

TUGAS AKHIR
EVALUASI HIDROLOGI PADA BENDUNGAN LAU SIMEME
KABUPATEN DELI SERDANG SUMATERA UTARA

*Di ajukan untuk Memenuhi Syarat-syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Sipil
Pada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

DISUSUN OLEH :
ALFRIEDO ARDINATA
1907210211



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama: Alfriedo Ardinata

NPM: 1907210211

Program Studi: Teknik Sipil

Jenjang Studi: Sarjana (S1)

Judul Skripsi: Evaluasi Hidrologi Pada Bendungan Lau Simeme Kabupaten
Deli Serdang Sumatera Utara

DISETUJUI UNTUK DI SAMPAIKAN KEPADA
PANITIA UJIAN SKRIPSI

Medan, 22 Mei 2026

Dosen Pembimbing



Sayed Iskandar Muda S.T., M.T

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Alfriedo Ardinata

NPM : 1907210211

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Evaluasi Hidrologi Pada Bendungan Lau Simeme Kabupaten

Deli Serdang Sumatera Utara

Bidang Ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Medan, 22 Mei 2026

Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Pembimbing



Sayed Iskandar Muda, S.T., M.T

Dosen Pembanding I



Randi Gunawan, ST., M.Si

Dosen Pembanding II



Yunita Pane, S.T., MT

Ketua Prodi Teknik Sipil



Josef Hadipramana, S. T., M.Sc., Ph.d

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama: Alfriedo Ardinata

NPM: 1907210211

Program Studi: Teknik Sipil

Jenjang Studi: Sarjana (S1)

Judul Skripsi: Evaluasi Hidrologi Pada Bendungan Lau Simeme Kabupaten
Deli Serdang Sumatera Utara

Menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini merupakan gagasan, rumusan dan ide saya sendiri, tanpa bantuan dari pihak lain kecuali arahan dari tim dosen Pembimbing.
2. Skripsi belum pernah diajukan untuk mendapat gelar sarjana, baik di fakultas teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara maupun di perguruan Tinggi lain.
3. Dalam Skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan mencantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan menyebut nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.

Demikian pernyataan ini saya perbuat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terbukti pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diberikan melalui karya tulis, serta sanksi lainnya dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Medan, 22 Mei 2026



Alfriedo Ardinata

NPM: 1907210211

ABSTRAK

Bendungan Lausimeme merupakan bendungan serbaguna (multipurpose dam) yang berfungsi sebagai mencegah terjadinya banjir di Kota Medan dan sekitarnya, Bendungan Lau Simeme berlokasi di Desa Kuala Dekah, Kecamatan Biru-Biru, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. Memiliki manfaat untuk memenuhi kebutuhan air baku Kota Medan dan sekitarnya dengan suplai sebesar 3000 liter per detik. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis curah hujan dan debit banjir pada bendungan Lau Simeme. Data yang digunakan ada 2 yaitu data primer dan sekunder. Data sekunder yaitu data BMKG untuk curah hujan dan data primer data dari perusahaan untuk debit banjir.

Kata Kunci: Bendungan, Hujan, Debit Banjir

ABSTRACT

Lausimeme Dam is a multipurpose dam that functions to prevent flooding in Medan City and its surroundings. Lau Simeme Dam is located in Kuala Dekah Village, Biru-Biru District, Deli Serdang Regency, North Sumatra. It has benefits to meet the raw water needs of Medan City and its surroundings with a supply of 3000 liters per second. The purpose of this study was to analyze rainfall and flood discharge at Lau Simeme Dam. There are 2 types of data used, namely primary and secondary data. Secondary data is BMKG data for rainfall and primary data from companies for flood discharge.

Keywords: *Dam, Rain, Flood Discharge*

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT, yang telah memberikan dan melimpahkan berkat serta memberikan kekuatan, kesehatan, dan kemudahan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Evaluasi Hidrologi Pada Bendungan Lau Simeme Kabupaten Deli Serdang Sumatera Utara”.

Penulis skripsi ini merupakan sebuah kewajiban, untuk mendapatkan gelar sarjana pada Jurusan Teknik Sipil di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Adapun tujuan penulisan skripsi ini adalah untuk menambahkan wawasan dan pengetahuan pada mahasiswa yang sedang belajar dan juga untuk adik-adik yang membaca skripsi ini, agar semua menjadi mahasiswa yang berguna bagi agama, bangsa dan negara.

Kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih banyak yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Ibu Rizki Efrida, S.T., M.T. selaku Seketaris Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak dan Ibu dosen pengajar Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Teman-teman seperjuangan yang ikut turut membantu dalam penyelesaian Skripsi ini yang tidak dapat disebutkan, semoga dengan bantuan teman-teman tugas ini dapat menjadi karya yang bermanfaat bagi orang lain.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan, untuk itu masukan dan saran yang membangun akan penulis terima dengan ikhlas dan penulis ucapkan terima kasih.

Medan, 2025

Alfriedo Ardinata

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Siklus Hidrologi.....	4
2.1.1 Presipitasi	5
2.1.2 Evapotranspirasi.....	5
2.2 Intensitas Hujan.....	6
2.3 Analisa Hidrologi.....	7
2.4 Analisa Frekuensi Curah Hujan	7
2.5 Analisis Debit Banjir Rencana	12
2.6 Pengertian Bendung.....	14
2.7 Jenis dan Manfaat Bendungan.....	14
2.8 Lebar Bendung.....	16
2.9 Ketahanan Bendung Terhadap Guling	16
2.10 Katahanan Terhadap <i>Piping</i>	16
2.11 Bangunan Pelimpah (<i>Spillway</i>).....	17
2.12 Saluran Pengarah	18
2.13 Mercu	18
2.14 Saluran Transisi	21
2.15 Saluran Peluncur	21
2.16 Bangunan Peredam Energi.....	21
2.17 Peredam Energi USBR.....	22
2.18 Bangunan Terjun	25

2.19 Model Fisik	25
2.20 Tinggi Bendungan	26
2.21 Saluran Pengarah	26
2.22 Bangunan Peredam Energi.....	26
2.23 Bangunan Terjun.....	26
2.24 Macam-Macam Aliran.....	26
2.24.1 Aliran Invisid dan Viskos.....	27
2.24.2 Aliran Kompresibel dan Tak Kompresibel.....	27
2.24.3 Aliran Laminar dan Turbulen.....	27
2.24.4 Aliran Mantap dan Tak Mantap.....	28
2.24.5 Aliran Seragam dan Tak Seragam	28
2.24.6 Aliran Satu, Dua, dan Tiga Dimensi.....	28
2.24.7 Aliran Rotasional dan Tak Rotasional	28
2.25 Debit Aliran	29
2.26 Koefisien Aliran.....	29
2.27 Klasifikasi Aliran.....	30
2.28 Distribusi Kecepatan.....	32
2.29 Aliran Seragam	33
2.30 Tampang Lintang Ekonomis.....	34
2.31 Aliran Tidak Seragam.....	37
2.32 Energi Spesifik	38
2.33 Neraca Air.....	39
2.34 Limpasan dan Penyimpanan Air Tanah.....	40
2.35 Kebutuhan Air Irigasi	42
2.36 Sifat Hidraulik Tanah.....	43
2.37 Aliran Air Tanah.....	44
2.38 Banjir.....	45
2.38.1 Jenis Banjir.....	46
2.38.2 Penyebab Banjir.....	47
2.38.3 Faktor Penyebab Banjir.....	47
2.38.4 Daerah Rawan Banjir.....	49
2.38.5 Indikator Pengendalian Banjir.....	49
2.38.6 Penentuan Debit Banjir	49
2.39 Hidrograf.....	49
2.40 Metode Nakayasu	50

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	52
3.1 Lokasi Penelitian.....	52
3.2 Pengumpulan Data.....	52
3.3 Waktu Penelitian.....	53
3.4 Bagan Alir Penelitian.....	53
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	56
4.5 Hasil Perhitungan Debit Banjir Metode Nakayasu.....	63
4.5.1 Data Parameter DAS Lau Simeme.....	63
4.5.2 Perhitungan Parameter Hidrograf Nakayasu.....	63
4.5.3 Perhitungan Debit Puncak Hidrograf Satuan	64
4.5.4 Perhitungan Base Flow	64
4.5.5 Koordinat Hidrograf Banjir.....	64
4.5.6 Debit Banjir Menurut Periode Ulang	65
4.6 Hasil Perhitungan Dimensi Saluran.....	66
4.6.1 Saluran Samping (Side Channel Spillway)	67
4.6.2 Saluran Transisi	68
4.6.3 Saluran Peluncur (Chute Spillway)	68
4.6.4 Estimasi Kecepatan Aliran pada Chute Spillway	69
4.6.5 Kapasitas Debit Chute Spillway	69
4.6.6 Kolam Olak (Stilling Basin).....	70
4.6.7 Tinggi Air di Atas Mercu Spillway.....	70
4.7 Hasil Perhitungan Waduk	71
4.7.1 Data Dasar Waduk.....	71
4.7.2 Perhitungan Kedalaman Rata-rata Waduk	71
4.7.3 Evaluasi Kebutuhan Tampungan Waduk.....	72
4.7.4 Estimasi Volume Efektif dan Dead Storage	72
4.7.5 Estimasi Laju Sedimentasi Waduk	73
4.7.6 Potensi Irigasi Waduk.....	73
4.8 Pembahasan.....	74
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA.....	79
LAMPIRAN.....	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	: Siklus Hidrologi	4
Gambar 2.2	: Metode Tahapan Langsung	19
Gambar 2.3	: Bentuk-Bentuk Bendung Mercu Ogee	20
Gambar 2.4	: Grafik C0 Sebagai Fungsi Perbandingan H/r	21
Gambar 2.5	: Grafik C1 Sebagai Fungsi Perbandingan P/H1	21
Gambar 2.6	: Grafik C2	22
Gambar 2.7	: Peredam Energi USBR tipe I	24
Gambar 2.8	: Peredam Energi USBR tipe I	25
Gambar 2.9	: Peredam Energi USBR Tipe III	25
Gambar 2.10	: Peredam Energi USBR tipe IV	26
Gambar 2.11	: Aliran Seragam dan Berubah	32
Gambar 2.12	: Gelombang Banjir Melalui Saluran Terbuka	33
Gambar 2.13	: Pola Penjalaran Gelombang di Saluran Terbuka	33
Gambar 2.14	: Distribusi Kecepatan pada Saluran Terbuka	34
Gambar 2.15	: Penurunan Rumus Chezy	35
Gambar 2.16	: Saluran Ekonomis Bentuk Trapesium	37
Gambar 2.17	: Saluran Ekonomis Bentuk Segi Empat	38
Gambar 2.18	: Saluran Ekonomis Bentuk Lingkaran	38
Gambar 2.19	: Aliran Melalui Permukaan Dasar Lengkung	41
Gambar 2.20	: Prinsip Aliran Air Tanah	47
Gambar 2.21	: Komponen Hidrograf	53
Gambar 3.1	: Lokasi Penelitian	55
Gambar 3.2	: Bagan Alir Penelitian	57
Gambar 4. 1	: Grafik Hidrograf Debit Banjir Metode Nakayasu	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	: Nilai Variabel Reduksi Gauss	8
Tabel 2.2	: Nilai K untuk distribusi Log-Person III	11
Tabel 2.3	: Standar Deviasi (Y_n) untuk Distribusi Gumbel	12
Tabel 3.1	: Jadwal Penelitian	56
Tabel 4. 1	: Analisa Curah Hujan Rata-Rata	56
Tabel 4. 2	: Analisa Curah Hujan Rata-Rata (Sambungan)	57
Tabel 4. 3	: Perhitungan Pengukuran Dispersi	57
Tabel 4. 4	: Perhitungan Pengukuran Dispersi (Sambungan)	58
Tabel 4. 5	: Analisa Curah Hujan Dengan Metode Gumbel	59
Tabel 4. 6	: Parameter Statistik Metode Distribusi Gumbel	60
Tabel 4. 7	: Perhitungan Curah Hujan Rencana Distribusi Log Normal	61
Tabel 4. 8	: Perhitungan Curah Hujan Rencana Log Pearson III	62
Tabel 4. 9	: Data Parameter DAS Lau Simeme	63
Tabel 4. 10	: Debit Banjir Menurut Kala Ulang	65
Tabel 4. 11	: Data Teknis Saluran Samping	67
Tabel 4. 12	: Data Teknis Saluran Transisi	68
Tabel 4. 13	: Data Teknis Chute Spillway	68
Tabel 4. 14	: Data Teknis Kolam Olak	70
Tabel 4. 15	: Tinggi Air di Atas Mercu Spillway	70
Tabel 4. 16	: Data Dasar Waduk	71

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bendungan Lausimeme merupakan bendungan serbaguna (*multipurpose dam*) yang berfungsi sebagai mencegah terjadinya banjir di Kota Medan dan sekitarnya, Bendungan Lausimeme berlokasi di Desa Kuala Dekah, Kecamatan Biru-Biru, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. Memiliki manfaat untuk memenuhi kebutuhan air baku Kota Medan dan sekitarnya dengan suplai sebesar 3000 liter per detik. Manfaat langsung yang dapat dirasakan oleh warga di sekitar proyek adalah sebagai destinasi wisata baru di Kabupaten Deli Serdang, sehingga dapat meningkatkan perekonomian masyarakat sekitar.

Kota Medan merupakan salah satu wilayah yang sering mengalami bencana banjir. Permasalahan banjir di Kota Medan merupakan permasalahan yang patut untuk diperhatikan dan dicari solusinya karena banjir sudah menjadi rutinitas di Kota Medan. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan banjir di Kota Medan, tetapi sampai saat ini banjir masih saja melanda beberapa wilayah kota Medan.

Banjir yang terjadi di Kota Medan disebabkan karena curah hujan dengan intensitas yang tinggi. Intensitas hujan yang tinggi di Kota Medan dengan durasi yang lama terjadi secara berkelanjutan. Selain itu curah hujan di Kota Medan sebesar 100 mm/hari juga di iringi dengan curah hujan pegunungan yang mencapai 175 mm/hari, hal tersebut yang menyebabkan Kota Medan sering banjir.

Salah satu faktor lain yang menyebabkan Kota Medan sering terjadi banjir adalah faktor keberadaan sungai yang cukup banyak dan beragam, seperti sungai besar yang membelah kota Medan misalnya Sungai Belawan, Sungai Deli, Sungai Percut dan Sungai Serdang, sedangkan Sungai Kecil yaitu Sungai Batuan, Sungai Badera dan Sungai Kera. pada 23 Desember 1992 dimana seluas 1.513 Ha areal tergenang air dengan kedalaman 1,5 meter meliputi daerah pemukiman, jalan, perkebunan dan transportasi umum disepanjang aliran Sungai Badera. Kecamatan Medan Marelan merupakan daerah yang paling banyak terkena dampak dari sering meluapnya air Sungai Badera yang mengakibatkan banjir setiap tahunnya. Dampak dari banjir tersebut adalah lumpuhnya kegiatan perekonomian masyarakat dan menghancurkan lahan area pertanian dan perkebunan penduduk serta sarana transportasi berupa jalan dan jembatan.

Sungai Deli kembali meluap, akibat dari luapan tersebut menyebabkan pemukiman warga terendam. Sungai Deli merupakan salah satu sungai yang sering meluap setiap tahunnya. Sungai Deli merupakan sungai yang berhilirkan di Kota Medan, Sungai Deli mengalir dari Kabupaten Karo, Kabupaten Deli Serdang dan melintasi Kota Medan sebelum bermuara ke Selat Malaka. Bagian hulu sungai pada umumnya berada di Kabupaten Karo dan Kabupaten Deli Serdang, sedangkan bagian tengah dan hilir berada di Kota Medan. Keberadaan Sungai Deli yang melintasi seluruh wilayah administrasi Kota Medan membuat Sungai Deli memiliki peran penting dalam terjadinya banjir di Kota Medan. Luapan Sungai Deli menjadi hal yang sangat penting untuk diantisipasi, karena dengan kepadatan penduduk yang tinggi dan aset yang lebih besar berada di kawasan perkotaan, maka kerugian yang ditimbulkan juga lebih besar.

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah satu bagian dalam upaya untuk menjaga ketahanan sumber daya air. Dalam pemanfaatannya DAS dapat menjadi sumber kehidupan jika DAS dirawat dengan baik sehingga dapat bertahan lama. Terdapat berbagai permasalahan dari hasil penelitian yang mengkonfirmasi bahwa terjadinya kesenjangan kondisi dalam pengelolaan daerah aliran sungai (DAS). Maka dalam menyelesaikan permasalahan harusla terwujudnya kesadaran masyarakat.

Daerah Aliran Sungai (DAS) di sungai Deli memiliki fungsi yang empiris yakni sebagai pemasok air di sebagian besar daerah Kota Medan. Daerah Aliran Sungai sungai Deli di bagian hulu merupakan daerah tangkapan air (*recharge area*).

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis curah hujan dan debit banjir pada bendungan Lau Simeme, Berdasarkan uraian di atas, maka peneliti tertarik untuk membuat sebuah judul ***“Evaluasi Hidrologi Pada Bendungan Lau Simeme Kabupaten Deli Serdang Sumatera Utara”***.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang harus diselesaikan sebagai berikut:

1. Berapa besar curah hujan yang di dapatkan pada bendungan Lau Simeme untuk mengatasi banjir di Kota Medan?
2. Berapa besar debit banjir pada bendungan Lau Simeme?
3. Bagaimana kapasitas waduk dan dimensi saluran pelimpah (*spillway*) Bendungan Lau Simeme dalam menampung serta mengalirkan debit banjir secara aman?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui hasil analisa curah hujan pada bendungan Lau Simeme.
2. Untuk mengetahui hasil analisa debit banjir pada bendungan Lau Simeme.
3. Menganalisis kapasitas waduk serta dimensi saluran pelimpah (spillway) Bendungan Lau Simeme dalam menampung dan mengalirkan debit banjir secara aman.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kawasan studi adalah bendungan Lau Simeme.
2. Data curah hujan terdiri dari 10 Tahun.
3. Menghitung debit banjir dengan menggunakan metode Nakayasu.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui elevasi banjir maksimum, agar dapat meningkatkan optimalisasi fungsi waduk.
2. Bagi penulis adalah dapat menerapkan ilmu yang sudah dapat di bangku kuliah untuk dapat di implementasikan pada masyarakat dan lingkungan, untuk mencegah banjir di Kota Medan.

1.6 Sistematika Penulisan

Isi penulisan sesuai dengan yang direncanakan adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Di dalam bab 1 ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Di dalam bab 2 ini menjelaskan tentang teori-teori pendukung yang ada dan berkaitan dengan pembahasan yang sedang dibuat.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Di dalam bab 3 ini menjelaskan pembahasan lokasi penelitian, pengambilan data dan bagan alir penelitian

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka ini berupa kumpulan-kumpulan yang berisi jurnal, buku, artikel yang bisa di jadikan rujukan bagi penulis. Semua narasi di dalam skripsi ini perpaduan dari narasi sendiri dan bisa rujukan lainnya.

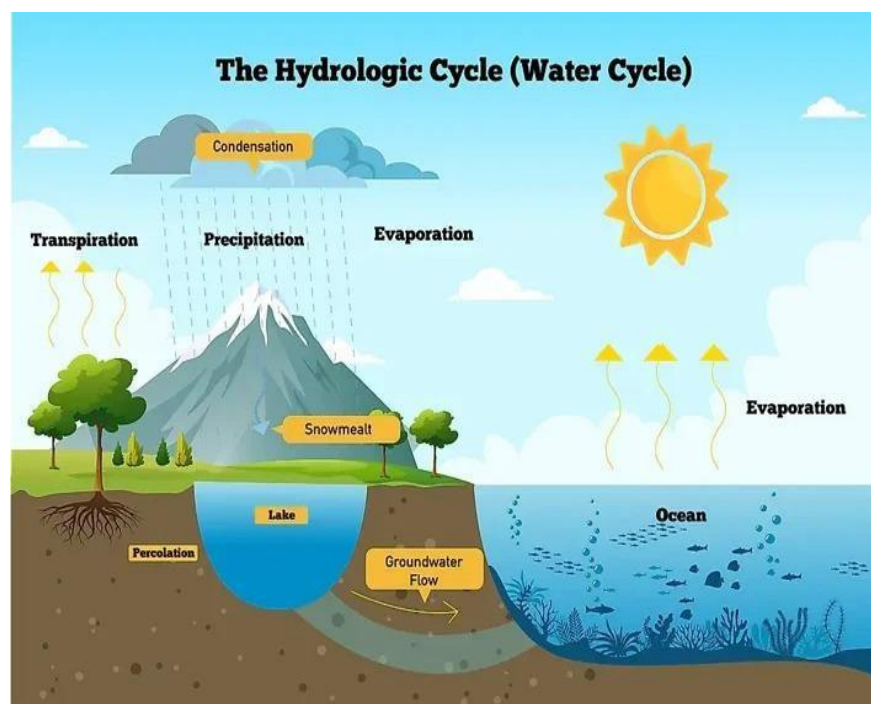
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Siklus Hidrologi

Hujan merupakan sebuah proses penguapan yang terjadi di permukaan bumi dari wilayah perairan, tumbuhan, atau daratan (Windari & Sudarti, 2024). Jika terdapat penambahan uap air di suhu yang rendah maka terjadilah proses kondensasi, dan dengan gilirannya massa air tersebut yang jatuh di sebut sebagai air hujan. Sistem air hujan berlangsung dengan mencantumkan tiga faktor utama, yakni:

1. Penambahan massa uap air ke daerah yang lebih tinggi hingga membuat atmosfer udara penuh.
2. Proses kondensasi terjadi dalam unsur uap air pada atmosfer.
3. Unsur uap air tersebut bertambah besar seiring dengan waktu kemudian jatuh ke bumi dan permukaan laut (sebagai hujan) karena gravitasi.

Salah satu proses siklus hidrologi yang paling berbahaya adalah hujan karena mampu menyebabkan bencana di lingkungan perairan seperti banjir dan banjir bandang (Sabriyati & Hadi, 2022). Ilustrasi mengenai siklus hidrologi sesuai dalam Gambar 2.1



Gambar 2.1 Siklus Hidrologi
Sumber: <https://water.co.id>

2.1.1 Presipitasi

Presipitasi saat awan mencairkan akibat pengaruh suhu udara tinggi, sehingga terjadi hujan butiran-butiran air jatuh dan membasahi bumi. Apabila udara terlalu rendah hingga nol derajat celcius, proses pretipitasi akan menghasilkan salju. Awan yang mengandung banyak air akan turun ke litosfer dalam bentuk butiran salju tipis seperti di negara sub tropis.

Intensitas curah hujan dan jumlah total hujan adalah dua kata umum yang digunakan untuk menggambarkan jumlah curah hujan atau hujan. Intensitas hujan merupakan jumlah hujan yang jatuh selama periode waktu tertentu dengan P, misalnya, hujan tahunan dinyatakan dalam mm/tahun. Intensitas hujan adalah jumlah hujan yang turun per unit waktu (mm/jam atau mm/hari), yang menampilkan tingkat hujan lebat dan memberikan notasi. Penggolongan hujan dan kedalaman curah hujan serta ukuran butir hujan, massa dan kecepatan jatuh butir hujan.

2.1.2 Evapotranspirasi

Dalam menyelidiki siklus hidrologi DAS (Daerah Aliran Sungai) biasanya hanya digunakan penguapan total (evapotranspirasi). Evapotranspirasi adalah penguapan air yang terjadi di seluruh permukaan bumi, termasuk permukaan tanaman, air dan tanah (Asdak, 2023). Evapotranspirasi berasal dari dua suku kata, evaporasi dan transpirasi. Evaporasi dan transpirasi merupakan faktor yang tidak bisa di pisahkan, kedua faktor tersebut dalam berbagai bidang seperti DAS (Daerah Aliran Sungai) dianalisa sebagai masalah tunggal. Penggunaan konsumtif merupakan uap air total suatu (Daerah Aliran Sungai) disebut evaporasi atau Transpirasi adalah istilah untuk penggunaan langsung air dalam pengembangan jaringan tanaman. Perbedaan kedua nama itu murni teoretis pada titik ini, dan keduanya memiliki makna yang sama.

