

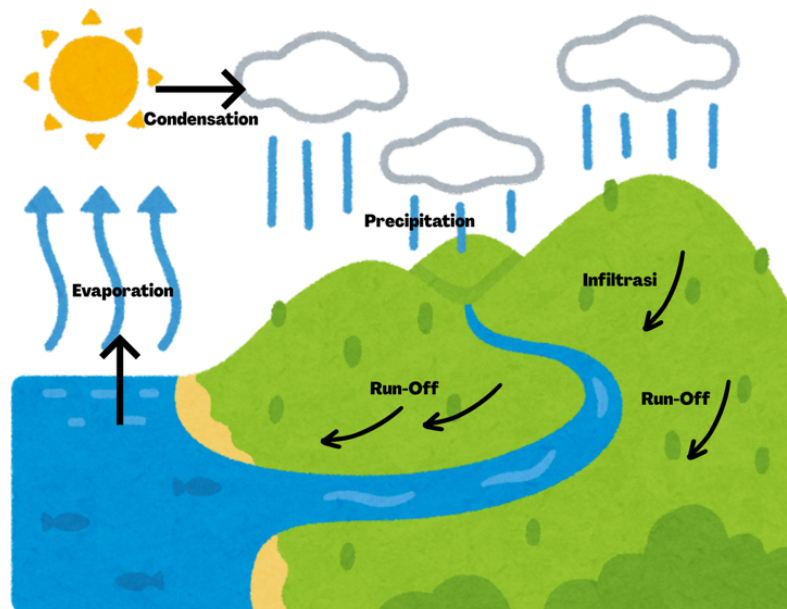
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hidrologi

Hidrologi merupakan cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari keberadaan, distribusi, pergerakan, dan sifat air di bumi, baik yang berada di atmosfer, di permukaan tanah, maupun di dalam tanah (Sosrodarsono & Takeda, 2003). Dalam konteks sumber daya air, hidrologi berperan penting sebagai dasar perencanaan, perancangan, dan pengelolaan bangunan air seperti bendungan, waduk, saluran drainase, dan pengendalian banjir.

Siklus hidrologi adalah konsep fundamental dalam hidrologi yang menggambarkan pergerakan air secara terus-menerus dari permukaan bumi ke atmosfer dan kembali lagi ke bumi (Suripin, 2004). Siklus ini meliputi beberapa proses utama, antara lain evaporasi (penguapan), transpirasi, kondensasi, presipitasi (curah hujan), *infiltrasi*, limpasan permukaan (*runoff*), dan aliran air tanah. Interaksi antar proses tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim, topografi, jenis tanah, dan tutupan lahan.



Gambar 2.1 Siklus Hidrologi

Sumber : Dokumentasi Pibadi

2.1.1 Curah Hujan Wilayah

Dalam analisis hidrologi, curah hujan merupakan parameter utama karena menjadi sumber air utama bagi aliran sungai (SNI 2415:2016). Data curah hujan yang diperoleh dari stasiun hujan perlu dianalisis untuk mengetahui karakteristik hujan, seperti hujan rata-rata daerah, hujan maksimum, intensitas hujan, serta distribusi hujan dalam waktu tertentu. Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rencana pemanfaatan air adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah, bukan curah hujan pada suatu titik tertentu. Curah hujan ini disebut curah hujan rerata wilayah/daerah dan dinyatakan dalam mm (Sosrodarsono & Takeda, 1977).

Data hujan yang diperoleh dari suatu stasiun hujan merupakan hujan titik (*point rainfall*) sehingga belum dapat mewakili hujan kawasan. Hujan kawasan didapat dengan menghitung rata-rata curah hujan dari beberapa stasiun hujan yang ada dalam suatu kawasan DAS. Metode analisis yang umum digunakan antara lain metode rata-rata aljabar, Thiessen, dan Isohyet untuk menentukan hujan wilayah. Berikut merupakan penentuan pemilihan metode curah hujan yang didapatkan dari (Suripin, 2004) yang dijelaskan dalam tabel

Tabel 2.1 Pemilihan Metode Penentuan Curah Hujan

Jumlah Pos Penangkar Hujan	Metode
Cukup	<i>Isohyet</i> , Poligon <i>Thiesen</i> atau Rerata Aljabar
Terbatas	<i>Isohyet</i> , Poligon <i>Thiesen</i> atau Rerata Aljabar
Tunggal	Rerata Aljabar atau Poligon <i>Thiesen</i>
Luas DAS	Metode
DAS besar (>5000 km ²)	<i>Isohyet</i>
DAS sedang (500 s/d 5000 km ²)	Poligon <i>Thiesen</i>
DAS kecil (<500 km ²)	Rerata Aljabar
Topografi	Metode
Pegunungan	Rerata Aljabar
Dataran	Poligon <i>Thiesen</i>
Berbukit dan tidak beraturan	<i>Isohyet</i>

Sumber : (Suripin, 2004)

2.1.1.1 Metode Rerata Aritmatik (Aljabar)

Metode ini adalah yang paling sederhana untuk menghitung hujan rerata pada suatu daerah. Metode Rerata Aritmatik didasarkan pada asumsi bahwa semua stasiun hujan tersebar merata atau hampir merata dalam suatu kawasan yang mempunyai topografi relatif datar, sehingga mempunyai pengaruh yang sama terhadap suatu kawasan. Hujan kawasan dihitung dengan persamaan berikut.

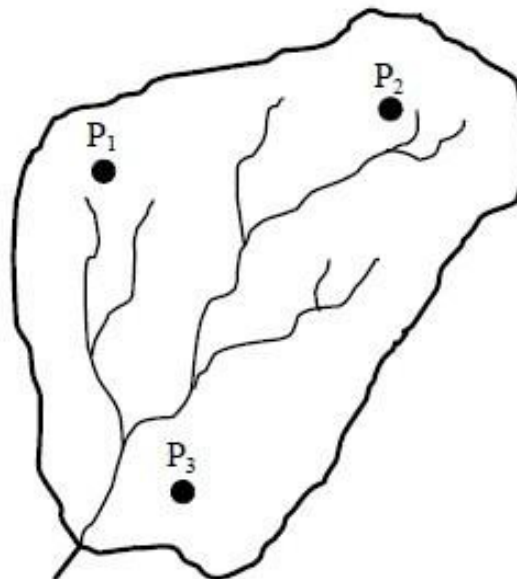
$$P = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots}{n} \quad (2.1)$$

Dimana :

P = Hujan rerata kawasan

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ = Hujan di stasiun

$1, 2, 3, \dots, n$ = Jumlah stasiun



Gambar 2.2 Stasiun Hujan di Suatu DAS

Sumber : (Triatmodjo, 2008)

2.1.1.2 Metode Thiessen

Metode ini memperhitungkan bobot dari masing-masing stasiun yang mewakili luasan di sekitarnya. Pada suatu luasan di dalam DAS dianggap bahwa hujan adalah sama dengan yang terjadi pada stasiun terdekat, sehingga hujan yang tercatat pada suatu stasiun mewakili luasan tersebut. Metode ini digunakan apabila penyebaran stasiun hujan di daerah yang ditinjau tidak merata. Perhitungan poligon *Thiessen* dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini.

