

Analisis Identifikasi Jaringan Drainase Permukaan Menggunakan Metode Penghalusan DEM LiDAR *Feature-Preserving* Dan *Edge-Preserving Smoothing* (Studi Kasus: Sungai Kedungbener, Kecamatan Kebumen)

Arizal Bawasir dan Hepsari Handayani
Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hapsari@geodesy.its.ac.id

Abstrak—Informasi akurat terkait konektivitas hidrologi akan diperlukan dalam aliran permukaan daratan yang terkena dampak bencana alam. Seperti halnya pada wilayah Kecamatan Kebumen yang merupakan daerah dengan tingkat kerawanan banjir tinggi, termasuk di daerah sekitar Sungai Kedungbener. DEM resolusi tinggi yang dihasilkan dari data LiDAR dapat memetakan kondisi permukaan daratan secara akurat, namun memiliki tingkat kekasaran dan kompleksitas yang tinggi. Metode penghalusan *feature-preserving* dan *edge-preserving* secara umum dapat menghasilkan *smoothed* DEM LiDAR yang optimal pada nilai parameter tertentu dalam algoritmanya. DEM LiDAR optimal untuk kedua metode penghalusan (FPDEM-S dan EPDEM-S) ditentukan berdasarkan konsistensi efek penghalusannya pada tiap-tiap parameter algoritma. DEM optimal didapatkan pada parameter *kernel size* 25-31 piksel; *normal difference threshold* 20°-25°; iterasi 10 kali (metode *feature preserving*) dan sigma spasial 1,7-2,3 piksel; sigma range 2,0-10,0 meter (metode *edge-preserving*). Jaringan drainase yang dihasilkan dari FPDEM-S dan EPDEM-S dapat mengidentifikasi hingga fitur drainase kecil di sekitar sawah dan pemukiman. FPDEM-S dan EPDEM-S memiliki karakteristik morfometri aliran dan *watershed* yang hampir sama, dengan rasio panjang aliran pada FPDEM-S memiliki konsistensi 7% lebih baik. Kedua DEM menghasilkan karakteristik bentuk *watershed* oval mendekati sirkular.

Kata Kunci—DEM LiDAR, *Feature-Preserving Smoothing*, *Edge-Preserving Smoothing*, Drainase, *Watershed*, *Stream*, Morfometri.

I. PENDAHULUAN

PERUBAHAN iklim yang meningkat mengakibatkan adanya kebutuhan untuk mengidentifikasi dan memetakan konektivitas hidrologi (*hydrologic connectivity*) secara akurat pada aliran permukaan daratan yang terkena dampak bencana alam. Maka dari itu, pemanfaatan teknologi *ranging* mengandalkan *Light Detection and Ranging* (LiDAR) dan ketinggian permukaan digunakan untuk menentukan aliran permukaan [1].

Teknik *terrain mapping* modern menggunakan data *Light Detection and Ranging* (LiDAR) memungkinkan terbentuknya *Digital Elevation Model* (DEM) dengan resolusi digital yang akurat [2]. Pada data dengan resolusi spasial yang lebih tinggi, kondisi topografi yang terekam akan lebih kompleks, mengingat permukaan topografi yang sangat variatif, sehingga hal tersebut akan berpengaruh kepada kekasaran (*roughness*) pada DEM LiDAR yang dihasilkan [3]. Hal tersebut seringkali tidak diinginkan karena

dampaknya pada karakteristik topografi skala besar, serta berpotensi mengacaukan identifikasi dan pengukuran indeks geomorfometrik seperti kelerengan/*slope*, aspek, dan arah aliran [4].

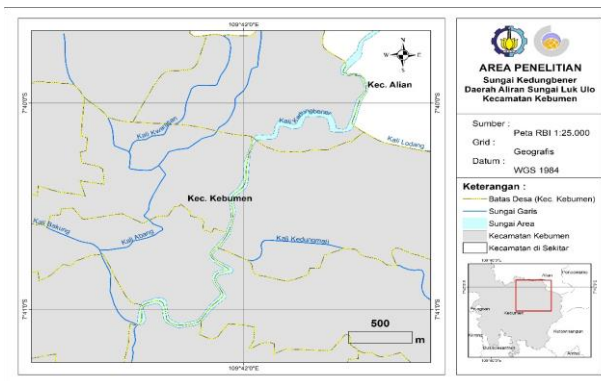
Metode *filtering* seperti *mean filtering*, *median filtering*, dan *low pass filtering* sering diaplikasikan pada model elevasi digital untuk meminimalisir *error/spike* dan kekasaran permukaan pada skala kecil (*small-scale roughness*) [4-6]. Namun, beberapa metode *low pass filtering* memiliki kecenderungan untuk mengaburkan sisi tepi/*edges* untuk ketinggian yang signifikan, serta mengaburkan *slope* dan aspek [7].

Metode *edge-preserving low pass filter* dapat mempertahankan fitur *edges* menghaluskan rekaman data/sinyal *short-scale* yang tidak terstruktur pada sebuah citra [8]. Sehingga teknik tersebut dapat berguna untuk menghasilkan fitur drainase pada DEM LiDAR. Teknik *feature-preserving smoothing* biasanya digunakan untuk proses penghalusan data 2,5D atau 3D. Teknik ini berpotensi cocok digunakan untuk pemrosesan data *terrain* [9]. Kedua metode penghalusan yang digunakan memungkinkan tereliminasi kekasaran skala kecil namun tetap mempertahankan objek mayor maupun fitur tepian/*edges* pada DEM LiDAR.

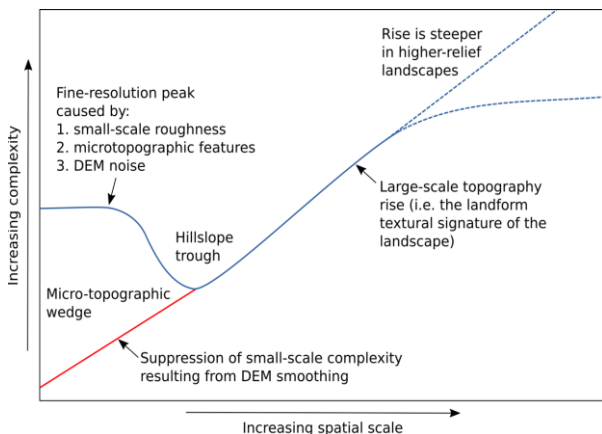
Sungai Kedungbener berada pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Lukulo dengan sebagian besar wilayah yang dilintasi adalah Kecamatan Kebumen. Sekitar 80,4% wilayah Kecamatan Kebumen merupakan daerah dengan tingkat kerawanan banjir yang tinggi. Dimana salah satu daerah paling rawan adalah pada sekitar Sungai Kedungbener, sehingga data yang akurat akan diperlukan untuk analisis hidrologi di daerah tersebut [10].

