

Dehazing Citra Kabut Gunung Berapi Kelud Dengan Color Attenuation Prior Dan Adaptive Gamma Correction

Oddy Virgantara Putra ¹⁾*, Aziz Musthafa ²⁾

Universitas Darussalam Gontor ^{1),2)}
oddy@unida.gontor.ac.id ¹⁾*, aziz@unida.gontor.ac.id ²⁾

Abstrak

Visibilitas citra luar ruangan yang ditangkap dalam cuaca buruk seringkali menurun karena adanya kabut, badai pasir, dan sebagainya. Visibilitas yang buruk, yang disebabkan oleh fenomena di atmosfer, menjadi faktor penyebab kegagalan aplikasi visi komputer, seperti sistem pengenalan objek luar, sistem deteksi rintangan atau sistem pengawasan video. Sejak letusan terakhir gunung Kelud, telah dipasang kamera CCTV untuk mengamati kawah danau dan sekitarnya. Akan tetapi, kamera pengamat mengalami gangguan dikarenakan adanya kabut. Tidak hanya itu, penghilangan kabut dari satu citra dengan struktur yang rumit, efek halo, dan distorsi warna adalah hal yang menantang teknik image recovery. Penelitian ini bertujuan mereduksi kabut dan meningkatkan visibilitas dari citra berkabut. Pada artikel ini, diusulkan metode dehazing baru yang menggabungkan metode Color Attenuation Prior (CAP) dan Adaptive Gamma Correction (AGC). Metode ini dibagi menjadi tiga modul utama, yaitu modul estimasi kedalaman (DispE), modul peningkatan peta transmisi (TME), dan modul restorasi (ImRec). Modul DispE yang diusulkan memanfaatkan teknik estimasi kedalaman dari CAP. Sedangkan modul TME mengadopsi teknik AGC. Dengan demikian, efek halo pada citra dapat dihindari dan estimasi peta transmisi yang efektif dapat dicapai. Selanjutnya, modul ImRec menggunakan peta transmisi hasil keluaran dari TME untuk memperbaiki distorsi warna citra kawah. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa metode yang diusulkan bisa mengurangi kabut tanpa menimbulkan efek halo dan distorsi warna. Penelitian berikutnya difokuskan pada metode berbasis pembelajaran mesin.

Kata kunci: adaptive gamma correction, color attenuation prior, dehazing, kabut.

Abstract

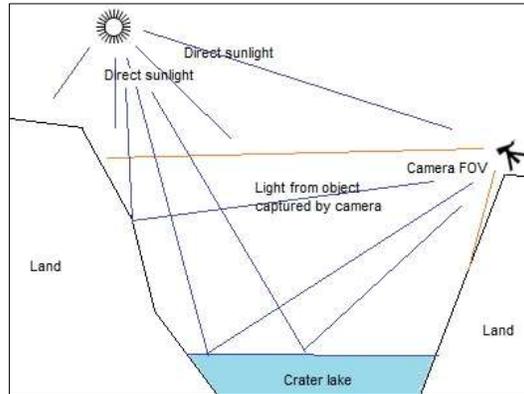
[Single Kelud Volcano Lake Crater Image Dehazing Using Color Attenuation Prior and Adaptive Gamma Correction] Visibility of outdoor images captured in bad weather often decreases due to fog, sandstorms, and so on. Poor visibility, caused by atmospheric phenomena, is a factor in the failure of computer vision applications, such as external object recognition systems, obstacle detection systems or video surveillance systems. Due to the last eruption, CCTV cameras have been installed on top of Mt. Kelud summit to observe the crater of the lake and its surroundings. However, the observation camera experienced interference due to the fog. Not only that, the removal of fog from an image with complicated structures, halo effect, and color distortion is challenging image recovery techniques. This study aims to reduce the fog and improve the visibility of the foggy image. In this article, a new dehazing method is proposed that combines the Color Attenuation Prior (CAP) and Adaptive Gamma Correction (AGC) methods. This is divided into three main modules, namely the depth estimation module (DispE), the transmission map enhancement module (TME), and the restoration module (ImRec). The proposed DispE module utilizes depth estimation techniques from CAP. While the TME module adopts the AGC technique. Thus, the halo effect on the image can be avoided and the estimation of an effective transmission map can be achieved. Furthermore, the ImRec module uses a transmission map output from TME to correct the color distortion of the crater image. Experimental results show that the proposed method can reduce haze without causing halo and color distortion effects. Subsequent research focused on machine learning based methods.