Menurut Linsley, laju penguapan bervariasi tergantung pada cuaca dan keadaan permukaan penguapan.

a. Faktor Terkait Meteorologi

Faktor meteorologis radiasi matahari, suhu udara, tekanan uap, angin, dan tekanan atmosfer semuanya berdampak pada penguapan. Penguapan bervariasi dengan garis lintang, musim, waktu hari, dan kondisi langit karena radiasi matahari adalah efek yang signifikan.

b. Sifat permukaan objek yang menguap

Permukaan terbuka, seperti tanaman, struktur, atau jalan, adalah permukaan potensial penguapan. Kecuali sebagian besar wilayah yang terdiri dari tanah terbuka dan basah, laju distribusi salju harus melebihi laju penguapan pada suhu yang jauh di atas pembekuan.

2.2 Intensitas Hujan

Intensitas hujan adalah jumlah curah hujan yang dinyatakan dalam tinggi hujan atau volume hujan persatuan waktu. Besarnya intensitas curah hujan berbeda-beda tergantung dari lamanya curah hujan dan frekuensi kejadian. Intensitas curah hujan ini sangat penting untuk perencanaan debit banjir rencana.

Bila proses pendinginan terjadi secara besar-besaran maka butir-butir air akan jatuh sebagai hujan (Presipitasi). Sebenarnya presipitasi yang terjadi dapat juga berupa salju, embun dan sebagainya. Derasnya hujan tergantung dari banyaknya uap air yang terkandung didalam udara. Pada umumnya, semakin deras hujannya, maka semakin pendek waktunya, oleh karena itu setelah sebagian uap air mengkondensir udara semakin kering maka deras hujannya berubah dengan waktu.

Jenis curah hujan, menurut linsley, adalah sebagai berikut:

1. Gerimis (*drizzle*) yang kadang-kadang disebut mist, terdiri dari tetes-tetes air yang tipis biasanya dengan diameter antara lain 0,1 dan 0,5 mm, dengan kecepatan jatuh demikian lambatnya sehingga kelihatan seolah-olah melayang dengan intensitas jarang melebihi 1 jam seolah-olah melayang dengan intensitas jarang melebihi 1 mm/jam.
2. Hujan (*Rain*) terdiri dari tetesan air yang lebih besar dari 0,05 mm.
3. *Glaze* dalam selimut es, Biasanya bersih dan halus, beku atau air yang sangat dingin yang disimpan oleh hujan atau gerimis menciptakan permukaan yang terbuka. Ini dapat memiliki gravitasi spesifik 0,8 hingga 0,9 kg.
4. *Rime* mengacu pada endapan biji es yang buram, putih, yang dipisahkan udara yang terbentuk ketika membekukan air dingin dengan cepat mempengaruhi benda-benda terbuka. Gravitasi spesifik rime dapat serendah 0,2 hingga 0,3 kg.
5. Butir es bulat, pejal, dan tembus cahaya membentuk sleet (hujan dikombinasikan dengan es dan salju), yang diciptakan ketika kristal es yang meleleh.
6. Salju adalah campuran kristal-kristal es yang sebagian besar berbentuk heksagonal yang kompleks dan bercabang, dan umumnya menggumpal menjadi kumpulan

salju (*snowflake*), diameternya dapat mencapai beberapa inci. Berat jenis rata-ratanya sering dianggap sebesar 0,1 kg.

7. Hujan es (*Hail*) merupakan hujan yang terlihat seperti bola es dan diproduksi oleh awan konvektif, paling sering cumulonimbus. Batu es, kadang-kadang dikenal sebagai batu hujan es, dapat memiliki bentuk yang tidak teratur, bulat, atau kerucut, dan diameternya berkisar dari 5 hingga 125 mm. 0,8 kg gravitasi spesifik

2.3 Analisa Hidrologi

Sebagian perencanaan bangunan air memerlukan analisa hidrologi. Analisa hidrologi tidak hanya diperlukan dalam perencanaan berbagai macam bangunan air, seperti drainase, DAS (Daerah Aliran Sungai), bangunan pengendali banjir, dan bangunan irigasi, tetapi juga bangunan jalan raya, lapangan terbang, dan bangunan lainnya. Analisa hidrologi merupakan bidang yang sangat rumit dan kompleks. Hal ini disebabkan oleh ketidakpastian dalam hidrologi, keterbatasan teori dan rekaman data, dan keterbatasan ekonomi.

Hidrologi adalah ilmu yang mempelajari tentang asal dan perjalanan air di permukaan bumi. Hidrologi dipelajari untuk memecahkan masalah-masalah yang berhubungan dengan air seperti pengendali banjir, manajemen air, dan perencanaan bangunan air. Proses awal dari siklus hidrologi adalah penguapan yang merupakan proses alami berubahnya molekul cairan menjadi molekul gas/uap. Penguapan dapat terjadi dari semua permukaan yang lembab, seperti rawa, danau, dan lautan. Akibat penguapan ini terkumpul massa uap air, yang dalam kondisi atmosfer tertentu dapat membentuk awan.

2.4 Analisa Frekuensi Curah Hujan

Dalam ilmu statistik dikenal beberapa macam distribusi frekuensi dan empat jenis distribusi yang paling banyak digunakan dalam bidang hidrologi adalah:

1. Distribusi Normal.
2. Distribusi Log Normal.
3. Distribusi Log Person III.
4. Distribusi Gumbel.

1. Distribusi Normal

Distribusi normal atau kurva normal disebut juga distribusi Gauss. Fungsi densitas peluang normal PDF (*Probability Density Function*) yang paling dikenal adalah bentuk bell dan dikenal sebagai distribusi normal. PDF distribusi normal dapat dituliskan dalam bentuk rata-rata dan simpangan bakunya, sebagai berikut:

$$P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] - \infty \leq x \leq \infty \quad (2.1)$$

Dimana:

$P(X)$ = fungsi densitas peluang normal (ordinat kurva normal)

X = variabel acak kontinu

μ = rata-rata nilai X

σ = simpangan baku dari nilai X

Dalam pemakaian praktis, umumnya rumus tersebut tidak digunakan secara langsung karena telah dibuat tabel untuk keperluan perhitungan, dan juga dapat didekati dengan:

$$K_T = \frac{X_T - \bar{X}}{S} \quad (2.2)$$

Dimana:

X_T = Perkiraan nilai yang diharapkan terjadi dalam periode ulang T Tahunan

\bar{X} = nilai rata-rata hitung variat

S = deviasi standar nilai variat

K_T = faktor frekuensi (nilai *variabel* reduksi Gauss)

Nilai faktor frekuensi (K_T), umumnya sudah tersedia dalam Tabel 2.1 untuk mempermudah perhitungan, seperti ditunjukkan dalam tabel berikut, biasa disebut sebagai tabel nilai variabel reduksi Gauss (*Variabel reduced Gauss*).

Tabel 2.1 Nilai Variabel Reduksi Gauss

No	Periode Ulang, T (tahun)	Peluang	K_T
1	1,001	0,999	-3,05
2	1,005	0,995	-2,58
3	1,010	0,990	-2,33
4	1,050	0,900	-1,64
5	1,110	0,800	-1,28
6	1,250	0,750	-0,84
7	1,330	0,750	-0,67
8	1,430	0,700	-0,52
9	1,670	0,600	-0,25
10	2,000	0,500	0

Tabel 2.1 Nilai Variabel Reduksi Gauss (Lanjutan)

No	Periode Ulang, T (tahun)	Peluang	K_T
11	2,500	0,400	0,25
12	3,330	0,300	0,52
13	4,000	0,250	0,67
14	5,000	0,200	0,84
15	10,000	0,100	1,28
16	20,000	0,050	1,64
17	50,000	0,020	2,05
18	100,000	0,010	2,33
19	200,000	0,005	2,58
20	500,000	0,002	2,88
21	1000,000	0,001	3,09

Sumber: Suripin, 2003, *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*: 37

2. Distribusi Log Normal

Jika variabel $Y = \log X$ terdistribusi secara normal, maka X dikatakan mengikuti distribusi Log Normal. PDF (*Probability Density Function*) untuk distribusi Log Normal dapat dituliskan dalam bentuk rata-rata dan simpangan bakunya, sebagai berikut:

$$P(X) = \frac{1}{X\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Y-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right] \quad (2.3)$$

$$Y = \log X \quad (2.4)$$

Dimana:

$P(X)$ = peluang log normal;

X = nilai varian pengamatan;

μ_Y = nilai rata-rata populasi Y ; dan

σ_Y = deviasi standar nilai varian Y

Dengan persamaan yang dapat didekati:

$$Y_T = \bar{Y} + K_T S \quad (2.5)$$

$$K_T = \frac{Y_T - \bar{Y}}{S} \quad (2.6)$$

Dimana:

Y_T = perkiraan nilai yang diharapkan terjadi dengan periode ulang T tahunan;

Y = nilai rata-rata hitung variat;

S = deviasi standar nilai variat; dan

K_T = faktor frekuensi, merupakan fungsi dari peluang atau periode.

3. Distribusi Log Person III

Pada situasi tertentu, walaupun data yang diperkirakan mengikuti distribusi sudah konversi kedalam bentuk logaritmis, ternyata kedekatan antara data dan teori tidak cukup kuat untuk menjustifikasi pemakaian distribusi log normal. Salah satu distribusi dari serangkaian distribusi yang sikembangkan person yang menjadi perhatian ahli sumber daya air adalah Log-Person Type III (LP III).

Tiga parameter penting dalam LP III yaitu harga rata-rata, simpangan baku dan koefisien kemencengan. Yang menarik adalah jika koefisien kemencengan sama dengan nol maka perhitungan akan sama dengan log Normal.

Berikut ini langkah-langkah penggunaan distribusi Log-Person Type III:

Ubah data kedalam bentuk logaritmis, $X = \text{Log } X$

a. Hitung harga rata-rata:

$$\log X = \frac{\sum_{i=1}^n \log X_i}{n} \quad (2.7)$$

b. Hitung harga simpangan baku:

$$s = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\log X_i - \log \bar{X})^2}{n-1} \right]^{0,5} \quad (2.8)$$

c. Hitung koefisien kemencengan:

$$G = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log x_i - \log \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)S^3} \quad (2.9)$$

d. Hitung logaritma hujan atau ba njir periode ulang T dengan rumus:

$$\log X_T = \log \bar{X} + K \cdot s \quad (2.10)$$

K adalah variabel standar (*standardized variable*) untuk X yang besarnya tergantung koefisien kemencengan G, dicantumkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai K untuk distribusi Log-Person III

Koef	Interval Kejadian (<i>Recurrence Interval</i>), Tahun (Periode Ulang)							
	10,101	12,500	2	5	10	25	50	100
	Persentase Peluang Terlampaui (<i>Percent Chance Of Being Exceeded</i>)							
	99	80	50	20	10	4	2	1
3.0	-0.667	-0.636	-0.396	0.420	1,180	2,278	3,152	4,051
2.8	-0.714	-0.666	-0.384	0.460	1,210	2,275	3,144	3,973
2.6	-0.769	-0.696	-0.368	0.499	1,238	2,267	3,071	2,889
2.4	-0.832	-0.725	-0.351	0.537	1,262	2,256	3,023	3,800
2.2	-0.905	-0.752	-0.330	0.574	1,284	2,240	2,970	3,705
2.0	-0.990	-0.777	-0.307	0.609	1,302	2,219	2,192	3,605
1.8	-1.087	-0.799	-0.282	0.643	1,318	2,193	2,848	3,499
1.6	-1.197	-0.817	-0.254	0.675	1,329	2,163	2,780	3,388
1.4	-1.318	-0.832	-0.225	0.705	1,337	2,128	2,076	3,271
1.2	-1.449	-0.844	-0.195	0.732	1,340	2,087	2,626	3,149
1.0	-1.588	-0.852	-0.164	0.758	1,340	2,043	2,542	3,022
0.8	-1.733	-0.856	-0.132	0.780	1,336	1,993	2,453	2,891
0.6	-1.880	-0.857	-0.099	0.800	1,328	1,939	2,359	2,755
0.4	-2.029	-0.855	-0.066	0.516	1,317	1,880	2,261	2,615
0.2	-2.178	-0.850	-0.033	0.830	1,301	1,818	2,159	2,472
0.0	-2.326	-0.842	-0.000	0.842	1,282	1,715	2,051	2,326
-0.2	-2.472	-0.830	-0.033	0.850	1,258	1,680	1,945	2,178
-0.4	-2.615	-0.816	-0.066	0.855	1,231	1,606	1,834	2,028
-0.6	-2.755	-0.800	-0.099	0.857	1,200	1,528	1,720	1,880
-0.8	-2.891	-0.780	-0.132	0.856	1,166	1,448	1,606	1,733
-1.0	-3.022	-0.758	-0.164	0.852	1,086	1,366	1,492	1,588
-1.2	-2.149	-0.732	-0.195	0.844	1,086	1,282	1,379	1,449
-1.4	-2.271	-0.705	-0.225	0.832	1,041	1,198	1,270	1,318
-1.6	-2.238	-0.675	-0.254	0.817	0,994	1,116	1,166	1,197
-1.8	-3.499	-0.643	-0.282	0.799	0,945	1,035	1,069	1,087
-2.0	-3.605	-0.609	-0.307	0.777	0,895	0,959	0,980	0,990
-2.2	-3.705	-0.574	-0.330	0.752	0,844	0,888	0,900	0,905
-2.4	-3.800	-0.532	-0.351	0.725	0,795	0,823	0,823	0,832
-2.6	-3.889	-0.490	-0.368	0.696	0,747	0,764	0,768	0,796
-2.8	-3.973	-0.469	-0.384	0.666	0,702	0,712	0,714	0,714
-3.0	-7.051	-0.420	-0.696	0.636	0,666	0,666	0,666	0,667

Sumber: Suripin, 2004, *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*: 43

4. Distribusi Gumbel

Perhitungan curah hujan rencana menurut Metode Gumbel, mempunyai perumusan sebagai berikut:

$$X = \bar{X} + sK \quad (2.11)$$

Dimana:

\bar{X} = harga rata-rata sampel

S = standar deviasi (simpangan baku) sampel

Nilai K (faktor probabilitas) untuk harga-harga ekstrim Gumbel dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$K = \frac{Y_{Tr}-Y_n}{S_n} \quad (2.12)$$

Dimana:

Y_n = *reduced mean* yang tergantung jumlah sample/ data n

S_n = *reduced standard deviation* yang juga tergantung pada jumlah sample/data

Y_{Tr} = *reduced variate*, yang dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$Y_{Tr} = -\ln \left\{ -\ln \frac{T_r-1}{T_r} \right\} \quad (2.13)$$

Tabel 2.3 Standar Deviasi (Y_n) untuk Distribusi Gumbel

No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
10	0.4592	0.4996	0.5035	0.5070	0.5100	0.5128	0.5157	0.5181	0.5202
20	0.5236	0.5252	0.5268	0.5283	0.5296	0.5309	0.5320	0.5332	0.5343
30	0.5362	0.5371	0.5380	0.5388	0.5396	0.5403	0.5410	0.5418	0.5424
40	0.5436	0.5442	0.5448	0.5453	0.5458	0.5463	0.5468	0.5473	0.5477
50	0.5486	0.5489	0.5493	0.5497	0.5501	0.5504	0.5508	0.5511	0.5515
60	0.5521	0.5524	0.5527	0.5530	0.5533	0.5535	0.5538	0.5540	0.5543
70	0.5548	0.5550	0.5552	0.5555	0.5557	0.5559	0.5561	0.5563	0.5565
80	0.5569	0.5570	0.5572	0.5574	0.5576	0.5578	0.5580	0.5581	0.5583
90	0.5586	0.5587	0.5589	0.5591	0.5592	0.5593	0.5595	0.5596	0.5598
100	0.5600	0.5602	0.5603	0.5604	0.5606	0.5607	0.5608	0.5609	0.5619

Sumber: Suripin, 2003, *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan: 51*

2.5 Analisis Debit Banjir Rencana

Untuk mencari debit banjir rencana dapat digunakan metode hubungan empiris antara curah hujan dengan limpasan. Metode ini paling banyak di kembangkan dan digunakan, yakni metode Nakayasu, namun ada beberapa hal yang harus di tentukan terlebih dahulu, sebelum melakukan menganalisis debit banjir adalah sebagai berikut:

Distribusi Hujan Jam-Jaman

Untuk menghitung distribusi hujan diperlukan suatu pendekatan yang mungkin terjadi pada selang waktu tertentu, dan dalam selang waktu tersebut dapat diambil suatu

pendekatan 5 jam tiap harinya. Adapun persamaan yang digunakan untuk menentukan curah hujan jam-jaman, adalah sebagai berikut:

$$R_o = \frac{R_{24}}{t} \quad (2.14)$$

$$R_t = R_o \left(\frac{t}{T}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.15)$$

Dimana:

R_o = Hujan harian rerata (mm)

R_{24} = Curah hujan netto dalam 24 jam (mm)

R_t = Rerata hujan dari awal sampai T (mm)

T = Waktu mulai hujan hingga ke-t (jam)

t = Waktu konsentrasi (jam)

Adapun persamaan yang akan digunakan untuk menentukan jam ke-t, adalah sebagai berikut:

$$R'_t = tR_t - (t-1)R(t-1) \quad (2.16)$$

Dimana:

R'_t = Tinggi hujan pada jam ke-T (mm)

T = Waktu konsentrasi (jam)

R_t = Rata-rata hujan sampai T (mm)

$R(t-1)$ = Rata-rata hujan dari awal sampai ke-T jam (jam)

Koefisien Pengaliran

Koefisien pengaliran tergantung pada faktor-faktor untuk menentukan koefisien pengaliran rata-rata (C) dengan berbagai kondisi permukaan dapat ditentukan melalui dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$C = \frac{\sum A_i n_i C_i}{\sum A_i n_i} \quad (2.17)$$

Dimana:

C = Koefisien pengaliran rata-rata (C)

A = Luas masing-masing tata guna lahan (km^2)

C_i = Koefisien pengaliran sesuai dengan jenis permukaan (C)

n = Banyak jenis tata guna lahan dalam satu daerah

2.6 Pengertian Bendung

Bendung merupakan bangunan atau infrastruktur sumber daya air yang sangat penting yang mempunyai fungsi dan manfaat untuk memenuhi berbagai kebutuhan bagi kehidupan dan penghidupan manusia, selain memberikan manfaat yang demikian besar, perlu disadari bahwa bendungan juga mengandung potensi resiko terjadinya bencana apabila terjadi kegagalan atau keruntuhan bendungan.

Menurut macamnya bendung dibagi dua, yaitu bendung tetap dan bendung sementara, bendung tetap adalah bangunan yang sebagian besar konstruksi terdiri dari pintu yang dapat digerakkan untuk mengatur ketinggian muka air sungai sedangkan bendung tidak tetap adalah bangunan dipergunakan untuk menaikkan muka air di sungai, sampai pada ketinggian yang diperlukan agar air dapat dialirkan ke saluran irigasi dan petak tersier.

2.7 Jenis dan Manfaat Bendungan

Terdapat banyak sekali tipe bendungan yang sukar dibandingkan antara satu dengan lainnya. Jadi satu bendungan dapat dipandang dari beberapa segi yang masing-masing menghasilkan tipe yang berbeda.

1. Bendungan besar (*Large Dams*)

Bendungan besar adalah bendungan yang tingginya lebih dari 500 m, diukur dari bagian terbawah pondasi sampai ke puncak bendungan.

Bendungan yang tingginya antara 10 m dan 15 m dapat pula di sebut bendungan besar asal memenuhi salah satu kriteria sebagai berikut:

- a. Panjang puncak bendungan tidak kurang dari 500 m.
- b. Kapasitas waduk yang akan terbentuk tidak kurang dari 1 juta m³.
- c. Debit banjir maksimal yang diperhitungkan tidak kurang dari 2000 m³/ detik.
- d. Bendungan menghadapi kesulitan-kesulitan khusus pada pondasinya.
- e. Bendungan didesain tidak seperti biasanya.

2. Pembagian tipe bendungan berdasarkan tujuan pembangunannya

Ada 2 tipe bendungan dengan tujuan tunggal dan bendungan serbaguna:

- a. Bendungan dengan tujuan tunggal (*Single purpose dams*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi satu tujuan saja.

b. Bendungan serbaguna (*Multipurpose dams*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan misalnya: PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) dan irigasi pengendalian banjir.

3. Pembagian tipe bendungan berdasarkan jalannya air

Ada 2 tipe bendungan untuk di lewati air dan bendungan untuk menahan air:

a. Bendungan untuk di lewati air (*Overflow dams*) adalah bendungan yang dibangun untuk dilewati air misalnya pada bangunan pelimpah (*spillway*).

b. Bendungan menahan air (*non Overflow dams*) adalah bendungan yang tidak boleh dilewati oleh air.

4. Pembagian tipe bendungan berdasarkan fungsinya

Ada 8 tipe bendungan yaitu:

a. Bendungan pengelak pendahuluan (*primary cofferdam dike*) adalah bendungan yang pertama-tama di bangun di sungai pada waktu debit air rendah agar lokasi rencana bendungan pengelak menjadi kering yang memungkinkan pembangunannya secara teknis.

b. Bendungan pengelak (*cofferdam*) adalah bendungan yang di bangun sesudah selesainya bendungan pengelak pendahuluan sehingga lokasi rencana bendungan utama menjadi kering yang memungkinkan pembangunannya secara teknis.

c. Bendungan utama (*main dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi satu atau lebih tujuan tertentu.

d. Bendungan sisi (*high level dam*) adalah bendungan yang terletak di sebelah sisi kiri dan sisi kanan bendungan utama yang tinggi puncaknya juga sama, ini dipakai untuk membuat proyek seoptimal-optimalnya, artinya dengan menambah tinggi pada bendungan utama.

e. Bendungan tempat rendah (*saddle dam*) adalah bendungan yang terletak di tepi waduk yang jauh dari bendungan utama yang di bangun untuk mencegah keluarnya air dari waduk sehingga air waduk tidak mengalir ke daerah sekitarnya.

f. Tanggul (*dyke, levee*) adalah bendungan yang terletak di sebelah sisi kiri dan di sisi kanan bendungan utama dan di tempat yang jauh dari bendungan utama yang tinggi maksimalnya 5 m dengan panjang puncaknya maksimal 5 kali tingginya.

g. Bendungan limbah industri (*industrial waste dam*) adalah bendungan yang terdiri atas timbunan secara bertahap untuk menahan limbah yang berasal dari industri.

- h. Bendungan pertambangan (*mine tailing dam, tailing dam*) adalah bendungan yang terdiri atas timbunan secara bertahap untuk menahan hasil pertambangan dan bahan pembuatannya pun berasal dari hasil galian pertambangan juga.

2.8 Lebar Bendung

Lebar bendungan yaitu jarak antara pangkal-pangkalnya (*abutment*), sebaiknya sama dengan lebar rata-rata sungai pada bagian yang stabil. Di bagian ruas bawah sungai, lebar rata-rata ini dapat diambil pada debit penuh (*bankfull discharge*) di bagian ruas atas mungkin sulit untuk menentukan debit penuh. Dalam hal ini banjir mean tahunan dapat diambil untuk menentukan lebar rata-rata bendung.

Untuk sungai-sungai yang mengangkut bahan-bahan sedimen kasar yang berat, lebar bendung tersebut harus lebih disesuaikan lagi terhadap lebar rata-rata sungai, yaitu jangan diambil 1,2 kali lebar sungai tersebut.

2.9 Ketahanan Bendung Terhadap Guling

Persyaratan agar bendung aman dari penggulingan adalah bahwa gaya-gaya resultan yang bekerja dibagian bangunan atas dibidang horisontal harus berpotongan dengan bidang diteras. Tidak boleh berpotongan pada tegangan. Tingkat tegangan internal pada pondasi dan bangunan dipertahankan dinilai maksimum yang direkomendasikan. Untuk beton, ini setara dengan sekitar $4,0 \text{ N/mm}^2$, sementara pada pasangan bata wajib memiliki kekuatan min $1,5 - 3,0 \text{ N/mm}^2$.

2.10 Ketahanan Terhadap Piping

Rembesan yang terjadi melalui pondasi, tumpuan, tubuh bendungan, tepian dan bukit disekeliling bendung harus dikendalikan, sehingga tidak terjadi gaya angkat, longsor, aliran buluh, ketidakstabilan, hanyutnya agregat karena erosi internal atau material terbawa aliran rembesan.

Disekeliling bendung terdapat tebing dan dinding yang harus tetap aman dalam segala kondisi atau disebut dengan *severe operation*, sehingga terjadi kestabilan pada dinding disekeliling bendung. Hal tersebut berdampak terhadap terjadinya longsor yang besar nanti mengakibatkan masuknya material kedalam tampungan saat pengisian tampungan air/impounding yang berdampak timbulnya gelombang yang mengakibatkan luapan air.