Pada penelitian ini, data yang digunakan adalah data LiDAR untuk pembuatan DEM dengan resolusi 0,5 meter. Fitur drainase kecil seringkali mengontrol pola drainase permukaan yang dimodelkan dari data DEM. Kemampuan DEM LiDAR untuk mewakili fitur drainase skala kecil inilah yang memberikan justifikasi dalam penggunaan sumber data.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengeksplorasi dua teknik penghalusan data DEM LiDAR yaitu teknik *edge-preserving low pass filter* dan *feature-preserving smoothing* untuk menghasilkan fitur drainase secara akurat sehingga dapat diidentifikasi perbedaan karakteristik aliran dan morfometri dari kedua metode yang dilakukan.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian.



Gambar 2. Model konseptual dari efek penghalusan DEM dalam grafik skala CVA (CVA scale signature).

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini mengambil lokasi di wilayah Sungai Kedungbener (Daerah Aliran Sungai Luk Ulo) pada Kecamatan Kebumen, Kabupaten Kebumen. Tepatnya pada wilayah sekitar Bendungan Sumberadi (Gambar 1). Rincian koordinat ujung ke ujung cakupan sungai adalah (7°39'38.46"LS & 109°42'34.36"BT) dan (7°41'15.95"LS 109°41'31.36"BT) atau berada di NLP 1408-132 pada Peta RBI skala 1:25.000.

B. Data dan Peralatan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Data LiDAR *point cloud* wilayah Sungai Kedungbener, Kecamatan Kebumen, Kabupaten Kebumen. (2) Data Ortofoto wilayah Sungai Kedungbener, Kecamatan Kebumen, Kabupaten Kebumen. (3) Data DEMNAS Grid 1408-13 wilayah Kabupaten Kebumen.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut: (1) Perangkat keras yang terdiri dari seperangkat laptop. (2) Perangkat lunak yang terdiri dari sistem operasi Windows 10, QGIS 3.16 (dengan Whitebox Tools dan GRASS GIS), ArcGIS 10.5, Global Mapper 19, dan Microsoft Office 365.

C. Tahap Pengolahan Data

1) DEM Generation

Data LiDAR di-input untuk dilakukan klasifikasi *ground* dan *non-ground*. Pembentukan DEM dilakukan dengan menggunakan klasifikasi *ground* saja. Proses ini

Tabel 1.
Parameter linier dan areal pada analisis morfometri

Parameter Morfometri	Simbol & Formula
<i>Aspek Linier</i>	
Strahler stream order	u
Stream number	N_u
Stream length	L_u
Bifurcation ratio	R_b
Stream length ratio	R_L
<i>Aspek Areal</i>	
Luas watershed	A
Keliling watershed	P
Panjang watershed	L_b
Drainage density	$D_d = L_u/A$
Stream frequency	$F_s = N_u/A$
Texture ratio	$R_T = N_1/P$
Elongation ratio	$R_e = (2\sqrt{A/\pi})/L_b$
Circularity ratio	$R_c = (4\pi A)/P^2$
Form factor ratio	$R_f = A/L_b^2$

Tabel 2.
Rincian pengaturan pada variasi nilai tiga parameter metode penghalusan

Ukuran Kernel (Piksel)	Normal Difference Threshold (Derajat)	Iterasi
3 × 3	5,0°	1
7 × 7	10,0°	3
11 × 11	15,0°	5
17 × 17	20,0°	7
25 × 25	25,0°	10
31 × 31	35,0°	13
51 × 51	50,0°	15

menghasilkan data DEM LiDAR awal sebelum dilakukan proses penghalusan/*smoothing*.

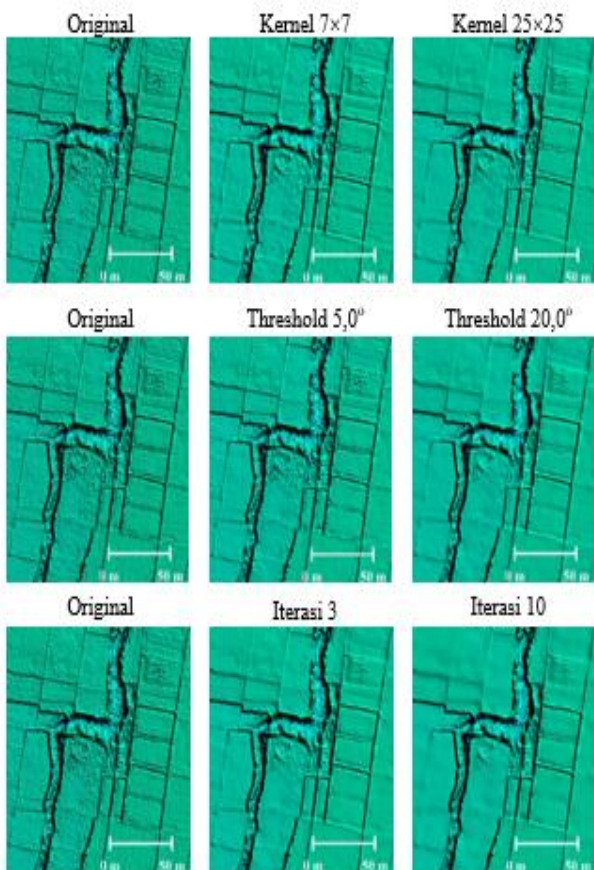
2) Pengaturan Parameter Metode Penghalusan

Proses *smoothing*/penghalusan dilakukan pada DEM LiDAR dengan dua metode, yaitu *feature-preserving smoothing* dan *edge-preserving smoothing*. Metode *feature-preserving* memiliki tiga parameter dalam proses penghalusannya, yaitu parameter ukuran filter kernel (*kernel size*), batas selisih sudut normal (*normal different threshold*), dan iterasi (*iterasi*) [11]. Pada penelitian ini ketiga parameter berturut-turut dinotasikan sebagai N , θ_T , dan I . Sedangkan metode *edge-preserving* pada penelitian ini menggunakan metode *edge-preserving filtering* tradisional yaitu *Bilateral Filter* dengan dua parameter yang terdiri dari sigma spasial (σ_S) dan sigma intensitas/sigma range (σ_R) [12]. Pengaturan variasi nilai pada setiap parameter untuk kedua metode *smoothing* akan dilakukan pada DEM LiDAR agar didapatkan rentang nilai parameter yang optimal.

