

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

2.1.1 Definisi DAS

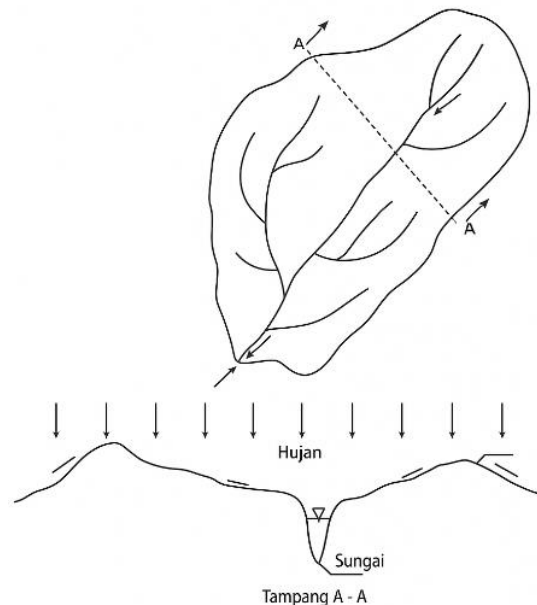
Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah daerah yang dibatasi oleh punggung-punggung gunung/pegunungan dimana air hujan yang jatuh di daerah tersebut akan mengalir menuju sungai utama pada suatu titik/stasiun yang ditinjau. Luas DAS diperkirakan dengan mengukur daerah itu pada peta topografi. Luas DAS sangat berpengaruh terhadap debit sungai. Pada umumnya semakin besar DAS semakin besar jumlah limpasan permukaan sehingga semakin besar pula aliran permukaan atau debit sungai (Triatmodjo, 2008). Selain sebagai sistem hidrologi, DAS juga berfungsi sebagai satu kesatuan ekosistem yang mendukung kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Pemanfaatan DAS yang tidak terkendali, seperti deforestasi dan alih fungsi lahan, dapat menyebabkan degradasi lingkungan, peningkatan sedimentasi, serta perubahan pola aliran air yang berujung pada banjir atau kekeringan (Suripin, 2004). Oleh karena itu, pengelolaan DAS yang berkelanjutan menjadi hal yang sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem, menjamin ketersediaan air, serta mengurangi dampak bencana hidrometeorologi.

Dalam aspek perencanaan dan pengelolaan sumber daya air, DAS menjadi unit perencanaan utama dalam berbagai kebijakan lingkungan dan pembangunan (Asdak, 2010). Pendekatan berbasis DAS digunakan dalam perencanaan tata ruang, konservasi air, serta pembangunan infrastruktur air, seperti bendungan dan irigasi. Studi hidrologi pada DAS juga diperlukan untuk mengembangkan strategi mitigasi bencana, seperti banjir dan longsor, guna mengurangi dampak negatif terhadap masyarakat dan lingkungan sekitar. Dengan demikian, pemahaman terhadap konsep dan dinamika DAS menjadi hal yang fundamental dalam upaya konservasi dan pengelolaan sumber daya air (Laurentia, 2023).

2.1.2 Komponen dan Karakteristik DAS

Bentuk DAS dibatasi garis kontur penghubung titik-titik tertinggi yang mengelilingi wilayah tersebut. Limpasan berasal dari titik tertinggi dan bergerak

menuju titik-titik yang lebih rendah dalam arah gerak lurus dengan garis-garis kontur. Air hujan yang jatuh di dalam DAS akan mengalir menuju sungai utama yang ditinjau (Triatmodjo, 2008). Sungai utama menjadi jalur utama yang mengalirkan air dari seluruh wilayah DAS, sementara anak sungai mengumpulkan aliran air dari sub DAS yang lebih kecil. Daerah hulu biasanya memiliki topografi curam dengan aliran air deras, sedangkan daerah tengah merupakan wilayah transisi dengan topografi sedang, dan daerah hilir memiliki kemiringan landai, sering dimanfaatkan untuk aktivitas manusia seperti pertanian, pemukiman, atau industri (Wardani, 2010). Adapun bentuk dari suatu DAS dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Triatmodjo, 2008).



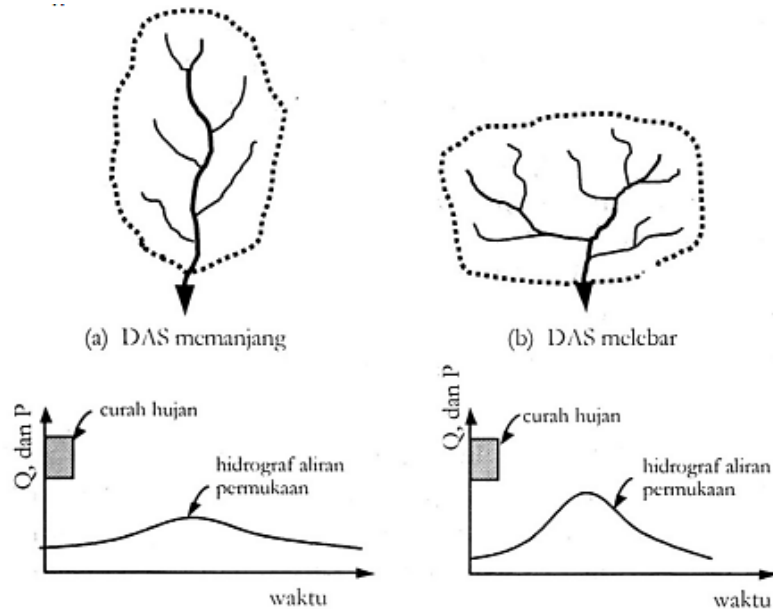
Gambar 2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Karakteristik DAS biasanya diperhitungkan dengan analisis perhitungan curah hujan wilayah dengan hasil akhir debit banjir rancangan (Tallar, 2023). Karakteristik DAS meliputi berbagai aspek yang mempengaruhi proses hidrologi, diantaranya luas dan bentuk DAS, topografi, dan tata guna lahan (Laurentia, 2023).

1. Luas dan Bentuk DAS

Laju dan volume aliran permukaan bertambah besar seiring dengan bertambah luasnya DAS. Namun apabila aliran tidak dinyatakan sebagai jumlah total DAS melainkan sebagai laju dan volume persatuan luas, besarnya aliran permukaan akan berkurang dengan bertambahnya luas

DAS. Ini berkaitan dengan waktu kritis aliran dan penyebaran atau intensitas hujan. Bentuk DAS berpengaruh terhadap pola aliran pada sungai khususnya bentuk hidrograf aliran (Laurentia, 2023). Adapun pengaruh bentuk DAS pada aliran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Laurentia, 2023).



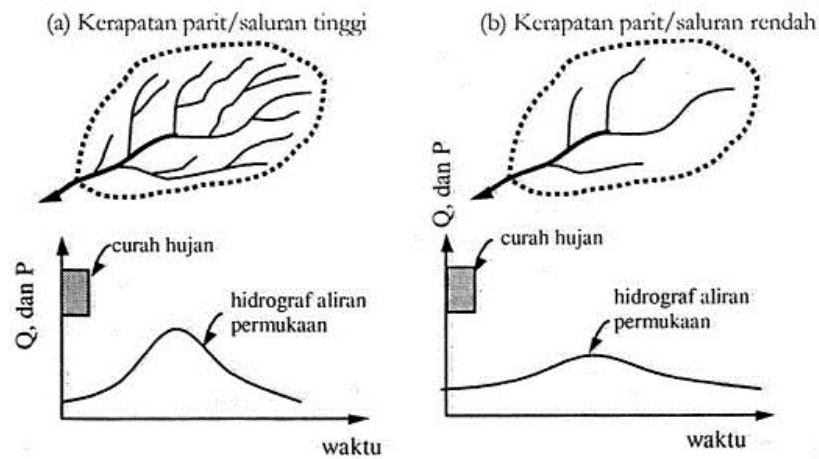
Gambar 2.2 Pengaruh bentuk DAS pada aliran permukaan

2. Topografi

Topografi lahan yang meliputi kemiringan lahan, kerapatan saluran, dan bentuk cekungan lainnya berpengaruh terhadap laju dan volume aliran permukaan. Semakin curam lahan dan rapat saluran pada suatu DAS menghasilkan laju dan volume aliran yang lebih besar (Laurentia, 2023). Pengaruh kerapatan saluran terhadap hidrograf aliran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.3 (Laurentia, 2023). Sementara itu klasifikasi kemiringan lereng disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi Kemiringan Lereng

Kelas	Kemiringan Lereng (%)	Klasifikasi
1	0 - 8	Datar
2	8 - 15	Landai
3	15 - 25	Agak Curam
4	25 - 45	Curam
5	>45	Sangat Curam



Gambar 2.3 Pengaruh kerapatan saluran pada hidrograf aliran permukaan

3. Tata Guna Lahan

Pengaruh tata guna lahan terhadap aliran permukaan dinyatakan dalam koefisien limpasan. Koefisien limpasan merupakan indikator untuk menentukan kondisi fisik suatu DAS (Laurentia, 2023). Koefisien limpasan bernilai antara 0 hingga 1, di mana nilai mendekati 0 menunjukkan bahwa sebagian besar air hujan meresap ke dalam tanah atau mengalami infiltrasi, sementara nilai mendekati 1 menunjukkan bahwa sebagian besar air hujan langsung menjadi aliran permukaan.

- $C = 0$ (semua air hujan terintersepsi dan terinfiltrasi ke dalam tanah)
- $C = 1$ (semua air hujan mengalir sebagai aliran permukaan)
- C mendekati 1 (kondisi DAS semakin kritis)

2.1.3 Fungsi DAS dalam Siklus Hidrologi

Daerah Aliran Sungai (DAS) berperan dalam siklus hidrologi untuk proses utama seperti intersepsi, infiltrasi, evapotranspirasi, aliran permukaan (*runoff*), aliran bawah permukaan, dan penyimpanan air di tanah maupun di cekungan alami (Asdak, 2010). Selain itu, DAS juga berfungsi sebagai pengatur aliran air, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Dalam jangka pendek, DAS dapat mengurangi risiko banjir dengan menyimpan air sementara di tanah, rawa, dan danau. Dalam jangka panjang, DAS berfungsi menjaga ketersediaan air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi yang menjadi sumber utama air bagi ekosistem dan kebutuhan manusia di musim kemarau (Chow dkk, 1988).