Pada bangunan utama bendung baik bendung gerak ataupun tidak, untuk bendung gerak langkah awal adalah diperiksa kestabilannya terhadap erosi pada bagian bawah

permukaan dan hanya dapat runtuh karena pengangkatan atau penghancuran dasar dibagian hilir bangunan. Dapat direkomendasikan bahwa bahaya akibat erosi bawah permukaan diperiksa dengan membuat jaringan *flownet*. Dalam pengerjaan yang sering menemukan kesulitan seperti keterbatasan waktu untuk mengerjakan dan tidak adanya *software* untuk menganalisa data, maka perhitungan dapat menerapkan beberapa metode, yaitu: metode *bligh*, *koshia* dan *lane*.

Metode Lane sering dikatakan sebagai metode laju penetrasi *lane* (*Weighted creep ratio method*), sebagai kajian dan referensi direkomendasikan untuk memeriksa apakah bangunan utama bendung tidak terkikis dibawah tanah. Hasil dari metode ini adalah aman atau tidaknya suatu bendung terhadap erosi. Pada bangunan yang sederhana, metode lain relative dapat menghasilnya output yang lebih baik, namun pengerjaannya lebih sulit.

Prinsip dari metode *lane* adalah membandingkan panjang jalur rembesan di bawah bangunan sepanjang area kontak antara pondasi dan bangunan yang berbatasan langsung dengan perbedaan permukaan air tanah dikedua sisi bendung. Di sepanjang jalur ini, lereng yang lebih curam dari 45 derajat dianggap vertikal dan lereng yang kurang dari 45 derajat dianggap horizontal. Jalur vertikal dianggap memiliki resistensi tiga kali lebih kuat terhadap aliran daripada jalur horizontal.

2.11 Bangunan Pelimpah (*Spillway*)

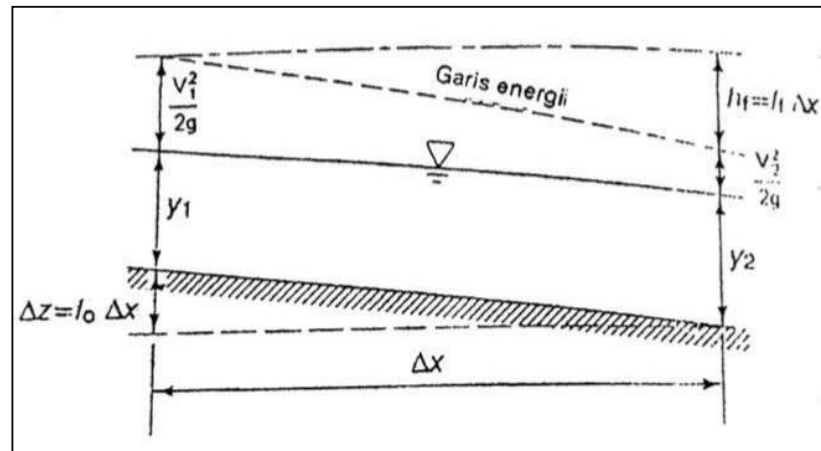
Bangunan pelimpah merupakan bangunan yang mengalirkan kelebihan air di dalam waduk. Sehingga air tidak melimpas ke puncak bendungan (*overtopping*) yang dapat membahayakan bendungan, terutama bendungan tipe urukan tanah. Jika pelimpah tersebut dilengkapi dengan pintu untuk mengendalikan aliran banjir, disebut sebagai pelimpah berpintu (*gated spillway*). Jika aliran cukup dikendalikan oleh mercu pelimpah, disebut sebagai pelimpah tidak berpintu (*ungated spillway*). Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain bangunan pelimpah yaitu:

1. Debit inflow, frekuensi, dan bentuk hidrografnya.
2. Tinggi mercu pelimpah yang direncanakan.
3. Kapasitas waduk pada beberapa variasi permukaan.
4. Kondisi geologi dan kondisi lapangan lainnya.
5. Lokasi berupa lereng yang terjal/ curam.
6. Bekas galian yang dapat dimanfaatkan sebagai material timbunan.
7. Daya dukung, stabilitas lereng, rembesan/ *uplift*.

Untuk menentukan profil aliran rencana pada bangunan pelimpah mempunyai beberapa metode yaitu metode tahapan langsung (*direct step method*) dan metode tahapan standar (*standar step method*)

Metode Tahapan Langsung (*Direct Step Method*)

Metode tahapan langsung berupa metode sederhana yang cara pengerjaannya lebih mudah dan praktis untuk menghitung profil muka air. Dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Metode Tahapan Langsung

Sumber: Triatmodjo, 2008

2.12 Saluran Pengarah

Saluran pengarah berfungsi untuk mengarahkan aliran agar aliran tersebut saat melewati mercu memiliki kondisi hidraulik yang baik yaitu aliran yang seragam. Perbandingan nilai kedalaman saluran pengarah dari puncak mercu pelimpah diusahakan memiliki nilai 1,5 kali lebih besar, atau sama dengan tinggi limpasan air di atas puncak mercu pelimpah. Dan pada saluran pengarah diusahakan kecepatan masuknya aliran air di bawah 4 m/s.

2.13 Mercu

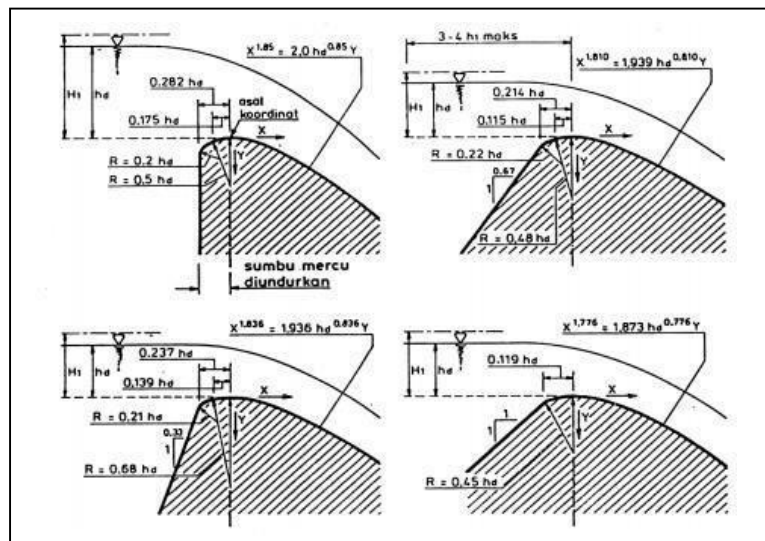
Mercu yang digunakan di Indonesia pada umumnya digunakan dua tipe mercu yaitu mercu tipe Ogee dan tipe bulat. Kedua bentuk mercu tersebut dapat dipakai untuk konstruksi beton maupun pasangan batu atau kombinasi dari keduanya. Penentuan elevasi mercu bendungan ditentukan pertimbangan faktor – faktor seperti panjang bendungan untuk mengalirkan debit rencana QPMF, untuk mendapatkan sifat aliran sempurna, elevasi sawah tertinggi yang akan dialiri, keadaan tinggi air di sawah,

kehilangan tekanan mulai dari intake sampai dengan saluran tersier dan tekanan yang diperlukan agar dapat membilas sedimen.

a. Mercu Ogee

Mercu Ogee berbentuk tirai luapan bawah dari bendungan ambang tajam. Sehingga mercu ini tidak akan memberikan tekanan sub atmosfer pada permukaan mercu sewaktu bendungan mengalirkan air pada debit rencana. Untuk bagian hulu mercu bervariasi sesuai dengan kemiringan permukaan hilir.

Salah satu alasan dalam perencanaan digunakan tipe Ogee adalah karena tanah di sepanjang kolam olah, tanah berada dalam keadaan baik, maka tipe mercu yang cocok adalah tipe mercu Ogee karena memerlukan lantai muka untuk menahan penggerusan, digunakan tumpukan batu sepanjang kolam olah sehingga lebih hemat. Beberapa bentuk mercu Ogee ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bentuk-Bentuk Bendung Mercu Ogee

Sumber: U.S Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station

b. Koefisien Debit

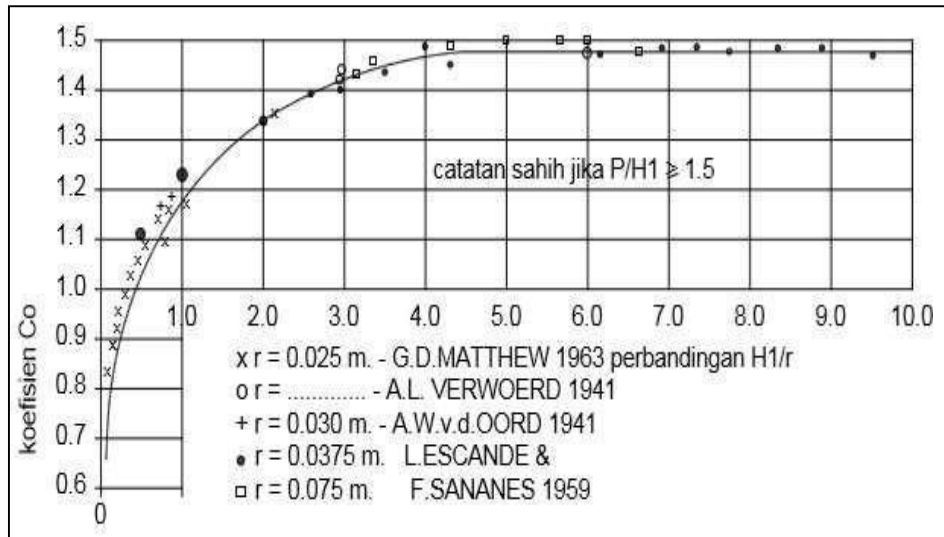
Koefisien debit (C_d) merupakan angka tak berdimensi sebagai koreksi dari hasil formulasi matematika debit aliran yang mengalir pada bangunan air terhadap hasil pengukuran debit aliran. Untuk mengetahui hambatan yang terjadi pada saat air mengalir yaitu menggunakan koefisien debit.

Koefisien debit C_d adalah hasil dari perkalian antara $C_0 \times C_1 \times C_2$. Dimana tiap angka dari koefisien tersebut didapatkan dengan cara melihat ke grafik. Penjabaran mencari nilai setiap koefisien didapat sebagai berikut.

C_0 diperoleh berdasarkan fungsi H/r , terdapat pada Gambar Gambar 2.4.

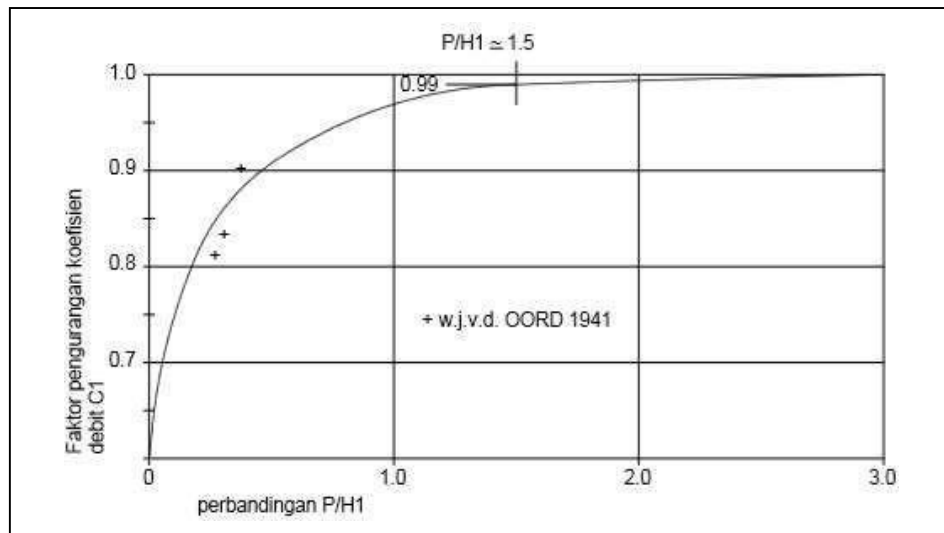
C_1 diperoleh berdasarkan fungsi p/H , terdapat pada Gambar Gambar 2.5.

C2 diperoleh berdasarkan fungsi p/H dan kemiringan muka udik bendungan, terdapat pada Gambar 2.6.



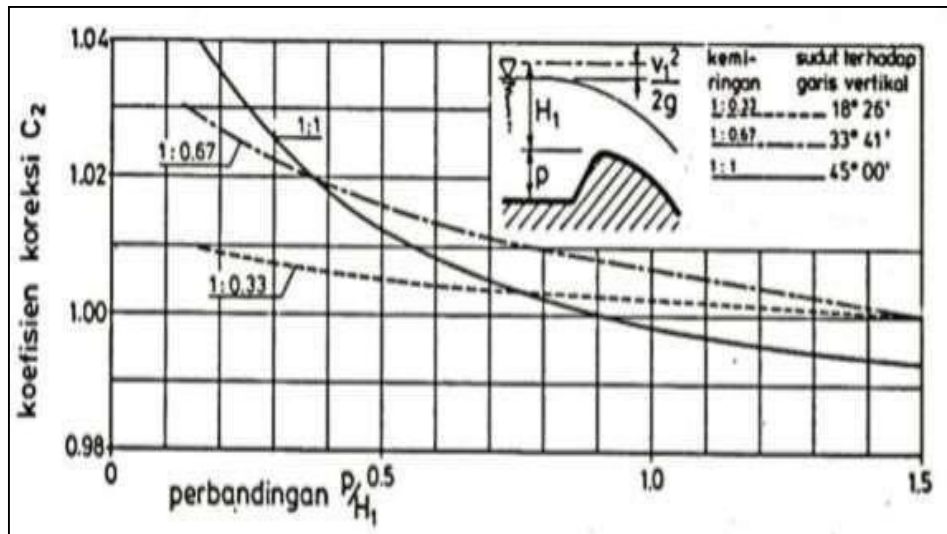
Gambar 2.4 Grafik C0 Sebagai Fungsi Perbandingan H/r

Sumber: Kumala Y.E, 2018



Gambar 2.5 Grafik C1 Sebagai Fungsi Perbandingan P/H1

Sumber: Kumala Y.E, 2018



Gambar 2.6 Grafik C2

Sumber: Kumala Y.E, 2018

2.14 Saluran Transisi

Saluran transisi berfungsi agar debit banjir rencana yang disalurkan memiliki kecepatan aliran yang rata dan aliran air yang baik tidak mengalami aliran balik berlebih pada bagian hilir saluran yang dapat menyebabkan luapan air.

2.15 Saluran Peluncur

Saluran peluncur berfungsi memindahkan aliran debit air dengan perbedaan elevasi dari saluran peralihan ke sungai atau saluran lainnya, saluran ini harus direncanakan secara aman dan ekonomis, jika saluran terlalu panjang maka biaya perencanaan menjadi tidak ekonomis karena panjang saluran menjadi besar. Namun jika saluran terlalu curam maka tingkat keamanannya akan menurun.

2.16 Bangunan Peredam Energi

Bangunan peredam energi adalah bangunan yang berfungsi meredam energi akibat pembendungan, sehingga aliran air dari saluran peluncur ke sungai tidak menimbulkan penggerusan yang membahayakan tubuh bendungan dan kelengkapannya. Peredam energi mempunyai beberapa bentuk yaitu lantai datar, cekung masif atau cekung bergigi, berganda atau bertangga, dan kolam loncat air. Prinsip peredam energi dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

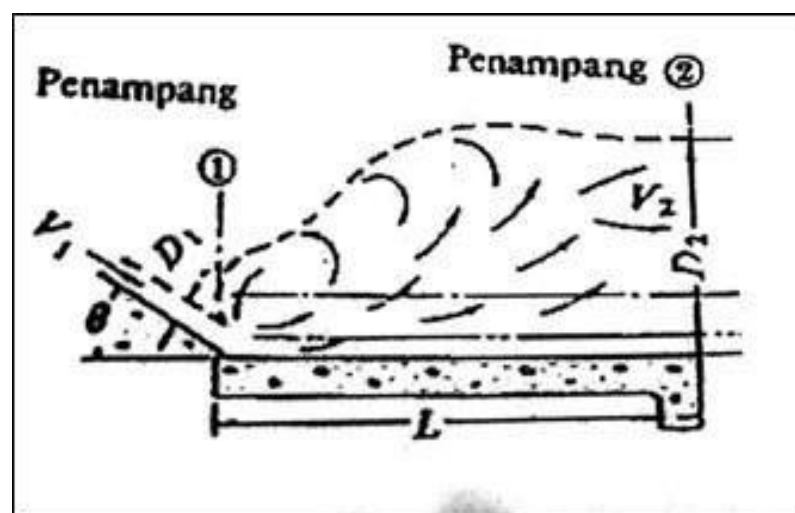
1. Menimbulkan gesekan air dengan lantai dan dinding struktur.
2. Membentuk loncatan air di dalam ruang olakan.
3. Menambah kekasaran pada lantai/bidang.
4. Menimbulkan benturan air ke bidang, air atau udara.

2.17 Peredam Energi USBR

Peredam energi yang digunakan untuk bendungan adalah peredam energi tipe USBR yang dikembangkan oleh *United States Bureau of Reclamation* (USBR). Kolam olak tipe USBR mempunyai tembok tepi vertikal, dengan lantai yang biasanya panjang dan beberapa tipe dilengkapi dengan balok-balok yang terdiri dari balok miring dan balok tengah. Balok miring yang berfungsi untuk menaikkan pancaran dari lantai ruang olakan dan menstabilkan loncatan air, sedangkan balok tengah untuk memecah pancaran yang menabraknya dan menambah kekasaran pada lantai. Dan kolam olak tipe USBR mempunyai ambang hilir biasa atau ambang hilir bergerigi yang berfungsi untuk mengurangi panjang lantai dan jika alirannya mempunyai kecepatan tinggi masih dapat memecah sisa pancaran yang sampai pada ambang ini. Peredam energi tipe USBR, dibedakan menjadi 4 (empat) berdasarkan hidraulik alirannya dan kondisi konstruksinya seperti yang diuraikan di bawah ini:

1. Peredam Energi USBR tipe I

Peredam energi USBR tipe I adalah suatu peredam energi dengan dasar yang datar dan terjadinya peredaman energi yang terkandung dalam aliran air dengan benturan secara langsung, aliran tersebut ke atas permukaan dasar kolam. Benturan langsung tersebut menghasilkan peredaman energi yang cukup tinggi sehingga perlengkapan-perengkapan lainnya guna peredaman tidak diperlukan lagi pada kolam olakan tersebut. Penampang peredam energi USBR tipe I ditunjukkan pada Gambar 2.7.



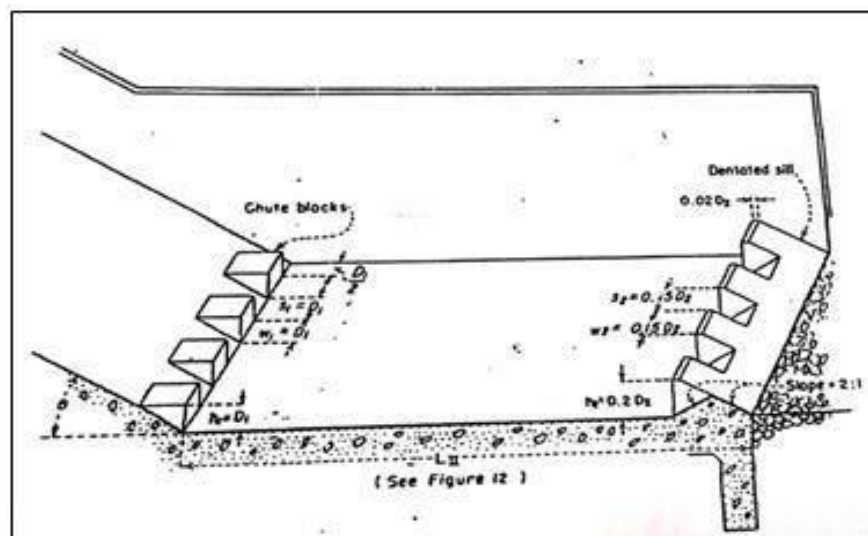
Gambar 2.7 Peredam Energi USBR tipe I

Sumber: Kumala, Y.E 2018

Penyempurnaan peredaman terjadi akibat gesekan-gesekan yang terjadi antara molekul-molekul air di dalam kolam olakan, maka air yang meninggalkan kolam olakan tersebut mengalir memasuki alur sungai dalam kondisi yang sudah tenang. Akan tetapi kolam olakan menjadi lebih panjang oleh karena itu tipe ini hanya sesuai untuk mengalirkan debit yang relatif kecil dengan kapasitas peredam yang kecil sehingga dimensinya menjadi kecil. Peredam energi tipe ini biasanya dibangun untuk kondisi yang tidak memungkinkan pembuatan perlengkapan- perlengkapan lainnya pada kolam olak tersebut.

2. Peredam Energi USBR tipe II

Peredam energi USBR tipe II terjadi peredam energi yang terkandung dalam aliran akibat gesekan-gesekan di antara molekul-molekul air di dalam kolam dan dibantu dengan perlengkapan lain yang dibuat berupa gigi-gigi pemancar di pinggir udik dasar kolam dan ambang bergerigi di pinggir hilirnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Kolam olak tipe ini cocok untuk aliran dengan tekanan hidraustatis yang tinggi dengan debit yang besar. Peredam energi tipe ini cocok untuk aliran dengan $q > 45 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, tekanan hidrostatik $> 60 \text{ m}$, dan bilangan Froude $> 4,5$.



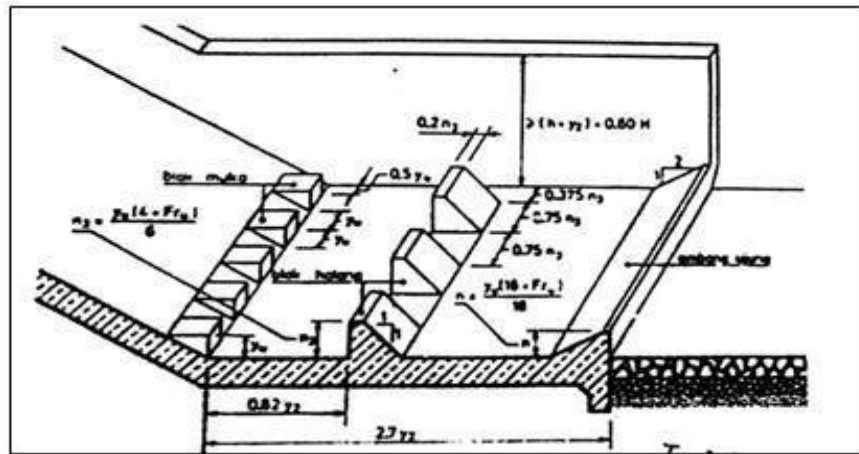
Gambar 2.8 Peredam Energi USBR Tipe II

Sumber: Kumala, Y.E, 2018

3. Peredam Energi USBR tipe III

Peredam energi USBR tipe III yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 mempunyai prinsip kerja dari kolam olakan ini sangat mirip dengan sistem kerja dari kolam

olakan tipe II, akan tetapi lebih sesuai untuk mengalirkan air dengan tekanan hidrostatik yang lebih rendah dan debit yang agak kecil dengan $q < 18,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, dan bilangan Froude $> 4,5$. Untuk mengurangi panjang kolam olakan, biasanya dibuatkan gigi pemancar aliran di tepi udik dasar, gigi penghadang aliran (gigi benturan) pada dasar kolam olakan, dan di ujung hilir dibuat perata aliran. Kolam olakan ini biasanya digunakan untuk bangunan pelimpah pada bendungan urukan yang rendah.