3) Asesmen Circular Variance of Aspect (CVA)

Asesmen CVA dilakukan pada DEM untuk mencirikan kompleksitas bentuk permukaan/tekstur pada filter kernel (skala spasial) tertentu pada DEM hasil *smoothing* (DEM-S). CVA bernilai 0,0 untuk area halus dan mendekati 1,0 di area dengan kekasaran permukaan tinggi atau topografi kompleks.

Model konseptual dari dampak penghalusan DEM yang ideal dapat dilihat pada *CVA scale signature*. Garis biru pada Gambar 2 menunjukkan pola *circular variance of aspect* (CVA) untuk DEM awal dan garis merah menunjukkan efek dari penghalusan/*smoothing* yang ideal [12]. Artinya, penghalusan harus menghasilkan penekanan kompleksitas permukaan pada skala yang lebih kecil, sementara kompleksitas skala yang lebih besar tidak terpengaruh [11].



Gambar 3. Beberapa hasil penghalusan dengan pengaturan variasi nilai pada 3 parameter *feature-preserving smoothing*. (a) hasil untuk parameter N, (b) hasil untuk parameter θ_T , (c) hasil untuk parameter I.

Asesmen CVA dilakukan untuk setiap pengaturan nilai parameter pada kedua metode *smoothing* untuk melihat pengaruh penghalusan serta konsistensi model CVA pada beberapa skala spasial, sehingga dapat ditentukan rentang optimal nilai pada masing-masing parameter.

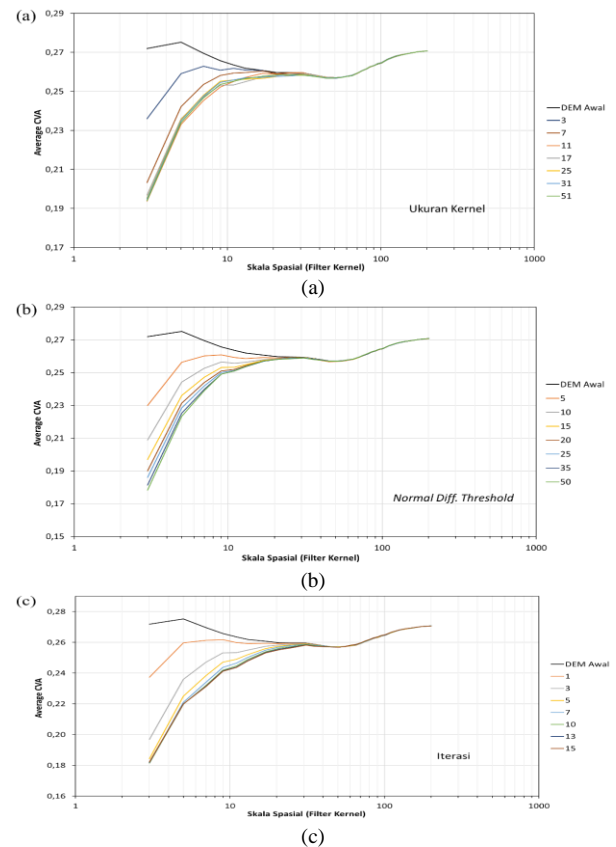
4) Identifikasi Fitur Drainase dan Daerah Aliran/Watershed

Pemrosesan jaringan drainase dilakukan untuk DEM hasil penghalusan *feature-preserving* (FPDEMS), DEM hasil penghalusan *edge-preserving*, serta data DEMNAS. Proses pembentukan jaringan drainase ini dilakukan pada *software* ArcGIS menggunakan fitur *Hydrology Analysis* dengan tahapan meliputi: DEM Input > Pengisian/Fill Sinks > Pendefinisian Arah Aliran Piksel (*Flow Direction*) > Akumulasi Aliran (*Flow Accumulation*) > Pendefinisian Fitur Aliran (*Stream Definition*) > Segmentasi Aliran (*Stream Segmentation*) > *Strahler Stream Order* > Pendefinisian Daerah Tangkapan/*Catchment*.

5) Analisis Morfometri Aliran dan Watershed

Morfometri pada *watershed* merupakan ukuran kuantitatif karakteristik *watershed* yang terkait dengan aspek geomorfologi dan proses aliran air permukaan di suatu daerah [13]. Analisis morfometri meliputi 3 aspek, yaitu aspek linier, aspek areal, dan aspek relief [14-15].

Pada penelitian ini, analisis morfometri pada tiga DEM (FPDEMS, EPDEMS, dan DEMNAS) menggunakan aspek linier dan aspek areal dengan penghitungan parameter pada Tabel 1 [17]. Dimana N_1 adalah jumlah aliran/*stream* pada orde pertama.



Gambar 4. Grafik skala CVA pada parameter ukuran kernel (a), *normal difference threshold* (b), dan iterasi (c).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

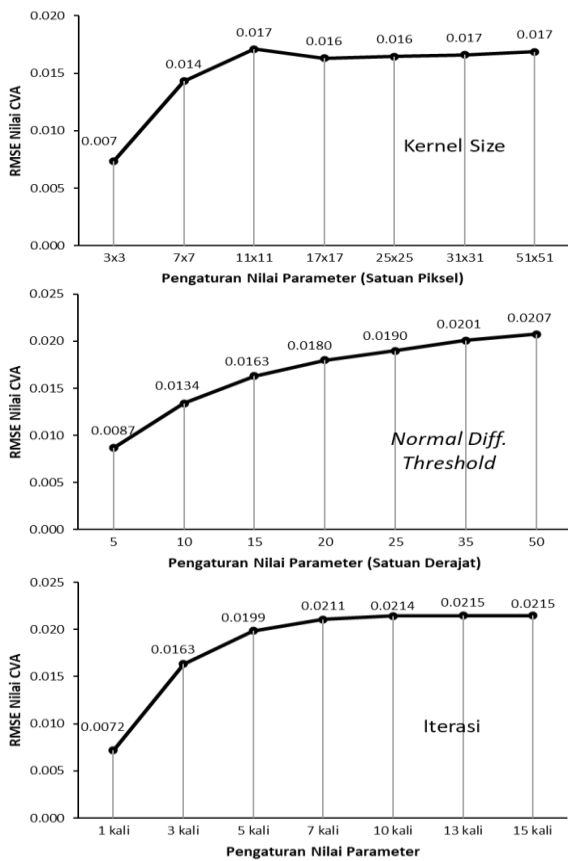
A. Nilai Optimal pada Parameter Penghalusan

Nilai optimal parameter untuk dua metode penghalusan (*feature-preserving* dan *edge-preserving*) ditentukan setelah data *point cloud* LiDAR diproses menjadi data *Digital Elevation Model* (DEM) menggunakan klasifikasi fitur *ground*. Dalam penentuan rentang nilai optimal, dilakukan penghalusan pada DEM dengan pengaturan nilai parameter yang bervariasi [11]. Sehingga didapatkan efek penghalusan yang konsisten serta tetap mempertahankan objek mayor/penting pada DEM LiDAR.