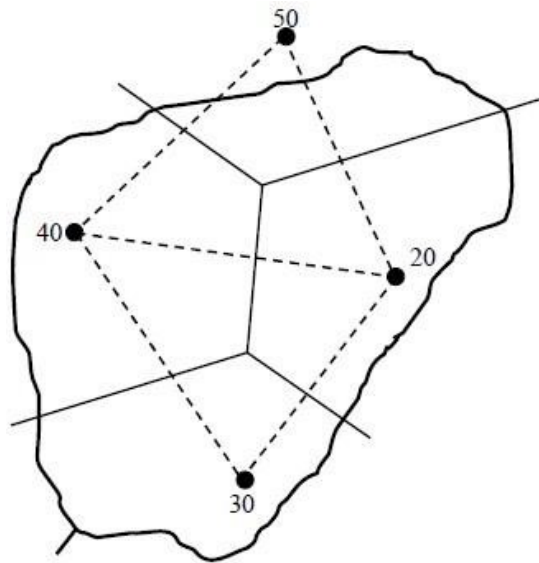
$$P = \frac{A_1 P_1 + A_2 P_2 + A_3 P_3 + \dots + A_n P_n}{A_{\text{total}}} \quad (2.2)$$

Dimana :

P = Hujan rerata Kawasan

P₁, P₂, ..., P_n = Hujan pada stasiun 1, 2, ..., n

A₁, A₂, ..., A_n = Luas daerah stasiun 1, 2, ..., n



Gambar 2.3 Metode Poligon Thiessen

Sumber : (Triatmodjo, 2008)

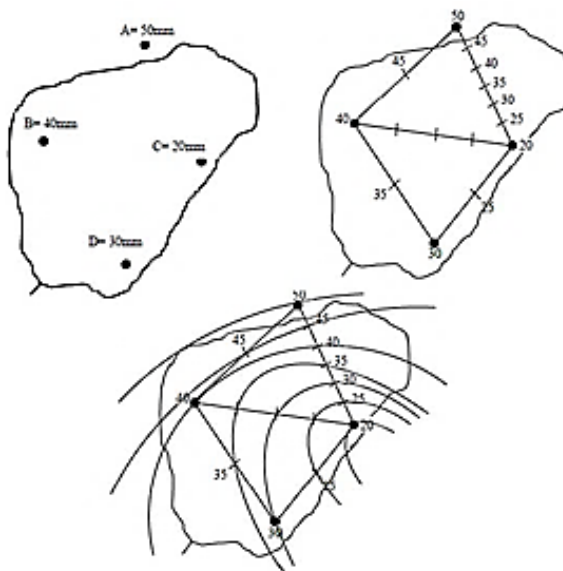
2.1.1.3 Metode *Isohyet*

Isohyet adalah garis yang menghubungkan titik-titik dengan kedalaman hujan yang sama. Pada metode isohiet, dianggap bahwa hujan pada suatu daerah di antara dua garis isohyet adalah merata dan sama dengan nilai rerata dari kedua garis isohiet tersebut. Dibandingkan dengan kedua metode sebelumnya metode *isohyet* merupakan cara paling teliti untuk menghitung kedalaman hujan rerata di suatu daerah, tetapi cara ini membutuhkan pekerjaan dan perhatian yang lebih banyak dibandingkan dengan dua metode sebelumnya. Secara matematis hujan rerata tersebut dapat ditulis seperti pada persamaan berikut.

$$n = \frac{A_1 \frac{I_1 + I_2}{2} + A_2 \frac{I_2 + I_3}{2} + \dots + A_n \frac{I_n + I_{n+1}}{2}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (2.3)$$

Dimana :

- P = Hujan rereta kawasan
 $I_1, I_2, \dots, I_n$ = Hujan pada stasiun 1, 2, ..., n
 $A_1, A_2, \dots, A_n$ = Luas daerah yang dibatasi oleh *isohyet* ke 1 dan 2, 2 dan 3, ..., n dan n+1



Gambar 2.4 Metode Isohyet

Sumber : (Triatmodjo, 2008)

2.1.2 Uji Konsistensi Data

Data hujan mempengaruhi ketepatan Analisis hujan-aliran. Apabila terdapat kesalahan pada data hujan yang terlalu besar maka hasil Analisis yang dilakukan akan diragukan. Oleh karena itu, sebelum data digunakan perlu dilakukan uji kualitas data hujan yaitu dengan uji kepangghahan. Satu seri data hujan untuk satu stasiun tertentu dimungkinkan sifatnya tidak pangghah (*inconsistent*). Dalam penelitian sebelumnya, pengujian kepangghahan dilakukan dengan RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*) Buishand, 1982 (Hartono Br, 1993). Bila Q/n yang didapat lebih kecil dari nilai kritik untuk tahun dan *confidence level* yang sesuai, maka data dinyatakan pangghah.

2.1.3 Distribusi Frekuensi

Analisis frekuensi merupakan prakiraan dalam arti memperoleh probabilitas untuk terjadinya suatu peristiwa hidrologi dalam bentuk debit/curah hujan rencana yang berfungsi sebagai dasar perhitungan perencanaan hidrologi untuk antisipasi setiap kemungkinan yang akan terjadi (Soemarto 1986, dalam Irawan Pengki et al.,

2020). Analisis distribusi frekuensi digunakan untuk mendapatkan besaran curah hujan rencana yang ditetapkan berdasarkan patokan sesuai perencanaan. Analisis ini diperlukan untuk mendapatkan relevansi curah hujan rencana pada periode ulang rencana seperti 2, 5, 10, 20, 50, 100 dan 1000 tahun.

Metode yang dapat digunakan untuk melakukan Analisis distribusi frekuensi curah hujan harian terhadap nilai rata-rata tahunannya dalam periode ulang tertentu menggunakan distribusi Normal, distribusi *Log Normal*, distribusi *Gumbel* dan distribusi *Log Pearson III*. Penentuan metode yang tepat untuk analisis distribus frekuensi akan dilakukan cek kesesuaian bergantung pada data dan fungsi kebutuhan. Parameter statistik untuk menentukan jenis distribusi ditunjukkan dalam tabel (Triatmodjo, 2008).

Tabel 2.2 Parameter Statistik untuk Menentukan Jenis Distribusi

No	Jenis Distribusi	Syarat Uji Distribusi	
1	Normal	Cs = 0	
		Ck = 3	
2	Log Normal	$Cv^3 + 3Cv$	Cs = 0
		$Cv^8 + 6Cv^6 + 15Cv^4 + 16Cv^2 + 3$	Ck = 0
3	Gumbell	Cs = 1,14	
		Ck = 5,4 Ck = 5,4	
4	Log Pearson tipe III	Jika semua syarat tidak terpenuhi	

Sumber : (Triatmodjo, 2008)

2.1.2.1 Distribusi Normal

Persamaan metode distribusi Normal (Hartono Br, 1993) sebagai berikut.

$$X_{Tr} = \bar{X} + K_{Tr} \times S_x \quad (2.4)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_i^n X_i}{n} \quad (2.5)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.6)$$

Dimana :

X_{Tr} = Besarnya curah hujan rencana untuk periode ulang T tahun

$\bar{X}$ = Harga rata-rata dari data

K_{Tr} = Variabel reduksi Gauss

S_x = Simpangan baku

2.1.2.2 Distribusi *Log Normal*

Persamaan metode distribusi *Log Normal* (Hartono Br, 1993) adalah sebagai berikut.

$$\log X_{Tr} = \log \bar{X} + K_{Tr} \times S_{\log x} \quad (2.7)$$

$$\log \bar{X} = \frac{\sum_i^n \log (X_i)}{n} \quad (2.8)$$

$$S_{\log x} = \sqrt{\frac{\sum (\log X_i - \log \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.9)$$

Dimana :

$\log X_{Tr}$ = Besarnya curah hujan rencana untuk periode ulang T tahun

$\log \bar{X}$ = Harga rata-rata dari data

K_{Tr} = Variabel reduksi Gauss

$S_{\log x}$ = Simpangan baku

2.1.2.3 Distribusi *Gumbel*

Persamaan metode distribusi *Gumbel* (Hartono Br, 1993) adalah sebagai berikut.

$$X_{Tr} = \bar{X} + K \times S_x \quad (2.10)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_i^n X_i}{n} \quad (2.11)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.12)$$

Dimana :

X_{Tr} = Besarnya curah hujan rencana untuk periode ulang T tahun

$\bar{X}$ = Harga rata-rata dari data

S_x = Simpangan baku

K = Faktor frekuensi (fungsi dari periode ulang dan tipe frekuensi)

Untuk menghitung faktor frekuensi Gumbel mengambil harga :

$$K = \frac{y_t - y_n}{S_n} \quad (2.13)$$

Dimana :

y_t = Reduksi sebagai fungsi dari probabilitas

y_n = Besaran yang merupakan fungsi dari jumlah pengamatan

S_n = Besaran yang merupakan fungsi dari jumlah pengamatan

2.1.2.4 Distribusi *Log Pearson Type III*

Persamaan metode distribusi *Log Pearson Tipe III* (Hartono Br, 1993) adalah sebagai berikut.

$$\log X_{Tr} = \log \bar{X} + K_{Tr} \times S_{\log x} \quad (2.14)$$

$$\log \bar{X} = \frac{\sum_i^n \log (X_i)}{n} \quad (2.15)$$

$$S_{\log x} = \sqrt{\frac{\sum (\log X_i - \log \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.16)$$

Dimana :

$\log X_{Tr}$ = Besarnya curah hujan rencana untuk periode ulang T tahun

$\log \bar{X}$ = Harga rata-rata dari data

K_{Tr} = Koefisien frekuensi Log Pearson Tipe III

$S_{\log x}$ = Simpangan baku

Analisis frekuensi Metode *Log Normal* dan *Log Pearson Tipe III* didapatkan data parameter koefisien *skewnes*, koefisien *kurtosis* dan koefisien *variansi*. Berikut ini persamaan *skewnes* (Cs), *kurtosis* (Ck) dan *variansi* (Cv).

