

# Implementasi Transformasi Berbasis *Local Standard Deviation* untuk Peningkatan Kontras Citra Fundus Retina

Eka Prakarsa Mandyartha<sup>1</sup>, Fetty Tri Anggraeny<sup>2</sup>, Pratama Wirya Atmaja<sup>3</sup>, Faisal Muttaqin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Program Studi Informatika, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

<sup>1</sup>[eka\\_prakarsa.fik@upnjatim.ac.id](mailto:eka_prakarsa.fik@upnjatim.ac.id)

<sup>2</sup>[fettyaanggraeny.if@upnjatim.ac.id](mailto:fettyaanggraeny.if@upnjatim.ac.id)

<sup>3</sup>[pratama\\_wirya.fik@upnjatim.ac.id](mailto:pratama_wirya.fik@upnjatim.ac.id)

<sup>4</sup>[faisalmuttaqin.if@upnjatim.ac.id](mailto:faisalmuttaqin.if@upnjatim.ac.id)

\*Corresponding author email: [eka\\_prakarsa.fik@upnjatim.ac.id](mailto:eka_prakarsa.fik@upnjatim.ac.id)

**Abstrak**— Deteksi dan diagnosis beberapa penyakit mata misalnya retinopati diabetik dan penyakit mata degenerasi makula terkait usia (AMD) dilakukan oleh oftalmologis dengan mengamati citra retina pasien yang diakuisisi dari kamera fundus. Namun demikian, terdapat permasalahan yang dapat dijumpai yaitu rendahnya kontras citra fundus retina sehingga sulit dipisahkan antara daerah normal dengan daerah abnormal. Hal ini dapat disebabkan oleh pemfokusan cahaya yang kurang tepat saat akuisisi citra fundus. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan kontras pada citra fundus retina sehingga diperoleh citra dengan kontras yang lebih merata. Dalam penelitian ini diusulkan implementasi peningkatan kontras citra fundus retina menggunakan transformasi berbasis *Local Standard Deviation* (LSD). Kerangka kerja yang diusulkan ini didasarkan pada peningkatan kontras menggunakan informasi lokal pada citra fundus retina berskala keabuan. Teknik peningkatan kontras lokal menerapkan fungsi transformasi yang memperhitungkan distribusi tingkat keabuan di sekitar tiap-tiap piksel pada citra masukan. Informasi lokal seperti *mean* lokal dan standar deviasi lokal dihitung. Performa algoritma dievaluasi berdasarkan jumlah tepi hasil pendeteksian tepinya dengan *filter* Sobel. Hasil peningkatan kontras yang diperoleh dari uji coba menggunakan kerangka kerja usulan, ditabulasi dan dibandingkan dengan hasil peningkatan kontras menggunakan metode lain yaitu *Global-Local Contrast Enhancement* (GLCE) dan citra skala keabuan tanpa peningkatan kontras. Dari hasil uji coba diperoleh jumlah tepi yang berhasil terdeteksi dari citra fundus retina hasil peningkatan kontras transformasi berbasis LSD lebih tinggi dibanding metode GLCE. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa peningkatan kontras citra fundus retina menggunakan transformasi berbasis LSD yang diusulkan lebih baik daripada peningkatan kontras citra menggunakan metode GLCE berdasarkan jumlah tepi yang berhasil dideteksi.

**Kata Kunci**— peningkatan kontras citra, fundus retina, local standard deviation.

## I. PENDAHULUAN

Pengamatan terhadap citra retina pasien yang secara langsung diambil menggunakan kamera fundus, dilakukan oleh dokter spesialis mata (oftalmologis) dalam pendeteksian awal dan diagnosis beberapa penyakit mata misalnya retinopati diabetik dan penyakit mata degenerasi makula terkait usia (AMD) [1], [2]. Pada pengamatan citra fundus

retina, terdapat permasalahan yang dapat dijumpai yaitu rendahnya kontras citra fundus retina sehingga sulit dipisahkan antara daerah normal dengan daerah abnormal [3]. Proses akuisisi citra retina yang kurang sempurna merupakan alasan utama penyebab citra memiliki iluminasi yang tidak merata dan citra dengan kontras rendah [4], [5]. Iluminasi yang tidak merata dan kontras rendah dapat disebabkan oleh pemfokusan cahaya yang kurang tepat saat akuisisi citra [6]. Hal ini dapat memengaruhi akurasi proses selanjutnya, misalnya pada proses segmentasi, dalam sistem *computer-aided* diagnosis retina yang membantu oftalmologis [7]. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan kontras pada citra fundus retina [3] sehingga diperoleh citra dengan kontras yang lebih merata.

