

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Delineasi dan Uji Ketelitian Spasial Batas DAS dan Alur Sungai

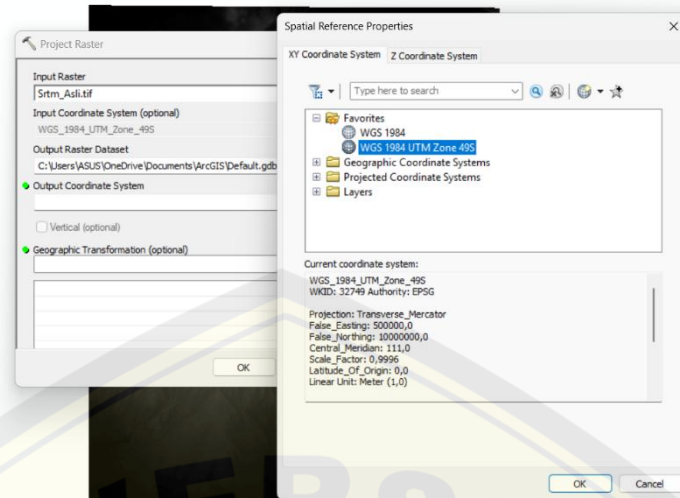
Sebelum melakukan delineasi batas Daerah Aliran Sungai (DAS) dan perhitungan statistik spasial, semua data perlu menjalani tahapan pra-pemrosesan. Proses ini bertujuan untuk menyamakan referensi spasial dari berbagai sumber data yang berbeda, sehingga analisis perbandingan tingkat kesalahan (RMSE) dan penentuan nilai parameter fisik geometri DAS bisa dilaksanakan dengan tepat dan akurat secara matematis.

Hasil dari tahapan pra-pemrosesan mencakup penyelarasan sistem koordinat proyeksi dan penyeragaman ukuran piksel data elevasi.

4.1.1. Penyelarasan Sistem Koordinat (Proyeksi Spasial)

Data lintasan (*tracking*) alur sungai dicatat secara langsung di lapangan melalui GPS Garmin 78s secara otomatis memakai sistem referensi koordinat geografis (*Geographic Coordinate System*) WGS 1984 dalam satuan derajat (Lintang/Bujur). Sementara itu, perhitungan jarak deviasi pada rumus RMSEr dan RMSEz serta perhitungan luas (A) serta panjang sungai (L) memerlukan satuan metrik (meter atau kilometer).

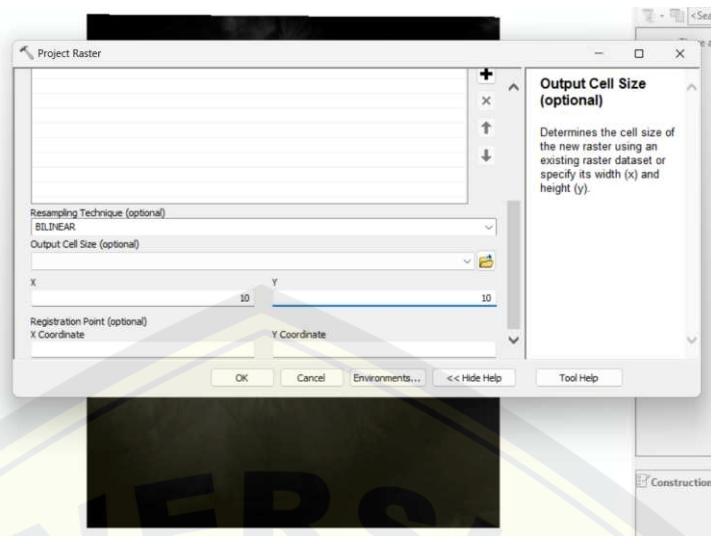
Oleh sebab itu, semua informasi asli, baik dari data vektor GPS maupun data raster dari tiga jenis *Digital Elevation Model* (SRTM, Copernicus DEM, dan NASADEM), akan diproyeksikan ulang ke dalam sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM). Mengingat bahwa daerah Kabupaten Jember dan Sub-DAS Pengarengan terletak di rentang bujur timur Jawa Timur, sistem proyeksi yang diterapkan secara konsisten adalah WGS 1984 UTM Zone 49S. Transformasi spasial ini menjamin bahwa jarak perubahan bentuk yang akan dianalisis murni adalah kesalahan dari model ketinggian, dan bukan disebabkan oleh distorsi lengkungan bumi atau kesalahan dalam pembacaan sistem koordinat oleh *software*.



Gambar 4.1 Penyalarsan Sistem Koordinat
(Sumber : *Software GIS*)

4.1.2. *Resampling* Resolusi *Digital Elevation Model* (DEM)

Untuk menghasilkan parameter perbandingan geometris yang sebanding (perbandingan yang setara), ketiga sumber data DEM (SRTM, Copernicus DEM, dan NASADEM) telah disesuaikan menggunakan perangkat lunak GIS melalui algoritma *Project Raster*. Fitur ini melakukan transformasi sistem koordinat dari koordinat geografis (WGS 1984) ke proyeksi UTM Zona 49S secara bersamaan dengan proses *resampling* untuk menghasilkan tiga skenario resolusi spasial yang konsisten, yakni 10 meter, 20 meter, dan 30 meter. Teknik interpolasi yang digunakan adalah Interpolasi Bilinear, yang sangat cocok untuk data permukaan yang berkelanjutan karena menetapkan nilai elevasi baru berdasarkan rata-rata jarak berbobot dari empat piksel terdekat. Pendekatan ini menciptakan transisi ketinggian lereng yang lebih halus dan alami, serta mencegah munculnya efek tangga (*stair-step artifacts*) yang dapat mempengaruhi presisi dalam penarikan garis batas air (*water divide*).



Gambar 4.2 Contoh *Resampling* Resolusi SRTM 10m

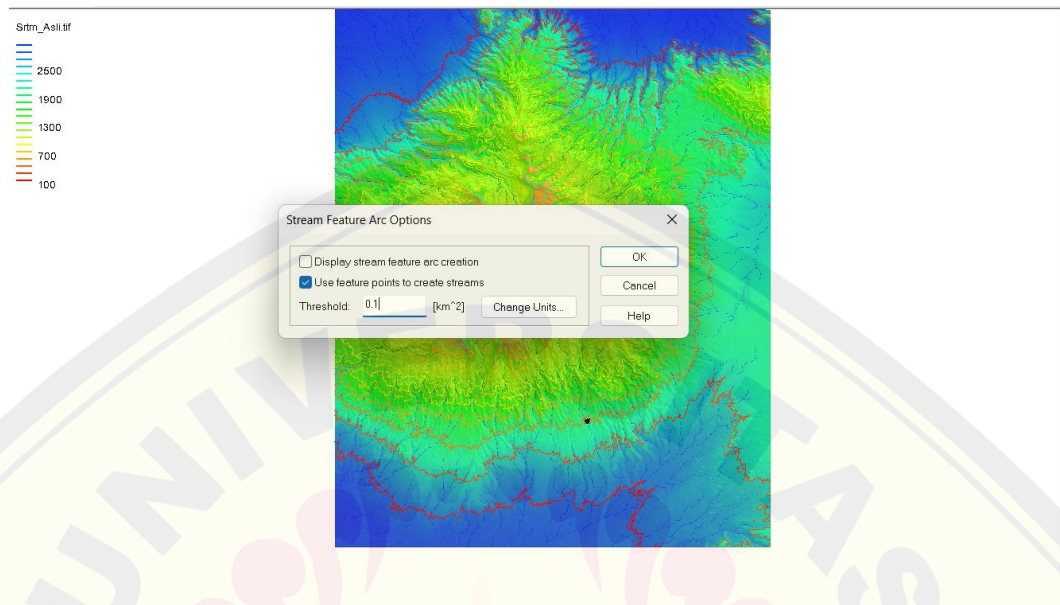
Tahap pra-pemrosesan ini menghasilkan total 9 (sembilan) skenario dataset DEM yang siap untuk diekstraksi ke dalam *Watershed Modeling System* (WMS). Secara visual, perubahan ukuran piksel ini secara langsung berdampak pada tingkat detail representasi bentang alam Sub-DAS Pengarengan, terutama di daerah dengan kemiringan curam di kaki Gunung Argopuro. Dengan resolusi 10 meter, kontur topografi dapat diinterpolasi menjadi lebih padat dan tajam, sementara resolusi 30 meter cenderung menghasilkan generalisasi topografi yang berisiko menyederhanakan lekukan-lekukan kecil pada alur sungai dan punggung bukit.

4.1.3. Hasil Delineasi Batas Sub-DAS dan Jaringan Sungai Pengarengan

Proses ekstraksi batas Sub-Daerah Aliran Sungai (Sub-DAS) Pengarengan serta jaringan sungainya dilakukan secara otomatis dengan memanfaatkan perangkat lunak *Watershed Modeling System* (WMS). Setelah penentuan titik *outlet* pada bekas Bendung Pengarengan, faktor utama yang mempengaruhi rinciannya tentang jaringan sungai adalah pengaturan ambang batas akumulasi aliran (*Flow Accumulation Threshold*).

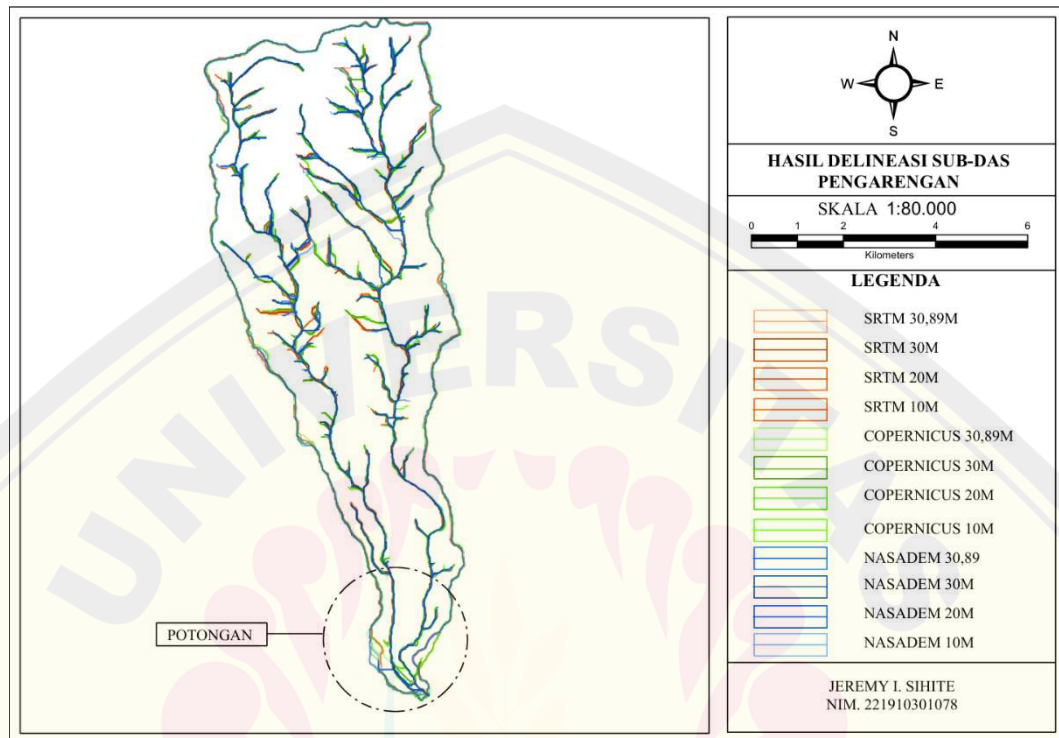
Pada penelitian ini, nilai *threshold* ditetapkan secara tetap pada 0,1 km² untuk semua skenario data DEM (SRTM, Copernicus DEM, dan NASADEM) dengan semua tingkat resolusi. Penetapan ambang batas untuk area tangkapan minimum yang relatif kecil ini dilakukan dengan tujuan agar algoritma WMS

menjadi lebih peka dalam mendeteksi ceruk topografi, sehingga sungai-sungai kecil dari orde rendah dapat diekstraksi dengan baik. Ini sangat penting untuk menampilkan pola aliran dendritik di lereng Gunung Argopuro yang terlihat jelas.



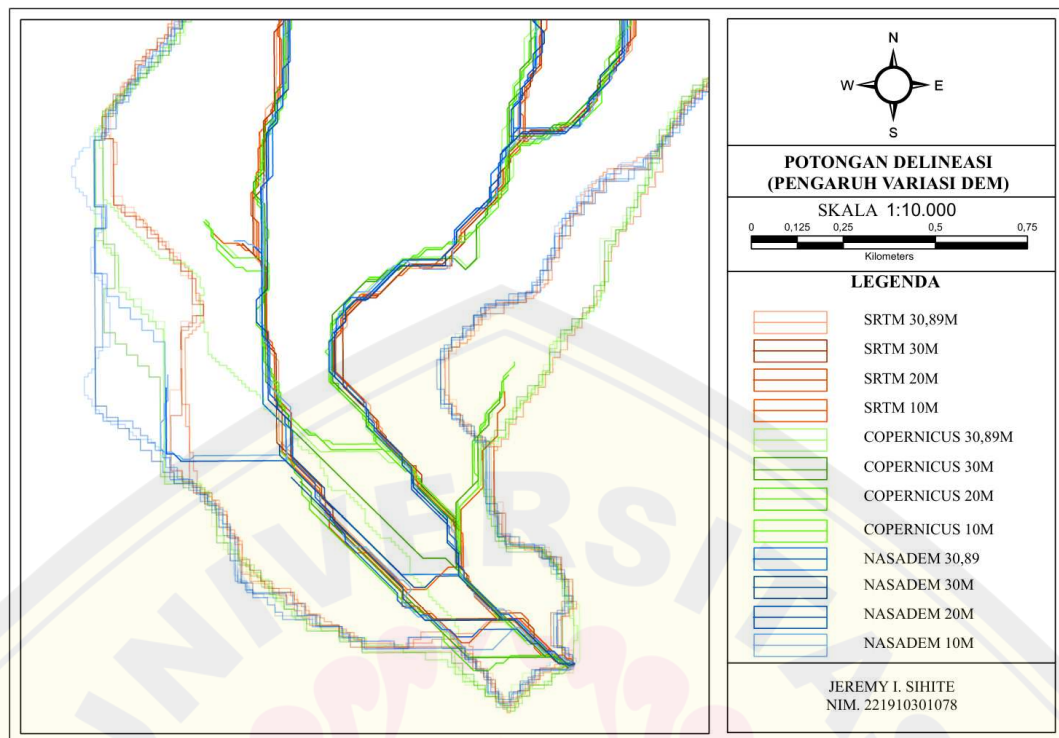
Gambar 4.3 Contoh Penentuan Nilai *Threshold* di WMS

Hasil delineasi digital dari seluruh skenario DEM menunjukkan adanya variasi bentuk batas (poligon) dan pergeseran jalur jaringan sungai, yang disajikan pada gambar berikut.



