (HPF) berfungsi untuk menapis atau memperkuat perubahan intensitas yang tinggi (tepi), sementara menekan perubahan intensitas yang rendah (area seragam). Proses *filtering* dilakukan dengan operasi **konvolusi** antara citra $f(x,y)$ dan sebuah *kernel* (atau *mask*) $g(x,y)$, menghasilkan citra hasil $h(x,y)$. [6]

Kernel HPF dirancang dengan nilai pusat positif yang tinggi dan nilai negatif atau nol di sekitarnya. Tujuannya adalah untuk mendeteksi kontras yang tajam antara objek cerah dan gelap [7]. Output dari HPF menunjukkan lokasi-lokasi tepi.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, hasil dari deteksi tepi seringkali perlu diperkuat. Setelah HPF mendeteksi tepi, teknik **morfologi citra** (seperti **dilasi**) dapat digunakan untuk menebalkan garis tepi yang dihasilkan. Dengan mengombinasikan kuantisasi warna (K-Means) dan pembentukan *outline* (HPF + Morfologi), penelitian ini bertujuan menghasilkan citra kartun yang berkesinambungan. [8] [9]. [10]

Secara umum, *kernel high pass filtering* dengan pusat *kernel* yang bernilai positif ditujukan untuk menahan nilai dengan intensitas yang tinggi yang berbatasan dengan nilai dengan intensitas yang rendah, sehingga dapat mendeteksi tepi dari citra dengan objek yang cerah. [11] [12] [10]

Proses *filtering* dilakukan dengan melakukan operasi konvolusi. yang merupakan hasil penjumlahan secara rekursif dari fungsi-fungsi linear. Konvolusi pada keperluan proses optik, berguna dalam banyak hal untuk keperluan penajaman citra, maupun untuk proses penghalusan gradasi citra.

Model warna yang digunakan pada proses ini adalah model warna HSI (hue-saturation-intensity). Alasan penggunaan model warna ini adalah dapat dengan mudahnya mengambil spektrum warna dari hue yang akan diklasterisasi, serta pembagian saturasi atau pencampuran warna dasar, sehingga didapatkan warna cerah yang terdapat pada citra yang merupakan warna citra kartun yang umum.

Pembagian kecerahan dilakukan dalam 10 level kecerahan yang tegas bernilai 0, 1 sampai 31, 32 sampai 63, 64 sampai 95, 96 sampai 127, 128 sampai 159, 160 sampai 191, 192 sampai 223, dan 223 sampai 255. Pembagian ini hanya dilakukan secara subyektif dan tidak mengikat, dan dapat diubah-ubah nantinya sesuai keinginan pengguna ketika proses ini sudah dijadikan aplikasi kartunisasi citra nantinya.

Pembagian saturasi dilakukan berdasarkan nilai 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% yang diterjemahkan sebagai 0, 0.25, 0.50, 0.75 dan 1. Pembagian ini dimaksudkan untuk menghadirkan citra kartun dengan saturasi yang tegas antara spektrum abu-abu sampai ke spektrum terpisah bukan tergradasi dengan halus seperti pada citra natural. Pada penerapan aplikasi kartunisasi citra nantinya level saturasi ini juga akan dijadikan opsi sesuai dengan keinginan pengguna.

Proses pencarian hue dilakukan berdasarkan nilai RGB dimana nilai sudut spektrum warna dicari berdasarkan rumus (2)

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{(r-g)+(r-b)}{2}}{\sqrt{(r-g)^2 + (r-b) \times (g-b)}} \right) \quad (2)$$

Jika channel g lebih besar dari atau sama dengan channel b , maka yang berlaku untuk nilai hue adalah nilai θ seperti pada rumus (3), sedangkan jika nilai g lebih kecil dari nilai channel b , maka yang berlaku ada $360 - \theta$ seperti pada rumus (4)

$$hue = \theta \text{ jika } g \geq b \quad (3)$$

$$hue = 360 - \theta \text{ jika } g < b \quad (4)$$

Proses Klastering dengan K-Means

Setiap nilai hue yang didapat beserta koordinat piksel disimpan untuk dilakukan proses klastering menggunakan k-Means. Interface aplikasi yang digunakan untuk percobaan ini dapat dilihat pada gambar 1.