Koefisien *skewnes* (Cs)

$$C_s = \frac{N \sum \log X - \log \bar{X}}{(n-1)(N-2)(\sigma_{\log x})^3} \quad (2.17)$$

Selain curah hujan, aliran sungai (debit) juga merupakan variabel penting dalam hidrologi. Debit sungai merupakan volume air yang mengalir melalui suatu penampang sungai dalam satuan waktu tertentu. Analisis debit digunakan untuk berbagai keperluan, seperti perencanaan kapasitas sungai, analisis banjir, dan evaluasi ketersediaan air. Hubungan antara curah hujan dan debit umumnya dianalisis menggunakan konsep hidrograf aliran, baik hidrograf satuan maupun hidrograf banjir.

2.2 Presipitasi dan Karakteristik Curah Hujan

Presipitasi adalah segala bentuk air yang jatuh dari atmosfer ke permukaan bumi, seperti hujan, gerimis, salju, dan hujan es (Chow dkk., 1988). Di wilayah tropis seperti Indonesia, presipitasi umumnya berbentuk hujan. Karakteristik curah hujan yang penting dalam kajian hidrologi meliputi intensitas, durasi, frekuensi, dan distribusi spasial hujan.

Analisis frekuensi hujan dilakukan untuk memperkirakan besarnya hujan rencana dengan kala ulang tertentu (Suripin, 2004). Beberapa metode distribusi probabilitas yang umum digunakan dalam analisis hidrologi antara lain distribusi Normal, Log Normal, Gumbel, dan Log Pearson Tipe III. Pemilihan distribusi yang sesuai dilakukan berdasarkan parameter statistik dan uji kesesuaian distribusi.

Hasil analisis hujan rencana selanjutnya digunakan sebagai input dalam perhitungan debit banjir rencana, baik dengan metode empiris maupun metode hidrograf sintetis. Dengan demikian, ketelitian dalam analisis curah hujan sangat mempengaruhi hasil perencanaan dan evaluasi bangunan air.

2.3 Limpasan Permukaan dan Infiltrasi

Limpasan permukaan merupakan bagian dari air hujan yang tidak meresap ke dalam tanah dan mengalir di atas permukaan tanah menuju saluran atau Sungai (Asdak, 2010). Besarnya limpasan permukaan dipengaruhi oleh intensitas hujan, kemiringan lahan, jenis tanah, tingkat kejenuhan tanah, serta kondisi tutupan lahan.

Infiltrasi adalah proses masuknya air ke dalam tanah melalui permukaan tanah. Laju infiltrasi sangat bergantung pada tekstur tanah, struktur tanah, dan kandungan air awal dalam tanah. Tanah berpasir umumnya memiliki laju infiltrasi lebih besar dibandingkan tanah lempung. Perubahan penggunaan lahan, seperti

urbanisasi, dapat menurunkan laju *infiltrasi* dan meningkatkan limpasan permukaan, sehingga berpotensi meningkatkan risiko banjir.

2.4 Daerah Aliran Sungai

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu wilayah daratan yang dibatasi oleh punggung-punggungan bukit atau batas topografi, di mana seluruh air hujan yang jatuh di wilayah tersebut akan mengalir melalui suatu sistem sungai menuju satu titik keluaran (*outlet*) (Asdak, 2010). DAS merupakan satuan wilayah yang umum digunakan dalam pengelolaan sumber daya air karena mencerminkan keterkaitan antara komponen hidrologi, geomorfologi, dan penggunaan lahan.

DAS memiliki beberapa komponen utama, yaitu daerah hulu, daerah tengah, dan daerah hilir. Daerah hulu umumnya berfungsi sebagai daerah tangkapan air (*catchment area*) yang berperan penting dalam pengaturan tata air dan konservasi tanah. Daerah tengah berfungsi sebagai daerah transisi, sedangkan daerah hilir umumnya merupakan wilayah pemanfaatan air yang padat aktivitas manusia, seperti permukiman, pertanian, dan industri.

Karakteristik DAS meliputi luas DAS, panjang sungai utama, kemiringan sungai, bentuk DAS, dan kerapatan jaringan sungai. Parameter-parameter tersebut mempengaruhi respon hidrologi DAS terhadap hujan, khususnya dalam pembentukan debit puncak dan waktu konsentrasi aliran.

2.5 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian sebelumnya yaitu dalam tugas akhir yang berjudul “Analisis Kapasitas Pelimpah Bendungan Leuwikeris Akibat Perubahan Tutupan Lahan di Sub-DAS Citanduy Hulu”. Didapatkan beberapa hasil dari penelitian tersebut yaitu:

1. Besarnya debit banjir maksimum (*inflow*) yang dihitung dengan menggunakan prinsip HSS Superposisi berdasarkan metode Snyder, Nakayasu, Gama-I, SCS-CN dan Clark pada periode Q2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 & 1000th serta QPMF masing-masing adalah 777.00 m³/s, 1005.90 m³/s, 1157.80 m³/s, 1352.40 m³/s, 1497.80 m³/s, 1648.40 m³/s, 1802.80 m³/s, 2218.70 m³/s dan 6553.80 m³/s. Akibat adanya perubahan tutupan lahan pada Sub-DAS Citanduy Hulu tersebut, debit banjir maksimum terutama untuk Q1000th dan QPMF-nya

- mengalami kenaikan sebesar 107.96% dan 37.47% dari perencanaan awal desain debit banjirnya ($Q_{1000th} = 1066.90 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $Q_{PMF} = 4767.40 \text{ m}^3/\text{s}$).
2. Hasil simulasi flood routing Bendungan Leuwikeris pada elevasi puncak 158 meter untuk QPMF mampu mereduksi besarnya debit banjir dari $6553.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (*peak discharge*) menjadi $6325.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (*peak discharge*) dalam jangka waktu 1 jam dimana kejadian puncak banjir berubah dari pukul 14:00 menjadi pukul 15:00 WIB. Waduk sendiri mengalami kenaikan elevasi muka air banjir hingga mencapai elevasi 157.4 meter dari perencanaan awal 155.5 meter. Akibatnya tinggi jagaan bendungan berubah menjadi 0.6 meter dan hal tersebut tidak lagi memenuhi tinggi jagaan minimal sebesar 0.75 meter berdasarkan SKSNI. Oleh karena itu, kapasitas *Spillway* Bendungan Leuwikeris akibat adanya perubahan tutupan lahan pada Sub-DAS Citanduy Hulu dalam kurun waktu 50 tahun kondisinya menjadi tidak aman karena berpotensi besar akan terjadi *overtopping*.

2.6 Aliran Banjir

Banjir merupakan suatu peristiwa hidrologis yang terjadi ketika aliran air pada suatu tampang sungai melampaui kapasitas alirannya, sehingga air meluap ke luar palung sungai dan menggenangi wilayah daratan di sekitarnya. Kondisi ini terjadi apabila debit aliran yang masuk ke sistem sungai lebih besar daripada kemampuan tampang sungai dalam menyalurkan aliran secara aman (Suripin, 2004).

Secara umum, banjir disebabkan oleh peningkatan debit aliran sungai yang signifikan akibat curah hujan dengan intensitas dan durasi tinggi. Curah hujan tersebut menghasilkan limpasan permukaan yang besar ketika kapasitas infiltrasi tanah telah terlampaui, sehingga air hujan mengalir di atas permukaan tanah menuju saluran dan sungai. Akumulasi limpasan dari seluruh Daerah Aliran Sungai (DAS) menyebabkan kenaikan muka air sungai secara cepat dan berpotensi menimbulkan banjir (Asdak, 2010).

