



BIO DATA

Nama : Dr. Sardi Salim, M.Pd.
NIP : 196307051997021001
Prodi : Teknik Elektro FATEK UNG
Pangkat/Gol : Pembina Tkt I / IVb
Tempat, Tgl Lahir : Gorontalo, 5 Juli 1963
Alamat : Perum Misfallah Blok F3 Kota Gorontalo

PENDIDIKAN

- S1, Teknik Elektro Fakultas Pendidikan Teknik Kejuruan IKIP Manado, lulus Tahun 1992, Karya Tugas Akhir: Perancangan Pintu Otomatis Gedung dengan Sensor Cahaya.
- S2, Pend Teknik Kejuruan Universitas Negeri Yogyakarta, lulus Tahun 2003, Thesis: Sistem Pengelolaan Laboratorium Teknik Elektro berbasis Manajemen Mutu.
- S3, Pengembangan Wilayah, Geografi UGM, Lulus Tahun 2013, Disertasi: Pemodelan Aliran Sungai untuk Sumberdaya Listrik

TEKNIK ANALISIS DEBIT ALIRAN SUNGAI

UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO PLTMH

**Teknik Pemodelan Hidrologi Hujan-Limasan
HEC-HMS Berbasis DAS**



Penerbit: **ideaspublishing**

ISBN: 978-602-1396-88-9

Dr. SARDI SALIM



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Yang Maha Besar Illahi Robbi, karena dengan kuasa dan ridho Nya, buku Teknik Analisis Debit Aliran Sungai Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro, Penerapan Model Hidrologi Hujan-Limpasa HEC-HMS Berbasis DAS, dapat diselesaikan dengan baik walaupun disadari masih terdapat kekurangan di dalamnya.

Buku ini dapat menjadi acuan baik dalam pelaksanaan pengajaran materi Energi Terbarukan Aliran Air Sungai Untuk Pembangkit Listrik dan Teknik Pemodelan Hidrologi untuk Menentukan Potensi Aliran Sungai yang diterapkan untuk Energi Pembangkit Tenaga Listrik.

Melalui Teknik Pemodelan Hidrologi Hujan-Limpasan dapat ditentukan Nilai Debit Aliran suatu sungai dalam wilayah suatu DAS sepanjang waktu (temporal). Dengan menerapkan metode pengukuran langsung di lapangan nilai debit aliran sungai hanya dapat merepresentasi nilai pada saat melakukan pengukuran. Perubahan yang terjadi akibat curah hujan yang berubah-ubah setiap saat serta berubahnya komponen dalam sistem DAS yang secara langsung mempengaruhi keberadaan aliran air sungai tidak dapat terpantau hingga nilai debit aliran sungai sepanjang hari, minggu, bulan, maupun dalam waktu setahun tidak dapat diperoleh.

Semoga dengan adanya buku ini, dapat memberi acuan bagi pengguna dalam menentukan nilai debit aliran suatu sungai sepanjang waktu.

Desember 2015

PENULIS

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	.....	i
DAFTAR ISI	.....	ii
BAB I. ENERGI SUMBER DAYA ALAM	.....	1
1.1. Energi Terbarukan	.....	6
1.2. Energi Air Untuk Pembangkit Listrik Mikro Hidro	.....	8
BAB II. HIDROLOGI DAERAH ALIRAN SUNGAI	.....	12
2.1. Siklus Hidrologi	.....	12
2.2. Daerah Aliran Sungai (DAS)	.....	14
2.3. Analisa Penginderaan Jauh untuk Menentukan Karakteristik DAS	.....	21
BAB III. HUJAN	.....	26
3.1. Hujan	.....	26
3.2. Distribusi Hujan Dalam Daerah Aliran Sungai	.....	30
3.3. Proses Hujan Menjadi Aliran	.....	33
3.4. Hujan Efektif	.....	34
BAB IV. AIR TANAH DAN ALIRAN	.....	37

4.1. Simpanan Air Dalam Tanah	37	6.2. Model Hidrologi HEC-HMS	85
4.2. Tanah dan Penentuan Kelas Hidrologi Tanah	39	6.3. Model SCS-CN	86
4.3. Penentuan Nilai Curve Number (CN)	42	6.4. Model Clark's Unit Hydrograph	89
4.4. Evaporasi dan Evapotranspirasi	47	6.5. Model Exponential Recession	90
4.5. Infiltrasi	49	6.6. Model Muskingum	90
4.6. Aliran (<i>overland</i>)	51	6.7. Model Hidrologi Hujan-Limpasan dengan HEC-HMS	91
4.7. Pengaruh Penggunaan Lahan Terhadap Aliran	60	6.8. Analisis Karakteristik dan Morfometri DAS HecGeo-HMS	95
4.8. Pengaruh Tutupan Vegetasi terhadap Aliran	62	6.9. Analisis Hidrograf Aliran dengan HEC-HMS	97
4.9. Penentuan Tutupan Vegetasi berdasarkan Interpretasi Citra Penginderaan Jauh	64	6.10. Estimasi Volume Runoff dengan Model SCS-CN	99
BAB V. HIDROGRAF ALIRAN	66	6.11. Estimasi Direct runoff dengan Model Clark Hidrograph	100
5.1. Hidrograf Aliran	66	6.12. Estimasi Baseflow dengan Model Resesi Eksponensial	101
5.2. Hidrograf Sintetik	71	6.13. Proses Validasi dan Kalibrasi	102
5.3. Hidrograf Banjir	73	6.14. Simulasi Model	107
5.3. Pemisahan Aliran Permukaan dan Aliran Dasar Dalam Hidrograf Aliran	74	BAB VII. ANALISIS PETENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO	110
BAB VI. PEMODELAN HIDROLOGI	78	7.1. Analisis Debit Andalan	110
6.1. Pemodelan Hidrologi Aliran Sungai	78	7.2. Analisis Tinggi Jatuh Air (Head)	115
		7.3. Energi Air untuk Pembangkit Tenaga Listrik	118

7.4. Analisis Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Air
120

DAFTAR PUSTAKA
123

BAB I.

ENERGI SUMBERDAYA ALAM

Energi alamiah atau energi sumberdaya alam, dewasa ini telah banyak digunakan sebagai sumber energi untuk menunjang kebutuhan energi masyarakat. Sumberdaya alam terdiri atas sumberdaya alam terbarukan dan sumberdaya alam tidak atau tak-terbarukan. Sumberdaya alam terbarukan adalah sumberdaya alam yang dapat diperbaharui/ terpulihkan atau sumberdaya alam yang tidak akan habis digunakan sepanjang kehidupan manusia. Sumberdaya alam tak-terbarukan merupakan sumberdaya alam yang tidak dapat diperbaharui/tak terpulihkan atau sumberdaya alam yang dapat habis jika digunakan secara terus menerus.

Beberapa sumberdaya alam terbarukan yang dapat digunakan sebagai sumber energi dalam menunjang kebutuhan hidup manusia adalah:

1. Air : - Aliran air sungai
- Pasang surut air laut
- Gelombang air laut
- Arus laut, dan lain-lain
2. Matahari : - Energi radiasi matahari
- Energi surya
3. Angin : Energi hembusan angin (Bayu)
4. Panas bumi : Energi thermal,
5. Energi biomassa.

Sumberdaya air (sungai) merupakan potensi energi aliran air yang telah banyak digunakan menjadi energi pembangkit tenaga listrik. Energi air merupakan energi yang sangat potensial untuk menghasilkan energi listrik, dibanding dengan menggunakan energi mesin yang menggunakan minyak bensin/solar. Walaupun untuk pembangunannya memerlukan pembiayaan yang besar, namun dalam pengoperasiannya hanya membutuhkan biaya yang relatif kecil, dan produksi energi listrik yang dihasilkan cukup besar.

Dalam menentukan potensi energi aliran sungai dapat dilakukan dengan melakukan observasi potensi aliran di lapangan untuk mengetahui bagaimana dan dimana potensi aliran sungai yang tepat untuk pembangunan pembangkit tenaga listrik. Volume dan debit aliran sungai dapat diukur secara langsung di lapangan, dengan cara mengukur kecepatan aliran air sungai dan luas penampang basah sungai. Hasil perkalian ke dua besaran tersebut menjadi nilai debit aliran sungai.

Pengukuran kecepatan aliran air dapat menggunakan metode pelampung atau dengan menggunakan alat ukur *current meter*. Untuk pengukuran luas penampang basah sungai menggunakan metode *area velocity*. Setelah memperoleh kedua nilai tersebut, maka nilai debit aliran sungai dapat diketahui dengan persamaan:

$$Q = v \cdot A.$$

Dimana Q = Debit aliran sungai (m³/det)

v = Kecepatan aliran air (m/det)

A = Luas penampang basah sungai (m^2)

Nilai hasil pengukuran dengan menggunakan metode di atas adalah nilai debit aliran sungai yang hanya merepresentasi debit aliran pada saat melakukan pengukuran. Perubahan nilai volume dan kecepatan aliran yang terjadi akibat adanya hujan yang turun pada waktu setelah dilakukan pengukuran tidak dapat teramati. Debit aliran sungai merupakan besaran dengan fungsi waktu. Pada waktu tertentu kadang besar dan waktu lainnya menjadi kecil tergantung input air yang masuk ke sistem sungai.

Keberadaan air sungai ditentukan oleh banyaknya air hujan yang jatuh dalam sistem Daerah Aliran Sungai (DAS). Aspek lain yang juga mempengaruhi banyaknya air sungai adalah komponen dalam sistem DAS yaitu: kondisi tanah, banyaknya tumbuhan (vegetasi) dan morfometri DAS. Komponen-komponen tersebut merupakan parameter yang mempengaruhi karakteristik suatu DAS. Karakteristik DAS dapat berubah sesuai aktivitas manusia yang terjadi dalam lingkungan DAS tersebut. Munculnya lahan terbangun (bangunan gedung, dll), penebangan pohon-pohon dan aktivitas pertanian yang terjadi dalam lingkungan DAS akan mempengaruhi banyaknya air yang masuk (terinfiltrasi dan ter-perkolasi) ke dalam tanah menjadi air tanah.

Aliran air di dalam tanah akibat gaya kapiler akan keluar kembali sebagai mata air. Mata air yang keluar dari dalam tanah

akan mempengaruhi banyaknya air pada suatu tampungan air (sungai, danau, sumur, dll.). Pada saat terjadi hujan air yang mengalir di atas permukaan tanah akan mengalir menuju sungai bercampur dengan aliran air yang keluar dari dalam tanah dan menjadi aliran sungai.

Munculnya lahan terbangun sebagai akibat aktivitas kehidupan manusia akan memperkecil luasan areal resapan air. Air hujan yang jatuh tidak akan teresap ke dalam tanah karena tanah telah tertutup oleh bangunan, jalan atau lainnya yang menutup pori tanah. Air hujan yang jatuh ke bumi akan mengalir sebagai air larian (*runoff*) menuju tampungan air sementara (genangan). Jika air hujan turun dengan volume yang banyak dapat mengakibatkan banjir genangan.

Demikian pula halnya dengan penebangan pohon pada suatu areal DAS dalam jumlah yang banyak. Daun dan batang pohon yang berperan dalam menghambat laju air jatuh ke tanah (*time lag*) dan waktu meresapnya air ke dalam tanah. Air hujan akan banyak menjadi air larian yang mengalir di atas tanah karena waktu resapan terlalu kecil.

yang sering berubah-ubah setiap saat dan perubahan karakteristik DAS sebagai akibat perubahan penggunaan lahan secara langsung akan mempengaruhi nilai volume dan debit aliran sungai. Perubahan nilai volume dan debit aliran sungai sebagai akibat perubahan yang terjadi pada kondisi alam akan sulit

teramati secara langsung. Oleh karenanya dibutuhkan cara tertentu melalui suatu teknik pemodelan aliran sungai.

Pembangkit listrik tenaga air yang ekonomis adalah Pembangkit Listrik Mikro Hidro atau Mini Hidro. Pembangunan pembangkit listrik tersebut hanya memerlukan pembiayaan yang kecil dan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik terutama bagi masyarakat sekitar yang biasanya berada di daerah terpencil yang belum teraliri listrik. Energi penggerak pembangkit tenaga listriknya cukup dengan energi air dari sungai yang kecil (anak sungai), dimana aliran sungai-sungai tersebut banyak melintasi daerah-daerah terpencil.

Pembangunan pembangkit listrik tenaga air sepenuhnya tergantung dari bagaimana potensi volume debit aliran air sungai dan karakteristik wilayah DAS yang mempengaruhi keberadaan aliran sungai. Sungai yang merupakan bagian dari sistem Daerah Aliran Sungai (DAS) memiliki korelasi yang saling mempengaruhi antara satu sama lain dalam sistem DAS. Keberadaan air sungai dipengaruhi langsung oleh unsur air tanah yang dihasilkan dari hujan yang jatuh dalam daerah tangkapan air (*catchmen area*). Unsur-unsur yang saling berkaitan dalam suatu sistem DAS untuk menghasilkan aliran air sungai adalah berupa curah hujan, geomorfologi DAS, morfometri sistem sungai, kondisi tanah, penggunaan dan penutupan lahan/vegetasi, serta unsur manusia sebagai pengguna air di daerah tersebut.

Kondisi sungai yang dipengaruhi oleh karakteristik suatu DAS dan intensitas hujan yang jatuh di wilayah DAS sangat mempengaruhi besarnya kapasitas pembangkitan daya/energi listrik di tempat tersebut. Pembangkit tenaga listrik Mikro/Mini Hidro atau Pembangkit Listrik Tenaga Air pembangunannya tergantung seberapa besar volume dan debit aliran sungai. Semakin besar volume dan debit aliran sungai, maka semakin besar daya/energi listrik yang dapat dibangkitkan.

1.1. Energi Terbarukan

Energi ialah kemampuan melakukan kerja/usaha selama (periode) waktu tertentu. Secara umum energi dapat dirumuskan sebagai berikut (Utomo, 2007):

- Fisika $E = F \times X$
E adalah Energi (Joule)
F adalah gaya (Newton),
X adalah jarak (meter)
- Elektrik $E = P \times t$
P = daya (Watt), dan t adalah waktu (Jam)

Energi dibedakan menjadi 2 macam yaitu energi potensial dan energi kinetik. Energi potensial merupakan energi yang tersimpan dalam suatu massa tertentu terdiri atas energi mekanikal, energi medan listrik, energi medan magnet, energi termal, energi gas dan lain-lain. Energi Kinetik merupakan energi

yang terjadi karena gerak mekanik dari suatu massa dengan kecepatan tertentu (Utomo, 2007).

Berdasarkan klasifikasi yang didasarkan pada rasio (perbandingan) antara waktu yang diperlukan untuk siklus keberadaan suatu sumber daya energi T_E , dengan usia generasi kehidupan (manusia) T_G , maka energi dapat dibedakan menjadi 3 yakni (Utomo, 2007):

1. Energi tak terbarukan (*non rewable energi*) bila:

$$T_E/T_G \cong \infty;$$

T_E adalah sumberdaya energi

T_G adalah kehidupan sepanjang masa

Contoh : energi fosil (minyak dan gas bumi, batubara).

2. Energi terbarukan (*renewable energi*), bila:

$$T_E/T_G < 1$$

Contoh : energi air, energi biomassa, panas bumi dsb.

3. Energi baru dan terbarukan (*new energi*), bila:

$$T_E/T_G \cong 0$$

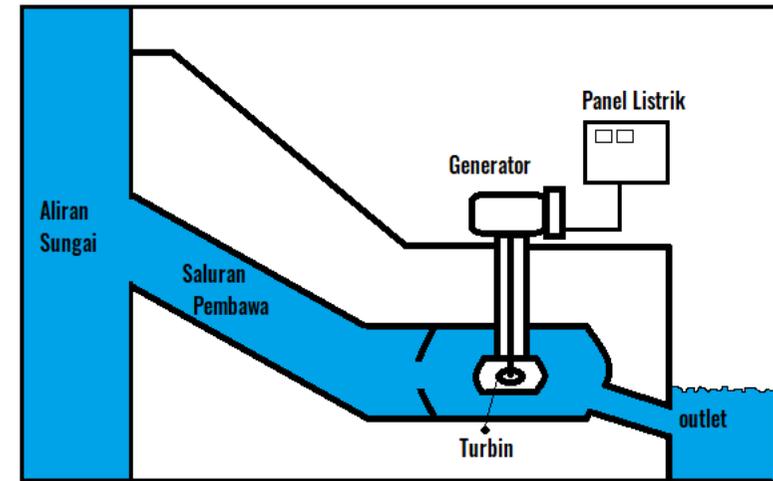
Contoh : energi angin, energi surya

Jenis-jenis sumber energi baru dan terbarukan (Energi air terjun, Energi air kelautan) adalah:

- Energi ombak dan arus laut – mekanik.
- Energi gelombang laut – mekanik.
- Energi pasang surut – mekanik.
- Energi panas laut – termal,

Jenis energi terbarukan lainnya adalah seperti: energi panas bumi, energi surya, energi angin, energi biomassa, dan energi hidrogen.

Contoh konversi energi berupa energi air ke energi mekanik dan menjadi energi listrik adalah seperti pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Prinsip dasar konversi energi air ke energi mekanik dan ke energi listrik

1.2. Energi Air Untuk Pembangkit Listrik Mikro Hidro

Pembangkit listrik mikrohidro adalah pembangkit listrik yang menggunakan energi air (aliran air anak sungai) sebagai energi penggerak generator pembangkit listriknya. Kondisi air yang dapat dimanfaatkan sebagai sumberdaya (*resources*) penghasil listrik memiliki kapasitas aliran dan ketinggian tertentu dari sistem saluran airnya. Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya maka semakin besar energi yang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan tenaga listrik (Ketut, 2009) .

Pembangkit listrik mikrohidro kapasitas dan ketinggian aliran mengacu pada jumlah volume aliran air persatuan waktu (*flow capacity*). Beda ketinggian tempat dari titik pengamatan debit aliran sampai ke bangunan PLTMH dikenal dengan istilah *head*. Mikrohidro juga dikenal sebagai *clean resources* karena pembangkit listrik ini menggunakan sumber daya yang telah disediakan oleh alam dan ramah lingkungan. Dalam praktek penggunaannya pembangkit mikro hidro sama dengan mini hidro. Yang membedakan adalah daya output yang dihasilkan. Mikrohidro daya *output* adalah 100 – 500 kilo watt, dan mini hidro *output* daya listriknya adalah 500 – 1000 kilo watt (Arismunandar dan Kuwahara, 2000).

Macaringue (2009), menunjukkan bahwa persyaratan utama yang harus dipertimbangkan ketika membangun pembangkit listrik tenaga mikro hidro adalah:

1. Curah hujan dan limpasan yang tersedia sepanjang waktu.
2. Memiliki ketinggian jatuh air (*head*)
3. Saluran air yang akan menjadi energi penggerak turbin
4. Power house sebagai rumah turbin dan peralatan pembangkit listrik lainnya
5. Saluran pembuangan air.

Secara teknis mikrohidro memiliki tiga komponen utama yaitu: aliran air (merupakan sumber energi penggerak); turbin

(menghasilkan energi pemutar generator); dan generator (menghasilkan energi listrik).

Air yang mengalir dengan kapasitas dan ketinggian tertentu disalurkan menuju sistem turbin (*power house*). Turbin berputar menggerakkan generator dan generator akan menghasilkan energi listrik sesuai kapasitasnya. Listrik yang dihasilkan disalurkan ke pengguna dengan terlebih dahulu diatur pada panel control pembangkit listrik.

Kebanyakan PLTMH dibangun dengan sistim aliran air sungai (*runoff river*), dimana air sungai dialirkan pada saluran yang dibuat dengan konstruksi tertentu untuk menghasilkan energi aliran air yang besar untuk memutar turbin. Biaya pembangunan *runoff river* lebih ekonomis dibandingkan dengan sistim penampungan air (*reservoir*) yang memerlukan bedungan dan area genangan yang luas.

Salah satu contoh bangunan Pembangkit Listrik Mikro Hidro di Kabupaten Sigi Sulawesi Tengah disajikan pada Gambar 1.2.



(www.bisnis-kti.com, 2012)

Gambar 1.2. Bangunan pembangkit listrik mikro hidro

BAB II

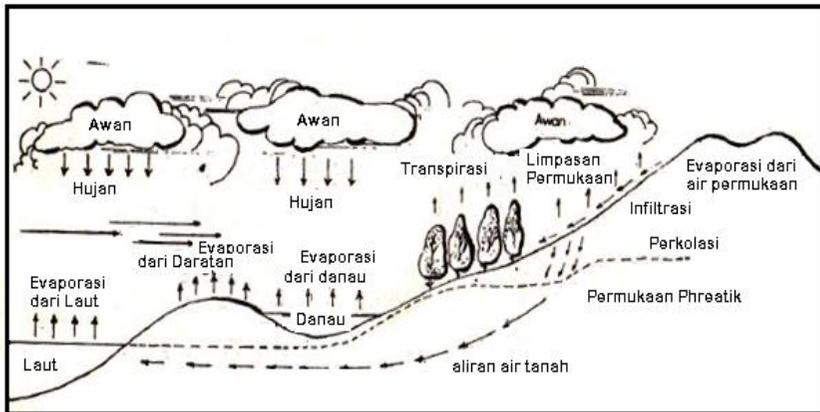
HIDROLOGI DAERAH ALIRAN SUNGAI

2.1. Siklus Hidrologi

Secara keseluruhan banyaknya air di planet bumi relatif tetap dari masa ke masa. Air di bumi mengalami suatu siklus melalui serangkaian peristiwa yang berlangsung terus-menerus. Di mana kita tidak tahu kapan dan dari mana berawalinya dan kapan pula akan berakhir. Serangkaian peristiwa tersebut dinamakan siklus hidrologi (Sri-Harto, 1993).

Siklus hidrologi adalah suatu rangkaian proses yang terjadi dengan air yang terdiri dari penguapan, presipitasi, infiltrasi dan pengaliran keluar (*outflow*). Air menguap ke udara dari permukaan tanah dan laut. Penguapan dari daratan terdiri dari evaporasi dan transpirasi. Evaporasi merupakan proses menguapnya air dari permukaan tanah, sedangkan transpirasi adalah proses menguapnya air dari tanaman. Uap yang dihasilkan mengalami kondensasi dan dipadatkan membentuk awan-awan yang nantinya dapat kembali menjadi air dan turun sebagai presipitasi. Sebelum tiba di permukaan bumi presipitasi tersebut sebagian langsung menguap ke udara, sebagian tertahan oleh tumbuh-tumbuhan (*intersepsi*) dan sebagian lagi mencapai permukaan tanah. Presipitasi yang tertahan oleh tumbuh-tumbuhan sebagian akan diuapkan dan sebagian lagi mengalir melalui daun (*trough flow*) mengalir melalui dahan (*steam flow*) dan akhirnya sampai ke permukaan tanah (Sri-Harto, 1993).

Air yang sampai ke permukaan tanah sebagian akan terinfiltrasi dan sebagian lagi mengisi lekuk-lekuk permukaan tanah, kemudian mengalir ketempat yang lebih rendah, masuk ke sungai-sungai dan akhirnya masuk ke laut. Dalam perjalanan menuju ke laut sebagian akan mengalami penguapan. Air yang masuk ke dalam tanah sebagian akan keluar lagi menuju sungai yang disebut dengan aliran intra (*interflow*). Sebagian lagi akan terus turun dan masuk lagi kedalam air tanah yang keluar sedikit demi sedikit dan masuk ke dalam sungai sebagai aliran bawah tanah (*groundwater flow*), dan begitu seterusnya. Proses mengenai siklus hidrologi dapat dilihat pada Gambar 2.1.



(Soemarto,1999)

Gambar 2.1. Daur Hidrologi

maka air yang masuk selalu sama dengan yang keluar. Hal ini dikenal dengan istilah neraca air. (Soemarto, 1999)

2.2. Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah aliran sungai (DAS), dalam istilah asing disebut *catchmen area*, *river basin*, atau *watershed*. DAS adalah suatu wilayah daratan yang secara topografi dibatasi oleh punggung-punggung bukit yang menampung dan menyimpan air hujan untuk kemudian menyalurkan hujan yang jatuh di atasnya baik dalam bentuk aliran permukaan, aliran bawah permukaan, dan aliran bawah tanah ke sungai dan akhirnya bermuara ke danau atau laut. Wilayah daratan tersebut dinamakan Daerah Tangkapan Air (DTA atau *catchmen area*) yang merupakan suatu ekosistem dengan unsur utamanya terdiri atas sumberdaya alam (tanah, air, dan vegetasi) dan sumberdaya manusia sebagai pemanfaat sumberdaya alam (Asdak, 2007).

DAS dapat diumpamakan sebagai suatu cekungan yang miring dari hulu ke hilir, sehingga semua air hujan yang jatuh pada batas topografi akan mengalir ke sungai. Wilayah DAS dibedakan menjadi tiga, yaitu DAS kecil (luas kurang dari 250 ha), DAS sedang (luas 250 – 500.000 ha), dan DAS besar (lebih dari 500.000 ha) (Gorgens, 1983). Dalam pendefinisian DAS pemahaman akan konsep daur hidrologi sangat diperlukan terutama untuk melihat masukan berupa curah hujan yang selanjutnya didistribusikan melalui beberapa cara seperti diperlihatkan pada gambar daur hidrologi di atas.

Konsep daur hidrologi DAS menjelaskan bahwa air hujan langsung sampai ke permukaan tanah untuk kemudian terbagi menjadi air larian, evaporasi dan air infiltrasi, yang kemudian akan mengalir ke sungai sebagai debit aliran (Ponce, 1989). DAS yang sangat luas bias terdiri dari beberapa sub DAS, dan sub DAS dapat terdiri dari beberapa sub-sub DAS, tergantung banyaknya anak sungai yang ada, yang merupakan bagian dari suatu sistem sungai utama. DAS merupakan ekosistem yang terdiri dari beberapa macam komponen dan terjadi kesinambungan dinamik antara komponen yang merupakan masukan (*input*) dan komponen yang merupakan keluaran (*output*), di mana keadaan atau pengaruh yang berlaku pada salah satu bagian di dalamnya akan mempengaruhi wilayah secara keseluruhan (Chow *et al.*, 1988).

Menurut Sosrodarsono dan Takeda (1978), berdasarkan perbedaan debit banjir yang terjadi, bentuk DAS dapat dibedakan menjadi tiga bentuk, yaitu:

1). DAS bentuk bulu burung

Suatu daerah pengaliran yang mempunyai jalur daerah di kiri kanan sungai utama, dimana anak-anak sungai mengalir ke sungai utama. Daerah pengaliran bentuk bulu burung mempunyai debit banjir yang kecil, oleh karena waktu tiba banjir dari anak-anak sungai itu berbeda-beda. Sebaliknya jika terjadi banjir, akan berlangsung dengan waktu yang agak lama.

2). DAS bentuk radial

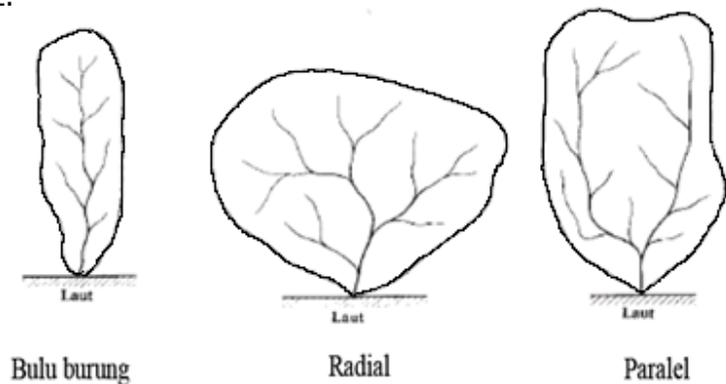
Daerah pengaliran yang berbentuk kipas atau lingkaran dan dimana anak-anak sungainya mengkonsentrasi kesutau titik secara radial. Daerah pengaliran semacam ini mempunyai banjir yang besar di dekat titik pertemuan anak-anak sungai.