Gambar 4.4 Hasil Delineasi Sub-DAS Pengarengan

Untuk melihat perbedaan dari variasi citra satelit dilakukan potongan di 1 titik. Hasil dari potongan akan disajikan pada gambar berikut.



Gambar 4.5 Pengaruh Variasi DEM Terhadap Hasil Delineasi

Secara morfometrik, visualisasi hasil delineasi memperlihatkan dua karakteristik utama dari Sub-DAS Pengarengan, yakni:

1. Bentuk DAS Memanjang

Sub-DAS Pengarengan secara visual memiliki profil bentuk wilayah yang memanjang dari arah hulu (utara) menuju hilir (selatan). Secara hidrologis, bentuk memanjang ini memberikan keuntungan alami dalam peredaman debit banjir. Akibat jarak tempuh alur utama yang panjang, waktu konsentrasi (T_c) aliran air dari titik terjauh menuju titik pengamatan (*outlet*) membutuhkan waktu yang lebih lama. Kondisi ini mencegah air limpasan dari berbagai anak sungai tiba di *outlet* secara serempak, sehingga lonjakan debit puncak (Q_p) tidak terjadi secara tiba-tiba atau ekstrem dibandingkan dengan DAS yang berbentuk membulat (*radial*).

2. Pola Aliran Dendritik (Menyerupai Akar Pohon)

Analisis terhadap jaringan sungai yang terekstraksi menunjukkan bahwa Sub-DAS Pengarengan memiliki pola aliran bertipe dendritik. Pola ini ditandai dengan bentuk percabangan anak-anak sungai yang tidak teratur, menyerupai struktur akar atau ranting pohon yang bermuara pada satu sungai utama.

Karakteristik dendritik ini mengindikasikan bahwa wilayah tangkapan air tersebut memiliki resistensi batuan dasar yang relatif seragam. Pola aliran ini mendistribusikan limpasan permukaan secara proporsional dan bertahap dari sub-sub wilayah kecil menuju saluran utama.

4.1.4. Uji Ketelitian Spasial dan Verifikasi Lapangan

Analisis visual terhadap hasil delineasi Sub-DAS Pengarengan diuji secara kuintatif guna mengukur seberapa jauh keakuratan atau ketelitian geometrinya. Verifikasinya dilakukan dengan cara membandingkan titik koordinat (x,y, dan z) dari hasil delineasi menggunakan DEM COPERNICUS DEM, SRTM, dan NASADEM terhadap data *ground truth* hasil tracking menggunakan GPS Garmin 78s.

Verifikasi Lapangan ini menggunakan *tracking* GPS, yang dimana untuk verifikasi batas Sub-DAS Pengarengan dilakukan dengan mengambil titik elevasi tertinggi di sekitar sungai dengan total 4 titik, dan untuk aliran sungai utamanya dimulai dari titik *outlet* (bendung Pengarengan) dan berjalan ke arah Hulu dengan total 12 titik dari *outlet*, yang dimana jarak per titik nya 100 meter. Untuk penentuan titik *tracking* pada penelitian ini menyesuaikan dengan medan di lapangan. Berikut penyajian tabel hasil pengukuran di lapangan.

Tabel 4.1 Hasil Tracking Batas SUB-DAS di Lapangan

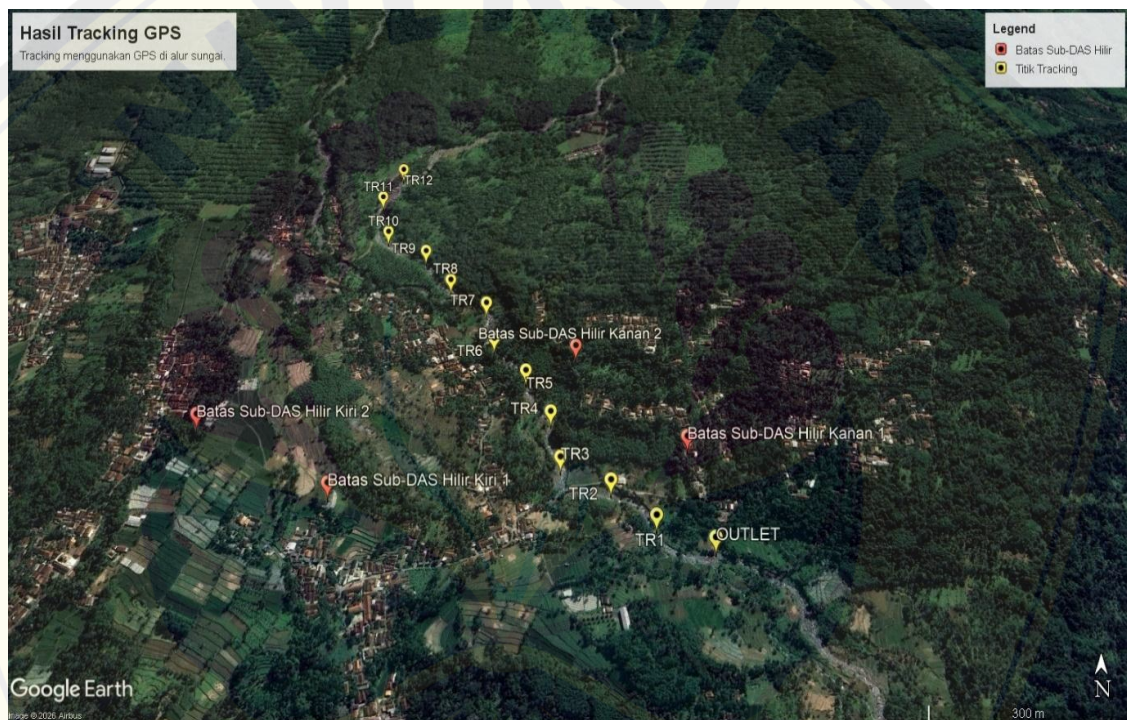
Titik	X Lapangan	Y Lapangan	Z Lapangan
Batas Sub-DAS Kiri 1	793691	9103829	429
Batas Sub-DAS Kiri 2	793427	9103976	437
Batas Sub-DAS Kanan 1	794325	9103921	395
Batas Sub-DAS Kanan 2	794126	9104132	423

Tabel 4.2 Hasil Tracking Aliran Sungai Utama di Lapangan

Titik	X Lapangan	Y Lapangan	Z Lapangan
<i>Outlet</i>	794355	9103721	380
1	794259	9103763	380
2	794184	9103832	389
3	794096	9103879	402
4	794078	9103977	406
5	794030	9104072	414

Titik	X Lapangan	Y Lapangan	Z Lapangan
6	793964	9104151	415
7	793946	9104244	409
8	793869	9104308	407
9	793810	9104392	426
10	793723	9104451	431
11	793698	9104562	435
12	793734	9104655	439

Setelah melakukan pengukuran, pada penelitian ini juga melakukan *overlay* koordinat yang diukur ke Google Earth. Berikut gambar hasil *overlay* data *tracking* di lapangan.



Gambar 4.6 Hasil *Tracking* Menggunakan GPS

Data lapangan ini akan di bandingkan dengan data horizontal dan vertikal dari hasil delineasi. Untuk perbandingan nya, penelitian ini membuat atau menarik garis tegak lurus dari titik titik hasil *tracking* terhadap garis batas Sub-DAS dan aliran sungai utamanya. Berikut contoh data koordinat yang didapat dari hasil delineasi SRTM dengan resolusi Asli.

Tabel 4.3 Koordinat Batas Sub-DAS SRTM Resolusi Asli

Titik	X Permodelan	Y Permodelan	Z Permodelan
Batas Sub-DAS Kiri 1	793671	9103829	427,8935
Batas Sub-DAS Kiri 2	793444	9103975	427,2523
Batas Sub-DAS Kanan 1	794340	9103921	391,0089
Batas Sub-DAS Kanan 2	794135	9104132	412,6307

Tabel 4.4 Koordinat Aliran Sungai Utama SRTM Resolusi Asli

Titik	X Permodelan	Y Permodelan	Z Permodelan
<i>Outlet</i>	794355	9103721	370,4253
1	794274	9103763	374,4118
2	794195	9103832	377,8572
3	794117	9103879	382,6993
4	794057	9103977	390,0000
5	794037	9104072	394,7052
6	793969	9104151	405,0302
7	793937	9104244	404,9876
8	793853	9104308	412,7725
9	793810	9104392	423,0043
10	793752	9104451	429,9584
11	793717	9104562	429,4924
12	793748	9104655	433,9820

1. Validasi Ketelitian Horizontal dan Vertikal Batas SUB-DAS Pengarengan

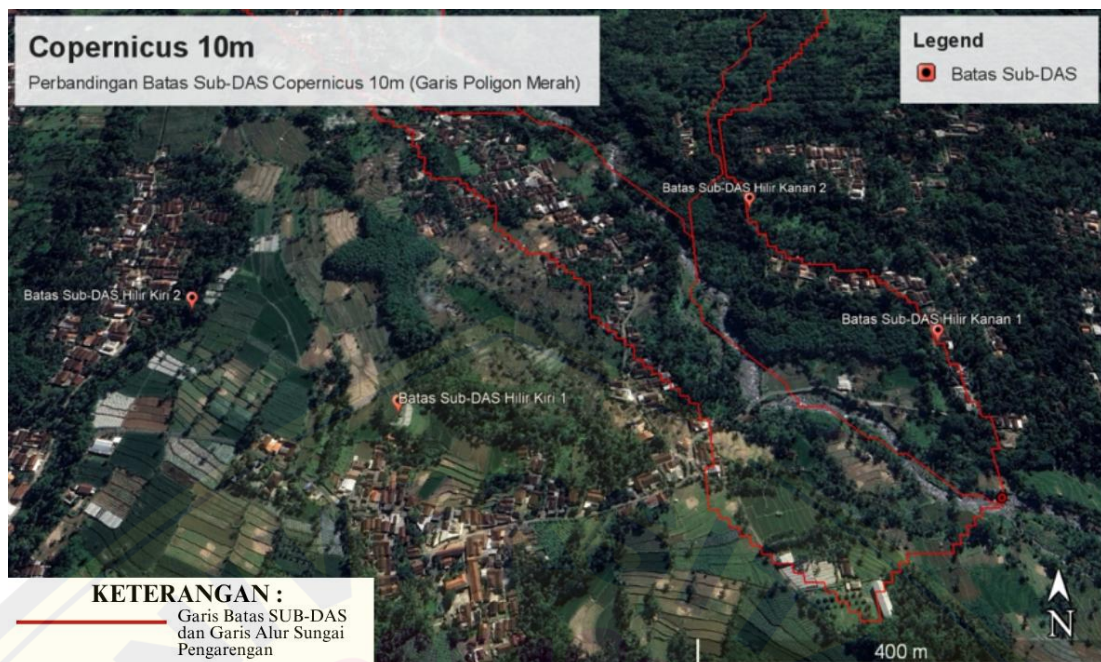
Berikut hasil perhitungan statistik ketelitian horizotal batas Sub-DAS Pengarengan dengan resolusi asli serta hasil *resampling* 10 m, 20 m, dan 30 m.

Tabel 4.5 Ketelitian Horizontal Batas Sub-Das

Citra Satelit	RMSEr	CE90	Keteltitan
SRTM Resolusi Asli	15,7797	23,9457	Memenuhi
COPERNICUS Resolusi Asli	19,3714	29,3961	Tidak Memenuhi
NASADEM Resolusi Asli	15,9138	24,1492	Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 10m	16,2635	24,6798	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 10m	271,4765	411,9656	Tidak Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 10m	14,2653	21,6477	Memenuhi

Citra Satelit	RMSEr	CE90	Keteltitan
SRTM <i>Resampling</i> 20m	14,6544	22,2380	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 20m	20,8207	31,5954	Tidak Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 20m	17,2772	26,2181	Tidak Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 30m	28,2931	42,9348	Tidak Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 30m	24,3619	36,9691	Tidak Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 30m	16,3248	24,7729	Memenuhi

Berpacu pada Perka BIG yang dimana untuk skala 1:50.000 dengan rincian: CE90 Kelas 1 adalah 10 meter, kelas 2 adalah 15 meter dan kelas 3 adalah 25 meter. Dari Hasil Perhitungan di dapat nilai CE90 untuk masing masing DEM dengan resolusi asli serta hasil *resampling* 10m, 20m dan 30m. Pada resolusi asli, SRTM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 23,9457 yang dimana nilai SRTM dan NASADEM memiliki selisih yang cukup kecil dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3, sedangkan untuk COPERNICUS tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun. Untuk klaster *resampling* 10m, NASADEM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 21,6477. Pada klaster *resampling* 10m SRTM dan NASADEM memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3. Sementara itu, untuk COPERNICUS menghasilkan nilai CE90 yang sangat tinggi dengan nilai CE90 411,9656. Hal ini menjadi temuan pada penelitian ini yang dimana batas Sub-DAS dari delineasi Copernicus 10m tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun. Berikut adalah gambar yang menunjukkan ketidakakuratan COPERNICUS 10m dalam ekstraksi batas Sub-DAS.