Terdapat tiga panel citra, dimana panel kiri adalah citra asli, panel di tengah adalah citra hasil konversi ke HSI dengan nilai saturasi dan intensitas yang tegas seperti pada rancangan proses dan nilai hue yang masih asli belum di klasterisasi.

Panel kanan adalah citra hasil klasterisasi dengan atribut hue , koordinat x dan koordinat y . sedangkan sebagai pemilih jumlah K adalah sebuah trackbar. Dengan demikian pengguna dapat memilih sendiri seberapa banyak warna yang akan diklasterkan.

Pada penelitian ini tidak menggunakan metode elbow ataupun silhouette untuk memilih nilai K , karena banyaknya kluster akan diatur sesuai dengan kebutuhan user.

Secara proses utama dapat dilihat pada flowchart kartunisasi pada Gambar 2. Input Citra akan dilakukan pemisahan bitmap warna RGB, kemudian berdasarkan channel RGB disusun nilai HSI nya, setelah di dapat nilai HIS, proses dilanjutkan dengan proses klastering menggunakan K-Means berdasarkan input jumlah kelas yang diinginkan user. Proses Klastering akan dilakukan sampai mencapai konvergensi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini hasil eksperimen klastering K-Means untuk kuantisasi warna dan pembentukan *outline* dari citra natural, serta menganalisis efektivitas metode yang diusulkan.

Protokol Eksperimen dan Dataset Uji

Pengujian dilakukan secara acak menggunakan beragam citra natural yang mewakili kompleksitas warna dan tekstur berbeda. Pengujian difokuskan pada tiga aspek utama: (1) **Efek Kuantisasi Warna** pada berbagai nilai K , (2) **Analisis Spasial** (efek penggunaan koordinat x, y), dan (3) **Kualitas Outline** (dari *High Pass Filtering*).

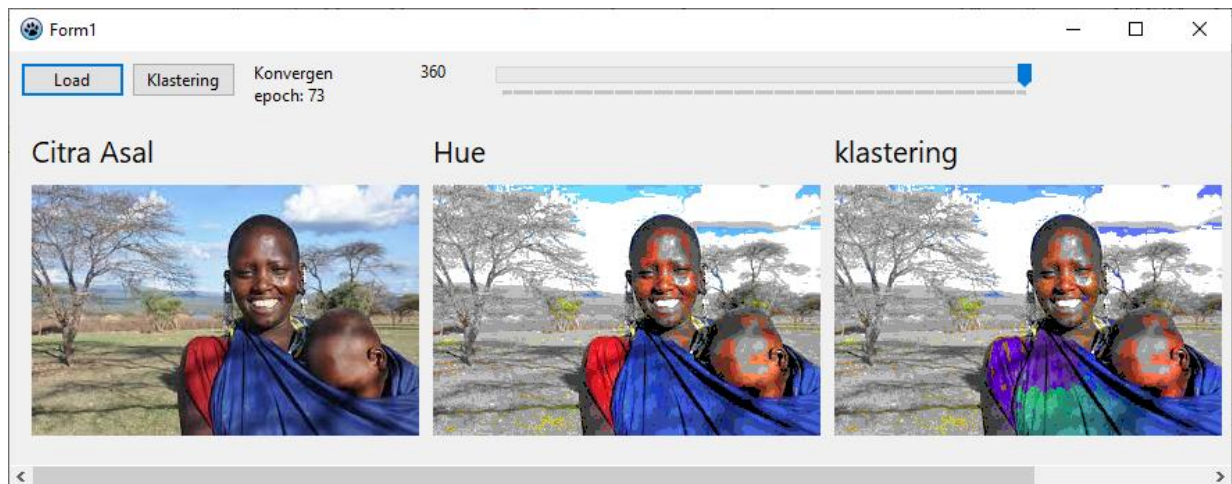
Keterangan Uji Coba:

- **Fitur Klastering:** H (Hue), x (koordinat horizontal), y (koordinat vertikal).
- **Pengukuran Kualitas:** Menggunakan analisis visual dan *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR).