Keywords: adaptive gamma correction, color attenuation prior, dark channel prior, dehazing, haze.

1. PENDAHULUAN

Gunung Kelud adalah gunung berapi aktif yang memiliki danau kawah yang indah dan eksotis.

Berdasarkan data historis dari letusan gunung Kelud, letusan yang terjadi pada tanggal 3 November 2007 ditandai dengan perubahan warna air danau. Pusat



Gambar 1: Kondisi proses akuisisi citra kawah

Vulkanologi telah melakukan beberapa upaya untuk mengantisipasi dampak negatif pra dan pasca letusan.

Di antara kegiatan yang dilakukan pra letusan adalah pemantauan secara visual maupun non-visual. Pengamatan dilakukan secara jarak jauh menggunakan kamera CCTV yang dipasang berhadapan satu sama lain dan terletak di tepi puncak. Bidang pandang kamera meliputi seluruh permukaan danau kawah, bebatuan, dan pepohonan di sekitarnya.

Peningkatan aktivitas vulkanik pada kondisi tertentu memicu senyawa kimia seperti Sulfur Dioksida dan gas Hidrogen Sulfida [1]. Reaksi ini menyebabkan munculnya gas. Proses ini disebut dengan *degassing*. Dampaknya, gas hasil reaksi ini semakin lama akan naik ke arah puncak gunung. Menebalnya gas yang naik, menjadikan jarak pandangan kamera terbatas.

Dalam dua dekade terakhir, banyak teknik yang telah digunakan penghilangan kabut telah dikembangkan [2]–[6]. Menurut Tan [2], citra berkabut (CK) jika dibandingkan dengan citra cerah memiliki kontras lebih sedikit. Penilitan Tan hanya berfokus pada restorasi visibilitas pada cuaca buruk dan bukan pemulihan ke warna asli. Karena perbedaan kontras yang tinggi, metode ini cenderung menghasilkan kontras yg berlebihan. Istilah ini disebut dengan *overcontrast*. Fattal [3] memperbaiki model citra kabut dengan menurunkan menjadi beberapa bagian. Hasilnya, transmisi medium dan bayangan permukaan tidak berkorelasi secara lokal. Metodenya mungkin gagal pada kabut dengan tingkat berkepadatan tinggi.

He dkk. [5] mengusulkan metode yang dinamakan dengan *dark channel prior* (DCP). Diasumsikan bahwa di sebagian besar *patch* dengan intensitas rendah, ada sebagian intensitas piksel yang cenderung mendekati nol. Karena metode DCP menggunakan *patch* dengan bentuk blok untuk prosesnya, citra yang dipulihkanpun mengandung blok *patch*. Oleh karena itu, algoritma *soft matting* digunakan untuk memperbaiki kualitas citra dengan cara menghaluskan blok *patch*. Sayangnya, proses penyaringannya memakan waktu terlalu lama.

Kim dkk [7] mengusulkan teknik estimasi transmisi berbasis blok. Diasumsikan bahwa ada kemungkinan objek yang lebih cerah dari cahaya atmosfer maka, cahaya atmosfer diperkirakan dengan dibagi menjadi empat bagian secara rekursif. Proses ini dilakukan terus hingga mencapai ambang batas tertentu. Metode ini berfungsi dengan baik untuk menangani area langit yang luas tetapi mungkin gagal jika ada objek yang lebih besar dari area langit dengan warna yang lebih cerah.