Gambar 4.7 Batas Sub-DAS Copernicus 10m

Selanjutnya, pada klaster *resampling* 20m, SRTM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 22,2380 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3. Sementara itu, untuk COPERNICUS dan NASADEM tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun.

Pada klaster *resampling* 30m, NASADEM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 22,2380 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3. Sementara itu, untuk COPERNICUS dan SRTM tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun.

Setelah menghitung ketelitian horizontal, penelitian ini juga menghitung ketelitian vertikal juga. Berikut hasil perhitungan statistik ketelitian vertikal batas Sub-DAS Pengarengan dengan resolusi asli serta hasil *resampling* 10 m, 20 m, dan 30 m.

Tabel 4.6 Ketelitian Vertikal Batas Sub-Das

Citra Satelit	RMSEz	LE90	Ketelitian
SRTM Resolusi Asli	7,4110	12,2275	Memenuhi
COPERNICUS Resolusi Asli	5,5953	9,2317	Memenuhi
NASADEM Resolusi Asli	6,5723	10,8436	Memenuhi

Citra Satelit	RMSEz	LE90	Ketelitian
SRTM <i>Resampling</i> 10m	5,0355	8,3080	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 10m	26,6457	43,9627	Tidak Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 10m	6,0028	9,9040	Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 20m	5,1121	8,4345	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 20m	5,6378	9,3018	Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 20m	6,0173	9,9280	Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 30m	5,5959	9,2327	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 30m	6,6150	10,9140	Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 30m	2,2759	3,7550	Memenuhi

Berpacu pada Perka BIG yang dimana untuk skala 1:50.000 dengan rincian: LE90 Kelas 1 adalah 10 meter, kelas 2 adalah 15 meter dan kelas 3 adalah 25 meter. Dari Hasil Perhitungan di dapat nilai LE90 untuk masing masing DEM dengan resolusi asli serta hasil *resampling* 10m, 20m dan 30m. Pada resolusi asli, COPERNICUS mendapatkan nilai LE90 terkecil dengan nilai error 9,2317 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 1. Sementara untuk SRTM dan NASADEM memenuhi dan masuk ke dalam kelas 2. Untuk klaster *resampling* 10m, SRTM mendapatkan nilai LE90 terkecil dengan nilai error 8,3080 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 1, sama juga untuk NASADEM dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 1. Sementara itu, untuk COPERNICUS menghasilkan nilai LE90 yang sangat tinggi dengan nilai 43,9627. Berdasarkan hasil CE90 yang sebelumnya hal ini juga menjadi temuan pada penelitian dalam uji ketelitian vertikal yang dimana batas Sub-DAS dari delineasi Copernicus 10m tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun. Pada klaster *resampling* 20m, SRTM mendapatkan nilai LE90 terkecil dengan nilai error 8,4345 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 1, sama juga untuk NASADEM dan COPERNICUS dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 1. Untuk klaster *resampling* 30m SRTM mendapatkan nilai LE90 terkecil dengan nilai error 3,7550 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 1, disusul dengan SRTM dengan klasifikasi memenuhi dan masuk kedalam kelas 1. Sementara itu untuk COPERNICUS dari hasil LE90 nya memenuhi tetapi masuk kedalam kelas 2.

2. Validasi Ketelitian Horizontal dan Vertikal Aliran Sungai Utama

Berikut hasil perhitungan statistik terhadap resolusi asli serta hasil *resampling* 10 m, 20 m, dan 30 m.

Tabel 4.7 Ketelitian Horizontal Aliran Sungai Utama

Citra Satelit	RMSEr	CE90	Ketelitian
SRTM Resolusi Asli	15,4373	23,4260	Memenuhi
COPERNICUS Resolusi Asli	16,4410	24,9493	Memenuhi
NASADEM Resolusi Asli	17,7894	26,9954	Tidak Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 10m	15,3422	23,2819	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 10m	20,4206	30,9882	Tidak Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 10m	19,2094	29,1502	Tidak Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 20m	17,0362	25,8524	Tidak Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 20m	18,5223	28,1076	Tidak Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 20m	16,0504	24,3565	Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 30m	16,4621	24,9812	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 30m	17,2337	26,1521	Tidak Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 30m	17,0429	25,8626	Tidak Memenuhi

Berpacu pada Perka BIG yang dimana untuk skala 1:50.000 dengan rincian: LE90 Kelas 1 adalah 10 meter, kelas 2 adalah 15 meter dan kelas 3 adalah 25 meter. Dari Hasil Perhitungan di dapat nilai CE90 untuk masing masing DEM dengan resolusi asli serta hasil *resampling* 10m, 20m dan 30m. Pada resolusi asli, SRTM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 23,4260 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3. Sementara COPERNICUS memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3 juga, tetapi untuk NASADEM tidak memenuhi dan tidak masuk ke kelas manapun. Untuk klaster *resampling* 10m, SRTM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 23,2819 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3, untuk NASADEM dan COPERNICUS tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun. Pada klaster *resampling* 20m, NASADEM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 24,3565 dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3, untuk SRTM dan COPERNICUS tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun. Untuk klaster *resampling* 30m SRTM mendapatkan nilai CE90 terkecil dengan nilai error 24,9812 dengan

klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3, untuk NASADEM dan COPERNICUS tidak memenuhi dan tidak masuk ke dalam kelas manapun.

Selanjutnya, akan ditampilkan tabel hasil perhitungan statistik ketelitian vertikal aliran sungai utama dengan resolusi asli serta hasil *resampling* 10 m, 20 m, dan 30 m.

Tabel 4.8 Ketelitian Vertikal Aliran Sungai Utama

Citra Satelit	RMSEz	LE90	Ketelitian
SRTM Resolusi Asli	10,6058	17,4984	Memenuhi
COPERNICUS Resolusi Asli	13,1420	21,6830	Memenuhi
NASADEM Resolusi Asli	11,6461	19,2149	Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 10m	10,7000	17,6540	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 10m	12,9964	21,4428	Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 10m	11,5542	19,0633	Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 20m	10,8637	17,9240	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 20m	12,8605	21,2186	Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 20m	11,5146	18,9979	Memenuhi
SRTM <i>Resampling</i> 30m	10,2853	16,9697	Memenuhi
COPERNICUS <i>Resampling</i> 30m	12,6722	20,9079	Memenuhi
NASADEM <i>Resampling</i> 30m	11,4591	18,9063	Memenuhi

Pada hasil ketelitian vertikal di aliran sungai utama, semua DEM dan semua klaster (resolusi asli serta hasil *resampling* 10m, 20m, dan 30m) nilai LE90 terkecil dihasilkan oleh DEM SRTM dengan klasifikasi memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3. Sementara itu, untuk NASADEM dan COPERNICUS juga memenuhi dan masuk ke dalam kelas 3.

4.1.5. Analisis Kelayakan dan Pemilihan DEM Terbaik

Tahapan dalam menentukan data *Digital Elevation Model* (DEM) yang paling mewakili untuk melanjutkan ekstraksi parameter fisik dan simulasi HSS Nakayasu dilakukan dengan cara sistematis melalui pengelompokan kluster dengan resolusi (resolusi asli, 10m, 20m, dan 30m).

Penilaian kelayakan tersebut memperhitungkan kolaborasi antara ketelitian horizontal (CE90) yang berfungsi sebagai akurasi posisi alur/panjang sungai (L) dan ketelitian vertikal (LE90) yang berperan sebagai penentu keandalan kemiringan

lereng (S) Mengingat seluruh (100%) skenario DEM telah dinyatakan MEMENUHI standar ketelitian vertikal Perka BIG, maka faktor penentu untuk memilih model terbaik di setiap klaster lebih difokuskan pada pencapaian peringkat ketelitian horizontalnya.

Evaluasi kelayakan DEM pada masing-masing klaster menghasilkan ketetapan sebagai berikut:

1. Resolusi Asli

Dari hasil pengujian ketelitian, pada resolusi asli DEM SRTM menunjukkan nilai error yang paling kecil. Maka, yang paling layak untuk menginterpretasikan dan mewakili ekstraksi delineasi Sub-DAS Pengarengan pada resolusi asli adalah SRTM.

2. *Resampling* 10m

Sama hasilnya dengan resolusi asli, pada *resampling* 10m nilai error yang terkecil kembali dihasilkan oleh SRTM. Maka, yang paling layak untuk menginterpretasikan dan mewakili ekstraksi delineasi Sub-DAS Pengarengan pada klaster *resampling* 10m adalah SRTM.

3. *Resampling* 20m

Berbeda dari sebelumnya, untuk *resampling* 20m ada temuan baru dari penelitian ini. Berdasarkan hasil uji ketelitian pada klaster *resampling* 20m, NASADEM menghasilkan nilai error terkecil. Maka dari itu, untuk klaster *resampling* 20m, yang paling layak untuk menginterpretasikan dan mewakili ekstraksi delineasi Sub-DAS Pengarengan adalah SRTM.

4. *Resampling* 30m

Namun pada *resampling* 30m, SRTM kembali menghasilkan nilai error terkecil. Maka yang paling layak untuk menginterpretasikan dan mewakili ekstraksi delineasi Sub-DAS Pengarengan pada klaster *resampling* 30m adalah SRTM.

Analisis perbandingan yang menggabungkan ketelitian X, Y, dan Z ini menunjukkan bahwa SRTM (Asli), SRTM (10m), NASADEM (20m), dan SRTM (30m) adalah variasi model topografi yang paling akurat dalam kelasnya masing-

masing Pemenuhan kriteria Perka BIG baik secara horizontal maupun vertikal oleh keempat model terpilih ini memberikan dasar akademis yang kuat.

4.2 Pengaruh Parameter Fisik DAS Terhadap Karakteristik HSS Nakayasu

4.2.1. Ekstraksi Parameter Fisik Sub-DAS Pengarengan

Proses ekstraksi digital memakai perangkat lunak *Watershed Modeling System* (WMS) menghasilkan tiga variabel fisik absolut yang akan berfungsi sebagai input untuk pemodelan Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) Nakayasu, yang terdiri dari Luas DAS (A), Panjang Sungai Utama (L), bersama dengan Beda Elevasi (ΔH) serta Kemiringan Sungai (S).

Tabel 4.9 Ekstraksi Parameter Morfometri

Citra Satelit	Resolusi	A(km ²)	$\Delta H(m)$	L(km)	S(m/m)
SRTM	30,89 m	46,7700	1995,5800	18,123	0,1099
	30 m	46,7500	1953,0000	17,931	0,1092
	20 m	46,8600	1972,3800	18,241	0,1086
	10 m	46,6700	1969,3600	18,387	0,1073
NASADEM	30,89 m	46,8500	1957,9100	17,861	0,1097
	30 m	46,9300	1946,7600	18,012	0,1087
	20 m	46,9000	1954,5700	18,252	0,1087
	10 m	46,8500	1952,0100	18,45	0,1074
COPERNICUS	30,89 m	47,0100	1938,9200	18,017	0,1094
	30 m	47,0400	1924,0900	18,002	0,1096
	20 m	46,9600	1934,0700	18,119	0,1084
	10 m	46,6400	1924,4200	18,362	0,1069

Berdasarkan Tabel 4.9, hasil ekstraksi parameter morfometri dari 12 skenario varian DEM menunjukkan adanya stabilitas pada parameter makro dan sensitivitas pada parameter linier. Stabilitas Parameter Makro (Luas dan Kemiringan) Parameter makro DAS, yakni Luas (A) dan Kemiringan lereng rata-rata (S), terbukti sangat stabil dan tidak terpengaruh secara signifikan oleh perbedaan sumber satelit maupun resolusi spasial. Total luas Sub-DAS Pengarengan konsisten berada pada rentang yang sangat ketat, yaitu antara 46,6400 km² (Copernicus 10m) hingga 47,0400 km² (Copernicus 30m). Begitu pula dengan parameter kemiringan lereng (S) yang bertahan pada kisaran 0,1069 hingga 0,1099

m/m. Ketahanan nilai ini mengindikasikan bahwa secara makro, topografi batas pemisah air (punggungan bukit) dan gradien kelerengan di Gunung Argopuro sangat terjal dan tegas. Morfologi yang ekstrem ini mampu terekam dengan baik oleh seluruh sensor satelit (SRTM, NASADEM, maupun Copernicus) terlepas dari kelemahan penetrasi kanopi ataupun efek *resampling* piksel. Sensitivitas Parameter Linier (Panjang Sungai Utama) Berbeda dengan parameter makro, parameter linier yaitu Panjang Sungai Utama (L) menunjukkan tingkat sensitivitas yang nyata terhadap variasi ukuran resolusi. Terdapat pola hubungan yang konsisten pada ketiga jenis satelit: semakin halus resolusi citra, semakin panjang alur sungai yang terekstrak, dan sebaliknya. Sebagai contoh, pada kelompok NASADEM, resolusi halus 10m menghasilkan lintasan sungai terpanjang mencapai 18,450 km. Sebaliknya, pada resolusi yang lebih kasar (30,89m), panjang sungai menyusut menjadi 17,861 km. Hal serupa terjadi pada kelompok SRTM, di mana lintasan memendek dari 18,387 km (*resampling* 10m) menjadi 17,931 km (*resampling* 30m). Secara spasial, ini sangat logis. Citra beresolusi halus (*resampling* 10m) memiliki ukuran grid piksel yang cukup kecil untuk mampu melacak detail lekukan-lekukan mikro alur sungai (sinuositas). Sebaliknya, pada resolusi kasar (*resampling* 30m), piksel yang besar menyebabkan terjadinya efek generalisasi spasial, di mana algoritma GIS cenderung menyederhanakan bentuk lembah dan menarik garis lurus yang memotong kelokan *meander* sungai, sehingga jarak lintasan menjadi lebih pendek. Data hasil ekstraksi parameter morfometri dari ke-12 skenario DEM ini (Luas, Panjang Sungai, dan Kemiringan) yang selanjutnya akan digunakan sebagai data masukan (*input*) dalam simulasi pemodelan matematis Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) metode Nakayasu pada tahap berikutnya.