2.2 Sungai

2.2.1 Definisi Sungai

Sungai atau disebut *streamflow* adalah massa air yang secara alami mengalir melalui suatu lembah. Air hujan yang jatuh di permukaan tanah sebagian besar akan menjadi aliran permukaan dan sebagian lagi meresap ke dalam tanah menjadi air tanah. Aliran permukaan berkumpul dan mengalir ke daerah-daerah yang rendah dan kemudian menuju parit, selokan, anak-anak sungai dan sungai (Laurentia, 2023). Sungai rentan terhadap berbagai permasalahan lingkungan, seperti pencemaran, sedimentasi, dan perubahan alur akibat aktivitas manusia. Penataan kawasan sepanjang alur sungai menjadi krusial karena menyangkut aspek sumber daya air yang kompleks (Maryono, 2014).

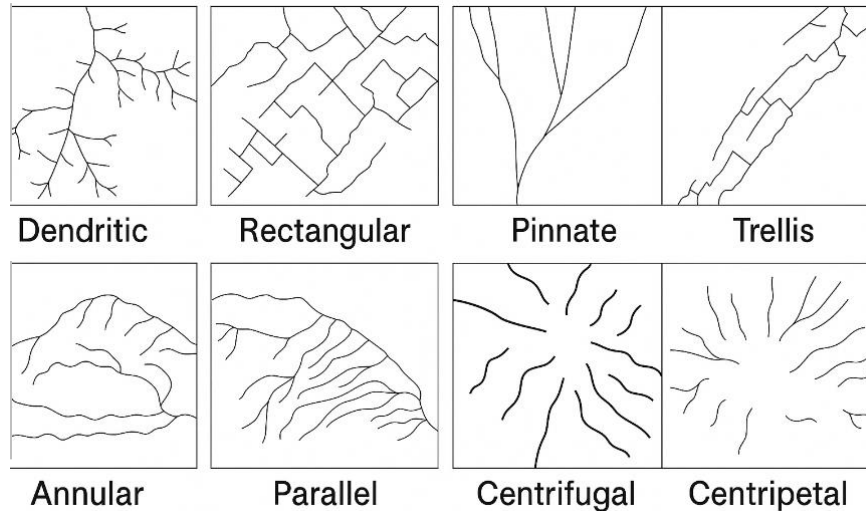
2.2.2 Fungsi dan Manfaat Sungai

Sungai memiliki peran multifungsi yang esensial bagi kehidupan manusia dan ekosistem sekitarnya. Sungai juga berperan dalam siklus hidrologi dengan mengalirkan air hujan dari DAS ke laut atau ke danau, serta membantu mengendalikan banjir melalui penyaluran air secara alami (Suprayogi dkk, 2014). Dari perspektif sosial dan ekonomi, sungai menyediakan sumber air untuk kebutuhan domestik, pertanian, dan industri. Sungai juga dimanfaatkan sebagai sarana transportasi, pembangkit tenaga listrik, serta objek wisata yang mendukung perekonomian lokal. Namun, kurang terawatnya sungai dan infrastrukturnya dapat menurunkan fungsi dan kondisi sungai tersebut. Penilaian kerusakan akibat kurang terawatnya sungai dan infrastruktur ini penting untuk memastikan pemanfaatan sungai yang optimal bagi kehidupan manusia (Wahyudi dkk, 2017).

2.2.3 Pola Aliran Sungai

Pola aliran sungai merupakan gerak arus sungai yang menggambarkan bagaimana dan kemana air mengalir yang akhirnya bermuara ke laut (Salsabila & Nugraheni, 2020). Pola aliran sungai cenderung dipengaruhi oleh adanya bentuk lahan, contohnya di daerah dome, basin, plato, pegunungan lipatan, blok dan lain sebagainya (Laurentia, 2023). Terdapat beberapa jenis pola aliran pada sungai, seperti pola dendritik, radial sentrifugal, rectangular, trellis, sentripetal, paralel,

annular, dan pinnate. Pola aliran sungai seperti pada Gambar 2.4 (Salsabila & Nugraheni, 2020) terbentuk karena faktor morfologi, struktur geografi, batuan penyusun, dan erosi.



Gambar 2.4 Pola Aliran Sungai

2.2.4 Karakteristik Sungai di Sub DAS Citanduy Hulu

Karakteristik sungai di Sub DAS Citanduy Hulu mencerminkan dinamika alam yang kompleks. Sungai Citanduy Hulu terletak di Kabupaten Ciamis dan Kabupaten Tasikmalaya yang mengalir dari daerah hulu menuju hilir, tepatnya Segara Anakan di Cilacap (Kurnia Hidayat dkk, 2021). Topografi wilayah ini bervariasi, dengan kemiringan lereng yang mempengaruhi pola aliran dan karakteristik hidrologis sungai-sungainya. Kondisi Sub DAS Citanduy Hulu saat ini tergolong kritis, dengan tutupan vegetasi kurang dari 20% (IFISH Project, 2024).

Hal ini berdampak pada meningkatnya limpasan permukaan dan risiko erosi yang pada gilirannya mempengaruhi kualitas air dan ekosistem sungai. Selain itu, perubahan penggunaan lahan di wilayah ini turut mempengaruhi karakteristik hidrologis sungai, seperti debit aliran dan frekuensi banjir. Diperlukan upaya konservasi dan pengelolaan DAS yang berkelanjutan untuk memulihkan fungsi ekologis dan hidrologis sungai-sungai di Sub DAS Citanduy Hulu. Dengan dinamika hidrologi yang cukup tinggi, pemantauan dan pengelolaan sungai di Sub DAS Citanduy Hulu menjadi penting untuk menjaga keseimbangan antara pemanfaatan sumber daya air dan mitigasi risiko banjir.

2.3 Banjir

2.3.1 Definisi Banjir

Banjir adalah suatu keadaan aliran sungai dimana permukaan airnya lebih tinggi dari pada suatu ketinggian tertentu (Ihsan, 2015). Banjir terjadi ketika keadaan suatu daerah tergenang oleh air dalam jumlah yang besar, melebihi kapasitas pembuangan air di wilayah tersebut (Fitriani, 2021). Fenomena ini biasanya terjadi ketika intensitas hujan yang tinggi melebihi kemampuan penyerapan tanah atau kapasitas aliran sungai.

Banjir dapat terjadi karena peluapan air yang berlebihan di suatu wilayah akibat hujan besar, pecahnya bendungan sungai, meningkatnya air di permukaan laut, es mencair . Banjir menjadi sebuah peristiwa atau bencana bagi manusia ketika terjadi pada kawasan yang merupakan tempat aktivitas manusia. Terdapat dua klasifikasi banjir, kedua peristiwa banjir terjadi karena limpasan air banjir dari sungai yang disebabkan oleh debit banjir yang lebih besar dari kapasitas pengaliran sungai yang ada (Safitri dkk, 2022). Oleh karena itu, banjir merupakan ancaman alam yang paling umum dan menimbulkan kerusakan paling besar, baik terhadap manusia maupun terhadap ekonomi (Balahanti & Mononimbar, 2023).

2.3.2 Faktor Penyebab Banjir

Banjir dapat disebabkan oleh berbagai faktor, baik alami maupun akibat aktivitas manusia. Faktor alami meliputi curah hujan yang tinggi, kondisi topografi yang rendah, dan kapasitas sungai yang terbatas dalam menampung aliran air. Curah hujan yang melebihi kapasitas resapan tanah dapat menyebabkan limpasan permukaan yang berlebihan, sementara daerah dengan topografi rendah atau cekungan cenderung menjadi tempat penampungan air hujan, meningkatkan risiko banjir (Nugroho & Handayani, 2021).

Faktor-faktor yang disebabkan oleh aktivitas manusia juga berkontribusi signifikan terhadap terjadinya banjir. Penebangan hutan secara liar mengurangi kemampuan tanah dalam menyerap air, meningkatkan limpasan permukaan dan risiko erosi. Selain itu, konversi lahan untuk pembangunan infrastruktur atau pertanian mengurangi area resapan air, memperburuk kondisi drainase alami. Pembangunan yang tidak berwawasan lingkungan, seperti pembangunan di daerah

resapan air atau bantaran sungai, dapat mengganggu aliran sungai dan meningkatkan risiko banjir (Nugro, 2014).

2.3.3 Dampak Banjir di Wilayah Sub DAS Citanduy Hulu

Banjir di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) Citanduy Hulu memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan dan kehidupan masyarakat setempat. Selama musim hujan, curah hujan yang tinggi menyebabkan aliran sungai meluap, menggenangi area pertanian, pemukiman, dan infrastruktur lainnya. Genangan air ini tidak hanya merusak tanaman pertanian, mengakibatkan kerugian ekonomi bagi petani, tetapi juga mengganggu aktivitas sehari-hari masyarakat, seperti transportasi dan akses ke fasilitas umum (Palawaae dkk, 2024). Oleh karena itu, upaya mitigasi banjir yang efektif sangat penting untuk mengurangi dampak negatif tersebut dan meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap bencana banjir (Priambudi & Utami, 2020).

2.4 Analisa Hidrologi

2.4.1 Definisi Analisa Hidrologi

Hidrologi merupakan cabang ilmu bumi atau *Geoscience* atau *Science de la Terre* yang secara khusus mempelajari tentang siklus hidrologi atau siklus air di permukaan bumi dengan berbagai macam konsekuensinya (Indarto, 2016). Hidrologi berkaitan dengan air di muka bumi baik mengenai terjadi, peredarannya dan penyebarannya (Tarru dkk, 2024). Analisa hidrologi merupakan suatu proses ilmiah untuk memahami, mengukur, dan mengevaluasi komponen-komponen siklus hidrologi, termasuk curah hujan, infiltrasi, aliran permukaan (*runoff*), evapotranspirasi, serta debit sungai, dalam rangka mendukung perencanaan, pengelolaan, dan pengendalian sumber daya air (Asdak, 2010). Prosedur analisis hidrologi untuk penetapan banjir rancangan tergantung dari keluaran analisis yang diinginkan (*peak discharge, flood hydrograph* atau *volume of flood hydrograf*) dan ketersediaan data yang dapat digunakan dalam proses hitungan (Laurentia, 2023).