Pada pengolahan citra digital, kontras citra didefinisikan sebagai faktor pemisah antara titik paling terang dan titik paling gelap dalam gambar [8], [9]. Faktor pemisah yang lebih besar menunjukkan kontras yang lebih tinggi, sedangkan kebalikannya, faktor pemisah yang lebih kecil menunjukkan kontras yang lebih rendah [9]. Peningkatan kontras citra retina bertujuan untuk pemerataan kontras, yaitu meningkatkan faktor pemisah (tingkat kontras) dengan melakukan perubahan (*adjustment*) pada nilai intensitas citra fundus retina [10].

Beberapa pendekatan peningkatan kontras citra telah diusulkan, diantaranya adalah, metode ekualisasi histogram, metode peningkatan kontras *Global-Local Contrast Enhancement* (GLCE) [8] dan metode *Local Standard Deviation* (LSD) [11]–[13].

Ekualisasi histogram merupakan metode peningkatan kontras citra yang paling banyak diimplementasikan [14]. Ekualisasi histogram meningkatkan kontras dengan pemerataan kontras pada histogram citra yaitu menyebarkan nilai intensitas yang paling sering muncul dengan meregangkan rentang intensitas citra. Metode ekualisasi histogram merupakan metode yang populer karena mudah diimplementasikan serta kompleksitasnya yang relatif rendah sehingga proses komputasinya cepat [15].

Metode peningkatan kontras *Global-Local Contrast Enhancement* (GLCE) yang diusulkan oleh Singh dan Kumar [8] merupakan pendekatan yang digunakan untuk meningkatkan kontras serta mempertahankan pencahayaan pada citra masukan (citra asli). GLCE menggabungkan

informasi global dan lokal citra yaitu dan global *mean* dan *mean* ketetanggaan piksel [8]. Pada penelitian yang diusulkan oleh Eka, dkk [16], kerangka kerja untuk peningkatan kontras citra fundus retina menggunakan metode GLCE telah diimplementasikan. Berdasarkan hasil pengujian disimpulkan bahwa metode ekualisasi histogram menghasilkan kontras yang lebih cerah dibanding dengan metode GLCE. Namun, citra yang lebih cerah ini memberi peluang absennya beberapa detil dalam citra fundus retina, contohnya pembuluh darah retina.

Oleh karena karakteristik beberapa piksel berbeda dari satu *region* dengan *region* lain dalam citra yang sama, pada transformasi berbasis LSD, peningkatan citra didasarkan pada kontras lokal [12]. Metode LSD merupakan pendekatan peningkatan kontras citra, yang dapat mempertahankan tepi (*edge*) dari citra asli.

Pada penelitian ini diusulkan perbaikan kontras citra fundus retina menggunakan transformasi berbasis LSD *Local Standard Deviation* (LSD). Implementasi transformasi berbasis LSD diharapkan dapat meningkatkan kontras citra fundus retina dengan mempertahankan/mempertajam tepi citra aslinya.

## II. TEKNIK PENINGKATAN KONTRAS GLOBAL-LOKAL

Salah satu teknik pemerataan kontras yang dapat diaplikasikan pada citra keabuan retina adalah teknik peningkatan kontras global-lokal atau *Global-Local Contrast Enhancement* (GLCE).