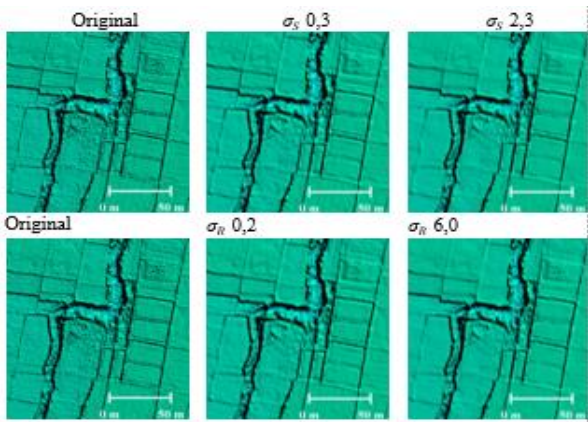
1) Nilai Optimal pada Parameter Metode *Feature-Preserving Smoothing*

Metode penghalusan *feature-preserving* menggunakan pendekatan yang sama dengan penghalusan data 3D. Algoritma *feature-preserving* terdiri atas komponen/parameter ukuran kernel (N), batas selisih sudut normal/*normal difference threshold* (θ_T), dan iterasi (I). Tabel 2 menunjukkan rincian variasi pengaturan pada nilai tiga parameter metode penghalusan *feature-preserving* pada DEM LiDAR.

Nilai optimal masing-masing parameter ditentukan dengan melihat kecenderungan konsistensi pada efek penghalusan seiring dengan bertambahnya nilai parameter serta efeknya secara visual pada objek-objek mayor/penting. Beberapa hasil penghalusan (Gambar 3) pada tiga parameter metode *feature-preserve smoothing*, serta gambaran efeknya dalam grafik skala CVA (Gambar 4).



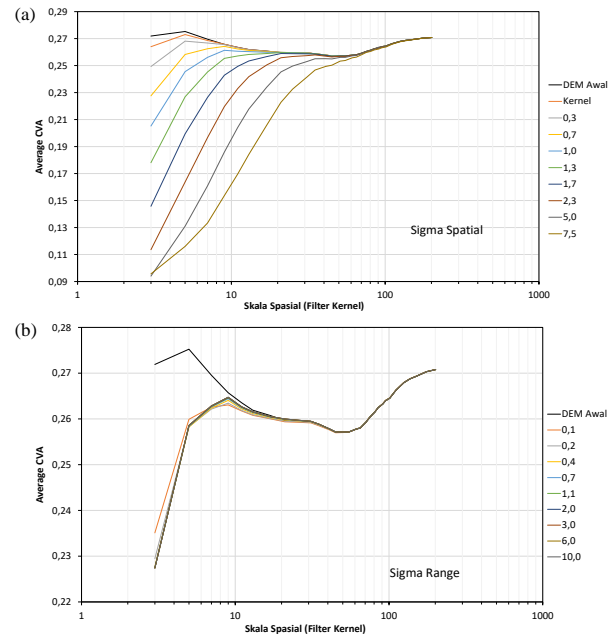
Gambar 5. RMSE antara DEM hasil *feature-preserve smoothing* (dengan variasi pengaturan nilai parameter) terhadap DEM awal/original.



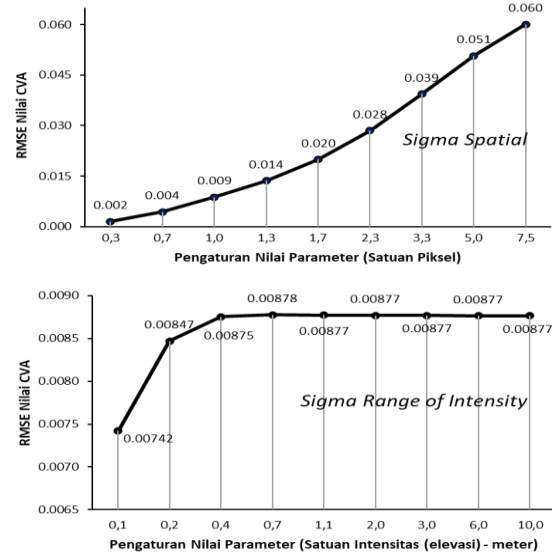
Gambar 6. Beberapa hasil penghalusan dengan pengaturan variasi nilai pada dua parameter *edge-preserving smoothing*. (a) hasil untuk parameter σ_s , (b) hasil untuk parameter σ_R .

Berdasarkan grafik skala CVA, efek penghalusan mulai serupa/konsisten pada nilai $N=25$, $\theta_T = 20^\circ$, dan $I=10$. Sehingga perbedaan efek penghalusan akan sangat kecil untuk pengaturan nilai yang lebih tinggi. Untuk melihat pola konsistensi dalam penentuan parameter optimal, dilakukan perhitungan selisih nilai CVA (menggunakan *root mean square error*) antara variasi nilai parameter dengan DEM awal, seperti terlihat pada Gambar 5.

Rentang nilai optimal tiga parameter *feature-preserving smoothing* pada DEM area studi ditentukan pada ukuran kernel 25-31 piksel; *threshold* (θ_T) 20° - 25° ; dan iterasi 10 kali. Selain karena konsistensi efek penghalusannya berda untuk variasi nilai parameter yang lebih tinggi (berdasarkan skala CVA), nilai optimal di atas dipilih karena penghalusan



Gambar 7. Grafik skala CVA pada parameter σ_s (a) dan σ_R (b).



Gambar 8. RMSE antara DEM hasil *edge-preserving smoothing* (dengan variasi pengaturan nilai parameter) terhadap DEM awal/original. Parameter σ_s (a) tidak memberikan efek penghalusan yang mirip/konsisten seiring bertambahnya variasi nilai parameter.

pada rentang nilai tersebut menghasilkan DEM yang tidak terlampau halus dan tetap mempertahankan objek mayor. DEM dengan penghalusan *feature-preserve* yang sudah optimal selanjutnya disebut *Feature-preserving Smoothed DEM* (FPDEM-S).