2.4.2 Hujan Kawasan

Hujan kawasan adalah curah hujan rata-rata yang terjadi pada suatu wilayah tertentu yang dihitung dari data curah hujan di beberapa titik pengamatan (stasiun

hujan) dalam kawasan tersebut (Asdak, 2010). Hujan ini tidak hanya terbatas pada satu titik atau lokasi kecil, tetapi mencakup area yang lebih luas, seperti satu daerah aliran sungai (DAS), kota, atau wilayah administratif lainnya. Apabila pada suatu daerah terdapat lebih dari satu stasiun pengamatan yang ditempatkan secara terpisah, hujan yang tercatat di masing-masing stasiun tidak sama.

Tabel 2.2 Metode Berdasarkan Luas DAS

Luas DAS	Hujan Kawasan
DAS besar (>5000 km ²)	Metode Isohiet
DAS sedang (500 s.d 5000 km ²)	Metode Poligon Thiessen
DAS kecil (<500 km ²)	Metode Rerata Aritmatik

Hujan kawasan dihitung menggunakan metode statistik berdasarkan data curah hujan dari beberapa titik pengukuran dalam wilayah tersebut, terdapat tiga metode dalam menghitungnya yaitu Metode Rerata Aritmatik (aljabar), Metode Poligon Thiessen, dan Metode Isohiet (Triatmodjo, 2008). Ketiga metode yang digunakan mempunyai kelemahan dan kekurangan, pemilihan metode yang tepat dapat ditentukan dengan mempertimbangkan luas DAS tersebut. Penggunaan metode hujan kawasan juga dipengaruhi oleh luas dari DAS itu sendiri seperti dijelaskan dalam Tabel 2.2 (Suripin., 2004).

1. Metode Rerata Aritmetik (Aljabar)

Metode Rerata Aritmatik (Aljabar) adalah metode yang biasa digunakan pada daerah yang datar, dengan jumlah pos curah hujan yang cukup banyak dengan anggapan bahwa curah hujan pada daerah tersebut cenderung bersifat seragam seperti pada Gambar 2.5 (Triatmodjo, 2008). Curah hujan metode ini dihitung dengan persamaan berikut (Soemarto, 1986):

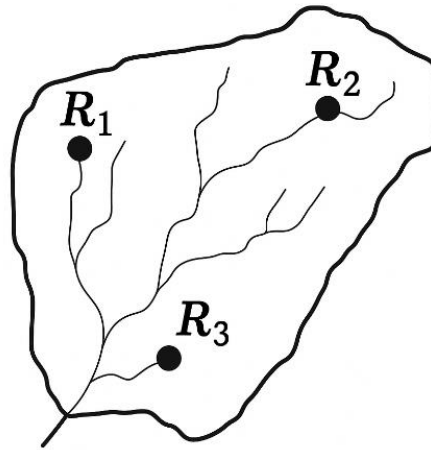
$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{n} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$\bar{R}$ = Curah hujan daerah rata-rata (mm)

$R_1 \dots R_n$ = Curah hujan di setiap titik pengamatan

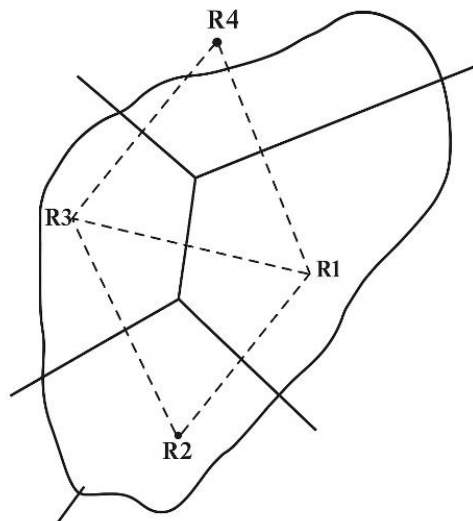
n = Jumlah titik pengamatan



Gambar 2.5 Metode Rerata Aritmetik (Aljabar)

2. Metode Poligon Thiessen

Metode Poligon Thiessen menganggap setiap stasiun hujan dalam suatu daerah yang mempunyai luas pengaruh tertentu dan luas tersebut merupakan faktor koreksi bagi hujan stasiun menjadi hujan daerah yang bersangkutan. Curah hujan daerah Metode Poligon Thiessen seperti pada Gambar 2.6 (Triatmodjo, 2008) dihitung dengan persamaan (Soemarto, 1986):



Gambar 2.6 Metode Poligon Thiessen

$$\bar{R} = \frac{A_1 R_1 + A_2 R_2 + A_3 R_3 + \dots + A_n R_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i R_i}{A_i} \quad (2.2)$$

Keterangan :

$\bar{R}$ = Curah hujan daerah rata-rata (mm)

$R_1 \dots R_n$ = Curah hujan di setiap titik pengamatan (mm)

$A_1 \dots A_n$ = Luas daerah pengaruh tiap-tiap stasiun (km^2)

3. Metode Isohyet

Metode Isohyet adalah metode yang menggunakan garis lengkung untuk menghubungkan tempat-tempat dengan kedudukan dan mempunyai curah hujan yang sama. Metode ini diperoleh dengan menggambar kontur tinggi hujan yang sama, selanjutnya luas area antara garis isohyet yang berdekatan diukur dan dihitung nilai rata-ratanya. Curah hujan daerah dengan metode isohyet seperti pada Gambar 2.7 (Suripin, 2004) dihitung dengan persamaan berikut (Soemarto, 1986):

$$\bar{R} = \frac{A_1 \frac{R_0 + R_1}{2} + A_2 \frac{R_1 + R_2}{2} + A_3 \frac{R_2 + R_3}{2} + \dots + A_n \frac{R_{n-1} + R_n}{2}}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (2.3)$$

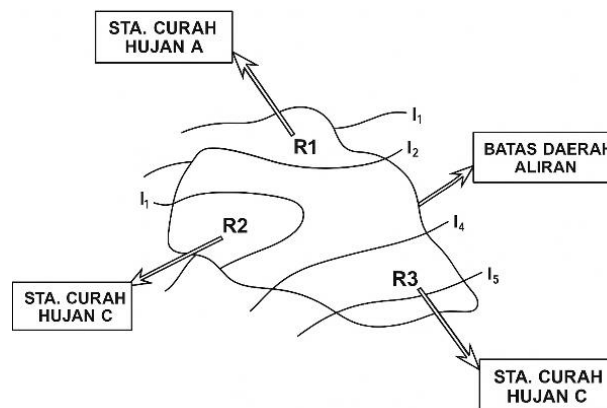
$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \frac{R_{i-1} + R_i}{2}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\bar{R}$ = Curah hujan daerah rata-rata (mm)

$R_1 \dots R_n$ = Curah hujan di setiap titik pengamatan (mm)

$A_1 \dots A_n$ = Luas daerah pengaruh tiap-tiap stasiun (km^2)



Gambar 2.7 Metode Isohyet

2.4.3 Analisa Curah Hujan Hilang

Analisis curah hujan hilang merupakan suatu proses penting dalam studi hidrologi untuk memastikan kelengkapan dan keakuratan data curah hujan yang digunakan dalam pemodelan hidrologis. Ketika data curah hujan dari suatu stasiun pengamatan tidak tercatat karena berbagai faktor seperti kerusakan alat, kesalahan pencatatan, atau gangguan teknis, maka dilakukan estimasi terhadap nilai yang

hilang. Analisis curah hujan hilang dengan menggunakan metode ISD (*Inverse Square Distance*) atau metode jarak kuadrat terbalik adalah salah satu pendekatan spasial yang digunakan untuk mengestimasi data curah hujan yang hilang di suatu stasiun berdasarkan data dari stasiun-stasiun terdekat. Prinsip dasar metode ini adalah bahwa kontribusi atau pengaruh curah hujan dari stasiun lain terhadap lokasi yang datanya hilang akan semakin kecil seiring bertambahnya jarak. Oleh karena itu, stasiun yang lebih dekat memiliki bobot yang lebih besar dibandingkan stasiun yang lebih jauh.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{L_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

P_x = Hujan yang hilang di stasiun x

P_i = Data hujan di stasiun sekitarnya pada periode yang sama

L_i = Jarak antara stasiun hujan

2.5 Analisa Debit Banjir Rancangan

2.5.1 Definisi Debit Banjir Rancangan

Banjir rancangan (*design flood*) adalah salah satu besaran rancangan untuk suatu rencana pembuatan bangunan air atau bangunan yang keberadaannya (fungsi operasi dan stabilitas) dipengaruhi oleh karakteristik aliran banjir. Banjir rancangan dapat diperoleh melalui kegiatan analisis hidrologi yang secara umum hasilnya dapat berupa debit banjir maksimum, volume banjir, ataupun atau hidrograf banjir. Dalam hal ini, banjir rancangan merupakan debit banjir yang ditetapkan sebagai dasar penentuan kapasitas dan dimensi bangunan-bangunan air (termasuk bangunan di sungai), sedemikian hingga kerusakan yang dapat ditimbulkan baik langsung maupun tidak langsung oleh banjir tidak boleh terjadi selama besaran banjir tidak terlampaui (Sri Harto, 1993).