3). DAS bentuk paralel

Daerah pengaliran ini mempunyai corak, dimana dua jalur daerah pengaliran yang bersatu di bagian hilir. Banjir akan terjadi di sebelah hilir titik pertemuan sungai.

Ketiga bentuk DAS tersebut di atas seperti pada Gambar

2.2.



Sosrodarsono dan Takeda (1978)

Gambar 2.2. Berbagai macam bentuk DAS

DAS adalah kawasan yang dibatasi oleh pemisah topografi (berupa igir) yang menangkap hujan, menyimpan, dan

mengalirkan air hujan melalui system sungai dan keluar kawasan tertentu melalui titik pelepasan sungai atau *single outlet*.

Morfometri (bentuk dan ukuran) DAS, sangat berpengaruh terhadap bentuk hidrograf aliran. Identifikasi morfometri DAS yang penting untuk menghasilkan hidrograf aliran adalah menyangkut (Asriningtyas, 2007):

1. Luas DAS

DAS dibatasi oleh igir pegunungan yang berfungsi sebagai batas (*river divide*) dan akhirnya mengalirkan air hujan yang bertemu pada satu outlet. Akibatnya, semakin luas suatu DAS, hasil akhir (*water yield*) yang diperoleh akan semakin besar, karena hujan yang ditangkap juga semakin banyak.

2. Titik berat (*center of gravity*)

Titik pusat DAS atau titik pusat gaya berat (*center of gravity*) merupakan titik imajiner yang dianggap sebagai pusat DAS. Penentuan titik ini diperlukan untuk penghitungan model hidrologi suatu DAS, misalnya dengan metoda HSS Gama I. Penentuan titik berat dapat dilakukan dengan cara manual dan digital. Penentuan dengan cara manual yaitu dengan menggunakan grid (hampir sama dengan menghitung luas DAS). Pada kertas grid sumbu Y merupakan grid vertikal dan sumbu X merupakan grid horizontal. Titik berat DAS adalah rata-rata jumlah perkalian antara sumbu X dengan jumlah noktah pada tiap jalur

sumbu (dan juga sumbu y), yang termasuk ke dalam area DAS dibagi jumlah noktah, dengan menggunakan rumus:

$$\bar{x} = \frac{\sum (x_i \cdot n_{x_i})}{\sum n}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum (x_i \cdot n_{y_i})}{\sum n}$$

keterangan:

n = jumlah titik grid dalam DAS

n_{xi} = jumlah titik potong menurut sumbu x dalam DAS

n_{yi} = jumlah titik potong menurut sumbu y dalam DAS

i = nomor grid (1,2,3 ...dst)

3. Panjang sungai utama (L) dan panjang sungai sampai pada titik berat (Lca).

Panjang sungai utama diukur mulai dari outlet sungai ke ujung DAS di hulunya. Apabila terdapat perpotongan sungai maka digunakan cara horton yaitu:

- Apabila sudut yang terbentuk sama, maka sungai utama adalah sungai yang paling panjang.
- Apabila sudut yang terbentuk tidak sama, maka sungai utama adalah yang memiliki sudut terkecil.

- c. Panjang sungai sampai pada titik berat (L_c) adalah panjang sungai yang diukur mulai dari titik outlet menyusuri sungai utama sampai ke titik berat (*center of gravity*).

4. Kemiringan Sungai

Kemiringan sungai dapat dihitung dengan menggunakan cara *average slope* dengan menggunakan persamaan:

$$S = \frac{H}{L}$$

dalam hal ini:

S = kemiringan sungai

L = Panjang sungai Utama

H = beda tinggi antara outlet DAS dengan hulu DAS.

5. Kemiringan DAS

Kemiringan DAS rata-rata (*basin slope*) ditetapkan dengan analisa garis kontur. Pada daerah/wilayah yang mempunyai total panjang garis kontur makin panjang maka kemiringan DAS akan lebih besar dari pada total panjang garis kontur yang pendek. Kemiringan DAS dihitung dengan persamaan (Chow *et al.*, 1988):

$$S_b = mh/A,$$

Keterangan:

S_b = *basin slope*

m = total panjang garis kontur (meter)

h = kontur interval (meter)

A = Luas DAS (m^2)

6. Luas DAS daerah hulu (A_u), Lebar garis pada 0,75 L (W_u) dan Lebar garis pada 0,25 L (W_l).

Daerah DAS hulu ditentukan dengan membuat garis lurus yang tegak lurus dengan sungai utama serut melewati titik berat DAS sehingga DAS terbagi menjadi dua bagian yaitu wilayah hulu dan wilayah hilir. W_u diukur mulai dari outlet DAS sampai dengan panjang 0,75 kali dari keseluruhan panjang sungai utama, sedangkan W_l diukur 0,25 kali dari keseluruhan panjang sungai utama.

7. Panjang sungai orde 1 (L_1)

Adalah menghitung panjang semua sungai yang dikategorikan sebagai sungai orde 1. Sungai orde 1 adalah sungai paling ujung dan tidak memiliki percabangan lagi.

8. Panjang semua sungai (L_i)

Adalah menghitung panjang seluruh sungai yang ada pada cakupan DAS, baik yang merupakan orde 1, orde 2 dan seterusnya.

9. Jumlah sungai orde 1 (ST_1)

Merupakan jumlah seluruh sungai yang termasuk katagori orde 1.

10. Jumlah semua sungai (St_i)

Merupakan jumlah seluruh sungai yang ada dalam cakupan wilayah suatu DAS.

Sungai mempunyai fungsi untuk mengumpulkan curah hujan dalam suatu daerah tertentu dan mengalirnya ke laut. Daerah pengaliran merupakan suatu wilayah dimana terdapat sungai utama dan anak-anak sungai mengalirkan airnya ke sungai tersebut. Luas daerah pengaliran dapat diperkirakan melalui peta topografi. Luas daerah pengaliran berpengaruh terhadap besarnya debit yang terjadi. Semakin besar daerah pengaliran maka debit pengaliran akan semakin besar.

2.3. Analisis citra penginderaan jauh untuk penentuan karakteristik DAS

Topografi (Peta Rupabumi) pada umumnya tersedia dalam berbagai ukuran skala, baik yang berskala besar maupun berskala kecil. Untuk proses perencanaan biasanya menggunakan peta standar yaitu peta rupabumi skala 1 : 25.000. Citra satelit seperti Landsat, SPOT, Ikonos atau Quick bird dengan skala yang lebih detail dapat dipakai untuk melengkapi peta dasar yang ada (Lillesand dan Chipman, 2004).

Peta rupabumi adalah peta dasar yang umum digunakan untuk menentukan persen lereng/kelas lereng, arah lereng, serta ketinggian. Peta kelerengan dapat dihasilkan dari peta rupa bumi dengan cara perhitungan garis kontur dengan menggunakan

rumus tertentu untuk mengelompokkan kelas-kelas lereng tertentu. Persentase kelas lereng umumnya dipakai oleh para perencana (*planners*) di dalam perencanaan lahan. Peta kelerengan tidak saja mengelompokkan bentuk-bentuk bentangalam, akan tetapi dapat untuk mengetahui informasi yang berkaitan dengan arah lereng yang berpengaruh terhadap iklim mikro, hidrologi, jenis vegetasi dan kestabilan lahan (Yustina dkk., 2005).

Pengelompokan kelas lereng sangat berpengaruh terhadap peruntukan lahan. Pada Tabel 2.2 diperlihatkan karakteristik lahan dan kesesuaian lahan didasarkan atas kelas lereng. Kelas lereng antara 0-5% adalah bentuk bentangalam (*terrain*) dataran yang peruntukan lahannya sesuai untuk pemukiman atau pertanian, namun bentuk bentangalam yang berupa dataran memiliki potensi terhadap genangan air dan drainase yang kurang baik, sedangkan kelas lereng 30-50% merupakan bentuk bentangalam yang terjal. Bentuk bentangalam semacam ini hanya cocok untuk permukiman yang bersifat *cluster* (terbatas) dan sebagai areal wisata serta baik untuk lahan hutan (Arsyad, 2000).

Tabel 2.1. Karakter dari kelas lereng terhadap peruntukan kesesuaian lahan

Kelas Lereng	Karakter dan Peruntukan Kesesuaian Lahan
0 – 5 %	Lahan bertopografi datar, sangat sesuai untuk dikembangkan menjadi areal permukiman dan pertanian. Sebagian areal berpotensi terhadap genangan banjir dan sebagian berpotensi terhadap drainase yang buruk.
5 - 15%	Lahan bertopografi landai., kurang sesuai untuk pembangunan lapangan terbang atau areal industri berat, Irigasi yang terbatas namun baik untuk pengembangan pertanian tanaman keras. Lahan yang sesuai untuk dikembangkan menjadi areal permukiman, perkantoran, dan areal bisnis dengan drainase baik.
15 -30%	Lahan bertopografi bergelombang, kurang sesuai untuk areal pertanian karena masalah erosi, namun demikian lahan dengan kelerengan hingga 20% dapat dimanfaatkan untuk areal pertanian dengan jenis tanaman tertentu. Lahan ini juga baik untuk pengembangan industri ringan, kompleks perumahan, dan untuk fasilitas rekreasi.

30 –50%	Lahan bertopografi terjal, cocok untuk dikembangkan menjadi tempat tinggal secara cluster, pariwisata dengan intensitas rendah dan lahan yang cocok untuk hutan dan padang rumput.
> 50%	Lahan bertopografi sangat terjal: tempat yang sesuai untuk kehidupan satwa liar dan tanaman hutan lindung serta padang rumput yang terbatas, tidak sesuai untuk areal real estate karena topografi yang terlalu terjal

Hal yang sangat penting dari peta tanah adalah informasi mengenai jenis dan tipe tanah yang terdapat di dalam lahan tersebut. Ada dua hal yang penting dalam klasifikasi tanah, yaitu: (1) Tanah untuk kepentingan pertanian, seperti jenis tanah, moisture tanah, ketebalan lapisan tanah, water table, porositas tanah, resistensi terhadap erosi. dan (2) Tanah untuk kepentingan konstruksi (daya dukung tanah), seperti: porositas tanah, permeabilitas tanah, sifat fisik tanah, plastisitas, mekanika tanah, dan keterbatasan terhadap penyaring septik tank.

Peta Tutupan Lahan adalah peta yang berisi informasi baik vegetasi maupun hasil budidaya manusia. Biasanya cara yang paling mudah untuk memetakan *landcover* melalui interpretasi citra satelit Landsat, SPOT, Ikonos, *Quickbirds*, Foto Udara, dsb.,

dengan cara mendeliniasi batas batas dari jenis tutupan lahan (Yustina dkk., 2007).

Hasil interpretasi harus diikuti dengan *ground-check* di lapangan secara sampling. Bagi perencana, peta tutupan lahan sangat penting dan menjadi pertimbangan di dalam penetapan peruntukan lahan, terutama dalam konversi lahan dan perhitungan biaya *land clearing*.

Kemiringan lereng merupakan ukuran kemiringan lahan relative terhadap bidang datar yang secara umum dinyatakan dalam persen atau derajat. Kecuraman lereng, panjang lereng dan bentuk lereng semuanya akan mempengaruhi besarnya erosi dan aliran permukaan. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian Bogor mengelaskan lereng menjadi seperti Tabel 2.2.

Tabel 2.2, Klasifikasi lereng

KEMIRINGAN (%)	KLASIFIKASI	KELAS
0 – 3	Datar	A
3 – 8	Landai Atau Berombak	B
8 – 15	Agak Miring	C
15 – 30	Miring	D
30-45	Agak Curam	E
45-65	Curam	F
>65	Sangat Curam	G

Sumber: Puslittanak (2003).

BAB III.

HUJAN

Hujan terjadi sebagai akibat adanya massa udara yang menjadi dingin, mencapai suhu di bawah titik embunnya dan terdapat inti higroskopik yang dapat memulai pembentukan melekul air. Apabila massa udara terangkat ke atas dan menjadi dingin karena ekspansi adiabatic, dan mencapai ketinggian yang memungkinkan terjadinya kondensasi, maka akan terbentuk awan. Hujan hanya akan terjadi apabila molekul-molekul air hujan sudah mencapai ukuran sekitar 1-10 mikron (Barry, 1971 dalam Sri-Harto, 2000).

Tipe hujan dibedakan menurut cara naiknya udara ke atas yakni sebagai berikut (Triatmojo, 2010):

1. Hujan konvektif

Merupakan hujan yang terjadi akibat pemanasan intensif udara yang berada di dekat permukaan tanah yang menyebabkan massa udara berkurang sehingga udara basah naik ke atas dan mengalami pendinginan/kondensasi menjadi butiran air yang turun ke bumi sebagai hujan. Hujan konvektif bersifat setempat, mempunyai intensitas tinggi dan durasi yang singkat.

2. Hujan siklonik

Merupakan hujan yang terjadi akibat massa udara panas yang relatif ringan bertemu dengan massa udara yang relatif berat, maka udara tersebut akan bergerak di atas udara dingin.

Udara yang bergerak ke atas mengalami pendinginan/kondensasi menjadi butiran air dan turun ke bumi sebagai hujan. Hujan siklonik mempunyai sifat tidak terlalu lebat dan berlangsung dalam waktu lebih lama.

3. Hujan orografis

Merupakan hujan yang terjadi akibat udara lembab yang tertiuap angin melintasi daerah pegunungan bergerak naik ke atas membentuk awan dan mengalami pendinginan/kondensasi menjadi butiran air, turun ke bumi sebagai hujan. Sisi gunung yang dilalui udara tersebut banyak mendapatkan hujan atau biasa disebut daerah lereng hujan. Sisi lain yang dilalui udara kering/uap air biasanya hujannya lebih sedikit atau disebut lereng bayangan hujan. Hujan orografis mempunyai sifat berubah ubah tergantung arah angin dan tekanan udara. Hujan yang terjadi di daerah pegunungan (hulu DAS) merupakan pemasok air tanah, danau, dan sungai.

Secara konseptual ditunjukkan bahwa hujan jatuh pada permukaan vegetasi, permukaan tanah dan badan air (sungai dan danau) suatu DAS. Pada sistem hidrologi alami, banyak air hujan kembali ke atmosfer melalui evaporasi dari vegetasi, permukaan tanah, badan air, serta melalui transpirasi dari vegetasi. Selama kejadian hujan lebat, proses evaporasi dan transpirasi terbatas. Sebagian hujan yang jatuh pada vegetasi melalui dedaunan, batang ranting dan batang pohon menuju ke permukaan tanah,

dimana air ini bergabung dengan air hujan yang jatuh secara langsung pada permukaan tanah. Di permukaan tanah, air bisa tertahan tergantung pada tipe tanah, penutup tanah, kelembapan sebelumnya dan karakteristik DAS lainnya, serta sebagian terinfiltrasi ke dalam tanah (Barry, 1971 dalam Sri-Harto, 2000).

Air yang terinfiltrasi disimpan sementara pada lapisan tanah atas, dan sebagian lagi masuk (terperkolasi) pada bagian tanah yang lebih dalam dan tersimpan sebagai air artesis. Air yang tersimpan akan naik lagi ke permukaan akibat gaya kapilaritas, bergerak secara horizontal sebagai *interflow* hanya di bawah lapisan permukaan tanah. Air yang bergerak menjadi aliran antara menuju ke sungai. Air pada akuifer bergerak secara lambat dan menuju ke sungai sebagai *baseflow*. Air yang tidak tertahan atau terinfiltrasi bergerak sebagai *overlandflow* menuju ke sungai. Sungai merupakan titik gabungan aliran air atau limpasan (*runoff*). Hasil aliran sungai adalah total seluruh aliran keluaran suatu DAS (Sujono, 1999).

Hujan merupakan komponen masukan yang paling penting dalam suatu sistem hidrologi. Hujan yang jatuh pada suatu tempat mempunyai karakteristik tertentu yang meliputi: sebaran keruangan, intensitas hujan, lama hujan dan kualitas air hujan (Hadi, 2003). Hujan yang jatuh di permukaan bumi merupakan curah hujan dinyatakan sebagai ketebalan air hujan (biasanya dalam satuan mm), dianggap terdistribusi secara merata pada seluruh daerah tangkapan air. Intensitas hujan

adalah jumlah curah hujan dalam suatu satuan waktu (dalam satuan mm/jam atau mm/hari) yang sering disebut hujan jam-jaman atau hujan harian (Triatmojo, 2010).

Curah hujan tidak bertambah seiring dengan waktu. Semakin lama durasi hujan semakin kecil karena berkurangnya hujan yang jatuh ke bumi. Keadaan hujan berdasarkan intensitas hujan di bagi atas beberapa bagian seperti digambarkan oleh Sosrodarsono dan Takeda (1978) pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Keadaan Hujan dan Intensitas Hujan

Keadaan Hujan	Intensitas Hujan (mm/jam)	
	1 Jam	24 Jam
Hujan sangat ringan	< 1	< 5
Hujan ringan	1-5	5-20
Hujan normal	5-10	20-50
Hujan lebat	10-20	50-100
Hujan sangat lebat	>20	> 100

Sumber: Sosrodarsono dan Takeda (1978)

Intensitas hujan, lama hujan dan penyebarannya akan mempengaruhi banyaknya air yang tertimbun dalam simpanan DAS (*catchment area*), mempengaruhi infiltrasi dan limpasan, yang semuanya akan berpengaruh terhadap erosi dan sumberdaya air secara keseluruhan. Penyebaran hujan pada suatu daerah dapat dipantau dengan pemasangan sukat hujan yang

tersebar mewakili daerah yang dikaji. Sebaran hujan mempunyai karakteristik tertentu, yaitu cenderung mempunyai sebaran yang mengelompok (*clustered*). Oleh karena itu kajian mengenai sebaran hujan tergantung pada luasan daerah. Makin kecil luasan daerah kajian, makin homogen sebaran hujannya (Neal *et al.*, 1992).

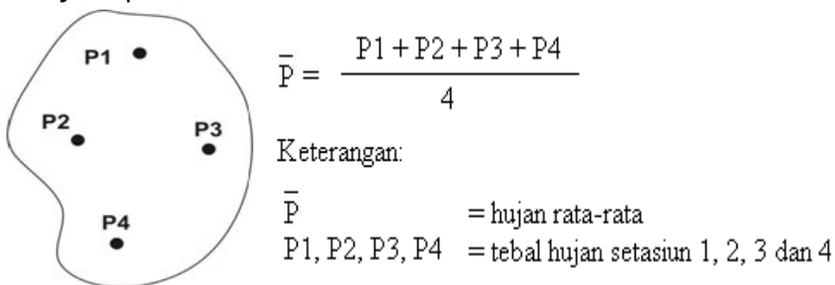
3.2. Distribusi curah hujan dalam Daerah Aliran Sungai

Pada umumnya pusat dari curah hujan itu tidak diam, namun bergerak karena adanya proses alamiah pada proses hujan. Jika suatu durasi hujan lebat bergerak sepanjang sistem aliran sungai akan sangat berpengaruh pada lamanya limpasan permukaan dan juga lokasi terjadinya limpasan permukaan. Hal ini menyebabkan limpasan permukaan tidak akan terjadi pada satu titik saja, sama halnya dengan daerah genangan. Jika distribusi curah hujan berubah untuk selang waktu tertentu, akan menyebabkan perubahan letak dari daerah yang memiliki limpasan permukaan besar, dan akan mengakibatkan perubahan tempat terjadinya genangan sesuai dengan distribusi curah hujan tersebut terjadi. Masing-masing daerah kemiringan ini akan memberikan kontribusi yang berbeda terhadap nilai koefisien limpasan permukaan (C), dan akhirnya akan berpengaruh terhadap jumlah limpasan permukaan yang terjadi di daerah tersebut (Sosrodarsono dan Takeda, 1978).

Curah hujan wilayah/daerah merupakan curah hujan rata-rata pada daerah yang bersangkutan yang diperlukan untuk menyusun suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir. Cara-cara perhitungan curah hujan daerah dari pengamatan curah hujan di beberapa titik adalah dengan cara (Sosrodarsono dan Takeda, 1978): (1) Cara rata-rata aljabar, (2) Cara poligon thiennes, dan (3) Cara isohiet.

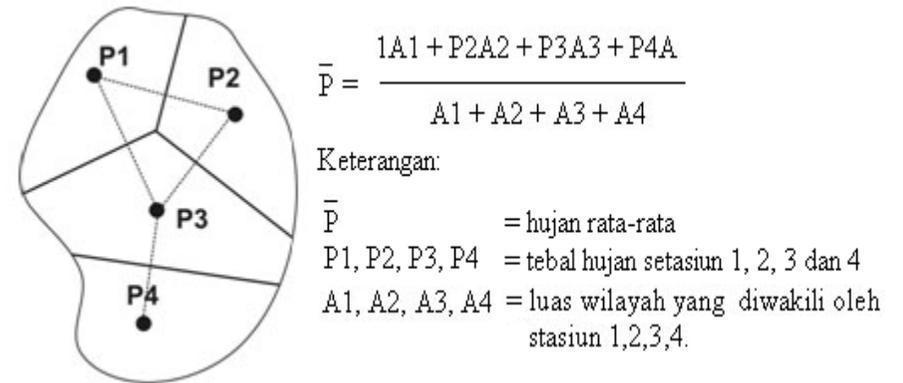
1). Cara Rata-rata Aljabar

Cara ini merupakan cara yang paling sederhana yaitu hanya dengan membagi rata pengukuran pada semua stasiun hujan dengan jumlah stasiun dalam wilayah tersebut. Sesuai dengan kesederhanaannya maka cara ini hanya disarankan digunakan untuk wilayah yang relatif mendatar dan memiliki sifat hujan yang relatif homogen dan tidak terlalu kasar seperti disajikan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2, Pengukuran hujan rata-rata Aljabar

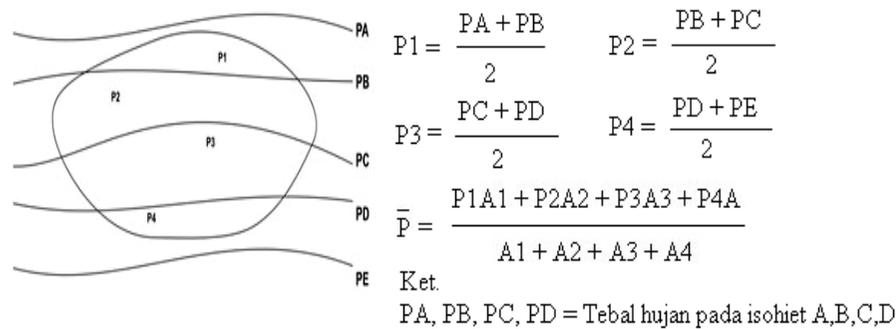
Cara ini selain memperhatikan tebal hujan dan jumlah stasiun, juga memperkirakan luas wilayah yang diwakili oleh masing-masing stasiun untuk digunakan sebagai salah satu faktor dalam menghitung hujan rata-rata daerah yang bersangkutan. Poligon dibuat dengan cara menghubungkan garis-garis berat diagonal terpendek dari para stasiun hujan yang ada seperti disajikan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3, Pengukuran hujan rata-rata Poligon Thiessen

3). Cara Isohiet

Isohiet adalah garis yang menghubungkan tempat-tempat yang mempunyai tinggi hujan yang sama. Metode ini menggunakan isohiet sebagai garis-garis yang membagi daerah aliran sungai menjadi daerah-daerah yang diwakili oleh stasiun-stasiun yang bersangkutan, yang luasnya dipakai sebagai faktor koreksi dalam perhitungan hujan rata-rata seperti Gambar 3.4.



Gambar 3.4, Pengukuran hujan rata-rata isohiet

3.3. Proses hujan menjadi aliran sungai

Secara konseptual hujan jatuh pada permukaan tanah, vegetasi, badan air (sungai dan danau) pada suatu DAS. Pada sistem hidrologi alami banyak juga hujan yg jatuh ke bumi kembali lagi ke atmosfer melalui evaporasi dari vegetasi, permukaan tanah, badan air atau melalui transpirasi dari vegetasi. Selama kejadian hujan lebat, proses evaporasi dan transpirasi terbatas.

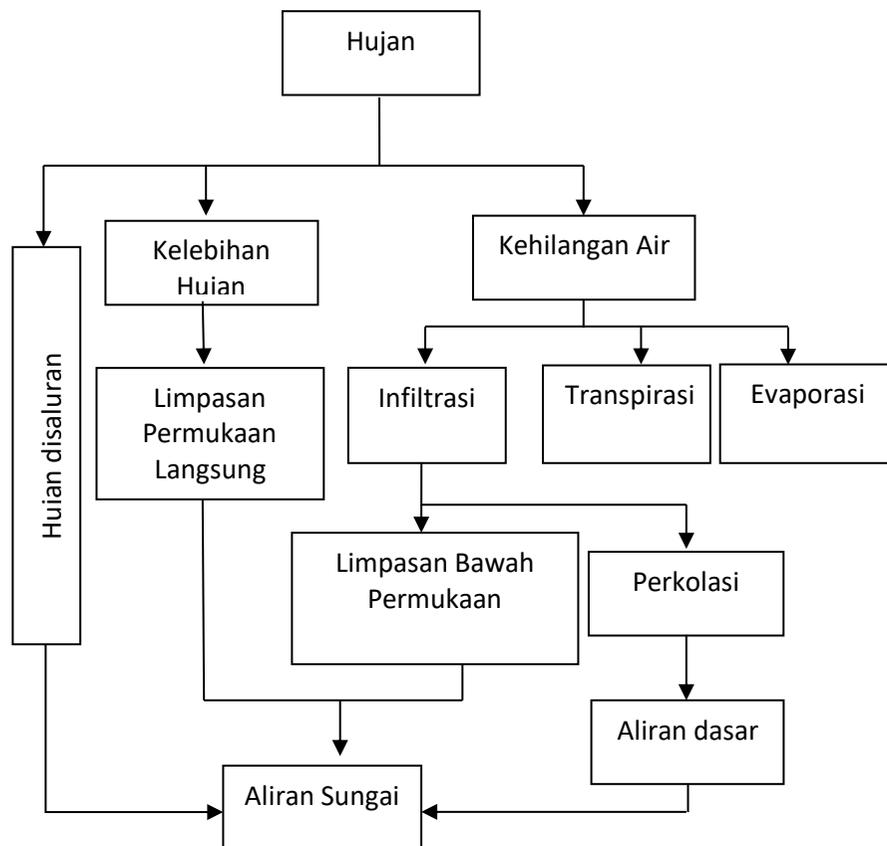
Sebagian air yang jatuh pada vegetasi melalui dedaunan atau batang, ranting menuju permukaan tanah dan akan bergabung dengan air hujan yang jatuh ke permukaan tanah. Air akan masuk ke dalam lapisan tanah atas (infiltrasi) dan masuk ke lapisan bagian bawah (perkolasi), atau menjadi aliran langsung di atas tanah (*runoff*). Air yang terinfiltrasi akan mengalir sebagai *interflow* atau sebagai *overlandflow* karena adanya gaya kapilaritas dan bergerak ke sungai atau badan air lainnya. Air yang

terperkolasi akan mengalir ke akuifer air bawah tanah dan sebagian secara lambat mengalir sebagai *baseflow* ke sungai.