Selain faktor curah hujan, karakteristik fisik DAS juga berpengaruh terhadap terjadinya banjir. Luas DAS, kemiringan lahan, bentuk DAS, kerapatan jaringan sungai, serta kondisi penggunaan lahan menentukan besarnya debit puncak dan kecepatan respon aliran terhadap hujan. DAS dengan tingkat urbanisasi tinggi

dan tutupan vegetasi yang rendah cenderung menghasilkan limpasan permukaan yang lebih besar, sehingga meningkatkan potensi banjir (Kodoatie dan Sjarief, 2010).

Banjir tidak hanya disebabkan oleh faktor hidrologi alami, tetapi juga dapat terjadi akibat kegagalan bangunan air, salah satunya adalah keruntuhan bendungan. Keruntuhan bendungan merupakan kondisi kegagalan struktur bendungan yang menyebabkan pelepasan air waduk secara tiba-tiba dan tidak terkendali. Pelepasan volume air yang sangat besar dalam waktu singkat ini menghasilkan gelombang banjir dengan debit puncak dan kecepatan aliran yang jauh lebih besar dibandingkan banjir akibat hujan biasa, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan yang sangat besar di wilayah hilir bendungan (Froehlich, 2008).

Dari sudut pandang hidraulika sungai, peluapan air terjadi ketika elevasi muka air sungai melebihi elevasi tebing sungai atau kapasitas maksimum tampang basah. Kapasitas tampang sungai dipengaruhi oleh bentuk penampang, kekasaran saluran, kemiringan dasar sungai, serta kondisi sedimentasi dan vegetasi di sepanjang alur sungai. Penurunan kapasitas tampang akibat sedimentasi atau penyempitan sungai dapat meningkatkan risiko banjir meskipun debit aliran tidak terlalu besar (Suripin, 2004).

Dalam kajian teknis, pemahaman terhadap kejadian banjir memerlukan analisis hidrologi dan hidraulika yang terintegrasi. Analisis hidrologi digunakan untuk menentukan debit banjir rencana atau hidrograf banjir, baik akibat hujan ekstrem maupun akibat keruntuhan bendungan. Selanjutnya, analisis hidraulika dilakukan untuk mensimulasikan perambatan aliran banjir di sepanjang sungai dan dataran banjir. Untuk analisis keruntuhan bendungan, pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak HEC-RAS direkomendasikan oleh U.S. Army Corps of Engineers (USACE) karena mampu mensimulasikan aliran tak permanen dan propagasi gelombang banjir secara satu maupun dua dimensi (U.S. Army Corps of Engineers, 2023).

Dengan demikian, banjir merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor hidrologi, karakteristik DAS, kapasitas hidraulik sungai, serta kemungkinan terjadinya kegagalan bangunan air seperti bendungan. Pemahaman yang komprehensif terhadap faktor-faktor tersebut menjadi dasar penting dalam upaya

mitigasi risiko banjir dan perencanaan pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan (Kodoatie & Sjarief, 2010).

2.7 Bendungan

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) No. 27/PRT/M/2015 mendefinisikan bendungan adalah bangunan yang berupa urukan tanah, urukan batu, dan beton, yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang, atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk. Sedangkan waduk adalah wadah buatan yang terbentuk sebagai akibat dibangunnya bendungan. Pembangunan bendungan dilakukan untuk pengelolaan sumber daya air yang berfungsi untuk penyediaan air baku, penyediaan air irigasi, pengendalian banjir, dan/atau pembangkit listrik tenaga air.

Pembangunan bendungan dan pengelolaan bendungan beserta waduknya bertujuan untuk meningkatkan kemanfaatan fungsi sumber daya air, pengawetan air, pengendalian daya rusak air, dan fungsi pengamanan tampungan limbah tambang (tailing) atau tampungan lumpur. Berdasarkan tujuan pembangunannya, bendungan dibagi menjadi dua yaitu:

1. Bendungan dengan tujuan tunggal (*Single Purpose Dam*), merupakan bendungan yang dibangun untuk memenuhi satu tujuan saja, misalnya untuk pembangkit listrik saja, untuk irigasi (pengairan), atau untuk pengendalian banjir saja, dll.
2. Bendungan serbaguna (*Multi Purpose Dam*), merupakan bendungan yang dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan, misalnya untuk pembangkit listrik (PLTA) dan irigasi (pengairan), atau untuk pengendalian banjir dan PLTA, air minum dan air industri, dll.

Menurut Nuramini, 2017 dalam jurnal (Setiawan, 2021) berdasarkan kegunaan-kegunaan tersebut maka potensi waduk dalam menampung air (kapasitas waduk atau storage capacity) dapat dibedakan menjadi tiga bagian, yaitu:

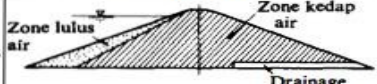
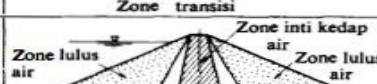
1. Kapasitas mati (*dead storage zone*), dipergunakan untuk pengumpulan sedimen.
2. Kapasitas efektif (*effective/usefull storage*), merupakan kapasitas yang dipergunakan untuk konservasi sumber air (penyediaan air baku, irigasi, dll),

sehingga setiap pemanfaatan waduk dalam konservasi waduk dapat memenuhi kapasitas efektif waduk.

3. Kapasitas penahan banjir (*flood control*), merupakan kapasitas waduk yang bertujuan untuk menahan kelebihan air guna mengurangi potensi kerusakan akibat banjir.

Bendungan tipe urugan adalah bendungan yang terbuat dari bahan urugan dari borrow area yang dipadatkan dengan menggunakan vibrator roler atau alat pemadat lainnya pada setiap hamparan dengan tebal tertentu (Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, 2004). Bendungan urugan terbagi lagi atas beberapa tipe seperti diuraikan pada gambar di bawah. Hal yang perlu dipertimbangkan tentang pembangunan bendungan adalah konsekuensi daerah hilir. Konsekuensi daerah hilir yang kemungkinan dapat terkena banjir apabila bendungan runtuh dibagi dalam dua kelas (Sosrodarsono & Takeda, 1977) yaitu:

1. Konsekuensi besar, bila terdapat kelompok pemukiman penduduk (contoh: desa, kecamatan, kota) dan atau daerah usaha maupun industri baik yang sudah berkembang maupun yang akan dibangun.
2. Konsekuensi kecil, bila tidak terdapat atau terdapat sedikit rumah penduduk, dan atau daerah usaha maupun industri.

Type:	Skema Umum	Keterangan
Bendungan Homogen		Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.
Bendungan Zonal		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tirai kedap air di udiknya.
		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.
		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.
Bendungan Sekat		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan dinding tidak lulus air di lereng udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dll. nya.

Gambar 2.5 Tipe Bendungan Urugan

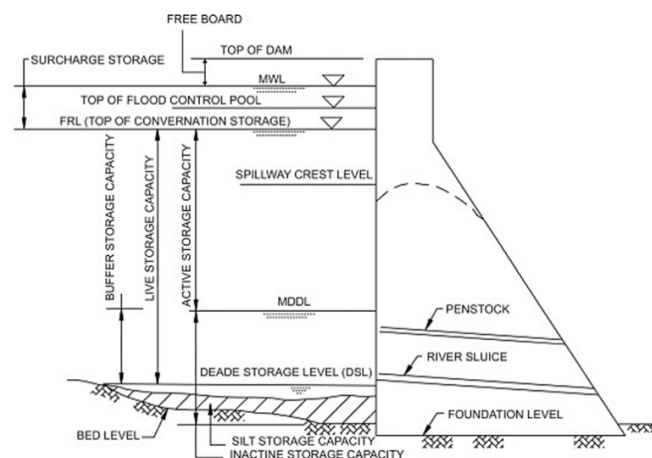
Sumber : (Sosrodarsono & Takeda, 1977)

2.7.1 Penggunaan Waduk dan Zona Tampungannya

Waduk adalah wadah air buatan termasuk material yang terkandung di dalamnya yang terbentuk sebagai akibat dibangunnya bendungan, dan berbentuk pelebaran alur/badan/palung sungai (Departemen Pekerjaan Umum, 2004). Fungsi waduk adalah menyediakan air untuk satu atau lebih dari satu tujuan. Waduk yang menyediakan air untuk beberapa tujuan disebut sebagai “*multi purpose*” reservoir. Tujuan penggunaan waduk untuk kebutuhan manusia dan/atau keperluan industri sendiri biasanya terdiri dari:

1. Irigasi, untuk menambah curah hujan yang tidak mencukupi kebutuhan.
2. Pembangkit listrik tenaga air, untuk menyediakan pasokan listrik.
3. Skema *Pumped storage hydropower*, di mana air mengalir dari reservoir atas ke bawah untuk menghasilkan tenaga dan energi pada saat permintaan tinggi melalui turbin, yang reversibel dan air dipompa kembali ke reservoir atas ketika memiliki kelebihan energi.
4. Pengendali Banjir (*Flood Control*), untuk menampung debit banjir dan membuang kelebihan debit melalui *spillway*.
5. Penggunaan fasilitas, dalam hal ini termasuk ketentuan untuk berperahu, olahraga air, memancing dan lainnya.