Analisis debit banjir antara lain dipakai untuk perencanaan hidroteknik, untuk memprediksi kemungkinan banjir, untuk penggunaan kebutuhan air baku dan jaringan irigasi, untuk penggunaan PLTA, dan sebagainya (Tallar, 2023). Debit banjir rancangan untuk suatu periode ulang tertentu juga digunakan sebagai dasar

dalam perencanaan dan desain infrastruktur pengendalian banjir, seperti bendungan, saluran irigasi, tanggul, jembatan, dan sistem drainase. Debit banjir rancangan dihitung berdasarkan analisis data historis curah hujan dan debit sungai di suatu DAS, serta dengan mempertimbangkan karakteristik fisik DAS seperti luas, topografi, jenis tanah, dan penggunaan lahan (Asdak, 2010). Nilai kala ulang banjir rancangan untuk bangunan di wilayah sungai dapat dilihat pada Tabel 2.3 (Laurentia, 2023)

Tabel 2.3 Kala Ulang Banjir Rancangan untuk Bangunan di Sungai

Jenis Bangunan	Kala Ulang Banjir Rancangan (tahun)
Bendung sungai besar sekali	100
Bendung sungai sedang	50
Bendung sungai kecil	25
Tanggul sungai besar/daerah penting	25
Tanggul sungai kecil/daerah kurang penting	10
Jembatan jalan penting	25
Jembatan jalan tidak penting	10

2.5.2 Metode Penentuan Debit Banjir Rancangan

Dalam praktik analisis hidrologi terdapat beberapa cara yang dapat ditempuh untuk menetapkan debit banjir rancangan. Masing-masing cara akan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut (Sri Harto, 1993):

1. Ketersediaan data.
2. Tingkat ketelitian yang dikehendaki.
3. Kesesuaian cara dengan DAS yang ditinjau.

Keluaran analisis hidrologi untuk penentuan banjir rancangan tergantung dari kasus yang ditinjau. Pada perancangan bendung irigasi atau sistem drainase areal pemukiman yang tidak terlalu luas, hasil analisis yang diinginkan berupa debit banjir maksimum (*peak discharge*). Pada perancangan tanggul sungai atau bangunan pelimpah waduk, hasil analisis tidak cukup debit maksimum dari banjir rancangan, akan tetapi diperlukan pula hidrograf banjir rancangan. Untuk perancangan kantong banjir (*detention pond*), selain hidrograf banjir juga dikehendaki nilai volume hidrograf banjir rancangan (Laurentia, 2023).

1. Metode Empiris

Metode empiris adalah salah satu pendekatan dalam penentuan debit banjir rancangan yang didasarkan pada persamaan matematis sederhana yang dikembangkan dari hasil pengamatan dan pengalaman di lapangan. Metode ini umumnya digunakan untuk DAS kecil dan wilayah dengan data yang terbatas karena mudah diaplikasikan tanpa memerlukan perangkat lunak yang kompleks (Asdak, 2010). Salah satu metode empiris yang paling umum adalah Metode Rasional yang menghitung debit banjir berdasarkan persamaan:

$$Q = C \times I \times A \quad (2.6)$$

Keterangan:

Q = Debit puncak (m³/s)

C = Koefisien limpasan

I = Intensitas hujan maksimum (mm/jam)

A = Luas DAS (km²)

Koefisien limpasan (C) dalam metode ini memperhitungkan faktor penggunaan lahan dan sifat permukaan DAS, seperti jenis tanah dan tingkat urbanisasi (Asdak, 2010). Adapun koefisien limpasan dan persentase kedap air pada tata guna lahan yang akan digunakan dalam menganalisis debit banjir rancangan dapat dilihat pada Tabel 2.4 (Badan Standarisasi Nasional 2016).

Tabel 2.4 Koefisien Limpasan dan Persentase Kedap Air Tata Guna Lahan

Tata guna lahan	Karakteristik	C	Im (%)	Keterangan
Pusat pembelanjaan dan perkantoran		0,9	100	
Industri	Bangunan penuh	0,8	80	Berkurang untuk bangunan tidak penuh
Pemukiman (kepadatan menengah-tinggi)	20 rmh/ha	0,48	30	Bandingkan daerah kedap air dengan daerah lain
	30 rmh/ha	0,55	40	
	40 rmh/ha	0,65	60	
	60 rmh/ha	0,75	75	

Tata guna lahan	Karakteristik	C	Im (%)	Keterangan
Pemukiman (kepadatan rendah)	10 rm/ha	0,4	<20	CN = 85 (Curve Number)
Taman	Daerah datar	0,3	0	
Pedesaan	Tanah berpasir		0	C = 0,20 ; CN = 60
	Tanah berat (<i>heavy soil</i>)		0	C = 0,35 ; CN = 75
	Daerah irigasi		0	C = 0,50 ; CN = 85

2. Metode Statistik

Metode statistik dalam penentuan debit banjir rancangan bertujuan untuk menganalisis data historis debit maksimum tahunan atau curah hujan ekstrem di suatu DAS dengan pendekatan probabilitas. Dalam metode ini, data debit atau curah hujan digunakan untuk membuat distribusi frekuensi yang kemudian digunakan untuk memprediksi debit banjir dengan periode ulang tertentu. Distribusi probabilitas yang sering digunakan meliputi Distribusi Gumbel, Log Pearson Type III, dan Distribusi Normal. Distribusi Gumbel, misalnya, digunakan untuk memprediksi kejadian ekstrem seperti debit banjir dengan memperhitungkan nilai rata-rata dan penyimpangan standar dari data historis (Pramono dkk, 2015). Kelebihan metode statistik adalah kemampuannya untuk menghasilkan estimasi debit banjir rancangan berdasarkan data historis, sehingga lebih representatif terhadap kondisi lokal. Namun, metode ini membutuhkan data historis yang panjang dan konsisten agar hasilnya valid. Keterbatasan data atau data yang tidak homogen akibat perubahan lingkungan dapat menyebabkan bias dalam analisis. Oleh karena itu, metode statistik biasanya dikombinasikan dengan pendekatan lain untuk meningkatkan akurasi prediksi debit banjir (Suryadi, 2005).

3. Metode Hidrograf

Metode hidrograf merupakan pendekatan yang menggunakan hidrograf, yaitu grafik yang menunjukkan hubungan antara debit aliran sungai dengan waktu, untuk menentukan debit banjir rancangan. Salah satu metode populer

dalam kategori ini adalah Hidrograf Satuan Sintetik (HSS), seperti HSS Nakayasu, HSS Gamma I, dan HSS Snyder. Metode ini digunakan untuk memprediksi respons hidrologi DAS terhadap hujan tertentu berdasarkan karakteristik fisik DAS, seperti luas, panjang sungai utama, kemiringan lahan, dan waktu konsentrasi. HSS Nakayasu, misalnya, menggunakan parameter seperti waktu puncak dan debit puncak yang dihitung dari data hidrologi dan morfologi DAS (Asdak, 2010). Kelebihan metode hidrograf adalah kemampuannya untuk memodelkan aliran sungai dalam suatu periode waktu tertentu, sehingga sangat berguna untuk analisis dinamika banjir dan perencanaan infrastruktur pengendali banjir. Namun, metode ini memerlukan parameter-parameter DAS yang cukup lengkap, sehingga penerapannya membutuhkan data yang lebih banyak dibandingkan metode empiris atau statistik. Selain itu, penggunaan metode hidrograf biasanya didukung oleh perangkat lunak seperti HEC-HMS untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam perhitungan (Chow dkk, 1988).

2.5.3 Peran Debit Banjir Rancangan dalam Perencanaan Infrastruktur

Debit banjir rancangan memiliki peran penting dalam perencanaan dan desain infrastruktur untuk pengelolaan sumber daya air, terutama infrastruktur pengendalian banjir. Debit banjir rancangan digunakan sebagai dasar untuk menentukan kapasitas dan dimensi struktur, seperti tanggul, bendungan, saluran drainase, jembatan, dan sistem pengendalian banjir lainnya. Tujuan utama dari perhitungan debit banjir rancangan adalah untuk memastikan bahwa infrastruktur yang dibangun mampu menahan debit puncak aliran yang dihasilkan dari hujan ekstrem dengan periode ulang tertentu, sehingga risiko kerusakan akibat banjir dapat diminimalkan (Asdak, 2010).

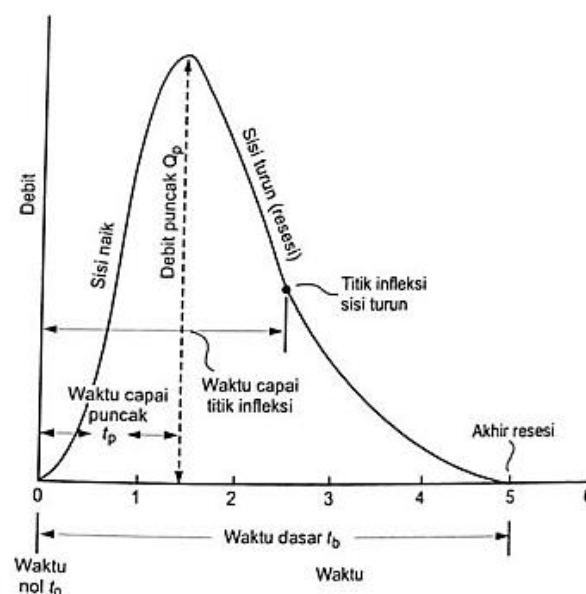
Dalam perencanaan bendungan, misalnya, debit banjir rancangan digunakan untuk menentukan kapasitas spillway (saluran pelimpah) agar dapat mengalirkan air dengan aman tanpa mengancam stabilitas bendungan. Demikian pula, dalam perencanaan jembatan, debit banjir rancangan diperlukan untuk menentukan elevasi fondasi dan lebar aliran di bawah jembatan, sehingga tidak terjadi genangan yang dapat merusak infrastruktur tersebut. Untuk sistem drainase perkotaan, debit banjir

rancangan digunakan untuk menghitung dimensi saluran agar mampu mengalirkan air hujan dengan cepat dan efisien, sehingga banjir perkotaan (*urban flooding*) dapat dicegah (Chow dkk, 1988).