Sungai merupakan titik gabungan limpasan hujan yang jatuh secara langsung pada badan air, aliran antara, dan aliran dasar. Hasil aliran sungai adalah total aliran keluaran suatu DAS (Seyhan, 1997). setiap model hidrologi hendaknya mampu mengikuti seluruh proses pengubahan hujan menjadi aliran dalam daur hidrologi atau proses hujan menjadi aliran pada suatu DAS seperti disajikan pada Gambar 3.5.

3.4. Hujan efektif

Hujan efektif adalah bagian dari hujan yang menjadi limpasan langsung (*direct runoff*) pada permukaan tanah. Hujan efektif ini adalah sama dengan hujan total yang jatuh di permukaan tanah dikurangi dengan kehilangan air. Kehilangan air yang juga sering sebagai abstraksi (*abstraction*) meliputi air yang hilang karena terinfiltrasi, tertahan di dalam cekukan-cekukan permukaan (*depression storage*), dan karena penguapan. Untuk hujan deras yang terjadi dalam waktu singkat, maka penguapan dapat diabaikan (Ponce, 1989). Hujan lebih besar dari 10 mm sudah merupakan hujan deras, sehingga terdapat kemungkinan mengakibatkan banjir (Soemarto, 1999).



(Seyhan, 1997, dengan modifikasi)

Gambar 3.5 Proses hujan menjadi aliran pada suatu DAS

Hujan yang jatuh di permukaan tanah merupakan fungsi waktu yang biasanya dinyatakan dalam bentuk histogram. Histogram hujan efektif diperoleh dengan mengurangi

kehilangan air terhadap histogram hujan total. Histogram hujan efektif sangat penting dalam analisis hubungan hujan limpasan, dan untuk mendapatkan hujan efektif perlu dicari besarnya kehilangan air (Triatmojo, 2010). Salah satu cara untuk mencari kehilangan air guna menghitung aliran langsung adalah dengan menggunakan metode ϕ indeks. Nilai ϕ indeks adalah laju kehilangan air yang disebabkan karena infiltrasi, tampungan permukaan dan penguapan.

$$\phi_{\text{Indeks}} = \frac{F}{T_r} = \frac{P-Q}{T_r} \dots\dots\dots (3.1)$$

dengan F = Infiltrasi total
 P = Hujan total
 Q = Aliran permukaan total
 Tr = Waktu terjadinya hujan

BAB IV AIR TANAH DAN ALIRAN

4.1. Simpanan Air dalam Tanah

Secara umum, tanah yang berkembang telah menjadi beberapa lapisan. Lapisan tanah disebut horizon, dan hanya dapat terlihat di lapisan tanah yang tersingkap. Secara umum terdapat empat lapisan horizon dalam profil tanah. Ketebalan lapisan bervariasi tergantung lokasi dan kondisi. Dalam kondisi 'terganggu' tidak semua horizon akan ada. Di bagian atas adalah horizon 'O' yang terdiri dari bahan organik seperti serasah dedaunan di permukaan atas. Sementara pada kedalaman lebih rendah semua tanda-tanda struktur vegetasi telah hancur oleh dekomposisi. Bahan organik yang membusuk atau humus dapat memperkaya tanah dengan nutrient (nitrogen, kalium) dan mendukung terbentuknya struktur tanah (pengukatan partikel) sehingga meningkatkan retensi kelembaban tanah. Lapisan ini memberikan pengaruh besar terhadap limpasan permukaan (*surface runoff*), perkolasi dan evaporasi (Soerianegara, 1978).

Di bawah lapisan O terdapat humus atau horizon 'A' yang menandai awal dari tanah mineral. Horizon A adalah lapisan tipis (biasanya kurang dari 30 cm) terdapat akar yang paling banyak dan banyak aktivitas biologis. Di bawah horizon A adalah horizon 'B' atau disebut sub-tanah. Horizon B biasanya berwarna terang, padat dan mengandung sedikit bahan organik. Horizon sub-sub tanah adalah zona akumulasi yang terbentuk karena sebagian besar bahan pencucian dari humus menumpuk di sini. Lapisan ini dapat bervariasi dalam ketebalan dari beberapa centimeter hingga

satu meter atau lebih. Horizon 'C' terletak di bawah horizon sub-tanah dan disebut bahan induk. Bahan induk adalah bahan asli dari tanah yang telah berkembang. Horizon induk memiliki komposisi berupa pasir, kerikil, batu besar dalam berbagai ukuran. Horizon C memiliki ciri khas pengatusan buruk. Horizon bawah lapisan bahan induk atau terbawah adalah horizon 'D' yang disebut sebagai *badrock*. Horizon D dapat ditemukan pada singkapan profil tanah di daerah pegunungan. Karakteristik horizon D adalah drainase yang buruk bahkan ada yang kedap air (*impermeable*) (Sutanto, 2005).

Jumlah air maksimum yang dapat disimpan dalam tanah ditentukan oleh porositas (persentase volume tanah yang berupa pori-pori terhadap volume totalnya). Dalam kondisi kandungan maksimum ini tanah disebut dalam keadaan jenuh, sehingga kadar kelembaban air jenuh sama dengan porositas. Apabila air mengalir keluar dari profil tanah, maka pori-pori tanah sedikit demi sedikit mulai kosong, tetapi terdapat sejumlah air yang tidak dapat keluar, sebab butir-butir air dipengaruhi adanya gaya kapiler dari pori-pori yang terdekat. Kecepatan drainase tanah akan menurun dengan cepat sebagaimana kebasahan tanah berkurang (Martha dan Adidarma, 1999).

Jenis tanah merupakan faktor yang memberikan kontribusi cukup besar dalam penentuan koefisien limpasan permukaan (C). Menurut Hakim dkk., (1986) jenis tekstur tanah

dapat digolongkan berdasarkan kandungan pasir, debu dan tanah liat dimana deskripsi untuk masing-masingnya adalah:

1. Tanah berpasir adalah tanah dimana kandungan pasirnya 70% dan dalam keadaan lembab akan terasa kasar dan tidak lekat.
2. Tanah berlempung adalah tanah dimana kandungan debu dan tanah liatnya relatif sama.
3. Tanah liat adalah tanah yang kandungan tanah liatnya antara 35% dan 40%.

4.2. Tanah dan Penentuan Kelas Hidrologi Tanah

Data tanah yang diperlukan berupa informasi jenis tanah dan sifat fisik tanah. Data jenis tanah diperoleh dari interpretasi citra berdasarkan peta tanah di DAS Bone yang menjadi daerah penelitian. Data tanah hasil interpretasi citra dilakukan *check* lapangan untuk penyesuaian data. Pengamatan dan pengambilan sampel lapangan dilakukan pada tempat yang dapat terjangkau karena luasnya daerah penelitian dan sulitnya medan yang akan dilalui. Penetapan kelas hidrologi tanah dilakukan dengan melihat tekstur tanah dan menyesuaikan dengan Tabel *Hydrology Soils Group* (HSG) (Wanielista, 1997). Jenis tekstur tanah menentukan kelas hidrologi tanah karena berkaitan erat dengan nilai kapasitas air efektif dalam tanah. Hubungan tekstur dan kelas hidrologi tanah (HSG) ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1, Klasifikasi hidrologi tanah berdasarkan tekstur tanah

Tekstur	Kapasitas air efektif (mm/mm)	Laju infiltrasi minimum (mm/jam)	Kelas SCS
Pasir	8,89	210,06	A
Pasir Bergeluh	7,89	61,21	A
Geluh berpasir	6,35	25,91	B
Geluh	4,83	13,21	B
Geluh berdebu	4,42	6,86	C
Gelum lempung berpasir	3,56	4,32	C
Geluh berlempung	3,56	2,29	D
Geluh lempung berdebu	2,79	1,52	D
Lempung berpasir	2,29	1,27	D
Lempung berdebu	2,29	1,02	D
Lempung	2,03	0,51	D

Sumber : Wanielista dkk. (1997)

Karakteristik jenis tanah yang termasuk dalam kelas hidrologi tanah dideskripsikan seperti pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Kelompok hidrologi tanah berdasarkan SCS-CN

Kelompok Hidrologi Tanah	Deskripsi Jenis Tanah
--------------------------	-----------------------

A	Potensi terjadi limpasan rendah, meliputi lapisan tanah tebal dengan tekstur geluh dan lempung sangat rendah, tergolong tekstur pasiran yang sangat porus
B	Potensi terjadi limpasan agak rendah, meliputi tanah tekstur pasir yang tidak dalam dan agregat berukuran lebih halus dari tanah A dengan infiltrasi yang cepat
C	Potensi terjadi limpasan agak tinggi, meliputi tanah tipis dengan tekstur lempung dan <i>colloid</i> yang lebih sedikit dibandingkan kelas tanah D. tingkat infiltrasi rendah dan
D	Potensi terjadi limpasan tinggi, meliputi tanah dengan tekstur lempung, mudah tergenang air, kedalaman dangkal dan dekat dengan lapisan batuan induk yang <i>impermeable</i>

Sumber : Wanielista dkk. (1997)

Bagian hujan yang jatuh ke tanah akan mengalami peresapan ke dalam tanah atau proses infiltrasi, dan bagian yang tidak meresap akan mengalir menjadi limpasan permukaan. Air yang meresap ke dalam tanah sangat tergantung dari sifat fisik tanah yakni: tekstur, struktur, permeabilitas tanah, dan kelembaban awal.

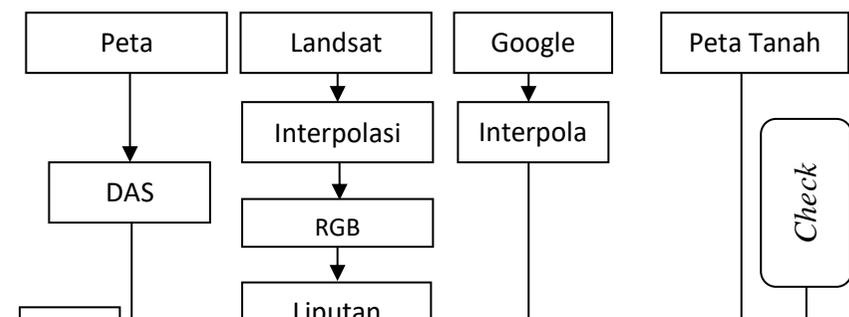
Perubahan nilai CN pada kondisi AMC I (kering) dan AMC III (basah) berdasarkan kondisi AMC II (normal ditetapkan berdasarkan Persamaan 2.1, dan 2.2.

$$CN I = \frac{4,2 CN (II)}{10 - 0,058 CN (II)} \dots\dots\dots 2.1.$$

$$CN III = \frac{23 CN (II)}{10 + 0,13 CN (II)} \dots\dots\dots 2.2$$

4.3. Penentuan nilai *Curve Number* (CN)

Pada sebaran nilai CN diperoleh dari *overlay* hasil peta penggunaan lahan dengan peta tanah yang disesuaikan dengan kelas hidrologi tanah berdasarkan hasil *check* lapangan. Klasifikasi nilai *Curve Number* sesuai dengan tabel SCS-CN. Proses analisis citra hingga penentuan klasifikasi CN ditunjukkan dengan urutan pengerjaan seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Alur penentuan CN

Nilai-nilai penggunaan lahan dan kondisi hidrologi tanah dibuat dalam suatu tabel untuk menentukan nilai CN. Analisis nilai CN dilakukan pada kondisi nilai kebasahan tanah normal (AMC II). Nilai kebasahan tanah (AMC) dihitung berdasarkan catatan curah hujan 5 hari sebelumnya. Patokan nilai kebasahan tanah adalah, AMC-1 sebesar < 35 mm, AMC-II sebesar 35 – 53 mm, dan AMC-III sebesar > 53 mm.

Nilai CN subDAS diperoleh melalui analisis *overlay* antara berbagai komponen seperti peta topografi wilayah penelitian, peta penggunaan lahan, peta tanah, penyesuaian karaktersitik DAS dan

hasil *check* lapangan yang selanjutnya dianalisis berdasarkan acuan Tabel SCS-CN. Tabel nilai CN untuk berbagai keadaan penggunaan lahan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Perkiraan hujan efektif sebagai fungsi dari hujan kumulatif, penutup lahan, penggunaan lahan, dan kelembapan tanah sebelumnya (AMC) menggunakan persamaan berikut:

$$P_e = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \dots\dots > Ia \geq 0,2 * S$$

Keterangan:

- P_e = Akumulasi hujan efektif pada saat t,
- P = Akumulasi curah hujan total pada saat t,
- Ia = Kehilangan awal air hujan sebelum terjadinya limpasan
- S = Retensi potensial maksimum

Tabel 4.3. Nilai CN berdasarkan kondisi penggunaan lahan dan kelas hidrologi Tanah

Peta	Penggunaan lahan/Kondisi Penutup lahan	Soil Group Hydrology
------	--	----------------------

Pemukiman	Daerah Pemukiman		A	B	C	
Kerapatan 35%		65% Daerah Kedap Air	77	85	90	
Kerapatan 60%		38% Daerah Kedap Air	61	75	83	
Kerapatan 70%		25% Daerah Kedap Air	54	70	80	
Kerapatan 80%		20% Daerah Kedap Air	51	68	79	
Kerapatan < 10%	Daerah Pertokoan (85% daerah kedap air)		89	92	94	
Tegalan 30%	Lahan terbuka, lapangan, taman	Keadaan baik (75% tertutup oleh rerumputan)	39	61	74	
Tegalan < 10%	Lahan kosong	Berjajar lurus lereng	77	80	91	
Sawah Tadah Hujan	Tanaman panen berjajar	Sejajar dengan kontur	Jelek	70	79	84
Sawah irigasi	Tanaman padi-padian	Sejajar dengan kontur	Baik	61	73	83
Kebun kerapatan < 25%	Tanaman rpat atau padang	Sejajar dengan kontur	Jelek	64	75	83

Kebun kerapatan >50%	rumput musiman		Baik	55	69	78
Kerapatan 30-70%	Hutan		Sedang	36	60	73
Kerapatan >70%			Baik	25	55	70
Tubuh Air	Tubuh Air			100	100	100

Sumber: USDA NRCS (2005).

Jika Ia mendekati 0, berarti permukaan subDAS dalam kondisi jenuh, namun jika permukaan subDAS dalam keadaan kering maka nilai Ia akan meningkat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa hujan maksimum yang jatuh dalam subDAS adalah dalam kondisi tanpa limpasan. Ia tergantung pada kondisi permukaan subDAS, keadaan penggunaan lahan, jenis tanah, dan perlakuan atas tanah.

Perhitungan retensi potensial maksimum (S) berdasarkan nilai CN adalah dengan menggunakan rumus:

$$S = \frac{2540}{CN} \times 25,4 \text{ centimeter (sistem metrik)}$$

Jika terdapat berbagai macam jenis tanah dan penggunaan lahan, maka nilai CN yang dihitung merupakan nilai CN komposit dengan menggunakan persamaan:

$$\text{CN Komposit} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \text{CN}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \dots\dots\dots (4.1)$$

Keterangan:

- CN-komposit : nilai CN komposit yang digunakan untuk menghitung volume *runoff* dengan HEC-HMS
- i : indeks dari bagian subDAS yang mempunyai perbedaan *lanuse* dan jenis tanah
- CN_i : nilai CN masing-masing bagian dalam sub-subDAS
- A_i : luas areal masing-masing bagian dalam sub-subDAS (m²)
- N : jumlah sub-subDAS

4.4. Evaporasi dan evapotranspirasi

Evaporasi atau penguapan merupakan faktor penting dalam studi tentang perhitungan sumberdaya air. Evaporasi sangat mempengaruhi suatu debit sungai, besar kapasitas waduk, besar kapasitas pompa untuk irigasi, penggunaan konsumtif untuk tanaman, analisis ketersediaan air dan lain sebagainya. Air akan menguap dari semua kondisi tanah, baik air di tanah terbuka atau tertutup oleh tanaman dan pepohonan, maupun tanah dengan permukaan tidak tembus air seperti atap rumah, jalan raya dan

saat di aliran sungai. Laju evaporasi akan berubah-ubah menurut warna dan sifat pantulan permukaan. Hal ini berbeda untuk permukaan yang langsung tersinari oleh matahari dan yang terlindung dari sinar matahari (Soemarto, 1999).

Evapotranspirasi merupakan proses evaporasi dan transpirasi yang berkaitan dengan apa yang terjadi pada tanah yang tertutup oleh tumbuh-tumbuhan. Proses transpirasi berjalan terus hampir sepanjang hari di bawah pengaruh sinar matahari. Pada malam hari pori-pori daun yang disebut stomata menutup, yang menyebabkan terhentinya proses transpirasi dengan drastis. Proses evaporasi dapat berjalan terus selama ada masukan energi panas. Oleh karena itu bagian terbesar jumlah evaporasi diperoleh pada saat siang hari.

Faktor penting lain adalah adanya air yang cukup banyak. Jika jumlah air terlalu banyak dari yang dibutuhkan oleh tanaman maka jumlah air yang di traspirasikan akan lebih besar dibandingkan dengan apabila tersedianya air di bawah kebutuhan (Soemarto, 1999).

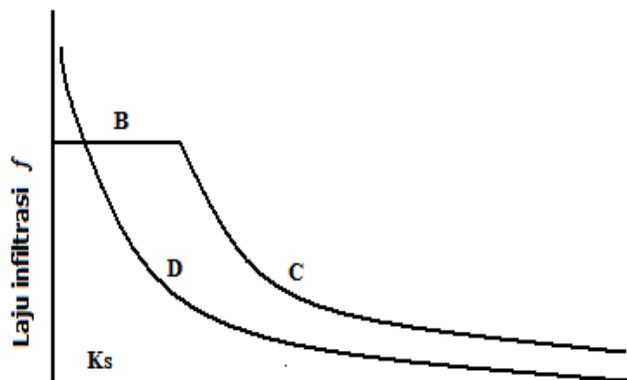
4.5. Infiltrasi

Infiltrasi adalah proses Bergeraknya air meresap ke dalam solum tanah, karena pengaruh tenaga grafitasi bumi dan sifat kenaikan-merambut tanah. Besarnya laju infiltrasi sangat

mempengaruhi lamanya aliran permukaan mencapai sistem sungai. Laju infiltrasi dipengaruhi oleh faktor-faktor: tipe penutup lahan, topografi permukaan tanah, temperatur tanah, intensitas hujan, karakteristik fisik dan kimiawi tanah, dan kualitas air (Seyhan, 1997).

Pemodelan-pemodelan infiltrasi yang banyak digunakan dan telah dikembangkan, seperti model Horton (1930), model Green-Ampt (1911),(1973), dan (1978), Philip (1954), model Stanford Watershed (1966), dan masih banyak model-model yang merupakan kombinasi dan modifikasi model yang telah ada. Oleh karena itu harus dilakukan pemilihan model infiltrasi yang sesuai untuk diterapkan secara praktis pada satuan-satuan pemetaan dalam daerah kajian.

Bedient dan Huber (1992), menggambarkan karakteristik infiltrasi dengan kurva hubungan laju infiltrasi dengan waktu saat mulai perhitungan infiltrasi. Gambar kurva diberikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2, Kurva hubungan antara laju infiltrasi dan waktu. (Sumber: Mein dan Larson, 1973)

K_s menggambarkan keterhantaran jenuh (*saturated*) dari tanah. Bila laju hujan yang jatuh lebih kecil dibandingkan nilai K_s , maka laju infiltrasi sebagai fungsi waktu digambarkan kurva A. Bila laju hujan lebih besar dari K_s namun masih lebih kecil dari nilai kapasitas infiltrasi (f_p), maka laju infiltrasi digambarkan sebagai kurva B. Bila laju hujan yang jatuh lebih besar di banding nilai kapasitas infiltrasi, maka laju infiltrasi digambarkan kurva C dan D. Perbedaan C dan D disebabkan karena perbedaan intensitas hujan awal.

4.4. Aliran (*overland*)

Aliran (*overland*) adalah semua air yang mengalir lewat suatu sungai bergerak meninggalkan daerah tangkapan air (DAS), tanpa memperhatikan asal/jalan yang ditempuh sebelum

mencapai saluran (*surface* atau *subsurface*) karena terjadinya air limpasan ini merupakan gabungan dari aliran air permukaan (*surface flow*) dan aliran airtanah pada waktu muka airtanah tinggi atau merupakan gabungan dari aliran air permukaan dan aliran bawah permukaan (*subsurface flow*) pada waktu muka airtanah rendah (Mustofa, 2005).

Terdapat dua komponen utama yang menyusun aliran sungai yaitu aliran langsung dan aliran tidak langsung. Pada keadaan banjir aliran langsung memberikan kontribusi yang sangat besar dibandingkan dengan aliran airtanah. Respon hidrologi suatu (DAS), karakteristik aliran langsung perlu dikaji lebih mendalam. Sosrodarsono dan Takeda (1977), menyatakan bahwa aliran sungai tergantung dari berbagai faktor secara bersama. Faktor-faktor yang mempengaruhi limpasan terbagi dalam dua kelompok yaitu elemen-elemen meteorologi yang diwakili oleh curah hujan dan elemen-elemen daerah pengaliran yang menyatakan sifat-sifat fisik daerah pengaliran. Faktor-faktor yang termasuk kelompok elemen-elemen meteorologi adalah jenis persipitasi, intensitas curah hujan, lamanya curah hujan, distribusi curah hujan dalam daerah pengaliran, arah pergerakan curah hujan, curah hujan terlebih dahulu dan kelembaban tanah. Sedangkan faktor yang termasuk elemen daerah pengaliran adalah kondisi penggunaan tanah (*land use*), daerah pengaliran, kondisi topografi dalam daerah pengaliran dan jenis tanah.

Komponen-komponen yang merupakan sumber-sumber penyebab pengaliran di dalam sungai terdiri atas (Subarkah, 1980):

1. Aliran permukaan (*surface runoff*) berasal dari air hujan yang mencapai sungai. Jadi aliran permukaan ialah besarnya hujan dikurangi infiltrasi, intersepsi, evaporasi dan yang tertahan dibagian-bagian ledokan.
2. Aliran bawah permukaan tanah (*subsurface flow, interflow*) sebagian dari air hujan yang meresap ke dalam tanah bergerak ke arah horisontal melalui rongga-rongga di dalam tanah lapisan atas sampai memotong suatu saluran atau kembali ke luar permukaan tanah lagi di tempat-tempat yang lebih rendah. Komponen ini disebut aliran bawah permukaan tanah. Besarnya tergantung pada susunan tanahnya.
3. Aliran air tanah (*groundwater flow*), banyaknya air hujan yang meresap ke dalam tanah dan mencapai airtanah tergantung pada susunan tanahnya. Pengalirannya di dalam tanah (perkolasi) untuk mencapai saluran atau sungai sulit dan lama sampai berbulan-bulan bahkan sampai beberapa tahun. Karena itu tidak banyak pengaruhnya pada banjir di sungai.
4. Hujan di permukaan sungainya sendiri, danau, rawa atau lain sebagainya banyaknya air hujan yang langsung masuk

ke dalam sungai dapat dihitung dengan mengalikan curah hujan rata-rata dan persentase dari luas permukaan air yang berpengaruh dengan sistem pengalirannya. Persentase luas permukaan air itu berubah-ubah, tergantung pada waktu dan tinggi air sungai

Dasanto (2006), menjelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi limpasan digolongkan menjadi lima, yaitu faktor yang mempengaruhi volume total limpasan, faktor yang mempengaruhi distribusi waktu limpasan, faktor meteorologi, faktor DAS dan faktor manusia.

Faktor yang mempengaruhi volume total limpasan adalah banyaknya presipitasi, banyaknya evapotranspirasi, ukuran DAS dan tinggi tempat rata-rata daerah aliran sungai. Faktor yang mempengaruhi distribusi waktu limpasan adalah intensitas dan durasi presipitasi, distribusi kawasan dan arah gerak hujan. Faktor meteorologi yang mempengaruhi diantaranya adalah radiasi matahari, suhu, kelembaban udara, kecepatan angin, dan tekanan atmosfer. Faktor DAS diantaranya adalah topografi yang meliputi bentuk daerah aliran sungai, kemiringan daerah aliran sungai, aspek daerah aliran sungai, geologi (permeabilitas dan kapasitas akifer), tipe tanah, vegetasi, jaringan drainase (tatanan sungai dan kerapatan drainase). Faktor Manusia meliputi struktur hidrolis, teknik pertanian, dan urbanisasi.

Intensitas hujan akan mempengaruhi laju dan volume *runoff*. Pada hujan dengan intensitas tinggi, kapasitas infiltrasi akan terlampaui dengan beda yang cukup besar dibandingkan dengan hujan yang kurang intensif. Dengan demikian, total volume *runoff* akan lebih besar pada hujan intensif dibandingkan dengan hujan yang kurang intensif meskipun curah hujan total untuk kedua hujan tersebut sama besarnya. Namun demikian, hujan dengan intensitas tinggi dapat menurunkan infiltrasi akibat kerusakan struktur permukaan tanah (pemadatan) yang ditimbulkan oleh tenaga kinetis hujan dan *runoff* yang dihasilkan.

Laju dan volume *runoff* suatu DAS dipengaruhi oleh penyebaran dan intensitas curah hujan di DAS yang bersangkutan. Umumnya, laju run off dan volume terbesar terjadi ketika seluruh DAS tersebut ikut berperan. Dengan kata lain, hujan turun merata di seluruh wilayah DAS yang bersangkutan. Pengaruh DAS terhadap run off adalah melalui bentuk dan ukuran (morfometri) DAS, topografi, geologi, dan tataguna lahan (jenis dan kerapatan vegetasi). Semakin besar ukuran DAS, semakin besar *runoff* dan volume *runoff*. Tetapi, baik laju maupun volume *runoff* per satuan wilayah dalam DAS tersebut turun apabila luas daerah tangkapan air (*catchment area*) bertambah besar. Beberapa pengaruh morfometri DAS, dalam hal ini terdiri atas luas, kemiringan lereng, bentuk dan kerapatan drainase DAS, terhadap besaran dan timing dari hidrograf aliran yang dihasilkan.

Kerapatan daerah aliran (*drainase*) juga merupakan faktor penting dalam menentukan kecepatan air larian. Kerapatan *drainase* adalah jumlah dari semua saluran air/sungai (km) dibagi luas DAS (km²). Semakin tinggi kerapatan daerah aliran, semakin besar kecepatan air larian untuk curah hujan yang sama. Oleh karenanya, dengan kerapatan daerah aliran tinggi, debit puncak akan tercapai dalam waktu yang lebih cepat.

Kepadatan alur sungai, dapat digunakan sebagai parameter yang mencerminkan panjang alur sungai per satuan luas, yang dapat digunakan sebagai petunjuk kondisi pengatusan suatu DAS. Selain itu dapat digunakan sebagai pengukur tingkat erosi dan kekasaran batuan secara relatif. Sebagai contoh DAS dengan tingkat kerapatan alur sungai tinggi maka tingkat erosi DAS tersebut tinggi dan kekasaran batuan rendah.