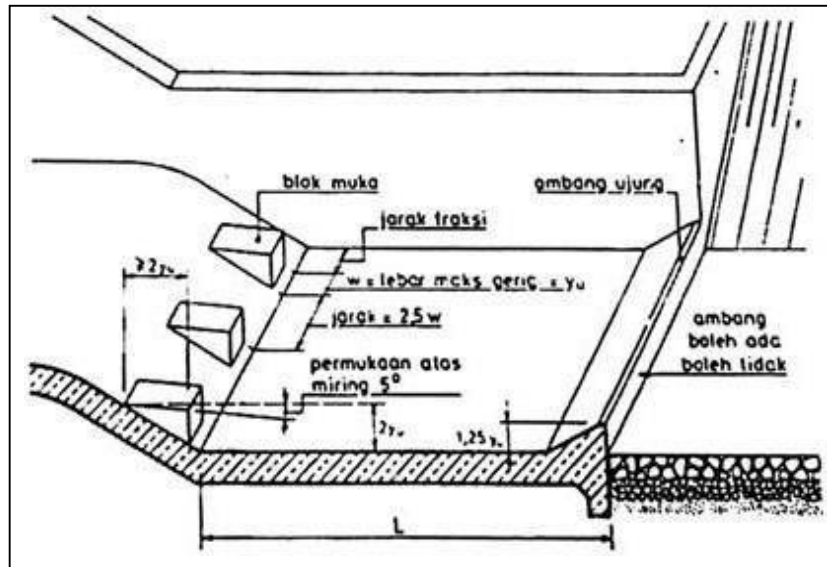
Gambar 2.9 Peredam Energi USBR Tipe III

Sumber: Kumala, Y.E, 2018

4. Peredam Energi USBR tipe IV

Sistem kerja olakan tipe ini sama saja dengan sistem kerja kolam olakan datar USBR tipe III, dipasang gigi pemancar di ujung hulu dan diujung hilir sebagai perata aliran seperti terlihat pada Gambar 2.10. Tetapi penggunaannya paling cocok adalah untuk aliran dengan tekanan hidrostatik yang rendah dan debit yang besar per unit lebar yaitu $q > 18,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ untuk aliran dalam kondisi superkritis dengan bilangan Froude antara 2,5 - 4,5. Berhubung peredam energi untuk aliran

air dengan bilangan Froude 2,5 - 4,5 umumnya sangat sulit karena hidraulik yang terjadi pada aliran tersebut tidak dapat dicegah secara sempurna.



Gambar 2.10 Peredam Energi USBR tipe IV

Sumber: Kumala, Y.E, 2018

2.18 Bangunan Terjun

Bangunan terjun adalah bangunan yang membawa air dari ruas hulu ke ruas hilir saluran yang berfungsi menurunkan muka air dipusatkan di suatu tempat. Bangunan terjun merupakan bangunan yang mempunyai terjunan tegak atau miring.

Bangunan terjun dibuat jika ada perbedaan elevasi dasar saluran yang satu dengan lainnya atau apabila kemiringan permukaan tanah lebih curam dari kemiringan maksimum yang diizinkan. Bangunan terjun tegak digunakan jika perbedaan tinggi energi (dalam hal ini boleh dianggap perbedaan dasar saluran) kurang dari 1,5 m. Jika tinggi energi lebih tinggi dari 1,5 m maka digunakan bangunan terjun miring.

2.19 Model Fisik

Model fisik dibuat apabila fenomena fisik permasalahan yang ada di prototipe dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan keserupaan yang memadai. Model fisik digunakan untuk simulasi perilaku hidraulik bangunan air yang akan dilaksanakan. Model fisik hidraulik pada bangunan air terdapat dua model yaitu model 2 dimensi dan model 3 dimensi.

Model fisik hidraulik bertujuan untuk memprediksi kemungkinan yang akan terjadi setelah bangunan dibuat dan untuk mengetahui berbagai permasalahan yang belum dapat diformulasikan fenomenanya yang dapat dipecahkan melalui pemodelan.

2.20 Tinggi Bendungan

Tinggi bendungan merupakan elevasi dari permukaan pondasi hingga puncak bendungan. Untuk mencegah terjadinya limpasan di atas puncak bendungan harus diupayakan agar tinggi puncak bendungan setelah terjadi penurunan akhir masih cukup tinggi sehingga tinggi jagaan yang tersedia masih memenuhi standar yang diperlukan. Tinggi jagaan haruslah cukup untuk menahan limpasan air banjir.

2.21 Saluran Pengarah

Saluran pengarah aliran berfungsi sebagai pengarah aliran agar aliran tersebut dapat mengalirkan debit rencana QPMF dalam kondisi hidraulika yang baik. Dengan kecepatan aliran maksimum 4 m/s dan lebar saluran semakin mengecil ke hilir. Apabila melebihi kecepatan aliran maksimum itu berakibat aliran akan bersifat helisoidal dan kapasitas pengalirannya menurun.

2.22 Bangunan Peredam Energi

Bangunan peredam energi yang berfungsi untuk meredam energi dengan adanya loncatan air yang berada di kolam olak, loncatan air berupa perubahan kondisi aliran dari superkritis ke subkritis. Aliran superkritis terjadi akibat kecepatan aliran yang sangat tinggi pada saat aliran tersebut berada di saluran peluncur, maka dengan adanya bangunan peredam energi dapat mengubah kondisi aliran air menjadi aliran subkritis dengan pembuktian berdasarkan perhitungan bilangan Froude.

2.23 Bangunan Terjun

Bangunan terjun miring pada bendungan digunakan jika tinggi energi jatuh melebihi 1,5 m. Pada bangunan terjun, kemiringan permukaan belakang dibuat securam mungkin dan relatif pendek. Jika peralihan ujung runcing dipakai di antara permukaan pengontrol dan permukaan hilir disarankan untuk memakai kemiringan yang tidak lebih curam dari 1:2.

2.24 Macam-Macam Aliran

Aliran zat cair dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam seperti berikut:

1. Aliran inviscid dan viskos
2. Aliran kompresibel dan tak kompresibel
3. Aliran laminar dan turbulen
4. Aliran mantap dan tak mantap
5. Aliran seragam dan tak seragam
6. Aliran satu, dua dan tiga dimensi

7. Aliran rotasional dan tak rotasional

2.24.1 Aliran Invisid dan Viskos

Aliran invisid adalah aliran dimana kekentalan zat cair, μ , dianggap nol (zat cair ideal). Sebenarnya zat cair dengan kekentalan nol tidak ada di alam, akan tetapi dengan anggapan tersebut akan sangat menyederhanakan permasalahan yang sangat kompleks dalam hidrolika. Karena zat cair tidak ada kekentalan maka tidak terjadi tegangan geser antara partikel zat cair dan antara zat cair dengan bidang batas.

Pada kondisi tertentu anggapan bahwa $\mu = 0$ dapat diterima untuk zat cair dengan kekentalan kecil seperti air. Aliran viskos adalah aliran dimana kekentalan zat cair diperhitungkan (zat cair riil) Putri et al. (2024). Keadaan ini menyebabkan timbulnya tegangan geser antara partikel zat cair yang bergerak dengan kecepatan berbeda. Apabila zat cair riil mengalir pada bidang batas yang diam, zat cair yang berhubungan langsung dengan bidang batas akan mempunyai kecepatan nol (diam). Kecepatan akan bertambah sesuai dengan jarak dari bidang batas tersebut.

2.24.2 Aliran Kompresibel dan Tak Kompresibel

Semua fluida adalah kompresibel sehingga rapat massanya berubah dengan perubahan tekanan (Suryanto, 2023). Pada aliran mantap dengan perubahan rapat massa kecil, sering dianggap zat cair tidak kompresibel dan rapat massa konstan. Oleh karena zat cair mempunyai kemampatan yang sangat kecil, maka dalam analisis aliran mantap sering dilakukan anggapan zat cair tak kompresibel, tetapi pada aliran tak mantap melalui pipa di mana bisa terjadi perubahan tekanan yang sangat besar, maka kompresibilitas zat cair harus diperhitungkan.

2.24.3 Aliran Laminar dan Turbulen

Ada dua macam aliran viskos yaitu aliran laminer dan aliran turbulen. Aliran laminer adalah suatu tipe aliran yang ditunjukkan oleh gerak partikel-partikel cairan yang beraturan menurut garis-garis arusnya yang halus dan sejajar. Apabila zat warna diinjeksikan pada suatu titik dalam aliran, maka zat warna tersebut akan mengalir secara teratur seperti benang tanpa terjadi difusi dan penyebaran. Aliran laminar dapat terjadi apabila kecepatan aliran rendah, ukuran saluran sangat kecil dan zat cair mempunyai kekentalan besar. Sebaliknya pada aliran turbulen, partikel-partikel zat cair bergerak tidak teratur dan garis lintasannya saling berpotongan. Zat warna yang dimasukkan pada suatu titik dalam aliran akan terdifusi cepat ke seluruh aliran. Aliran turbulen terjadi apabila kecepatan aliran besar, saluran besar dan zat cair mempunyai kekentalan kecil.

Karakteristik aliran turbulen ditunjukkan oleh terbentuknya pusaran-pusaran dalam aliran yang menghasilkan percampuran terus menerus antara partikel partikel cairan di seluruh penampang aliran.

2.24.4 Aliran Mantap dan Tak Mantap

Aliran dikatakan sebagai aliran mantap (*steady flow*) apabila variabel dari aliran (seperti kecepatan V , tekanan p , rapat massa ρ , tampang aliran A , debit Q dan sebagainya) di sebarang titik pada zat cair tidak berubah dengan waktu (Suryanto, 2023). Keadaan ini dapat dinyatakan dalam bentuk matematis berikut:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial p}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial h}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2.18)$$

Dalam aliran turbulen, gerak partikel zat cair selalu tidak beraturan. Di sebarang titik selalu terjadi fluktuasi kecil dari kecepatan. Tetapi jika nilai reratanya pada suatu periode adalah konstan maka aliran tersebut adalah permanen. Kecepatan reratanya adalah:

$$V = \frac{1}{t} \int v \, dt \quad (2.19)$$

2.24.5 Aliran Seragam dan Tak Seragam

Aliran disebut seragam (*uniform flow*) apabila tidak ada perubahan besar dan arah dari kecepatan dari satu titik ke titik yang lain di sepanjang aliran. Demikian juga dengan variabel-variabel lainnya seperti tekanan, rapat massa, kedalaman, debit, dll.

$$\frac{\partial V}{\partial s} = 0 ; \frac{\partial \rho}{\partial s} = 0 ; \frac{\partial p}{\partial s} = 0 ; \frac{\partial h}{\partial s} = 0 ; \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (2.20)$$

2.24.6 Aliran Satu, Dua, dan Tiga Dimensi

Dalam aliran satu dimensi, kecepatan di setiap titik pada tampang lintang mempunyai besar dan arah yang sama. Sebenarnya jenis aliran ini sangat jarang terjadi, tetapi dalam analisisnya, pada aliran tiga dimensi sering disederhanakan menjadi aliran satu dimensi yaitu dengan mengabaikan dan mengabaikan perubahan kecepatan vertikal dan melintang terhadap kecepatan memanjang. Keadaan pada tampang melintang adalah rata-rata dari kecepatan, rapat massa dan sifat-sifat lainnya. Aliran dalam pipa atau saluran yang kecil dapat dianggap sebagai aliran satu dimensi. Dalam aliran dua dimensi, semua partikel dianggap mengalir dalam bidang sepanjang aliran, sehingga tidak ada aliran tegak lurus pada bidang tersebut.

2.24.7 Aliran Rotasional dan Tak Rotasional

Aliran adalah rotasional apabila setiap zat cair mempunyai kecepatan sudut terhadap

pusat massanya. Aliran rotasional terjadi karena distribusi kecepatan aliran yang tidak merata. Pada aliran tak rotasional, distribusi kecepatan di dekat dinding batas adalah merata, sehingga partikel zat cair tidak berotasi terhadap pusat massanya.

2.25 Debit Aliran

Jumlah zat cair yang mengalir melalui tampang lintang aliran tiap satu satuan waktu disebut debit aliran dan di beri notasi Q . Debit aliran biasanya di ukur dalam volume zat cair tiap satuan waktu, sehingga satuannya adalah meter kubik per detik (m^3/d) atau satuan yang lain (liter/detik, liter/menit) (Sunaryo, 2020).

Apabila tampang alirang tegak lurus pada arah aliran adalah A , maka debit aliran di berikan oleh bentuk berikut:

$$Q = A V \text{ (m}^2 \times \text{m/d} = \text{m}^3/\text{d)} \quad (2.21)$$

Untuk zat cair riil, kecepatan pada dinding batas adalah nol, dan bertambah dengan jarak dari dinding batas. Untuk aliran melalui pipa, kecepatan maksimum terjadi di sumbu pipa. Apabila v adalah kecepatan di pias setebal dr dan berjarak r dari sumbu, maka debit aliran melalui pias adalah:

$$dQ = dA v = 2\pi r dr v \quad (2.22)$$

2.26 Koefisien Aliran

Partikel zat cair yang melalui lubang berasal dari segala arah seperti ditunjukkan oleh garis arus. Karena zat cair mempunyai kekentalan maka beberapa partikel yang mempunyai lintasan membelok akan mengalami kehilangan tenaga. Setelah melewati lubang pancaran air mengalami kontraksi, yang ditunjukkan oleh penguncupan aliran. Kontraksi maksimum terjadi pada suatu tampang sedikit di sebelah hilir lubang, dimana pancaran kurang lebih horizontal. Tampang dengan kontraksi maksimum tersebut dikenal dengan vena kontrakta. Pada aliran zat cair melalui lubang terjadi kehilangan tenaga sehingga beberapa parameter aliran akan lebih kecil dibanding pada aliran zat cair ideal. Berkurangnya parameter aliran tersebut dapat ditunjukkan oleh beberapa koefisien, yaitu koefisien kontraksi, kecepatan dan debit. Koefisien kontraksi (C_c) didefinisikan sebagai perbandingan anantara luas tampang aliran pada vena kontrakta (a_c) dan luas lubang (a) yang sama dengan tampang aliran zat cair ideal.

$$C_c = \frac{a_w}{a} \quad (2.23)$$

Koefisien kontraksi tergantung pada tinggi energi, bentuk dan ukuran lubang, dan nilai

reratanya adalah sekitar $C_c = 0,64$.

Perbandingan antara kecepatan nyata aliran pada vena kontrakta (v_c) dan kecepatan teoritis (V) dikenal dengan koefisien kecepatan (C_v).

$$C_v = \frac{\text{kecepatan nyata pada vena kontrakta}}{\text{kecepatan teoritis}} \quad (2.24)$$

$$C_v = \frac{v_c}{V} \quad (2.25)$$

Nilai koefisien kecepatan tergantung pada bentuk dari sisi lubang (lubang tajam atau dibulatkan) dan tinggi energi. Nilai rerata dari koefisien kecepatan adalah $C_v = 0,97$.

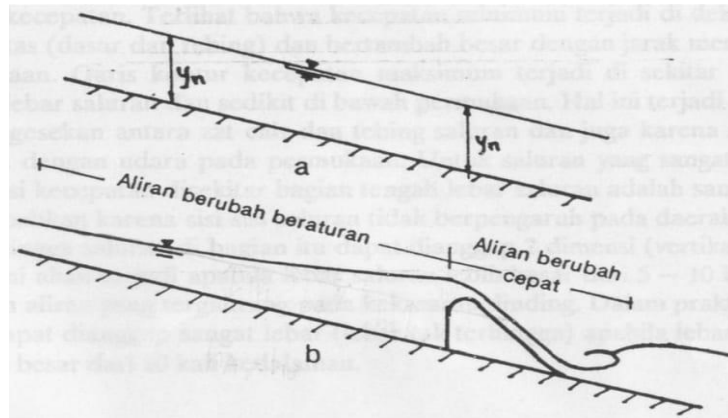
$$\begin{aligned} C_d &= \frac{\text{debit nyata}}{\text{debit teoritis}} = \frac{\text{kecepatan nyata} \times \text{luas nyata tampang aliran}}{\text{kecepatan teoritis} \times \text{luas lobang}} \quad (2.26) \\ &= \frac{V_c}{V} \times \frac{a_c}{a} = C_v \times C_c \end{aligned}$$

2.27 Klasifikasi Aliran

Pada umumnya tipe aliran melalui saluran terbuka adalah turbulen, karena kecepatan aliran dan kekerasan dinding relatif besar. Aliran melalui saluran terbuka akan turbulen apabila angka *Reynolds* $Re > 1.000$, dan *laminer* apabila $Re < 500$ (Sahril, 2023). Dalam hal ini panjang karakteristik yang ada pada angka *Reynolds* adalah jari-jari hidraulis, yang didefinisikan sebagai perbandingan antara luas tampang basah dan keliling basah.

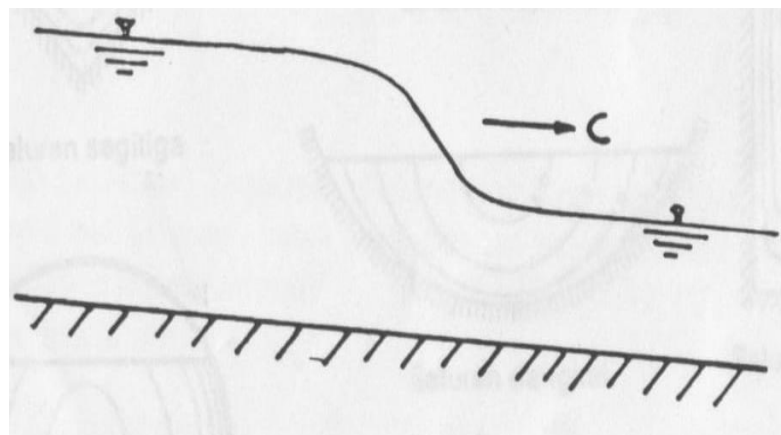
Aliran melalui saluran terbuka disebut seragam (*uniform*) apabila berbagai variabel aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan dan debit pada setiap tampang di sepanjang aliran adalah konstan. Pada aliran seragam, garis energi, garis muka air dan dasar saluran adalah sejajar sehingga kemiringan dari ketiga garis tersebut adalah sama. Kedalaman air pada aliran seragam disebut dengan kedalaman normal y_n . Untuk debit aliran dan luas tampang lintasan saluran tertentu, kedalaman normal adalah konstan di seluruh panjang saluran.

Aliran disebut tidak seragam atau berubah (*non uniform flow atau varied flow*) apabila *variabel* aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan di sepanjang saluran tidak konstan. Apabila perubahan aliran terjadi pada jarak yang pendek maka disebut aliran berubah cepat, sedang apabila terjadi pada jarak yang panjang disebut aliran berubah beraturan. Gambar 2.11 menunjukkan kedua tipe aliran.



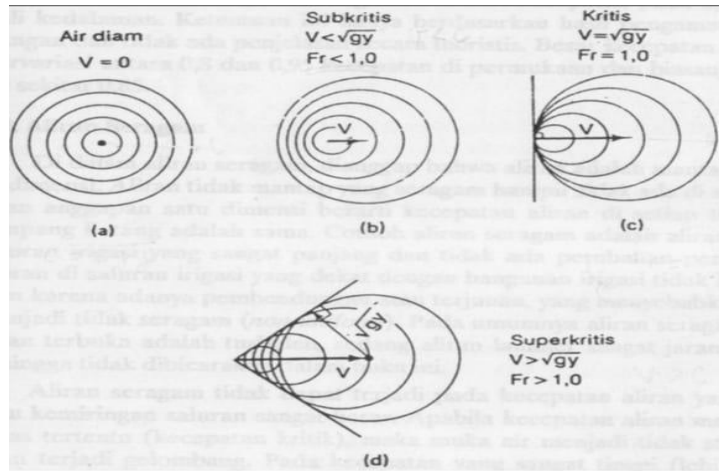
Gambar 2.11 Aliran Seragam dan Berubah
 Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Aliran disebut mantap apabila *variable* aliran di suatu titik seperti ke dalaman dan kecepatan tidak berubah terhadap waktu, dan apabila berubah terhadap waktu disebut aliran tidak mantap. Gambar 2.12 adalah gelombang banjir melalui saluran terbuka yang merupakan contoh aliran tidak mantap.



Gambar 2.12 Gelombang Banjir Melalui Saluran Terbuka
 Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Gambar 2.13 menunjukkan perbandingan antara kecepatan aliran dan kecepatan rambat gelombang karena adanya gangguan. Pada Gambar 2.3.a gangguan pada air diam ($V = 0$) akan menimbulkan gelombang yang merambat ke segala arah. Dalam Gambar 2.4.b di mana aliran adalah sub kritis gelombang masih bisa menjalar ke arah hulu. Pada kondisi ini angka Froude $Fr < 1$ atau $V < \sqrt{gy}$ dengan \sqrt{gy} adalah kecepatan rambat gelombang sedang y adalah kecepatan aliran. Gambar 2.4.c adalah aliran kritis dimana kecepatan aliran sama dengan kecepatan rambat gelombang. Dalam keadaan ini $Fr = 1$ atau $V = \sqrt{gy}$. Sedangkan Gambar 2.4.d adalah aliran super kritis dimana gelombang tidak bisa merambat ke hulu karena kecepatan aliran lebih besar dari kecepatan rambat gelombang ($Fr > 1$ atau $V > \sqrt{gy}$).

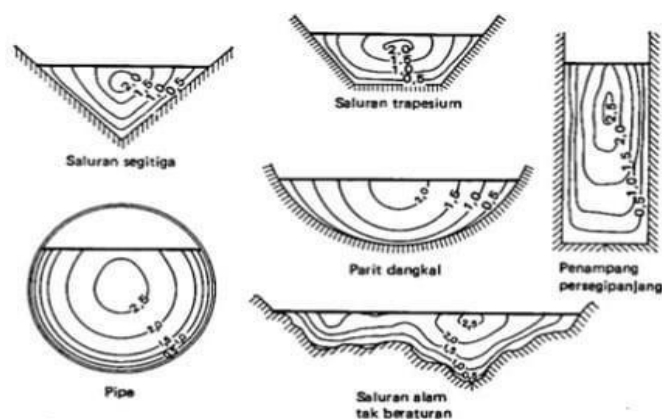


Gambar 2.13 Pola Penjalaran Gelombang di Saluran Terbuka
 Sumber: Triatmodjo (2008)

2.28 Distribusi Kecepatan

Gambar 2.14 menunjukkan distribusi kecepatan pada tampang lintang saluran dengan berbagai bentuk saluran, yang digambarkan dengan garis kontur kecepatan. Terlihat bahwa kecepatan minimum terjadi di dekat dinding batas (dasar dan tebing) dan bertambah besar dengan jarak menuju ke permukaan. Garis kontur kecepatan maksimum terjadi di sekitar tengah-tengah lebar saluran dan sedikit di bawah permukaan. Hal ini terjadi karena adanya gesekan antara zat cair dan tebing saluran dan juga karena adanya gesekan dengan udara pada permukaan.

Untuk saluran yang sangat lebar, distribusi kecepatan disekitar bagian tengah lebar saluran adalah sama. Hal ini disebabkan karena sisi-sisi saluran tidak berpengaruh pada daerah tersebut, sehingga saluran di bagian itu dapat dianggap 2 dimensi (vertikal). Kedalaman aliran yang tergantung pada kekasaran dinding.

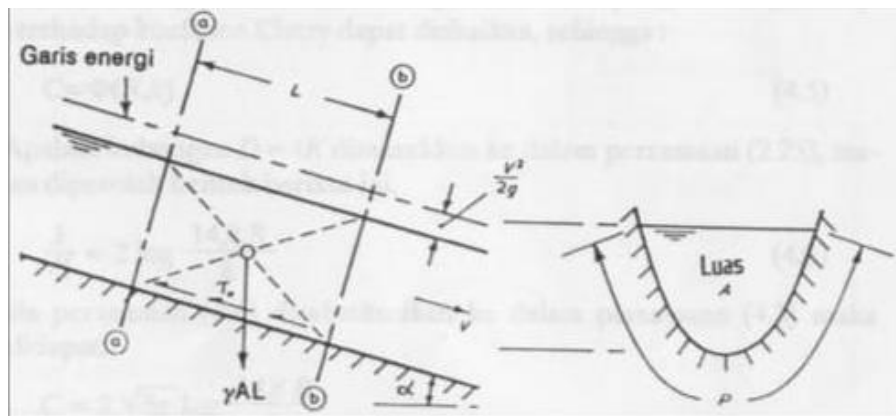


Gambar 2.14 Distribusi Kecepatan pada Saluran Terbuka
 Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Distribusi kecepatan pada vertikal dapat ditentukan dengan melakukan pengukuran pada berbagai kedalaman. Semakin banyak titik pengukuran akan memberikan hasil semakin baik. Biasanya pengukuran kecepatan di lapangan dilakukan dengan menggunakan *current* meter. Alat ini baling-baling yang akan berputar karena adanya aliran, yang kemudian akan memberikan hubungan antara kecepatan sudut baling-baling dengan kecepatan aliran.

2.29 Aliran Seragam

Di dalam aliran seragam, dianggap bahwa aliran adalah mantap dan satu dimensi. Aliran tidak mantap yang seragam hampir tidak ada di alam. Dengan anggapan satu dimensi berarti kecepatan aliran di setiap titik pada tampang lintang adalah sama. Contoh aliran seragam adalah aliran melalui saluran irigasi yang sangat panjang dan tidak ada perubahan penampang. Aliran di saluran irigasi yang dekat dengan bangunan irigasi tidak lagi seragam karena adanya pembendungan atau terjunan, yang menyebabkan aliran menjadi tidak seragam (*non unifrom*). Pada umumnya aliran seragam di saluran terbuka adalah turbulen, sedang aliran laminar sangat jarang terjadi sehingga tidak dibicarakan dalam hal ini.