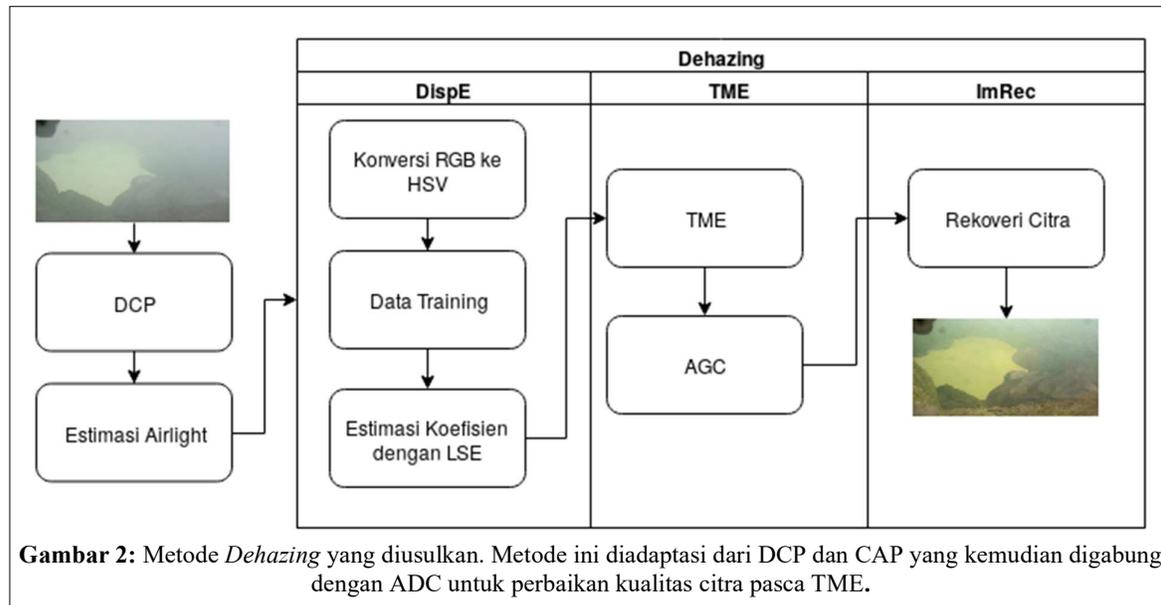
Sebuah metode baru dari diusulkan oleh Meng dkk [8] diadaptasi dari DCP (ADCP). Meng menurunkan fungsi transmisi medium dengan cara kalkulasi bobot berdasarkan bentuk L1 (*L1-norm*). Dengan perubahan fungsi adaptasi transmisi, maka dihasilkan pula geometri baru dalam model citra kabut. Geometri ini berbentuk kubus radian dengan penambahan dan batas bawah dan atas. Hasil dari metode Meng diklamin bahwa bentuk L1 lebih *robust* dari bentuk L2. Namun, ada kekurangan dalam minimalisir efek halo.

Zhu dkk [9] mengusulkan model estimasi peta kedalaman berdasarkan pengamatan antara kecerahan dengan saturasi. Pada kasus Zhu, diamati perbedaan intensitas warna antara objek jauh dengan objek dekat pada CK. Secara statistik, hasil pengamatan Zhu adalah bahwa pada objek dekat nilai saturasi mengalami peningkatan. Objek jarang sedang, saturasi semakin rendah jika dibanding jarak dekat. Dan untuk objek yang jauh, di mana kabut hampir sepenuhnya menutupi objek, intensitas saturasi dan kecerahan berbanding terbalik. Menariknya, pengamatan ini menunjukkan adanya korelasi positif antara saturasi dan kecerahan dengan jarak objek pada citra. Dengan ini maka bisa diasumsikan juga bahwa peta kedalaman, konsentrasi kabut, serta kecerahan berbanding terbalik dengan saturasi. Inilah yang dinamakan dengan *color attenuation prior* (CAP).

Pada artikel ini, sebuah metode *dehazing* gabungan antara DCP dengan CAP untuk restorasi visibilitas citra dan mereduksi kabut dari citra yang diambil oleh kamera CCTV. Dengan menggunakan DCP dengan *Guided Filter* (GF) yang diusulkan dalam [10] kita dapat mengurangi waktu proses penghalusan citra. Metode yang diusulkan adalah teknik *dehazing* dengan menggabungkan [9]–[11]. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut: estimasi *dark channel* (DC), estimasi *atmospheric light*, estimasi medium transmisi, penghalusan transmisi, dan restorasi visibilitas citra.