Peningkatan Kontras Lokal-Global atau *Global-Local Contrast Enhancement* (GLCE) [8], [16] adalah teknik pemerataan kontras yang dihasilkan dari kombinasi informasi global dan lokal suatu citra keabuan. Secara matematis, transformasi GLCE ditunjukkan oleh persamaan (1).

$$h(x, y) = g(x, y) + [l(x, y) - G] \quad (1)$$

dengan  $h(x, y)$  merupakan citra keluaran atau citra hasil perbaikan kontras,  $g(x, y)$  adalah citra masukan keabuan (komponen *green* dari citra RGB), sedangkan  $l(x, y)$  adalah citra *mean* lokal yaitu rata-rata nilai intensitas warna dari masing-masing piksel citra masukan keabuan dengan ketetanggaan piksel 3x3, sedangkan  $G$  merepresentasikan *mean* global yaitu rata-rata nilai intensitas warna keseluruhan piksel di dalam citra  $g(x, y)$ .

## III. KERANGKA KERJA USULAN

Pada domain spasial, peningkatan kontras citra dapat dipandang sebagai transformasi piksel yang dapat dimodelkan ke dalam persamaan matematis yang ditunjukkan oleh persamaan 2.

$$h(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2)$$

dengan  $h(x, y)$  adalah fungsi transformasi yang menciptakan nilai intensitas baru untuk setiap piksel pada koordinat  $x$  dan  $y$  dari citra masukan  $M \times N$   $f(x, y)$ .  $M$  adalah jumlah kolom

piksel citra masukan  $f(x, y)$ , sedangkan  $N$  adalah jumlah baris piksel citra masukan  $f(x, y)$ .

Kerangka kerja yang diusulkan ini didasarkan pada peningkatan kontras menggunakan informasi lokal pada citra fundus retina berskala keabuan. Teknik peningkatan kontras lokal menerapkan fungsi transformasi yang memperhitungkan distribusi tingkat keabuan di sekitar tiap-tiap piksel pada citra masukan. Pada teknik peningkatan kontras lokal ini, untuk setiap piksel pada koordinat  $(i, j)$ , diterapkan transformasi yang ditunjukkan pada persamaan 3 [13], [17].

$$h(i, j) = \left[ k \frac{D}{\sigma(i, j) + b} \right] [f(i, j) - c * m(i, j)] + m(i, j)^a \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{M * N} \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \quad (4)$$

$$m(i, j) = \frac{1}{n * n} \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \quad (5)$$

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\frac{1}{(n * n) - 1} \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} (f(x, y) - m(i, j))^2} \quad (6)$$

dengan  $D$  adalah *mean* global,  $m(i, j)$  dan  $\sigma(i, j)$  adalah *mean* lokal dan standar deviasi intensitas piksel  $(i, j)$  dari citra masukan skala keabuan  $f(i, j)$  dengan ketetanggaan  $n \times n$  (dalam penelitian ini dipilih  $n=3$ ), sedangkan  $a, b, c, k$  adalah parameter statis yang didefinisikan pada bilangan riil positif dan memiliki nilai yang sama untuk semua *dataset* citra. Nilai empat parameter statis tersebut memiliki jangkauan yaitu  $a \in (0, 1.5)$ ,  $b \in (0, \frac{D}{2})$ ,  $c \in ([0, 1])$ ,  $k \in ([0.5, 1.5])$  [17].

Algoritma dari kerangka kerja yang diusulkan sebagai berikut:

- a) **Langkah 1:** Baca citra masukan RGB fundus retina  $I(x, y)$ .
- b) **Langkah 2:** Pisahkan komponen *green* dari komponen lainnya pada  $I(x, y)$  sedemikian sehingga membentuk citra skala keabuan  $f(x, y)$ .

Untuk setiap piksel:

- c) **Langkah 3:** Hitung *mean* global  $D$  dan *mean* lokal  $m(x, y)$  masing-masing menggunakan persamaan 4 dan persamaan 5.
- d) **Langkah 4:** Hitung standar deviasi  $\sigma(x, y)$  menggunakan persamaan 6.
- e) **Langkah 5:** Bangkitkan citra *enhanced*  $h(i, j)$  menggunakan transformasi berbasis LSD yang diusulkan Al-Betar, dkk [13] dan Braik, dkk [17], seperti ditunjukkan oleh persamaan 3.