4.2.2. Pembentukan Parameter Waktu dan Debit Puncak HSS Nakayasu

Simulasi pemodelan hidrologi pada Sub-DAS Pengarengan digunakan untuk menilai respons wilayah tangkapan air terhadap curah hujan efektif sebesar 1 mm yang turun merata. Karakteristik fisik spasial dari seluruh skenario DEM digabungkan ke dalam pendekatan HSS Nakayasu melalui dua langkah komputasi utama: penentuan waktu karakteristik, dan estimasi debit puncak.

Parameter waktu hidrograf merepresentasikan durasi rambatan aliran dari titik elevasi tertinggi di hulu (kawasan Gunung Argopuro) hingga mencapai titik outlet bendung. Mengingat panjang lintasan sungai utama (L) pada seluruh skenario model melebihi 15 km ($L > 15$ km), maka waktu kelambatan (*time lag*, T_g) dihitung dengan contoh perhitungan untuk SRTM resolusi asli sebagai berikut :

$$T_g = 0,4 + 0,058L = 0,4 + 0,058(18,1230) = 1,4511 \text{ jam}$$

$$t_{0,3} = \propto t_g = 1,5 \times 1,4511 = 2,1767 \text{ jam}$$

$$t_r = 0,75 t_g = 0,75 \times 1,4511 = 1,0884 \text{ jam}$$

$$t_p = t_g + 0,8 T_r = 1,4511 + 0,8(1,0883) = 2,3218 \text{ jam}$$

Nilai parameter waktu yang dihasilkan kemudian disubsitusikan dengan parameter Luas DAS (A) untuk menghitung besaran Debit Puncak awal (Q_p). Berikut contoh perhitungannya untuk SRTM resolusi asli:

$$Q_p = \frac{1}{3,6} + A \times R_0 \times \frac{1}{(0,3 \times t_p + t_{0,3})} = 4,5216 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabel 4.10 Parameter Waktu dan Debit Puncak HSS Nakayasu

Citra Satelit	Resolusi	T_g	T_r	T_p	$T_{0,3}$	Q_p
SRTM	30,89 m	1,4511	1,0884	2,3218	2,1767	4,5216
	30 m	1,4400	1,0800	2,3040	2,1600	4,5546
	20 m	1,4580	1,0935	2,3328	2,1870	4,5090
	10 m	1,4664	1,0998	2,3463	2,1997	4,4648
NASADEM	30,89 m	1,4359	1,0770	2,2975	2,1539	4,5773
	30 m	1,4447	1,0835	2,3115	2,1670	4,5573
	20 m	1,4586	1,0940	2,3338	2,1879	4,5109
	10 m	1,4701	1,1026	2,3522	2,2052	4,4709
COPERNICUS	30,89 m	1,4450	1,0837	2,3120	2,1675	4,5641
	30 m	1,4441	1,0831	2,3106	2,1662	4,5698
	20 m	1,4509	1,0882	2,3214	2,1764	4,5407
	10 m	1,4650	1,0987	2,3440	2,1975	4,4664

Berdasarkan Tabel 4.10, hasil perhitungan parameter waktu karakteristik dan kapasitas debit puncak awal menunjukkan adanya fluktuasi yang selaras dengan variasi parameter morfometri sebelumnya. Analisis terhadap hasil perhitungan tersebut diuraikan sebagai berikut:

- a. Intervensi Panjang Sungai terhadap Parameter Waktu

Mengingat seluruh varian DEM menghasilkan panjang sungai utama (L) lebih dari 15 km, maka perhitungan waktu kelambatan (T_g) secara matematis dikontrol penuh oleh variabel (L) melalui persamaan $T_g = 0,4 + 0,058 L$. Akibatnya, efek generalisasi resolusi piksel memberikan dampak berantai terhadap seluruh parameter waktu. Citra resolusi kasar (misal NASADEM 30,89m) yang memiliki lintasan terpendek, akan menghasilkan waktu kelambatan tercepat ($T_g = 1,4359$ jam), yang kemudian memicu pencapaian waktu puncak banjir menjadi lebih awal ($T_p = 2,2975$ jam). Sebaliknya, pada resolusi halus yang lintasannya lebih panjang (misal NASADEM 10m), waktu rambatan air melambat sehingga pencapaian puncak mundur menjadi $T_p = 2,3522$ jam.

b. Stabilitas Kapasitas Debit Puncak (Q_p)

Meskipun parameter waktu (T_g , T_r , T_p , dan $T_{0,3}$) mengalami fluktuasi akibat efek sensitivitas lintasan sungai, perhitungan kapasitas Debit Puncak (Q_p) menunjukkan tingkat ketahanan yang sangat baik. Pada ke-12 skenario data, besaran Q_p awal secara konsisten terkunci pada rentang yang sempit, yakni antara 4,4648 hingga 4,5773 m³/dtk. Stabilitas nilai debit puncak ini merupakan hasil kompensasi dari parameter Luas DAS (A) dan Kemiringan Lereng rata-rata (S) yang sebelumnya terbukti kebal terhadap perubahan resolusi dan distorsi sensor satelit.

4.2.3. Penentuan Parameter Alfa dan Penyusunan Ordinat Hidrograf

Bentuk kurva hidrograf Nakayasu sangat dikendalikan oleh parameter empiris koefisien karakteristik DAS (α). Parameter ini berfungsi mengatur kelengkungan kurva resesi (*falling limb*) yang secara akumulatif akan menentukan total volume Tinggi Limpasan Langsung (TLL). Pada penelitian ini, pengujian sensitivitas α dilakukan melalui percobaan untuk nilai 1,5, 2, dan 3 untuk melihat koefisien mana yang menghasilkan TLL mendekati 1,00 mm. Berikut tabel penyajian percobaan untuk parameter alfa menggunakan SRTM resolusi asli.

Tabel 4.11 Skenario Percobaan Parameter Alfa

Skenario Alfa (α)	Tinggi Limpasan Langsung (TLL)
$\alpha = 1,5$	0,9650
$\alpha = 2$	0,9477
$\alpha = 3$	0,9274

Merujuk pada Tabel 4.12, pengujian sensitivitas parameter koefisien karakteristik DAS α dilakukan untuk mengevaluasi respons akumulasi Tinggi Limpasan Langsung (TLL) sebelum proses kalibrasi. Secara teoritis, luasan di bawah kurva hidrograf satuan harus bernilai ekuivalen dengan 1,00 mm.

Hasil simulasi menunjukkan adanya korelasi terbalik antara besaran nilai α dengan total volume TLL yang diproyeksikan. Skenario $\alpha = 3,0$ (merepresentasikan karakteristik resesi lambat/landai) menghasilkan akumulasi TLL terendah sebesar 0,9274 mm. Nilai TLL ini mengalami peningkatan menjadi 0,9477 mm pada penggunaan skenario $\alpha = 2,0$ (karakteristik normal). Puncak akumulasi volume dicapai pada skenario $\alpha = 1,5$ (karakteristik curam/cepat) yang menghasilkan TLL sebesar 0,9650 mm.

Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan koefisien $\alpha = 1,5$ secara matematis memberikan luaran yang paling mendekati hukum kekekalan massa (ideal 1,00 mm) dengan simpangan defisit terkecil. Hasil matematis ini berkorelasi positif dan selaras dengan realitas morfometri Sub-DAS Pengarengan yang memiliki kemiringan lereng terjal. Topografi yang ekstrem secara alami akan menghasilkan kurva resesi yang meluncur turun dengan tajam dan cepat menguras volume limpasan ke *outlet* (*peaky hydrograph*). Dalam metode HSS Nakayasu, sifat pengurasan cepat tersebut direpresentasikan secara sempurna oleh nilai $\alpha = 1,5$. Oleh karena itu, ordinat dengan parameter $\alpha = 1,5$ ditetapkan sebagai model dasar, karena hanya membutuhkan faktor koreksi matematis yang sangat minor untuk mencapai kalibrasi volume absolut 1,00 mm.

Setelah mendapatkan parameter utama HSS Nakayasu langkah berikutnya adalah menyusun ordinat HSS Nakayasu. Penyusunan ordinat dilakukan dengan

membagi bentuk hidrograf menjadi dua segmen, yaitu kurva naik dan kurva turun.

Pada kurva naik ($0 < t < T_p$), contoh perhitungan debit SRTM resolusi asli:

$$Q = Q_p \frac{t^{2,4}}{t_p}$$

Sebagai contoh, $t = 1$ jam

$$Q_1 = 4,5216 \frac{1^{2,4}}{2,3218}$$

$$Q_1 = 0,5988 \text{ m}^3/\text{s}$$

Selanjutnya, pada saat $t = t_p$, sehingga :

$$Q_{Tp} = Q_p = 4,5216 \text{ m}^3/\text{s}$$

Setelah melewati waktu puncak ($t > T_p$), debit dihitung menggunakan persamaan kurva turun:

$$Q_t = Q_p \times 0,3^{\frac{t-t_p}{t_{0,3}}}, \text{ contoh } t = 4 \text{ jam}$$

$$Q_4 = 4,5216 \times 0,3^{\frac{4-2,3218}{2,1767}} = 1,7872 \text{ m}^3/\text{s}$$

Penyusunan ordinat dilakukan hingga debit mendekati nol (0). Pada SRTM resolusi asli, ordinat disusun sampai jam ke-24 karena nilai debit pada jam ke-24 sudah kecil yaitu, $0,0010 \text{ m}^3/\text{s}$. Perhitungan Volume Limpasan Langsung (VLL) dilakukan dengan mengintegrasikan jumlah luasan ordinat debit terhadap interval waktu. Setelah VLL dikonversi menjadi satuan milimeter terhadap Luas DAS (A), diperoleh nilai faktor koreksi (k) melalui persamaan

$$FK = \frac{1}{TLL_{hitung}}$$

Seluruh ordinat debit awal (Q_t) kemudian dikalikan dengan faktor koreksi (FK) tersebut untuk menghasilkan ordinat terkoreksi ($Q_{tkoreksi}$).

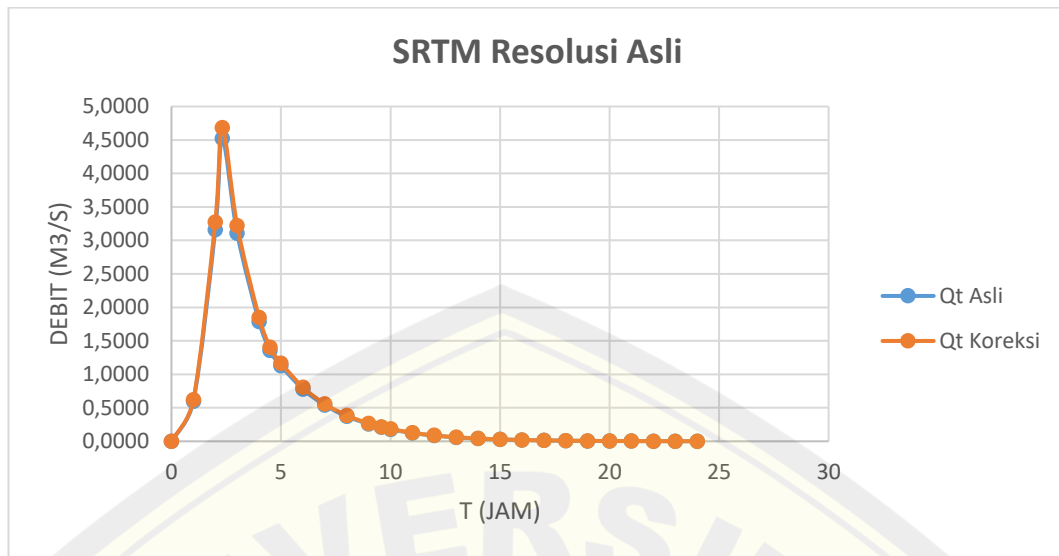
Hasil akhir penyusunan ordinat HSS Nakayasu SRTM resolusi asli setelah koreksi disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.12 Perhitungan HSS Nakayasu (SRTM Resolusi Asli)

t	Qt	Qt Koreksi
(jam)	m ³ /s	m ³ /s
0	0,0000	0,0000

t (jam)	Qt m ³ /s	Qt Koreksi m ³ /s
1	0,5988	0,6206
2	3,1607	3,2754
2,3218	4,5216	4,6858
3	3,1073	3,2201
4	1,7872	1,8520
4,4985	1,3565	1,4057
5	1,1275	1,1684
6	0,7798	0,8081
7	0,5393	0,5589
8	0,3730	0,3865
9	0,2579	0,2673
9,5775	0,2085	0,2160
10	0,1784	0,1849
11	0,1234	0,1279
12	0,0853	0,0884
13	0,0590	0,0612
14	0,0408	0,0423
15	0,0282	0,0293
16	0,0195	0,0202
17	0,0135	0,0140
18	0,0093	0,0097
19	0,0065	0,0067
20	0,0045	0,0046
21	0,0031	0,0032
22	0,0021	0,0022
23	0,0015	0,0015
24	0,0010	0,0011
Jumlah Qt (m ³ /s)	12,5365	12,9917
VLL(m ³)	45131,56	46770
TLL(mm)	0,9650	1,00
Faktor Koreksi (1/TLL)	1,0363	

Visualisasi HSS Nakayasu SRTM resolusi asli untuk melihat perbedaan Q_t dan $Q_{tkoreksi}$ akan ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 4.8 HSS Nakayasu SRTM Resolusi Asli

Ordinat debit dari SRTM resolusi asli diplot ke dalam grafik Cartesian. Visualisasi ini bertujuan untuk melihat secara komparatif sensitivitas bentuk hidrograf. Plotting ordinat debit (Q_p) ke dalam satu sumbu grafik Cartesian menghasilkan visualisasi komparatif yang sangat konsisten. Grafik ini berfungsi sebagai dasar penting untuk melakukan analisis ilmiah mengenai pola dan karakteristik aliran permukaan di area penelitian. Mengacu pada bentuk kelengkungan hidrograf yang terbentuk.