Radiasi di sekitar danau mempengaruhi sebagian besar warna pada citra kabut. Gambar 1 menunjukkan arsitektur akuisisi data di gunung Kelud.

Citra diakuisisi setiap 10 menit. Perubahan cuaca di sekitar gunung Kelud berubah dengan cepat berubah dari menit ke menit. Sehingga, luminansi warna dari CK cenderung berubah. Selama waktu tertentu, luminansi cenderung hijau, hijau gelap dan coklat muda. Warna hijau dipengaruhi oleh vegetasi di sekitar danau. Semakin gelap saat mendung. Ketika



cuaca cerah, warnanya cenderung coklat muda. Pada Gambar 2, ini menunjukkan luminansi yang berbeda.

2. METODE YANG DIUSULKAN

Menurut penelitian sebelumnya, masalah *dehazing* terutama difokuskan pada mengembalikan visibilitas. Masalah ini bekerja dengan baik ketika tidak ada pengaruh cahaya warna global karena warna ini memengaruhi citra yang dipulihkan. Masalah yang tersisa adalah menyesuaikan warna yang dipulihkan. Adapun rincian dari masalah ini akan dijelaskan lebih detail nanti.

Sebagian besar, metode state-of-the-art sebelumnya [2], [5], [9] memulihkan CK dengan proporsi citra yang tepat. Proporsi yang tepat ini disusun oleh objek-objek seperti pohon, mobil, dan langit. Dikarenakan lebar jangkauan kamera (FOV) hanya mencakup danau dan sekitarnya, tidak didapati langit sebagai latar belakang pada data kami. Kondisi ini cukup menyulitkan untuk estimasi cahaya atmosfer.

Citra luaran dari kabut memiliki masalah berbeda sesuai dengan metode. Hampir setiap algoritma *dehazing* dapat memunculkan warna cerah dari CK. Namun, masalah lain muncul ketika *dehazing* hanya bergantung pada penghilangan kabut dan hasilnya dipengaruhi oleh pencahayaan global. Sehingga, citra yang dipulihkan tidak menunjukkan warna aslinya.

Warna danau bervariasi karena beragam kondisi cuaca. Warna hijau muncul saat mendung. Warna kuning juga muncul saat cuaca cerah. Terkadang, warnanya menjadi coklat tua saat mendung. Untuk mengatasi masalah ini, dalam makalah ini, diusulkan penghapusan kabut citra tunggal *hybrid* menggunakan CAP dan Adaptive Gamma Correction (AGC). Metode ini diterapkan pada citra CCTV dari kawah danau gunung Kelud.

Metode yang diusulkan menunjukkan hasil yang mengesankan.

Metode yang diusulkan terdiri dari tiga modul seperti yang terlihat pada Gambar 2. Metode yang diusulkan menggunakan AGC. Modul pertama adalah modul estimasi disparitas (DispE). Modul kedua adalah modul peningkatan transmisi (TME). Dan modul terakhir adalah modul pemulihan citra (ImRec). Ketiga modul ini akan diuraikan nanti.

3.1. DispE

Model degradasi CK diusulkan oleh McCartney [12]. Kemudian, model ini semakin dikembangkan oleh [1]. Formula degradasi citradapat ditulis sebagai:

$$I(j) = \Phi(j)(t(j)) + A(1 - t(j)) \quad (1)$$

di mana $I(j)$ adalah luaran CK yang dibentuk oleh ruas kanan formula dalam persamaan (1). $\Phi(j)$, A , $t_0(j)$, dan j dalam sisi kanan adalah citra bebas-kabut, cahaya atmosfer, media transmisi, dan posisi dalam citra masing-masing. Tujuan utama *dehazing* adalah mengekstraksi dari persamaan 1. Citra bebas kabut dapat dicapai setelah variabel $I(j)$, A , dan $t_0(x)$ yang tersisa terpenuhi.