Secara grafis, algoritma dari kerangka kerja yang diusulkan digambarkan oleh Gbr 1.

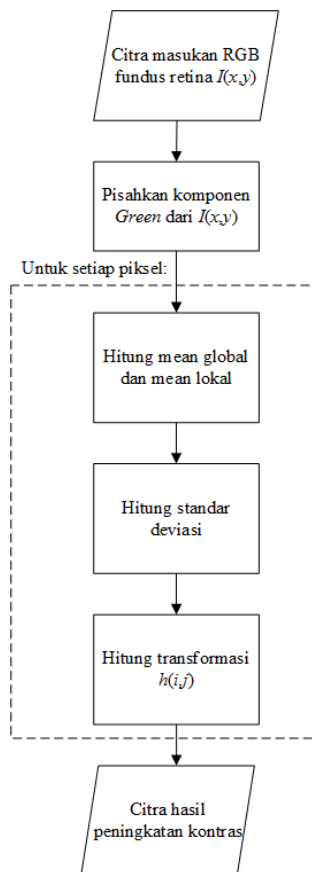
## IV. HASIL UJI COBA

Untuk menguji performanya, algoritma kerangka kerja yang diusulkan diimplementasikan menggunakan MATLAB

R2016b pada lingkungan sistem operasi MacOS versi 10.14.5, prosesor 2.5 GHz Intel Core i5 dengan RAM 4GB. Performa algoritma kerangka kerja usulan diukur berdasarkan jumlah tepi citra (*number of edges*), kemudian dibandingkan dengan metode GLCE dan jumlah tepi citra tanpa mengimplementasikan metode peningkatan kontras apapun. Untuk mendeteksi tepi, pada penelitian ini digunakan *filter* Sobel.

#### A. Dataset

Dataset yang dipergunakan untuk uji coba dalam penelitian ini adalah basis data STARE (*Structured Analysis of the Retina*), The Stare Project [18]. STARE merupakan basis data citra fundus retina yang tersedia secara publik. Basis data STARE secara lengkap terdiri dari 402 citra retina, yang diakuisisi menggunakan kamera fundus TopCon TRV-50 [19]. Data klinis dan citra fundus retina dalam STARE, didukung oleh Shiley Eye Center di University of California, San Diego, dan Veterans Administration Medical Center, San Diego, Amerika Serikat.



Gbr. 1 Algoritma kerangka kerja usulan.

#### B. Uji Coba Pengaturan Parameter $a, b, c, k$

Pada transformasi berbasis *Local Standard Deviation* (LSD), perlu dilakukan pengaturan parameter  $a, b, c, k$ , terlebih dahulu. Untuk menentukan pengaturan parameter  $a, b, c, k$ , pada penelitian ini digunakan sebanyak 40 sampel citra fundus retina. Dari sampel citra tersebut, dievaluasi rata-rata jumlah tepi (*edge*) citra hasil transformasi berbasis LSD.

Tabel I mendeskripsikan uji coba pengaturan parameter  $a, b, c, k$ .

TABEL I  
UJI COBA PENGATURAN PARAMETER  $a, b, c, k$

Uji Coba	Rata-rata Jumlah tepi ( <i>edge</i> )
Pengaturan 1: $a = 1$ $b = D/2$ $c = 0,4$ $k = 0,8$	676,375
Pengaturan 2: $a = 1,5$ $b = D/2$ $c = 1$ $k = 1,5$	455,675
Pengaturan 3: $a = 1,1$ $b = D/2$ $c = 0,3$ $k = 0,5$	667,725
Pengaturan 4: $a = 0,899$ $b = D/2$ $c = 0$ $k = 0,7$	646,875
Pengaturan 5: $a = 0,999$ $b = D/2$ $c = 0$ $k = 0,5$	659,7
Pengaturan 6: $a = 0,8$ $b = D/2$ $c = 0,2$ $k = 0,6$	665,275
Pengaturan 7: $a = 1,2$ $b = D/2$ $c = 0,4$ $k = 0,5$	706,5
Pengaturan 8: $a = 1$ $b = D/2$ $c = 0,1$ $k = 0,5$	657,225
Pengaturan 9: $a = 1,2$ $b = D/2$ $c = 0,8$ $k = 0,5$	681,8
Pengaturan 10: $a = 1,2$ $b = D/2$ $c = 1$ $k = 0,5$	684,125

Semakin tinggi jumlah *edge* suatu citra, maka citra tersebut memiliki detail konten yang lebih tinggi pula [13]. Berdasarkan

data Tabel I, Pengaturan 7 memiliki nilai tertinggi untuk rata-rata jumlah *edge*.