2) Nilai Optimal pada Parameter Metode Edge-Preserving Smoothing

Metode penghalusan *edge-preserving smoothing* terdiri atas dua komponen/parameter utama dalam algoritmanya, yaitu sigma spasial (σ_s) sebagai efek blur, serta sigma range/intensitas (σ_R) sebagai penghalusan pada intensitas (*edge-preserving*). Tabel 3 menunjukkan rincian variasi pengaturan nilai pada dua parameter metode penghalusan *edge-preserving* pada DEM LiDAR pengaturan pada parameter ukuran kernel (σ_s) menggunakan nilai $\sigma_R=0,5$, variasi parameter σ_R menggunakan nilai $\sigma_s=1,0$ (Gambar 6). Untuk parameter σ_R , pemberian variasi nilai secara umum tidak

Tabel 3.
Rincian pengaturan pada variasi nilai dua parameter metode penghalusan *edge-preserving* pada DEM LiDAR

Sigma Spasial (Piksel)	Sigma Range (meter)
0,3	0,1
0,7	0,2
1,0	0,4
1,3	0,7
1,7	1,1
2,3	2,0
3,3	3,0
5,0	6,0
7,5	10,0

Tabel 4.
RMSE nilai CVA antara sembilan DEM variasi σ_s dengan FPDEM-S

Sigma Spasial (σ_s)	RMSE Nilai CVA
0,3	0,0254
0,7	0,0229
1,0	0,0190
1,3	0,0146
1,7	0,0091
2,3	0,0048
3,3	0,0127
5,0	0,0247
7,5	0,0359

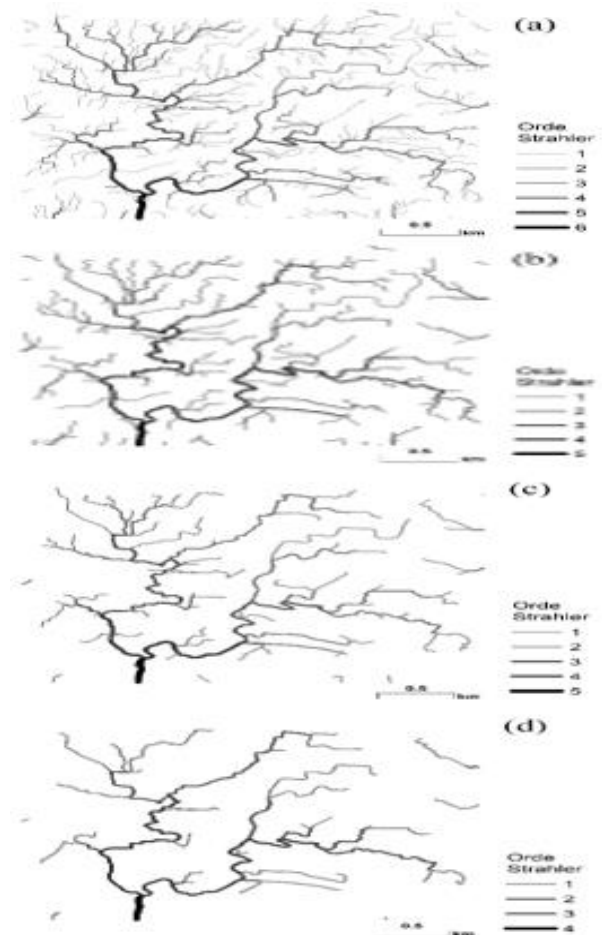
Tabel 5.
Rincian beberapa nilai *threshold* akumulasi aliran untuk data FPDEM-S, EPDEM-S, DEMNAS.

Flow Threshold Value	FPDEM-S	EPDEM-S	DEMNAS
Nilai Maksimum	28966584	28837680	53546
Threshold 1,00%	289666*	288377*	535*
Threshold 0,50%	144833	144188	268
Threshold 0,25%	72416	72094	134
Threshold 0,10%	28967**	28838**	54

mempengaruhi hasil *smoothing* secara signifikan. Secara visual, efek *edge-preserve* mulai terlihat pada nilai 0,2 dan kemudian efek penghalusan serupa/konsisten pada nilai 2,0 atau lebih tinggi. Namun untuk parameter σ_s , berdasarkan grafik skala CVA (Gambar 7) dan grafik RMSE terhadap DEM awal (Gambar 8), penghalusan ternyata memberikan efek yang semakin blur pada DEM dan tidak menandakan adanya konsistensi seiring bertambahnya variasi nilai parameter.

Sehingga penentuan rentang nilai optimal ditentukan dengan membandingkan tingkat kompleksitas ke-sembilan DEM variasi σ_s terhadap FPDEM-S (hasil penghalusan *feature-preserving* yang sudah optimal) dengan maksud untuk mendapatkan efek penghalusan yang serupa. Penghitungan RMSE nilai CVA antara sembilan DEM variasi σ_s dengan FPDEM-S ($N=25$, $\theta_T=20^\circ$, $I=10$). Parameter σ_R disamakan pada nilai 6,0 dilakukan untuk membandingkan efek penghalusan antara sembilan DEM variasi σ_s dengan FPDEM-S (hasil penghalusan *feature-preserving* yang sudah optimal) (Tabel 4 dan Gambar 8).

Nilai RMSE terkecil berdasarkan Tabel 4 diperoleh pada $\sigma_s=1,7$ hingga $\sigma_s=2,3$. Sehingga rentang nilai optimal parameter σ_s dipilih pada rentang 1,7-2,3. Sementara untuk parameter σ_R , nilai optimal dipilih pada rentang 2,0-10,0 berdasarkan konsistensi pada efek penghalusan (skala CVA). DEM dengan penghalusan *edge-preserve* yang sudah optimal selanjutnya disebut *Edge-preserving Smoothed DEM* (EPDEM-S).



Gambar 9. Fitur drainase FPDEM-S dengan empat *threshold* nilai akumulasi aliran. (a) *threshold* 0,10% dari nilai akumulasi aliran maksimal, (b) *threshold* 0,25%, (c) *threshold* 0,50%, (d) *threshold* 1,00%.

B. Hasil Identifikasi Fitur Drainase

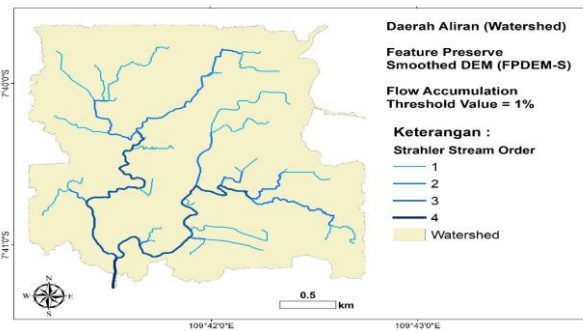
Identifikasi fitur drainase pada grid DEM pada penelitian ini (FPDEM-S, EPDEM-S, DEMNAS) secara umum meliputi pengisian *sink*, pendefinisian arah *flow*/aliran piksel, akumulasi aliran/*flow accumulation*, pendefinisian *stream*/aliran drainase, pendefinisian Orde Strahler, serta deliniasi *watershed*/daerah aliran. Dalam pendefinisian aliran, penentuan batas nilai akumulasi aliran menjadi sangat penting. Dikarenakan nilai akumulasi aliran pada masing-masing piksel memiliki arti jumlah sel/piksel sekitar yang mengalir menuju piksel tersebut. Sehingga nilai batas/*threshold* yang berbeda menghasilkan turunan jaringan drainase yang berbeda terkait dengan panjang dan jumlah fitur *stream* [16]. Pada Tabel 5 tanda ** menunjukkan hasil jaringan drainase digunakan untuk identifikasi fitur drainase kecil pada foto udara, sedangkan * hasil jaringan drainase digunakan untuk analisis morfometri.