Kapasitas Waduk adalah jumlah daya tampung waduk sampai ke elevasi muka air normal atau elevasi operasi normal. Kapasitas tampungan dalam waduk dibagi menjadi tiga atau empat bagian yang dibedakan oleh beberapa elevasi. Berikut diagram zona tampungan pada waduk.

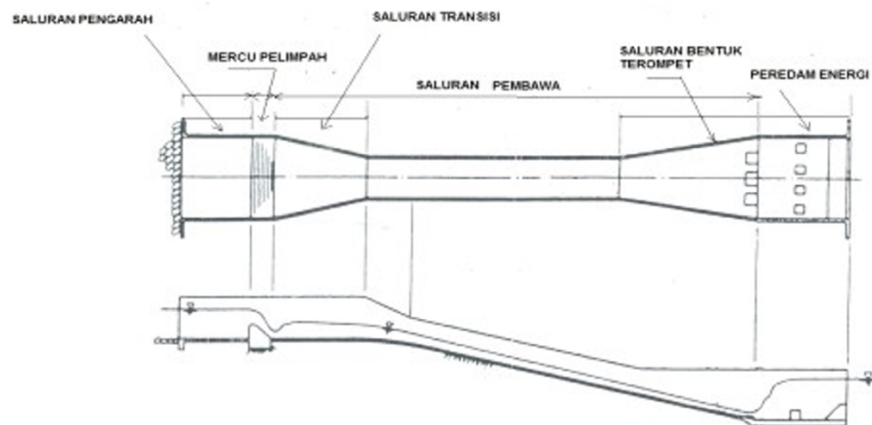


Gambar 2.6 Diagram Zona Tapungan

Sumber : (Triatmodjo, 2008)

2.7.2 Bangunan Pelimpah (*Spillway*)

Spillway adalah salah satu komponen penting dari sebuah bendungan, yang digunakan sebagai pengontrol pelepasan arus dari suatu bendungan ke daerah hilir. Fungsi utama dari *Spillway* adalah membuang kelebihan air waduk, sehingga air tidak melimpas puncak bendungan (*overtopping*) yang dapat membahayakan bendungan, terutama bendungan tipe urugan tanah. *Spillway* harus dirancang dengan baik agar debit banjir yang direncanakan nantinya dapat mengalir dengan baik melalui saluran transisi, saluran peluncur dan peredam energi.



Gambar 2.7 Skema Tipe Bangunan Pelimpah pada Bendungan Urugan

Sumber : (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017)

Spillway harus didesain secara hati-hati dan jangan sampai berdampak merugikan terhadap tubuh bendungan, pondasi dan reservoir. Penentuan tipe bangunan pelimpah harus mempertimbangkan kondisi geologi, topografi, segi keamanan, sosial dan ekonomi, cara operasi dan pemeliharaan dan juga tipe bendungannya. Bangunan pelimpah dapat dibangun menjadi bagian dari bendungan, tapi bila kondisi topografi memungkinkan bangunan pelimpah juga dapat dibangun terpisah dari bendungan utama, untuk menghindari pengaruh rembesan melalui bidang kontak.

Berdasarkan fungsinya *Spillway* dibedakan menjadi tiga, yaitu *Service Spillway*, *Auxiliary Spillway* dan *Emergency Spillway*. Sedangkan berdasarkan bentuknya *Spillway* terdiri dari *Chute*, *Side Channel Spillway*, *Shaft*, *Siphon*, *Labirin*, *Box Inlet Drop Spillway* dan Pelimpah Konduit/Terowongan (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017). Selain itu, *Spillway* juga diklasifikasikan menjadi *Spillway* tanpa pintu dan dengan pintu.

Spillway dengan pintu terdiri dari pelimpah berpintu dan pelimpah dengan “*fuse gate*”. Sedangkan *Spillway* tanpa pintu terdiri dari:

1. Pelimpah dengan Mercu Ogee dan *Sill* kendali
2. Saluran dengan dua sisi dan pelimpah samping dengan Mercu Ogee
3. Pelimpah “*Morning Glory*”
4. Pelimpah dengan Mercu Labirin
5. Bangunan Pelimpah (*Spillway*)

Bangunan pelimpah (*spillway*) yang ada di Bendungan Leuwikeris merupakan bangunan pelimpah yang bertipe mercu ogee yang didesain dengan pintu sorong tegak dan tanpa pintu yang membentuk mercu. Pada hilir bangunan pelimpah Bendungan Leuwikeris dibangun sebuah kolam peredam energi yang dibangun dengan tipe USBR tipe II.

Selain kegunaan bendungan yang begitu besar, bendungan juga berpotensi akan terjadi bahaya besar. Potensi bahaya tersebut diakibatkan dari adanya kegagalan bendungan atau keruntuhan bendungan yang penyebabnya bervariasi, sehingga berpotensi juga menimbulkan jatuhnya korban jiwa dan kerusakan pada daerah permukiman. Disebutkan dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) No. 27/PRT/M/2015 bahwa kegagalan bendungan adalah keruntuhan sebagian atau seluruh bendungan atau bangunan pelengkapannya dan/atau kerusakan yang mengakibatkan tidak berfungsinya bendungan.

Melihat potensi bahaya yang sangat besar akibat keruntuhan bendungan maka Pemerintah Republik Indonesia menetapkan melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) No. 27/PRT/M/2015 tentang bendungan yang mengisyaratkan bahwa Pembangunan bendungan harus memiliki perancangan rencana tindak darurat dan disertai dengan analisis keruntuhan bendungan.

2.8 Keruntuhan Bendungan

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 tentang bendungan. Pembangunan bendungan mempunyai resiko tinggi berupa kemungkinan terjadinya kegagalan bendungan yaitu keruntuhan Sebagian atau seluruh bendungan atau bangunan pelengkapannya. Keruntuhan bendungan dapat disebabkan oleh kegagalan struktur antara lain terjadi longsor, kegagalan

operasi, kegagalan hidraulik yang mengakibatkan terjadinya peluapan air dan terjadinya rembesan yang dapat mengganggu kestabilan bendungan. Sehingga berpotensi bahaya yang sangat besar yang dapat mengancam keselamatan masyarakat pada kawasan hilir bendungan.

Beberapa peneliti mencoba untuk memprediksi ukuran, bentuk dan waktu keruntuhan. Sehingga *US Army Corps Of Engineer* (USACE) telah mengembangkan sebuah program komputer untuk menganalisis keruntuhan bendungan dan penelusuran sungai. Program tersebut adalah perangkat lunak (*software*) *Hydrologic Engineering center's – 1* (HEC-1) dan *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS) yang pada kelangsungannya terus dikembangkan oleh USACE.