### C. Uji Coba Perbandingan Transformasi Berbasis LSD dan GLCE Berdasarkan Jumlah Tepi

Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$  yang akan digunakan untuk uji coba perbandingan transformasi berbasis LSD dengan GLCE ditunjukkan pada Tabel II. Nilai-nilai pada Tabel II diperoleh dari hasil uji coba pengaturan parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$  sebelumnya.

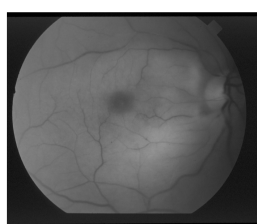
TABEL II  
PARAMETER A,B,C,K

Parameter	Nilai
$a$	1,2
$b$	$D/2$
$c$	0,4
$k$	0,5

Dalam penelitian ini untuk menguji performa transformasi berbasis LSD digunakan 402 data uji citra fundus retina dari dataset. Hasil implementasi transformasi berbasis LSD dengan parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$  pada Tabel II ditunjukkan oleh Gbr 2.



(a)



(b)



(c)

Gbr. 2 Hasil implementasi transformasi berbasis LSD. (a) Citra masukan RGB. (b) Komponen *green* dari citra masukan RGB. (c) Citra keluaran transformasi berbasis LSD.

Perbandingan jumlah tepi untuk sampel 7 citra fundus retina, antara transformasi berbasis LSD, GLCE dan tanpa peningkatan kontras citra ditunjukkan dalam Tabel III. Deteksi tepi dilakukan menggunakan *filter* Sobel.

Untuk keseluruhan data uji, rata-rata jumlah tepi untuk antara transformasi berbasis LSD, GLCE dan tanpa peningkatan kontras citra ditunjukkan dalam Tabel IV.

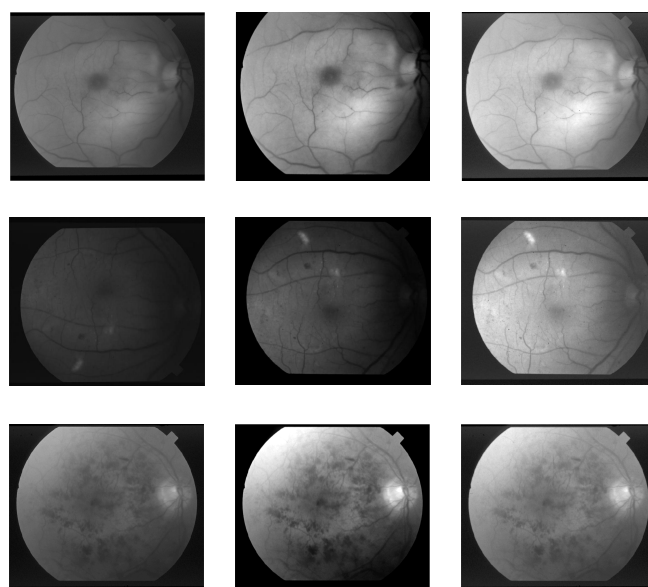
Gbr. 3 menunjukkan citra skala keabuan perbandingan antara citra tanpa peningkatan kontras, citra dengan peningkatan kontras menggunakan GLCE dan transformasi berbasis LSD.