Pada akhirnya, penentuan besaran *threshold* pada nilai akumulasi aliran bergantung pada tujuan penelitian [17]. Gambar 9 merupakan hasil identifikasi fitur drainase (4 *threshold* nilai akumulasi aliran yang berbeda) di area studi menggunakan FPDEM-S.

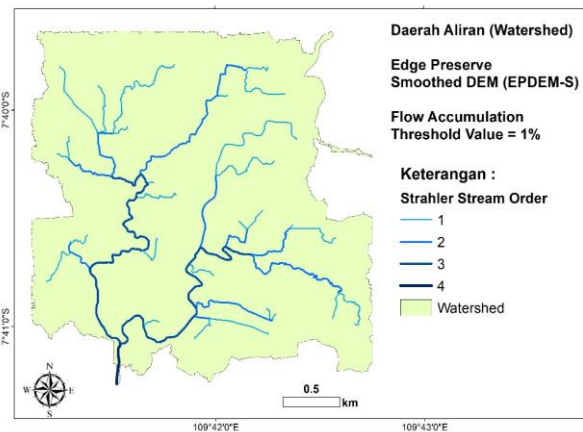
Berdasarkan Gambar 9, semakin kecil *threshold* yang diberikan, maka semakin panjang dan/atau banyak *stream* yang terdefinisi dari grid DEM. Dalam penelitian ini digunakan *threshold* 1% dari nilai maksimal akumulasi aliran masing-masing DEM untuk visualisasi dan analisis



Gambar 10. Perbandingan fitur drainase FPDEM-S dan EPDEM-S pada foto udara.



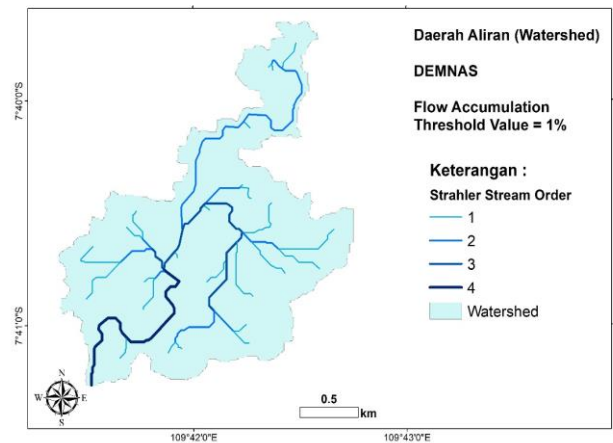
Gambar 11. Jaringan drainase menggunakan data FPDEM-S.



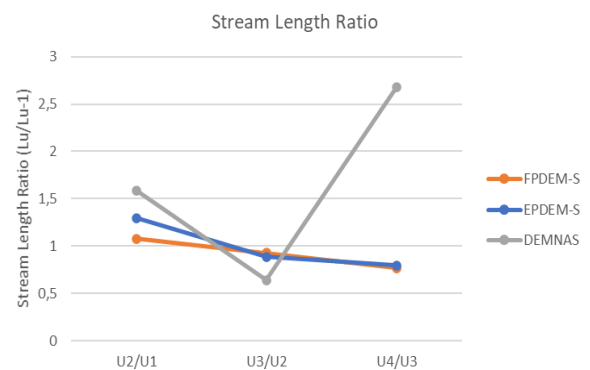
Gambar 12. Jaringan drainase menggunakan data EPDEM-S.

morfometri. Hal ini didasarkan pada area studi yang tidak terlalu luas serta variasi ketinggian/relief yang relatif kecil.

Secara visual menggunakan bantuan foto udara, hasil jaringan drainase dengan *threshold* nilai akumulasi aliran 0,10% (FPDEM-S dan EPDEM-S) dapat mengidentifikasi fitur drainase besar (Sungai Kedungbener), cabang sungai, serta beberapa fitur drainase kecil di sekitar sawah dan pemukiman (Gambar 10). Terdapat pula fitur drainase yang teridentifikasi pada objek yang ditutupi pepohonan. Namun tidak dapat mengidentifikasi fitur drainase seperti selokan kecil yang memiliki lebar kurang dari resolusi DEM LiDAR yang digunakan (0,5 m). Selain itu, beberapa *stream* pada



Gambar 13. Jaringan drainase menggunakan data DEMNAS.



Gambar 14. Grafik tren rasio panjang aliran pada jaringan drainase FPDEM-S, EPDEM-S, dan DEMNAS.

orde awal (orde 1) terdefinisi pada daratan (*overland flow*).

Gambar 11-14 merupakan jaringan drainase dengan *threshold* 1% (FPDEM-S, EPDEM-S, dan DEMNAS) beserta *catchment area* (*watershed*) pada masing-masing jaringan drainase DEM.

C. Analisis Morfometri Aliran dan Watershed

Parameter dalam analisis morfometri pada penelitian ini meliputi dua aspek, yaitu aspek linier dan aspek areal. Seperti pada Tabel 1, aspek linier meliputi karakteristik *stream*/fitur aliran pada jaringan drainase. Sementara aspek areal meliputi karakteristik *watershed* dan hubungannya dengan *stream* di dalamnya.

1) Aspek Linier Jaringan Drainase

Parameter linier yang dihitung untuk jaringan drainase di area studi meliputi jumlah aliran pada tiap orde (*u*), rasio bifurkasi/percabangan (R_b), total panjang aliran (L_u), rasio panjang aliran/*length ratio* (R_L) Tabel 6 merupakan karakteristik aliran berdasarkan parameter linier morfometri pada FPDEM-S (Gambar 11), EPDEM-S (Gambar 12), dan DEMNAS (Gambar 13).

Hasil pemetaan parameter linier menunjukkan bahwa drainase EPDEM-S menghasilkan jumlah *stream* sedikit lebih banyak daripada FPDEM-S. Pada Tabel 6 tanda (*) menunjukkan perhitungan rata-rata *bifurcation ratio* (R_b) menggunakan bobot jumlah aliran yang terlibat dalam perhitungan rasio [14].