Peta transmisi dapat dianggap sebagai tingkat transparansi citra [2]. Ada definisi lain dari peta transmisi menurut [3], [13], [14] bahwa peta transmisi didefinisikan sebagai bagian cahaya yang tidak terhambur dan mencapai kamera sebagaimana yang tampak pada Gambar 3. Secara matematis, peta transmisi dirumuskan sebagai:

$$t_0(j) = \exp\left(-\int_0^m \beta(z)dz\right) \quad (2)$$

dimana t_0 adalah peta transmisi. Ini mewakili sebagian dari cahaya yang melewati partikel di udara dan akhirnya mencapai pengamat, β adalah koefisien hamburan cahaya, dan d mewakili peta kedalaman. Dari persamaan (2), kita mendapatkan:



Gambar 3: Citra kabut dengan peta transmisinya

$$t_0(j) = e^{-\beta d(z)} \quad (3)$$

Masalah yang tersisa dalam menentukan peta transmisi bergantung pada kedalaman citra $d(z)$. Citra peta kedalaman adalah citra dalam tingkat abu-abu yang pikselnya memiliki nilai intensitas. Bisa juga dikatakan bahwa setiap piksel mewakili jarak antara objek titik atau latar belakang ke pengamat.

Mengukur kedalaman citra cukup menantang [5], [6], [9]. Beberapa alat seperti Microsoft Kinect dan kamera stereo dapat digunakan untuk memperkirakan kedalaman untuk objek jarak terukur atau dalam ruang (*indoor*). Dengan kondisi di dalam ruangan, peta kedalaman bisa diukur dengan akurat. Sebaliknya, beberapa kondisi di luar ruangan, pengukuran kedalaman ini sulit untuk dilakukan karena keterbatasan fitur dari alat pengukur.

Model kedalaman luar ruang baru diperkenalkan oleh [9]. Model ini dibentuk dari tiga koefisien yang berkorelasi positif. Koefisien ini adalah kecerahan, saturasi, dan disparitas dari dua koefisien sebelumnya. Dalam pengukuran ini, ditemukan bahwa nilai kedalaman berbanding lurus dengan perbedaan antara kecerahan dan saturasi. Maka, dengan definisi ini, korelasi ketiga koefisien tersebut dapat dimodelkan sebagai:

$$d(z) \propto v(z) - s(z) \quad (4)$$

di mana d adalah perbedaan, v , s adalah nilai dan saturasi dalam domain warna HSV masing-masing dan z adalah posisi piksel.

Karena persamaan (4) adalah korelasi positif, representasi matematis dapat didefinisikan sebagai:

$$d(z) = \lambda_0 + \lambda_1 v(z) + \lambda_2 s(z) + r(z) \quad (5)$$

di mana d , v , dan s adalah kedalaman, nilai, dan saturasi masing-masing. Model ini diadaptasi dari persamaan (4). λ_0 , λ_1 , dan λ_2 merupakan koefisien yang harus diestimasi. Dan yang terakhir adalah residual r . Dalam penelitian [9], koefisien model ini diperkirakan menggunakan estimasi kemungkinan maksimum (MLE).

Untuk menyederhanakan perhitungan, bentuk matriks dari persamaan (5) adalah \mathbf{K} mewakili variabel v_0 ke v_n dan s_0 ke s_n , vektor d mewakili kedalaman d_0 ke d_n , dan vektor p mewakili λ_0 hingga λ_n . Dengan deklarasi ini, kami memiliki:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & v_0 & s_0 \\ 1 & v_1 & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & v_n & s_n \end{bmatrix}, \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Untuk memperkirakan koefisien p , Estimasi Kuadrat Terkecil (LSE) diusulkan dalam metode ini. Dari (6), koefisien yang diperkirakan dapat diperkirakan dengan:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{d} \quad (7)$$

Pelatihan data dikumpulkan dari [15]. Poin diakumulasikan sebelum pelatihan data. Setelah koefisien diperkirakan, disparitas juga dapat diestimasi menggunakan persamaan (7).

3.2. TME

Dalam kasus *dehazing*, kondisi citra luar ruangan bervariasi. Citra dapat terdiri dari objek yang bertindak sebagai sumber cahaya. Objek ini dapat menyebabkan oversaturasi untuk pemandangan yang dipulihkan. Masalah lainnya, warna lingkungan global juga mempengaruhi citra yang dipulihkan. Kondisi yang unik dari setiap masalah ini memerlukan perlakuan yang berbeda [16].