2.6 Analisa Hidrograf

2.6.1 Definisi Hidrograf

Hidrograf merupakan grafik yang menggambarkan fluktuasi aliran air di Sungai sepanjang periode waktu (Indarto, 2016). Grafik ini memberikan gambaran tentang pola aliran yang dihasilkan oleh curah hujan yang jatuh di Daerah Aliran Sungai (DAS) dan menunjukkan respons hidrologi DAS terhadap input hujan. Hidrograf sendiri merupakan respon dari hujan yang terjadi pada suatu wilayah. Karena sebab itulah untuk masing-masing wilayah atau DAS memiliki bentuk hidrograf yang berbeda tergantung kondisi DAS dan karakteristiknya (Margini dkk, 2017).



Gambar 2.8 Komponen Hidrograf

Hidrograf biasanya memiliki tiga komponen utama, yaitu bagian naik (*rising limb*), puncak (*peak discharge*), dan bagian turun (*recession limb*). *Rising limb* menggambarkan peningkatan debit aliran akibat hujan, sedangkan *peak discharge* menunjukkan debit maksimum yang terjadi pada suatu periode. Bagian *recession limb*, di sisi lain, mencerminkan pengurangan debit seiring waktu setelah hujan berhenti. Secara umum, hidrograf membantu dalam memahami pola aliran

permukaan dan pergerakan air dalam DAS (Chow dkk, 1988). Bentuk hidrograf dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Triatmodjo, 2008)

2.6.2 Penurunan Hidrograf satuan

Hidrograf satuan adalah hidrograf limpasan yang dihasilkan oleh hujan efektif yang terjadi di seluruh DAS dengan intensitas tetap dalam satuan waktu yang ditetapkan (Aurdin, 2014). Hidrograf aliran sungai selalu berubah tergantung pada sifat masukan (*input*) hujannya. Hal ini disebabkan karena sistem DAS yang sebenarnya adalah sistem yang tidak linier (*non-linier*) yang berubah terhadap waktu (*non-linier time invariant*) sehingga akan menyederhanakan proses pengalihragaman hujan menjadi aliran. Berdasarkan anggapan tersebut maka masukan (*input*) yang terjadi setiap saat akan mengakibatkan aliran yang sama atau dengan kata lain, suatu DAS tertentu mempunyai tanggapan khas terhadap masukan (*input*) hujan tertentu (Laurentia, 2023)

Hidrograf satuan dari suatu daerah aliran tertentu dapat dicari dengan pertolongan hidrograf sungai yang diakibatkan oleh hujan sebarang dan meliputi daerah tangkapannya dengan intensitas yang cukup merata (Soemarto, 1986). Untuk menurunkan hidrograf satuan diperlukan data hujan dan debit aliran berkaitan. Prosedur penurunan hidrograf satuan adalah sebagai berikut: (Triatmodjo, 2008).

1. Digambar hidrograf yang berkaitan dengan hujan yang terjadi. Aliran dasar dipisahkan dengan cara seperti yang telah dijelaskan di depan, sehingga diperoleh Hidrograf Aliran Langsung (HAL).
2. Dihitung luasan di bawah HAL yang merupakan volume aliran permukaan. Volume aliran tersebut dikonversi menjadi kedalaman aliran di seluruh DAS.
3. Ordinat dari HAL dibagi dengan kedalaman aliran yang menghasilkan hidrograf satuan dengan durasi sama dengan durasi hujan.

2.6.3 Hidrograf Satuan Pengamatan (HSP)

Hidrograf Satuan Pengamatan (HSP) merupakan hidrograf yang menggambarkan rangkaian kejadian curah hujan yang hanya menghasilkan satu curah hujan efektif dalam satuan waktu yang dapat diturunkan dari data hujan

terpisah dengan intensitas merata atau hujan periode tunggal. Namun demikian hal tersebut jarang terjadi yang banyak terjadi adalah hujan dengan periode kompleks, yaitu curah hujan yang dihasilkan lebih dari satu periode (Subarkah, 1980). Hidrograf Satuan Pengamatan (HSP) sering digunakan dalam analisis hidrologi untuk memprediksi pola aliran sungai yang terjadi akibat hujan dengan intensitas tertentu. Secara umum, HSP direpresentasikan dalam bentuk grafik debit aliran terhadap waktu yang mencakup informasi tentang waktu puncak, debit puncak, dan durasi aliran (Chow dkk, 1988).

Salah satu keunggulan HSP adalah kemampuannya merepresentasikan karakteristik hidrologi DAS secara spesifik berdasarkan data pengamatan, sehingga hasil analisis yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi DAS yang bersangkutan. Namun, kelemahan HSP adalah ketergantungannya pada data pengamatan yang memadai. Data debit dan curah hujan harus diukur secara konsisten dalam jangka waktu panjang untuk memastikan validitas dan akurasi hasil analisis (Asdak, 2010).

Kajian mengenai HSP (*observed unit hydrograph*), dilakukan dengan menggunakan cara analisa numerik. Dalam hal ini, terdapat dua cara penyelesaian yang bisa dipakai, yaitu menggunakan persamaan Polynomial atau cara Collins. Persamaan Polynomial mempunyai beberapa kelemahan, sedangkan cara Collins bisa dipakai pada semua kondisi. Umumnya cara Collins selalu dapat diselesaikan dan memberikan hasil yang terbaik dan wajar (Laurentia, 2023).

2.6.3.1 Hidrograf Satuan Pengamatan (HSP) Metode Polinomial

Hidrograf Satuan Pengamatan (HSP) Metode Polinomial adalah salah satu pendekatan untuk menganalisis hidrograf satuan berdasarkan data pengamatan debit dan hujan di suatu daerah aliran sungai (DAS). Metode ini menggunakan fungsi polinomial untuk merepresentasikan bentuk hidrograf satuan, di mana debit aliran di setiap interval waktu dinyatakan sebagai fungsi polinomial dari waktu. Polinomial yang digunakan dapat berupa polinomial tingkat rendah (*linier atau kuadratik*) hingga tingkat tinggi, tergantung pada kompleksitas pola hidrograf DAS yang dianalisis. Metode ini bertujuan untuk menghasilkan representasi matematis

hidrograf yang sederhana namun cukup akurat untuk menggambarkan respons hidrologi DAS terhadap hujan efektif tertentu (Asdak, 2010).

2.6.3.2 Hidrograf Satuan Pengamatan (HSP) Metode Collins

Hidrograf satuan yang dihitung dari suatu kasus banjir belum merupakan hidrograf yang mewakili DAS yang bersangkutan. Oleh sebab itu diperlukan hidrograf satuan yang diturunkan dari sebuah kasus banjir, kemudian dirata-rata. Namun tidak ada petunjuk tentang berapa jumlah kasus banjir yang diperlukan untuk memperoleh hidrograf satuan ini (Agusalim & Nanda, 2018).

Hubungan antara limpasan langsung/*direct run-off* (Q) dan hujan efektif (*effective rainfall*) yang terjadi (R) bisa dinyatakan dalam hubungan linier seperti berikut (Laurentia, 2023):

$$Q_0 = 0 \quad (2.7)$$

$$Q_1 = R_1 U_1 \quad (2.8)$$

$$Q_2 = R_1 U_2 + R_2 U_1 \quad (2.9)$$

$$Q_3 = R_1 U_3 + R_2 U_2 + R_3 U_1 \quad (2.10)$$

$$Q_j = R_1 U_j + R_2 U_{j-1} + R_3 U_{j-2} + \dots + R_j U_1 \quad (2.11)$$

$$Q_{n-1} = R_{j-1} U_k + R_j U_{k-1} \quad (2.12)$$

$$Q_n = R_j U_k \quad (2.13)$$

$$Q_{n+1} = 0 \quad (2.14)$$

Keterangan:

n = Jumlah ordinat hidrograf (tidak termasuk harga nol pada jam awal dan akhir)

j = Jumlah jam hujan efektif

k = Jumlah ordinat hidrograf satuan (tidak termasuk harga nol pada jam awal dan akhir)

Jika data pengamatan (hidrograf pengamatan/*observed hydrograph*) salah, akan mengakibatkan pencatatan hujan yang salah juga. Jika hal tersebut terjadi, berarti teori hidrograf satuan (*unit hydrograph*) tidak bisa mencerminkan karakteristik DAS yang bersangkutan dan hidrograf satuan (*unit hydrograph*) tidak

dapat dianggap mewakili DAS yang bersangkutan. Metode Collins merupakan cara/metode untuk memperoleh hidrograf satuan pengamatan (*observed unit hydrograph*) dengan input berupa data hujan periode kompleks (Laurentia, 2023). Estimasi terakhir dari ordinat hidrograf satuan (*unit hydrograph*) adalah sebagai berikut:

$$U_e = \frac{V U^{**}}{3600 \sum U^{**}} \quad (2.15)$$

$$U^{**} = \frac{U_i + F U^*}{1 + F} \quad (2.16)$$

$$U^* = \frac{dQ}{Re_{maks}} \quad (2.17)$$

Keterangan:

- U_e = Ordinat hidrograf awal ($m^3/dt/mm$)
- V = Volume limpasan (m^3)
- U_i = Ordinat hidrograf pada jam ke-1 ($m^3/dt/mm$)
- F = Faktor Kalibrasi
- U^* = Ordinat hidrograf setelah dikoreksi ($m^3/dt/mm$)
- dQ = Ordinat hidrograf pengamatan ($m^3/dt/mm$)
- Re_{maks} = Hujan efektif maksimum (mm)

Metode Collins memerlukan prosedur bertahap, antara lain dengan memisahkan tinggi limpasan (*run-off*) terdistribusi merata dan melakukan kalibrasi hidrograf satuan (*unit hydrograph*) untuk tahap-tahap selanjutnya. Sementara itu, tahapan secara teknis adalah sebagai berikut (Laurentia, 2023):

1. Pemilihan data debit AWLR jam-jaman dari stasiun AWLR dengan hidrograf debit AWLR yang terpisah (*isolated*) dan memiliki satu puncak (*single peak*).
2. Memisahkan aliran dasar dengan metode *straight line method* untuk menentukan hidrograf aliran langsung (Sri Harto, 1993).
3. Menghitung hujan efektif yang menyebabkan limpasan permukaan langsung dengan menggunakan metode phi indeks (ϕ) dan memisahkan hujan maksimumnya.
4. Menghitung tinggi lintasan amatan.