TABEL III  
PERBANDINGAN JUMLAH TEPI ANTARA TRANSFORMASI BERBASIS LSD, GLCE, DAN TANPA PENINGKATAN KONTRAS

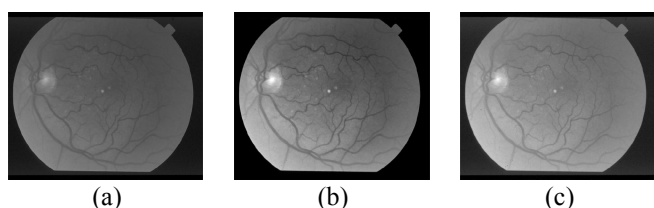
Image	Jumlah Tepi		
	Tanpa Peningkatan Kontras	GLCE	Transformasi Berbasis LSD
im0001	658	675	839
im0002	880	843	1086
im0003	455	520	700
im0004	86	119	261
im0005	566	495	658
im0006	512	809	722
im0007	260	273	517

TABEL IV  
RATA-RATA PERBANDINGAN JUMLAH TEPI ANTARA TRANSFORMASI BERBASIS LSD, GLCE, DAN TANPA PENINGKATAN KONTRAS

Rata-rata Jumlah Tepi		
Tanpa Peningkatan Kontras	GLCE	Transformasi Berbasis LSD
481,612	441,738	680,604







Gbr. 3 Perbandingan citra skala keabuan. (a) Citra tanpa peningkatan kontras. (b) Citra keluaran GLCE. (c) Citra keluaran transformasi berbasis LSD.

Berdasarkan Tabel III dan Tabel IV, transformasi berbasis LSD mencapai detail konten terbaik pada citra hasil peningkatan kontras jika dibandingkan dengan jumlah tepi pada citra hasil peningkatan kontras menggunakan metode GLCE dan jumlah tepi pada citra asli skala keabuan. Dapat ditunjukkan dari Gambar 3, bahwa kecerahan dan kontras citra hasil peningkatan kontras menggunakan transformasi berbasis LSD tampak lebih jelas dari kecerahan dan kontras citra aslinya tanpa peningkatan kontras.

## V. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini diimplementasikan peningkatan kontras citra fundus retina menggunakan transformasi berbasis LSD. Algoritma kerangka kerja yang diusulkan ini diujikan pada basis data citra retina STARE. Performa algoritma dievaluasi berdasarkan jumlah tepi hasil pendeteksian tepinya dengan *filter* Sobel. Beberapa pengaturan parameter transformasi yaitu  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$ , diuji coba sehingga menghasilkan jumlah tepi yang paling tinggi. Hasil peningkatan kontras yang diperoleh dari uji coba menggunakan kerangka kerja yang diusulkan, ditabulasi dan dibandingkan dengan hasil peningkatan kontras menggunakan metode GLCE dan citra skala keabuan tanpa peningkatan kontras. Dari hasil uji coba dapat disimpulkan bahwa peningkatan kontras citra fundus retina menggunakan transformasi berbasis LSD yang diusulkan lebih baik daripada peningkatan kontras citra menggunakan metode GLCE berdasarkan jumlah tepi yang berhasil dideteksi. Jumlah tepi yang berhasil terdeteksi dari citra fundus retina hasil peningkatan kontras transformasi berbasis LSD lebih tinggi dibanding metode GLCE. Implementasi transformasi berbasis LSD dapat meningkatkan kontras citra fundus retina yang mempertahankan/mempertajam tepi citra aslinya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Informatika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur atas dukungannya pada penelitian ini sehingga dapat diseminarkan dan dipublikasikan dalam Semnas SANTIKA 2020.