Metode yang didasarkan pada koreksi gamma diadaptasi dari [11]. Metode ini mengklasifikasikan intensitas citra menjadi cerah dan gelap. Koreksi gamma tidak hanya digunakan untuk meningkatkan kontras tetapi juga untuk menyesuaikan intensitas fungsi transformasi. Selain itu, koreksi gamma adaptif (AGC) ini mempertahankan tepian dari citra. Dengan demikian, TME yang dimodifikasi dapat dirumuskan sebagai:

$$t_1(j) = V_m \left(\frac{t_0(j)}{V_m} \right)^\gamma \quad (8)$$

di mana γ didapat dari:

$$\gamma = \begin{cases} 1 + \frac{z}{T_{thres}} & , z \geq T_{thres} \\ 1 & , z < T_{thres} \end{cases} \quad (9)$$

Dimana t_1 transmisi yang ditingkatkan, V_m adalah intensitas maksimum dari skala keabuan, γ adalah nilai gamma adaptif, z adalah nilai intensitas ketika nilai didistribusikan secara kumulatif mencapai ambang tertentu, dan T_{thres} merupakan batasan



Gambar 4: Hasil dari metode kami dibandingkan dengan metode sebelumnya, yaitu DCP dan CAP. (a) citra kabut, (b) hasil DCP, (c) hasil (CAP), dan (d) hasil kami

intensitas dariz. Kami menetapkan nilai T_{thre} pada 0,429 saat $z=0,1$. Nilai ini diperoleh dari pengamatan kami terhadap citra kawah dalam berbagai kondisi cuaca, seperti cerah, berawan, dan kabur.

Terinspirasi dari [11] dalam memulihkan citra cuaca buruk, rata-rata setiap nilai RGB dihitung. Karena itu, didapatkan:

$$\mu_c = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q H_c(i, j) \quad (10)$$

di mana μ intensitas rata-rata setiap titik, s adalah jumlah piksel, p , q adalah tinggi dan lebar citra masing-masing, dan H_c intensitas pada i, j .

Dari persamaan (10), didapatkan:

$$\delta^c = \mu_r - \mu_c, \quad c \in \{r, g, b\} \quad (11)$$

3.3. ImRec

Akhirnya, modul ini adalah tahapan akhir dari metode usulan. Ketika modul DispE dan TME telah tercapai, citra bebas kabut di luar ruangan dapat diperoleh dari:

$$\Phi^c(j) = \frac{I^c(j) - (A^c - \delta^c)}{\max(t_1(j), t_0)} + (A^c - \delta^c) \quad (12)$$

di mana $\Phi^c(j)$ adalah citra bebas kabut yang dipulihkan, $I^c(j)$ adalah intensitas citra kabur di j , A adalah cahaya atmosfer, δ adalah perbedaan dari (11), t_0 dan t_1 batas-batasnya. Biasanya, t_0 diatur pada 0,1.

Selanjutnya, persamaan (12) berhasil memulihkan $\Phi^c(j)$ dari $I^c(j)$. Singkatnya, metode yang diusulkan diilustrasikan seperti pada Gambar 2.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode kami dievaluasi menggunakan citra kabut yang umum digunakan misalnya: lapangan sepak bola kabur dan sebuah kastil. Evaluasi ini dimaksudkan untuk mengukur kinerja metode yang kami usulkan untuk algoritma *dehazing* terkenal lainnya, yaitu [5], [9], [17]. Parameter yang dievaluasi adalah kepadatan kabut (FADE) dan entropi.

Eksperimen ini dilakukan menggunakan PC dengan RAM 16 GB, Intel Core i7 8th gen, dan dataset yang dipakai berasal dari citra hasil CCTV pada puncak gunung Kelud model Axis Q1755-E dengan resolusi 1280x720. Citra kabut kawah berukuran 800 x 600 piksel dan diambil saat kondisi cerah pada pukul 07.00 hingga 17.00 WIB.