Pengaruh vegetasi dan cara bercocok tanam terhadap air larian dapat diterangkan bahwa vegetasi dapat memperlambat jalannya air larian dan memperbesar jumlah air yang tertahan di atas permukaan tanah (*surface detention*), dan dengan demikian, menurunkan laju air larian. Berkurangnya laju dan volume air larian berkaitan dengan perubahan (penurunan) nilai koefisien air larian.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dalam skala DAS, pola drainase nampaknya mempunyai peranan lebih menentukan daripada kerapatan drainase dalam mempengaruhi besarnya debit puncak dan lama waktu berlangsungnya debit puncak tersebut (Black, 1991 dalam Asdak, 2007).

4.4.1 Karakteristik Aliran permukaan

Aliran dapat terdistribusikan menjadi limpasan permukaan (*surface runoff*), limpasan bawah permukaan (*subsurface runoff*), dan aliran air tanah (*groundwater flow*) (Seyhan, 1977; Chow, *et al.*, 1964). Limpasan permukaan merupakan air yang mencapai sungai melalui permukaan tanah, berasal dari curah hujan dikurangi infiltrasi, genangan, dan air yang tertahan. Limpasan permukaan mengalir ke sungai dengan volume paling besar dan kecepatan tinggi, merupakan bagian yang penting dari puncak banjir suatu sungai. Limpasan bawah permukaan merupakan limpasan yang dekan dan menyatu dengan limpasan permukaan, mengalir dalam waktu yang cukup cepat, dipengaruhi oleh struktur dan kelembaban tanah. *Baseflow* merupakan air yang meresap ke dalam tanah, mencapai permukaan air tanah dan bergerak menuju sungai dalam rentang waktu yang lama, dapat digunakan sebagai cadangan air pada musim kemarau (Setyowati, 2010).

Aliran yang terjadi pada suatu DAS dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor yang mampu mempengaruhi kondisi limpasan antara lain iklim, morfometri DAS, tanah, dan penggunaan lahan. Faktor iklim meliputi jumlah hujan, intensitas hujan, lama hujan, dan distribusi hujan. Morfometri DAS meliputi luas DAS, kemiringan, kerapatan aliran, panjang sungai utama, dan bentuk DAS. Keberadaan tanah dan penggunaan lahan terdiri dari tipe tanah, permeabilitas, kelembaban, kapasitas infiltrasi, dan vegetasi penutup lahan (Seyhan, 1977). Setiap faktor mempunyai peranan yang berbeda terhadap pembentukan limpasan, meskipun limpasan yang terjadi adalah hasil dari proses yang terjadi di dalam DAS.

Perjalanan air yang mengalir dari hulu ke hilir sungai memerlukan waktu yang disebut waktu konsentrasi (*time concentration*). Waktu konsentrasi (Tc) adalah waktu perjalanan yang diperlukan oleh air dari tempat yang paling jauh (hulu sungai) sampai ke titik pengamatan aliran air (hilir sungai atau *outlet*). Hal ini terjadi ketika tanah sepanjang kedua titik tersebut telah jenuh dan semua cekukan bumi lainnya telah terisi oleh air hujan. Diasumsikan bahwa bila lama waktu hujan sama dengan Tc berarti seluruh bagian DAS telah ikut berperan untuk terjadinya limpasan air yang sampai ke titik pengamatan (Soemarto, 1999, dan Asdak, 2002).

4.4.2 Koefisien Aliran permukaan (*runoff coefficient*)

Koefisien aliran adalah rasio jumlah limpasan terhadap jumlah curah hujan, dimana nilainya tergantung pada tekstur tanah, kemiringan lahan, dan jenis penutupan lahan. Pada daerah aliran sungai (DAS) berhutan dengan tekstur tanah liat berpasir, nilai koefisien aliran berkisar antara 0.10 - 0.30. Pada lahan pertanian dengan tekstur tanah yang sama, nilai koefisien aliran adalah 0.30–0.50 (Prastowo, 2003).

Koefisien aliran adalah perbandingan antara aliran dengan curah hujan yang masuk. Bagian dari air hujan yang menjadi aliran dapat dipandang sebagai suatu respon DAS. Koefisien limpasan dapat dikategorikan berdasarkan koefisien aliran tahunan yang dapat dipakai sebagai petunjuk kehilangan air dari sistem DAS, serta koefisien aliran sesaat yang merupakan perbandingan antara aliran sesaat yang disebabkan oleh curah hujan penyebabnya. Koefisien limpasan tahunan selama beberapa kurun waktu tertentu dapat menggambarkan kondisi suatu DAS terhadap masukan air hujan yang responnya dapat menjadi gambaran kesehatan suatu DAS ditinjau dari aspek tata air (Supangat dkk., 2002),.

Koefisien aliran permukaan, dihitung dengan menggunakan persamaan (Dariah *et al.*, 2003):

$$KR = \theta Rh / (\theta CH * \cos \theta) \theta \times 100 \%$$

Dimana:

KR = Koefisien aliran permukaan (%),

Rh = Total volume aliran permukaan dibagi luas plot (mm),

CH = Jumlah curah hujan (mm),

θ = kemiringan lahan (derajat).

Koefisien alirann juga dapat ditentukan dengan metode rasional. Metoda rasional menyatakan bahwa puncak limpasan pada suatu DAS akan diperoleh pada intensitas hujan maksimum yang lamanya sama dengan waktu konsentrasi (Tc). Waktu konsentrasi adalah lamanya waktu yang diperlukan untuk pengaliran air dari yang paling ujung dari suatu DAS sampai ke outlet. Apabila lama hujannya kurang dari waktu konsentrasi, maka intensitasnya kemungkinan lebih besar akan tetapi luas DAS yang memberikan kontribusi terhadap debit akan lebih kecil dari total luas DAS (A). Apabila lama waktu hujan lebih besar dari waktu konsentrasi maka luas areal sama dengan total luas DAS (A) tetapi intensitasnya kurang dari intensitas hujan pada lama hujan sama dengan Tc.

Rumus metoda rasional dinyatakan (Kalsim, 2003):

a. Satuan seragam

$$Q = C.i.A$$

$$C = Q / (i.A)$$

$$C = Q / \text{Vol.Hujan}$$

Keterangan:

Q = puncak aliran;

C = koefisien aliran ($0 < C < 1$);

i = intensitas hujan maksimum dengan lama hujan sama dengan waktu konsentrasi;

A = luas DAS.

b. Dalam satuan khusus di mana i dalam mm/jam; A dalam hektar dan Q dalam m³/det, maka rumus tersebut dinyatakan:

$$C = \frac{Q}{0.0028.i.A}$$

Angka koefisien aliran berkisar antara 0 sampai 1. Angka 0 menunjukkan bahwa semua air hujan terdistribusi menjadi air intersepsi dan terutama infiltrasi. Sedangkan nilai limpasan sama dengan 1 menunjukkan bahwa semua air hujan mengalir sebagai limpasan (*runoff*) (Asdak, 2007).

4.5. Pengaruh penggunaan lahan terhadap aliran

Penebangan hutan sebagai akibat penggunaan lahan yang luas, sangat berpengaruh terhadap besaran perubahan debit puncak dan perubahan bentuk hidrograf. Perubahan besar terjadi

pada distribusi hujan menjadi limpasan langsung dan infiltrasi. Upaya perbaikan terhadap keadaan adalah dengan menghidupkan kembali.

Pengembangan sistem saluran yang intensif karena proses urbanisasi dan industrialisasi yang disertai dengan perubahan permukaan yang semula tertutup tumbuh-tumbuhan, menjadi permukaan yang berlapis keras dan memperbesar limpasan limpasan dan memperkecil aliran dasar. Perubahan tidak hanya terjadi di permukaan, tetapi juga berpengaruh ke dalam air tanah. Akibat perubahan yang dilakukan di permukaan, sifat akuifer dapat berubah dan mengakibatkan perannya terhadap aliran ke sungai berubah. Karena kebutuhan domestik dan industry maka air dari *unconfined aquifer* menjadi tumpuan utama. Perubahan pada kelengasan tanah dapat terjadi akibat perubahan perlakuan lahan.

Dengan kegiatan tersebut di atas akan mengubah karakteristik hidrograf banjir di antara debit puncak, volume dan waktu puncak banjirnya. Pengembangan daerah perkotaan dan industry juga akan berpengaruh pada limpasan dan pengurangan infiltrasi. Sri-Harto (2000) mengatakan bahwa penambahan debit puncak dipengaruhi oleh beberapa hal sebagai berikut:

- a. Perten luas daerah yang dikembangkan
- b. Rancangan sistem drainase

- c. Ketersediaan sarana tampungan (*recharge*).
- d. Kala ulang yang digunakan dalam perancangan.
- e. Formasi geologi.

Laoh (2002) mengemukakan bahwa peran vegetasi cukup besar dalam mengatur keseimbangan tata air suatu DAS. Lahan yang semula bervegetasi rapat jika berubah menjadi vegetasi jarang, akan menyebabkan tanah tidak mampu menahan laju aliran permukaan, karena limpasan hujan bertambah dan kapasitas infiltrasi menurun. Konversi lahan akan memberikan pengaruh langsung terhadap total volume hujan yang diteruskan ke dalam tanah melalui proses infiltrasi. Jenis vegetasi berbeda akan memberikan respon limpasan berbeda.

Berdasarkan bentuk penggunaan lahan dan kelompok hidrologi tanah, maka dapat ditentukan nilai *curve number* (CN) berdasarkan tabel SCS-CN. Selain itu dengan data penggunaan lahan dapat ditentukan nilai persentase permukaan kedap air atau *impervious area*. Dalam penerapannya dengan mengetahui bentuk penggunaan lahan pada suatu DAS dapat digunakan untuk mengetahui perubahan karakteristik hidrograf banjir akibat pengaruh perubahan atau dinamika penggunaan lahan, dengan merubah luas penggunaan lahannya (Setyowati, 2010).

4.6. Pengaruh Tutupan vegetasi Terhadap Aliran

Satelit Landsat telah memasuki generasi ke tujuh dengan banyak kelebihan dibanding dengan kemampuan satelit

sebelumnya. Generasi ini disebut sebagai ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Sistem orbit satelit ini berupa jenis sinkron matahari berada di dekat kutub dan satelit bergerak dari utara ke selatan. Adanya sistem sinkron matahari maka peliputan selalu pada waktu siang hari sekitar pukul 09.30 – 10.00 waktu setempat dengan sudut $37,51^\circ$ terhadap bumi dan matahari. Citra satelit landsat memiliki luasan liputan seluas $185 \times 185 \text{ km}^2$. Sifat Landsat adalah selaras orbit matahari yang berarti satelit ini senantiasa melintasi ekuator pada waktu matahari local yang sama secara tepat. Oleh karena Landsat selaras dengan orbit matahari, maka menjamin kondisi ulang pada liputan yang sama saat penyinaran matahari pada musim tertentu (Lilisand *et al*, 2004).

Vegetasi, tanah dan air mempunyai karakteristik spectral yang unik dalam merespon energi elektromagnetik matahari yang mengenyainya. Vegetasi banyak menyerap energi pada spectrum tampak (terutama biru dan merah), namun banyak memantulkan energi pada spectrum inframerah dekat.

Vegetasi hijau menyerap banyak radiasi matahari pada spectrum merah untuk digunakan sebagai sumber energi dalam proses fotosintesis. Penyerapan energi pada spektrum ini akan menyebabkan pemanasan berlebihan pada tumbuhan dan berpotensi merusak metabolisme tumbuhan, oleh karena itu dipantulkan dengan kuat (Gates, 1980 dalam Marjuki, 2008).

4.7. Penentuan Penutupan Lahan/Vegetasi berdasarkan Interpretasi Citra Penginderaan Jauh

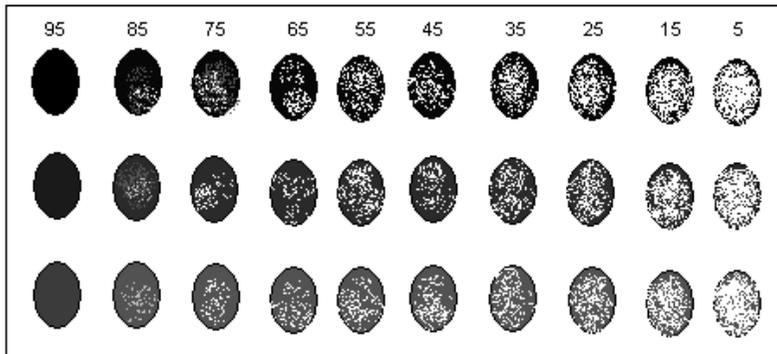
Teknik yang digunakan untuk identifikasi tutupan vegetasi di lapangan adalah berdasarkan interpretasi citra Landsat 7 ETM+ yang ditumpangtindih dengan peta topografi (RBI) tutupan lahan untuk lembar Taludaa Bone Bolango. Sebagai pembanding interpretasi citra dilakukan plot foto tutupan vegetasi di lapangan. Estimasi untuk menentukan keadaan vegetasi digunakan standar *USDA FIA Canopi Cover Estimation Chart* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Klasifikasi tutupan vegetasi menggunakan skala yang dikeluarkan oleh Departemen Kehutanan (2004) seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4

Tabel 4.4. Klasifikasi tutupan vegetasi

Tutupan Vegetasi	Kelas
>80 %	Sangat baik
61 – 80 %	Baik
41 – 60 %	Sedang
21 – 40 %	Buruk
< 20 %	Sangat buruk

Sumber: Departemen Kehutanan (2004).

Plot titik vegetasi lapangan dilakukan secara sampel pada sebaran wilayah subDAS Bula. Sampel Plot vegetasi diambil untuk mewakili tutupan vegetasi hutan, vegetasi kebun/pertanian, vegetasi tegalan dan lapangan, dan plot untuk permukiman pada koordinat masing-masing. Representasi plot vegetasi lapangan disesuaikan dengan *Canopy Cover Estimation Chart*, USDA FIA seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3.



(Sumber: Jennings dkk. (1999) dalam Komponen et al. (2006)) 85-95 dinyatakan sebagai vegetasi kerapatan tinggi/sangat baik. Plot pada chart nilai 65-75 vegetasi kerapatan baik, Plot pada nilai 45-55 vegetasi kerapatan sedang, Plot pada nilai 25-35 vegetasi kerapatan buruk, dan Plot pada nilai 5-15 vegetasi kerapatan sangat buruk.

BAB V HIDROGRAF ALIRAN

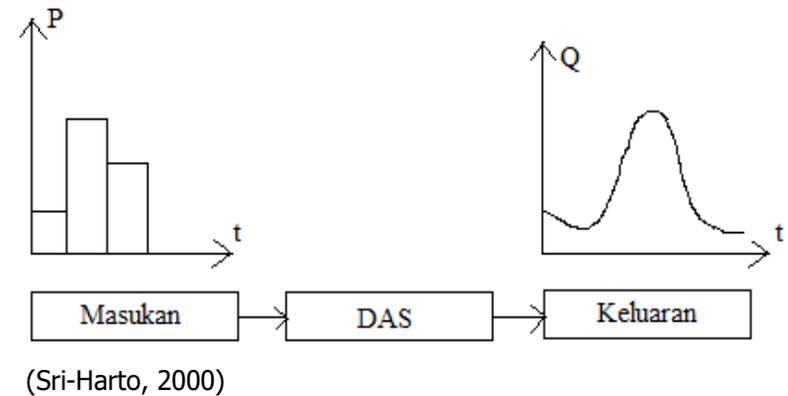
5.1. Hidrograf aliran

Hidrograf aliran menunjukkan tanggapan menyeluruh DAS terhadap masukan curah hujan sesuai dengan sifat dan perilaku DAS tersebut (Setyowati, 2010). Hidrograf aliran selalu berubah sesuai dengan besaran dan waktu terjadinya masukan.

Bentuk hidrograf pada umumnya banyak dipengaruhi oleh input hujan yang terjadi dan karakteristik DAS (Sri-Harto, 1993). Hidrograf aliran menggambarkan perilaku debit sebagai respon adanya perubahan karakteristik biogeofisik yang berlangsung dalam suatu DAS, karena kegiatan pengelolaan DAS atau adanya fluktuasi musiman iklim lokal (Viesmann, 1989).

Hidrograf merupakan diagram garis yang menggambarkan hubungan antara variabel yang dianalisis dengan waktu. Menurut Sri-Harto (1993), ada tiga macam bentuk hidrograf, yaitu hidrograf muka air (*stage hydrograph*), hidrograph limpasan (*discharge hydrograph*), dan hidrograph sedimen (*sediment hydrograph*). Hidrograf muka air menggambarkan hubungan antara perubahan tinggi muka air dengan waktu. Hidrograf limpasan merupakan gambaran hubungan debit dengan waktu, dan hidrograf sedimen merupakan hubungan antara kandungan sedimen dengan waktu.

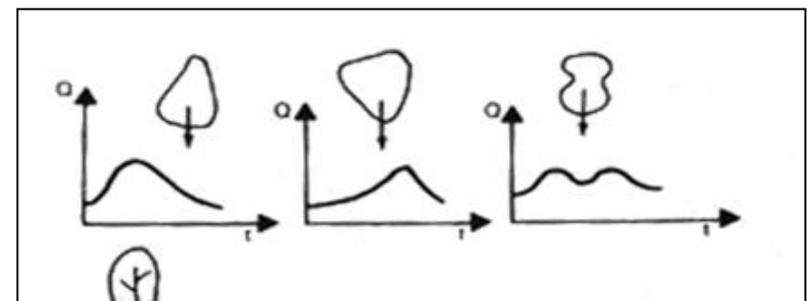
Hidrograf dapat dianggap sebagai suatu gambaran menyeluruh dari karakteristik fisografis dan hujan yang mengendalikan hubungan antara curah hujan dan pengaliran dari suatu daerah pengaliran tertentu. Hidrograf melukiskan suatu distribusi waktu dari aliran di tempat pengamatan dan menentukan kompleksifitas karakteristik daerah alirannya dengan suatu lengkung tunggal (Subarkah, 1980). Tanggapan DAS terhadap masukan hujan disajikan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 , Tanggapan DAS terhadap masukan hujan,

Dasanto (2006), menggambarkan hidrograf dipengaruhi oleh bentuk DAS. Bentuk DAS yang lonjong menyempit akan menghasilkan puncak hidrograf yang agak melenceng ke kiri. Bentuk DAS yang lonjong melebar akan menghasilkan puncak hidrograf agak melenceng ke kanan. Tanggapan DAS terhadap keluaran hidrograf disajikan pada Gambar 5.2.

Hidrograf terdiri dari tiga bagian pokok yaitu *rising limb*, *crest*, dan *recession limb segment*. Bagian sebelum sisi naik adalah bagian akhir dari hidrograf sebelumnya. Pada bagian sisi naik akan tergantung dari intensitas dan lama hujan, serta kelengasan DAS. Semakin tinggi intensitas hujan maka sisi naik akan semakin terjal.



(Dasanto, 2006)

Gambar 5.2, Hidrograf berdasarkan bentuk DAS.

Hidrograf aliran selalu berubah tergantung sifat masukannya. Hal ini terjadi karena sistem DAS yang sebenarnya adalah *non linear time invariant*. Akan tetapi jika DAS sebagai system yang *linear time invariant* maka masukan yang terjadi setiap saat akan mengakibatkan aliran yang sama. Dengan demikian suatu DAS tertentu mempunyai *specific response* terhadap masukan dengan besaran tertentu. Tanggapan tersebut dalam konsep hidrologi dikenal dengan *unit hydrograph* (Viesmann, 1989).

Hidrograf aliran memberikan distribusi waktu pada limpasan yang keluar dari DAS, dihasilkan oleh hujan efektif yang

jatuh merata di atas DAS dengan tinggi tertentu. Hidrograf aliran menunjukkan bagaimana hujan efektif ditransformasikan menjadi aliran langsung di pelepasan DAS. Bentuk hidrograf aliran memberikan informasi empat sifat pokok limpasan meliputi: volume limpasan (*direct runoff* atau DRO), debit puncak (Q_p), waktu puncak (T_p), dan waktu dasar (T_b). Debit puncak adalah besarnya debit mencapai maksimum, waktu puncak adalah waktu mulai terjadi debit awal sampai terjadi debit puncak, waktu dasar merupakan waktu mulai bertambah debit aliran sampai kembali ke debit aliran dasar (Sri-Harto, 1993).

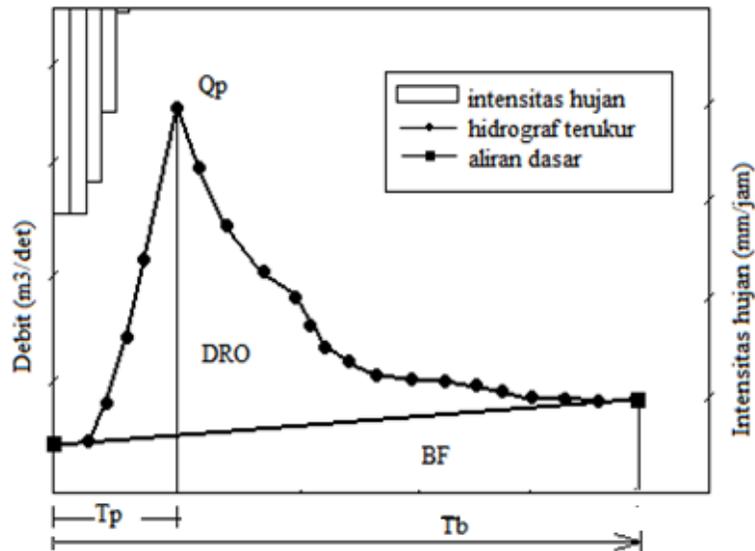
Parameter hidrograf aliran terdiri dari sisi naik (*rising limb*), puncak aliran (*peak discharge*), dan aliran dasar (*base flow*). Hujan yang turun ke bumi dengan jumlah, intensitas, dan lama hujan tertentu akan mempengaruhi sisi naik (Sing, 1977). Apabila tanah kering, sisi ini tampak datar karena hujan yang menjadi aliran sangat kecil. Bagian puncak aliran (*peak discharge*) merupakan bagian dari debit maksimum untuk suatu kejadian hujan dengan kedalaman tertentu. Pada sisi resesi (*recession limb*) merupakan bagian dari debit aliran yang menunjukkan pengatusan dari akifer setelah tidak ada aliran, dan aliran masuk ke dalam sungai.

Komponen yang merupakan sumber penyebab limpasan di suatu sungai antara lain berasal langsung dari hujan (presipitasi), limpasan permukaan (*surface runoff*), dan limpasan

dasar (*base flow*). Untuk mengetahui besarnya limpasan permukaan (DRO) yang disebabkan hujan maka dilakukan pemisahan komponen-komponen pembentuk hidrograf menjadi komponen limpasan permukaan (DRO) dan limpasan dasar (*base flow*).

Pendekatan untuk pemisahan DRO dan BF yaitu: *straight line methods*, *variable slope methods*, dan *fixed base length methods* (Linsley *et al.*, 1988).

Bentuk dan komponen hidrograf disajikan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3. Bentuk dan komponen hidrograf (Viesmann, 1989).

Keterangan:

Qp= Debit Puncak, Tp= Waktu Puncak,
Tb= Waktu Dasar, DRO= Limpasan Langsung,
BF= *Baseflow*

5.2. Hidrograf sintetik

Untuk menurunkan hidrograf satuan perlu tersedia data yang baik, yaitu data AWLR, data pengukuran debit, data hujan jam-jaman dan harian. Hal yang sering menjadi masalah adalah bahwa karena berbagai sebab data ini sering sulit diperoleh atau tidak tersedia. Untuk mengatasi hal tersebut dikembangkan suatu cara untuk mendapatkan hidrograf satuan, tanpa menggunakan data tersebut di atas. Salah satu cara yaitu dikembangkan oleh Snyder (1938, dalam Bedient dan Huber, 1992), yaitu dengan memanfaatkan karakteristik dan parameter DAS untuk memperoleh Hidrograf Satuan Sintetik.

Karakteristik atau parameter DAS yang digunakan misalnya *time to peak magnitude*, lebar dasar, luas, kemiringan, *length of the longest channel*, *runoff coefficient* dan sebagainya. Perlu disesuaikan terlebih dahulu dengan karakteristik DAS yang

ditinjau. Chow *et al.*, (1998) menyarankan hidrograf sintetik dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

- a) Berhubungan dengan karakteristik hidrograf satuan, seperti puncak hidrograf satuan (HS) dan waktu puncak HS dengan karakteristik DAS. Contoh: Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) Snyder.
- b) Berdasarkan HS tak berdimensi. Contoh: HSS SCS
- c) Berdasarkan perhitungan untuk simpanan DAS. Contoh: HSS Clark dan pemodelan modifikasi Clark (ModClark).

5.3. Hidrograf banjir

Hidrograf banjir sungai selalu berubah tergantung masukannya. Hal ini terjadi karena sistem DAS yang sebenarnya bersifat non-linear menurut waktu, berarti masukan input air DAS dapat kapan saja dan dalam jumlah yang berbeda-beda. Namun diperlukan penyederhanaan dalam pemodelan sehingga diasumsikan DAS adalah sistem yang linear terhadap waktu, untuk memastikan masukan yang terjadi setiap saat akan mengakibatkan aliran yang sama. Sehingga DAS memiliki respon tertentu terhadap masukan dengan besaran tertentu. Konsep demikian dalam model hidrologi disebut dengan hidrograf banjir.

Hidrograf banjir adalah hidrograf yang menentukan limpasan langsung (*direct runoff*) dari hasil hujan efektif yang

terjadi secara merata di seluruh DAS dengan intensitas tetap dalam satu satuan waktu yang ditetapkan. Menurut Sujono (1999), besaran hujan efektif adalah sebesar 1 mm. Dalam pembuatan hidrograf banjir harus memenuhi syarat dimana hujan jatuh secara merata di seluruh DAS dan selama curah hujan yang dipilih harus menghasilkan satu puncak hidrograf. Hidrograf banjir difungsikan untuk menggambarkan proses hujan menjadi aliran sungai dengan seluruh karakteristik DAS yang mempengaruhi dalam suatu bentuk grafik kurva tunggal.