Gambar 2.15 Penurunan Rumus Chezy

Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Gaya yang menahan aliran tiap satuan luas dasar saluran adalah sebanding dengan kuadrat kecepatan dalam bentuk:

$$T_0 = k V^2 \quad (2.27)$$

Dengan k adalah konstanta. Bidang singgung (kontak) antara aliran dengan dasar saluran adalah sama dengan perkalian antara keliling basah (P) dan panjang saluran (L) yang ditinjau, yaitu PL. Gaya total yang menahan aliran adalah:

$$\text{Gaya tahanan} = T_0 PL \quad (2.28)$$

Di dalam aliran mantap, komponen gaya berat (searah aliran) yang mengakibatkan

aliran harus sama dengan gaya tahanan total. Besar komponen gaya berat adalah:

$$\text{Komponen gaya berat} = \gamma A L \sin a \quad (2.29)$$

Dengan:

γ = Berat jenis zat cair (N/m³)

A = Luas tampang basah (m²)

L = Panjang saluran yang di tinjau (m)

a = Sudut kemiringan saluran (%)

Oleh karena sudut kemiringan saluran a adalah kecil, maka kemiringan saluran adalah

$I = \tan a = \sin a$ dan persamaan:

$$V = C \sqrt{RI} \quad (2.30)$$

2.30 Tampang Lintang Ekonomis

Beberapa rumus kecepatan aliran yang diberikan dalam sub bab terdahulu menunjukkan bahwa untuk kemiringan dan kekerasan saluran tertentu, kecepatan akan bertambah dengan jari-jari hidrolis. Sehingga untuk luas tampang basah tertentu debit akan maksimum apabila nilai $R = A/P$ maksimum, atau apabila keliling basah minimum. Dengan kata lain untuk debit aliran tertentu, luas tampang lintang saluran akan minimum apabila saluran mempunyai nilai R maksimum (atau P minimum). Tampang lintang saluran seperti ini disebut tampang saluran ekonomis (efisien) untuk luas tampang tertentu.

Penjelasan tentang tampang lintang ekonomis ini dapat dilakukan dengan menggunakan rumus debit aliran, yang dalam hal ini misalnya digunakan rumus Manning.

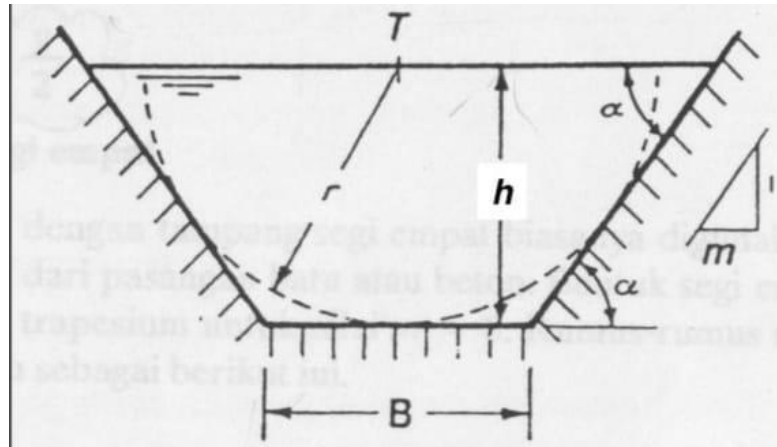
$$R = \frac{A}{P} \quad (2.31)$$

Dimana:

R = Nilai maksimum

A/P = Nilai minimum

Untuk saluran tanah dengan bentuk trapesium seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.16 dengan lebar dasar B , kedalaman y , dan kemiringan tebing $\tan a = 1/m$.



Gambar 2.16 Saluran Ekonomis Bentuk Trapesium

Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Nilai $m = 1/\tan \alpha$ adalah fungsi dari jenis tanah. Kemiringan ini ditentukan oleh sudut longsor material tebing. Dengan demikian hanya ada dua variabel yaitu lebar dasar B dan kedalaman y untuk mendapatkan bentuk tampang basah yang paling efisien. Luas tampang dan keliling basah adalah:

$$A = y (B + my) \tag{2.32}$$

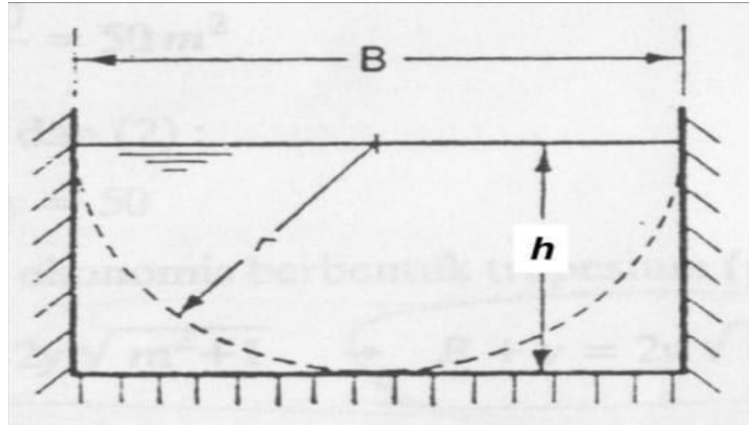
$$P = B + 2y \sqrt{1 + m^2} \tag{2.33}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{y (B+my)}{B+2y \sqrt{1+m^2}} \tag{2.34}$$

Dalam hal ini y dan B adalah variabel. Apabila nilai B dari persamaan (2.34) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.35) maka akan didapat:

$$P = \frac{A - my^2}{y} + 2y \sqrt{1 + m^2} \tag{2.35}$$

Saluran dengan tampang segi empat biasanya digunakan untuk saluran yang terbuat dari pasangan batu atau beton. Bentuk segi empat ini sama dengan bentuk trapesium untuk nilai $m = 0$. Rumus-rumus untuk bentuk segi empat adalah sebagai berikut:



Gambar 2.17 Saluran Ekonomis Bentuk Segi Empat

Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Luas tampang basah: $A = B y$ (m²)

Keliling basah: $P = B + 2y$

$$P = \frac{A}{y} + 2y \text{ (m)}$$

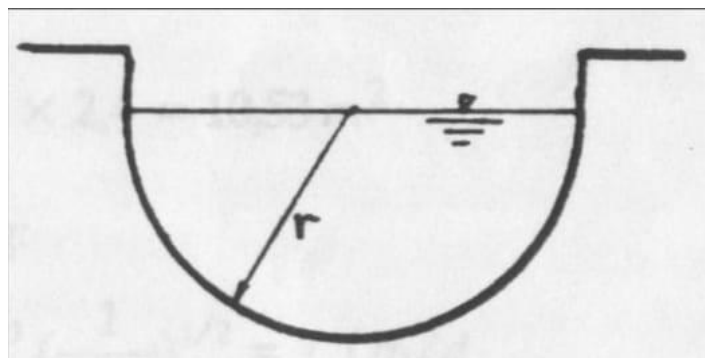
Jari-jari hidraulis: $R = \frac{A}{P} = \frac{By}{B+2y}$ (m)

Dari semua bentuk tampang lintang yang ada, bentuk setengah lingkaran mempunyai keliling basah terkecil untuk luas tampang tertentu. Dalam hal ini,

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2 \tag{2.36}$$

$$P = \pi r \tag{2.37}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\frac{\pi r^2}{2}}{\pi r} \tag{2.38}$$



Gambar 2.18 Saluran Ekonomis Bentuk Lingkaran

Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Jadi saluran dengan bentuk setengah lingkaran akan dapat melewati debit aliran lebih besar dari bentuk saluran lain, untuk luas tampang basah, kemiringan dan kekerasan dinding yang sama. Meskipun saluran setengah lingkaran ini efisien, tetapi

pembuatan saluran tersebut jauh lebih sulit dari bentuk lain (segi empat atau trapesium), sehingga saluran setengah lingkaran jarang dipakai. Biasanya saluran berbentuk segi empat untuk dinding dari pasangan batu atau beton dan bentuk trapesium untuk saluran tanah. Jadi ada faktor-faktor lain selain tampang efisien yang menentukan pemilihan tampang lintang saluran. Untuk luas tampang basah dan kemiringan tebing tertentu, akan dapat di tentukan bentuk tampang basah yang efisien sehingga biaya pekerjaan akan minimum.

2.31 Aliran Tidak Seragam

Di dalam aliran seragam, seperti yang telah di bahas dalam sub bab terdahulu, kedalaman air di sepanjang saluran adalah konstan yang dikenal dengan kedalaman normal. Garis tenaga adalah sejajar dengan permukaan air dan dasar saluran.

Demikian juga kecepatan di sepanjang saluran juga konstan. Jadi profil muka air dapat diperoleh dengan hanya menghitung kedalaman air di suatu tampang.

Di dalam aliran tidak seragam, garis tenaga tidak sejajar dengan garis muka air dan dasar saluran. Kedalaman dan kecepatan aliran di sepanjang saluran tidak konstan. Pengaliran ini terjadi apabila tampang lintang sepanjang saluran tidak konstan, seperti sungai, atau juga di saluran seragam (irigasi) di daerah dekat bangunan (bendung) atau di ujung saluran. Analisis aliran tidak seragam biasanya bertujuan untuk mengetahui profil aliran di sepanjang saluran atau sungai. Analisis ini banyak dilakukan di dalam perencanaan perbaikan sungai atau penanggulangan banjir, terutama di dalam menentukan elevasi puncak tanggul, daerah genangan, elevasi jembatan, dan sebagainya. Meskipun aliran banjir di sungai merupakan aliran tidak mantap (*unsteady flow*), tetapi sering analisis profil muka air di sepanjang saluran di lakukan berdasarkan aliran mantap dengan menggunakan debit puncak dari hidrograf banjir. Aliran tidak seragam dapat dibedakan dalam dua kelompok berikut ini:

- a. Aliran berubah (*gradually varied flow*) dimana parameter hidraulis (kecepatan, tampang basah) berubah secara progresif dari satu tampang ke tampang yang lain. Kecepatan aliran di sepanjang saluran dapat di percepatan atau di perlambat yang tergantung kondisi saluran. Apabila di ujung hilir saluran terdapat bendung maka akan terjadi profil muka air pembendungan di mana kecepatan aliran akan berkurang (diperlambat). Sedangkan apabila terdapat terjunan maka profil aliran akan menurun dan kecepatan akan bertambah (dipercepat). Aliran di dalam sungai biasanya termasuk dalam tipe ini.

- b. Aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*), dimana parameter hidraulis berubah secara mendadak dan kadang-kadang juga tidak kontinu (*discontinue*). Contoh dari aliran ini adalah perubahan tampang mendadak (saluran trasisi), loncat air, tertujan, aliran melalui bangunan pelimpahdan pintu air, dan sebagainya. Kehilangan tenaga karena gesekan adalah kecil (jarak pendek) dibanding dengan kehilangan tenaga karena turbulensi.

2.32 Energi Spesifik

Prinsip kerja yang diturunkan untuk aliran melalui pipa dapat juga digunakan untuk aliran melalui saluran terbuka. Energi yang terkandung di dalam satu satuan berat air yang mengalir di dalam saluran terbuka terdiri dari tiga bentuk yaitu energi kinetik, energi tekanan, dan energi elevasi di atas garis referensi.

Untuk air yang besar dari tekanan yang di ukur dari ke dalaman aliran. Untuk air yang mengalir di atas kurva cembung, gaya sentrifugal berkerja dalam arah yang berlawanan dengan gaya gravitasi, energi tekanan di berikan oleh bentuk:

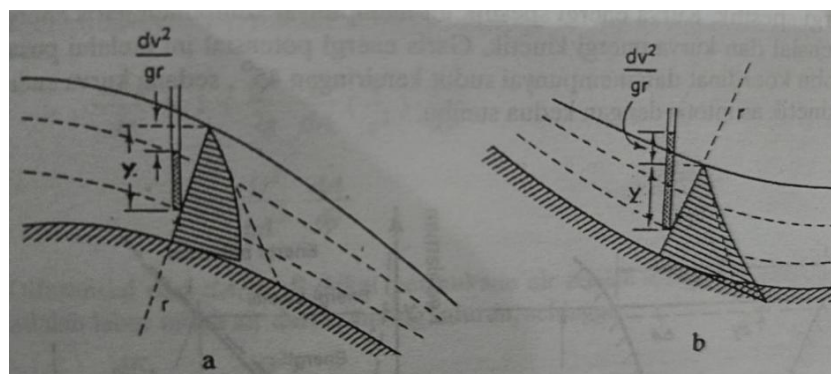
$$p = \gamma y - M \frac{v^2}{r} \quad (2.39)$$

dengan M adalah massa kolom air di atas satuan luas dan v^2 / r adalah percepatan sentrifugal dari massa air, v adalah kecepatan pada suatu titik dan r adalah jari-jari kurva. Persamaan diatas dapat di tulis bentuk tinggi tekanan yaitu:

$$\frac{p}{\gamma} = y - \frac{v^2}{g r} \quad (2.40)$$

Untuk air yang mengalir melalui kurva cekung Gambar (2.10) gaya sentrifugal adalah searah dengan gaya gravitasi, dan tinggi tekanan adalah:

$$\frac{p}{\gamma} = y + \frac{v^2}{g r} \quad (2.41)$$



Gambar 2.19 Aliran Melalui Permukaan Dasar Lengkung

Sumber: Bambang Triatmodjo, 2011

Elevasi dari tinggi energi aliran melalui saluran terbuka di ukur terhadap garis

referensi horisontal. Jarak vertikal dari garis referensi ke dasar saluran biasanya di ambil sebagai tinggi energi elevasi (potensial) pada tampang tersebut.

Untuk debit tertentu (debit tetap), untuk penampang saluran sama, dapat dinyatakan bahwa energi spesifik E_s , merupakan fungsi dari kedalaman aliran h . Permukaan air dihitung dari satu penampang melintang ke penampang. Apabila kecepatan aliran hilir lebih cepat dibandingkan kecepatan hulu, demikian pula, ketika kecepatan hulu lebih cepat dibandingkan kecepatan hilir, program akan mengasumsikan terjadi ekspansi aliran.

2.33 Neraca Air

Neraca air selisih antara jumlah air yang diterima oleh tanaman dengan air yang dibutuhkan tanaman untuk penyiapan lahan dan pertumbuhan. Air yang diterima oleh tanaman dalam hal ini berkaitan dengan ketersediaan air yang ada di bendung.

Kegunaan mengetahui kondisi air pada surplus dan defisit dapat mengantisipasi bencana yang terjadi, serta dapat pula untuk mendayagunakan air sebaik-baiknya. Sifat tanah yang merupakan komponen-komponen neraca air, misalnya kapasitas menyimpan air (jumlah ruang pori), infiltrasi, kemampuan pori sangat dipengaruhi oleh macam penggunaan lahan atau jenis dan susunan tanaman yang tumbuh di tanah tersebut. Secara umum persamaan neraca air dirumuskan sebagai berikut:

$$I = O \pm DS \quad (2.42)$$

Dimana:

I = masukan (*inflow*)

O = keluaran (*outflow*)

Yang dimaksud dengan masukan adalah semua air yang masuk kedalam sistem (sungai), sedangkan keluaran adalah semua air yang keluar dari sistem (sungai). Perubahan tampungan adalah perbedaan antara jumlah semua kandungan air (dalam berbagai sub sistem) dalam satu unit waktu yang ditinjau, yaitu antara waktu terjadinya masukan dan waktu terjadinya keluaran.

Persamaan ini tidak dapat dipisahkan dari konsep dasar yang lainnya (siklus hidrologi) karena hakikatnya, masukan dalam sub sistem yang ada, adalah keluaran dari sub sistem yang lain dalam siklus tersebut.

Neraca air lahan metode *Thorntwaite* dan *Mather* (1957) adalah neraca air yang dalam pelaksanaannya dilapangan disesuaikan dengan tingkat kebutuhan dan ketersediaan data klimatologi. Beberapa komponen yang dibutuhkan saat menghitung

menggunakan neraca air yaitu hujan, evapotranspirasi potensial, evapotranspirasi aktual yang nantinya akan menghasilkan ketersediaan air tanah yang surplus atau defisit. Berikut penjelasan masing-masing komponen neraca air lahan metode *Thornthwaite Mather*:

1. Suhu Udara

Suhu udara disebut sebagai ukuran derajat panas udara. Suhu udara umumnya diukur dengan skala tertentu menggunakan thermometer. Beberapa faktor yang bisa mempengaruhi suhu udara adalah : tinggi tempat (elevasi), daratan atau lautan, radiasi matahari, sudut datang sinar matahari, dan angin.

Data suhu berasal dari suhu rata-rata harian, bulanan, dan tahunan. Pengertian masing-masing adalah sebagai berikut:

2. Suhu rata-rata harian, yaitu dengan:

- a. Menjumlahkan suhu maksimum dan minimum hari tersebut, selanjutnya dibagi dua.
- b. Mencatat suhu setiap jam pada hari tersebut selanjutnya dibagi 24 (faktor waktu 24 jam).
- c. Suhu rata-rata bulanan, yaitu dengan menjumlahkan suhu rata-rata harian selanjutnya dibagi 30 (faktor waktu 30 hari dalam satu bulan).
- d. Suhu rata-rata tahunan, yaitu dengan menjumlahkan suhu rata-rata bulanan selanjutnya dibagi 12 (faktor waktu 12 bulan dalam satu tahun).
- e. Suhu normal adalah angka rata-rata suhu yang diambil dalam waktu 30 tahun.

Indonesia memiliki permasalahan yaitu tidak setiap stasiun hujan memiliki data suhu udara. Untuk mengatasi hal tersebut dapat dilakukan pendugaan suhu udara dari stasiun terdekat dengan mempertimbangkan faktor perbedaan tinggi tempat (elevasi). Untuk penyesuaian ini digunakan cara *Mock* (1973).

2.34 Limpasan dan Penyimpanan Air Tanah

a. Koefisien infiltrasi (i)

Koefisien infiltrasi diperlirakan berdasarkan kondisi porositas tanah serta kemiringan daerah pengaliran. Lahan yang mempunyai porous misalnya pasir halus mempunyai infiltrasi lebih tinggi dibandingkan tanah lempung. Lahan terjal dimana air tidak sempat infiltrasi ke dalam tanah maka koefisien infiltrasi akan kecil. Batasan koefisien infiltrasi adalah 0,00 - 1,00.

b. Penyimpanan air tanah (*Groundwater Storage*)

Pada permulaan simulasi harus ditentukan penyimpanan awal (*initial storage*) yang

besarnya tergantung dari kondisi geologi setempat dan waktu. Sebagai contoh: dalam daerah pengaliran kecil yang mana kondisi geologi lapisan bawah adalah tidak tembus air dan mungkin tidak ada air di sungai pada musim kemarau, maka penyimpanan air tanah menjadi nol. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$V_n = k \times V_n + \frac{1}{2} \times (1+k) \times i_n \quad (2.43)$$

$$DV_n = V_n - V_{n-1} \quad (2.44)$$

Keterangan:

V_n = volume air tanah bulan ke n

V_{n-1} = volume air tanah bulan ke n-1

k = faktor resesi aliran air tanah

i_n = infiltrasi bulan ke n

DV_n = perubahan volume aliran air tanah

Faktor resesi air tanah (k) adalah 0 - 1. Harga k yang tinggi akan memberikan resesi yang lambat seperti pada kondisi geologi lapisan bawah yang sangat lulus air (*permeable*).

c. Limpasan (*Runoff*)

Aliran dasar = infiltrasi dikurangi perubahan volume aliran dalam tanah

Limpasan langsung = kelebihan air (water surplus) - infiltrasi

Limpasan = aliran dasar + limpasan langsung

Debit andalan = aliran sungai dinyatakan dalam m³/bulan

Langkah-langkah perhitungan debit adalah sebagai berikut:

Mempersiapkan data-data yang diperlukan, antara lain rerata hujan daerah (P), evapotranspirasi potensial (Eto), jumlah hari hujan (n), faktor resesi aliran air tanah (k), dan angka koefisien infiltrasi (i).

1. Menentukan evapotranspirasi terbatas.
2. Menentukan besar hujan di permukaan tanah (Ds).
3. Menentukan harga kelembaban tanah (SMC).
4. Menentukan infiltrasi (i), dengan koefisien antara 0 - 1,00.
5. Menentukan air lebih tanah (*water surplus*).
6. Menentukan kandungan air bawah tanah (V_n).
7. Menentukan perubahan kandungan air bawah tanah (DV_n).
8. Menentukan aliran dasar dan aliran langsung.

9. Menentukan debit yang tersedia di sungai.

2.35 Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air irigasi adalah jumlah volume air yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan evapotranspirasi, kehilangan air, kebutuhan air untuk tanaman dengan memperhatikan jumlah air yang tersedia dari alam melalui hujan dan kontribusi air tanah. Kebutuhan air untuk tanaman pada suatu jaringan irigasi merupakan air yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman yang optimal tanpa adanya kekurangan air yang dinyatakan dalam Netto Kebutuhan Air Lapangan (*Net Field Requirement* atau NFR). Kebutuhan air sawah dinyatakan dalam mm/hari atau liter/detik/hari dan ditentukan oleh faktor-faktor sebagai berikut:

1. Penyiapan lahan.
2. Penggunaan konsumtif.
3. Perkolasi dan rembesan.
4. Curah hujan efektif.
5. Pergantian lapisan air.

Untuk mencari besarnya air yang dibutuhkan digunakan rumus:

$$DR = \frac{NFR}{e \times 8,64} \quad (2.45)$$

$$NFR = Etc + P + WLR - Re \quad (2.46)$$

Dimana:

DR= *Devertion Requirement* (Besarnya Kebutuhan Penyadapan dari Sumber)

NFR= *Net Field Requirement* (Kebutuhan Bersih Air di Sawah)

Etc = Evaporasi Konsumtif (Evaporasi Tanaman)

Mengantisipasi ketersediaan air yang semakin terbatas maka perlu dicari terus cara budidaya tanaman padi yang mengarah pada penghematan konsumsi air. Cara pemberian air terputus / berkala (*intermittent irrigation*) memang terbukti efektif di lapangan dalam usaha hemat air, namun mengandung kelemahan dalam membatasi pertumbuhan rumput. Beberapa metode lain salahsatunya metode “*System of Rice Intensification (SRI)*” yang ditawarkan dapat dipertimbangkan. Sistem pemberian air terputus/berkala sesuai untuk daerah dengan debit tersedia aktual lebih rendah dari debit andalan 80 %.

Untuk tujuan-tujuan perencanaan, dianggap bahwa seperlima sampai seperempat dari jumlah air yang diambil akan hilang sebelum air itu sampai di sawah. Kehilangan

ini disebabkan oleh kegiatan eksploitasi, evaporasi dan perembesan. Kehilangan akibat evaporasi dan perembesan umumnya kecil saja jika dibandingkan dengan jumlah kehilangan akibat kegiatan eksploitasi. Penghitungan rembesan hanya dilakukan apabila kelulusan tanah cukup tinggi.