Analisis keruntuhan bendungan penting memperhatikan estimasi parameter waktu, dimensi dan posisi rekahan keruntuhan bendungan. Parameter keruntuhan bendungan akan secara langsung mempengaruhi perkiraan debit puncak *outflow* yang keluar dari bendungan dan kemungkinan waktu tiba banjir untuk memberikan peringatan dini pada daerah hilir bendungan yang terdampak untuk mengurangi resiko kerugian dan kerusakan. Hal pertama yang perlu dilakukan dalam menganalisis keruntuhan bendungan ini adalah menentukan dimensi dan waktu pengembangan pada setiap skenario keruntuhan. Setelahnya, HEC-RAS dapat dimanfaatkan untuk menganalisis hidrograf keluaran dari keruntuhan bendungan dan menunjukkan penelusuran aliran pada hilir bendungan. Namun posisi, ukuran dan waktu rekahan merupakan parameter yang paling tidak pasti dalam analisis keruntuhan bendungan.

2.5.1 Penyebab Keruntuhan Bendungan

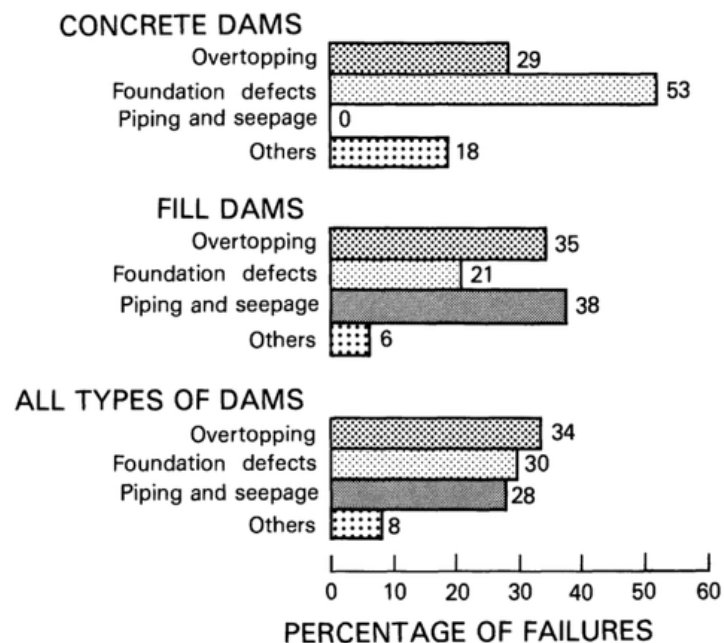
Keruntuhan bendungan dapat terjadi pada semua tipe atau jenis bendungan. Namun berdasarkan kejadian yang telah terjadi keruntuhan bendungan paling banyak pada tipe bendungan urugan tanah penyebabnya adalah banjir di daerah hulu bendungan. Berikut beberapa hal yang dapat menyebabkan keruntuhan bendungan, diantaranya adalah:

1. Banjir di hulu bendungan.
2. Rekahan pada tubuh bendungan.
3. Aliran dalam tanah pada tubuh bendungan.

4. Longsor pada tubuh bendungan.
5. Gempa bumi.
6. Kegagalan struktur.
7. Penurunan muka air secara cepat.
8. Sabotase.

Berdasarkan identifikasi dari penelitian terdahulu bahwa penyebab paling banyak terjadinya keruntuhan bendungan adalah *overtopping* atau terjadi luapan air pada puncak bendungan dan *piping* atau rekahan pada tubuh bendungan yang menyebabkan adanya aliran tanah pada tubuh bendungan. (Costa, 1985) menyimpulkan semua kejadian keruntuhan pada semua tipe bendungan pada tahun 1985, bahwa 34% peristiwa keruntuhan disebabkan oleh *overtopping*, 30% disebabkan oleh kegagalan pondasi, 28% disebabkan oleh *piping*, dan 8% sisanya terjadi karena faktor lain. Sedangkan bendungan dengan tipe urugan tanah, 38% disebabkan oleh *piping*, 35% oleh *overtopping*, 21% disebabkan oleh kegagalan pondasi, dan 6% sisanya disebabkan oleh beberapa faktor lain.

Persentase penyebab keruntuhan bendungan menurut (Costa, 1985) dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.8 Persentase Keruntuhan Bendungan

Sumber : (Costa, 1985)

Kemungkinan penyebab terjadinya keruntuhan bendungan yang dijelaskan pada tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Kemungkinan Penyebab Keruntuhan Berdasarkan Tipe Bendungan

No.	Mekanisme Keruntuhan	Tipe Urugan Tanah	<i>Concrete Gravity</i>	<i>Concrete Arch</i>	<i>Concrete Buttress</i>	<i>Concrete Multi-Arch</i>
1.	<i>Overtopping</i>	✓	✓	✓	✓	✓
2.	<i>Piping/Seepage</i>	✓	✓	✓	✓	✓
3	<i>Foundation Defect</i>	✓	✓	✓	✓	✓
4.	<i>Sliding</i>	✓	✓		✓	
5.	<i>Overturning</i>		✓	✓		
6.	<i>Cracking</i>	✓	✓	✓	✓	✓
7.	<i>Equipment failure</i>	✓	✓	✓	✓	✓

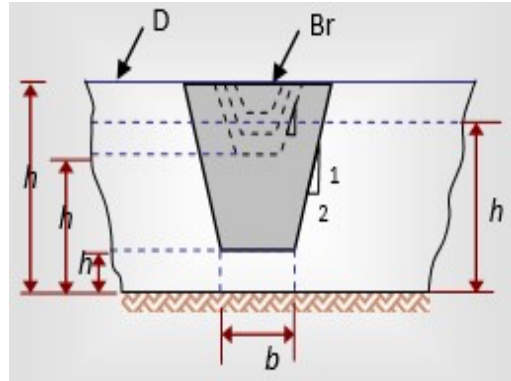
Sumber : (Brunner, 2014)

2.5.2 Keruntuhan Bendungan Akibat *Overtopping*

Kondisi *overtopping* pada bendungan dapat menjadi awal mula penyebab keruntuhan bendungan. *Overtopping* yaitu melimpasnya air pada waduk melalui tubuh bendungan, hal ini terjadi karena kapasitas pelimpah (*spillway*) yang tidak lagi bisa mengakomodir banjir dalam waduk, atau bahkan karena terhalangnya pelimpah oleh suatu hal, misalnya reruntuhan, atau bisa juga dikarenakan oleh kecacatan pondasi bendungan sehingga tubuh bendungan mengalami *landslide* yang menyebabkan elevasinya menurun. Secara umum, keruntuhan *overtopping* pada bendungan urugan, proses erosi awal terjadi pada bagian hilir dari tubuh bendungan. Saat air melewati puncak bendungan, puncak bendungan bertindak seperti ambang lebar bendung. Potongan tersebut akan terkikis kembali ke pusat bendungan dan melebar seiring waktu. Ketika potongan mulai memotong ke dalam puncak bendungan, panjang puncak bendungan akan menjadi lebih pendek. Ketika potongan mencapai hulu dari puncak bendungan, kegagalan dari hulu puncak dapat terjadi. Potongan akan berlanjut mengikis bagian hulu melalui tanggul bendungan (Brunner, 2014).

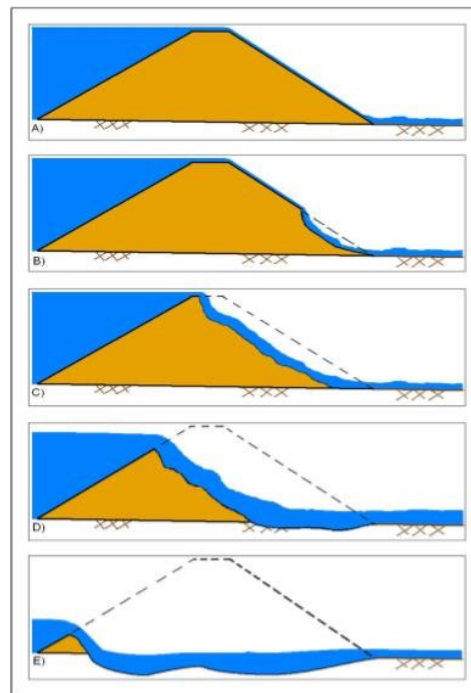
Keruntuhan bendungan akibat *overtopping* disimulasikan dengan rekahan yang berbentuk segi empat, trapesium, atau segitiga. Rekahan ini makin lama

makin membesar dengan waktu secara progresif dari puncak bendungan ke bawah sampai mencapai pondasi. Aliran yang lewat pada rekahan ini diperhitungkan sebagai aliran yang melewati ambang lebar.