5. Menentukan lebar dasar hidrograf (*time base*).

$$Tb = n - j + 1 \quad (2.18)$$

Keterangan:

n = Jumlah ordinat hidrograf

j = Jumlah jam hujan efektif

6. Menghitung volume limpasan langsung akibat hujan 1 mm.

$$Vu = A \times 0,001 \quad (2.19)$$

7. Menentukan ordinat awal (coba-coba 1).

$$U_{t-awal} = \frac{Vu}{3600 \times Tb} \quad (2.20)$$

8. Menentukan ordinat limpasan langsung dengan menghitung hasil kali hujan efektif (kecuali hujan maksimum) dengan ordinat hidrograf yang dicobakan.

$$\text{Jumlah Limpasan } run-off = \sum R_u \quad (2.21)$$

9. Menghitung selisih antara ordinat limpasan langsung (Q_{RU}) dengan ordinat limpasan amatan (Q_d).

$$\text{Jumlah} = \sum (Q_d - Q_{RU}) \quad (2.22)$$

10. Mencari U_{t-1} (ordinat hidrograf ke-1 percobaan ke-1) pada masing-masing ordinat

$$U_{t-1} = \frac{Q_d - Q_{RU}}{Reff_{maks}} \quad (2.23)$$

11. Mencari faktor perubahan (P).

$$P = \frac{A / 3600}{\sum (U_{t-1})} \quad (2.24)$$

12. Menghitung U_{t-jus} (U_{t-1} yang telah dikalikan dengan P).

13. Menghitung faktor F.

$$F = \frac{\sum (Q_d - Q_{RU})}{\sum Q_{RU}} \quad (2.25)$$

14. Mengalikan U_{t-jus} dengan faktor F

15. Mencari nilai U_{t-1}^*

$$U_{t-1}^* = \frac{(F \times U_{t-jus}) - U_{t-Awal}}{1 + F} \quad (2.26)$$

16. Menghitung ordinat akhir (U_{t-2})

$$q = \frac{A \times 1000 / 3600}{\sum U_{t-1}} \quad (2.27)$$

$$U_{t-2} = U_{t-1} \times q \quad (2.28)$$

Keterangan:

Q = Debit limpasan amatan (m^3/dt)

Ru = Debit limpasan model (m^3/dt)

A = Luas DAS (m^2)

17. Jika jumlah volume awal ($U_{t \text{ awal}}$) belum sama dengan jumlah volume U_{t-2} maka coba-coba ini dilakukan ulang dari poin ke-6 dengan $U_{t \text{ awal}}$ menggunakan ordinat pada hidrograf satuan yang terakhir, sampai mendapatkan hasil yang relatif sama antara jumlah $U_{t \text{ awal}}$ dengan jumlah volume U_{t-2} (toleransi 4%). Selanjutnya merata-ratakan besarnya Q_p , T_p , dan T_b untuk seluruh kejadian banjir.

2.6.4 Hidrograf Satuan Sintetik (HSS)

Berdasarkan cara untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan (*observed unit hydrograph*), diperlukan seperangkat data yang dibutuhkan, namun data tersebut sering kali sulit didapatkan atau bahkan tidak ada/tidak tersedia sama sekali. Untuk membuat hidrograf banjir (*flood hydrograph*) pada sungai-sungai yang tidak ada atau sedikit sekali dilakukan pengamatan/observasi hidrograf banjir (*flood hydrograph*), maka diperlukan data karakteristik atau parameter daerah pengaliran DAS tersebut terlebih dahulu. Untuk sungai-sungai yang tidak mempunyai hidrograf banjir pengamatan, biasanya dipakai hidrograf sintetik (*synthetic hydrograph*) yang sudah dikembangkan di negara-negara lain, dimana parameter-parameternya harus disesuaikan terlebih dahulu dengan karakteristik DAS yang ditinjau (Laurentia, 2023).

Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) adalah representasi hidrograf yang dihasilkan secara teoritis atau matematis tanpa memerlukan data pengamatan debit langsung dari suatu lokasi tertentu. HSS digunakan untuk memodelkan respons hidrologi suatu DAS terhadap hujan efektif tertentu, terutama pada DAS yang tidak memiliki data pengamatan debit yang memadai. HSS dikembangkan berdasarkan

karakteristik fisik DAS, seperti luas DAS, panjang dan kemiringan sungai utama, bentuk DAS, waktu konsentrasi, dan karakteristik topografi lainnya. Dengan menggunakan parameter-parameter tersebut, HSS dapat menghasilkan gambaran pola aliran sungai yang cukup representatif untuk berbagai aplikasi hidrologi, termasuk perhitungan debit banjir rancangan dan perencanaan infrastruktur pengendalian banjir (Chow dkk, 1988).

HSS memiliki beberapa keunggulan, terutama dalam hal fleksibilitas dan kegunaannya pada DAS yang tidak memiliki data pengamatan debit. Beberapa model HSS yang sering digunakan dalam hidrologi adalah HSS Nakayasu, HSS Snyder, dan HSS SCS (*Soil Conservation Service*). Setiap metode HSS memiliki pendekatan yang berbeda dalam mengestimasi waktu puncak, debit puncak, dan durasi hidrograf, tetapi semuanya bertujuan untuk memberikan gambaran hidrograf yang realistis sesuai dengan karakteristik DAS (Asdak, 2010).

2.6.4.1 Metode HSS Nakayasu

Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) Nakayasu adalah salah satu metode hidrograf satuan sintetik yang sering digunakan dalam analisis hidrologi untuk memperkirakan respons DAS terhadap hujan efektif. Metode ini dikembangkan oleh Nakayasu pada tahun 1932 berdasarkan analisis terhadap berbagai DAS di Jepang dan menjadi salah satu metode yang populer karena kesederhanaan perhitungannya. HSS Nakayasu sangat bermanfaat untuk DAS yang tidak memiliki data debit pengamatan langsung, sehingga memungkinkan perencanaan hidrologi seperti perhitungan debit banjir rancangan pada DAS yang memiliki keterbatasan data pengamatan (Chow dkk, 1988). Parameter yang dibutuhkan dalam analisa memakai Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu dapat dilihat pada Tabel 2.5 (Laurentia, 2023).

Tabel 2.5 Parameter HSS Nakayasu

No	Parameter	Simbol
1.	Tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak hidrograf (<i>time to peak magnitude</i>)	T_p
2.	Tenggang waktu dari titik berat hujan sampai titik berat hidrograf (<i>time lag</i>)	t_g

No	Parameter	Simbol
3.	Tenggang waktu hidrograf (<i>time base of hydrograph</i>)	TB
4.	Luas daerah pengaliran (<i>catchment area</i>)	A
5.	Panjang alur sungai utama terpanjang (<i>length of the longest channel</i>)	L
6.	Koefisien pengaliran (<i>run-off coefficient</i>)	C

HSS Nakayasu dihitung menggunakan persamaan berikut dan disajikan secara sistematis dalam persamaan berikut:

$$T_p = T_g + 0,8 T_r \quad (2.29)$$

$$T_{0,3} = \alpha t_g \quad (2.30)$$

Cara menentukan t_g :

$$\text{Jika } L \geq 15 \text{ km, maka } t_g = 0,40 + 0,058 L \quad (2.31)$$

$$L < 15 \text{ km, maka } t_g = 0,21 L^{0,7} \quad (2.32)$$

Dengan

α = Parameter hidrograf pada Tabel 2.6 (Limantara, 2018)

$t_r = 0,5 \times t_g$ sampai $1 \times t_g$

Keterangan:

T_p = Tenggang waktu (*time lag*) dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

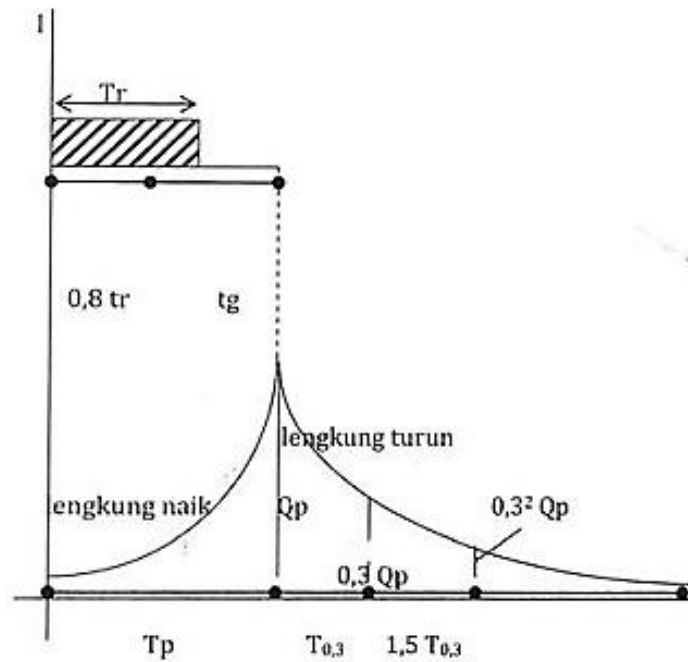
t_g = Waktu konsentrasi hujan (jam)

$T_{0,3}$ = Waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari debit puncak sampai menjadi 30% dari debit puncak (jam)

Tabel 2.6 Nilai α

Nilai α	Keterangan
2	Untuk daerah pengaliran biasa.
1,5	Untuk bagian naik hidrograf (<i>rising limb</i>) yang lambat dan bagian menurun (<i>recession line</i>) yang cepat.
3	Untuk bagian naik hidrograf (<i>rising limb</i>) yang cepat dan bagian menurun (<i>recession line</i>) yang lambat.

Nilai α	Keterangan
Kalibrasi nilai α	Menurut pengalaman dan penelitian yang telah dilakukan di Indonesia, untuk memperoleh hasil yang akurat dan sesuai dengan kondisi karakteristik Daerah Aliran Sungai (DAS) di Indonesia.