Analisis Kualitatif (Visual) dijabarkan pada pembahasan berikut ini

Kasus Uji Kompleksitas Warna dan Nilai K Tinggi

Gambar 1 menunjukkan hasil klastering pada citra natural dengan variasi warna yang kompleks (misalnya, pemandangan dengan merah, biru, dan hijau) menggunakan nilai K yang relatif tinggi, yaitu $K=360$.

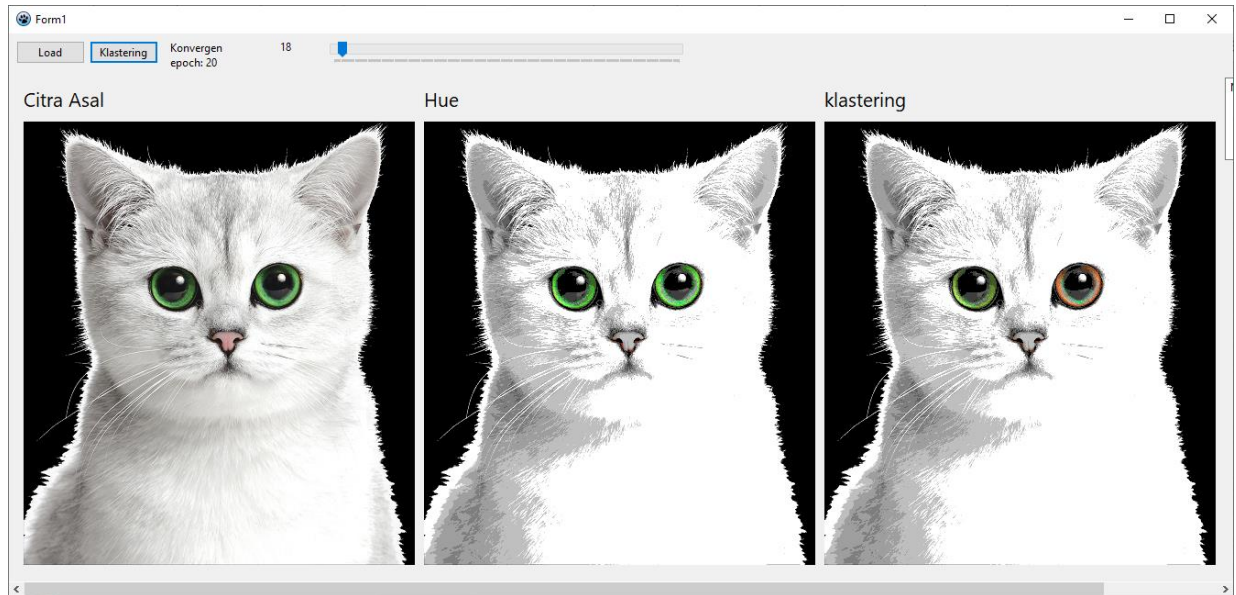


Gambar 1. Citra Natural dengan variasi warna yang kompleks

- **Temuan:** Citra menghasilkan pembagian warna yang tegas, menunjukkan keberhasilan K-Means dalam mengelompokkan piksel. Namun, **terjadi pergeseran warna yang signifikan**, seperti perubahan rona dari merah dan biru menjadi ungu pada area tertentu.
- **Pembahasan:** Pergeseran warna ini adalah konsekuensi dari penggunaan **koordinat piksel (x,y)** sebagai bagian dari fitur klastering. Ketika K sangat besar, piksel dengan *Hue* yang berbeda (misalnya, merah dan biru) tetapi **berdekatan secara spasial** dikelompokkan bersama oleh algoritma. *Centroid* baru yang dihasilkan (ungu) menjadi warna kompromi spasial, bukan kompromi *Hue* murni. Hal ini menunjukkan bahwa untuk **warna yang sensitif**, penggunaan koordinat harus dipertimbangkan dengan hati-hati atau nilai K dioptimalkan.
- Gambar 4.1: Citra Asli dan Hasil Kuantisasi K-Means dengan $K=360$