Tipikal Pola Hidrograf Tanggap Cepat (*Peaky Hydrograph*). Bentuk visual kurva hidrograf menunjukkan pola geometri yang khas, ditandai oleh bagian kurva naik (*rising limb*) yang sangat tegak/curam menuju puncak, diikuti oleh kaki kurva turun (*recession limb*) yang menyusut secara cepat menuju aliran dasar (*baseflow*). Pola hidrograf yang ramping dan tajam ini menunjukkan bahwa Sub-DAS Pengarengan memiliki respons hidrologis yang sangat sensitif dan cepat terhadap curah hujan yang signifikan. Hal ini sejalan dengan kondisi biofisik di bagian hulu yang terletak di lereng Gunung Argopuro, di mana kemiringan rata-rata sungai (S) tergolong sangat curam dengan nilai yang mencapai 0,110 m/m. Lereng yang curam ini memperpendek waktu tinggal air di permukaan tanah dan mempercepat proses pengumpulan limpasan langsung menuju aliran utama sungai.

4.2.4. Analisis Pengaruh Variasi Citra Satelit terhadap Kurva Hidrograf

Tahapan selanjutnya adalah melakukan sintesis komprehensif (analisis sensitivitas) untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh pemilihan sumber dan resolusi Digital Elevation Model (DEM) terhadap akurasi rupa bumi dan luaran hidrologi. Pembahasan ini dibedah melalui dua tinjauan utama, yakni sensitivitas ekstraksi geometri spasial dan sensitivitas output hidrograf satuan.

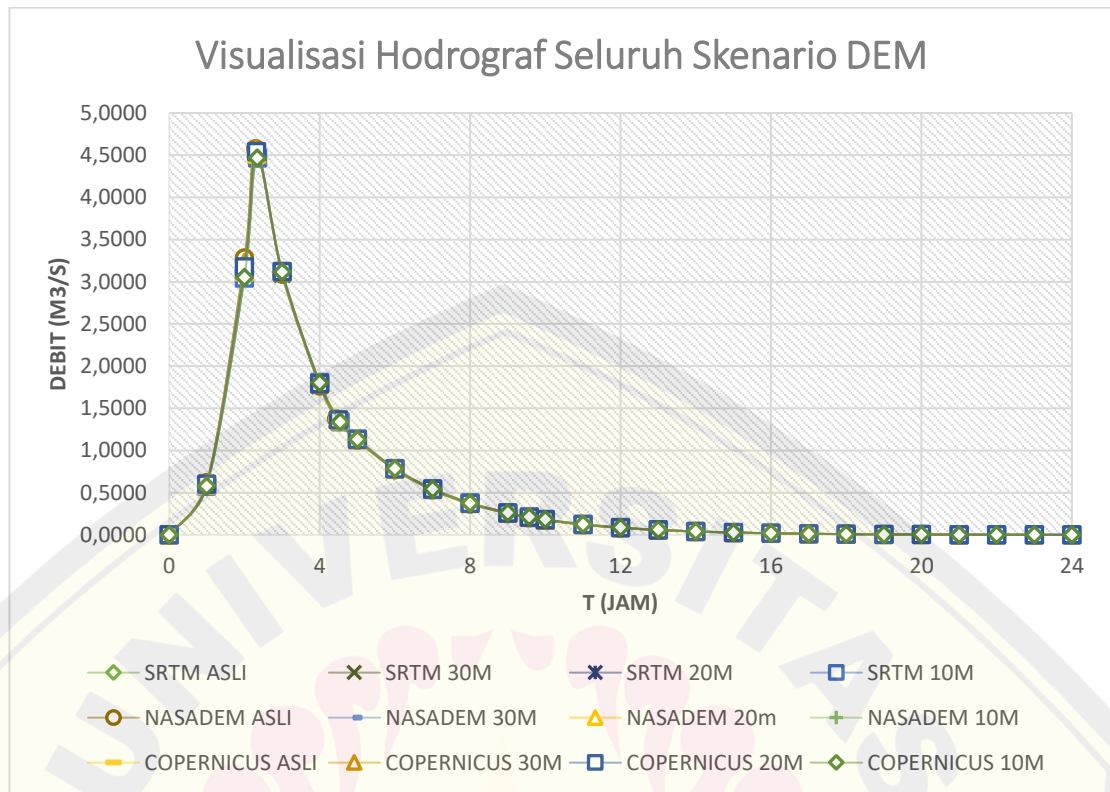
1. Sumber dan Resolusi DEM terhadap Akurasi Delineasi Spasial

Berdasarkan uji ketelitian spasial (RMSE) dan ekstraksi parameter morfometri, terbukti bahwa variasi sumber data satelit (SRTM, Copernicus, NASADEM) dan perlakuan *resampling* resolusi memberikan korelasi yang dinamis terhadap pembentukan batas dan alur Sub-DAS Pengarengan. Pada pengujian ketelitian horizontal (CE90), skenario SRTM menunjukkan tingkat ketelitian spasial tertinggi dibandingkan NASADEM dan Copernicus. Hal ini berkaitan dengan karakteristik sensor radar satelit. Meskipun ketiga model satelit tersebut sama-sama menggunakan teknologi radar, algoritma pengolahan data elevasi awal SRTM terbukti lebih stabil dalam merespons anomali tutupan kanopi hutan yang rapat di elevasi tinggi Gunung Argopuro. Pergeseran alur sungai pada SRTM masih berada pada batas toleransi sub-pixel ($CE90 < 25$ meter), sehingga tidak merusak delineasi batas pemisah air (*water divide*).

Proses *resampling* resolusi terbukti sangat memengaruhi ekstraksi panjang sungai utama (L). Skenario resolusi tinggi (10 meter) menghasilkan tarikan garis sungai terpanjang karena ukuran grid yang kecil memungkinkan algoritma membaca piksel lembah yang berbelok-belok (mendekati pola *meander* asli). Sebaliknya, pada resolusi kasar (30 meter), ukuran piksel yang besar memaksa algoritma untuk melakukan generalisasi spasial. Kelokan-kelokan mikro terpotong oleh tarikan garis lurus diagonal antar-piksel, sehingga total panjang kumulatif sungai menjadi tereduksi/lebih pendek.

2. Pengaruh Variasi Parameter Fisik Terhadap Hidrograf HSS Nakayasu

Untuk mengevaluasi keandalan dan sensitivitas model matematika Nakayasu terhadap variasi 12 skenario data spasial, dilakukan *plotting* kurva hidrograf secara serentak seperti yang disajikan pada gambar berikut.



Gambar 4.9 Visualisasi Kurva Gabungan HSS Nakayasu

Berbeda dengan ekspektasi awal di mana kesalahan delineasi spasial diprediksi akan menghasilkan dispersi kurva yang acak atau melenceng jauh (*outlier*), ke-12 garis hidrograf satuan justru menunjukkan pola yang sangat berhimpitan (*overlapping*) dan seragam. Penyimpangan kecil hanya terjadi persis pada titik ordinat puncak (berkisar antara 4,46 hingga 4,57 m³/dtk), sementara pada fase naik (*rising limb*) dan fase resesi (*falling limb*), seluruh kurva menyatu menjadi satu garis yang solid. Fenomena ini membuktikan bahwa rumus empiris HSS Nakayasu memiliki tingkat ketahanan yang tinggi terhadap kesalahan linier, karena kapasitas debitnya "dikunci" oleh parameter makro Luas DAS (A) dan Kemiringan Lereng (S) yang sebelumnya terbukti stabil pada seluruh skenario DEM.

Secara visual, seluruh kurva secara konsisten mengonfirmasi karakteristik Sub-DAS Pengarengan sebagai wilayah dengan pola limpasan tanggap cepat. Hal ini dicirikan oleh kurva fase naik yang sangat curam dan mencapai puncak kritis dalam waktu yang sangat singkat (kurang dari 2,5 jam). Bentuk kurva yang sangat ramping dan runcing ini merupakan manifestasi logis dari kondisi topografi hulu

Gunung Argopuro yang terjal, yang dikombinasikan dengan penggunaan parameter koefisien karakteristik DAS $\alpha = 1,5$ (karakteristik curam) hasil kalibrasi volume sebelumnya.

Meskipun hasil akhir hidrograf secara matematis di titik *outlet* terlihat serupa antara citra DEM yang valid (SRTM) dan yang cacat secara planimetris (Copernicus), hal ini tidak serta-merta melegitimasi penggunaan DEM berketelitian rendah dalam analisis tata ruang. Dalam pemodelan hidrologi spasial (seperti perancangan peta rawan genangan banjir), akurasi jalur aliran air di atas permukaan bumi adalah mutlak. Temuan ini justru semakin memperkuat justifikasi bahwa evaluasi ketelitian geometris (RMSE) di awal penelitian adalah filter krusial yang tidak bisa diabaikan agar rute pergerakan air tidak melenceng memotong area permukiman, dan menetapkan SRTM Resolusi Asli sebagai model spasial yang paling representatif secara fisik maupun matematis.

4.3 Simulasi dan Validasi Akurasi Debit Puncak Banjir

Tahapan ini merupakan inti dari analisis hidrologi untuk mengevaluasi sejauh mana parameter fisik yang diekstraksi dari berbagai variasi resolusi DEM memengaruhi nilai akhir rancangan debit banjir, serta menguji keakuratannya terhadap data kejadian faktual di lapangan.

4.3.1. Perhitungan Curah Hujan Efektif

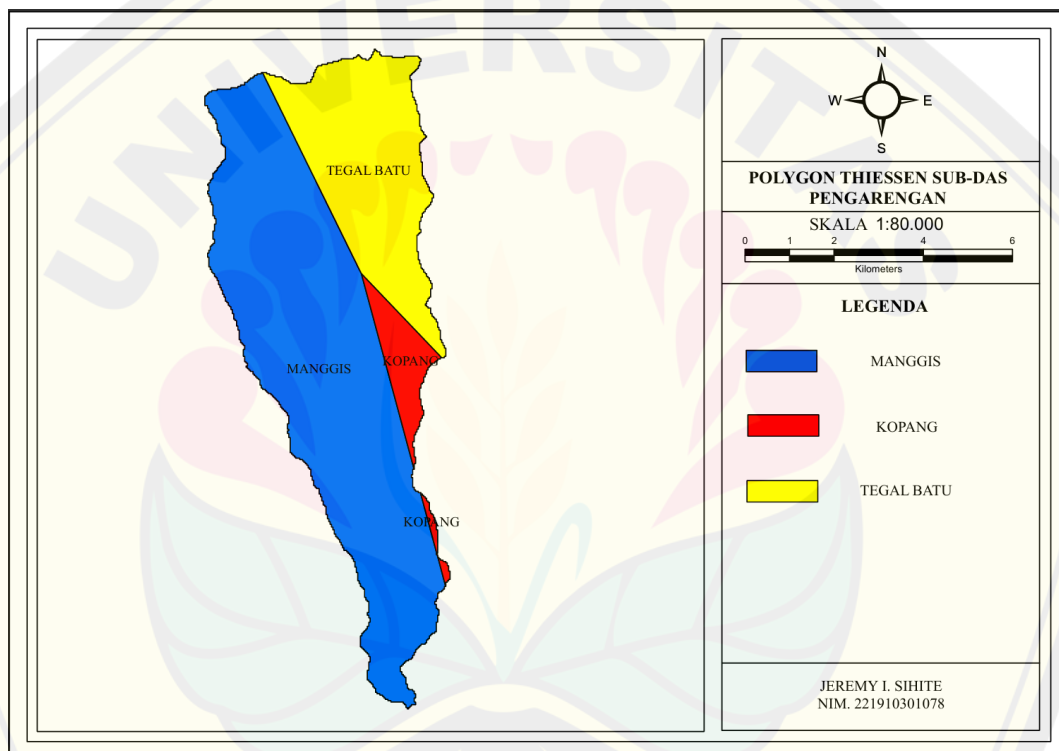
Data hujan diolah mulai dari identifikasi stasiun hujan, pemilihan kejadian hujan, perhitungan hujan wilayah, distribusi hujan jam-jaman, hingga perhitungan hujan efektif. Sementara itu, data debit puncak observasi diolah untuk memperoleh hidrograf limpasan langsung observasi yang akan digunakan sebagai pembanding pada tahap evaluasi hidrograf. Pada tahap ini, HSS Nakayasu dikembangkan menjadi hidrograf limpasan sintetik menggunakan hujan efektif jam-jaman. Adapun tahapan pengolahan data hidrologi dan pembentukan hidrograf limpasan Nakayasu dijelaskan sebagai berikut.

1. Analisis Stasiun Hujan dan Penyusunan Poligon Thiessen

Tahapan pengolahan data hujan diawali dengan identifikasi stasiun hujan yang berpengaruh terhadap wilayah Sub-DAS Pengarengan. Identifikasi dilakukan

menggunakan perangkat lunak ArcGIS dengan meninjau posisi stasiun hujan terhadap batas Sub-DAS yang digunakan dalam penelitian.

Setelah batas Sub-DAS acuan ditentukan, dilakukan penyusunan Poligon Thiessen untuk mengetahui wilayah pengaruh masing-masing stasiun hujan terhadap Sub-DAS Pengarengan. Metode ini digunakan karena posisi stasiun hujan tidak tersebar merata, sehingga setiap stasiun memiliki kontribusi yang berbeda dalam perhitungan hujan wilayah. Stasiun dengan wilayah pengaruh lebih luas akan memiliki bobot yang lebih besar, sedangkan stasiun dengan wilayah pengaruh lebih kecil akan memiliki bobot yang lebih kecil.