Gambar 2.9 Bentuk HSS Nakayasu

Salah satu keunggulan HSS Nakayasu adalah kemampuannya untuk menggambarkan respons DAS dengan pendekatan matematis yang sederhana namun tetap representatif. Formulasi dasar dalam metode Nakayasu dalam menyatakan debit puncak (Q_p) seperti Gambar 2.9 (Limantara, 2018) sebagai berikut:

$$Q_p = \frac{A R_o}{3,6 (0,3 T_p + T_{0,3})} \quad (2.33)$$

Keterangan:

Q_p = Q_{maks} , merupakan debit puncak banjir (m^3 / dt)

c = Koefisien aliran (=1)

A = Luas DAS sampai ke outlet (km^2)

R_o = Hujan satuan (mm)

T_p = Tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

T_{03} = Waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari debit puncak sampai menjadi 30 % dari debit puncak (jam)

Analisis HSS Nakayasu memiliki bagian naik dan turun yang diasumsikan simetris, tetapi dalam kenyataannya, bagian turun lebih panjang dibandingkan bagian naik. Bentuk hidrograf satuan dihitung berdasarkan persamaan berikut:

1. Pada kurva naik/*rising limb* ($0 < t < T_p$)

$$Q_t = Q_{maks} \left(\frac{t}{T_p} \right)^{2,4} \quad (2.34)$$

2. Pada kurva turun/*recession line*

- Untuk $T_p \leq t < (T_p + T_{0,3})$

$$Q_r = Q_{maks} \times 0,3^{\frac{t-T_p}{T_{0,3}}} \quad (2.35)$$

- Untuk $(T_p + T_{0,3}) \leq t < (T_p + T_{0,3} + T_{0,3}^2)$

$$Q_t = Q_{maks} \times 0,3^{\frac{(t-T_p)+(0,5 T_{0,3})}{1,5 T_{0,3}}} \quad (2.36)$$

- Untuk $t \geq (T_p + T_{0,3} + 1,5 T_{0,3})$

$$Q_t = Q_{maks} \times 0,3^{\frac{(t-T_p)+(1,5 T_{0,3})}{2 T_{0,3}}} \quad (2.37)$$

2.6.4.2 Metode HSS GAMA I

Hidrograf Satuan Sintetis GAMA I dikembangkan oleh Sri Harto pada tahun 1993 berdasar perilaku hidrlogis 30 DAS dan 300 banjir sungai-sungai di Pulau Jawa. Meskipun diturunkan dari data DAS di Pulau Jawa, ternyata HSS GAMA I berfungsi baik untuk berbagai daerah lain di Indonesia (Laurentia, 2023). HSS GAMA-I adalah metode hidrograf satuan sintetik yang dikembangkan berdasarkan pendekatan fungsi gamma. Metode ini bertujuan untuk memodelkan respons hidrologi suatu DAS terhadap hujan efektif, khususnya untuk DAS yang tidak memiliki data pengamatan debit atau memiliki keterbatasan data historis (Asdak, 2010). Parameter yang diperlukan dalam analisa memakai HSS GAMA-I, terdapat pada Tabel 2.7 (Limantara, 2018). Akurasi hasil sangat dipengaruhi oleh ketepatan dalam menentukan parameter morfometri DAS serta asumsi hujan seragam yang digunakan dalam simulasi.

Tabel 2.7 Parameter HSS GAMA I

No	Parameter	Simbol
1.	Luas DAS (<i>catchment area</i>)	A
2.	Panjang alur sungai utama terpanjang (<i>length of the longest channel</i>)	L
3.	Panjang alur sungai ke titik berat DAS (<i>the length of river towards the weight point of the catchment area</i>)	Lc
4.	Kelandaian sungai (<i>river slope</i>)	S
5.	Kerapatan jaringan kuras (<i>drainage density</i>)	D
6.	Faktor sumber	SF
7.	Frekuensi sumber	SW
8.	Faktor lebar	WF
9.	Luas DAS sebelah hulu	RUA
10.	Faktor simetri	SIM
11.	Jumlah pertemuan sungai	JN

Fungsi GAMA-1 memungkinkan representasi hidrograf yang lebih bervariasi, sesuai dengan bentuk DAS, topografi, dan karakteristik lainnya seperti Gambar 2.10 (Limantara, 2018). Persamaan untuk menentukan HSS Gama I adalah sebagai berikut:

$$TR = 0,43 \left(\frac{L}{100 SF} \right)^3 + 1,0665 SIM + 1,2775 \quad (2.38)$$

$$TB = 27,4132 TR^{0,1457} S^{-0,9868} SN^{0,7344} RUA^{0,2574} \quad (2.39)$$

$$Q_p = 0,1836 A^{0,5886} TR^{-0,4008} JN^{0,2381} \quad (2.40)$$

$$K = 0,5617 A^{0,1798} S^{-0,1446} SF^{-1,0897} D^{0,0452} \quad (2.41)$$

$$Q_t = Q_p \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (2.42)$$

$$Q_b = 0,4751 A^{0,6444} D^{0,940} \quad (2.43)$$

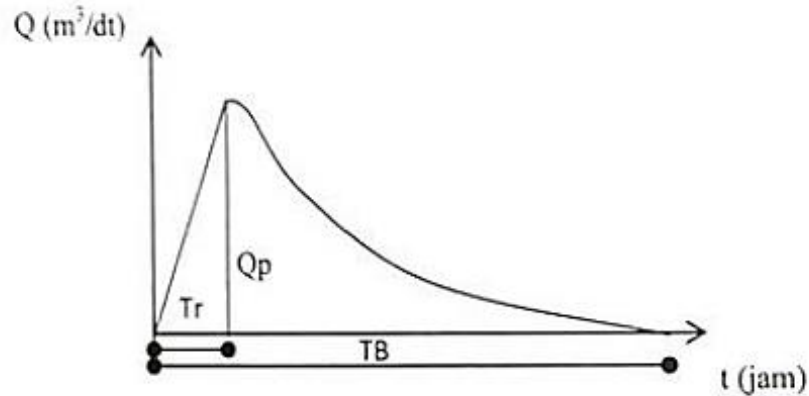
Keterangan:

TR = Waktu naik hidrograf (jam)

TB = Waktu dasar hidrograf (jam)

Qp = Debit puncak hidrograf (m³/ dt)

- K = Tampung (jam)
 Q_b = Aliran dasar (m³/dt)
 Q_t = Debit resesi hidrograf (m³/dt)



Gambar 2.10 Bentuk HSS GAMA I

Persamaan tambahan yang terkait dengan HSS GAMA I adalah indeks infiltrasi atau Φ indeks. Besarnya Φ indeks dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Phi = 10,4903 - 3,859 \times 10^{-6} \times A^2 + 1,6985 \times A^{-13} \left(\frac{A}{SN} \right)^4 \quad (2.44)$$

Keterangan:

Φ = Indeks infiltrasi (mm/jam)

SN = Frekuensi sumber

2.6.4.3 Metode HSS SCS-CN

Metode Hidrograf Satuan Sintetik SCS-CN merupakan salah satu metode yang dikembangkan oleh *Soil Conservation Service* (SCS) dari *United States Department of Agriculture* (USDA) untuk memperkirakan limpasan permukaan dari suatu hujan efektif di DAS dengan memperhitungkan kondisi fisik lahan, penggunaan lahan, dan karakteristik tanah. Metode ini sangat banyak digunakan dalam perencanaan hidrologi karena kesederhanaannya dan ketersediaan parameter yang dapat diperoleh dari peta dan survei lapangan. Salah satu keunggulan metode ini adalah kemampuannya dalam memodelkan hubungan antara hujan dan limpasan berdasarkan parameter *Curve Number* (CN) yang merepresentasikan kemampuan infiltrasi tanah dan tata guna lahan. Dalam metode SCS-CN, pembentukan

hidrograf satuan dilakukan melalui dua tahap, pertama menghitung hujan efektif (*excess rainfall*) menggunakan metode CN, dan kedua membentuk hidrograf satuan dari respon DAS terhadap hujan efektif tersebut.

Tabel 2.8 Parameter HSS SCS-CN

No	Parameter	Simbol
1.	Luas DAS (<i>catchment area</i>)	A
2.	Panjang sungai	L
3.	<i>Curve Number</i>	CN

Adapun parameter HSS SCS dapat dilihat pada Tabel 2.8 (Limantara, 2018).

Persamaan untuk menentukan HSS SCS adalah sebagai berikut:

$$S = \frac{25400}{CN} 254 \quad (2.45)$$

$$I_a = 0,2 S \quad (2.46)$$

$$TL = T_p - \frac{1}{2} T_r \quad (2.47)$$

Keterangan:

S = Kapasitas penyimpanan maksimum tanah (mm)

I_a = Kehilangan awal (*initial abstraction*)

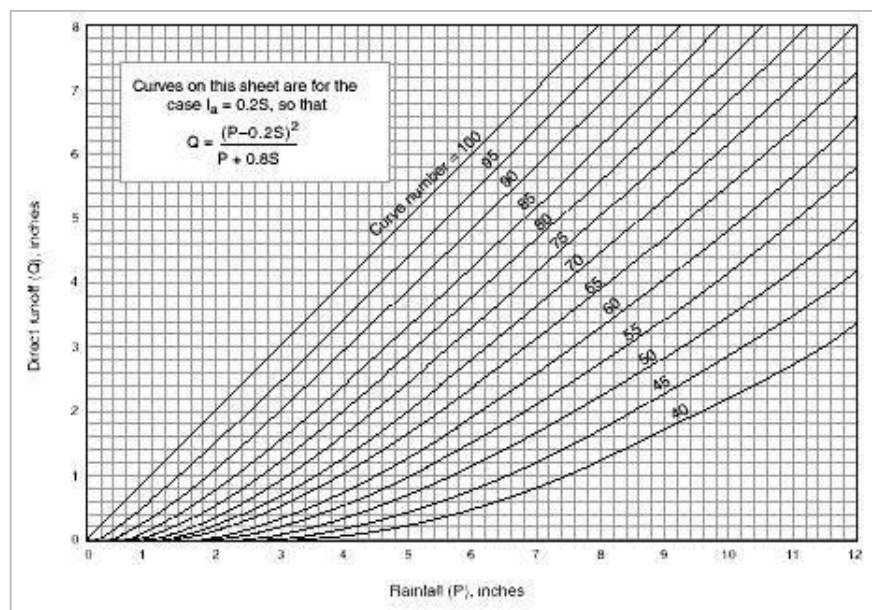
T_p = Waktu puncak (jam)