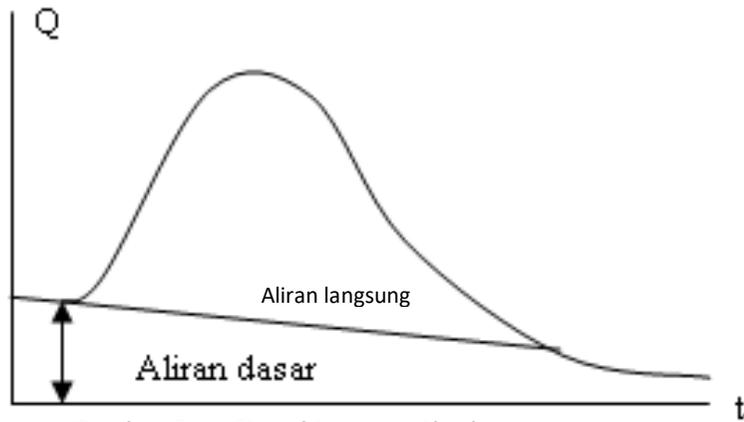
5.4. Pemisahan aliran permukaan (*surface runoff*) dan aliran dasar (*baseflow*) dalam hidrograf aliran

Analisa hidrograf satuan merupakan hubungan antara hujan efektif dan limpasan langsung, sehingga aliran dasar harus dipisahkan. Aliran dasar merupakan hasil pematuan (drainasi) dari akuifer dan merupakan debit minimum. Ada 3 cara empiris yang bisa dipakai untuk menentukan aliran dasar, yaitu: *Straight Line Method*, *Fixed Based Line Method* dan *Variable Slope Method*. Ketiga metode tersebut bisa dilakukan jika tersedia Hidrograf Pengamatan pada DAS tersebut (Linsley *et al.*, 1988).

a. *Straight Line Method*

Straight Line Method dilakukan dengan menghubungkan titik saat limpasan mulai (pada titik belok atau *inflection point*)

dengan titik pemisahan aliran dasar (pada titik belok atau *inflection point*) pada kurva resesi. Aliran di bawah garis lurus merupakan aliran dasar (baseflow). *Straight Line Method* seperti disajikan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4, *Straight Line Method*

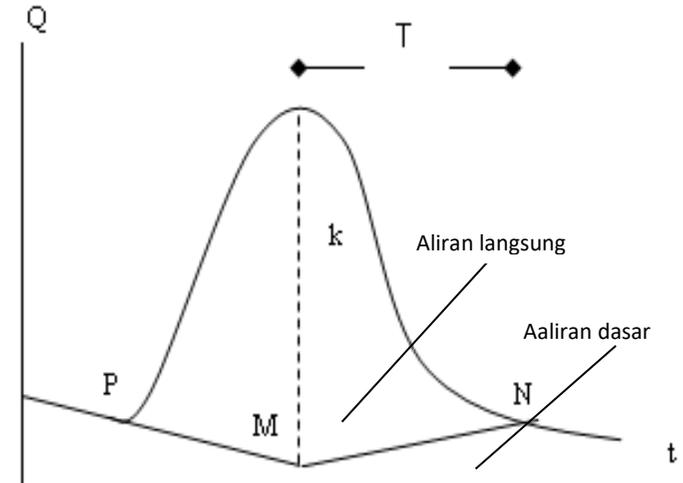
Fixed Based Line Method

Fixed Based Line Method dimulai dari garis singgung pada saat limpasan (titik belok P atau *inflection point*), berpotongan dengan garis vertikal yang melalui puncak dan sejajar sumbu Q di titik M. Kemudian dihubungkan dengan perpotongan antara garis vertikal sejauh T dari puncak dan sejajar sumbu Q dengan akhir hidrograf di titik N.

$$T = A^{0.2} \quad \text{dengan } T = \text{waktu (hari)}$$

A = luas DAS (mile²)

Aliran di bawah garis PM dan MN merupakan aliran dasar (baseflow). *Fixed Based Line Method* seperti disajikan pada Gambar 5.5.

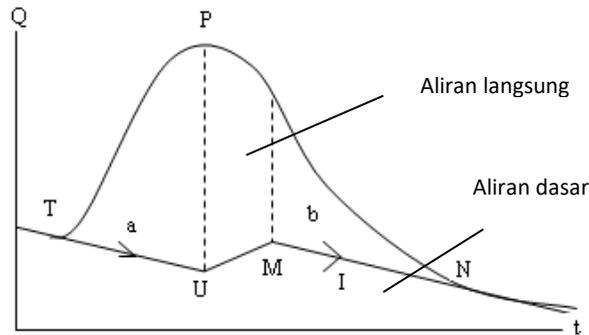


Gambar 5.5, *Fixed Based Line*

b. **Variable Slope Method**

Pada *Variable Slope Method*, aliran dasar dimulai dari garis singgung pada awal periode limpasan (titik belok awal: T, *inflection point*) hingga memotong garis vertikal yang melalui puncak hidrograf dan sejajar dengan sumbu Q (vertikal) yaitu titik U. Kemudian dibuat garis singgung pada akhir resesi M. Titik belok di akhir hidrograf yang memotong garis yang melalui titik belok di titik P di bagian kurva turun sejajar sumbu Q. Aliran di bawah

garis TU, UN dan NM merupakan aliran dasar (baseflow) pada jam tersebut. *Variable Slope Method* disajikan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4, *Variable Slope Method*

BAB VI PEMODELAN HIDROLOGI

6.1. Pemodelan hidrologi aliran sungai

Model adalah representasi sederhana dari sesuatu yang nyata. Adakalanya lingkungan nyata terlalu rumit sehingga sekedar untuk memahaminya ataupun untuk mengkomunikasikan dengan orang lain diperlukan sebuah model yang representatif (Phillips, 1976).

Ketika menetapkan suatu model tertentu, perlu untuk memberikan nilai-nilai kuantitatif terhadap beberapa besaran yang tak diketahui, yang disebut parameter. Keseluruhan tahap konseptualisasi dan estimasi parameter dinamakan identifikasi sistem. Sebuah model memerlukan ringkasan ideal sedemikian rupa tentang permasalahan, sehingga biasanya diperlukan perkiraan serta penyederhanaan asumsi-asumsi dengan harapan model mampu memecahkan permasalahan. Model yang telah melalui tahap validasi, kemudian digunakan untuk mempertimbangkan kemungkinan penyelesaian, menjadi titik awal dari proses pemodelan (Mananoma dan Soetopo, 2008).

Loucks dkk., (1981), mengemukakan dua pendekatan dasar dalam menyelesaikan model-model perencanaan yaitu simulasi dan optimasi. Bisa jadi simulasi adalah metode yang paling luas penggunaannya dalam mengevaluasi berbagai alternatif sistem sumberdaya air. Teknik ini mengandalkan cara coba-banding (*trial-and-error*) untuk memperoleh hasil yang mendekati optimal.

Dalam pemodelan hidrologi paling tidak ada tiga skala yang selalu dijadikan acuan, yaitu skala global, skala regional (skala DAS), dan skala lokal (skala plot percobaan). Pada skala global pemodelan cenderung diarahkan untuk mengetahui ketersediaan air secara makro. Metode imbalan air (*water balance*) dan *water accounting* sering digunakan. Pada pemodelan

skala DAS keluaran yang diharapkan antara lain aliran, baik aliran permukaan maupun aliran bawah permukaan, cadangan air, dan kehilangan air. Pemodelan hidrologi yang berkembang dari tahun ke tahun cenderung pada skala regional (skala DAS). Pada skala ini pemodelan hidrologi banyak diterapkan untuk menyelesaikan masalah-masalah kewilayahan seperti banjir dan kekurangan air (Larsson, 2002).

Dalam mengidentifikasi karakteristik aliran pada suatu sistem sungai, untuk mengetahui hubungan antara karakteristik DAS dan aliran, maka dibutuhkan data lebih dari 50 tahun periode pencatatan. Kenyataannya selama periode yang lama tersebut jarang diperoleh data yang terus-menerus (*continuous*) dan selama periode tersebut terdapat perubahan penggunaan lahan dan penutup lahan oleh manusia, sehingga data yang diperoleh tidak dapat dianalisis secara seri waktu (*time series analysis*). Permasalahan di atas dapat diselesaikan dengan simulasi matematis terhadap fenomena hidrologi, yang kemudian sering disebut sebagai pemodelan hidrologi (Gorgens, 1983).

Apabila air yang hilang (intersepsi, evapotranspirasi, dan infiltrasi) dari suatu hujan sesaat dapat ditentukan dengan benar, maka penentuan limpasan yang merupakan sisa hujan dapat pula dengan mudah dihitung. Air hujan yang tersisa ini disebut sebagai hujan lebihan (*excess rainfall*), dan merupakan air yang tersedia untuk limpasan permukaan. Berdasarkan data hujan lebihan,

perhitungan limpasan dapat dilakukan dengan pendekatan-pendekatan antara lain metode hidrograf satuan SCS (Sherman (1932 dalam Bedient dan Huber, 1992), metode *time area diagram*, metode gelombang kinematik, metode ARMA (*antoregressive moving average*), dan metode tiruan hidrograf lainnya (Sri-Harto, 2000).

Salah satu pemodelan hidrologi untuk perhitungan limpasan berdasarkan hujan yang jatuh pada suatu kawasan DAS adalah metode bilangan kurva (McCuen, 1982). Metode bilangan kurva (*curve number - CN*) pada dasarnya adalah metode empiris yang digunakan untuk menghitung volume limpasan yang dihasilkan oleh hujan sesaat, atau lebih tepat untuk menghitung hujan lebihan. Nilai CN adalah suatu indeks yang menggambarkan suatu keadaan hidrologis karena faktor-faktor seperti disebutkan di atas. Ada tiga kelompok parameter yang harus diidentifikasi untuk menentukan CN, yakni (McQuen, 1982):

1. Kelompok tanah berdasar kondisi hidrologisnya (*Hydrologic Soil Group*) yang dibedakan menjadi empat kelompok A,B,C, dan D. Kelompok A ciri tanah dengan tekstur pasir dan profil tanah dalam, laju infiltrasi $> 0,75$ cm/jam. Kelompok B tekstur tanah pasir bergeluh dan profil tanah dangkal. Kelompok C tekstur tanah lempung bergeluh dan kandungan bahan organik sedikit, serta kelompok D tekstur tanah lempung dengan laju infiltrasi $< 0,15$ cm/jam.

2. Klasifikasi kompleks penutup lahan (*cover complex classification*), yang terdiri dari tiga faktor yakni penggunaan lahan, pengolahan lahan dan kondisi hidrologis.
3. Kelengasan tanah sebelumnya (*Antecedent Moisture Condition - AMC*). Kondisi ini mempengaruhi volume limpasan maupun laju infiltrasi. Terbagi atas tiga kondisi, yaitu: Kondisi I, bila tanah dalam keadaan kering tetapi titik layu belum terlewati; Kondisi II, adalah keadaan rerata; Kondisi III bilamana tanah dalam keadaan jenuh air. Pada Tabel 6.1 disajikan pedoman untuk menentukan kondisi basah, sedang, atau kering suatu lahan.

Tabel 6.1. Pedoman penentuan kondisi kelembaban tanah

AMC	Jumlah curah hujan pada 5 hari sebelumnya	Kelembaban
AMC I	Kurang dari 35 mm	Kering
AMC II	35 – 52,5 mm	Normal
AMC III	Lebih dari 52,5 mm	Basah

Sumber: McCuen (1982).

Salah satu model hidrologi yang dinilai paling banyak diterapkan adalah *Stanford Watershed Model IV* – SWM. Model ini memiliki sembilan *sub routine* yang menghitung setiap proses

dalam siklus hidrologi. *Sub routine* meliputi intersepsi, infiltrasi, evapotranspirasi, simpanan zona atas, simpanan zona bawah dan air tanah, limpasan permukaan, limpasan bawah permukaan, alur sungai dan penulusurannya. Dari beberapa uji model SWM akan sesuai digunakan untuk DAS dengan luasan antara 1,6 – 3000 km² (James, 1972).

Pemodelan hidrologi terutama dalam menyelesaikan fenomena hidrologi pada skala DAS, pemodelan hujan-limpasan cenderung lebih banyak digunakan. Pembuatan model hujan limpasan adalah untuk menduga limpasan dan menerangkan proses-proses hidrologi. Selain itu pemodelan hidrologi juga harus dapat menerangkan sistem hidrologi secara fisis untuk sejumlah aplikasi. Allewijn (1990, dalam Hadi, 2003) mengemukakan pemodelan hujan limpasan pada dasarnya dapat dibedakan berdasarkan tingkat kerincian proses-proses hidrologi dan berdasarkan karakteristik komponen masukan dan komponen keluaran. Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Model untuk pengalihragaman hujan menjadi aliran telah banyak dikembangkan dari model yang sederhana sampai model yang paling kompleks. Model tersebut antara lain model tanki, NAM, Watball (*water balance*), SWMM (*storm water management model*), HEC-1, RORB (*run off routing model*). Di Indonesia

penerapan model-model tersebut banyak menemui kendala karena keterbatasan data, baik untuk kalibrasi maupun untuk verifikasi. Dalam memilih model yang sesuai untuk daerah yang dikembangkan belum ada acuan dasarnya (Suyono, 1989).

Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) merupakan paket program perangkat lunak model hidrologi yang dikembangkan oleh *US Army Corps of Engineering* di Amerika Serikat untuk menganalisis proses hujan dan limpasan pada suatu DAS.

Tabel 6.2. Klasifikasi pemodelan hujan limpasan beserta contohnya

Tingkat kedetilan deskripsi fisis proses-proses hidrologi		Kedetilan karakteristik komponen masukan dan keluaran				
		Model kejadian hujan sesaat			Model seri waktu	
		Hujan efektif	Bentuk hidrograf	Puncak banjir	Aliran terusan	Imbangan air
Model Kotak Hitam	Model statistik/stokastik			Model regresi	Model stokastik	
	Model empiris	Phi indeks SCS-CN 1972	Nash 1960	STORM HEC-1 TR-20	Tank – Sugawara (1979)	Mawdley & Ali (1985)

Model Konseptual	Model konseptual lumped	SED 1988 OSE 1989	GIUH 1979	Hebson-Wood Diaz-Granadoz	API Monash Secramato SSARR Atandford-IV	Palmer (1972) Thornthwaite (1981)
	Model konseptual semi terdistribusi		Cell models (Beyd, 1979)	Allewijn 1990	USDAHL-74 WATBAL	Modifikasi Thronthwaite 1984
Model berbasis fisis	Model quasi physical based	Philip's eq Green-ampt	Kinematic wave eq	CREAMS (Knisel, 1980)	TOP MODEL WETZON E	ECOWAT
	Model distributed physically based	Richard's eq Modifikasi Green-Ampt	HEC-HMS	Frezee 1972 Smith&Hebbert 83	IHDM SHE	

Sumber: Allewijn & Singh (1990; 1997, dalam Hadi 2003), dengan modifikasi.

6.2. Model hidrologi HEC-HMS

Model HEC-HMS serupa dengan paket program terdahulu seperti HEC-1, kelebihanannya terdapat *distributed runoff* model dan *continous soil moisture accounting model*, yang dipilih. Model matematik yang terdapat dalam HEC-HMS menjelaskan respon DAS terhadap hujan yang jatuh dan kondisi aliran air dari hulu sampai hilir DAS. Komponen model berupa variabel tetap, parameter, kondisi batas dan kondisi awal. Output software berupa hidrograf pada masing-masing outlet sub DAS pada waktu

tertentu yang ditunjukkan dengan grafik hidrograf dan tabel *time series* dari hidrologi tersebut (USACE, 2000).

Model HEC-HMS adalah model yang mampu mensimulasikan transformasi hujan menjadi limpasan, penelusuran banjir, simulasi aliran rendah (*low flow*), kalibrasi suatu nilai parameter, dan sebagainya, (USACE, 2000). Penggunaan HEC-HMS bertujuan membantu dalam menemukan karakteristik hidrograf (debit puncak, volume, dan waktu puncak) pada berbagai bentuk dinamika penggunaan lahan melalui simulasi penggunaan lahan.

Karakteristik suatu DAS dapat diketahui secara teliti melalui software HEC-HMS. Data berupa luas penggunaan lahan, pasangan data hujan dengan debit jam-jaman pada suatu kejadian hujan tertentu. Data tersebut digunakan untuk menentukan parameter yang terkait dengan penggunaan lahan dan jenis tanah, digunakan untuk memperoleh nilai *Curve Number* (CN) dan persen (%) *impervious area* masing-masing sub DAS.

6.3. Model Soil Conservation Service - Curve Number (SCS-CN)

Metode *soil conservation service* telah dikembangkan bertahun-tahun di Amerika Serikat dari catatan curah hujan untuk daerah aliran sungai yang didominasi oleh wilayah pertanian (Schwah *et al.*, 1981). Di Negara beriklim tropis termasuk

Indonesia daerah aliran sungai untuk pertanian banyak diperuntukkan untuk perkebunan kelapa sawit (Sastrosayono, 2007)

SCS-CN memperkirakan hujan efektif sebagai fungsi dari hujan kumulatif, penutupan lahan, penggunaan lahan (land use) dan kelembaban sebelumnya (*antecedent moisture*), dengan menggunakan Persamaan 6.1 (USACE, 2000):

$$P_e = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \dots\dots\dots(6.1)$$

dengan: P_e = Akumulasi hujan efektif pada saat t,
 P = Akumulasi curah hujan total pada saat t,
 Ia = Kehilangan awal air hujan sebelum terjadinya limpasan
 S = Retensi potensial maksimum

Hubungan antara Ia dan S berbentuk linear sama dengan Persamaan 6.2

$$Ia = 0,2 * S \dots\dots\dots(6.2)$$

Dengan akumulasi hujan efektif pada saat t, dirumuskan dengan Persamaan 6.3.

$$P_e = \frac{(P-0,2 S)^2}{P+ 0,8 S} \dots\dots\dots(6.3)$$

Retensi potensial maksimum (S) dihitung berdasarkan nilai CN dengan menggunakan Persamaan 6.4.a dan 6.4.b.

$$S = \frac{(1000-10 \text{ CN})}{\text{CN}} \text{ (inchi)} \dots\dots\dots 6.4.a$$

$$S = \frac{(25400-25400 \text{ CN})}{\text{CN}} \text{ (millimeter)} \dots\dots\dots 6.4.b$$

Pada model SCS *Curve Number* (CN) ini penggunaan lahan pada suatu bagian DAS tertentu diwakili dengan parameter CN. Nilai CN bervariasi dari 30 (untuk tanah dengan permeabilitas tinggi) sampai dengan 100 (untuk badan air). Nilai *Curve Number* (CN) suatu DAS dapat diperkirakan sebagai fungsi penggunaan lahan, jenis tanah dan kelembaban DAS sebelumnya menggunakan tabel SCS dan klasifikasi tanah secara hidrologi ditunjukkan pada Lampiran 4.

Untuk DAS yang di dalamnya terdapat berbagai macam jenis tanah dan penggunaan lahan, nilai CN dihitung sebagai CN komposit dengan menggunakan Persamaan 6.5 (Wijaya, 2004).

$$CN = \frac{\sum A_i * CN_i}{\sum A_i} \dots\dots\dots 6.5.$$

Dengan : *CN* = Nilai total CN komposit untuk menghitung volume *runoff* dengan HEC-HMS
i = Indeks Pembagian DAS yang mempunyai penggunaan lahan dan jenis tanah yang sama.

CN_i = Nilai CN untuk pembagian DAS *i*

A_i = Luas wilayah DAS *i*

Nilai CN ditentukan dengan memperhatikan kondisi kelembaban tanah sebelumnya (AMC atau *antecedent moisture condition*). Nilai AMC dapat ditentukan secara sederhana dengan pendekatan yang berdasarkan pada jumlah hujan yang jatuh selama 5 hari sebelum perhitungan CN dilakukan. Penentuan nilai CN berdasarkan kondisi AMC II dalam keadaan normal diasumsikan hujan yang turun lima hari sebelumnya berkisar antara 35 sampai 53 mm.

6.4. Model *Clark's Unit Hydrograph*

Tampungan pada permukaan tanah, saluran, atau dalam tanah memegang peranan penting dalam transformasi hujan menjadi aliran. *Linear reservoir model* merupakan metode yang mewakili efek dari tampungan ini. Pemodelan dimulai dengan menggunakan persamaan kontinuitas seperti Persamaan 6.6 (Tommy, 2010).

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \dots\dots\dots (6.6)$$

Keterangan:

dS/dt = Waktu rerata perubahan air dalam tampungan pada waktu t ,

I_t = Aliran masuk (inflow) rerata ke tampungan pada waktu t

O_t = aliran keluaran (*outflow*) dari tampungan pada waktu t

Aplikasi dari model Clark membutuhkan koefisien (R) dan *time area histogram*. Penelitian dari HEC telah dikembangkan bahwa terdapat suatu fungsi yang dapat digunakan, untuk mewakili *typical time-area* yaitu dengan Persamaan 1.8.

$$\frac{A_t}{A} = \left\{ 1.414 \left(\frac{t}{tc} \right)^{1.5} \quad \text{untuk } t \leq \frac{tc}{2} \right\} \text{ dan}$$

$$\frac{A_t}{A} = \left\{ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{tc} \right)^{1.5} \quad \text{untuk } t \geq \frac{tc}{2} \right\} \dots\dots\dots(6.7)$$

dengan A_t adalah kumulatif luas batas muka air yang memberikan kontribusi pada saat t , A adalah luas total DAS dan t adalah waktu konsentrasi (*time of concentration*). Dalam aplikasi *software* HEC-HMS hanya dibutuhkan parameter waktu konsentrasi yang dapat dilakukan melalui kalibrasi.

6.5. Model *Exponential Recession*

Aliran dasar dimodelkan dengan pengurangan secara eksponensial. Persamaan yang digunakan dalam pemodelan ditentukan dengan Persamaan 6.8 (Wijaya, 2004).

$$Q_t = Q_0 k^t \dots\dots\dots (6.8)$$

Pemodelan aliran dasar dengan menggunakan model ini melibatkan aliran awal (*junction flow*), rasio pengurangan (*the recession ratio*) dan aliran batas (*the threshold flow*). Konstanta pengurangan (k) tergantung dari sumber aliran dasar. Pada daerah permukaan yang alami, nilai k lebih kecil dari 1,00.

6.6. Model Muskingum

Konsep dasar dari model ini adalah persamaan kontinuitas (Wijaya, 2004):

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left(\frac{S_t + S_{t-1}}{\Delta t} \right) \dots\dots\dots (6.9)$$

Tampungan dalam saluran dimodelkan sebagai jumlah tampungan *prism* dan *wedge*. Tampungan *prism* didefinisikan sebagai aliran permanen air permukaan, sedangkan tampungan *wedge* adalah tambahan volume di bawah profil dari gelombang banjir. Selama ketinggian banjir naik, tampungan *wedge* adalah positif dan hal ini akan menambah tampungan *prism*. Selama banjir turun tampungan *wedge* adalah negatif dan akan mengurangi tampungan *prism*.

Volume tampungan *prism* adalah laju *outflow* O , yang dikalikan dengan *travel time* melalui saluran K . volume tampungan *wedge* adalah perbedaan antara *inflow* dan *outflow* yang dikalikan dengan *travel time* K dan *dimensionless weigh* X . dimana dalam model muskingum dinyatakan dengan Persamaan 6.10.

$$S_t = KO_t + KX(I_t - O_t) = K[XI_t + (1 - X)O_t] \dots (6.10)$$

Besarnya K dan X nilainya berkisar ($0 \leq X \leq 0,5$), diperoleh dengan kalibrasi.

6.7. Model hidrologi hujan–limpasan dengan *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*

Model hidrodinamik disusun atas beberapa komponen siklus hidrologi dan memiliki batasan-batasan yang terjadi pada DAS itu sendiri. Menurut Tivianton (2010), model hidrodinamik diwujudkan dengan perhitungan matematis sebagai representasi dari perubahan energi yang terjadi dalam siklus hidrologi DAS. Sistem model hidrologi (HEC-HMS) didesain untuk simulasi proses hujan limpasan pada sebuah DAS. HEC-HMS didesain untuk mudah digunakan di semua kondisi geologi dan geomorfologi DAS.

Perhitungan masing-masing model mempunyai komponen berupa :

1. Variable tetap
2. Parameter,
3. Batasan kondisi, dan
4. Kondisi permulaan.

Variabel tetap menunjukkan kondisi yang tidak berubah selama proses hujan limpasan berlangsung walaupun di lokasi yang berbeda, seperti kapasitas permeabilitas tanah. Parameter adalah nilai ukuran dari masing-masing komponen yang menyusun input

hingga output, seperti dalam unit hidrograf terdapat dua macam parameter, waktu tempuh dan puncak hidrograf. Nilai dari parameter dapat diperoleh dengan kalibrasi. Batasan kondisi diartikan sebagai prasyarat terpenuhinya model. Dalam model ini batasan kondisi yang digunakan adalah input dari DAS yang menyebabkan terjadinya limpasan hujan. Kondisi awal perumpamaan untuk menentukan permulaan dari aliran yang bersifat tidak selaras (*unsteady*). Output software ini adalah berupa grafik hidrograf dan tabel time series dari hidrograf.

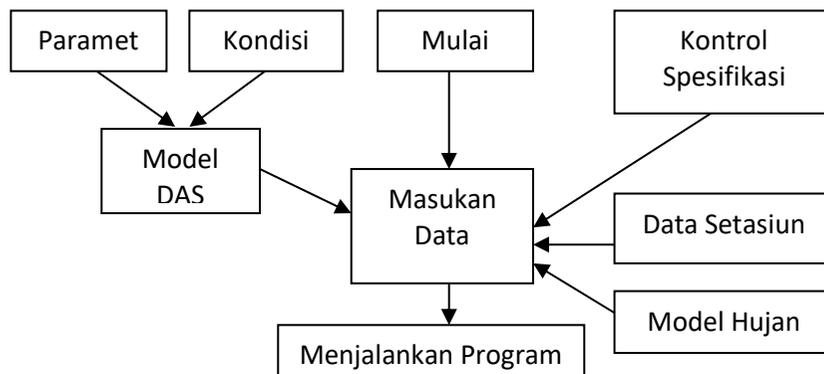
Komponen yang terdapat dalam HEC-HMS untuk mensimulasikan hujan-limpasan adalah sebagai berikut (USACE, 2000):

1. Presipitasi, dapat berupa curah hujan secara periodik
2. *Loss models*, untuk perkiraan debit limpasan yang disebabkan oleh input hujan dan karakteristik DAS.
3. *Direct runoff* untuk menghitung aliran permukaan tanah, *recharge*, dan pengurangan tingkat energi limpasan permukaan,
4. *Routing*, untuk menghitung *recharge* dan energi aliran air di sungai,
5. Kalibrasi, yang dapat memperkirakan parameter model dan kondisi awal tertentu dari masukan data meteorologi.

Proses pemodelan HEC-HMS untuk mempresentasikan masing-masing komponen dilalui dalam tahap pemodelan sebagai berikut :

1. Model perhitungan debit limpasan (*runoff*)
2. Pemodelan aliran langsung (*direct runoff*) dari limpasan permukaan (*runoff*) dan aliran antara (*interflow*).
3. Pemodelan aliran dasar (*baseflow*)
4. Pemodelan aliran pada saluran (*channel flow*).

Komponen HEC-HMS dalam suatu DAS ditunjukkan oleh *subbasin, reach, junction, source, diversion, reservoir dan sink*. Sub basin menandakan aspek fisik sub DAS seperti total hujan yang turun, *losses*, total aliran sungai dan *baseflow* pada *outlet* subDAS. *Reach* menandakan perhitungan *outflow* aliran pada hilir sungai. *Sourch* menandakan adanya sumber masukan *inflow* buatan. *Diversion* menandakan adanya pemisahan aliran dari aliran utama. *Sink* menandakan adanya keluaran berupa danau buatan yang tidak memiliki aliran keluaran. Skema penggunaan perangkat lunak HEC-HMS disajikan pada Gambar 6.1.