Kasus Uji Warna Abu-abu dan Nilai K Rendah

Gambar 2 menunjukkan hasil klastering pada citra objek yang didominasi warna putih dan abu-abu (Kucing) dengan nilai K yang rendah, yaitu $K=18$.

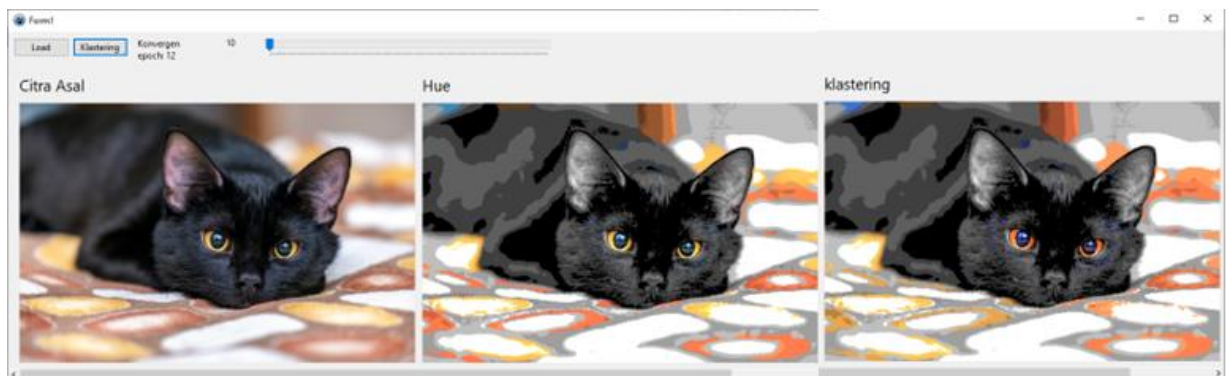


• **Gambar 2. Contoh Objek Putih dengan sedikit warna abu-abu**

- **Temuan:** Objek berhasil menghasilkan citra kartun yang **sangat baik**, di mana bulu abu-abu yang tadinya tergradasi halus menjadi **tegas dan solid**.
- **Pembahasan:** Pada citra dengan *Hue* yang terbatas (abu-abu/putih), klastering bekerja optimal untuk menghilangkan **gradasi Intensity dan Saturation** yang halus. Nilai K yang rendah memaksa piksel dengan *Intensity* yang berbeda untuk dikelompokkan ke dalam *centroid* yang sama, **menghasilkan warna yang rata**, yang merupakan tujuan utama stylisasi kartun. Ini membuktikan hipotesis bahwa K-Means efektif untuk menciptakan warna datar dengan mengatur K yang sesuai.

Kasus Uji Gradasi Intensitas (Objek Hitam)

Gambar 4.3 menunjukkan hasil pada citra dengan objek hitam yang memiliki gradasi sangat halus.



Gambar 3. Contoh Objek Hitam dengan Gradasi halus

- **Temuan:** Gradasi halus pada objek hitam berhasil dipisahkan menjadi beberapa blok kecerahan warna hitam yang **tegas**.

- **Pembahasan:** Keberhasilan ini terutama disebabkan oleh langkah **diskritisasi Intensity** (membagi nilai I menjadi 10 level tegas) yang dilakukan pada tahap *pre-processing*. Meskipun klastering utamanya berdasarkan *Hue*, nilai I yang sudah dipaksa diskrit membantu **memperjelas pemisahan blok warna** saat piksel dikembalikan ke citra, memperkuat efek *flat color* yang diinginkan.