4.1. Estimasi DispE dengan LSE

Kami mengumpulkan citra kabur di luar ruangan dengan peta kedalaman yang sesuai dari [18] parameter peta kedalaman seperti dalam persamaan (5) diperkirakan menggunakan *Least-Squared Estimation* (LSE). Citra berwarna dikonversi menjadi ruang warna HSV. Selanjutnya, hanya saturasi dan *value* yang diekstraksi sebelum digunakan untuk memenuhi persamaan (7). Dengan citra kedalaman yang tersedia, akhirnya, parameter koefisien dilatih. Sebagai hasil, didapati nilai koefisiennya masing-masing sama dengan 0,126111, -0,043755, dan -0,117156. Ketika parameter ini diperoleh, langkah selanjutnya adalah modul TME.

4.2. Peningkatan Peta Transimisi

Di bagian ini, peningkatan peta transmisi diusulkan. Metode ini digabungkan dari DC untuk estimasi cahaya udara, redaman warna untuk estimasi peta kedalaman luar-ruang yang luar biasa, dan akhirnya AGC dari restorasi citra dalam cuaca buruk.

Tugas ini cukup menantang. Dalam pekerjaan kami sebelumnya [6], [18], masih ada kekurangan. Citra yang dipulihkan dipengaruhi oleh warna global. Warna global ini menyebabkan terhalangnya pemandangan. Lebih jauh lagi, citra bebas kabut meninggalkan banyak kabut juga. Oleh karena itu, koreksi gamma dilakukan untuk mengatasi masalah ini.

Dikarenakan kondisi danau mengalami kondisi cuaca yang tidak menentu, maka parameter adaptif gamma digunakan. Nilai adaptif ini bergantung pada fungsi kepadatan kumulatif (CDF). Untuk mengoptimalkan AGC, distribusi intensitas warna, seperti dalam persamaan (10) dan (11), diterapkan juga.

4.3. Hasil Perbaikan

Pada bagian ini, kami mengevaluasi secara kuantitatif dengan menggunakan Fog-Aware Density Estimation (FADE) dari [19]. SE seperti diilustrasikan pada Tabel 1, metode yang diusulkan dibandingkan dengan algoritma *dehazing* sebelumnya dalam berbagai kondisi citra kabut. Secara umum, metode kami dapat mengatasi kondisi kabut. Meskipun pada kondisi tertentu, metode yang diusulkan tidak berhasil mengalahkan algoritma sebelumnya, namun, metode yang diusulkan berhasil unggul dalam hal ketipisan kabut. Ini dapat dilihat bahwa kami mencapai nilai FADE terendah rata-rata pada 1,472 diikuti oleh He, Chen, dan Zhu. Secara umum, sebagian besar teknik penghilangan kabut dapat mengatasi kondisi kabut tersebut. Namun, protokol eksperimen lain harus

digunakan untuk mengukur hasil dalam berbagai kondisi.

Tabel 1. Hasil FADE

	<i>He DCP</i>	<i>Zhu CAP</i>	Chen HGIR	<i>Hasil Kami CAPAGC</i>
N1	1.59	2.27	2.16	1.17
N2	1.70	2.26	2.13	0.98
N3	1.90	2.18	2.28	1.55
N4	2.03	3.28	2.96	2.37
N5	1.90	2.50	2.65	1.29

Seperti diilustrasikan dalam Gambar 4, perbedaan antara metode yang diusulkan dan tiga metode lainnya cukup signifikan. Dapat dilihat bahwa hasil DCP memiliki kabut lebih tipis dibandingkan dengan yang lain. Namun, meski sudah mencapai hasil seperti itu, DCP cenderung terpengaruh oleh warna biru global. Selain itu, warna danau terlalu jenuh, belum lagi efek halo di sekitar tepi danau. Efek halo ini terjadi karena artefak tambalan blok DC. Bahkan, hasil ADCP memiliki lebih sedikit kabut dan mampu mengatasi efek halo karena fitur adaptif dari DC. Sayangnya, warna yang dihasilkan masih cenderung kebiruan. Akhirnya, dalam hasil kami, metode yang diusulkan mampu menunjukkan kemampuannya untuk mempertahankan tepi dan mengurangi oversaturasi warna danau.