Hal ini dikarenakan FPDEM-S di area studi mendefinisikan jumlah aliran orde terendah (1) lebih banyak, sehingga berpengaruh terhadap jumlah *stream* pada orde di

Tabel 6.

Parameter aspek linier pada masing-masing jaringan drainase DEM (FPDEM-S, EPDEM-S, DEMNAS).

Jaringan Drainase FPDEM-S					
u	N_u	R_b	L_u (km)	L_{sm} (m)	R_L
1	27	2,077	11,767	435,811	-
2	13	1,083	6,098	469,061	1,076
3	12	12,000	5,214	434,459	0,926
4	1		0,333	333,320	0,767
	$\sum N_u = 53$	$R_{\bar{b}} = 3,369^*$	$\sum L_u = 23,412$	-	$R_L = 0,923$
Jaringan Drainase EPDEM-S					
u	N_u	R_b	L_u (km)	L_{sm} (m)	R_L
1	30	2,000	10,928	364,272	-
2	15	1,154	7,084	472,266	1,296
3	13	13,000	5,453	419,472	0,888
4	1		0,334	333,564	0,795
	$\sum N_u = 59$	$R_{\bar{b}} = 3,498^*$	$\sum L_u = 23,799$	-	$R_L = 0,993$
Jaringan Drainase DEMNAS					
u	N_u	R_b	L_u (km)	L_{sm} (m)	R_L
1	25	2,083	5,960	238,405	-
2	12	1,333	4,544	378,648	1,588
3	9	3,000	2,186	242,923	0,642
4	3		1,950	650,064	2,676
	$\sum N_u = 49$	$R_{\bar{b}} = 2,015^*$	$\sum L_u = 14,640$	-	$R_L = 1,635$

Tabel 7.

Rangkuman parameter linier pada masing-masing jaringan drainase DEM (FPDEM-S, EPDEM-S, DEMNAS).

Parameter	FPDEM-S	EPDEM-S	DEMNAS
<i>Strahler Order</i>	4th	4th	4th
Jumlah Aliran ($\sum N_u$)	53	59	49
Mean Bifurcation Ratio ($R_{\bar{b}}$)	3,369	3,498	2,015
Panjang Total Aliran ($\sum L_u$)	23,412 km	23,799 km	14,640 km
Mean Stream Length Ratio (R_L)	0,923	0,993	1,635

atasnya (orde 2). Sementara pada jaringan drainase DEMNAS, terdapat *stream* tidak terdefinisi pada bagian sebelah barat area studi dikarenakan tertutup oleh kanopi. Teknologi LiDAR yang dapat menembus celah kanopi membuat fitur *ground* dapat terdeteksi lebih baik (Tabel 7).

Rasio bifurkasi ($R_{\bar{b}}$) pada rentang 3,0-5,0 pada drainase FPDEM-S dan EPDEM-S menunjukkan bahwa pola drainase tidak terlalu terganggu oleh struktur geologi wilayah tersebut. Sedangkan nilai $R_{\bar{b}} < 3,0$ menunjukkan pola drainase yang hampir tidak dipengaruhi oleh struktur geologi [18]. Sementara untuk rasio panjang aliran (R_L), idealnya rasio akan memiliki tren yang teratur dan cenderung lurus pada grafik Gambar 14. Jaringan drainase FPDEM-S menghasilkan rasio panjang aliran dengan tren yang sedikit lebih baik daripada EPDEM-S, yaitu dengan konsistensi lebih baik sekitar 7%.

2) Aspek Areal Daerah Aliran/Watershed

Tabel 8 menunjukkan karakteristik *watershed* berdasarkan parameter areal morfometri pada FPDEM-S, EPDEM-S, dan DEMNAS. *Watershed* pada drainase FPDEM-S dan EPDEM-S memiliki luas dan keliling yang hampir sama, serta dapat dikategorikan sebagai *micro-watershed* untuk rentang luas 5-10 km² [15]. Sedangkan pada drainase DEMNAS, adanya beberapa fitur aliran yang tidak terdeteksi

Tabel 8.

Parameter aspek areal pada masing-masing jaringan drainase DEM (FPDEM-S, EPDEM-S, DEMNAS).

Aspek Areal		FPDEM-S	EPDEM-S	DEMNAS
Luas Daerah Aliran (km ²)	A	7,242	7,210	3,699
Perimeter Daerah Aliran (km)	P	18,872	18,754	12,887
Panjang Daerah Aliran (km)	L_b	3,545	3,537	3,474
<i>Drainage Density</i> (km/km ²)	D_d	3,233	3,301	3,958
<i>Stream Frequency</i> (stream/km)	F_s	7,319	8,184	13,248
<i>Texture Ratio</i>	T	1,431	1,600	1,940
<i>Elongation Ratio</i>	R_e	0,857	0,857	0,625
<i>Circularity Ratio</i>	R_c	0,256	0,258	0,280
<i>Form Factor Ratio</i>	R_f	0,576	0,576	0,306

membuat luas *watershed* yang dihasilkan menjadi dua kali lebih kecil. Panjang daerah aliran dihitung secara garis lurus dari titik tuang (*pour points*) drainase menuju ujung *watershed* pada sumber aliran terjauh [19].

Densitas drainase diklasifikasikan menjadi 3 kelas, yaitu rendah (0-2,0 km/km²), moderat (2,0-3,0 km/km²), dan tinggi (>3,0 km/km²) [20]. Pada area *micro-watershed* seperti pada area studi di penelitian ini, densitas aliran drainase pada FPDEM-S (3,233 km/km²) dan EPDEM-S (3,301 km/km²) memiliki selisih nilai yang kecil pengaruh terhadap karakteristik secara umum sangat minim.