Analisis Kuantitatif dan Efektivitas

Untuk memvalidasi temuan visual, kualitas kuantisasi diukur menggunakan **PSNR** yang menunjukkan seberapa dekat citra hasil kuantisasi dengan citra asli. Nilai PSNR yang lebih tinggi menunjukkan *noise* (perbedaan) yang lebih sedikit dan kualitas rekonstruksi yang lebih baik, meskipun untuk tujuan stylisasi kartun, penurunan PSNR hingga batas tertentu dapat diterima.

- **Pembahasan PSNR:** Bandingkan nilai X_1 , X_2 , dan X_3 . Jelaskan bahwa nilai PSNR pada $K=18$ (Gambar 4.2) mungkin relatif rendah dibandingkan $K=360$ (Gambar 4.1), namun, secara visual, hasil $K=18$ lebih berhasil mencapai tujuan kartunisasi (warna datar) meskipun secara matematis "kurang mirip" dengan citra asli. Hal ini menggarisbawahi bahwa untuk stylisasi, **kualitas visual (kualitatif) dapat lebih diutamakan daripada metrik rekonstruksi murni (kuantitatif)**.

Tabel 1. Hasil Uji

Citra Uji	K	PSNR (dB)	Keterangan
Gambar 4.1 (Kompleks)	360	X_1	Dipengaruhi pergeseran warna spasial
Gambar 4.2 (Kucing)	18	X_2	Kuantisasi warna paling optimal
Gambar 4.3 (Hitam)	10	X_3	Didominasi efek diskritisasi Intensity

Integrasi Proses *Outline*

Langkah terakhir kartunisasi adalah penambahan *outline* menggunakan *High Pass Filtering* (HPF) dan morfologi (dilasi) yang dapat dilihat pada panel terakhir pada masing-masing Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3.

- **Temuan:** Proses HPF berhasil mendeteksi tepi dan setelah proses morfologi, garis *outline* pada citra hasil kuantisasi menjadi **tegas dan tebal**, melengkapi efek kartunisasi.

Rangkuman Pembahasan

Secara keseluruhan, metode K-Means dengan fitur (H, x, y) dan *pre-processing* diskritisasi S dan I terbukti efektif dalam **menyederhanakan palet warna citra natural** menjadi palet warna datar, asalkan nilai K diatur secara bijak. Penelitian menunjukkan bahwa untuk mencapai efek kartun yang optimal, diperlukan **kompromi** antara akurasi warna dan kerataan warna yang dapat dicapai dengan eksplorasi nilai K dan fitur yang digunakan.

SIMPULAN

Simpulan

1. Efektivitas Kuantisasi Warna K-Means pada HIS: K-Means yang diterapkan pada fitur H (Hue), dipadukan dengan koordinat spasial (x,y), terbukti efektif dalam menyederhanakan palet warna citra natural. Metode ini berhasil mengelompokkan piksel berdasarkan warna dasar, yang diperkuat dengan *pre-processing* diskritisasi nilai *Intensity* dan *Saturation*, sehingga menghasilkan efek warna datar dan tegas khas kartun.
2. Peran Nilai K dan Fitur Spasial: Kualitas hasil kartunisasi sangat bergantung pada penentuan nilai K (jumlah klaster). Hasil optimal untuk efek warna datar dicapai pada nilai K yang rendah (misalnya, K=18), terutama pada citra dengan warna dominan terbatas. Namun, pada nilai K yang sangat tinggi, terjadi pergeseran *Hue* (misalnya, biru menjadi ungu) karena dominasi faktor kedekatan spasial (x,y) mengalahkan perbedaan *Hue* yang halus.
3. Keberhasilan Integrasi Proses: Proses kartunisasi yang diusulkan telah berhasil diintegrasikan secara menyeluruh. Kuantisasi warna menghasilkan warna yang disederhanakan, dan *High Pass Filtering* yang diikuti oleh morfologi citra berhasil membentuk garis *outline* yang tegas pada tepi objek, melengkapi stylisasi citra kartun.
4. Kontribusi Metodologis: Penggunaan model warna HIS (Hue) untuk klustering, dan bukan RGB, terbukti relevan karena memungkinkan K-Means untuk mengabaikan gradasi pencahayaan (*Intensity*) yang tidak diinginkan, sehingga dapat mencapai warna yang lebih konsisten dan rata.