Gambar 4.10 Poligon Thiessen Sub-DAS Pengarengan

Pada Penelitian ini terdapat 3 stasiun penakar hujan yaitu Stasiun C1 (Manggis), C2 (Tegalbatu) dan C3 (Kopang). Luas wilayah pengaruh masing-masing stasiun kemudian digunakan untuk menghitung rasio atau bobot Thiessen. Rasio ini diperlukan agar perhitungan hujan wilayah tidak hanya didasarkan pada nilai curah hujan di setiap stasiun, tetapi juga mempertimbangkan proporsi luas daerah yang diwakili oleh masing-masing stasiun. Rasio Thiessen dihitung dengan membandingkan luas wilayah pengaruh masing-masing stasiun terhadap luas total

Sub-DAS. Sebagai contoh, perhitungan bobot Thiessen pada Stasiun C1 adalah sebagai berikut.

$$W_{C1} = \frac{A_{C1}}{A}$$

$$W_{C1} = \frac{31,1433}{46,7707}$$

$$W_{C1} = 0,6659$$

Nilai rasio sebesar 0,6659 menunjukkan bahwa Stasiun C1 mewakili sekitar 66,59% dari total luas Sub-DAS Pengarengan. Perhitungan yang sama dilakukan pada stasiun lainnya. Luas Wilayah dan hasil perhitungan luas wilayah pengaruh dan rasio Thiessen disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.13 Hasil Poligon Thiessen

Nama Stasiun	Stasiun	Luas (Km2)	Rasio
Manggis	C1	31,143	0,666
Tegalbatu	C2	12,988	0,278
Kopang	C3	2,640	0,056
Jumlah		46,771	1,000

2. Perhitungan Debit Observasi Berdasarkan Tinggi Muka Air (TMA)

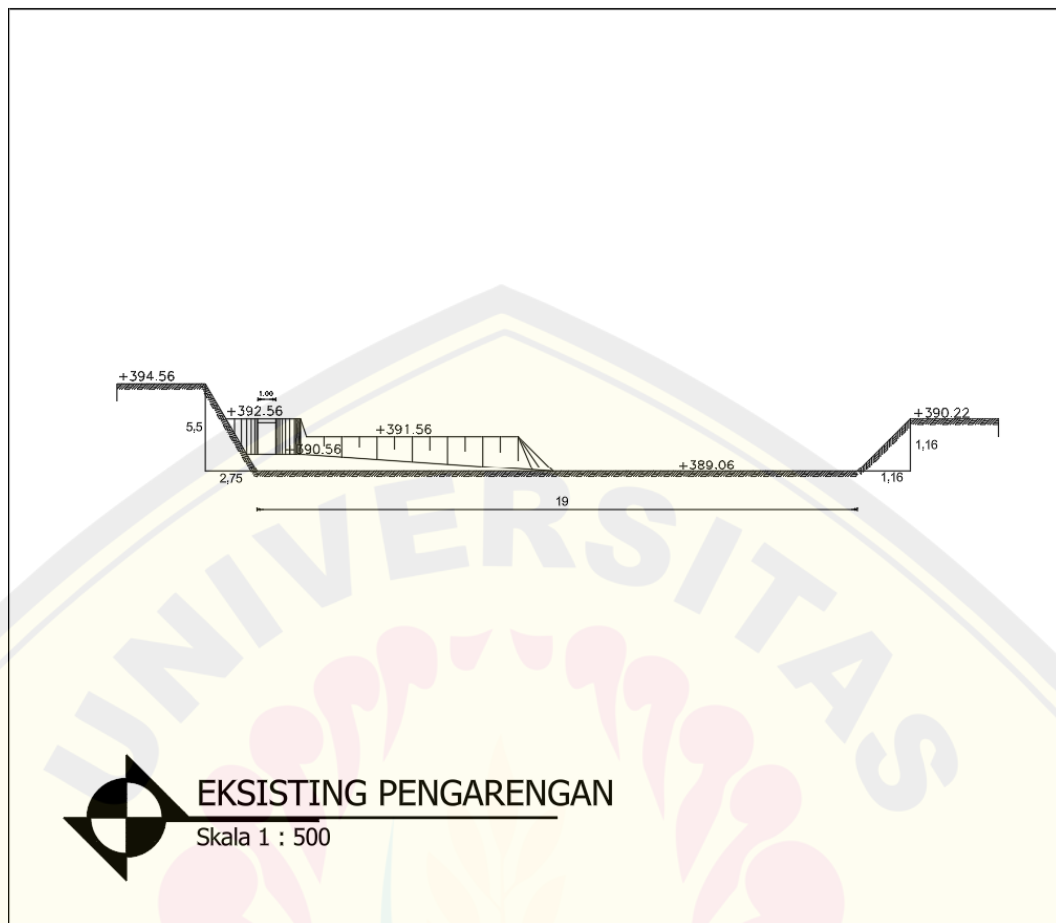
Data tinggi muka air (TMA) didapat dari UPT Pengairan Patrang. Kondisi bendung pada saat penelitian dilakukan berada dalam keadaan rusak total, dengan sisa struktur berupa dinding pasangan batu yang telah runtuh, sehingga aliran sungai mengalir bebas melalui dasar sungai alami yang didominasi bongkahan batu. Penampang saluran pada titik pengukuran didekati sebagai bentuk trapesium dengan lebar dasar (b) sebesar 19 m, mengacu pada hasil pengukuran lapangan pada bagian dasar sungai yang relatif datar. Perlu dikemukakan bahwa geometri penampang yang digunakan dalam perhitungan ini merupakan kondisi terkini pasca-kerusakan bendung, sementara data TMA yang dianalisis berasal dari periode saat bendung masih berfungsi normal, yaitu 21-31 Januari 2021. Perbedaan periode ini terjadi karena tidak tersedianya gambar desain maupun dokumentasi *as-built* bendung pada kondisi sebelum mengalami kerusakan, sehingga pendekatan

penggunaan geometri kondisi terkini menjadi salah satu batasan dalam penelitian ini.

Tabel 4.14 Data Tinggi Muka Air Pengarengan

DATA TMA PENGARENGAN	
Periode 21 sd 31 Januari 2021	
Tanggal	Tinggi Muka Air (m)
21	0,04
22	0,04
23	0,04
24	0,05
25	0,05
26	0,27
27	0,60
28	0,40
29	0,05
30	0,27
31	0,05

Perhitungan debit didasarkan pada persamaan $Q = V \times A$, dengan kecepatan aliran (V) diperoleh melalui persamaan *Manning*. Sebagai contoh, digunakan data TMA pada tanggal 21 Januari 2021 sebesar $h = 0,04$ m. Pada bendung pengarengan ini memiliki bentuk penampang trapesium sehingga dicari terlebih dahulu kemiringan talud (m).



Gambar 4.11 Bendung Pengarengan

Berdasarkan gambar potongan melintang struktur yang ditinjau, penampang saluran memiliki bentuk trapesium asimetris dengan nilai kemiringan talud (m) yang berbeda antara sisi kiri dan sisi kanan. Perhitungan kemiringan talud didasarkan pada rasio perbandingan antara jarak horizontal terhadap jarak vertikal tebing. Pada tebing sebelah kiri, diketahui jarak vertikal tebing adalah sebesar 5,5 meter dengan proyeksi jarak horizontal sejauh 2,75 meter. Berdasarkan dimensi tersebut, diperoleh nilai kemiringan talud kiri (m_{kiri}) sebesar 0,5 (dengan rasio vertikal banding horizontal sebesar 1 : 0,5). Sementara itu, pada tebing sebelah kanan, beda tinggi elevasi vertikal dari dasar saluran adalah 1,16 meter dengan bentang horizontal yang juga berukuran 1,16 meter, sehingga menghasilkan nilai kemiringan talud kanan (m_{kanan}) sebesar 1 (dengan rasio 1 : 1). Perbedaan karakteristik kemiringan pada kedua talud ini, bersama dengan dimensi lebar dasar saluran yang terukur sebesar 19 meter, mendefinisikan geometri penampang

struktur yang nantinya akan digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan luas penampang basah (A) dan keliling basah (P) untuk analisis hidrolika lebih lanjut. Luas penampang basah dihitung dengan mengalikan lebar dasar saluran dengan tinggi muka air, yaitu :

$$A = B \times h \frac{h^2}{2} \times (m_1 + m_2)$$

$$A = 19 \times 0,04 \frac{0,04^2}{2} \times (0,5_1 + 1_2) = 0,76 \text{ m}^2$$

Keliling basah dihitung dengan menjumlahkan lebar dasar dengan dua kali tinggi muka air, yaitu :

$$P = B + h(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2})$$

$$P = 19 + 0,04(\sqrt{1 + 0,5^2} + \sqrt{1 + 1^2}) = 19,07 \text{ m}$$

Jari-jari hidraulik kemudian diperoleh dari perbandingan luas penampang terhadap keliling basah, yaitu :

$$R = A/P$$

$$R = \frac{0,76}{19,07} = 0,04 \text{ m.}$$

Perhitungan yang sama dilakukan secara konsisten untuk seluruh data TMA pada periode 21–31 Januari 2021. Nilai koefisien kekasaran Manning (n) ditentukan berdasarkan kondisi visual material dasar dan dinding saluran pada lokasi pengukuran, yang berupa campuran sedimen alami dan puing pasangan batu atau beton sisa bangunan bendung yang rusak. Dengan mengacu pada klasifikasi nilai n untuk saluran lapisan beton dibuat pada potongan padas kasar terkikis bersih, sangat kasar dan dalam menurut Chow (1959), ditetapkan nilai n sebesar 0,020 dalam perhitungan ini. Adapun nilai kemiringan dasar saluran (S) diperoleh melalui hasil *tracking Global Positioning System* (GPS) pada segmen sungai terdekat dengan lokasi bendung, yaitu pada jarak sekitar 400 hingga 500 meter ke arah hulu. Penentuan nilai S dilakukan melalui pendekatan regresi linear antara jarak kumulatif dan elevasi dasar sungai, guna meminimalkan pengaruh galat pengukuran elevasi GPS yang cenderung signifikan apabila dihitung hanya berdasarkan dua titik pada satu segmen. Hasil regresi tersebut memberikan nilai kemiringan dasar saluran sebesar $S = 0,06 \text{ m/m}$.

Berdasarkan parameter-parameter tersebut, kecepatan aliran dihitung menggunakan persamaan *Manning*,

$$V = (1/n) \times R^{(2/3)} \times S^{(1/2)}$$

$$V = \left(\frac{1}{0,02}\right) \times 0,04^{0,667} \times 0,06^{0,5} = 1,4883 \text{ m/s}$$

Pada tanggal 27 Januari 2021, diperoleh nilai *V* sebesar 3,9248 m/s, sehingga debit pada tanggal tersebut adalah:

$$Q = V \times A$$

$$Q = 1,4883 \times 0,76 = 1,133 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hasil perhitungan debit untuk keseluruhan periode 21–31 Januari 2021 disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Debit Pengarengan

Hasil Perhitungan Debit Periode 21-31 Januari 2021						
Tanggal	TMA	A(m ²)	P (m)	R(m)	V(m/s)	Q (m ³ /s)
21	0,04	0,76	19,07	0,04	1,4883	1,13
22	0,04	0,76	19,07	0,04	1,4883	1,13
23	0,04	0,76	19,07	0,04	1,4883	1,13
24	0,05	0,95	19,08	0,05	1,7278	1,64
25	0,05	0,95	19,08	0,05	1,7278	1,64
26	0,27	5,18	19,44	0,27	2,1250	11,02
27	0,60	11,67	19,98	0,58	3,5931	41,93
28	0,40	7,72	19,65	0,39	2,7544	21,26
29	0,05	0,95	19,08	0,05	1,7278	1,64
30	0,27	5,18	19,44	0,27	2,1250	11,02
31	0,05	0,95	19,08	0,05	1,7278	1,64

Berdasarkan hasil perhitungan debit pada periode 21-31 Januari 2021 maka dipilih debit tertinggi yang tercatat pada tanggal 27 Januari 2021 dengan nilai TMA (h) 0,06 meter dan debit (*Q_o*) sebesar 41,9316 m³/s.

3. Pemilihan Kejadian Hujan Berbasis Event (Debit Puncak Tertinggi)

Berbeda dengan perancangan infrastruktur yang menggunakan curah hujan maksimum tahunan untuk mencari debit kala ulang, pemodelan ini bertujuan untuk memvalidasi kinerja model terhadap debit observasi faktual. Oleh karena itu, data curah hujan yang ditarik adalah curah hujan historis berbasis kejadian tunggal

(*single-event rainfall*). Berdasarkan kriteria tersebut, kejadian hujan tanggal 27 Januari 2021 digunakan karena menunjukkan curah hujan tinggi pada stasiun-stasiun yang digunakan dan diikuti oleh respon debit puncak yang meningkat dari tanggal sebelumnya. Pemilihan tanggal data hujan disesuaikan persis dengan tanggal historis terjadinya curah hujan yang memicu debit puncak banjir sebesar 41,9316 m³/dtk di pos pencatatan UPT Pengairan. Pendekatan ini memastikan bahwa input curah hujan yang diproses merupakan pemicu langsung dari output debit banjir yang terekam di lapangan.

Tabel 4.16 Hujan Harian Maksimum yang Digunakan

HUJAN HARIAN MAKS			
Tanggal	Manggis	Tegalbatu	Kopang
26-Jan-21	32	54	36
27-Jan-21	76	116	72
28-Jan-21	51	42	42

4. Perhitungan Hujan Wilayah

Bobot Thiessen yang telah diperoleh digunakan untuk menghitung curah hujan wilayah pada kejadian hujan terpilih. Perhitungan ini diperlukan karena data curah hujan yang tersedia masih berupa data titik dari masing-masing stasiun, sedangkan analisis hidrologi Sub-DAS membutuhkan nilai hujan yang dapat mewakili seluruh daerah tangkapan. Oleh karena itu, curah hujan setiap stasiun dikalikan dengan rasio Thiessen sesuai luas wilayah pengaruhnya. Data hujan yang digunakan adalah curah hujan harian pada tanggal 27 Januari 2021. Tanggal tersebut dipilih karena menunjukkan curah hujan tinggi pada stasiun-stasiun yang berpengaruh terhadap Sub-DAS Pengarengan dan diikuti oleh respon debit yang jelas.