2.36 Sifat Hidraulik Tanah

Akifer mempunyai fungsi ganda yaitu sebagai media untuk tampungan (*storage function*) dan media untuk mengalirkan air (*conduit function*). Hal ini dimungkinkan karena tanah tidak hanya terdiri dari bahan padat saja, akan tetapi mengandung bukaan (*opening*) yang berisi udara dan air. Bukaan tersebut berperan sebagai ruang-ruang tampungan dan jaringan saluran. Bentuk, ukuran, distribusi dan hubungan antar bukaan bervariasi sangat luas. Bukaan tersebut terdapat disebabkan oleh tiga hal, masing-masing:

1. Pori-pori yang terbentuk antar butir tanah (*primary porosity*).
2. Retak (*fractures*) maupun joints dalam batuan (*secondary porosity*).
3. Saluran yang terbentuk karena proses kimia, seperti di daerah kapur (*secondary porosity*).

$$p = \frac{V_p}{V} \quad (2.47)$$

Dengan:

p = cairan (m^3)

V_p = volume pori (cm^3)

V = volume batuan (m^3)

Bidang tertentu y_s ditafsirkan sebagai:

$$y_s = \frac{V_y}{V} \quad (2.48)$$

Dan retensi-spesifik R_s , ditafsirkan sebagai:

$$R_s = \frac{V_r}{V} \quad (2.49)$$

Dengan:

y_s = bidang tertentu (*specific yield*) (m)

V_y = volume air yang dapat diatus (*drained*) (m^3)

V_r = volume air tertekan (m^3)

V = volume batuan (m^3)

2.37 Aliran Air Tanah

Prinsip aliran air dalam akifer didasarkan pada hukum *Darcy* (*Darcy's law*) yang dapat dijelaskan dengan Gambar 2.20. Dalam percobaan yang dilakukan beberapa kali *Darcy* sampai pada kesimpulan bahwa debit aliran dalam lapisan kenyang air tersebut (*sample*) berbanding lurus dengan luas penampang, perbedaan tinggi dan koefisien permeabilitas, serta berbanding terbalik dengan panjang lintasan, yang dinyatakan dalam persamaan:

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L} = KA \frac{hL}{L} \quad (2.50)$$

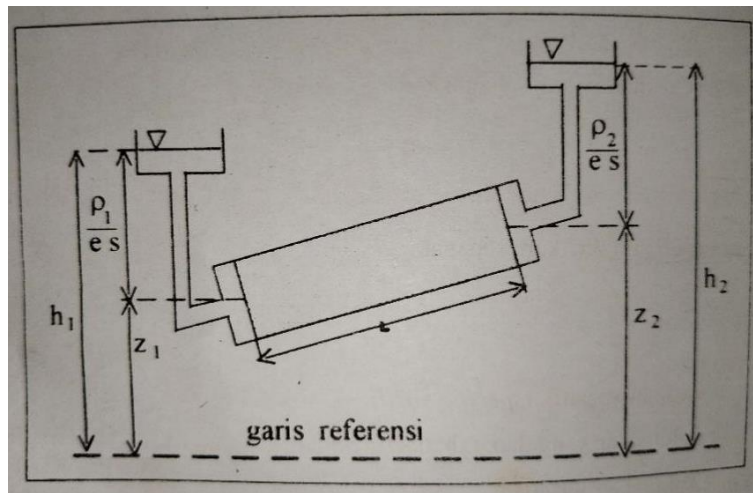
Dengan:

Q = debit (m³)

K= koefisien permeabilitas (m/s)

A= luas penampang (m²)

L= panjang lintasan (m/s)



Gambar 2.20 Prinsip Aliran Air Tanah

Sumber: Sri Harto Br, 2009

Ditakrifkan h_1 adalah $(z_1 + \frac{p_1}{\rho g})$ yaitu jumlah tinggi-elevasi (*elevation head*) dan tinggi tekanan (*pressure head*), demikian pula h_2 dengan $(z_2 + \frac{p_2}{\rho g})$ dengan z tinggi dari sebarang referansi, p tekanan air, ρ kerapatan air dan g percepatan gravitasi. Apabila $(h_2 - h_1)$ sama dengan $-h_L$ maka debit-spesifik (*specific discharge*) sesuai dengan arah alirannya:

$$v = -\frac{Q}{A} = -K \frac{hL}{L} \quad (2.51)$$

dan secara umum hukum *Darcy* dinyatakan sebagai:

$$v = -K \frac{hL}{dL} \quad (2.52)$$

dengan: $\frac{dh}{dL}$ = gradien hidraulik (*hydraulic gradient*)

dengan demikian maka koefisien permeabilitas:

$$K = \frac{Q}{A \left[\frac{dh}{dL} \right]} \quad (2.53)$$

Memperhatikan persamaan 2.54 persamaan dasar kecepatan aliran untuk arah x, y, dan z dalam media isotropic dapat disajikan dalam bentuk:

$$v_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} ; v_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} ; v_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.54)$$

Untuk dapat menyelesaikan masalah air tanah selain persamaan tersebut masih diperlukan persamaan kontinuitas (*continuity equation*). Dengan memperhatikan elemen aliran ke tiga arah sumbu (x,y,z) dan memperhatikan prinsip konvergensi, maka jumlah kehilangan massa ke tiga arah harus sama dengan nol. Dengan demikian akan diperoleh persamaan:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = () \quad (2.55)$$

Persamaan 2.55 ini selanjutnya disebut persamaan kontinuitas (*continuity equation*). Apabila persamaan Darcy 2.52 di masukkan ke dalam persamaan 2.56 akan dihasilkan:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial h}{\partial z^2} = () \quad (2.56)$$

Untuk aliran ke satu arah, persamaan 2.57 dapat di ubah menjadi:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = () \quad (2.57)$$

2.38 Banjir

Banjir merupakan peristiwa dimana daratan yang biasanya kering (bukan daerah rawa) menjadi tergenang oleh air, hal ini disebabkan oleh curah hujan yang tinggi dan kondisi topografi wilayah berupa dataran rendah hingga cekung. Selain itu terjadinya banjir juga dapat disebabkan oleh limpasan air permukaan (*runoff*) yang meluap dan volumenya melebihi kapasitas pengaliran sistem drainase atau sistem aliran sungai. Terjadinya bencana banjir juga disebabkan oleh rendahnya kemampuan infiltrasi tanah, sehingga menyebabkan tanah tidak mampu lagi menyerap air. Banjir dapat terjadi akibat naiknya permukaan air lantaran curah hujan yang diatas normal, perubahan suhu, tanggul/bendungan yang bobol, terhambatnya aliran air di tempat lain.

Banjir terjadi disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu faktor alam dan faktor manusia. Dari faktor alam, antara lain disebabkan oleh intensitas curah hujan yang

tinggi, sedimentasi di sepanjang aliran sungai, luas daerah tangkapan sungai, dan morfologi sungai. Sedangkan dari faktor manusia, antara lain disebabkan oleh penebangan hutan secara besar-besaran, perubahan daerah resapan menjadi daerah pemukiman, perawatan sistem drainase kurang baik, dan seringkali masyarakat membuang sampah tidak pada tempatnya.

Permasalahan banjir pada beberapa kota di Indonesia ini sudah ada sejak lama dan seringkali menjadi bencana yang merugikan berbagai pihak. Banjir yang terjadi telah mengakibatkan kerugian yang besar pada wilayah yang terkena dampak banjir. Kerugian mencakup kerugian fisik maupun non fisik. Kerugian fisik meliputi kerusakan infrastruktur seperti jalan raya, prasarana pendidikan seperti bangunan sekolah, pemukiman penduduk, serta lahan-lahan pertanian. Kerugian non fisik berupa munculnya korban jiwa dan terganggunya aktivitas kehidupan manusia seperti terputusnya jalur lalu lintas, terganggunya kegiatan perdagangan, dan lain-lain.

2.38.1 Jenis Banjir

Pada dasarnya banjir sendiri terdiri dari beberapa jenis antara lain sebagai berikut:

1. Banjir Kiriman

Banjir kiriman merupakan banjir yang paling membayakan dan seringkali membawa korban yang cukup besar, hal ini disebabkan khususnya dari pendeknya sungai dan kemiringan yang cukup terjal, dikarenakan kondisi topografi kota Semarang yang unik sehingga air akan dengan cepat mengalir kebawah dan sering mengakibatkan banjir di bawah. Hal ini sering terjadi pada daerah yang berada didaerah cekungan.

2. Banjir Genangan

Banjir genangan adalah banjir yang paling sering terjadi di kota Semarang, hal ini dapat di lihat pada waktu hujan lokal terjadi cukup deras. Saluran atau drainase yang ada tidak akan mampu untuk mengalirkan air kelaut dengan cepat, mengingat selisih peil antar saluran dalam kota dengan peil pantai terlalu kecil. Disamping itu kemampuan sungai didalam kota sudah sangat minim untuk menampung volume air hujan. Banjir ini biasanya mempunyai ketinggian genangan antara 0,2 – 0,7 m, lama genangan antara 1-8 jam. Seringkali terjadi pada dataran rendah.

3. Banjir Pasang (Rob)

Banjir pasang merupakan banjir rutin akibat laut pasang yang terjadi pada wilayah tepi pantai. Banjir ini terjadi setiap hari bahkan dalam sehari terkadang terjadi dua kali pasang surut. Ketinggian genangan antara 0,2 sampai 0,7 m, lama genangan

antara 3 sampai 6 jam.

2.38.2 Penyebab Banjir

Penyebab terjadinya banjir ada yang bersifat alamiah dan adanya pengaruh manusia yang bermukim dan melakukan kegiatan di daerah aliran sungai (DAS) baik hulu, tengah maupun hilir. Yang sering terjadi di daerah perkotaan adalah masalah genangan dengan permasalahan drainasenya. Hal ini disebabkan karena:

1. Daerah yang tadinya merupakan tempat air sementara (retarding basin) telah berubah menjadi perumahan atau lokasi permukiman. Tempat-tempat seperti itu misalnya rawa, situ, sawah, bantaran sungai yang digunakan untuk bermukim sehingga menjadi suatu masalah.
2. Tidak tersedianya tempat pembuangan sampah atau ketidak pedulian masyarakat dalam hal membuang sampah ke dalam saluran dan sungai-sungai turut pula memberi andil sebagai penyebab terhambatnya fungsi drainase.
3. Penyedotan air tanah dalam (*deep well*) yang melebihi kemampuan pemulihan (*recharge*) menyebabkan penurunan muka tanah (*land subsidence*) di beberapa tempat yang di barengi dengan kejadian pasang surut pula menjadi penyebab terhambatnya fungsi drainase.

Ada beberapa penyebab banjir di wilayah perkotaan antara lain:

- a. Fasilitas pengendalian banjir belum memadai.
- b. Perilaku masyarakat dalam penggunaan lahan / ruang.
- c. Membuang sampah ke badan sungai dan saluran drainase.
- d. Penyedotan air tanah yang melebihi kapasitas, sehingga menimbulkan masalah penurunan permukaan tanah.
- e. Menempati atau membangun di daerah yang rawan banjir.

2.38.3 Faktor Penyebab Banjir

Penyebab banjir terdiri dari berbagai faktor adalah sebagai berikut:

1. Kondisi Alam

Letak geografis lahan yang berada didataran rendah, sehingga rawan genangan dan banjir. Terdapatnya hambatan aliran akibat geometri alur sungai seperti terjadinya meandering pertemuan antara anak sungai dengan induk sungainya yang tidak stream line. Kemiringan dasar sungai yang landai yang menyebabkan kapasitas pengaliran sungai relatif kecil.

2. Peristiwa Alam

Curah hujan yang tinggi pembendungan dimuara sungai akibat terjadinya pasang naik yang bersamaan dengan puncak banjir sungai. Terjadinya pasang air laut sehingga menimbulkan limpasan air sungai dan air laut. Terjadinya kenaikan muka air laut akibat pemanasan global.

3. Kegiatan Manusia

Aktivitas dan perilaku manusia yang tidak memperhatikan alam dan lingkungan mengakibatkan terjadinya perubahan tata guna lahan. Perubahan penggunaan lahan, terutama lahan non terbangun menjadi lahan terbangun memiliki dampak terhadap konservasi hidrologi wilayah tersebut.

Perubahan dari lansekap kosong (pertanian) menjadi kawasan yang penuh dengan bangunan fisik perkotaan akan mengurangi daerah resapan air sehingga menyebabkan air yang meresap ke dalam tanah makin kecil dan air larian (*tun off*) makin besar sehingga menyebabkan terjadinya erosi. Dengan terjadinya peningkatan erosi maka tingkat sedimentasi juga makin besar sehingga lambat laut akan meningkatkan resiko terjadinya banjir.

Hal-hal dibawah ini yang merupakan aktivitas dan perilaku manusia terhadap alam dan lingkungan yang dapat menyebabkan banjir adalah sebagai berikut:

- a. Pembangunan dan pemanfaatan daerah rendah yang sebenarnya rawan terhadap banjir untuk berbagai keperluan seperti daerah permukiman atau perkotaan, industri, perkantoran maupun pertanian mengakibatkan luas daerah retensi banjir alamiah semakin berkurang, sehingga besar debit banjir yang mengalir disungai semakin meningkat dan akhirnya dapat mengakibatkan banjir.
- b. Perubahan pada kondisi lahan antara lain dengan adanya penebangan hutan, pengembangan daerah pertanian, pengembangan permukiman, industri, pariwisata, dan sebagainya pada daerah aliran sungai baik di hulu, tengah maupun hilir.
- c. Sampah padat yang dibuang ke saluran dan sungai menimbulkan pendangkalan dan penyempitan alur serta menghambat aliran, hal itu banyak dijumpai hampir di seluruh sungai daerah perkotaan.
- d. Pembangunan sarana drainase pada daerah pertanian dan permukiman dilahan daratan rendah dengan tujuan mengeringkan lahan tersebut terhadap genangan local, menjadikan banjir disungai meningkat sekaligus memperkecil potensi lahan yang dikeringkan tersebut sebagai daerah retensi banjir.

2.38.4 Daerah Rawan Banjir

Daerah rawan banjir adalah daerah yang sering dilanda banjir. Daerah tersebut dapat diidentifikasi dengan menggunakan pendekatan geomorfologi khususnya aspek morfogenesis, karena kenampakan seperti teras sungai, tanggul alam, dataran banjir, rawa belakang, kipas aluvial, dan delta yang merupakan bentukan banjir yang berulang-ulang yang merupakan bentuk lahan detil yang mempunyai topografi datar.

2.38.5 Indikator Pengendalian Banjir

Untuk mengurangi besarnya kerugian akibat banjir, dapat dilakukan upaya pengendalian dengan bangunan (*structural method*) dan dengan pengaturan yang sifatnya tidak membuat bangunan fisik (*non structural method*). Pengendalian banjir secara struktural pada prinsipnya dilakukan dengan cara membangun struktur atau bangunan air yang dapat meningkatkan kapasitas pengaliran penampang sungai atau mengurangi debit banjir yang mengalir. Alternatif pengendalian banjir dipilih sesuai dengan situasi, kondisi dan kebijakan yang ada terutama menyangkut program penanganannya. Alternatif ini antara lainnya adalah mencegah meluapnya banjir sampai ketinggian tertentu dengan tanggul atau merendahkan elevasi muka air banjir dengan normalisasi atau sudetan.

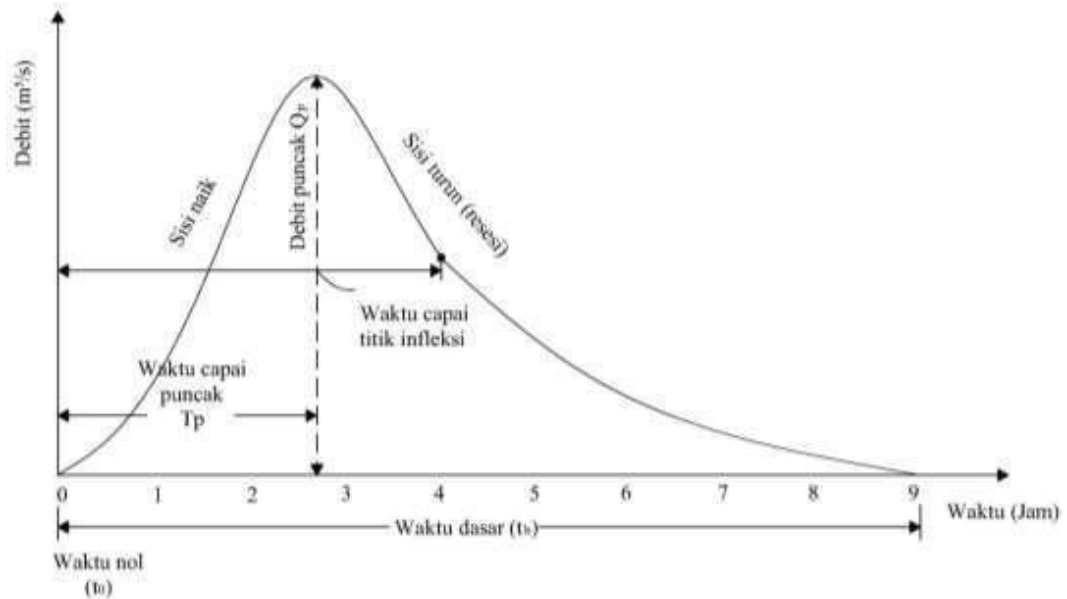
2.38.6 Penentuan Debit Banjir

Banjir rancangan adalah besarnya debit banjir kala ulang tertentu yang ditetapkan sebagai dasar penentuan kapasitas dan dimensi bangunan-bangunan hidraulik, sedemikian hingga kerusakan yang dapat ditimbulkannya baik langsung maupun tidak langsung oleh banjir tidak boleh terjadi selama besaran banjir tidak terlampaui.

Debit banjir rancangan idealnya didapatkan dengan cara hidrograf satuan bilamana tersedia pasangan data debit dan hujan yang cukup. Bila pasangan data debit dan hujan tidak tersedia, debit banjir rancangan bisa ditentukan dengan menggunakan hidrograf satuan sintetik yang diturunkan berdasarkan andaian transformasi hujan menjadi hidrograf ditentukan oleh beberapa parameter fisik DAS yang bisa diukur.

2.39 Hidrograf

Hidrograf adalah kurva yang memberi hubungan antara parameter aliran dapat berupa debit aliran atau muka air dengan waktu. Hidrograf terdiri dari sisi naik (*rising limb*), puncak (*peak*), dan sisi turun (*recession limb*), ditunjukkan oleh Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Komponen Hidrograf

Sumber: Triatmodjo (2008)

Aliran sungai terbagi menjadi limpasan langsung (*runoff*) dan aliran dasar (*base flow*). Menurut , limpasan langsung yang merupakan air hujan yang mengalir dalam bentuk lapisan tipis di atas permukaan akan masuk ke parit-parit dan selokan yang kemudian bergabung menjadi anak sungai dan akhirnya menjadi aliran sungai, sedangkan muka air tanah memiliki kemiringan yang sangat kecil dan aliran air searah dengan kemiringan tersebut menuju ke sungai sebagai aliran dasar.

Hidrograf satuan didefinisikan sebagai hidrograf limpasan langsung (tanpa aliran dasar) yang tercatat di ujung hilir DAS yang ditimbulkan oleh hujan efektif sebesar 1 mm yang terjadi secara merata di permukaan DAS dengan intensitas tetap dalam suatu durasi tertentu. Oleh karena itu perlu dilakukan pemisahan aliran sungai menjadi limpasan langsung dan aliran dasar. Di daerah yang tidak tersedia data hidrologi untuk menurunkan hidrograf satuan, maka dibuat Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) yang didasarkan pada karakteristik dari DAS. Penelitian ini menggunakan HSS Metode Nakayasu untuk menganalisis hidrograf banjir.

2.40 Metode Nakayasu

Metode Nakayasu dikembangkan di Jepang oleh Dr. Nakayasu pada tahun 1940. Metode Nakayasu merupakan salah satu metode yang sering digunakan pada DAS-DAS di Indonesia. Berikut persamaan-persamaan dan dari HSS Nakayasu.

$$Q_p = \frac{1}{36} \left(\frac{A R e}{0,3 T_p + T 0,3} \right) \quad (2.58)$$

$$T_p = t_g + 0,8 T_r \quad (2.59)$$

$$t_g = 0,4 + 0,058 L \quad \text{Untuk } L > 15 \text{ km} \quad (2.60)$$

$$t_g = 0,21 L^{0,7} \quad \text{Untuk } L < 15 \text{ km} \quad (2.61)$$

$$t_{0,3} = \alpha t_g \quad (2.62)$$

$$T_r = 0,5 t_g \text{ sampai } t_g \quad (2.63)$$

Keterangan:

Q_P : debit puncak banjir (m^3/s)

A : luas DAS (km^2)

R_e : curah hujan efektif (1 mm)

T_P : waktu dari permulaan banjir hingga puncak banjir (jam)

$T_{0,3}$: waktu dari puncak banjir hingga 0,3 kali Q_P (jam)

T_g : waktu konsentrasi (jam)

T_r : satuan waktu dari curah hujan (jam)

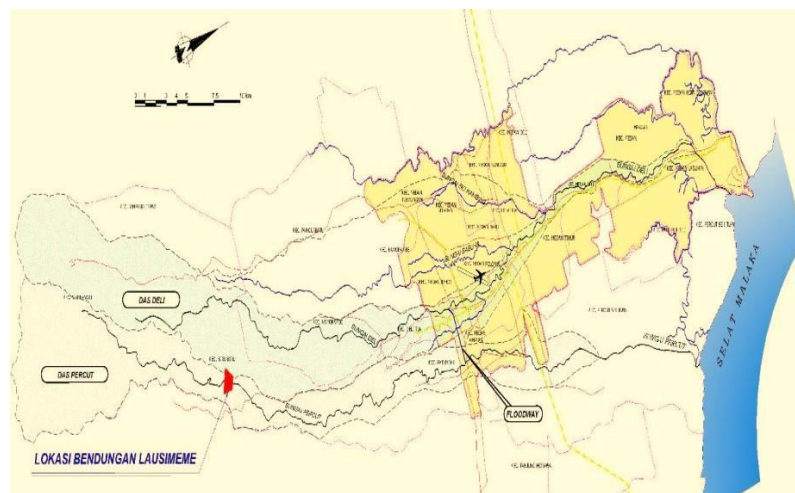
α : koefisien karakteristik DAS

L : panjang sungai utama (km)

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian pembangunan DAS, terletak di Desa Kuala Kecamatan Sibiru-biru Kabupaten Deli Serdang yang secara administratif terletak di Wilayah Kabupaten Deli Serdang Provinsi Sumatera Utara.



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian

Sumber: Proyek Pembangunan Bendungan Lausimeme

3.2 Pengumpulan Data

1. Data Primer

Data primer yang digunakan adalah: data dari BMKG. Data ini untuk curah hujan.

2. Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan adalah: data dari perusahaan. Data ini untuk debit banjir.

3.3 Waktu Penelitian

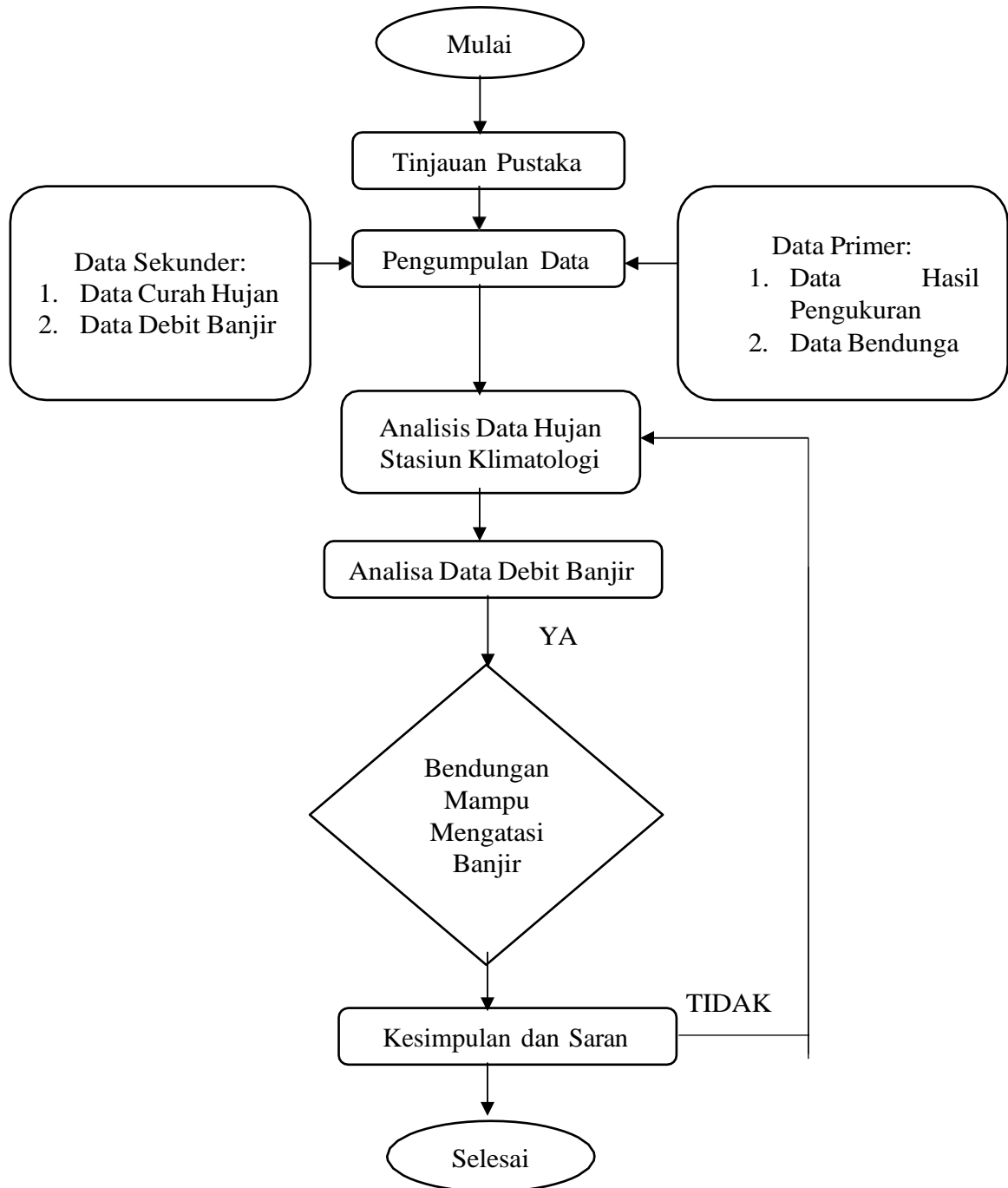
Waktu pelaksanaan penelitian akan dilaksanakan dalam waktu terhitung dari bulan Juni 2025 sampai November 2025.