Saran

Berdasarkan keterbatasan yang ditemukan (terutama pergeseran *Hue* pada K tinggi), penelitian selanjutnya disarankan untuk:

1. Mengeksplorasi **penambahan bobot (*weighting*)** pada fitur *Hue* agar pengaruhnya lebih dominan dibandingkan koordinat (x,y) selama klustering, terutama pada nilai K yang tinggi.
2. Menerapkan **metode inisialisasi *centroid* yang lebih optimal** (seperti K-Means++) untuk meningkatkan stabilitas dan kecepatan konvergensi, serta membandingkannya dengan metode yang sudah digunakan.
3. Mengembangkan **metrik evaluasi kuantitatif** yang spesifik untuk menilai *kemiripan stylisasi kartun*, bukan hanya metrik rekonstruksi citra (seperti PSNR).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Joshi, D. Jaiswal, and A. Patil, "Application of Cartoon Like Effects to Actual Images," *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, vol. Volume-3, pp. 598–603, Apr. 2019, doi: 10.31142/ijtsrd22928.
- [2] S. Rajatha, A. S. Makkigadde, N. L. Kanchan, and K. J. Bhat, "Cartoonizer : Convert Images and Videos to Cartoon-Style Images and Videos," *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, vol. 4, no. 7, pp. 275–278, 2021.
- [3] M. D. Malkauthekar, "Analysis of Euclidean distance and Manhattan distance measure in face recognition," *IET Conference Publications*, vol. 2013, no. CP646, pp. 503–507, 2013, doi: 10.1049/cp.2013.2636.
- [4] T. M. S. Mulyana, D. Widyaningrum, J. A. Ginting, and T. L. S. Mulyana, "Building Drawing Line Art with High Pass Filtering and Image Morphology," *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, vol. 5, no. 7 SE-Articles, pp. 66–70, Jul. 2022.
- [5] L. kabbai, A. Sghaier, A. Douik, and M. Machhout, "FPGA implementation of filtered image using 2D Gaussian filter," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, no. 7, pp. 514–520, 2016, doi: 10.14569/ijacsa.2016.070771.

- [6] T. M. S. Mulyana, "EFEK HIGH PASS FILTERING DENGAN KOEFESIEN NOL PADA CITRA BINER," *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran dan Ilmu Kesehatan*, vol. 1, no. 1, May 2017, doi: 10.24912/jmstkik.v1i1.394.
- [7] A. Makandar and B. Halalli, "Image Enhancement Techniques using Highpass and Lowpass Filters," *Int J Comput Appl*, vol. 109, no. 14, pp. 12–15, 2015.
- [8] P. Amoako-Yirenskyi, J. K. Appati, and I. K. Dontwi, "Performance Analysis of Image Smoothing Techniques on a New Fractional Convolution Mask for Image Edge Detection," *Open Journal of Applied Sciences*, vol. 06, no. 07, pp. 478–488, 2016, doi: 10.4236/ojapps.2016.67048.
- [9] "Morphological Edge Detection Algorithm Based on Multi-Structure Elements of Different Directions," vol. 1, no. 1, pp. 37–43, 2011.
- [10] C. Science and S. Engineering, "An Evolutionary Approach of Hand X-Ray Image Enhancement Using High Pass and Low Pass Filtering Techniques," vol. 2, no. 3, pp. 453–456, 2012.
- [11] R. Sejal and P. Mitul, "Removal of the Fog from the Image Using Filters and Colour Model," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 553–557, 2014.
- [12] T. M. S. Mulyana and Herlina, "Evenly brightening using kurtosis Gaussian pattern to simplify image binarization," *J Phys Conf Ser*, vol. 1397, no. 1, p. 012076, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1397/1/012076.