Gambar 6.1. Skema penggunaan program HEC-HMS (Wijaya, 2004., dengan modifikasi)

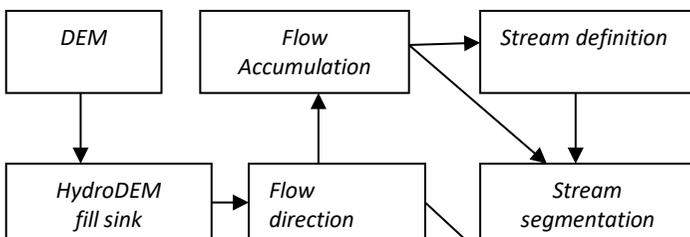
Penentuan dimulai dari elemen yang terdapat pada hulu hingga hilir, menggunakan perangkat lunak HEC-HMS. Model yang dapat dijalankan dalam HEC-HMS sangat bervariasi tergantung dari parameter batasan kondisi dan kondisi permulaan yang digunakan. Komponen meteorologi berisikan model perhitungan input presipitasi, termasuk proses evaporasi dan evapotranspirasi. Komponen syarat control berisi informasi waktu dimulainya model hingga selesai. Komponen input data dapat berupa format data periodik, data berpasangan, maupun data format grid. Tahapan dalam menjalankan *software* HEC-HMS versi 3.5 adalah:

- a. Memasukkan data *gage* (setasiun)

- b. Memasukkan data *basin model*, perlu ditentukan pilihan model (model *volume*, *runoff*, *direct runoff*, *baseflow*, dan *routing*). Masing-masing model mempunyai kondisi awal dan parameter yang harus diisi.
- c. Memasukkan data model *presipitation*, perlu ditentukan model hujan yang akan digunakan untuk analisis.
- d. Memasukkan *control specifications*
- e. *Running* program
- f. Menampilkan dan mengevaluasi hasil program

6.8. Analisis Karakteristik dan Morfometri DAS dengan HecGeo-HMS

Analisis morfometri DAS diambil dari data DEM dengan perangkat lunak HEC-GeoHMS. Uji batas DAS hasil HEC-GeoHMS dilakukan dengan perbandingan visual kenampakan kontur pada peta RBI, Aspek morfometri DAS seperti kemiringan lereng sungai, panjang sungai, titik berat DAS diperoleh juga dari analisis HEC-GeoHMS. Alur kerja Proses karakteristik SubDAS dalam Hec-GeoHMS disajikan dalam Gambar 6.2 (Tivianton, 2010). Selanjutnya dilakukan proses *terrain* yang terdiri dari delapan tahapan yaitu: 1) *Fill Sink*, 2) *Flow Direction*, 3) *Flow Accumulation*, 4) *Stream Definition*, 5) *Stream Segmentation*, 6) *Catchment Delineation*, 7) *Catchment Polygon Processing*, dan 8) *Drainage Line Processing*



Gambar 6.2, Alur proses karakteristik DAS dalam Hec-GeoHMS

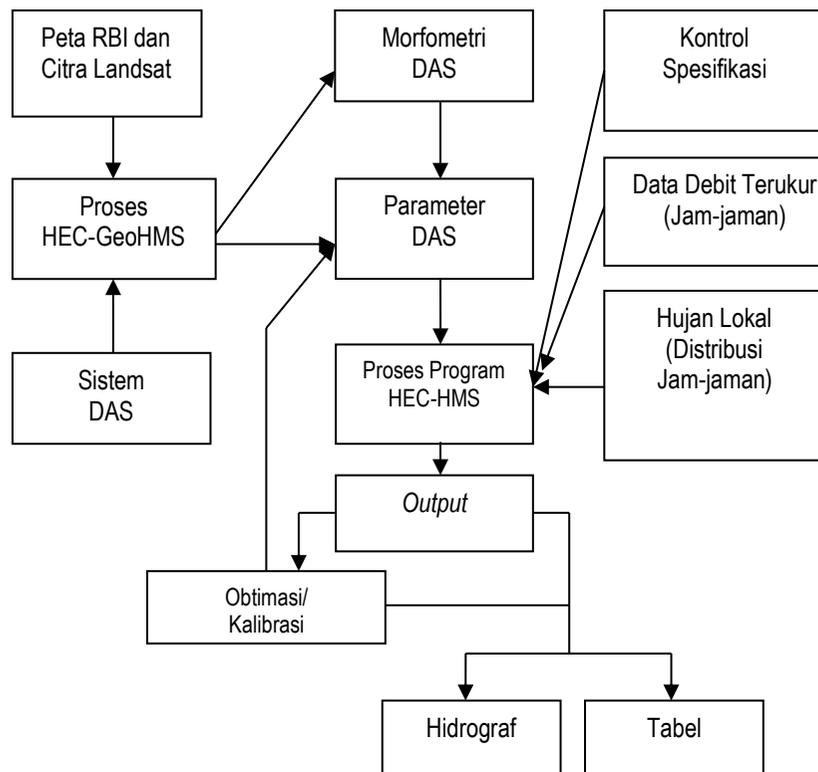
6.9. Analisis Hidrograf Debit Aliran dalam HEC-HMS

Analisis hidrograf debit aliran dalam HEC-HMS terdiri dari dua macam data, yaitu hidrograf debit aliran terukur dan hidrograf debit aliran model. Hidrograf debit aliran terukur diperoleh dari pasangan data hujan-limpasan interval jam-jaman. Hidrograf debit aliran model diperoleh dari model hidrodinamik dalam perangkat lunak HEC-HMS.

Penentuan pramodel hidrodinamik ditentukan pada tahap HEC-GeoHMS, seperti penentuan metode dalam *subbasin*, *reach*, dan *junction*. Parameter awal yang ditentukan sebelum pemrosesan dalam HEC-HMS juga turut dihasilkan oleh HEC-GeoHMS. Parameter awal tersebut adalah nilai *Curve Number*, *Time lag*, kelerengan sungai, panjang sungai, *river weight*.

Analisis untuk menghasilkan hidrograf debit aliran dalam model Hec-GeoHMS dan HEC-HMS secara garis besar dapat ditunjukkan pada Gambar 6.3.

Gambar 6.3. Alur pemodelan HEC-HMS (Tivianton, 2010., dengan modifikasi)



6.10. Estimasi volume *runoff* dengan Model *Soil Conservation Service – Curve Number (SCS-CN)*

Metode SCS-CN merupakan model yang dikembangkan oleh SCS-USDA untuk mensimulasikan nilai *runoff* dengan memasukkan parameter :

1. Penggunaan lahan
2. Tekstur tanah, dan
3. Tingkat kelembaban tanah saat terjadi hujan

Ketiga parameter tersebut kemudian ditentukan indeks dalam *Curve Number (CN)*, berdasarkan kelas hidrologi tanah (*Hydrology Soils Group, HSG*) dan kondisi tutupan lahan yang bersifat umum. Persamaan untuk menentukan SCS ditunjukkan dalam Persamaan 6.10

$$Pe = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \dots\dots\dots (6.10)$$

Dimana :
 P_e = Akumulasi hujan efektif pada saat t ,
 P = Akumulasi curah hujan pada saat t ,
 I_a = Kehilangan awal air hujan sebelum terjadinya limpasan
 S = Retensi potensial maksimum

Hubungan antara I_a dan S berbentuk linear dengan Persamaan 6.11.

$$I_a = 0,2 * S \dots\dots\dots (6.11)$$

Dengan akumulasi hujan efektif pada saat t , dirumuskan dengan Persamaan 6.12

$$P_e = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \dots\dots\dots (6.12)$$

Potensi penyimpangan maksimum (S) dihitung berdasarkan nilai CN dengan menggunakan Persamaan 6.13.a atau 6.13.b.

$$S = \frac{(1000-10\ CN)}{CN} \text{ (inchi)} \dots\dots\dots 6.13.a$$

$$S = \frac{(25400-25400\ CN)}{CN} \text{ (millimeter)} \dots\dots 6.13.b$$

6.11. Estimasi *Direct runoff* dengan Model Clark Unit Hydrograph

Bentuk hidrograf satuan sintetik model Clark pada dasarnya ditentukan berdasarkan parameter waktu konsentrasi

(t_c), koefisien simpanan DAS (R) dan diagram luas-waktu. Johnstone and Cross (1949, dalam USACE, 2000) mengenalkan salah satu persamaan untuk mencari waktu konsentrasi (jam) menggunakan Persamaan 6.14.

$$T_c = 5,0 \left(\frac{L_{ms}}{\sqrt{ars}} \right)^{0,5} \dots\dots\dots (6.14)$$

Dengan L_{ms} adalah panjang sungai utama (mil), dan ars adalah kemiringan saluran atau *slope channel* (ft/mil). Persamaan yang digunakan HEC-HMS untuk kurva luas-waktu adalah:

$$\frac{A_t}{A} = \left\{ \begin{array}{l} 1,414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1,5}, \text{ untuk } : t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1,5}, \text{ untuk } : t \geq \frac{t_c}{2} \end{array} \right\}$$

dimana, A_t adalah luas kumulatif yang berkontribusi pada waktu t , dan A adalah luas total DAS.

6.12. Estimasi *Baseflow* dengan Model Resesi Eksponensial

Aliran dasar terjadi akibat limpasan yang berasal dari kejadian presipitasi terdahulu yang tersimpan secara temporer dalam suatu DAS, ditambah dengan limpasan subpermukaan yang

tertunda dari suatu kejadian hujan. Pada penelitian ini, metode perhitungan aliran dasar yang digunakan adalah *exponential recession model*. Hubungan antara aliran dasar pada periode $t(Q_t)$ dan aliran dasar awal/pada $t=0$. (Q_0) dirumuskan dalam persamaan 6.15 (USACE, 2000):

$$Q_t = k^t * Q_0 \dots \dots \dots (6.15)$$

dengan k merupakan konstanta resesi.

Parameter *baseflow model* yang diperlukan HEC-HMS sebagai masukan meliputi aliran dasar awal, konstanta resesi dan aliran *threshold* (aliran saat dimulainya kurva resesi pada sisi yang menurun dari sebuah hidrograf). Ketiga parameter tersebut ditetapkan berdasarkan analisis terhadap hidrograf pengamatan.

Pemodelan aliran dasar memasukkan unsur aliran awal (*initial flow*) Q_0 , rasio pengurangan (*recession ratio*) dan aliran antara. Konstanta pengurangan (k) tergantung dari sumber aliran dasar. Pada daerah permukaan yang alami nilai berkisar $0 \leq k \leq 1$.

6.13. Proses Validasi dan Kalibrasi

Validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hidrograf debit aliran berdasarkan hasil simulasi atau model dan

hidrograf debit aliran berdasarkan hasil pengukuran lapangan atau observasi. Pengujian parameter yang mempengaruhi hidrograf debit aliran ditentukan berdasarkan masukan nilai tertentu untuk menghasilkan kesesuaian hidrograf terukur dan hasil simulasi. Pada proses ini dapat diketahui parameter mana yang lebih besar keterpengaruhannya (*sensitivity analysis*) terhadap hidrograf simulasi.

Untuk melihat ketelitian dari nilai-nilai parameter dugaan komponen sistem, maka digunakan teknik analisis kepekaan (*sensitivity analysis*). Dengan merubah nilai setiap parameter ke atas dan ke bawah, melalui suatu analisis komputer dapat dilihat respon dari sistem tersebut. Apabila respon sistem kecil maka dikatakan bahwa sistem tidak sensitif terhadap nilai parameter tersebut. Apabila respon sistem besar menunjukkan bahwa nilai parameter tersebut penting, oleh karena itu diperlukan suatu dugaan yang lebih teliti lagi (Smith, 1970).

Kalibrasi adalah suatu prosedur untuk menentukan nilai-nilai yang dianggap telah dapat mewakili keadaan DAS/sub DAS yang sebenarnya, berdasarkan data masukan dan keluaran yang tersedia. Kalibrasi dalam program HEC-HMS dimaksudkan untuk melakukan proses pengecekan output dari HEC-HMS terhadap data-data yang tersedia di lapangan. Proses kalibrasi juga digunakan untuk mengetahui kesesuaian dari

estimasi nilai parameter-parameter yang kita gunakan dengan nilai yang sebenarnya di lapangan.

Proses kalibrasi memerlukan data hidrograf debit terukur dan hidrograf debit model pada waktu yang sama sebagai perbandingan. Proses ini dilakukan secara otomatis dan berulang dengan iterasi tertentu oleh perangkat lunak HEC-HMS. Hasil kalibrasi ditentukan oleh nilai *objective function* model hidrograf debit. Dalam proses kalibrasi nilai parameter DAS yang dimasukkan pada *input* data awal dapat diverifikasi kembali hingga didapat hidrograf debit model yang mendekati hidrograf debit terukur.

Adapun kriteria yang digunakan untuk menyatakan hasil optimasi model kalibrasi perangkat lunak Hec-HMS tersebut cukup baik adalah sebagai berikut:

1. Kemiripan bentuk hidrograf debit model hasil kalibrasi dengan hidrograf debit terukur.
2. Besarnya selisih debit puncak, volume, waktu puncak dan *time to center of mass* antara hidrograf debit model hasil kalibrasi dengan hidrograf debit terukur adalah sangat kecil.
3. Nilai *objective function* kurang dari 10 %.

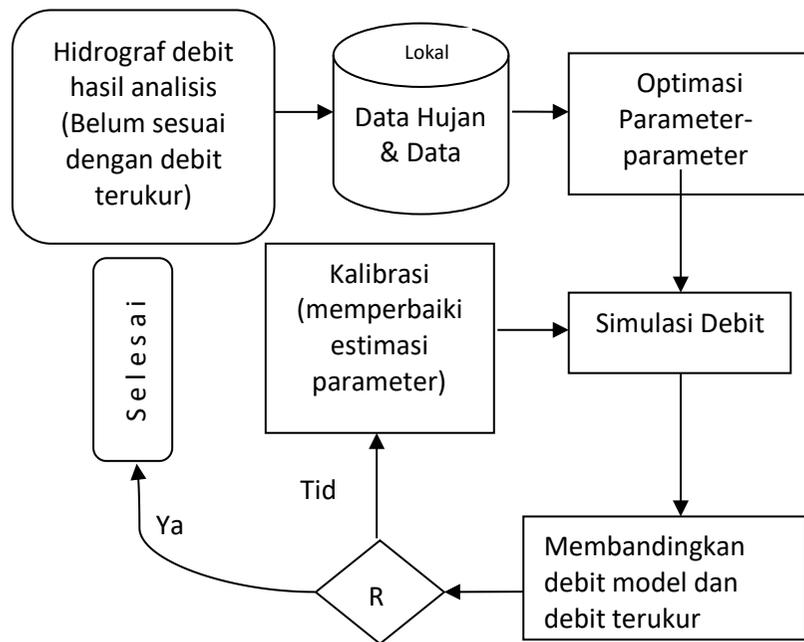
Beberapa fungsi kalibrasi yang terdapat dalam HEC-HMS dinyatakan dalam Tabel 3.8. Setelah proses kalibrasi selesai dimana hidrograf debit model telah sesuai dengan nilai besaran hidrograf terukur, maka debit model dinyatakan sebagai nilai potensi debit air sungai yang akan dimasukkan sebagai variabel inti dalam perumusan potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan. unsur lain yang perlu dianalisis adalah perolehan tinggi jatuh air (*head*) pada tempat yang dinilai dapat menghasilkan ketinggian jatuh air yang memadai.

Uji validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hidrograf debit aliran berdasarkan hasil simulasi atau model dan hidrograf debit aliran berdasarkan hasil pengukuran lapangan atau observasi. Pada tahap ini dapat ditentukan nilai keterpengaruhannya (*sensitivity analysis*) parameter subDAS dalam pembentukan hidrograf model.

Tujuan kalibrasi adalah untuk mendapatkan besaran parameter dan kondisi awal dari model, sehingga keluaran (hidrograf debit) model sesuai/mirip dengan hidrograf terukur. Proses kalibrasi memerlukan data hidrograf terukur jam-jaman dan data hujan jam-jaman pada rentang waktu yang sama.

Proses kalibrasi dilakukan pada parameter dan kondisi awal dari model yang dipilih seperti skema yang disajikan pada Gambar 6.4. Untuk melihat kesesuaian antara hidrograf model dan hidrograf terukur, *software* HEC-HMS menghitung indeks

kesesuaian (*index of goodness-of-fit*) yang dinyatakan dengan *objective function*. Selisih debit puncak dan volume hidrograf aliran mendekati 0% atau dapat melihat kemiripan hidrograf model dan hidrograf terukur. Dalam *software* terdapat empat jenis *objective function* yang pemilihannya tergantung dari kebutuhan analisis. Tujuan penggunaan *objective function* adalah untuk menentukan nilai parameter yang sesuai dengan meminimalkan nilai *objective function* tersebut. Pilihan *objective function* dapat dilihat pada Tabel 6.3 (USACE, 2000)



Gambar 6.4. Skema prosedur kalibrasi parameter limpasan (Wijaya, 2004., dengan modifikasi)

Keterangan:

- Ya : hidrograf debit model telah menyerupai hidrograf debit terukur (model diterima sebagai representasi debit aliran).
- Tidak : hidrograf debit model belum menyerupai hidrograf debit terukur (dilakukan proses Kalibrasi).

Tabel 6.3. Fungsi objektif dalam *software* HEC-HMS

Jenis	<i>Objective function</i>
Jumlah absolut nilai kesalahan	$Z = \sum_{i=1}^{NQ} [q_o(i) - q_s(i)]$
Jumlah kuadrat nilai sisa	$Z = \sum_{i=1}^{NQ} [q_o(i) - q_s(i)]^{1/2}$
Persen kesalahan pada puncak	$Z = 100 \left| \frac{q_s(peak) - q_o(peak)}{q_o(peak)} \right|$
Fungsi objektif kesalahan akar Kuadrat rata-rata puncak ter-Timbang	$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_s(i) - q_s(i))^2 \right] \left(\frac{q_o(i) + q_o(mean)}{2q_o(mean)} \right) \right\}^{1/2}$

Sumber: USACE (2000)

Keterangan:

- Z = *objective function*
- NQ = Jumlah ordinat hydrogen hasil hitungan
- q_o(i) = Debit terukur (lapangan)
- q_s(i) = Debit terhitung (model)

$q_o(\text{peak})$ = Debit puncak terukur
 $q_s(\text{peak})$ = Debit puncak terhitung
 $q_o(\text{mean})$ = Debit terukur rata-rata.

3.3.5. Simulasi Model di DAS Bone

Setelah hasil optimasi kalibrasi telah diperoleh, dimana terdapat kesesuaian antara hidrograf model dan hidrograf terukur, maka besaran volume dan debit aliran yang diperoleh ditetapkan sebagai hasil analisis model penelitian.

Simulasi adalah suatu teknik numerik untuk mengadakan eksperimen hipotetis bagi model matematis, yang dapat menjabarkan tingkah laku sistem dinamik secara kuantitatif. Dengan simulasi hidrologi dapat dengan jelas digambarkan proses curah hujan dan limpasan permukaan melalui satu seri fungsi-fungsi matematik di mana setiap komponen digambarkan dalam satu proses yang khusus dan seluruh proses sistem alam dalam simulasi gabungan. Program simulasi hidrologi dirancang dengan curah hujan sebagai masukan utama dan aliran sungai (***streamflow***) sebagai keluaran (Wijaya, 2004). Jadi dengan simulasi hidrologi dimungkinkan untuk menggambarkan data curah hujan historis ke dalam nilai-nilai aliran sungai yang menunjukkan pengaruh dari lahan dan saluran-saluran terhadap fluktuasi aliran dan membantu pengertian tentang siklus hidrologi dalam suatu Daerah Aliran Sungai.

Nilai CN dan Ia diperoleh berdasarkan analisis penggunaan lahan dan jenis tanah dengan kondisi hidrologi (HSG) tanah yang telah disesuaikan berdasarkan hasil pengecekan. Data utama berupa luas penggunaan lahan, pasangan data hujan dan debit jam-jaman pada suatu kejadian hujan tertentu. Data tersebut digunakan untuk menentukan parameter yang terkait dengan penggunaan lahan dan jenis tanah, digunakan untuk memperoleh nilai *curve number* (CN) dan persen (%) *impervious area* masing-masing subDAS. Parameter lain yang sulit dilakukan pengukuran didapatkan dengan proses kalibrasi (Setyowati, 2010).

Berdasarkan proses kalibrasi parameter akan diperoleh nilai parameter berupa: *initial loss*, *time of concentration*, *Clark's storage coefficient*, *recession constant*, *recession threshold*, *initial baseflow*, serta Muskingum K dan X. parameter yang telah diperoleh diasumsikan telah mempresentasikan keadaan sebenarnya subDAS dan selanjutnya digunakan untuk memprediksi besarnya debit aliran sungai pada subDAS lain berdasarkan perubahan karakteristik hidrograf (debit puncak, volume, dan waktu puncak) (Sujono, 1999).

Proses simulasi dimulai dari perubahan *input* parameter pada *basin* maupun *subbasin* dan *reach*. Perubahan parameter berupa nilai *Curve Number*, *impervious area* dan data hujan harian

rata-rata pada wilayah. Perlu diketahui bahwa dalam melakukan simulasi, nilai *observed flow* pada *junction* tidak digunakan lagi.

BAB VII

ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO

7.1. Analisis debit andalan

Analisis ketersediaan air adalah dengan membandingkan kebutuhan air total termasuk kebutuhan air untuk PLTMH dengan ketersediaan air. Setelah dibandingkan akan didapat kelebihan atau defisit air pada setiap bulannya, baik pada saat ini ataupun waktu yang akan datang. Secara umum debit andalan dinyatakan sebagai data aliran sungai yang dapat terpenuhi sepanjang waktu untuk keperluan pengembangan sumberdaya air. Analisis debit andalan bertujuan untuk mendapatkan potensi sumber air yang berkaitan dengan rencana pembangunan PLTMH. Salah satu metode untuk menentukan debit andalan sungai adalah menggunakan metode *flow duration curve* (FDC).

Cole (2003), menjelaskan bahwa bentuk grafik FDC adalah logaritmik yang memenuhi persamaan berikut:

$$y = 1 - \frac{a}{b} (1 - x)^b \dots \dots \dots (7.1)$$

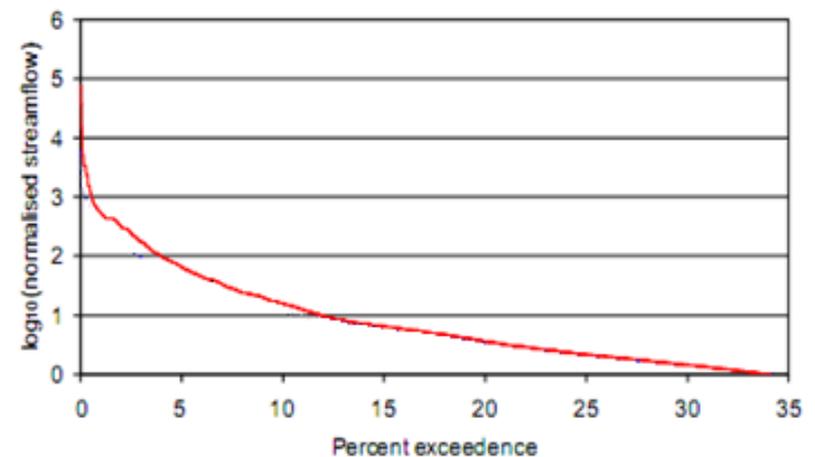
y : Log normalised streamflow

x : Peluang terlampaui

a : Intersep aliran

b : Sebuah konstanta yang mengendalikan kemiringan kurva FDC.

Data rata-rata debit sungai harian dapat diringkas dalam bentuk *flow duration curve* (FDC) yang menghubungkan aliran dengan persentase dari waktu yang dilampaui dalam pengukuran. FDC diplotkan dengan menggunakan data aliran atau debit pada skala logaritmik sebagai sumbu Y dan persentase debit pada skala peluang sebagai sumbu X. Contoh grafik kurva FDC disajikan pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1. Contoh Grafik *Flow Duration Curve* (FDC) (Cole, 2003).

Menurut pengamatan, besarnya debit andalan yang diambil untuk penyelesaian optimum penggunaan air di beberapa macam proyek sumberdaya air adalah (Soemarto, 1987):

- Penyediaan air minum = 99 %
- Penyediaan air industri = 95 – 98 %
- Penyediaan air irigasi:
 - daerah beriklim setengah lembab = 70 – 85 %
 - daerah beriklim kering = 80 – 95 %
- Pusat listrik tenaga air = 85 – 90 %

Dalam perencanaan pusat pembangkit listrik tenaga air biasanya ditentukan terlebih dahulu debit andalan (*dependable discharge*), guna menentukan debit yang diharapkan tersedia di sungai untuk memperkirakan daya terpasang pusat listrik tenaga air. Debit andalan adalah debit aliran sungai yang tersedia sepanjang tahun yang akan digunakan untuk proyek-proyek pengembangan sumberdaya air.

Debit andalan dapat dicari dengan membuat terlebih dahulu garis durasi untuk debit-debit yang disamai atau dilampaui, kemudian menetapkan suatu andalan yaitu suatu frekuensi kejadian dimana di dalamnya terdapat paling sedikit satu

kegagalan. Andalan yang didasarkan atas frekuensi kejadian (jaminan, kepastian) dirumuskan sebagai berikut (Soemarto, 1986):

$$A = \frac{n-q}{n} \times 100\%$$

Dengan n = banyaknya pengamatan
 q = banyaknya kegagalan, yaitu debit yang lebih kecil dari debit andalan

Debit andalan yang digunakan untuk keperluan pusat pembangkit tenaga listrik adalah sebesar 85 – 90 %, yang artinya dari sekian banyak kejadian debit aliran sungai sepanjang tahun, harus dapat dipenuhi debit kisaran 85 – 90% yang akan digunakan sebagai energi pembangkit tenaga listrik.

Nilai debit andalan yang digunakan untuk pembangkit listrik adalah sebesar 90%. Debit andalan dianalisis menggunakan metode *Flow Duration Curve* (FDC) yakni dengan menggambarkan grafik kurva hubungan debit dengan frekuensi kejadiannya. Proses pembuatan kurva FDC adalah dengan mengurutkan data debit dari data terbesar hingga data terkecil pada sumbu Y, dan membuat probabilitas ranking angka kejadian dari 1 – 100% pada sumbu X. Probabilitas debit untuk setiap presentasi dihitung menggunakan Persamaan 7.2 (Soemarto, 1986):

$$P = 100 \times \left[\frac{M}{n+1} \right] \dots\dots\dots (7.2)$$

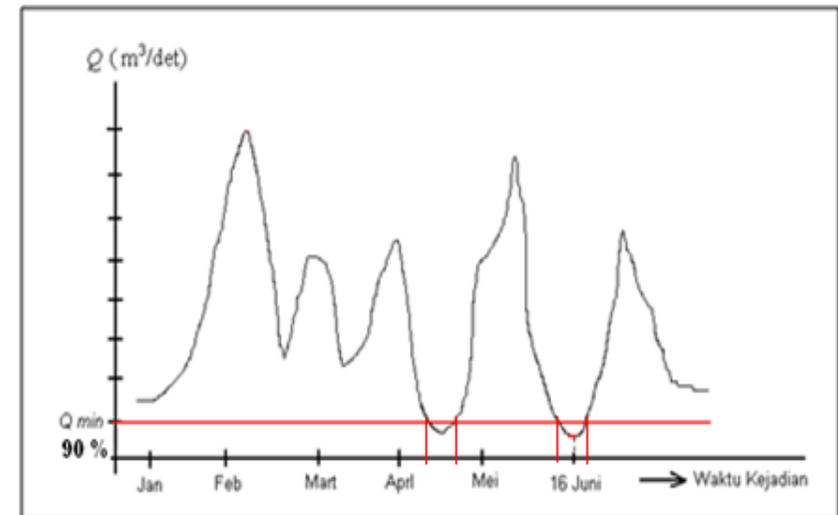
Dengan: P = Probabilitas dari debit air

M = Posisi ranking dari data debit
 n = Total data

Sebaran data debit menurut persentase kejadian yang disajikan melalui hasil analisis kurva FDC merupakan informasi penting dalam merancang struktur dan kapasitas pembangkit listrik mikro hidro yang akan dibuat.