Gambar 2.9 Formasi Perubahan Ukuran Rekahan yang Terjadi pada Tubuh Bendungan Akibat *Overtopping*

Sumber : (Brunner, 2014)



Gambar 2.10 Proses Keruntuhan Bendungan Akibat *Overtopping*

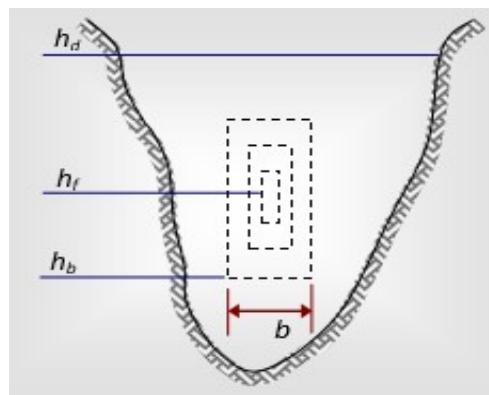
Sumber : (Brunner, 2014)

2.5.3 Keruntuhan Bendungan Akibat *Piping*

Rekahan yang diakibatkan oleh *piping* tidak bisa dipastikan awal mula lokasinya dikarenakan gerusan yang diakibatkan oleh rembesan terjadi didalam tubuh bendungan. Sedangkan untuk proses dari rekahan sampai tubuh bendungan

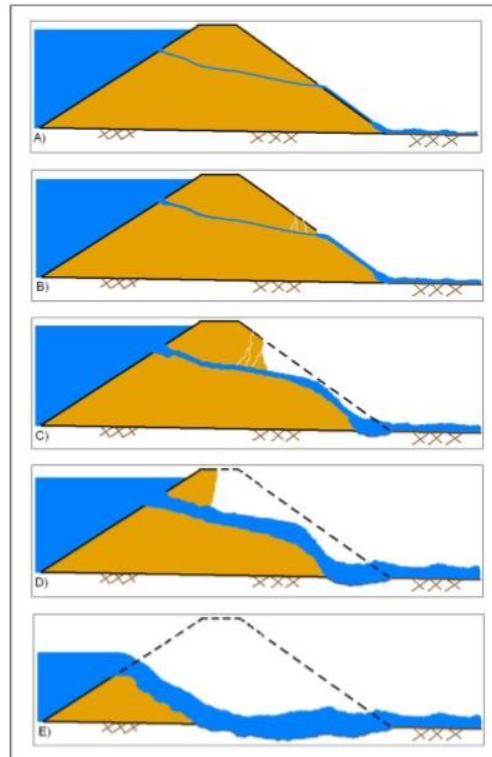
tererosi sepenuhnya merupakan akibat dari rusaknya tatanan konstruksi pada bagian bawah (*piping point*) sehingga membuat runtuh konstruksi bagian atas. Kegagalan *piping* dimulai dari air merembes melalui material, lubang yang lebih besar terbentuk, sehingga mampu membawa lebih banyak air dan mengikis lebih banyak material. Pergerakan air melalui bendungan selama proses ini dimodelkan sebagai aliran jenis lubang bertekanan. Selama proses aliran *piping*, erosi dan pemotongan akan mulai terjadi di bagian hilir bendungan sebagai hasil aliran keluar dari *piping*. Saat lubang *piping* semakin membesar, material di atas lubang akan mulai runtuh dan jatuh ke air yang bergerak. Proses erosi dan bahan material akan bergerak ke sisi hulu bendungan, sementara lubang *piping* akan terus berkembang secara bersamaan. Jika lubang *piping* sudah cukup besar, berat material di atas lubang mungkin terlalu berat untuk dipertahankan, dan masa keruntuhan dari material akan terjadi. Ini akan menghasilkan sebuah kerusakan besar pada *outflow* di atas kerusakan dan akan mempercepat proses keruntuhan. Potongan dan proses erosi akan dilanjutkan kembali melalui bendungan, serta ke bawah. Selain itu, keruntuhan akan semakin melebar. Tergantung pada volume dari air di waduk, keruntuhan dapat terus berkurang dan melebar sampai ke dasar saluran alami tercapai. Kemudian keruntuhan akan masuk fase yang melebar (Brunner, 2014)

Keruntuhan bendungan akibat *piping* ini dapat disimulasikan dengan menentukan elevasi sumbu *piping* yang disimulasikan sebagai lubang berbentuk segiempat yang melebar dengan waktu keatas dan kebawah dalam tubuh bendungan.



Gambar 2.11 Ilustrasi Rekahan pada Bendungan Akibat *Piping*

Sumber : (Brunner, 2014)



Gambar 2.12 Proses Keruntuhan Bendungan Akibat *Piping*

Sumber : (Brunner, 2014)

2.5.4 Parameter Keruntuhan Bendungan

Parameter keruntuhan bendungan merupakan aspek yang paling tidak pasti (*highly uncertain*) dalam analisis keruntuhan bendungan karena proses kegagalannya bersifat kompleks, non linier, dan sangat dipengaruhi oleh kondisi lokal bendungan serta karakteristik hidrologi dan geoteknik. Tidak seperti analisis hidrologi atau hidraulika yang dapat diturunkan secara matematis dengan parameter yang relatif terukur, proses terbentuk dan berkembangnya rekahan pada tubuh bendungan sangat sulit diamati secara langsung dan jarang terdokumentasi secara lengkap pada kejadian nyata (Brunner, 2014).

Parameter utama dalam keruntuhan bendungan meliputi posisi rekahan, ukuran rekahan, bentuk rekahan, dan waktu perkembangan rekahan. Posisi rekahan menentukan lokasi awal keluarnya air dari waduk dan sangat memengaruhi arah serta konsentrasi aliran. Ukuran rekahan, yang biasanya direpresentasikan oleh lebar dan kedalaman breach, berpengaruh langsung terhadap besarnya debit puncak yang dilepaskan. Bentuk rekahan, termasuk kemiringan sisi breach, memengaruhi laju erosi dan stabilitas bukaan selama proses keruntuhan berlangsung. Sementara

itu, waktu rekahan atau waktu pembentukan breach menentukan kecepatan pelepasan air waduk dan menjadi faktor kunci dalam menentukan bentuk hidrograf *outflow*.

Keempat parameter tersebut sangat diperlukan untuk memperoleh hidrograf *outflow* dan pola genangan di hilir yang realistis. Hidrograf *outflow* merupakan hasil utama dari analisis keruntuhan bendungan karena digunakan sebagai input dalam simulasi hidraulika aliran banjir di hilir. Kesalahan dalam penentuan satu atau lebih parameter keruntuhan dapat menyebabkan perbedaan yang signifikan pada debit puncak, waktu kedatangan gelombang banjir, serta luas dan kedalaman genangan, sehingga berpotensi menimbulkan kesalahan dalam penilaian risiko.

Parameter keruntuhan juga merupakan komponen penting dalam penyusunan laporan penelitian potensi risiko bendungan karena berpengaruh langsung terhadap nilai debit puncak, bentuk hidrograf *outflow*, dan waktu peringatan dini yang tersedia untuk evakuasi masyarakat di hilir. Debit puncak menentukan tingkat bahaya hidraulik, sedangkan bentuk hidrograf dan waktu puncaknya menentukan seberapa cepat banjir mencapai wilayah hilir setelah terjadinya kegagalan bendungan. Oleh karena itu, analisis keruntuhan bendungan tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga memiliki implikasi langsung terhadap keselamatan dan perencanaan evakuasi di hilir (Brunner, 2014).

Untuk mengurangi tingkat ketidakpastian tersebut, banyak studi kasus telah dilakukan berdasarkan data kegagalan bendungan bersejarah. Studi-studi ini menghasilkan berbagai pedoman, persamaan regresi empiris, serta metodologi pemodelan komputer yang bertujuan untuk memprediksi ukuran dan waktu terjadinya keruntuhan bendungan secara lebih sistematis. Pendekatan empiris ini diperlukan karena keterbatasan data lapangan dan sulitnya melakukan eksperimen skala penuh terhadap kegagalan bendungan.