Pada kejadian hujan tanggal 27 Januari 2021, rasio Thiessen yang digunakan seperti pada tabel 4.13, yaitu 0,666 untuk Stasiun C1, 0,278 untuk Stasiun C2 dan 0,056 untuk Stasiun C3. Sebagai contoh, kontribusi hujan wilayah pada Stasiun C1 dihitung sebagai berikut.

$$P_{C1} = 76 \times 0,666$$

$$P_{C1} = 50,61$$

Perhitungan yang sama dilakukan pada stasiun lainnya. Dengan demikian, curah hujan wilayah pada kejadian hujan tanggal 27 Januari 2021 diperoleh sebagai berikut.

$$P_w = P_{C1} + P_{C2} + P_{C3}$$

$$P_w = 86,88$$

Nilai curah hujan wilayah sebesar 86,88 mm selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam distribusi hujan jam-jaman pada tahap berikutnya. Hasil perhitungan hujan wilayah berdasarkan rasio Thiessen disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.17 Perhitungan Nilai Curah Hujan Wilayah

NILAI CURAH HUJAN WILAYAH				
Tanggal	Manggis (C1)	Tegalbatu (C2)	Kopang (C3)	Jumlah
	0,666	0,278	0,056	
27/01/2021	50,61	32,21	4,06	86,88

5. Distribusi Hujan Jam-Jaman dan Perhitungan Hujan Efektif

Setelah kejadian hujan terpilih ditentukan, data curah hujan dari stasiun yang berpengaruh terhadap Sub-DAS Pengarengan digunakan untuk memperoleh nilai hujan kejadian. Berdasarkan hasil pengolahan data hujan pada tanggal 27 Januari 2021, diperoleh nilai hujan sebesar 86,88 mm. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam distribusi hujan jam-jaman. Hujan wilayah yang diperoleh masih berupa hujan harian, sedangkan pembentukan hidrograf limpasan membutuhkan distribusi hujan dalam interval waktu yang lebih pendek. Oleh karena itu, hujan harian didistribusikan menjadi hujan jam-jaman menggunakan metode Mononobe. Metode ini dipilih karena dapat digunakan sebagai pendekatan empiris untuk membentuk distribusi temporal hujan ketika data hujan jam-jaman tidak tersedia. Sebelum distribusi hujan dilakukan, durasi hujan ditentukan dengan mempertimbangkan waktu konsentrasi Sub-DAS. Waktu konsentrasi menunjukkan waktu yang dibutuhkan aliran dari titik terjauh daerah tangkapan untuk mencapai outlet. Berdasarkan hasil perhitungan pada seluruh skenario DEM, nilai waktu konsentrasi berada pada kisaran sekitar 1,45 jam, sehingga secara umum waktu

konsentrasi Sub-DAS dapat dinyatakan sekitar 1,45 jam. Sebagai contoh, waktu konsentrasi pada salah satu skenario dihitung menggunakan panjang sungai utama sebesar 18,123 km dan kemiringan sungai utama sebesar 0,1099. Perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$T_c = 0,0663 \times L^{0,77} \times S^{-0,385}$$

$$T_c = 1,4452$$

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan T_c Seluruh Skenario DEM

Citra Satelit	Resolusi	L(km)	S(m/m)	T_c
SRTM	30,89 m	18,123	0,1099	1,4749
	30 m	17,931	0,1092	1,4591
	20 m	18,241	0,1086	1,4370
	10 m	18,387	0,1073	1,4452
NASADEM	30,89 m	17,861	0,1097	1,4783
	30 m	18,012	0,1087	1,4593
	20 m	18,252	0,1087	1,4445
	10 m	18,45	0,1074	1,4301
COPERNICUS	30,89 m	18,017	0,1094	1,4755
	30 m	18,002	0,1096	1,4526
	20 m	18,119	0,1084	1,4393
	10 m	18,362	0,1069	1,4412

Berdasarkan contoh perhitungan tersebut, durasi hujan pada distribusi Mononobe ditetapkan selama 4 jam. Penetapan durasi ini didasarkan pada nilai waktu konsentrasi maksimum Sub-DAS sebesar 1,4783 jam, sehingga dibulatkan ke atas menjadi 4 jam. Pemilihan durasi tersebut dianggap lebih representatif karena durasinya telah melampaui waktu konsentrasi, sehingga seluruh wilayah tangkapan diasumsikan telah berkontribusi terhadap aliran menuju outlet. Selain itu, durasi 4 jam masih cukup dekat dengan waktu respon Sub-DAS, sehingga distribusi hujan tidak terlalu melebar. Distribusi hujan jam-jaman dilakukan dengan mengubah hujan harian menjadi hujan kumulatif pada setiap durasi hujan. Pada tahap ini, hujan wilayah sebesar 86,88 mm digunakan sebagai hujan kejadian, sedangkan distribusi Mononobe digunakan untuk membentuk pola hujan jam-jaman. Perhitungan diawali dengan menentukan intensitas hujan pada setiap durasi

menggunakan persamaan Mononobe yang dilakukan untuk setiap durasi hujan, yaitu dari jam pertama sampai jam keempat. Contoh perhitungan ditampilkan pada jam pertama dan kedua, sedangkan perhitungan untuk jam berikutnya dilakukan dengan cara yang sama dengan mengganti nilai durasi t sesuai jam yang dihitung.

$$I_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$I_t = \frac{86,88}{24} \left(\frac{24}{1} \right)^{\frac{2}{3}} = 30,120 \text{ mm/jam}$$

Hasil perhitungan intensitas tersebut kemudian digunakan untuk memperoleh hujan kumulatif pada masing-masing durasi. Hujan kumulatif dihitung dengan mengalikan intensitas hujan terhadap durasi hujan. Sebagai contoh, hujan kumulatif pada jam pertama adalah sebagai berikut.

$$P_t = I_t \times t$$

$$P_1 = 30,120 \times 1 = 30,120 \text{ mm}$$

$$P_1 = 18,975 \times 2 = 37,949 \text{ mm}$$

Hujan tiap jam sebelum koreksi diperoleh dari selisih antara hujan kumulatif pada jam yang dihitung dengan hujan kumulatif pada jam sebelumnya. Dengan demikian, hujan pada jam kedua sebelum koreksi dihitung sebagai berikut.

$$R_t = P_t - P_{t-1}$$

$$R_2 = 37,949 - 30,120 = 7,829 \text{ mm}$$

Perhitungan yang sama dilakukan pada jam ketiga, sehingga diperoleh distribusi hujan tiap jam sebelum koreksi. Berdasarkan hasil distribusi awal yang berada pada tabel, total hujan tiap jam sebelum koreksi adalah 47,813 mm. Nilai tersebut belum sama dengan hujan wilayah hasil Thiessen, yaitu 86,88 mm, sehingga diperlukan faktor koreksi agar total hujan jam-jaman tetap konsisten dengan total hujan kejadian.

$$FK = \frac{P}{\sum R_t}$$

$$FK = \frac{86,88}{47,813} = 1,8171$$

Faktor koreksi sebesar 1,8171 kemudian digunakan untuk mengalikan hujan tiap jam sebelum koreksi. Sebagai contoh, hujan pada jam pertama sebelum koreksi

sebesar 30,120 mm, sehingga hujan jam pertama setelah koreksi dihitung sebagai berikut.

$$R_{t,k} = R_t \times FK$$

$$R_{1,k} = 30,120 \times 1,8171 = 54,7321 \text{ mm}$$

Perhitungan yang sama dilakukan pada jam berikutnya, sehingga total hujan setelah koreksi kembali sama dengan hujan wilayah sebesar 86,88 mm. Koreksi ini dilakukan agar proses distribusi hanya mengubah pola sebaran hujan terhadap waktu tanpa mengubah total hujan yang digunakan sebagai input hidrograf. Setelah hujan jam-jaman terkoreksi diperoleh, nilai tersebut dikalikan dengan koefisien limpasan (C) untuk memperoleh hujan efektif. Koefisien limpasan pada penelitian ini ditentukan berdasarkan tata guna lahan pada Sub-DAS acuan. Oleh karena itu, peta tata guna lahan digunakan untuk mengetahui komposisi penggunaan lahan dan luas masing-masing kelas di dalam Sub-DAS. Berikut merupakan tabel dan gambar untuk tata guna lahan dari Sub-DAS Pengarengan.

Tabel 4.19 Pembagian Tata Guna Lahan Sub-DAS Pengarengan

TATA GUNA LAHAN SUB-DAS PENGARENGAN				
Penggunaan Lahan	Luas	Nilai C	C x A	Koef. Limpasan Rata-Rata
Air	3,8056	1	3,806	0,1421
Hutan	40,4384	0,05	2,022	
Sawah	0,1671	0,15	0,025	
Pemukiman	0,2490	0,2	0,050	
Padang Rumput	2,1455	0,35	0,751	
Total	46,8056		6,6533	

Berikut akan disajikan tabel hasil perhitungan distribusi hujan mononobe dan hujan efektif.

Tabel 4.20 Hasil Distribusi Hujan Mononobe dan Hujan Efektif

DISTRIBUSI HUJAN DENGAN MONONOBE					
Jam Ke-	I	Hujan Kumulatif (mm)	Hujan tiap jam sebelum skala (mm)	Hujan tiap jam setelah skala (mm)	Pe (Hujan Efektif)
1	30,120	30,120	30,120	54,7321	7,2295
2	18,975	37,949	7,829	14,2260	1,8791
3	14,480	43,441	5,492	9,9792	1,3181

4	11,953	47,813	4,372	7,9444	1,0494
		Total	47,813	86,88	
		Faktor Koreksi		1,8171	

4.3.2. Pembentukan Hidrograf Limpasan Nakayasu

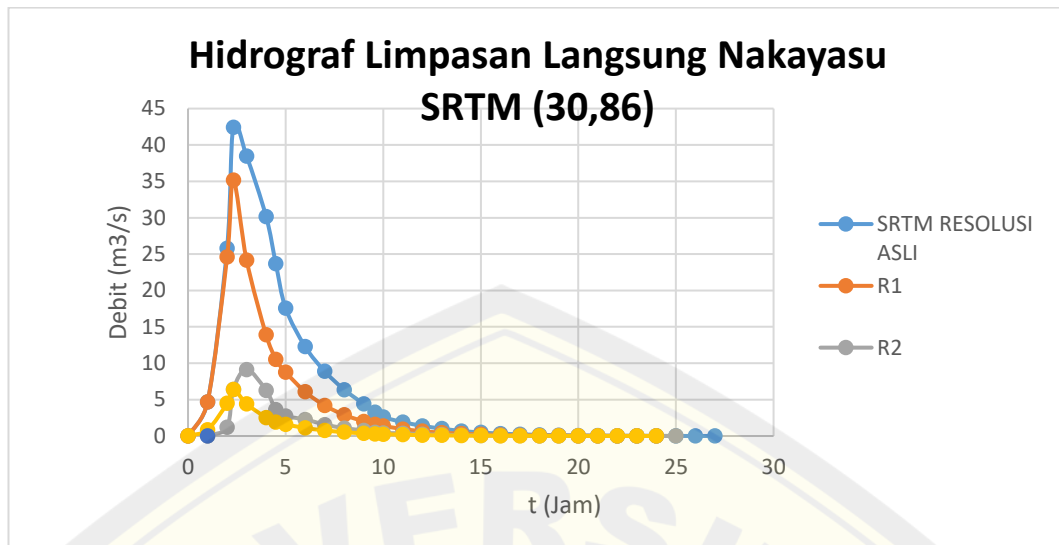
Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) Nakayasu yang telah dihitung pada Subbab 4.2 selanjutnya digunakan untuk membentuk hidrograf limpasan sintetik. Pada tahap sebelumnya, HSS Nakayasu masih menggunakan hujan satuan sebesar 1 mm. Pada tahap ini, HSS tersebut dikembangkan dengan menggunakan hujan efektif jam-jaman hasil pengolahan data hujan. Dengan demikian, hidrograf yang dihasilkan tidak lagi menunjukkan respon terhadap hujan satuan, tetapi menggambarkan respon limpasan terhadap kejadian hujan yang dianalisis. Contoh pembentukan hidrograf limpasan pada penelitian ini ditampilkan menggunakan skenario SRTM resolusi asli.

Pembentukan hidrograf limpasan dilakukan dengan prinsip superposisi, yaitu menjumlahkan kontribusi hujan efektif terhadap ordinat HSS Nakayasu pada setiap interval waktu. Hujan efektif yang digunakan terdiri atas tiga interval, yaitu Re_1 , Re_2 , Re_3 dan Re_4 . Nilai hujan efektif tersebut diperoleh dari hasil distribusi hujan Mononobe yang telah dikoreksi dan dikalikan dengan koefisien limpasan. Pada contoh ini, nilai hujan efektif yang digunakan adalah $R_1 = 7,7800$ mm, $R_2 = 2,0222$ mm, $R_3 = 1,4185$ mm, dan $R_4 = 1,1293$ mm. Penyusunan ordinat dan hidrograf limpasan nakayasu akan disajikan pada tabel dan gambar berikut.