Elongation ratio, *circularity ratio*, dan *form factor ratio* merepresentasikan karakteristik dari bentuk daerah aliran/*watershed* yang dihasilkan dari ketiga DEM. *Watershed* pada FPDEM-S dan EPDEM-S secara umum memiliki nilai yang mirip. Nilai R_e mendekati 1,0, nilai R_c mendekati 0, dan nilai R_f mendekati 0,78 menunjukkan bahwa *watershed* pada FPDEM-S dan EPDEM-S memiliki bentuk oval mendekati sirkular [21]. Sedangkan untuk *watershed* DEMNAS, nilai parameter *circularity ratio* tidak konsisten sehingga bentuk *watershed* secara kuantitatif tidak dapat ditentukan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut; (1) Metode penghalusan *feature-preserving* dan *edge-preserving* secara umum dapat menghasilkan *smoothed* DEM LiDAR yang optimal pada nilai parameter tertentu. Dengan pengaturan variasi nilai parameter dan asesmen CVA pada kedua metode penghalusan DEM LiDAR area studi, didapatkan rentang nilai optimal masing-masing parameter. FPDEM-S optimal pada ukuran kernel 25-31 piksel, *Normal difference threshold* 20°-25°, dan iterasi 10 kali. EPDEM-S optimal pada sigma spasial 1,7-2,3 piksel dan sigma *range* 2,0-10,0 meter. (2) Secara visual, jaringan drainase yang dihasilkan dari FPDEM-S dan EPDEM-S (dengan *threshold* nilai akumulasi aliran 0,10%) secara umum dapat mengidentifikasi fitur drainase besar (Sungai Kedungbener), cabang sungai, beberapa fitur drainase kecil di sekitar sawah dan pemukiman, dan bahkan fitur drainase di bawah pepohonan. (3) Pada tingkat kompleksitas/kekasaran yang kurang lebih sama, jaringan drainase yang dihasilkan dari FPDEM-S dan

EPDEM-S memiliki beberapa karakteristik yang sedikit berbeda berdasarkan aspek morfometri aliran, serta memiliki karakteristik yang serupa berdasarkan aspek morfometri *watershed*. Berdasarkan parameter linier morfometri aliran, jaringan drainase FPDEM-S dan EPDEM-S memiliki sedikit perbedaan pada jumlah aliran yang terdefinisi, dengan rasio panjang aliran FPDEM-S memiliki tren yang sedikit lebih baik. Namun pada jaringan drainase DEMNAS, terdapat *stream* tidak terdefinisi pada bagian sebelah barat area studi dikarenakan tertutup oleh kanopi. Sedangkan berdasarkan parameter areal morfometri, secara kuantitatif *watershed* pada FPDEM-S dan EPDEM-S memiliki karakteristik yang serupa, dengan bentuk *watershed* oval mendekati sirkular.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Waindo Specterra yang telah mendukung penelitian ini dalam penyediaan data LiDAR dan foto udara.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. C. Brock and S. J. Purkis, "The emerging role of lidar remote sensing in coastal research and resource management," *J. Coast. Res.*, no. 53, pp. 1–5, 2009, doi: 10.2112/S153-001.1.
- [2] P. Yang *et al.*, "What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results?," *Environ. Model. Softw.*, vol. 58, pp. 48–57, 2014, doi: 10.1016/j.envsoft.2014.04.005.
- [3] K. M. Brubaker, W. L. Myers, P. J. Drohan, D. A. Miller, and E. W. Boyer, "The use of LiDAR terrain data in characterizing surface roughness and microtopography," *Appl. Environ. Soil Sci.*, pp. 1–13, 2013, doi: 10.1155/2013/891534.
- [4] H. I. Reuter, T. Hengl, P. Gessler, and P. Soille, "Preparation of DEMs for geomorphometric analysis," *Dev. Soil Sci.*, vol. 33, no. C, pp. 87–120, 2009, doi: 10.1016/S0166-2481(08)00004-4.
- [5] J. C. Gallant, "Adaptive smoothing for noisy DEMs," *Geomorphometry 2011*, pp. 37–40, 2011.
- [6] B. Yuwono, "Image smoothing menggunakan mean filtering, median filtering, modus filtering dan gaussian filtering," *Telematika*, vol. 7, no. 1, 2015, doi: 10.31315/telematika.v7i1.416.
- [7] D. Barash, "A fundamental relationship between bilateral filtering, adaptive smoothing, and the nonlinear diffusion equation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 6, pp. 844–847, 2002, doi: 10.1109/TPAMI.2002.1008390.
- [8] J. A. Stevenson, X. Sun, and N. C. Mitchell, "Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm," *Geomorphology*, vol. 114, no. 3, pp. 238–252, 2010, doi: 10.1016/j.geomorph.2009.07.006.
- [9] T. Tasdizen and R. Whitaker, "Anisotropic Diffusion of Surface Normals for Feature Preserving Surface Reconstruction," in *Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'03)*, 2003, pp. 353–360, doi: 10.1109/IM.2003.1240269.
- [10] H. D. Nugroho, A. N. Ardiansyah, and A. Windarti, "Analisis tingkat kerawanan banjir di Kecamatan Kebumen, Kabupaten Kebumen, Jawa Tengah," *Nas. Penginderaan Jauh*, no. 6, pp. 1–10, 2019.
- [11] J. B. Lindsay, A. Francioni, and J. M. H. Cockburn, "LiDAR DEM smoothing and the preservation of drainage features," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 16, pp. 17–19, 2019, doi: 10.3390/rs11161926.
- [12] R. Tomasi, C., & Manduchi, "Bilateral Filtering for Gray and Color Images," in *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271)*, 1998, pp. 839–846, doi: https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815.
- [13] A. N. Strahler, "Quantitative analysis of watershed geomorphology, transactions of the American Geophysical Union.," *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 38, no. 6, pp. 39–76, 1957, doi: https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913.
- [14] S. Sukristiyanti, R. Maria, and H. Lestiana, "Watershed-based morphometric analysis: A review," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 118, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/118/1/012028.
- [15] J. Ikbal, S. A. Ali, and H. Aldharab, "Morphological character of a micro watershed of Katla River in Udaipur District, Rajasthan," *Int. J. Curr. Res.*, vol. 9, no. 9, pp. 57708–57715, 2017.
- [16] I. M. Ozulu and T. Gökgöz, "Examining the stream threshold approaches used in hydrologic analysis," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 7, no. 6, pp. 1–12, 2018, doi: 10.3390/ijgi7060201.
- [17] T. Gökgöz *et al.*, "Watershed Delineation from Grid DEMs in GIS: Effects of Drainage Lines and Resolution," in *Proceedings of the 10th International Specialised Conference on Diffuse Pollution and Sustainable Basin Management, Istanbul, Turkey*, 2006, pp. 18–22.
- [18] A. N. Strahler, "Quantitative geomorphology of drainage basin and channel network," *Handb. Appl. Hydrol.*, pp. 439–476, 1964.
- [19] S. A. Schumm, "Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey," *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 67, no. 5, pp. 597–646, 1956, doi: 10.1130/0016-7606(1956)67.
- [20] S. Singh, S. Kanhaiya, A. Singh, and K. Chaubey, "Drainage network characteristics of the Ghaghghar River Basin (GRB), Son Valley, India," *Geol. Ecol. Landscapes*, vol. 3, no. 3, pp. 159–167, 2019, doi: 10.1080/24749508.2018.1525670.
- [21] A. N. Strahler, "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography," *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 63, no. 11, pp. 1117–1142, 1952, doi: https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2.