4. KESIMPULAN

Dalam makalah ini, metode *hybrid* diusulkan berdasarkan estimasi kedalaman luar dari redaman warna dan koreksi gamma adaptif untuk restorasi visibilitas citra berkabut gunung Kelud. Metode ini berisi tiga langkah utama, yaitu estimasi disparitas, estimasi transmisi yang ditingkatkan, dan akhirnya pemulihan citra bebas kabut.

Metode kami mencapai nilai FADE terendah pada 1,448. Selain itu, citra yang dipulihkan mampu mempertahankan kualitas citra dan membantu mengatasi oversaturasi yang merupakan kekurangan DC sebelumnya. Namun, hasil kami masih jauh dari kondisi terbaik. Ada beberapa masalah yang perlu diperhatikan seperti akurasi dan segmentasi pada citra kabut, terutama dalam menggunakan algoritma pembelajaran mesin (*deep learning*). Isu ini menjadi pekerjaan mendatang bagi kami.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Eka, P. Sofyan, S. Pretina, and S. B. Ugan, "Karakteristik kimiawi air danau kawah Gunung Api Kelud, Jawa Timur pasca letusan tahun 1990," *Indones. J. Geosci.*, vol. 1, no. 4, pp. 185–192, 2006.
- [2] R. T. Tan, "Visibility in Bad Weather from a Single Image," in *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008, pp. 1–8.

- [3] R. Fattal, "Single Image Dehazing," *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, no. 3, pp. 72:1–72:9, Aug. 2008.
- [4] J.-P. Tarel and N. Hauti, "Fast Visibility Restoration from a Single Color or Gray Level Image," in *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2009, no. August 2015.
- [5] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 12, pp. 2341–2353, 2011.
- [6] O. V. Putra, B. Prianto, E. M. Yuniarno, and M. H. Purnomo, "Visibility restoration of lake crater hazy image based on dark channel prior," in *2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 2016, pp. 1–6.
- [7] J. H. Kim, W. D. Jang, J. Y. Sim, and C. S. Kim, "Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 24, no. 3, pp. 410–425, 2013.
- [8] G. Meng, Y. Wang, J. Duan, S. Xiang, and C. Pan, "Efficient Image Dehazing with Boundary Constraint and Contextual Regularization," in *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013, pp. 617–624.
- [9] Q. Zhu, J. Mai, L. Shao, and S. Member, "A Fast Single Image Haze Removal Algorithm Using Color Attenuation Prior," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 24, no. 11, pp. 3522–3533, 2015.
- [10] K. He, "Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior," The Chinese University of Hong Kong, 2011.
- [11] S. C. Huang, B. H. Chen, and W. J. Wang, "Visibility restoration of single hazy images captured in real-world weather conditions," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 24, no. 10, pp. 1814–1824, 2014.
- [12] J. McCartney, *Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles*. Wiley, 1976.
- [13] Y. Gao, H. M. Hu, S. Wang, and B. Li, "A fast image dehazing algorithm based on negative correction," *Signal Processing*, vol. 103, pp. 380–398, 2014.

- [14] B. Cai, X. Xu, K. Jia, C. Qing, and D. Tao, "DehazeNet: An End-to-End System for Single Image," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 25, no. 11, pp. 5187–5198, 2016.
- [15] Y. Zhang, L. Ding, and G. Sharma, "HazeRD: An Outdoor Scene Dataset and Benchmark for Single Image Dehazing." IEEE Dataport, 2019.
- [16] S. Lee, S. Yun, J.-H. Nam, C. S. Won, and S.-W. Jung, "A review on dark channel prior based image dehazing algorithms," *EURASIP J. Image Video Process.*, vol. 2016, no. 1, p. 4, 2016.
- [17] B. H. Chen and S. C. Huang, "Edge Collapse-Based Dehazing Algorithm for Visibility Restoration in Real Scenes," *J. Disp. Technol.*, vol. 12, no. 9, pp. 964–970, 2016.
- [18] O. V. Putra, "Reduksi Kabut pada Citra Kawah Gunung Berapi Kelud Berbasis Dark Channel Prior," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [19] Lark Kwon Choi, Jaehee You, and A. C. Bovik, "Referenceless Prediction of Perceptual Fog Density and Perceptual Image Defogging," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 24, no. 11, pp. 3888–3901, Nov. 2015.