T_r = Waktu hujan (jam)

Tabel 2.9 Nilai CN Berdasarkan SCS

Jenis Lahan	Keadaan Hidrologi	A	B	C	D
Padang rumput luas (penggembalaan)	Buruk	68	79	86	89
	Cukup	49	69	79	84
	Baik	39	61	74	80
Padang rumput tidak untuk ternak	-	30	58	71	78
Semak, gulma, rumputan	Buruk	48	67	77	83
	Cukup	35	56	70	77
	Baik	30	48	65	73
Perkebunan	Buruk	43	65	76	82
	Cukup	32	58	72	80
	Baik	31	55	70	78
Hutan	Buruk	45	60	73	79

Jenis Lahan	Keadaan Hidrologi	A	B	C	D
	Cukup	36	55	70	77
	Baik	30	50	70	77
Tanah pertanian	-	59	74	82	86
Ruang terbuka	Buruk	68	79	86	89
	Cukup	49	69	79	84
	Baik	39	61	74	80
Area terbangun perumahan	-	61	75	83	87
Badan air	-	100	100	100	100



Gambar 2.11 Grafik Hubungan antara *runoff* dengan Curah Hujan pada HSS SCS

2.7 Uji Penyimpangan Ordinat

2.7.1 Definisi Uji Penyimpangan Ordinat

Uji penyimpangan ordinat adalah metode untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian atau perbedaan antara dua hidrograf. Hidrograf yang dimaksud bisa berupa hidrograf pengamatan (observasi) dan hidrograf hasil perhitungan atau simulasi (prediksi). Uji ini bertujuan untuk menilai keakuratan atau kesalahan model dalam merepresentasikan data hidrologi aktual. Metode ini biasanya digunakan dalam studi hidrologi untuk memvalidasi metode atau model perhitungan debit banjir rancangan, termasuk dalam perbandingan berbagai metode HSS (Chow dkk, 1988).

Uji penyimpangan ordinat dilakukan dengan membandingkan nilai debit pada setiap waktu (t) antara dua hidrograf, yakni hidrograf pengamatan ($Q_{\text{observasi}}$) dan hidrograf hasil perhitungan (Q_{model}). Selisih atau penyimpangan pada setiap waktu dihitung, dan kemudian dianalisis untuk menentukan apakah model yang digunakan cukup andal. Hasil uji penyimpangan ini akan memperlihatkan metode HSS yang menunjukkan penyimpangan terkecil, dalam hal ini kita akan memilih metode apa yang akan digunakan pada DAS atau daerah tinjauan berdasarkan hasil uji penyimpangan koordinat tersebut. Uji ini dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$PY = \left| \frac{\sum Y_p - \sum Y_s}{\sum Y_p} \right| \times 100\% \quad (2.48)$$

Keterangan:

PY = Penyimpangan ordinat (%)

$\sum Y_p$ = Jumlah ordinat HS banjir pengamatan

$\sum Y_s$ = Jumlah ordinat HSS

Tabel 2.10 Klasifikasi Nilai Uji Penyimpangan Ordinat

Penyimpangan (%)	Kategori Tingkat Kesesuaian	Keterangan
0 – 5 %	Sangat Baik / Sangat Sesuai	HSS sangat representatif terhadap HSP
>5 – 10 %	Baik / Sesuai	HSS cukup representatif terhadap HSP
>10 – 20 %	Sedang / Cukup Sesuai	HSS masih dapat diterima, namun terdapat deviasi
>20 %	Kurang / Tidak Sesuai	HSS tidak representatif terhadap kondisi aktual

2.8 Pemodelan Menggunakan Perangkat Lunak

2.8.1 Pemodelan QGIS

QGIS adalah perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG) yang digunakan untuk analisis spasial dan pemodelan hidrologi, termasuk dalam pemetaan DAS. Pemodelan DAS dengan QGIS dilakukan untuk memahami karakteristik aliran air, menentukan batas DAS, serta menganalisis pola drainase guna mendukung perencanaan dan pengelolaan sumber daya air. Salah satu fungsi utama QGIS dalam pemodelan DAS adalah memanfaatkan DEM untuk

menentukan arah aliran air, mengidentifikasi jaringan sungai, dan membatasi daerah tangkapan air. Komponen-komponen pada QGIS berperan dalam menentukan pola aliran air dari curah hujan hingga membentuk sungai dan daerah tangkapan air. Komponen utama dalam QGIS adalah sebagai berikut:

1. *Fill DEM*
2. *Flow Direction*
3. *Flow Accumulation*
4. *Stream Order*
5. *Stream to Feature*
6. *Watershed*

Adapun kelebihan dan kekurangan QGIS dalam pemodelan karakteristik DAS dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Kelebihan dan Kekurangan QGIS

Aspek	Kelebihan	Kekurangan
Akurasi Data	QGIS dapat mengolah data DEM dengan resolusi tinggi, menghasilkan batas DAS dan jaringan sungai yang lebih akurat.	Kualitas hasil sangat bergantung pada resolusi dan kualitas DEM yang digunakan. DEM dengan resolusi rendah dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam analisis hidrologi.
Analisis Spasial	QGIS memiliki berbagai alat analisis spasial yang memungkinkan pemodelan DAS secara detail, termasuk Flow Direction, Flow Accumulation, Stream Order, dan Watershed.	Proses analisis dapat menjadi kompleks dan membutuhkan pemahaman mendalam tentang SIG dan pemodelan hidrologi.
Integrasi Data	Dapat mengintegrasikan berbagai jenis data spasial, seperti curah hujan, penggunaan lahan, tata guna lahan, dan jenis tanah, untuk	Format data yang digunakan dalam QGIS terkadang perlu dikonversi dari format lain yang bisa memakan waktu dan

Aspek	Kelebihan	Kekurangan
	pemodelan DAS yang lebih komprehensif.	berpotensi menimbulkan kesalahan konversi.
Fleksibilitas dan Kompatibilitas	Dapat digunakan dengan berbagai sumber data GIS lainnya, seperti QGIS, Google Earth, HEC-HMS, dan HEC-RAS, untuk analisis yang lebih luas.	Beberapa ekstensi atau fitur tambahan membutuhkan biaya tambahan untuk diakses, seperti <i>Spasial Analyst</i> dan <i>3D Analyst</i> .

2.8.2 Pemodelan HEC-HMS

Perangkat lunak HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) merupakan salah satu model hidrologi terkemuka yang dikembangkan oleh *Hydrologic Engineering Center* (HEC) dari *US Army Corps of Engineers*. Aplikasi ini merupakan pengembangan lebih lanjut dari program pendahulunya, yaitu HEC-1, dengan peningkatan fitur, tampilan antarmuka, dan kapabilitas komputasi. Dirancang untuk berbasis sistem operasi Windows, HEC-HMS memiliki keunggulan dalam hal kemudahan penggunaan dan aksesibilitas. Hingga saat ini, HEC-HMS telah mengalami berbagai pembaruan dan penyempurnaan, dan telah mencapai versi 4.12 yang menawarkan kemampuan simulasi hidrologi yang semakin komprehensif dan akurat. Model ini dapat memberikan simulasi hidrologi puncak aliran harian untuk perhitungan debit banjir rencana, mensimulasikan proses curah hujan dan limpasan langsung. HEC-HMS di desain untuk bisa diaplikasikan dalam area geografik yang sangat luas untuk menyelesaikan masalah, meliputi suplai air daerah pengaliran sungai, hidrologi banjir, dan limpasan air di daerah kota kecil ataupun kawasan tangkapan air alami. Komponen utama dalam model HEC-HMS terdiri dari beberapa modul yang saling terintegrasi dan merepresentasikan proses-proses hidrologi di dalam suatu daerah aliran sungai (DAS). Komponen-komponen tersebut meliputi:

1. *Basin Model Manager*
2. *Meteorologic Model*
3. *Control Specification*

4. *Time Series Data*5. *Paired Data*

Adapun kelebihan dan kekurangan QGIS dalam pemodelan karakteristik DAS dapat dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Kelebihan dan Kekurangan HEC-HMS

Aspek	Kelebihan	Kekurangan
Gratis dan <i>Open Source</i>	HEC-HMS merupakan perangkat lunak gratis yang dikembangkan oleh US Army Corps of Engineers, sehingga dapat digunakan tanpa biaya lisensi.	Karena bersifat gratis, dukungan teknis dan pembaruan fitur mungkin tidak secepat perangkat lunak komersial.
Metode Simulasi Beragam	Menyediakan berbagai metode simulasi hidrologi seperti SCS Curve Number, sehingga dapat disesuaikan dengan kondisi DAS yang berbeda.	Pemilihan metode yang tepat memerlukan kalibrasi yang baik agar hasilnya sesuai dengan kondisi nyata yang bisa memakan waktu.
Integrasi dengan Model Lain	Dapat dihubungkan dengan perangkat lunak lain seperti HEC-RAS (untuk analisis hidrodinamika sungai) dan QGIS (untuk pemetaan DAS dan curah hujan).	Tidak memiliki fitur untuk memproses GIS bawaan, sehingga perlu dukungan dari perangkat lunak lain untuk analisis spasial.
Analisis Curah Hujan ke Debit	Mampu mengonversi curah hujan menjadi debit dengan berbagai pendekatan, baik berbasis empiris maupun fisik.	Kualitas hasil sangat bergantung pada ketersediaan dan akurasi data input, seperti curah hujan dan karakteristik DAS.