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Juni	Juli	Agt	Sep	Okt	Nov
1	Pengajuan Judul	■					
2	Penyusunan Proposal dan Bimbingan		■	■			
3	Seminar Proposal				■		
4	Revisi Proposal					■	
5	Penyebaran Kuesioner					■	
6	Analisis dan Pengolahan Data					■	
7	Revisi						■
8	ACC						■
9	Seminar Hasil						■

3.4 Bagan Alir Penelitian

Tahap perhitungan dipresentasikan dengan menggunakan kerangka acuan dasar yang membentuk alur yang bertujuan menjadi pedoman dalam pelaksanaan perencanaan dalam perhitungan. Urutan analisis hidrologi pada bendungan Lau Simeme Kabupaten Deli Serdang Sumatera Utara.



Gambar 3. 2 Bagan Alir Penelitian

Pada Gambar 3.2 menjelaskan bahwa penelitian di mulai dari tinjauan Pustaka yaitu pengumpulan referensi dari jurnal-jurnal dan buku. Setelah mengumpulkan referensi di lanjut dengan pengumpulan data. Pengumpulan data digunakan ada 2 yaitu: data sekunder dan data primer. Data sekunder terdiri dari data curah hujan dan data debit banjir. Data primer terdiri dari data hasil pengukuran saluran dimensi dan data bendungan. Setelah pengumpulan data lanjut dengan menganalisis hidrologi yaitu

menghitung curah hujan dan debit banjir. Dalam analisis curah hujan dan debit banjir untuk mencari tahu bendungan mampu mengatasi banjir. Setelah selesai menganalisis data tersebut. Tahap selanjutnya adalah membuat kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perhitungan Curah Hujan Maksimum

Analisa Curah Hujan Penentuan luas pengaruh stasiun curah hujan dengan metode Aljabar karena metode ini didasarkan pada asumsi bahwa semua penakar hujan mempunyai pengaruh yang setara. Stasiun yang digunakan dalam hitungan ini adalah stasiun yang berada dalam DAS, tetapi stasiun yang berada di luar DAS yang masih berdekatan juga bisa diperhitungkan.

Berikut adalah perhitungan curah hujan rata-rata:

Tabel 4. 1 Analisa Curah Hujan Rata-Rata

Bulan/Tahun	2014	2015	2016	2017	2018
Januari	20	42	22	37	29
Februari	22	46	70	39	40
Maret	34	10	8	40	18
April	30	12	9	43	67
Mei	45	39	40	22	35
Juni	48	11	41	63	42
Juli	33	86	49	32	62
Agustus	90	50	54	31	29
September	65	52	84	33	55
Oktober	40	76	46	83	147
November	56	90	27	64	75
Desember	165	43	33	134	105
Rmax	165	90	84	134	147

(Sumber: Data BMKG selama 10 Tahun)

Tabel 4. 2 Analisa Curah Hujan Rata-Rata (Sambungan)

Bulan/Tahun	2019	2020	2021	2022	2023
Januari	26	146	103	26	42
Februari	19	56	12	97	6
Maret	9	15	18	117	41
April	45	67	25	46	24
Mei	159	85	35	101	160
Juni	21	57	45	132	34
Juli	31	79	52	42	28
Agustus	65	91	104	70	76
September	102	40	80	68	63
Oktober	69	44	89	74	52
November	50	27	124	111	42
Desember	54	74	52	71	94
Rmax	159	146	124	132	160

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Pada Tabel 4.1 menjelaskan bahwa data hasil analisis yang dimana data di ambil dari situs resmi BMKG. Data di ambil di mulai dari tahun 2014 sampai tahun 2023. Setelah data di ambil dari situs BMKG. Data di olah dengan menggunakan Excel.

Tabel 4. 3 Perhitungan Pengukuran Dispersi

No	Tahun	Curah Hujan Maksimum (MM)	$(X_i - X)$	$(X_i - X)^2$	$(X_i - X)^3$	$(X_i - X)^4$
1	2014	165	30.900	954.810	29503.629	911662.136
2	2015	90	-44.100	1944.810	-85766.121	3782285.936
3	2016	84	-50.100	2510.010	-12575.501	6300150.200
4	2017	134	-0.100	0.010	-0.001	0.000
5	2018	147	12.900	166.410	2146.689	27692.288
6	2019	159	24.900	620.010	15438.249	384412.400
7	2020	146	11.900	141.610	1685.159	20053.392
8	2021	124	-10.100	102.010	-1030.301	10406.040

Tabel 4. 4 Perhitungan Pengukuran Dispersi (Sambungan)

No	Tahun	Curah Hujan Maksimum (MM)	(Xi - X)	(Xi - X) ²	(Xi - X) ³	(Xi - X) ⁴
9	2022	132	-2.100	4.410	-9.261	19.448
10	2023	160	25.900	670.810	17373.979	449986.056
ΣX		1341	0.000	7114.900	-146409.480	11886667.897

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Pada Tabel 4.2 menjelaskan bahwa hasil analisa curah hujan dengan metode Gumbel di mulai dari tahun 2014 dengan hasil $X = 165$ sampai tahun 2023 $X = 160$ dengan rata-rata 1341. Dari tahun 2014 sampai 2023 dengan X_i sama yaitu 134.100 dengan rata-rata 134.100. Setelah X dan X_i sudah dapat kemudian $X_i - X$ dengan hasil rata-rata 0.000. Nilai rata-rata $X_i - X^2$ dari tahun 2014 sampai 2023 yaitu 7114.900. Untuk nilai rata-rata $X_i - X^3$ yaitu -146409.480. dan untuk nilai rata-rata $X_i - X^4$ yaitu 11886667.897.

4.2 Distribusi Gumbel

Data curah hujan yang digunakan untuk perhitungan curah hujan rencana dengan metode Gumbel yaitu data curah hujan rata-rata, dengan langkah-langkah sebagai berikut:

Hujan rata-rata = 7114.900

Jumlah data= 10 Tahun

Berapa standar deviasi?

$$S = \frac{7114.900}{(10-1)}$$

$$S = \frac{7114.900}{9}$$

S= 28.117 m³/det

Pada perhitungan di atas untuk mencari standar deviasi. Dari data hujan rata-rata 7114.900 dibagi dengan jumlah data 10 tahun. Jumlah data 10 tahun dikurang dengan 1 hasilnya 9. Jadi data hujan rata-rata 7114.900 di bagi dengan 9. Hasilnya adalah 28.117 m³/det.

Tabel 4. 5 Analisa Curah Hujan Dengan Metode Gumbel

No	Tahun	X	Xi	(Xi - X)	(Xi - X) ²
1	2014	165	134.100	30.900	954.810
2	2015	90	134.100	-44.100	1944.810
3	2016	84	134.100	-50.100	2510.010
4	2017	134	134.100	-0.100	0.010
5	2018	147	134.100	12.900	166.410
6	2019	159	134.100	24.900	620.010
7	2020	146	134.100	11.900	141.610
8	2021	124	134.100	-10.100	102.010
9	2022	132	134.100	-2.100	4.410
10	2023	160	134.100	25.900	670.810
ΣX		1341	134.100	0.000	7114.900

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Pada Tabel 4.3 menjelaskan bahwa hasil analisa curah hujan dengan metode Gumbel di mulai dari tahun 2014 dengan hasil $X = 165$ sampai tahun 2023 $X = 160$ dengan rata-rata 1341. Dari tahun 2014 sampai 2023 dengan X_i sama yaitu 134.100 dengan rata-rata 134.100. Setelah X dan X_i sudah dapat kemudian $X_i - X$ dengan hasil rata-rata 0.000. Nilai rata-rata $X_i - X^2$ dari tahun 2014 sampai 2023 yaitu 7114.900.

Setelah didapatkan deviasi standar (S), maka tahap selanjutnya adalah menghitung koefisien skewness dengan persamaan berikut:

$$C_s = S (X - X_{rata-rata})^3 \times n / (n-1) \cdot (n-2) \cdot S^3$$

$$C_s = \frac{-146409.480 \times 10.000}{(10-1) \times (10-2) \times (28.117)^3}$$

$$C_s = \frac{-1464094.800}{9 \times 8 \times 22227.44}$$

$$C_s = -0.915$$

Pada perhitungan koefisien skewness. Nilai rata-rata curah hujan -146409.480 di kali dengan jumlah data 10 tahun yaitu 10.000 di bagi dengan jumlah data 10 tahun di kurang 1 di kali jumlah data 10 tahun di kurang 2 di kali dengan nilai S pangkat 3. Hasilnya adalah -0.915.

Setelah menghitung koefisien skewness, maka tahap selanjutnya adalah menghitung koefisien kurtosis dengan persamaan berikut:

$$C_k = [1/n \cdot S (X - X_{rata-rata})^4] / S^4$$

$$Ck = \frac{0.100 \times 1188666.790}{624960.5186}$$

$$Ck = \frac{1188666.790}{624960.5186}$$

$$Ck = 1.902$$

Pada perhitungan koefisien kurtosis. Jumlah data hujan 10 tahun di kurang 1 dengan hasil 0.100 di kali dengan nilai rata-rata curah hujan pangkat 4 dengan hasil 1188666.790 di bagi nilai S pangkat 4 dengan hasil 624960.5186. Jadi hasil perhitungan koefisien kurtosis adalah 1.902

Setelah menghitung koefisien kurtosis, maka tahap selanjutnya adalah menghitung koefisien variasi dengan persamaan berikut:

$$Cv = \frac{S}{X_{rata-rata}}$$

$$Cv = \frac{28.117}{134.100}$$

$$Cv = 0.210$$

Pada perhitungan koefisien variasi. Nilai S yaitu 28.117 di bagi dengan nilai rata-rata curah hujan yaitu 134.100. Jadi hasilnya adalah 0.210.

Tabel 4. 6 Parameter Statistik Metode Distribusi Gumbel

Kala Ulang	X	S	Sn	Y _T	Y _n	Curah Hujan
2	134.100	28.117	0.9496	0.36651	0.4952	130.290
5	134.100	28.117	0.9496	1.99400	0.4952	178.478
10	134.100	28.117	0.9496	2.25037	0.4952	186.069
25	134.100	28.117	0.9496	3.12548	0.4952	211.980
50	134.100	28.117	0.9496	3.90194	0.4952	234.970
75	134.100	28.117	0.9496	4.25104	0.4952	245.306
100	134.100	28.117	0.9496	4.60015	0.4952	255.643

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

4.3 Distribusi Log Normal

Perhitungan curah hujan rencana menggunakan metode Distribusi Log Normal dapat dilakukan setelah mengetahui nilai; logaritmik curah hujan maksimum rata-rata (Log X).

$$\text{Log } X = 21.174$$

Jumlah data (n) = 10 tahun

Berapa nilai logaritmik curah hujan maksimum rata-rata (Log X)?

$$\text{Log } X = \frac{\text{Log } X}{n}$$

$$\text{Log } X = \frac{21.174}{10}$$

$$\text{Log } X = 2.1174$$

Pada perhitungan mencari nilai logaritmik curah hujan maksimum rata-rata. Log X yaitu 21.174 di bagi dengan jumlah data 10 tahun. Hasilnya adalah 2.1174.

Tabel 4. 7 Perhitungan Curah Hujan Rencana Distribusi Log Normal

No	Tahun	X	(Log X)	(Log Xi)	(X - X) ²	(X - X) ³
1	2014	165	2.217	2.117	0.010	0.0010
2	2015	90	1.954	2.117	0.027	-0.0043
3	2016	84	1.924	2.117	0.037	-0.0072
4	2017	134	2.127	2.117	0.000	0.0000
5	2018	147	2.167	2.117	0.002	0.0001
6	2019	159	2.201	2.117	0.007	0.0006
7	2020	146	2.164	2.117	0.002	0.0001
8	2021	124	2.093	2.117	0.001	0.0000
9	2022	132	2.121	2.117	0.000	0.0000
10	2023	160	2.204	2.117	0.008	0.0007
$\sum X$		1341	21.174	2.117	0.094	-0.0091

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

4.4 Metode Distribusi Log Pearson III

Perhitungan curah hujan rencana menggunakan Metode Distribusi Log Pearson III dapat dilakukan setelah mengetahui nilai S untuk menggunakan nilai Log X.

Curah hujan rata-rata = 0.094

Jumlah data (n) = 10 tahun

Berapa nilai S?

$$S = \frac{0.094}{10-1}$$

$$S = \frac{0.094}{9}$$

$$S = 0.102$$

Pada perhitungan mencari nilai S. Data curah hujan rata-rata di bagi dengan jumlah data 10 tahun di kurang 1. Data curah hujan rata-rata 0.094 dibagi 9. Hasilnya adalah 0.102.

Tabel 4. 8 Perhitungan Curah Hujan Rencana Log Pearson III

No	Tahun	X	(Log X)	Log Xt	(X - X) ²	(X - X) ³
1	2014	165	2.217	2.117	0.010	0.0010
2	2015	90	1.954	2.117	0.027	-0.0043
3	2016	84	1.924	2.117	0.037	-0.0072
4	2017	134	2.127	2.117	0.000	0.0000
5	2018	147	2.167	2.117	0.002	0.0001
6	2019	159	2.201	2.117	0.007	0.0006
7	2020	146	2.164	2.117	0.002	0.0001
8	2021	124	2.093	2.117	0.001	0.0000
9	2022	132	2.121	2.117	0.000	0.0000
10	2023	160	2.204	2.117	0.008	0.0007
ΣX		1341	21.174	2.117	0.094	-0.091

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Pada Tabel 4.8 menjelaskan bahwa data dari tahun 2014 dengan nilai X = 165 sampai tahun 2023 dengan nilai X = 160. Untuk nilai rata-rata X = 1341. Untuk nilai rata-rata Log x = 21.174. Nilai rata-rata Log Xt = 2.117. Nilai rata-rata X-X² = 0.094. Nilai rata-rata X-X³ = -0.091.

Menghitung koefisien kemencengan (G):

$$G = [S X-X \text{ rata-rata}^3 / (n-1) (n-2) s^3$$

$$G = \frac{\Sigma X - X_{\text{rata-rata}}^3}{(n-1) \times (n-2) \times s^3}$$

$$G = \frac{-0.0091}{(10-1) \times (10-2) \times (0.102)^3}$$

$$G = \frac{-0.0091}{0.0767} = -0.119$$

Pada perhitungan mencari koefisien kemencengan (G). Data curah hujan rata-rata dibagi dengan jumlah data. Yang dimana jumlah data 10 tahun. Data curah hujan rata-rata -0.091 di bagi dengan jumlah data 10 kurang 1 dikali dengan jumlah data 10 kurang 2 dikali dengan 0.102 pangkat 3. Hasilnya adalah -0.119.

4.5 Hasil Perhitungan Debit Banjir Metode Nakayasu

Perhitungan debit banjir rencana pada DAS Bendungan Lau Simeme dilakukan dengan menggunakan Metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu. Metode ini digunakan untuk memperkirakan besarnya debit banjir berdasarkan karakteristik daerah aliran sungai (DAS), curah hujan rencana, dan parameter hidrologi lainnya.

Metode Nakayasu banyak digunakan di Indonesia karena sesuai untuk DAS berukuran kecil hingga sedang serta memiliki data hidrologi terbatas.

4.5.1 Data Parameter DAS Lau Simeme

Parameter-parameter DAS yang digunakan dalam perhitungan debit banjir adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 9 Data Parameter DAS Lau Simeme

No	Uraian	Nilai
1	Luas DAS (A)	180 km ²
2	Panjang sungai utama (L)	27,5 km
3	Koefisien pengaliran (C)	0,50
4	Curah hujan satuan efektif (Ro)	1 mm

4.5.2 Perhitungan Parameter Hidrograf Nakayasu

1. Waktu Kelambatan (Tg)

Untuk panjang sungai utama $L > 15$ km, maka digunakan rumus:

$$Tg = 0,48 + 0,058L$$

$$Tg = 0,48 + (0,058 \times 27,5)$$

$$Tg = 0,48 + 1,595$$

$$Tg = 2,075 \text{ jam}$$

Jadi waktu kelambatan DAS Lau Simeme adalah 2,075 jam.

2. Lama Hujan Efektif (Tr)

Berdasarkan ketentuan metode Nakayasu:

$$Tr = 0,5$$

Dalam penelitian ini diambil:

$$Tr = 0,75Tg$$

$$Tr = 0,75 \times 2,075$$

$$Tr = 1,556 \text{ jam}$$

Jadi lama hujan efektif adalah 1,556 jam.

3. Waktu Puncak Hidrograf (Tp)

$$Tp = Tg + (0,8 \times Tr)$$

$$Tp = 2,075 + (0,8 \times 1,556)$$

$$Tp = 2,075 + 1,245$$

$$Tp = 3,320 \text{ jam}$$

Jadi waktu puncak banjir terjadi pada 3,320 jam setelah hujan efektif dimulai.

4. Waktu Penurunan Debit 30% ($T_{0,3}$)

Koefisien pembanding a berada antara 1,5–3,0. Dalam penelitian ini digunakan:

$$a = 2$$

Maka:

$$T_{0,3} = a \times Tg$$

$$T_{0,3} = 2 \times 2,075$$

$$T_{0,3} = 4,150 \text{ jam}$$

Jadi waktu penurunan debit menjadi 30% dari debit puncak adalah 4,150 jam.

4.5.3 Perhitungan Debit Puncak Hidrograf Satuan

Debit puncak hidrograf satuan dihitung dengan rumus:

$$Qp = \frac{C \times A \times Ro}{3,6(0,3Tp + T_{0,3})}$$

$$Qp = \frac{0,5 \times 180 \times 1}{3,6(0,3 \times 3,320 + 4,150)}$$

$$Qp = \frac{90}{3,6(0,996 + 4,150)}$$

$$Qp = \frac{90}{3,6(5,146)}$$

$$Qp = \frac{90}{18,526}$$

$$Qp = 4,819 \text{ m}^3/\text{det}$$

Jadi debit puncak hidrograf satuan Nakayasu sebesar 4,819 m³/det.

4.5.4 Perhitungan Base Flow

Aliran dasar diasumsikan sebesar 50% dari debit puncak hidrograf satuan.

$$Qb = 0,5 \times Qp$$

$$Qb = 0,5 \times 4,819$$

$$Qb = 2,410 \text{ m}^3/\text{det}$$

Jadi base flow DAS Lau Simeme adalah 2,410 m³/det.

4.5.5 Koordinat Hidrograf Banjir

Berdasarkan parameter di atas, pembagian kurva hidrograf adalah sebagai berikut:

1. Lengkung Naik

$$0 < t < T_p$$

$$0 < t < 3,320 \text{ jam}$$

2. Lengkung Turun I

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

$$3,320 \leq t \leq 7,470 \text{ jam}$$

3. Lengkung Turun II

$$(T_p + T_{0,3}) \leq t \leq (T_p + T_{0,3} + 1,5T_{0,3})$$

$$7,470 \leq t \leq 13,695 \text{ jam}$$

4. Lengkung Turun III

$$t > 13,695 \text{ jam}$$

4.5.6 Debit Banjir Menurut Periode Ulang

Tabel berikut menunjukkan hasil debit banjir rencana untuk beberapa kala ulang.

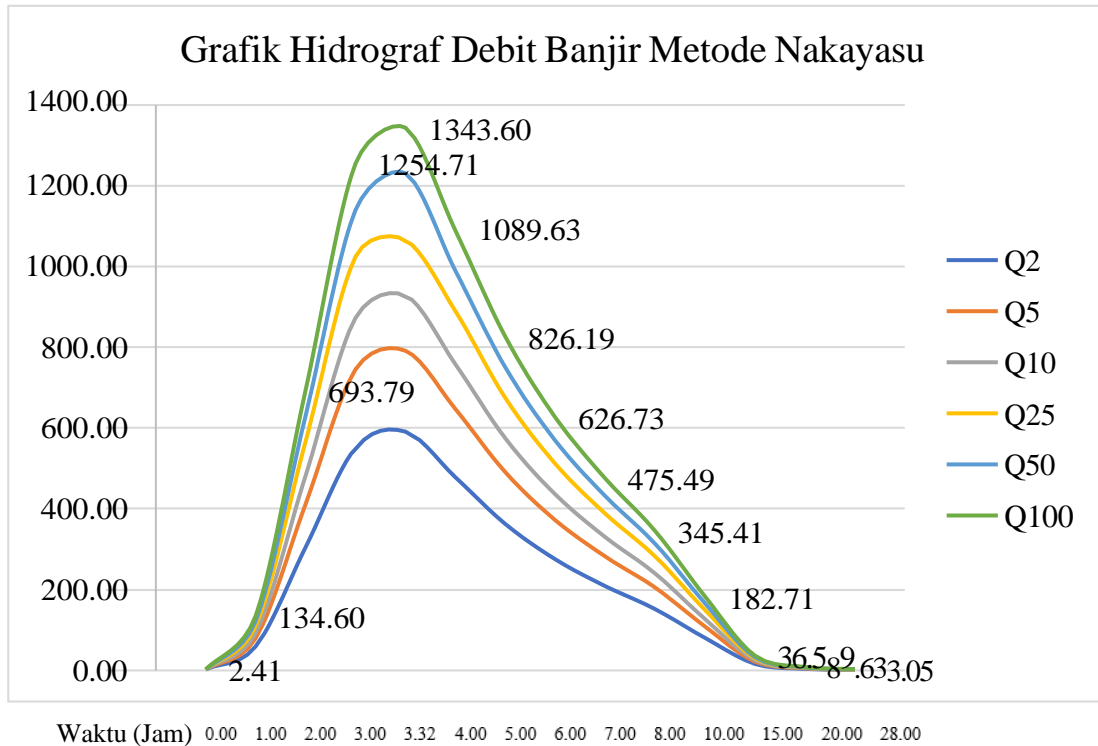
Tabel 4. 10 Debit Banjir Menurut Kala Ulang

Waktu (Jam)	2 Tahun	5 Tahun	10 Tahun	25 Tahun	50 Tahun	100 Tahun
0,00	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
1,00	59,16	79,24	92,51	109,55	122,13	134,60
2,00	304,88	411,51	481,81	566,80	630,55	693,79
3,00	550,39	744,97	872,62	1024,05	1139,81	1254,71
3,32	591,16	791,41	928,51	1065,80	1231,13	1343,60
4,00	478,23	647,33	758,27	889,79	990,11	1089,63
5,00	362,54	490,66	574,62	674,58	750,71	826,19
6,00	275,10	372,09	435,84	511,59	569,41	626,73
7,00	208,69	282,07	330,15	388,23	432,06	475,49
8,00	151,81	205,13	240,02	282,21	313,98	345,41
10,00	80,38	108,50	126,94	149,42	166,16	182,71
15,00	16,14	21,69	25,34	29,95	33,29	36,59
20,00	3,85	5,11	5,95	7,11	7,87	8,63
28,00	1,43	1,83	2,11	2,56	2,80	3,05

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Berdasarkan hasil analisis metode Nakayasu, debit banjir rencana meningkat seiring bertambahnya kala ulang hujan. Debit puncak terjadi pada waktu 3,32 jam

setelah hujan efektif dimulai. Debit puncak untuk kala ulang 2 tahun sebesar 591,16 m³/det, sedangkan untuk kala ulang 100 tahun sebesar 1343,60 m³/det. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kala ulang hujan, maka semakin besar pula debit banjir yang harus dialirkan oleh sungai maupun bangunan pelimpah bendungan. Debit banjir kala ulang besar, terutama Q50 dan Q100, sangat penting digunakan sebagai dasar evaluasi kapasitas spillway pada Bendungan Lau Simeme agar bendungan tetap aman terhadap banjir rencana maupun banjir ekstrem.