## REFERENSI

- [1] M. Zhou, K. Jin, S. Wang, J. Ye, and D. Qian, "Color Retinal Image Enhancement Based on Luminosity and Contrast Adjustment," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 65, no. 3, pp. 521–527, Mar. 2018, doi: 10.1109/TBME.2017.2700627.
- [2] B. Gupta and M. Tiwari, "Color retinal image enhancement using luminosity and quantile based contrast enhancement," *Multidimens. Syst. Signal Process.*, vol. 30, no. 4, pp. 1829–1837, Oct. 2019, doi: 10.1007/s11045-019-00630-1.
- [3] E. Daniel and J. Anitha, "Optimum green plane masking for the contrast enhancement of retinal images using enhanced genetic algorithm," *Optik*, vol. 126, no. 18, pp. 1726–1730, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.ijleo.2015.05.027.
- [4] N. A. Binti Mohd Sharif *et al.*, "Performance of Image Enhancement Methods for Diabetic Retinopathy based on Retinal Fundus Image," in *2020 IEEE 10th Symposium on Computer Applications Industrial Electronics (ISCAIE)*, Apr. 2020, pp. 18–23, doi: 10.1109/ISCAIE47305.2020.9108707.
- [5] M. Liao, Y. Zhao, X. Wang, and P. Dai, "Retinal vessel enhancement based on multi-scale top-hat transformation and histogram fitting stretching," *Opt. Laser Technol.*, vol. 58, pp. 56–62, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.optlastec.2013.10.018.
- [6] K. G. Dhal and S. Das, "Colour retinal images enhancement using modified histogram equalisation methods and firefly algorithm," *Int. J. Biomed. Eng. Technol.*, vol. 28, no. 2, pp. 160–184, Jan. 2018, doi: 10.1504/IJBET.2018.094725.
- [7] Y. Hagiwara *et al.*, "Computer-aided diagnosis of glaucoma using fundus images: A review," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 165, pp. 1–12, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cmpb.2018.07.012.
- [8] A. Singh and N. Kumar, "A Global-Local Contrast based Image Enhancement Technique based on Local Standard Deviation," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 93, pp. 8–12, May 2014, doi: 10.5120/16186-4363.
- [9] J. Chen, W. Yu, J. Tian, L. Chen, and Z. Zhou, "Image contrast enhancement using an artificial bee colony algorithm," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 38, pp. 287–294, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.swevo.2017.09.002.
- [10] S. Kansal, S. Purwar, and R. K. Tripathi, "Image contrast enhancement using unsharp masking and histogram equalization," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 77, no. 20, pp. 26919–26938, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11042-018-5894-8.
- [11] P. M. Narendra and R. C. Fitch, "Real-Time Adaptive Contrast Enhancement," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-3, no. 6, pp. 655–661, Nov. 1981, doi: 10.1109/TPAMI.1981.4767166.
- [12] S. Somorjeet Singh, T. Th, H. Devi, and T. Sinam, "Local Contrast Enhancement using Local Standard Deviation," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 47, pp. 39–44, Jun. 2012, doi: 10.5120/7267-0384.
- [13] M. A. Al-Betar, Z. A. A. Alyasseri, A. T. Khader, A. L. Bolaji, and M. A. Awadallah, "Gray image enhancement using harmony search," *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 9, no. 5, pp. 932–944, Sep. 2016, doi: 10.1080/18756891.2016.1237191.
- [14] A. W. Setiawan, T. R. Mengko, O. S. Santoso, and A. B. Suksmono, "Color retinal image enhancement using CLAHE," in *International Conference on ICT for Smart Society*, Jun. 2013, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICTSS.2013.6588092.
- [15] W. A. Mustafa and M. M. M. A. Kader, "A Review of Histogram Equalization Techniques in Image Enhancement Application," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1019, p. 012026, Jun. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1019/1/012026.
- [16] E. P. Mandyartha, H. E. Wahanani, and P. W. Atmaja, "IMPLEMENTASI GLOBAL-LOCAL CONTRAST ENHANCEMENT UNTUK PENINGKATAN KONTRAS CITRA FUNDUS RETINA," *Pros. Semin. Nas. SANTIKA Ke-1 2019*, pp. 213–218, Nov. 2019.
- [17] M. Braik, A. Sheta, and A. Ayesh, *Image Enhancement Using Particle Swarm Optimization*. 2007.
- [18] "The STARE Project." <https://cecas.clemson.edu/~ahoover/stare/> (diakses pada 18 Oktober 2020).
- [19] N. Popovic, M. Radunovic, J. Badnjar, and T. Popovic, "Manually segmented vascular networks from images of retina with proliferative diabetic and hypertensive retinopathy," *Data Brief*, vol. 18, pp. 470–473, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.03.041.