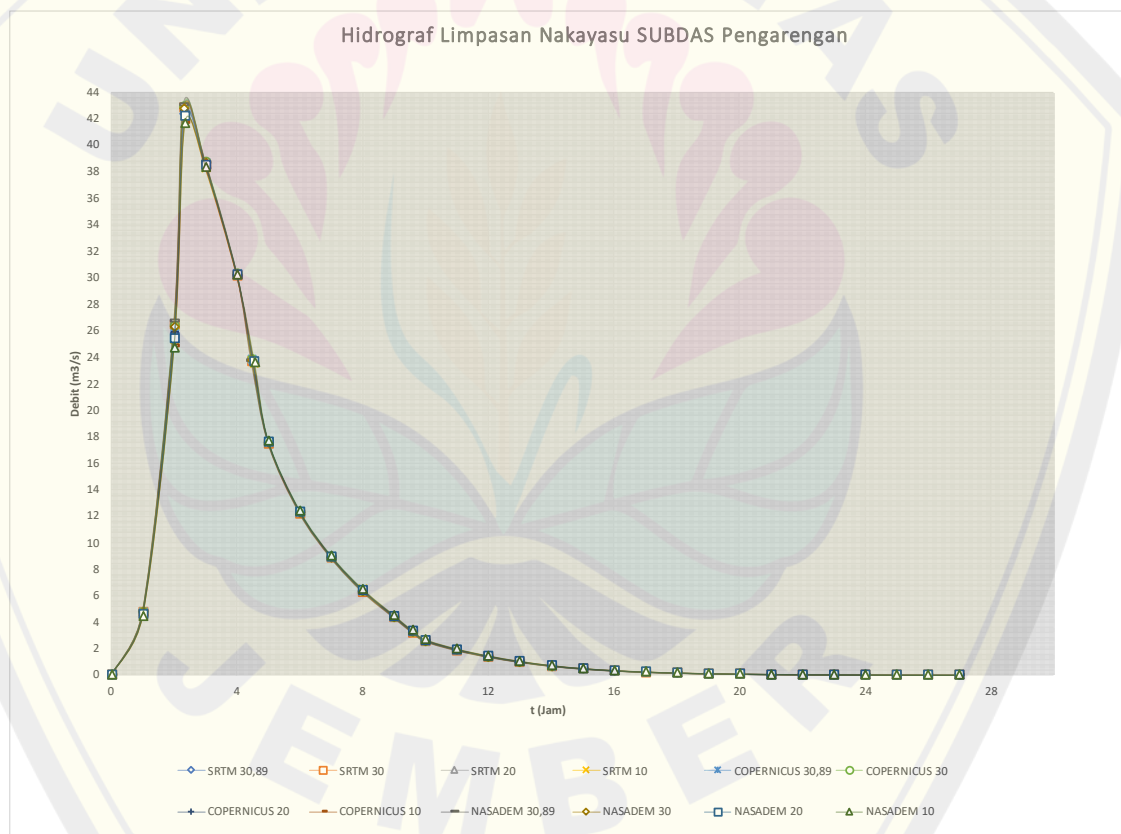
Tabel 4.21 Perhitungan Hidrograf Limpasan Nakayasu (SRTM Asli)

t (jam)	Q m ³ /s	Re1(mm) 7,7800	Re2(mm) 2,022	R3(mm) 1,4185	R4(mm) 1,1293	Q m ³ /s
0	0,0000	0				0
1	0,5988	4,6590	0,0000			4,6590
2	3,1607	24,5901	1,2110	0,0000		25,8011
2,321814	4,5216	35,1783	6,3915	0,8495	0,0000	42,4192
3	3,1073	24,1748	9,1436	4,4835	0,6763	38,4781
4	1,7872	13,9042	6,2835	6,4140	3,5693	30,1711
4,498515	1,3565	10,5535	3,6140	4,4078	5,1062	23,6814
5	1,1275	8,7717	2,7431	2,5351	3,5090	17,5590

t	Q	Re1(mm)	Re2(mm)	R3(mm)	R4(mm)	Q
(jam)	m ³ /s	7,7800	2,022	1,4185	1,1293	m ³ /s
6	0,7798	6,0665	2,2800	1,9242	2,0182	12,2889
7	0,5393	4,1956	1,5768	1,5993	1,5319	8,9036
8	0,3730	2,9017	1,0905	1,1061	1,2732	6,3716
9	0,2579	2,0068	0,7542	0,7650	0,8806	4,4066
9,5775	0,2085	1,6219	0,5216	0,5291	0,6090	3,2816
10	0,1784	1,3879	0,4216	0,3659	0,4212	2,5966
11	0,1234	0,9599	0,3608	0,2957	0,2913	1,9077
12	0,0853	0,6639	0,2495	0,2531	0,2354	1,4018
13	0,0590	0,4591	0,1726	0,1750	0,2015	1,0082
14	0,0408	0,3175	0,1193	0,1210	0,1393	0,6972
15	0,0282	0,2196	0,0825	0,0837	0,0964	0,4822
16	0,0195	0,1519	0,0571	0,0579	0,0666	0,3335
17	0,0135	0,1050	0,0395	0,0400	0,0461	0,2306
18	0,0093	0,0726	0,0273	0,0277	0,0319	0,1595
19	0,0065	0,0502	0,0189	0,0192	0,0220	0,1103
20	0,0045	0,0347	0,0131	0,0132	0,0152	0,0763
21	0,0031	0,0240	0,0090	0,0092	0,0105	0,0528
22	0,0021	0,0166	0,0062	0,0063	0,0073	0,0365
23	0,0015	0,0115	0,0043	0,0044	0,0050	0,0252
24	0,0010	0,0079	0,0030	0,0030	0,0035	0,0175
25	0,0007		0,0021	0,0021	0,0024	0,0066
26	0,0005			0,0007	0,0017	0,0024
27	0,0003				0,0004	0,0004



Gambar 4.12 Hidrograf Limpasan Nakayasu (SRTM Resolusi Asli)



Gambar 4.13 Hidrograf Limpasan Nakayasu seluruh skenario

Selanjutnya dilakukan analisis kontrol volume untuk memverifikasi bahwa hidrograf satuan (*unit hydrograph*) yang diturunkan telah memenuhi prinsip

kesetimbangan volume, yaitu volume limpasan langsung (*direct runoff*) yang dihasilkan harus setara dengan volume hujan efektif sebesar 1 mm yang terdistribusi merata di seluruh luas Sub-DAS. Sebagai contoh, hasil perhitungan kontrol volume SRTM resolusi asli akan disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.22 Kontrol Volume Hidrograf Limpasan

t (jam)	Q m ³ /s	Vol m ³	Q(koreksi) m ³ /s	Vol (koreksi) m ³
0	0,0000	8386,115	0,0000	872,309
1	4,6590	54828,02	0,4846	5703,11
2	25,8011	39517,67	2,6838	4110,56
2,321814	42,4192	98754,11	4,4124	10272,23
3	38,4781	123568,52	4,0024	12853,38
4	30,1711	48323,32	3,1383	5026,51
4,498515	23,6814	37226,54	2,4633	3872,24
5	17,5590	53726,19	1,8265	5588,50
6	12,2889	38146,64	1,2783	3967,95
7	8,9036	27495,40	0,9261	2860,02
8	6,3716	19400,70	0,6628	2018,03
9	4,4066	7991,86	0,4584	831,30
9,5775	3,2816	4470,35	0,3413	465,00
10	2,5966	8107,62	0,2701	843,34
11	1,9077	5957,08	0,1984	619,64
12	1,4018	4337,98	0,1458	451,23
13	1,0082	3069,71	0,1049	319,31
14	0,6972	2123,01	0,0725	220,83
15	0,4822	1468,28	0,0502	152,73
16	0,3335	1015,46	0,0347	105,63
17	0,2306	702,30	0,0240	73,05
18	0,1595	485,71	0,0166	50,52
19	0,1103	335,92	0,0115	34,94
20	0,0763	232,32	0,0079	24,17
21	0,0528	160,67	0,0055	16,71
22	0,0365	111,12	0,0038	11,56
23	0,0252	76,85	0,0026	7,99
24	0,0175	43,25	0,0018	4,50
25	0,0066	16,09	0,0007	1,67

t	Q	Vol	Q(koreksi)	Vol (koreksi)
(jam)	m ³ /s	m ³	m ³ /s	m ³
26	0,0024	4,94	0,0002	0,51
27	0,0004	0,00	0,0000	0,00
ΣQ	157,7841		16,412	
Vol.	568022,8	449632,75	59084,72673	46770,00
T _{LL} (mm)	12,1450	9,613700	1,263303971	1,000000
			A (Luas)	46,77 Km ²

Untuk hasil perhitungan kontrol volume limpasan seluruh skenario DEM akan disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.23 Hasil Kontrol Volume Seluruh Skenario DEM

Citra Satelit	Resolusi	TLL	ΣPe	A(WMSI)	A (HSS)
SRTM	30,89 m	12,15	12,35	46,77	46,77
	30 m	12,17	12,35	46,75	46,75
	20 m	12,13	12,35	46,86	46,86
	10 m	12,12	12,35	46,67	46,67
COPERNIC US	30,89 m	12,16	12,35	46,85	46,85
	30 m	12,16	12,35	46,93	46,93
	20 m	12,11	12,35	46,90	46,90
	10 m	12,18	12,35	46,85	46,85
NASADEM	30,89 m	12,18	12,35	47,01	47,01
	30 m	12,16	12,35	47,04	47,04
	20 m	12,13	12,35	46,96	46,96
	10 m	12,11	12,35	46,64	46,64

Secara keseluruhan, nilai TLL pada seluruh skenario DEM berada pada rentang yang relatif sempit, yaitu antara 12,11 mm hingga 12,18 mm, dan mendekati nilai ΣPe sebesar 12,35 mm yang konstan pada seluruh skenario. Selisih antara TLL dan ΣPe pada masing-masing skenario menunjukkan tingkat kehilangan (*losses*) hujan yang relatif seragam, yang mengindikasikan bahwa perbedaan resolusi dan sumber citra DEM tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil perhitungan hidrograf satuan maupun keseimbangan volume limpasan.

Konsistensi antara A(Model) dan A(Limpasan) pada seluruh skenario DEM, baik SRTM, COPERNICUS, maupun NASADEM, pada berbagai resolusi menunjukkan bahwa hasil kontrol volume pada seluruh skenario adalah valid,

sehingga seluruh skenario DEM tersebut dapat digunakan secara andal dalam analisis hidrograf satuan sintetik dan pemodelan hidrologi Sub-DAS pada tahapan penelitian selanjutnya.

4.3.3. Validasi Kinerja Model

Untuk mengevaluasi keandalan dan akurasi model spasial dalam merancang debit banjir, nilai Debit Puncak (Q_p) hasil simulasi dari 12 skenario DEM disandingkan dengan nilai observasi (Q_p kejadian) yang dihitung dari Tinggi Muka Air (TMA) tercatat oleh UPT Pengairan sebesar 41,932 m³/dtk. Pengujian tingkat penyimpangan model dilakukan secara statistik menggunakan persamaan *Percentage Error in Peak Flow* (PEPF). Sebagai contoh perhitungan pada SRTM resolusi asli akan disajikan sebagai berikut.

$$PEPF = \frac{Q_s - Q_o}{Q_o} \times 100\%$$

$$PEPF = \frac{42,4192 - 41,932}{41,932} \times 100\%$$

$$PEPF = 1,16\%, \text{ didapat nilai } < 15\% \text{ maka diklasifikasikan sangat baik.}$$

Untuk hasil perhitungan uji kesesuaian menggunakan *Percentage Error in Peak Flow* (PEPF) terhadap seluruh skenario DEM akan disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.24 Hasil Uji Kesesuaian Debit Puncak Menggunakan PEPF

Citra Satelit	Resolusi	Qp (Model)	Qp (Observasi)	PEPF	Persentase	Klasifikasi
SRTM	30,89 m	42,419	41,932	1,1628	1,16%	Sangat Baik
	30 m	42,865	41,932	2,2262	2,23%	Sangat Baik
	20 m	42,220	41,932	0,6884	0,69%	Sangat Baik
	10 m	41,709	41,932	-0,5317	0,53%	Sangat Baik
COPERNICUS	30,89 m	42,893	41,932	2,2931	2,29%	Sangat Baik
	30 m	42,957	41,932	2,4456	2,45%	Sangat Baik
	20 m	42,601	41,932	1,5967	1,60%	Sangat Baik
	10 m	41,740	41,932	-0,4577	0,46%	Sangat Baik
NASADEM	30,89 m	43,129	41,932	2,8556	2,86%	Sangat Baik
	30 m	42,832	41,932	2,1480	2,15%	Sangat Baik
	20 m	42,230	41,932	0,7124	0,71%	Sangat Baik
	10 m	41,724	41,932	-0,4954	0,50%	Sangat Baik

Berdasarkan hasil rekapitulasi pada Tabel 4.21, seluruh variasi resolusi DEM menghasilkan rentang nilai PEPF antara 0,46% hingga 2,86%. Nilai negatif yang mayoritas terjadi pada resolusi hasil resampling (20m dan 10m) mengindikasikan bahwa model bersifat *underestimate* atau menghasilkan debit yang lebih kecil dari kejadian aktual. Sebaliknya, nilai positif mengindikasikan model bersifat *overestimate*. Merujuk pada pedoman evaluasi kinerja model hidrologi oleh (Yu & Zhang, 2023), seluruh nilai simpangan PEPF dari ke-12 skenario tersebut berada jauh di bawah ambang batas $\pm 15\%$. Hal ini mengonfirmasi bahwa secara keseluruhan, pemodelan HSS Nakayasu di Sub-DAS Pengarengan masuk ke dalam klasifikasi kinerja Sangat Baik (*Very Good*).

Validasi hidrologi ini juga secara empiris membuktikan adanya korelasi langsung antara resolusi spasial dengan parameter waktu hidrograf. Berdasarkan tabel karakteristik waktu, semakin kecil ukuran piksel akibat *resampling*, nilai Waktu Puncak (T_p) mengalami perlambatan. Sebagai contoh pada citra SRTM, nilai T_p pada resolusi 30m adalah 2,3040 jam, namun melambat menjadi 2,3463 jam pada resolusi 10m. Perlambatan respons limpasan ini berdampak langsung pada penyusutan nilai debit puncak, di mana kesalahan model (PEPF) justru semakin membesar (menjauhi 0%) ketika resolusi piksel dipaksa menjadi lebih tinggi. Secara spesifik, evaluasi ini menemukan bahwa citra NASADEM dengan resolusi asli menunjukkan tingkat presisi yang paling tinggi. Skenario tersebut menghasilkan debit puncak sebesar 40,077 m³/dtk, dengan Waktu Puncak (T_p) 2,3115 jam, dan menghasilkan deviasi kesalahan mutlak yang sangat minim, yakni hanya sebesar 1,51% terhadap data observasi. Temuan ini memberikan justifikasi teknis bahwa penggunaan citra satelit pada resolusi 30 meter mampu menjaga integritas topografi dan kemiringan lereng secara optimal. Oleh karena itu, NASADEM resolusi asli ditetapkan sebagai model spasial yang paling representatif, andal, dan direkomendasikan untuk analisis mitigasi banjir di Sub-DAS Pengarengan.