Dalam menentukan debit aliran sungai secara rinci berdasarkan waktu kejadian yang akan digunakan untuk memutar turbin generator listrik sepanjang tahun, digunakan nilai debit 90 % dari total debit aliran yang tersedia sepanjang waktu sebagai debit minimum sungai.

Debit minimum diperoleh dengan memplot hidrograf debit aliran sepanjang satu tahun berdasarkan waktu kejadian. Jika terdapat 360 nilai debit dalam 1 tahun, maka ada 36 nilai debit tidak terpenuhi sebagai nilai debit yang akan memutar turbin generator untuk menghasilkan energi listrik. Dengan proses tersebut dapat diketahui kapan terjadinya nilai debit minimum di sungai sehingga untuk penggunaannya dapat diperhitungkan kapasitas komponen/generator listrik. Untuk jelasnya penentuan debit minimum yang terpenuhi 90 % berdasarkan kejadian hidrograf debit aliran sungai di sajikan pada Gambar 7.2.



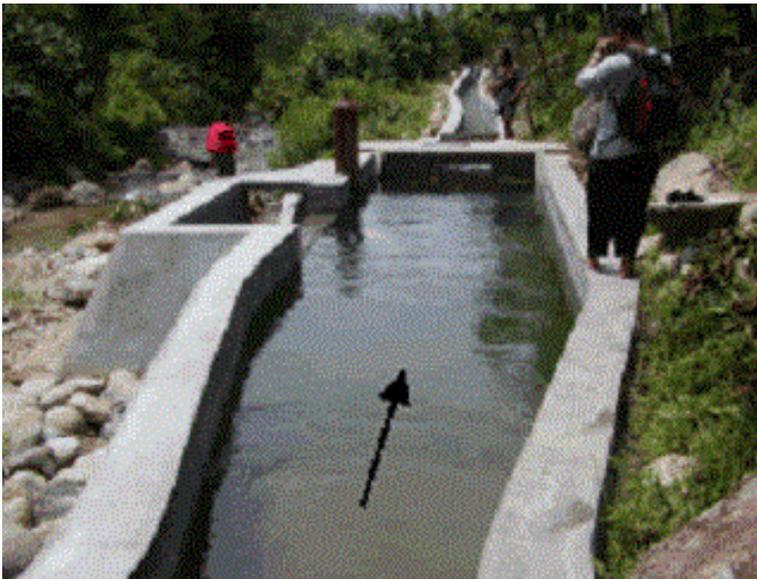
Gambar 7.2, Penentuan Debit Minimum 90% terpenuhi

Debit minimum merupakan acuan potensi debit aliran sungai yang akan digunakan untuk menentukan kapasitas daya listrik dari pembangkit listrik tenaga air yang akan dibangun.

7.2. Tinggi jatuh air (*head*)

Tinggi jatuh air rancangan digunakan sebagai energi penggerak pembangkit tenaga listrik yang akan dibuat. Penetapan lokasi pembangunan pembangkit tenaga listrik dilakukan melalui analisis kemiringan lereng di wilayah DAS. Diupayakan dapat diperoleh kemiringan lereng yang cukup tinggi untuk memungkinkan potensi arus air yang cukup besar untuk memutar turbin pembangkit listrik. Hal penting yang harus dipertimbangkan bahwa pemilihan tempat pembangunan pembangkit tidak terlalu jauh dari titik pengukuran debit air.

Untuk mendapatkan tinggi jatuh air yang memadai perlu dibangun saluran air yang sesuai agar dapat menghasilkan volume aliran sungai optimal untuk memutar turbin pembangkit listrik. Sebagai contoh bangunan saluran air untuk pembangkit listrik mikro hidro disajikan pada Gambar 7.3.



Gambar 7.3, Saluran air pembangkit listrik mikro hidro.

Sumber: download internet,

Perolehan tinggi jatuh air (*head*) didasarkan pada kemiringan (*slope*) sungai sesuai kondisi lapangan. Sudut elevasi kemiringan sungai dapat diperoleh melalui pengukuran lapangan dengan menggunakan alat ukur theodolite, atau melalui interpretasi citra dengan menentukan nilai ketinggian tempat titik pengamatan (tempat AWLR) dan nilai ketinggian tempat pada bangunan pembangkit listrik mikro hidro sesuai asumsi jarak ideal yang dapat diperoleh. Penentuan nilai ketinggian jatuh air (*head*) ditentukan dengan mengurangkan nilai ketinggian titik pengamatan dan nilai ketinggian titik bangunan PLTMH. Nilai ketinggian tempat dijumlahkan dengan tinggi aliran air sungai setelah dibendung merupakan nilai tinggi jatuh air (*Head*) sungai. Penentuan *Head* berdasarkan asumsi jarak ideal lapangan disajikan pada Gambar 7.4.



Gambar 7.4, Penentuan *Head* berdasarkan asumsi jarak ideal dari titik pengamatan sampai ke bangunan PLTMH

7.3. Energi air untuk pembangkit tenaga listrik

Total energi yang tersedia dari suatu reservoir air adalah merupakan energi potensial air yaitu (Agung, 2008):

$$E = mgh \dots\dots\dots (7.3)$$

dengan E adalah energi potensial air ($m^3/det.$)

m adalah massa air, h adalah head (m)

g adalah percepatan gravitasi ($m/det.^2$)

Daya merupakan energi tiap satuan waktu (E/t), sehingga persamaan 7.3 dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{E}{t} = \frac{m}{t} gh \dots\dots\dots (7.4)$$

Dengan mensubsitusikan P terhadap (E/t) dan mensubsitusikan ρQ terhadap (m/t) maka :

$$P = \rho Qgh \dots\dots\dots (7.5)$$

dengan

P adalah daya (watt)

Q adalah kapasitas debit aliran (m^3/s)

ρ adalah densitas air (kg/m^3)

Selain memanfaatkan air jatuh *hydropower* dapat diperoleh dari aliran air datar. Dalam hal ini energi yang tersedia merupakan energi kinetik

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \dots\dots\dots (7.6)$$

dengan v adalah kecepatan aliran air (m/s)

Daya air yang tersedia dinyatakan dengan Persamaan 7.7

$$P = \frac{1}{2} \rho Qv^2 \dots\dots\dots(7.7)$$

atau dengan menggunakan persamaan kontinuitas $Q = Av$

maka

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 \dots\dots\dots (7.8)$$

dengan A adalah luas penampang aliran air (m^2)

Pembangkitan tenaga air adalah suatu bentuk perubahan tenaga dari tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik, dengan menggunakan turbin air dan generator. Daya (*power*) yang dihasilkan dapat dihitung berdasarkan Persamaan 7.9 (Arismunandar dan Kuwahara, 2000).

$$P = 9,8 \cdot H \cdot Q \cdot \eta T \dots\dots\dots (7.9)$$

Dengan:

P = tenaga listrik yang dikeluarkan secara teoritis (KW)

H = tinggi jatuh air efektif (m)

Q = debit air (m^3/s)

η_T = efisiensi turbin

Jika tinggi jatuh efektif maksimum adalah H (m), maka debit maksimum turbin adalah Q (m^3/s), efisiensi dari turbin dan generator masing-masing adalah η_T dan η_G , maka:

Daya teoretis = $9,8 Q H$ (kW)

Daya turbin = $9,8 \eta_T Q H$ (kW)

Disini baru memperhitungkan potensi daya terpasang, belum memperhitungkan efisiensi. Untuk selanjutnya dipakai efisiensi *over all* sebesar 0,75 (untuk turbin, generator, distribusi). Menurut Abdul Kadir (1995), berdasarkan ketentuan PLN bahwa untuk Pembangkit Listrik dengan kapasitas terpasang masing-masing dibedakan:

- 1) Untuk kapasitas terpasang lebih kecil sama dengan 100 KW disebut Pusat Listrik Tenaga Mikro Hidro.
- 2) Untuk kapasitas terpasang antara 500 KW sampai dengan 5000 KW disebut Pusat Listrik Tenaga Mini Hidro (PLTM).

Untuk kapasitas terpasang lebih besar dari 5000 KW disebut Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA).

7.4. Analisis kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Air

Kajian layak tidaknya Pembangkit Listrik Tenaga Air dapat dibangun pada suatu aliran sungai adalah dilihat dari kajian teknis, ekonomis dan sosiologis (Ketut, 2009). Kajian teknis adalah menyangkut besarnya debit aliran sepanjang tahun apakah terpenuhi untuk memutar turbin. Diharapkan ketika debit aliran mencapai minimum, turbin masih tetap bisa beroperasi.

Di samping itu ketinggian jatuh air yang ideal dapat diperoleh di lokasi pengamatan debit. Kajian ekonomis dimaksudkan untuk mengetahui apakah pembangunan PLTMH menguntungkan dari segi ekonomis. Perhitungan total biaya investasi, break even point serta perhitungan ekonomis lainnya perlu dilakukan secara cermat.

Dari segi sosial perlu juga dilakukan kajian untuk mengetahui respon masyarakat setempat. Pembangunan PLTMH dapat menunjang aktivitas kehidupan masyarakat. Apakah pembangunan PLTMH tidak mengurangi debit aliran untuk fungsi kebutuhan mandi, cuci, atau untuk irigasi.

Pembangunan PLTMH berdasarkan kebutuhan masyarakat berbasis lingkungan DAS (bukan kebutuhan perorangan), harus memperhitungkan banyaknya pemukiman yang ada di lingkungan DAS. Pada DAS kecil jumlah pemukiman rata-rata berkisar antara 40 – 500 rumah. Pada asumsi 40 rumah dan jika 1 rumah mendapat pasokan daya listrik 200 watt (MCB 1 ampere), maka kebutuhan daya listrik untuk 40 rumah adalah sebesar 8.000 watt atau 8 KW.

Di sepanjang aliran sungai dapat dibangun 2 – 4 PLTMH secara berderet. Buangan air PLTMH 1 menjadi penggerak turbin PLTMH 2, dan seterusnya sampai PLTMH 4. Untuk memenuhi pasokan listrik 40 rumah dengan kebutuhan daya listrik 8 KW, maka daya listrik minimal yang dihasilkan masing-masing 4 PLTMH adalah sebesar 2 KW. Dengan demikian jika daya listrik yang dihasilkan PLTMH kurang dari 2 KW dianggap tidak layak dibangun untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat yang berbasis lingkungan DAS.

Kemampuan daya PLTMH juga dapat diperbesar dengan menambah ketinggian jatuh air (*head*). Semakin besar ketinggian jatuh air yang dapat diperoleh di lapangan maka daya PLTMH yang dihasilkan akan semakin besar

BAB VIII

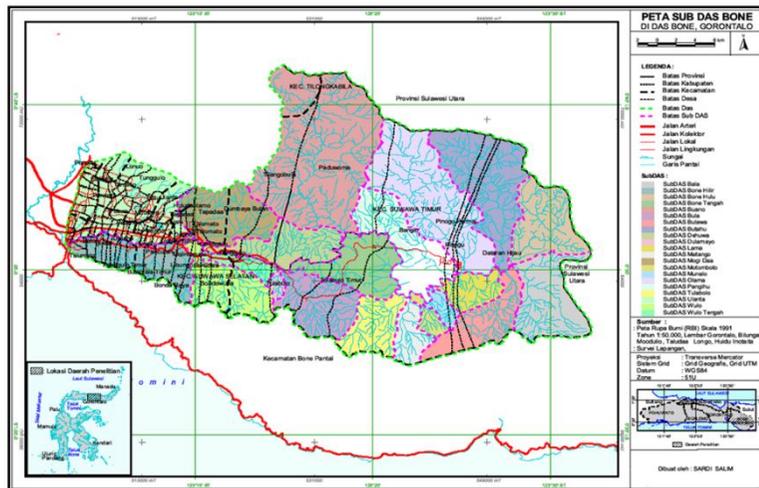
HASIL PENELITIAN PENERAPAN TEKNIK ANALISIS DEBIT ALIRAN SUNGAI

Menggunakan Model Hidrologi Hujan-Limpasan, HEC-HMS Berbasis DAS

Penelitian yang dilaksanakan di Daerah Aliran Sungai (DAS) BONE Gorontalo, untuk menentukan Nilai Debit Aliran masing-masing sungai (SubDAS) yaitu pada 17 SubDAS, diperoleh hasil analisis sebagai berikut:

1. Pemetaan DAS

Kondisi topografi DAS Bone dapat diklasifikasikan atas 6 kelas yaitu klasifikasi datar, klasifikasi landai/berombak, klasifikasi agak miring, klasifikasi miring, klasifikasi agak curam, dan klasifikasi curam. Kondisi topografi DAS bone didominasi oleh klasifikasi curam atau lereng pada kemiringan 45-65% yakni seluas 27.360,55 Hektar atau sebesar 26,27% dari total luas DAS Bone. Kelas lereng tersebut terdapat pada hampir seluruh subDAS di wilayah DAS Bone kecuali di subDAS Dulamayo dan subDAS Wolu Tengah. Peta DAS Bone seperti ditunjukkan pada Gambar 8.1.



Gambar 8.1, Peta DAS Bone Gorontalo

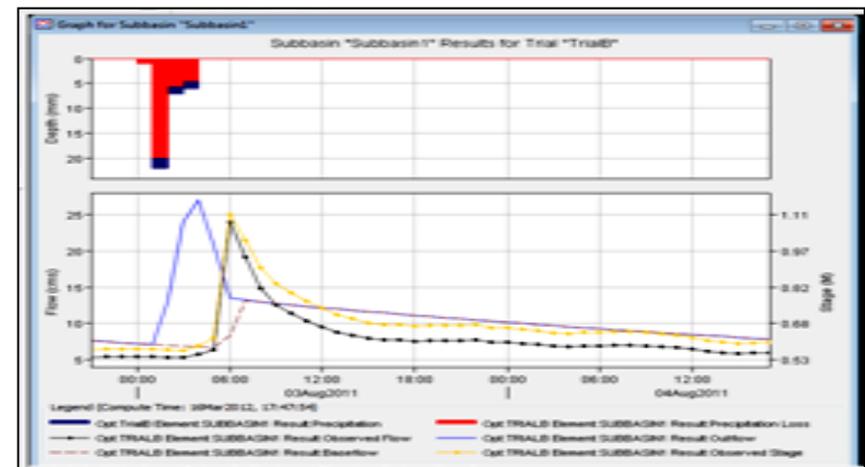
2. Analisis Pemodelan Hidrologi

Model hidrologi yang diterapkan di DAS Bone, dalam menentukan nilai debit aliran masing-masing sungai dalam SubDAS terlebih dahulu dianalisis melalui Teknik pemodelan hidrologi yang diterapkan di salah satu SubDAS yaitu SubDAS Bula. Hasil Analisis Parameter SUBDAS Bula yang akan diinput dalam HEC-HMS sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1, Parameter SUBDAS Bula

Komponen		Parameter	Nilai
1.	<i>SubBasin</i>	Area (Km ²)	44,38
2.	<i>Loss</i>	<i>Initial abstraction</i> (mm)	18,04
		<i>Curve Number</i>	60,77
		<i>Impervious (%)</i>	0,00
III	<i>Transform</i>	<i>Time Lag</i> (min)	168,00
IV	<i>Base Flow</i>	<i>Initial discharge</i> (M ³ /s)	5,30
		<i>Recession constant</i>	0,79
		<i>Flow</i> (m ³ /s)	7,70

Dengan menginput nilai parameter subDAS dalam software HEC-HMS dan dipadukan dengan input data hujan local area subDAS, Untuk data hujan tunggal pada tanggal 3 Agustus 2011 dan parameter morfometri subDAS, diperoleh hidrograf model sebagaimana disajikan pada Gambar 8.2.

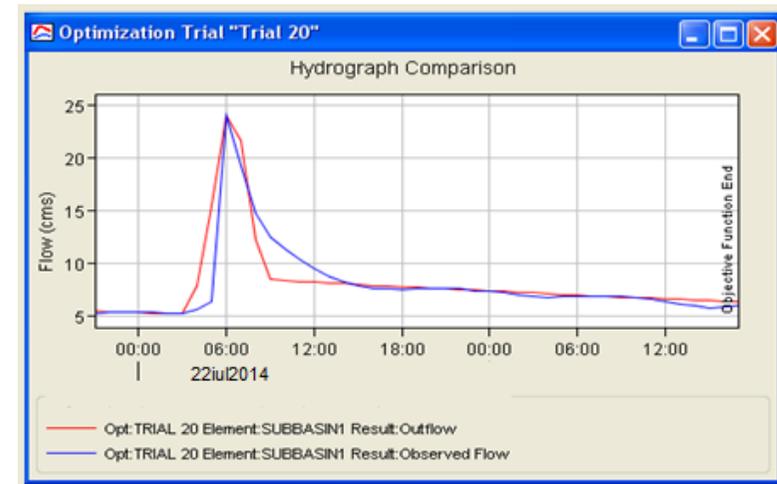


Running hasil proses kalibrasi dengan nilai parameter tersebut di atas menghasilkan hidrograf seperti Gambar 8.3.

Gambar 8.2, Hidrograf model hasil proses HEC-HMS
Output hidrograf model, terlihat bahwa hidrograf hasil simulasi berbeda dengan hidrograf hasil observasi. Dengan demikian model simulasi hasil HEC-HMS belum dapat diterima dan diperlukan proses validasi dan kalibrasi dengan melakukan penyesuaian pada nilai-nilai parameter model.

Proses validasi dan kalibrasi diperlukan untuk pengujian model, sehingga kemiripan hidrograf hasil model dengan pengamatan dapat terukur. Analisis sensitivitas dapat berguna untuk melihat pengaruh perubahan nilai-nilai parameter masukan terhadap parameter hasil model. Proses validasi dilakukan dengan mengganti nilai-nilai parameter dari nilai minimum sampai maksimum hingga *running* menemukan hidrograf model yang mendekati model pengamatan. Untuk parameter yang telah sesuai dapat di *lock* sambil terus menyesuaikan nilai parameter lainnya.

Pada penelitian ini, analisis sensitivitas HEC-HMS dilakukan terhadap 6 parameter yakni: *baseflow*, *baseflow threshold*, *Curve Number*, *initial abstraction*, *Recession Constant*, dan *Time Lag*. Nilai hasil optimasi kalibrasi parameter pada maksimum 50 *iteration*



Gambar 8.3, Hidrograf hasil optimasi kalibrasi HEC-HMS

Dari hasil kalibrasi, diperoleh bentuk hidrograf model yang hampir menyerupai hidrograf hasil observasi. Volume hidrograf simulasi masih sedikit berbeda dengan observasi, namun untuk *peak flow* telah sama dengan puncak hidrograf observasi. Demikian pula dengan garis *baseflow* diperoleh garis baseflow yang berdempet dengan hasil observasi. Mengingat hidrograf hasil simulasi sebagian besar telah menyerupai hasil observasi terutama

untuk *peak flow* dan garis *baseflow* maka hidrograf model dapat diterima dan dapat dinyatakan sebagai hidrograf model penelitian.

Hasil optimalisasi dengan software HEC-HMS pada waktu puncak tanggal 22 Juli 2014, jam 06.00 dan capaian waktu titik tengah basin tanggal 22 Juli jam 17.22, menghasilkan volume *runoff* adalah sebesar 29,52 mm dan debit puncak sebesar 23,98 m³/det, dengan persentasi penyimpangan volume *runoff* sebesar 1,56 % dan penyimpangan debit puncak adalah 0.

Berdasarkan hasil optimasi model hujan-aliran yang diterapkan di sungai Bula, SubDAS Bula Bone Bolango dapat jelaskan bahwa proses model HSS-SCS CN menghasilkan nilai debit aliran sungai sebesar 23,98 m³/det dan volume aliran sebesar 29,52 dengan nilai parameter: luas *area subBasin* = 44,38 Km², panjang sungai utama = 11,542 Km, *Curve Number* = 68,5, air yang terabstraksi ke dalam tanah (*Initial abstraction*) = 18,8 mm, aliran bawah tanah (*baseflow*) = 5,53 m³/det, rasio aliran yang terjadi sebelum dan pada saat pengukuran (*Recession constant*) = 0,8 dan waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh debit puncak setelah kejadian hujan maksimum adalah 73,35 menit atau 1,22 jam.

Berdasarkan hasil hidrograf debit aliran Sungai Bula, dapat diperoleh Debit Spesifik wilayah subDAS tersebut. Debit

puncak spesifik merupakan hasil pembagian dari debit puncak dengan luas subDAS. Debit spesifik dapat menjelaskan produksi air per satuan luas tertentu (1 Km²) dalam daerah subDAS. Data debit puncak spesifik di wilayah subDAS Bula disajikan pada Tabel 8.2.

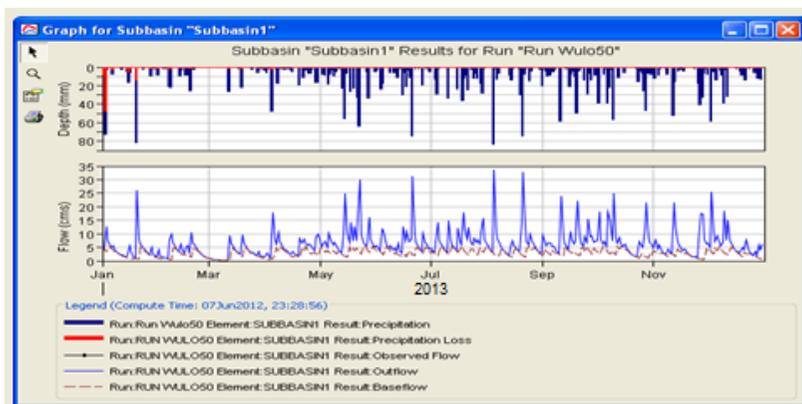
Tabel 8.2, Volume spesifik aliran subDAS Bula

SubDAS	Luas (Km ³)	Volume Observasi (mm)	Volume Simulasi (mm)	Simpangan volume (%)	Persentase simpangan volume
Bula Bone Bolango	44,38	29,06	29,52	0,45	1,56 %
Volume aliran spesifik	(29,52 x 1000)/44,38 = 66,51 mm				

Model alih ragam hujan limpasan (HSS-SCS CN) yang digunakan berdasarkan parameter-parameter di atas digunakan juga untuk menganalisis besaran debit aliran rata-rata sepanjang tahun berdasarkan data presipitasi yang ada. Data hujan di subDAS bula berdasarkan rekaman data setasiun hujan Bone Tulabolo (BWS Gorontalo) yang digunakan adalah data bulan Januari sampai Desember Tahun 2014.

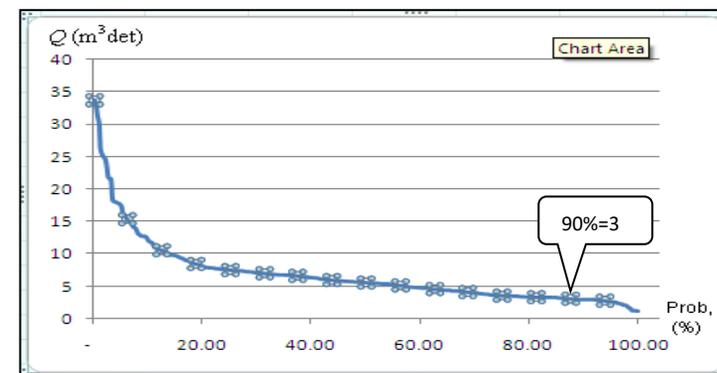
Hidrograf debit aliran rata-rata *continous* dianalisis berdasarkan data presipitasi hujan bulan Januari sampai Desember Tahun 2014. data hujan yang digunakan adalah data hujan harian. Data debit sebagai masukan untuk mengontrol nilai hidrograf terukur juga dirubah menjadi data debit harian.

Untuk menjaga tetap konsistennya nilai hidrograf simulasi dengan hidrograf terukur, dilakukan proses optimasi sesuai tanggal kejadian hidrograf terukur. Parameter optimasi tetap menggunakan nilai parameter hasil analisis model. Hasil optimasi hidrograf simulasi HEC-HMS dengan input presipitasi data hujan harian *continuous* bulan Januari sampai Desember Tahun 2014, disajikan pada Gambar 8.4.



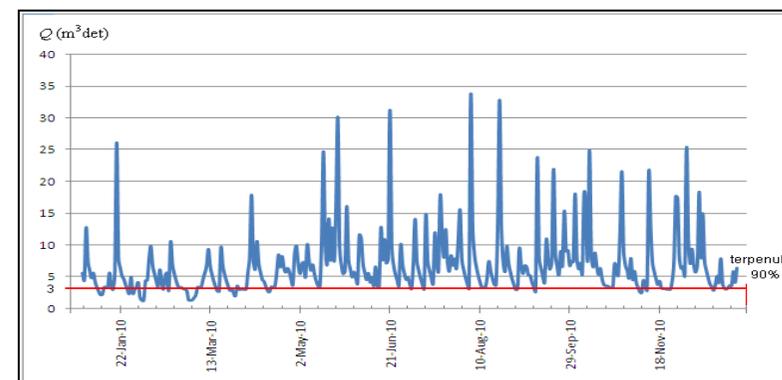
Gambar 8.4, Hidrograf debit aliran Sungai Bula subDAS Bula dengan input data presipitasi hujan bulan Januari – Desember 2014.

Data debit aliran *output* hidrograf hasil proses HEC-HMS dapat dilihat pada *Time-series Table* kolom *Total results* (m^3/s). Data aliran *baseflow* pada kolom *Baseflow* (m^3/s). Debit andalan 90% sebagai aliran yang terpenuhi sepanjang satu tahun berdasarkan *Flow Duration Curve* (FDC) adalah sebesar $3 m^3/det$, seperti disajikan pada Gambar 8.5.



Gambar 8.5, Debit andalan 90 % Sungai Bula subDAS Bula

Data debit beserta waktu kejadian hasil proses HEC-HMS dianalisis menggunakan *software microsoft excel* pada komponen *input charts scatter* untuk memperoleh grafik hidrograf debit berdasarkan waktu kejadian. Grafik hidrograf debit Sungai Bula disajikan pada Gambar 8.6.



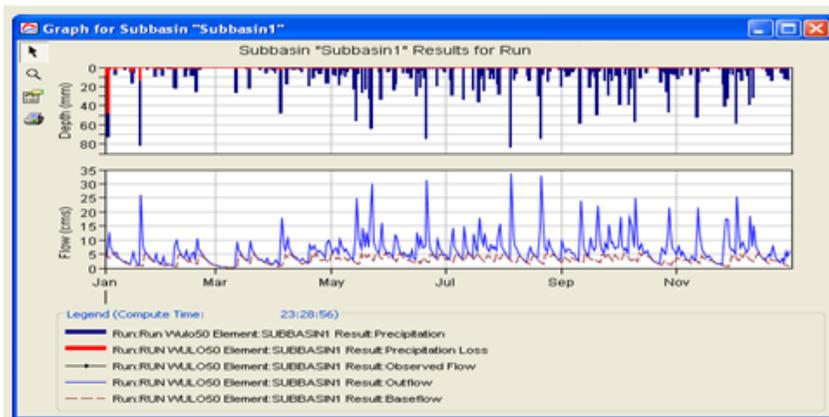
Gambar 8.6, Grafik hidrograf debit aliran Sungai Bula subDAS Bula 90% terpenuhi selang bulan Januari-Desember Tahun 2014.

Nilai debit aliran berdasarkan waktu kejadian disajikan pada Tabel 8.3.