Gambar 4. 1 Grafik Hidrograf Debit Banjir Metode Nakayasu

Berdasarkan Gambar 4.1, debit banjir rencana metode Nakayasu menunjukkan bahwa semakin besar kala ulang maka semakin tinggi debit puncak yang terjadi, dengan puncak tertinggi pada Q100 sebesar 1343,60 m³/det pada waktu sekitar 3,32 jam.

4.6 Hasil Perhitungan Dimensi Saluran

Bangunan pelimpah pada Bendungan Lau Simeme merupakan komponen utama yang berfungsi mengalirkan debit banjir dari waduk menuju sungai hilir secara aman, sehingga elevasi muka air waduk tetap berada dalam batas aman. Berdasarkan data teknis perencanaan, sistem pelimpah Bendungan Lau Simeme menggunakan tipe Side Channel Spillway yang diteruskan ke Chute Spillway, kemudian dilengkapi dengan kolam olak tipe USBR Type II sebagai peredam energi.

Pemilihan tipe pelimpah tersebut sangat sesuai dengan karakteristik bendungan urugan batu, karena air limpasan tidak diperbolehkan melewati tubuh bendungan. Dengan demikian, seluruh debit banjir dialirkan melalui bangunan pelimpah terpisah yang direncanakan secara hidraulik dan struktural.

4.6.1 Saluran Samping (Side Channel Spillway)

Saluran samping berfungsi menerima limpasan air dari mercu pelimpah dan mengalirkannya secara sejajar menuju saluran transisi. Pada tipe ini, arah aliran air sejajar dengan mercu sebelum dibelokkan menuju saluran peluncur.

Tabel 4. 11 Data Teknis Saluran Samping

Uraian	Nilai
Bentuk saluran	Persegi empat
Lebar dasar hulu	20 m
Lebar dasar hilir	30 m
Panjang saluran	75 m
Kemiringan dasar	1 : 18,75
Elevasi dasar hulu	+237,20 m
Elevasi dasar hilir	+233,20 m

Perhitungan Kemiringan Dasar

Selisih elevasi dasar:

$$\Delta H = 237,20 - 233,20 = 4,00 \text{ m}$$

Kemiringan saluran:

$$S = \frac{4,00}{75} = 0,0533$$

atau setara:

$$1: \frac{1}{0,0533} = 1: 18,75$$

Hasil ini sesuai dengan data teknis yang tersedia.

Lebar saluran bertambah dari 20 m menjadi 30 m. Hal ini menunjukkan bahwa debit aliran semakin besar sepanjang saluran akibat tambahan limpasan dari mercu pelimpah. Pelebaran saluran diperlukan agar kapasitas aliran tetap aman dan muka air tidak naik berlebihan.

4.6.2 Saluran Transisi

Saluran transisi berfungsi menghubungkan side channel dengan chute spillway. Pada bagian ini bentuk dan dimensi saluran diubah secara bertahap agar aliran menjadi stabil.

Tabel 4. 12 Data Teknis Saluran Transisi

Uraian	Nilai
Bentuk	Persegi empat
Lebar awal	30 m
Lebar akhir	25 m
Panjang	71,50 m
Kemiringan dasar	1 : 500
Elevasi dinding	+253,50 m

Perhitungan Penyempitan Saluran

Perubahan lebar:

$$\Delta B = 30 - 25 = 5 \text{ m}$$

Gradien penyempitan:

$$\frac{5}{71,50} = 0,0699$$

Artinya perubahan lebar dilakukan secara bertahap sehingga tidak menimbulkan turbulensi besar. Penyempitan saluran bertujuan mengarahkan aliran menuju chute spillway dengan kecepatan yang lebih seragam. Jika perubahan lebar terlalu mendadak, maka akan timbul pusaran air dan kehilangan energi besar.

4.6.3 Saluran Peluncur (Chute Spillway)

Chute spillway merupakan bagian utama bangunan pelimpah yang berfungsi membawa air dari elevasi atas menuju hilir dengan kemiringan curam.

Tabel 4. 13 Data Teknis Chute Spillway

Uraian	Nilai
Bentuk	Persegi empat
Lebar saluran	25 m
Panjang saluran	148,10 m
Kemiringan dasar	1 : 2,5
Elevasi dasar hulu	+234,26 m
Elevasi dasar hilir	+175,50 m

Perhitungan Selisih Elevasi

$$\Delta H = 234,26 - 175,50 = 58,76 \text{ m}$$

Perhitungan Kemiringan Aktual

$$S = \frac{58,76}{148,10} = 0,397$$

atau:

$$1: \frac{1}{0,397} = 1: 2,52$$

Nilai tersebut sangat dekat dengan data desain yaitu 1 : 2,5, sehingga data konsisten.

4.6.4 Estimasi Kecepatan Aliran pada Chute Spillway

Kecepatan aliran teoritis akibat beda tinggi dapat dihitung dengan persamaan energi:

$$V = \sqrt{2gH}$$

dengan:

- $g = 9,81 \text{ m/det}$
- $H = 58,76 \text{ m}$

$$V = \sqrt{2 \times 9,81 \times 58,76}$$

$$V = \sqrt{1152,87}$$

$$V = 33,95 \text{ m/det}$$

Kecepatan aktual di lapangan biasanya lebih kecil akibat gesekan dan kehilangan energi, sehingga berkisar 20–30 m/det. Nilai kecepatan tersebut menunjukkan bahwa aliran pada chute spillway bersifat superkritis, sehingga di ujung saluran wajib disediakan bangunan peredam energi.

4.6.5 Kapasitas Debit Chute Spillway

Dengan asumsi kedalaman aliran rata-rata 3,50 m, maka luas penampang aliran:

$$A = b \times h$$

$$A = 25 \times 3,50 = 87,50 \text{ m}^2$$

Jika kecepatan rata-rata diambil 25 m/det, maka debit:

$$Q = A \times V$$

$$Q = 87,50 \times 25$$

$$Q = 2.187,50 \text{ m}^3/\text{det}$$

Kapasitas ini menunjukkan spillway dirancang untuk melewatkan debit banjir besar, sesuai fungsi bendungan utama.

4.6.6 Kolam Olak (Stilling Basin)

Setelah air mengalir melalui chute spillway, energi aliran harus diredam agar tidak menyebabkan gerusan pada sungai hilir.

Tabel 4. 14 Data Teknis Kolam Olak

Uraian	Nilai
Tipe	USBR Type II
Panjang	60 m
Elevasi dasar	+175,50 m
Elevasi dasar sungai	+182,50 m
Elevasi dinding	+192,00 m

Kolam olah tipe USBR Type II digunakan untuk debit besar dengan aliran superkritis. Peredaman energi terjadi melalui hydraulic jump, yaitu perubahan aliran cepat menjadi aliran tenang.

Panjang kolam olah 60 m dinilai cukup untuk menstabilkan aliran sebelum masuk ke sungai.

4.6.7 Tinggi Air di Atas Mercu Spillway

Tabel 4. 15 Tinggi Air di Atas Mercu Spillway

Kondisi Debit	Tinggi Air
Q1000	3,24 m
QPMF	4,98 m

Pada debit banjir kala ulang 1000 tahun, tinggi muka air di atas mercu adalah 3,24 m. Sedangkan pada debit banjir maksimum probable maximum flood (PMF), tinggi air mencapai 4,98 m. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan pelimpah masih mampu melewati banjir ekstrem tanpa melimpas ke tubuh bendungan.

Berdasarkan hasil evaluasi dimensi bangunan pelimpah Bendungan Lau Simeme, dapat diketahui bahwa sistem pelimpah dirancang dengan kapasitas besar dan memenuhi syarat keamanan hidraulik. Kombinasi side channel, saluran transisi, chute spillway, dan kolam olah merupakan sistem yang umum digunakan pada bendungan urugan batu.

Kemiringan chute spillway sebesar 1 : 2,5 menghasilkan percepatan aliran tinggi, sehingga penggunaan kolam olah USBR Type II menjadi sangat penting untuk

mencegah kerusakan di hilir. Selain itu, kapasitas spillway masih mampu mengalirkan debit banjir Q1000 maupun QPMF.

Dengan demikian, bangunan pelimpah Bendungan Lau Simeme dinilai memadai dari segi dimensi geometrik dan kemampuan hidraulik dalam menjaga keamanan bendungan.

4.7 Hasil Perhitungan Waduk

Waduk pada Bendungan Lau Simeme berfungsi sebagai tampungan air untuk pengendalian banjir, penyediaan air irigasi, air baku, serta potensi pembangkit listrik tenaga minihidro. Berdasarkan data teknis, bendungan ini membendung Sungai Percut dengan tipe bendungan urugan setinggi 77 m, panjang puncak 205 m, dan lebar puncak 11 m. Kapasitas tampungan normal waduk sebesar 28.000.000 m³ dengan luas genangan 246,80 hektar.

Selain itu, bendungan ini direncanakan mampu mengairi lahan pertanian seluas 3.267 hektar, mereduksi banjir sebesar 68,17 m³/det, serta menghasilkan energi listrik melalui PLTM sebesar 2,8 MW. Menurut Studi Potensi SDA Pada Bendungan Lau Simeme Kabupaten Deli Serdang untuk Pengendalian Banjir, Pengadaan Air Bersih dan PLTA, kebutuhan volume tampungan berdasarkan analisis mass curve adalah 88,431 juta m³, sedangkan kapasitas aktual waduk berdasarkan hubungan elevasi-luas-volume hanya 21,07 juta m³.

4.7.1 Data Dasar Waduk

Tabel 4. 16 Data Dasar Waduk

Uraian	Nilai
Kapasitas normal waduk	28,00 juta m ³
Kapasitas efektif aktual	21,07 juta m ³
Luas genangan	246,80 ha
Luas genangan	2.468.000 m ²
Tinggi bendungan	77 m
Potensi irigasi	3.267 ha
Reduksi banjir	68,17 m ³ /det
Potensi listrik	2,8 MW

4.7.2 Perhitungan Kedalaman Rata-rata Waduk

Kedalaman rata-rata waduk dapat diperkirakan dari hubungan volume terhadap luas genangan:

$$h = VA$$

dengan:

$$V = 28.000.000 \text{ m}^3$$

$$A = 2.468.000 \text{ m}^2$$

$$h = \frac{28.000.000}{2.468.000}$$

$$h = 11,35 \text{ m}$$

Jadi kedalaman rata-rata waduk adalah 11,35 meter.

Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun tinggi bendungan mencapai 77 m, kedalaman rata-rata genangan lebih kecil karena bentuk topografi lembah yang melebar ke arah hulu.

4.7.3 Evaluasi Kebutuhan Tampungan Waduk

Menurut hasil studi sebelumnya, kebutuhan volume tampungan agar seluruh kebutuhan air terpenuhi adalah:

$$V_k = 88,431 \text{ juta m}^3$$

Sedangkan kapasitas aktual waduk:

$$V_k = 21,07 \text{ juta m}^3$$

Selisih kekurangan tampungan:

$$\Delta V = 88,431 - 21,07$$

$$\Delta V = 67,361 \text{ juta m}^3$$

Persentase kapasitas aktual terhadap kebutuhan:

$$\% = \frac{21,07}{88,431} \times 100$$

$$\% = 23,83\%$$

Artinya kapasitas aktual waduk hanya mampu memenuhi sekitar 23,83% dari kebutuhan tampungan berdasarkan analisis mass curve. Hal ini menunjukkan bahwa waduk lebih difokuskan untuk pengendalian banjir, irigasi musiman, dan air baku, bukan sebagai tampungan tahunan penuh.

4.7.4 Estimasi Volume Efektif dan Dead Storage

Pada umumnya waduk memiliki tampungan mati (dead storage) sebesar 10%–20% dari kapasitas total untuk menampung sedimen. Jika diasumsikan 15% dari kapasitas normal:

$$Vd = 15\% \times 28.000.000$$

$$Vd = 4.200.000 \text{ m}^3$$

Maka tampungan efektif:

$$Ve = 28.000.000 - 4.200.000$$

$$Ve = 23.800.000 \text{ m}^3$$

Nilai ini mendekati kapasitas aktual sebesar 21,07 juta m³, sehingga dapat diasumsikan sebagian volume waduk telah dialokasikan sebagai tampungan mati dan ruang banjir.

4.7.5 Estimasi Laju Sedimentasi Waduk

Apabila volume efektif berkurang dari 28 juta m³ menjadi 21,07 juta m³ dalam periode 20 tahun, maka sedimentasi rata-rata:

$$Vs = 28 - 21,07 = 6,93 \text{ juta m}^3$$

Laju sedimentasi tahunan:

$$Ls = \frac{6,93}{20}$$

$$Ls = 0,347 \text{ juta m}^3/\text{tahun}$$

atau:

$$347.000 \text{ m}^3/\text{tahun}$$

Sedimentasi merupakan faktor penting yang dapat menurunkan kapasitas tampungan waduk dari tahun ke tahun, sehingga diperlukan pengelolaan DAS dan pengerukan berkala.

4.7.6 Potensi Irigasi Waduk

Luas layanan irigasi direncanakan:

$$A = 3.267 \text{ ha}$$

Jika kebutuhan air sawah rata-rata:

$$1 \text{ liter/det/ha}$$

Maka kebutuhan debit:

$$Q = 3.267 \times 1$$

$$Q = 3.267 \times 1$$

$$Q = 3,267 \text{ m}^3/\text{det}$$

Debit tersebut masih memungkinkan dipenuhi waduk secara bertahap sesuai pola tanam.

Berdasarkan hasil evaluasi, waduk Bendungan Lau Simeme memiliki kapasitas normal sebesar 28 juta m³ dengan luas genangan 246,80 hektar. Kedalaman rata-rata waduk sebesar 11,35 m menunjukkan bentuk lembah genangan yang cukup lebar.

Kapasitas aktual sebesar 21,07 juta m³ lebih kecil dibanding kebutuhan teoritis 88,431 juta m³. Hal ini menunjukkan bahwa waduk tidak dirancang sebagai tampungan multi-tahun penuh, melainkan lebih difokuskan pada fungsi pengendalian banjir, irigasi, dan suplai air baku.

Selain itu, potensi energi listrik sebesar 2,8 MW menunjukkan bahwa waduk juga memiliki manfaat tambahan sebagai sumber energi terbarukan. Dengan demikian, Bendungan Lau Simeme memiliki peranan strategis bagi wilayah Kabupaten Deli Serdang dan sekitarnya.

4.8 Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis hidrologi menggunakan Metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu, diperoleh bahwa debit banjir rencana pada DAS Bendungan Lau Simeme mengalami peningkatan seiring bertambahnya kala ulang hujan. Debit puncak terjadi pada waktu 3,32 jam setelah hujan efektif dimulai. Nilai debit puncak untuk kala ulang 2 tahun sebesar 591,16 m³/det, sedangkan untuk kala ulang 100 tahun mencapai 1.343,60 m³/det. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar periode ulang hujan, maka semakin besar pula limpasan permukaan yang harus dialirkan melalui sungai maupun bangunan pelimpah bendungan. Menurut Soemarto (1999), analisis debit banjir rencana diperlukan untuk menentukan kapasitas bangunan air agar mampu menahan kejadian banjir sesuai tingkat keamanan yang direncanakan.

Metode Nakayasu banyak digunakan dalam perencanaan bendungan di Indonesia karena sesuai untuk daerah aliran sungai yang memiliki keterbatasan data pengamatan debit. Suripin & Eng (2004) menjelaskan bahwa metode ini mampu menggambarkan hubungan antara karakteristik DAS dengan respon limpasan banjir melalui parameter luas DAS, panjang sungai, dan waktu konsentrasi. Pada penelitian ini, luas DAS Lau Simeme sebesar 180 km² dan panjang sungai utama 27,5 km, sehingga termasuk DAS menengah yang masih relevan dianalisis dengan metode Nakayasu. Bentuk hidrograf yang dihasilkan menunjukkan kenaikan debit yang cepat menuju puncak, kemudian menurun secara bertahap hingga mendekati base flow. Karakteristik tersebut umum terjadi pada DAS dengan lereng relatif curam dan respon limpasan cukup cepat.

Dari sisi bangunan pelimpah, hasil evaluasi menunjukkan bahwa Bendungan Lau Simeme menggunakan sistem Side Channel Spillway yang dilanjutkan dengan Chute Spillway dan kolam olak USBR Type II. Menurut USBR (1987), tipe pelimpah saluran samping sangat sesuai digunakan pada kondisi topografi sempit atau ketika ruang di

sekitar tubuh bendungan terbatas. Pemilihan tipe ini juga tepat karena Bendungan Lau Simeme merupakan bendungan urugan, sehingga limpasan air tidak boleh melewati tubuh bendungan secara langsung. Oleh karena itu, seluruh debit banjir dialirkan melalui bangunan pelimpah terpisah yang dirancang aman secara hidraulik.

Dimensi spillway menunjukkan kapasitas yang cukup besar. Saluran peluncur memiliki lebar 25 m, panjang 148,10 m, dan kemiringan dasar 1 : 2,5. Kemiringan curam tersebut menyebabkan aliran memiliki kecepatan tinggi. Berdasarkan perhitungan energi, kecepatan teoritis aliran dapat mencapai 33,95 m/det, sedangkan kecepatan aktual diperkirakan berkisar 20–30 m/det akibat kehilangan energi karena gesekan. Chow (1959) menyatakan bahwa aliran pada kemiringan curam umumnya berada dalam kondisi superkritis, sehingga diperlukan bangunan peredam energi di bagian hilir untuk mencegah gerusan dasar sungai. Oleh sebab itu, penggunaan kolam olak tipe USBR Type II pada Bendungan Lau Simeme dinilai sudah tepat.

Kapasitas spillway hasil estimasi sebesar 2.187,50 m³/det, lebih besar dibanding debit banjir rencana kala ulang 100 tahun sebesar 1.343,60 m³/det. Hal ini menunjukkan bahwa spillway masih memiliki cadangan kapasitas terhadap banjir rencana. Selain itu, tinggi muka air di atas mercu spillway sebesar 3,24 m pada kondisi Q1000 dan 4,98 m pada kondisi PMF (Probable Maximum Flood) menunjukkan bahwa bangunan pelimpah masih mampu melewatkan banjir ekstrem tanpa menyebabkan overtopping pada tubuh bendungan. Menurut ICOLD (2011), kemampuan bendungan melewatkan debit PMF merupakan salah satu indikator penting keselamatan bendungan besar.

Pada aspek tampungan waduk, Bendungan Lau Simeme memiliki kapasitas normal sebesar 28 juta m³ dengan luas genangan 246,80 hektar. Namun berdasarkan studi sebelumnya, kebutuhan tampungan agar seluruh kebutuhan air terpenuhi mencapai 88,431 juta m³, sedangkan kapasitas efektif aktual hanya sekitar 21,07 juta m³. Hal ini berarti kapasitas aktual baru memenuhi sekitar 23,83% dari kebutuhan teoritis. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa fungsi utama waduk lebih diarahkan pada pengendalian banjir, penyediaan air baku, irigasi musiman, dan pembangkit listrik tenaga mini hidro, bukan sebagai waduk tampungan tahunan skala besar.

Dari sisi manfaat, bendungan ini direncanakan mampu mengairi lahan pertanian seluas 3.267 hektar, mereduksi debit banjir sebesar 68,17 m³/det, serta memiliki potensi listrik sebesar 2,8 MW. Hal ini sejalan dengan konsep pembangunan bendungan multipurpose sebagaimana dijelaskan Kementerian Pekerjaan Umum dan

Perumahan Rakyat (2023), yaitu bendungan modern tidak hanya berfungsi menampung air, tetapi juga mendukung ketahanan pangan, pengendalian banjir, penyediaan energi, dan peningkatan ekonomi wilayah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa Bendungan Lau Simeme telah dirancang dengan sistem pelimpah dan kapasitas hidraulik yang memadai untuk menghadapi debit banjir rencana. Namun demikian, pengelolaan daerah aliran sungai di hulu tetap penting dilakukan untuk mengurangi sedimentasi dan menjaga umur layanan waduk. Dengan demikian, keberadaan Bendungan Lau Simeme memiliki peranan strategis dalam mendukung pengendalian banjir serta penyediaan sumber daya air bagi Kabupaten Deli Serdang dan Kota Medan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada Bendungan Lau Simeme Kabupaten Deli Serdang Sumatera Utara, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis data curah hujan maksimum tahunan menggunakan metode distribusi probabilitas, diperoleh curah hujan rencana yang meningkat seiring bertambahnya kala ulang. Curah hujan rencana kala ulang 2 tahun sebesar 130,290 mm, kala ulang 5 tahun sebesar 178,478 mm, kala ulang 10 tahun sebesar 186,069 mm, kala ulang 25 tahun sebesar 211,980 mm, kala ulang 50 tahun sebesar 234,970 mm, dan kala ulang 100 tahun sebesar 255,643 mm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Bendungan Lau Simeme memiliki peranan penting dalam mereduksi potensi banjir akibat hujan ekstrem di wilayah hilir.
2. Berdasarkan perhitungan debit banjir menggunakan Metode Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu, diperoleh bahwa debit banjir rencana meningkat seiring bertambahnya kala ulang hujan. Debit puncak terjadi pada waktu 3,32 jam setelah hujan efektif dimulai. Debit puncak kala ulang 2 tahun sebesar 591,16 m³/det, kala ulang 5 tahun sebesar 791,41 m³/det, kala ulang 10 tahun sebesar 928,51 m³/det, kala ulang 25 tahun sebesar 1.065,80 m³/det, kala ulang 50 tahun sebesar 1.231,13 m³/det, dan kala ulang 100 tahun sebesar 1.343,60 m³/det. Hasil ini menunjukkan bahwa Bendungan Lau Simeme berfungsi penting dalam pengendalian debit banjir Sungai Percut dan wilayah sekitarnya.
3. Berdasarkan evaluasi kapasitas waduk dan bangunan pelimpah, Bendungan Lau Simeme memiliki kapasitas tampungan normal sebesar 28 juta m³ dengan luas genangan 246,80 hektar. Bangunan pelimpah menggunakan sistem side channel spillway yang terhubung dengan chute spillway dan kolam olak USBR Type II, sehingga mampu mengalirkan debit banjir secara aman. Dengan kapasitas tersebut, bendungan dinilai cukup memadai untuk mendukung fungsi pengendalian banjir, penyediaan air irigasi seluas 3.267 hektar, penyediaan air baku, serta potensi pembangkit listrik sebesar 2,8 MW.

5.2 Saran

Adapun saran yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk penelitian selanjutnya, sebaiknya digunakan metode yang berbeda ataupun metode baru serta lokasi studi yang berbeda pula. Agar dapat dijadikan bahan perbandingan dan menghasilkan analisis yang lebih baik lagi.
2. Diharapkan untuk memperhitungkan evapotranspirasi, menghitung kebutuhan air pada daerah irigasi.
3. Dapat mengevaluasi turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- Asdak, C. (2023). *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai*. Ugm Press.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. MacGraw-Hill Book Co. Inc., New York, NY, 206.
- ICOLD. (2011). *Selecting Seismic Parameters for Large Dams*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2023). *Profil Bendungan Strategis Nasional*.
- Putri, M. K., Asshaumi, R. U., Rahmadani, N. F., Kurnia, S. I., Mayasari, S., Martatino, R., Prastowo, S. H. B., & Dewi, N. M. (2024). Analisis nilai kecepatan terhadap viskositas pada fluida. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 8(1), 89–96.
- Sabriyati, D., & Hadi, M. P. (2022). Kajian Hidrologi Debit Puncak Penyebab Banjir Bandang Menggunakan Pemodelan Hidrograf Satuan Sintesis-SCS (HSS-SCS). *Jurnal Akuatiklestari*, 5(2), 80–90.
- Sahril, Y. (2023). *Distribusi Kecepatan dan Pola Aliran pada Variasi Hambatan Terendam di Saluran Terbuka. (Doctoral Dissertation, Universitas Hasanuddin)*.
- Soemarto, C. D. (1999). *Hidrologi Teknik*, Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Sunaryo, S. (2020). Analisis Kehilangan Air Irigasi Pada Saluran Primer Dan Sekunder Daerah Irigasi Rentang Jawa Barat. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 6(1), 7–16.
- Suripin, S., & Eng, M. (2004). *Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan*. Yogyakarta: Andi.
- Suryanto, I. A. (2023). *Fluida*. BuatBuku. com.
- Triatmodjo, B. (2008). *Hidrologi Terapan*, Beta Offset. Yogyakarta. Hal, 195–273.
- USBR. (1987). *Design of Small Dams*.
- Windari, G. A., & Sudarti, S. (2024). Mekanisme terjadinya hujan dan pengaruhnya terhadap lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 8(2), 11–20.

LAMPIRAN