Tabel 8.3, Debit aliran Sungai Bula berdasarkan waktu kejadian

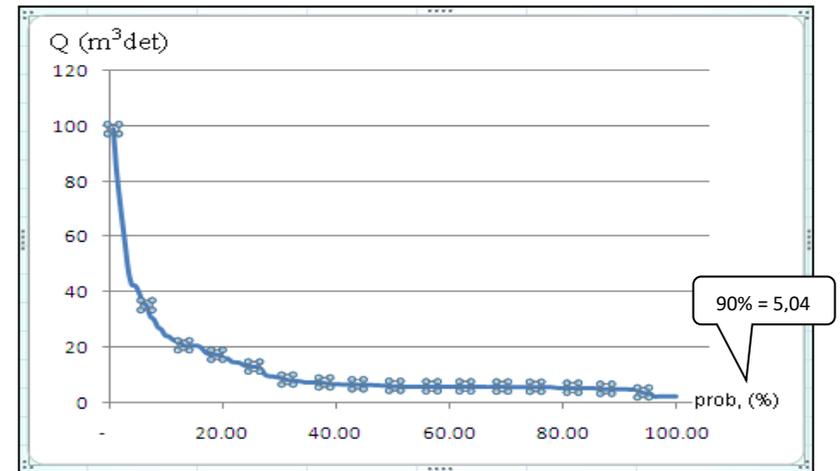
Debit aliran		Waktu Kejadian
Debit minimum/ 90% terpenuhi sebagai aliran Sungai Bula.	3,00 (m ³ /det)	Debit minimum tidak terpenuhi pada Tanggal 11-12 Januari, 2-4 Februari, 1-5 Maret, 24-27 Maret, 14-15 April, 10 September, 7-8 November, dan 18 Desember 2013 turun hingga 1,22 m ³ /det

Hidrograf debit aliran rata-rata *continuous* dengan input presipitasi data hujan harian *continuous* Tahun 2014, disajikan pada Gambar 8.7.



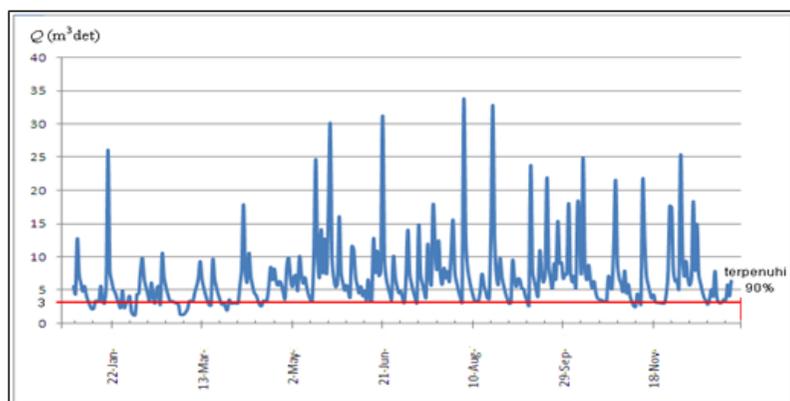
Gambar 8.7, Hidrograf hasil Proses HEC-HMS berdasarkan Input hujan harian Tahun 2014, di Sungai Bula.

Perhitungan debit andalan sungai untuk memperoleh nilai debit yang terpenuhi sepanjang waktu dilakukan dengan menggunakan metode *flow duration curve* (FDC) dengan menetapkan frekuensi capaian yang terpenuhi sebagai potensi debit sungai adalah sebesar 90% seperti disajikan pada Gambar 8.8.



Gambar 8.8, Grafik FDC untuk memperoleh debit andalan Sungai Bula

Berdasarkan grafik FDC di atas dapat dijelaskan bahwa debit aliran sungai sebagai debit andalan 90% yang dapat terpenuhi sepanjang waktu di Sungai Bula Bone Bolango adalah sebesar 5,04 m³/det. Untuk mengetahui debit minimum secara rinci berdasarkan waktu kejadian dilakukan dengan memplot 90 % hidrograf debit aliran yang dapat terpenuhi sebagai aliran Sungai Bula, seperti disajikan pada Gambar 8.9.



Gambar 16, Grafik hidrograf 90 % terpenuhi sebagai debit aliran Sungai Bula

Hasil Optimasi digambarkan secara grafik *scatter* yang nilainya di plot sesuai waktu kejadian dengan menggunakan *software microsoft excel*. Debit minimum diperoleh dengan menarik garis pada kisaran 90 % kejadian hidrograf terpenuhi sebagai debit minimum sungai Bula dengan nilai sebesar 5,04 m³/det. Secara rinci debit minimum 90% terpenuhi sebagai aliran

Sungai Bula berdasarkan waktu kejadian dengan input data hujan Tahun 2014 disajikan pada Tabel 8.4.

Tabel 8.4, Debit minimum berdasarkan waktu kejadian 90% terpenuhi sebagai aliran Sungai Bula

Debit aliran		Waktu Kejadian
Debit minimum/ 90% terpenuhi sebagai aliran Sungai Bula.	5,04 (m ³ /det)	Terjadi sepanjang waktu kecuali pada Tanggal 9 – 18 Juli 2014 turun hingga 2,5 m ³ /det

Debit minimum merupakan potensi sumberdaya air sungai yang akan digunakan sebagai energi pembangkit tenaga listrik.

3. Simulasi Model untuk Pendugaan Debit Aliran Sungai Lainnya

Simulasi untuk beberapa penggunaan lahan di subDAS-subDAS lain yang ada dalam wilayah DAS dilakukan dengan menerapkan model hasil analisis pada DAS tersebut. Masukan utama pada *time-series* presipitasi adalah data hujan yang terdapat di wilayah DAS Bone Gorontalo. Di wilayah DAS Bone terdapat 3 setasiun hujan yang masing-masing berada di Desa Alale Kecamatan

Suwawa Tengah, Desa Tulabolo Kecamatan Suwawa Timur, dan Desa Pinogu Kecamatan Suwawa Timur. Data hujan tersebut adalah data hujan jam-jaman Tahun 2014. Data hujan wilayah DAS Bone dianalisis menggunakan cara *polygon thiesen* untuk menentukan karakteristik hujan dan cakupan hujan pada masing-masing subDAS di DAS Bone.

Parameter input masing-masing subDAS adalah: Luas subDAS, nilai CN dan Ia. Nilai penggunaan lahan dan kondisi tanah direpresentasikan dengan angka CN. Berubahnya nilai CN mengakibatkan perubahan terhadap besarnya resapan air ke dalam tanah, sehingga nilai limpasan juga akan mengalami perubahan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan data hujan wilayah periode satu tahun sebagai input presipitasi dalam proses HEC-HMS.

Parameter sebagai input HEC-HMS tidak ada yang berubah kecuali luas area masing-masing subDAS, nilai CN, *Initial abstraction* (Ia), dan *Time Lag* (TL). Nilai parameter lain dianggap konstan pada semua subDAS. Perubahan yang terjadi pada penggunaan lahan subDAS akan mengakibatkan nilai CN ikut berubah. Dengan input data hujan wilayah pada masing-masing subDAS, nilai CN dan Ia, dapat diamati dengan terjadinya perubahan pada volume limpasan (Q_v) dan debit puncak (Q_p). Perhitungan nilai CN setiap perubahan penggunaan lahan, dihitung dengan memperhatikan luas subDAS. Hasil perhitungan

nilai CN dan Ia bersama-sama dengan data hujan digunakan sebagai input program HEC-HMS.

Pada penelitian ini penerapan model dilakukan pada 16 subDAS yang ada dalam wilayah DAS Bone. Karakteristik dan morfometri subDAS perlu diketahui sebagai input dalam memperoleh hidrograf debit aliran masing-masing sungai. Morfometri sistem subDAS dianalisis dengan menggunakan ArcGIS berdasarkan kontur dan citra Landsat 7 ETM+ wilayah Bone Bolango. Input data presipitasi yang digunakan adalah data hujan wilayah DAS Bone selama 1 tahun selang bulan Januari sampai dengan Desember Tahun 2014.

Analisis penerapan model penelitian pada masing-masing sungai di DAS Bone dilakukan dengan merubah nilai parameter berdasarkan karakteristik masing-masing subDAS. Parameter yang disesuaikan sebagai input masing-masing subDAS adalah: luas subDAS, nilai CN, nilai Ia, dan nilai *Time Lag*. Data parameter masing-masing subDAS berdasarkan analisis persamaan dan hasil proses HecGeo-HMS disajikan pada Tabel 8.5.

Debit aliran sungai pada masing-masing subDAS di DAS Bone dianalisis menggunakan *software* HEC-HMS dengan memasukkan input parameter masing-masing subDAS pada komponen *subBasin*. *Input time series* data presipitasi menggunakan data hujan wilayah dari ke tiga stasiun hujan di wilayah DAS Bone

yang ditetapkan berdasarkan pembagian cakupan wilayah setasiun hujan dengan cara *polygon thiesen*

Tabel 8.5, Nilai parameter subDAS di DAS Bone

No	Nama SubDAS	Luas (Km ²)	Panjang Sungai (Km)	Kemiringan Sungai (m)	CN	Ia (mm)	Time Lag (Jam)
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Wulo	43,59	9,08	175	72,66	19,11	1,90
2.	Tulabolo	31,95	9,62	675	73,22	18,58	1,70
3.	Matango	18,92	8,08	1000	73,00	18,79	1,34
4.	Bulawa	41,48	11,62	225	73,00	18,79	1,88
5.	Bala	53,61	32,17	275	73,00	18,79	2,07
6.	Bone Hulu	49,75	19,12	600	72,80	18,98	2,01
7.	Butahu	81,75	20,93	725	72,99	18,8	2,43
8.	Dulamayo	4,20	3,55	375	72,59	19,18	0,78
9.	Lama	21,66	4,98	275	72,96	18,83	1,47
10.	Mogi Daa	52,33	10,77	775	70,63	32,00	2,05
11.	Motomboto	8,34	4,33	700	73,00	18,79	1,02
12.	Olama	108,47	23,49	850	73,11	18,68	2,71
13.	Munalo	8,24	4,20	375	73,00	18,79	1,02
14.	Ulanta	94,39	19,59	65	71,85	19,90	2,57
15.	Buano	172,56	28,88	1200	73,00	18,79	3,22
16.	Pinogu	32,64	5,89	875	73,21	18,56	1,55

Berdasarkan proses *running* HEC-HMS dengan input parameter tersebut di atas diperoleh *output* hidrograf debit aliran sungai masing-masing subDAS di DAS Bone.

Debit aliran minimum 90% terpenuhi sepanjang tahun pada 17 subDAS di DAS Bone, disajikan pada Table 8.6.

Tabel 8.6, Debit aliran minimum masing-masing sungai di DAS Bone

No	Nama SubDAS	Luas subDAS (Km ²)	Debit Minimum 90% terpenuhi (m ³ /det)
1.	Bula	44,38	5,04
2.	Wulo	43,59	3,00
3.	Tulabolo	31,95	4,00
4.	Matango	18,92	1,25
5.	Bulawa	41,48	3,70
6.	Bala	53,61	5,00
7.	Bone Hulu	49,75	4,20
8.	Butahu	81,75	6,00
9.	Dulamayo	4,20	0,15
10.	Lama	21,66	1,50
11.	Mogi Daa	52,33	4,00
12.	Motomboto	8,34	0,30
13.	Olama	108,47	7,00
14.	Munalo	8,24	0,25
15.	Ulanta	94,39	6,70
16.	Buano	172,56	8,00
17.	Pinogu	32,64	3,00

4. Analisis Potensi Aliran Sungai untuk Sumberdaya Listrik

Potensi debit aliran sungai untuk sumberdaya listrik dianalisis berdasarkan persamaan (Arismunandar dan Kuwahara, 2000):

$$P = 9,8 \cdot H \cdot Q \cdot \eta E \quad (\text{Kilo watt})$$

Dengan:

P = tenaga yang dikeluarkan secara teoritis (Kilo watt)

H = tinggi jatuh air efektif (m)

Q = debit aliran sungai (m³/s)

ηE = efisiensi pembangkit

Potensi debit aliran untuk sumberdaya listrik dianalisis berdasarkan debit rata-rata sungai dan ketinggian jatuh air yang diperoleh pada titik pengamatan debit sungai sampai lokasi pembangunan pembangkit tenaga listrik..

Penetapan ketinggian jatuh air dilakukan melalui analisis interpretasi citra, yaitu dengan menganalisis nilai ketinggian tempat dari tempat AWLR (pengamatan debit) dengan menarik garis sepanjang alur sungai ke arah hilir. Dengan jarak tertentu ditetapkan titik ideal yang dianggap memiliki ketinggian yang memadai sebagai tempat/lokasi rencana pembangunan pembangkit tenaga listrik mikro hidro. Untuk memperoleh ketinggian jatuh air yang besar pada titik pengamatan dilakukan dengan membendung sungai sehingga dapat diperoleh tinggi maksimum sungai. Ketinggian jatuh air (*head*) merupakan penjumlahan nilai ketinggian titik pengamatan debit dan nilai

ketinggian tempat bangunan pembangkit listrik dan tinggi maksimum sungai setelah dibendung.

Nilai ketinggian jatuh air (*Head*) pada masing-masing sungai di DAS Bone didasarkan pada ketinggian air sungai saat dibendung dan perolehan ketinggian aliran sungai dari titik pengamatan sampai titik PLTMH pada asumsi jarak 20 meter.

Berdasarkan nilai variabel debit sungai dan nilai ketinggian jatuh air (*head*), dapat dihitung daya listrik pada masing-masing sungai di DAS Bone. Nilai debit sungai yang digunakan adalah debit minimum yang terpenuhi sepanjang tahun (debit andalan 95%) untuk memutar turbin generator. Potensi sumberdaya listrik berdasarkan nilai debit minimum pada masing-masing sungai di DAS Bone disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8, Potensi Sumberdaya Listrik masing-masing Sungai di DAS Bone

No	Nama Sungai	Sumberdaya Listrik PLTMH (Kilo watt)	Keterangan Kelayakan
1	Bula	12,04	Layak
2	Wulo	7,17	Layak
3	Tulabolo	9,11	Layak
4	Matango	2,07	Layak
5	Bulawa	8,02	Layak
6	Bala	12,68	Layak
7	Bone Hulu	10,03	Layak
8	Butahu	16,54	Layak

9	Dulamayo	0,14	Tidak layak
10	Lama	2,30	Layak
11	Mogi Daa	9,56	Layak
12	Motomboto	0,33	Tidak layak
13	Olama	24,44	Layak
14	Munalo	0,22	Tidak layak
15	Ulanta	16,50	Layak
16	Buano	32,34	Layak
17	Pinogu	6,84	Layak
Total		170,31	

123

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, M, 2008, Materi presentasi, Seminar Energi Sumberdaya Mineral, Departemen Sumberdaya Energi.
- Agung, 2008, Pemanfaatan Tenaga Air, <http://hydropower.wordpress.com>, (Down load 8 September 2008).
- Arismunandar A., S. Kuwahara, 2000, Teknik Tenaga Listrik *Jilid I: Pembangkitan dengan Tenaga Air*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Arsyad, S., 2000, *Konservasi Tanah dan Air*. Cetakan Ketiga. Institut Pertanian Bogor Press, Bogor.
- Asdak, C., 2007, Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Gajah Mada Univercity Press, Yogyakarta.
- Asriningtyas, V., 2007, *Bahan praktikum MPPDAS*, Fakultas Geografi UGM, (Tidak dipublikasikan).
- Badan Pusat Statistik Provinsi Gorontalo, 2008, Gorontalo Dalam Angka, Provinsi Gorontalo.
- Bedient, P.B., dan W.C., Huber, 1992, *Hydrology for Floodplain Analysis*, Addison-Wetsley Publishing Company, New York
- Brooks, K.N., P.F. Flolliott, H.M. Gregersen, dan J.L. Thames, 1988, *Hydrology and the Management of Watersheds*, Ohio State University Press, Ohio
- Campbell J.R., 2010, *Small Hydro and Low-Head Hydro Power Technologies and Prospects*, Congressional Research Service. 124
- Chow, V.T., D.R. Meidment dan L.W. Mays, 1988, *Applied Hydrology*, McGraw Hill Book, New York.
- Darmanto, D. dan Sudarmadji, 1985, Hidrologi, Proyek pusat latihan penanggulangan gunung berapi. UGM Yogyakarta
- Dariah, A., 2003. *Erosi Dan Aliran Permukaan Pada Lahan Pertanian Berbasis Tanaman Kopi Di Sumberjaya, Lampung Barat*. Jurusan Ilmu Tanah. IPB.
- Dasanto, B.D., 2006, *Pengantar Geosains : Limpasan dan Aliran Sungai*. Departemen Meteorologi dan Geofisika. IPB: Bogor.
- Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral RI, 2004, Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional.

Departemen Kehutanan, Dirjen Rehabilitasi Lahan Perhutanan Sosial, 2004, Buku Pedoman Inventarisasi dan Identifikasi Mangrove, Jakarta

Cole, R.A.J., 2003, *The Use of Flow Duration Curves as a Data Quality Tool*. Northern Ireland

Foth, H.D., 1998, *Dasar-Dasar Ilmu Tanah*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

Gorgens, A.H.M., 1983, *Conceptual Modelling of the Rainfall Runoff Process in Semi-Arised Catchments*, Report no 1/83, Hydrological Research Unit, Department of Geography, Rhodes University, Grahamstown.

125

Gunawan, T., 1991, Penerapan Teknik Penginderaan Jauh untuk Menduga Debit Puncak Menggunakan Karakteristik Lingkungan Fisik DAS, *Studi Kasus di Daerah Aliran Sungai Bengawan Solo Hulu Jawa Tengah*, Disertasi S3, IPB, Bogor.

Hadi, M.P., 2003, Hubungan antara hujan dan limpasan selama hujan sebagai fungsi karakteristik Daerah Aliran Sungai. (Suatu studi kasus pemodelan hidrologi di Daerah Aliran Sungai Bengawan Solo Hulu). *Disertasi*, Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.

Hakim. N., M.Y. Nyapka, A.M Lubis, S.G Nugroho, M.R Saul, M.A Dina, G.B Hong, dan H. B a i l e , 1 9 8 6 , *Dasar-Dasar Ilmu Tanah*. Universitas Lampung, Lampung.

James, L.D., 1972, Hydrologic Modeling, Parameter Estimation and Watershed Characteristic, *Journal of Hydrology*, 17 (2005), hal. 283-307

Jensen, J.R., 1991, *The Measurement of Mangrove Characteristic in South – West Florida Using SPOT Multispectral Data*. Geocarto International, Florida

Kadir A., 1995, *Energi: Sumber Daya, Inovasi, Tenaga Listrik dan Potensi Ekonomi*, Universitas Indonesia, Jakarta.

Kalsim, D.K., 2003, *Pendugaan Puncak Limpasan*. Laboratorium Teknik Tanah dan Air, IPB, Bogor

Ketut, D.N., 2009, Kajian Potensi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Memanfaatkan Aliran Sungai Kelampauk di Desa Tamblang-Buleleng, *Jurnal Ilm` Teknik Mesin Cakram*, Vol. 3 No.1, 121-126. 126

Kirpich, P.Z., 1940, Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds, *Civil Engineering*. 10 (6); 363.

Korhonen, L., M. Rautianen dan P. Stenberg, 2006, Estimation of Forest Canopy Covera Comparison of Field Measurement Techniques, *Journal of spatial hydrology*, Silfa Fennica, Vol 40 no. 4; 75-90.

Laoh, O.E.H., 2002, Keterkaitan factor fisik, factor social, ekonomi dan tataguna lahan di Daerah Tangkapan Air dengan erosi dan sedimemtasi, (studi kasus Tondano Sulawesi Utara), *Disertasi tidak dipublikasikan*, Pasca Sarjana IPB, Bogor.

Larsson, H., 2002, Acacia Canopy Cover Changesin Rawashda Forest Reverse, Kassala Province Eastern Sudan, Using Linear Regression NDVI Models, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 32, hal 102-175.

- Lilesand, T.M dan J. Chipman, 2004, *Remote Sensing and Image Interpretation*: 5th edition, John Wiley and Son, New York
- Linsley, R.K., M.A. Kohler dan J.L.H. Paulhus, 1988, *Hydrology of Engineers*. McGraw-Hill Book Co., London.
- Loucks,D.P., Stedinger,J.R. and Haith,D.A., 1981, *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall,Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp 21-23, 63-65, 307-308, 430-433.
- Macaringue D., 2009, The Potential for Micro-hidro Power Plants in Mozambique, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.128, 424-430.
- Mananoma T., W. Soetopo, 2008, Pemodelan sebagai sarana dalam mencapai solusi optimal, *Jurnal Teknik Sij UNSRAT Manado*, Volume 8 No. 3 Juni 2008, 184-193
- Manning, J.C., 1987, *Applied Principles of Hydrology*, Merrill Publishing Company, hal. 278.
- Menteri Kehutanan R.I., 2009, Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia No. P.32/MENHUT-II/2009, Tentang Tata Cara Penyusunan Rencana Teknik Rehabilitasi Hutan dan Lahan Daerah Aliran Sungai (RTKRHL-DAS)
- Marjuki, B., 2008, Penerapan Teknik Perolehan Data Tutupan Kanopi (*canopy cover*) Menggunakan indeks vegetasi dan hubungannya dengan tingkat erosi tanah, *Skripsi*, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.
- Marta J. dan Adidarma W., 1998, Mengenal Dasar-dasar Hidrologi, NCVA, Bandung.
- Mustofa, Y.M., M.S.M. Amin, T.S. Lee dan A.R.M. Shariff, 2005, Evaluation of Land Development Impact on a Tropical Watershed Hydrology Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Spatial Hydrology*, 5(2), hal 68-83.
- McCuen, R.H., 1982, *A Guide to Hydrology Analysis Using SCS Methods*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs.
- Neal, C.A. Robson, B. Reynolds dan A. Jenkins, 1992, Prediction of future short term stream chemistry: a modelling approach, *journal of hydrology*, vol 130. hal. 87-103.
- Pabla, A.S. dan A. Hadi, 1986, Sistem Distribusi Daya Listrik, Erlangga, Jakarta
- Phillips,D.T., Ravindran.A., and Solberg.J., 1976, *Operations Research Principles and Practice*, John Wiley & Sons, Ir~ Toronto, pp 1-11, 359-367
- PLN Wilayah VII SULUTTENGGO, 2003, Informasi Potensi Sumber Daya Energi Provinsi Gorontalo.
- PLN Wilayah VII SULUTTENGGO, 2009, Rencana Umum Ketenaga Listrik Daerah Provinsi Gorontalo
- Poerwowidodo, 1991, Genesa Tanah, CV. Rajawali, Jakarta,.
- Ponce, 1989, *Engineering Hydrologi, Principles and Practices*, Prentice Hall, New Jersey
- Prastowo, 2003, *Masalah Sumberdaya Air di Indonesia: Kerusakan Daerah Aliran Sungai Dan Rendahnya Kinerja Pemanfaatan Air*. Makalah Falsafah Sains. Program Pasca Sarjana. IPB.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1997, *Laporan Tahunan*, Direktorat Jenderal Pertambangan Umum, Jakarta.

Puslittanak, 2003, *Usaha tani pada Lahan Kering*, Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian, Bogor.

Sastrosayono, S., 2007, *Budidaya Kelapa Sawit*, Agromedia Pustaka, Jakarta.

Schwab, G.O., R.K. Frevent, T.W. Edminster, and K.K. Barnes, 1981, *Soil and Water Conservation Engineering*. Third Edition, John Willey and Sons Inc, New York.

Setyowati, D.L., 2010, Hubungan Hujan Limpasan pada Berbagai Dinamika Spasial Penggunaan Lahan di DAS Kreo Jawa Tengah, *Disertasi*, Program Pascasarjana Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada. 129

Seyhan, E., 1990, *Dasar-dasar Hidrologi*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

Sing, V.P., 1997, Effect of Spatial and Temporal Variability in Rainfall and Watershed Characteristics on Stream Flow Hydrograph, *Hydrological Process*, 11, hal. 1649-1669.

Soemarto, C.D., 1999, *Hidrologi Teknik*, Edisi kedua, Erlangga, Surabaya.

Soerianegara, C.D., 1978, *Pengelolaan Sumberdaya Air*, Pasca Sarjana IPB, Bogor.

Sosrodarsono dan S. Takeda, 1978, *Hidrologi Untuk Pengairan*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.

Sri-Harto, Br., 2000, *Analisis Hidrologi*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Subarkah, I., 1980, *Hidrologi Untuk Perencanaan Bangunan Air*, Idea Dharma, Bandung

Sujono, J., 1999, Pengaruh Pola Agihan Hujan Terhadap Hidrograf Satuan, *Jurnal Media Teknik* No.3, Tahun XXI, hal. 73-88

Sulistiyo, B., dan Hartono, 1998, The Effect of Geometrically Corrected Landsat TM Data on The Accuracy of The Landuse Clasification Result; A Case Studi in Semarang Municipality and Its Vicinity, *The Indonesian Journal og Geography*, Vol, 30, No, 75, hal 175-190.

Supangat, B., B. Agung dan U.H. Murtiono, 2002, Kajian Koefisien Aliran Pada Beberapa Sub Das Di Das Solo Hu... *Prosiding Seminar Monitoring dan Evaluasi Pengelola DAS*, Solo. 130

Suryatmo, F., 2002, *Dasar-dasar Teknik Listrik*, Bina Adiaksara, Jakarta

Sutanto, R., 2005, *Dasar-dasar Ilmu Tanah, Konsep dan Kenyataan*, Kanisius, Yogyakarta.

Suyono, 1989, Analisis Hidrograf Aliran Sungai Cimanuk di Atas Leuwigong Kabupaten Garut Jawa Barat, *Tesis tidak dipublikasikan*, Fakultas Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor.

Timothy, R.L., 1990, *Urban Hydrology*, Technomic publishing company, Inc. New Holland Avenue.

Thomas, R.W. dan R.J. Huggett, 1980, *Modelling in Geography*. Barnes & Noble Books, Totowa-New Jersey

Tivianton, T.A., 2010, Analisis Hidrograf Banjir Rancangan Terhadap Perubahan Penggunaan Lahan dalam Berbagai Kala Ulang Metode Hujan-Limpasan dengan HEC-GeoHMS dan HEC-HMS, *Tesis*, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.

US Army Corps, 1981, HEC-1 Flood Hydrograph Package, *User manual*. The hidrologic Engginering Certer.

USACE, 2000, Hydrologic Modeling System HEC-HMS, *Technical Reference Manual*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, California.

USDA NRCS, 2005, *National Engineering Handbook Section 4: Hydrology*, Washington DC, U.S.A.

131

Utomo, A.R., 2007, Prospek Pemanfaatan Energi Terbarukan Sebagai Energi Konvensional, *Bahan Kuliah pada Departemen Teknik Elektro*, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Viesmann, Jr.W., 1989, *Intoduction to Hydrology*, Harper and Row Publishers, New York.

Warrick, J. A., 2007, Suspended sediment rating curve response to urbanization and wildfire, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, No.7, hal. 125-140.

Wijaya, T.A., 2004, Analisis Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Perubahan Karakteristik Hidrograf Banjir Menggunakan *Software* HEC-HMS versi 2.2, *Skripsi*, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

Wanielista, M., Kersten R., Eaglin R., 1997, *Water Quantity and Quality Control*, John Wiley and Sons Inc., Florida