Salah satu kajian literatur paling komprehensif mengenai kegagalan bendungan bersejarah dilakukan oleh U.S. Bureau of Reclamation (USBR), yang dirangkum oleh (Wahl, 1998). Studi tersebut menginventarisasi dan menganalisis berbagai kejadian keruntuhan bendungan di seluruh dunia, mencakup berbagai tipe bendungan. Namun demikian, fokus utama kajian tersebut adalah bendungan tanah atau bendungan urugan (*earthen/embankment dams*) karena jenis bendungan ini

paling banyak mengalami kegagalan dan paling rentan terhadap mekanisme erosi internal maupun *overtopping*. Hasil kajian USBR ini kemudian menjadi dasar bagi pengembangan persamaan empiris dan pedoman penentuan parameter keruntuhan yang digunakan secara luas hingga saat ini.

Selain studi empiris, berbagai lembaga teknis internasional telah menerbitkan pedoman yang memuat rentang nilai kemungkinan untuk parameter keruntuhan, seperti lebar *breach* akhir, kemiringan sisi *breach*, serta waktu perkembangan keruntuhan. Rentang nilai tersebut tidak dimaksudkan sebagai nilai tunggal yang pasti, melainkan sebagai batas minimum dan maksimum yang realistis berdasarkan pengalaman historis. Dalam praktik analisis, rentang ini digunakan untuk menyusun skenario keruntuhan konservatif dan non-konservatif guna mengevaluasi sensitivitas hasil simulasi terhadap variasi parameter keruntuhan. Pedoman tersebut dapat digunakan sebagai batas minimum dan maksimum dalam mengestimasi parameter keruntuhan. Berikut merupakan tabel rentang nilai keruntuhan.

Tabel 2.4 Rentang Kemungkinan Nilai Karakter Keruntuhan Bendungan

Tipe Bendungan	Lebar Rata-Rata Rekahan	H:1V	Waktu Keruntuhan (jam)	Lembaga
<i>Earthen/Rockfill</i>	(0,5 – 3,0) HD	0 - 1,0	0,5 - 4,0	USACE 1990
	(1,0 – 5,0) HD	0 - 1,0	0,1 - 1,0	FERC
	(2,0 - 5,0) HD	0 - 1,0	0,1 - 1,0	NWS
	(0,5 - 5,0) HD*	0 - 1,0	0,1 - 4,0*	USACE 2007
<i>Concrete Gravity</i>	<i>Multiple Monoliths</i>	Vertikal	0,1 - 0,5	USACE 1980
	Biasanya $\leq 0,5$ L	Vertikal	0,1 - 0,3	FERC
	Biasanya $\leq 0,5$ L	Vertikal	0,1 - 0,2	NWS
	<i>Multiple Monoliths</i>	Vertikal	0,1 - 0,5	USACE 2007
<i>Concrete Arch</i>	Lebar Seluruhnya		$\leq 0,1$	USACE 1998

	Lebar Seluruhnya	0 - Kemiringan dinding lembah	$\leq 0,1$	FERC
	(0,8 L) - L	0 - Kemiringan dinding lembah	$\leq 0,1$	NWS
	(0,8 L) - L	0 - Kemiringan dinding lembah	$\leq 0,1$	USACE 2007
<i>Slag/Refuse</i>	(0,8 L) - L	1,0 - 2,0	0,1 - 0,3	FERC
	(0,8 L) - L		$\leq 0,1$	NWS
Keterangan: Bendungan dengan volume yang besar, dan panjang puncak bendungan. HD= Tinggi bendungan; L=Panjang puncak bendungan				

Sumber : (Brunner, 2014)

Sejumlah peneliti juga telah mengembangkan persamaan regresi yang berkaitan dengan dimensi keruntuhan termasuk lebar, kemiringan sisi, volume erosi, dan waktu kegagalan. Persamaan tersebut umumnya diperoleh dari data bendungan tanah, bendungan tanah dengan inti kedap air (seperti tanah liat atau beton), serta bendungan batu timbun (*rockfill*). Oleh karena itu, persamaan regresi tersebut tidak sepenuhnya berlaku untuk bendungan beton atau bendungan tanah dengan inti beton. Wahl (1998) menjelaskan beberapa persamaan regresi yang dapat digunakan untuk mengestimasi parameter keruntuhan. Berikut merupakan tabel rangkuman dari persamaan tersebut.

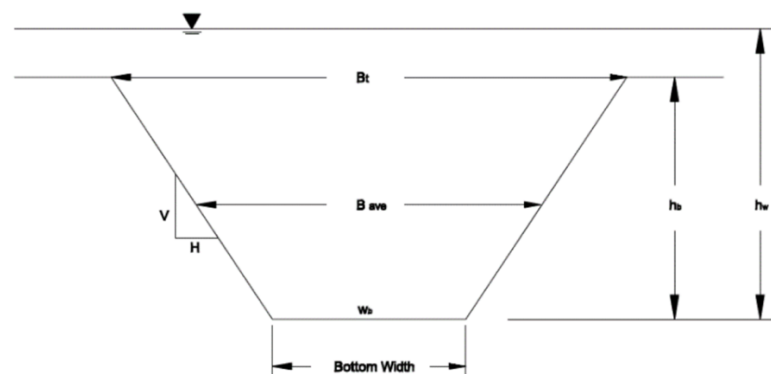
Tabel 2.5 Hubungan Parameter Keruntuhan Berdasarkan Studi Kasus Kegagalan Bendungan

Reference	Number of Case Studies	Relations Proposed (S.I. units: meters, m ³ /s, hours)
Johnson and Illes (1976)		$0.5h_d \leq B \leq 3h_d$ for earthen dams
Singh and Snorrason (1982, 1984)	20	$2h_d \leq B \leq h_d$ $0.15 \text{ meters} \leq d_{\text{ovtop}} \leq 0.61 \text{ meters}$ $0.25 \text{ hours} \leq t_f \leq 1.0 \text{ hours}$
MacDonald and Langridge-Monopolis (1984)	42	<u>Earthfill dams:</u> $V_{er} = 0.0261 (V_{\text{out}} * h_w)^{0.769}$ (best-fit) $t_f = 0.0179 (V_{er})^{0.564}$ (upper envelope) <u>Non-earthfill:</u> $V_{er} = 0.00348 (V_{\text{out}} * h_w)^{0.852}$ (best-fit)
FERC (1987)		B is normally 2-4 h_d B can range from 1-5 h_d $Z = 0.25-1.0$ (engineered, compacted dams)

		$Z = 1 \text{ to } 2$ (non-engineered, slag or refuse dams) $t_f = 0.1\text{--}1 \text{ hours}$ (engineered, compacted earth dams) $0.1\text{--}0.5 \text{ jam}$ (non-engineered, poorly compacted)
Froehlich (1987)	43	$\bar{B}^* = 0.47 K_o (S^*)^{0.25}$ $K_o = 1.4 \text{ overtopping, } 1.0 \text{ otherwise}$ $Z = 0.75 K_c (h_w^*)^{1.75} \bar{W}^{*0.73}$ $K_c = 0.6 \text{ with corewall; } 1.0 \text{ without corewall}$ $t_f = 79(S^*)^{0.47}$
Reclamation (1988)		$B = (3)h_w$ $t_f = (0.011)B$
Singh and Scarlatos (1988)	52	Breach geometry and time of failure tendencies $B_{\text{top}}/B_{\text{bottom}}$ average 1.29
Von Thun and Gillette (1990)	57	B , Z , dan t_f guidance (<i>see discussion</i>).
Dewey and Gillette (1993)	57	Breach initiation model; B , Z , t_f , guidance
Froehlich (1995b)	63	$\bar{B} = 0.1803 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.19}$ $t_f = 0.00254 V_w^{0.55} h_b^{(-0.90)}$ $K_o = 1.4 \text{ overtopping, } 1.0 \text{ otherwise}$

Sumber : (Brunner, 2014)

Karena ketidak pastian variasi bentuk rekahan yang terjadi dan banyak faktor yang berpengaruh terhadap kecepatan erosi pada tubuh bendungan saat terjadinya keruntuhan para peneliti menyederhanakan model keruntuhan bendungan dengan pendekatan bentuk trapesium. Para peneliti yang pernah melakukan penyederhanaan model keruntuhan bendungan dengan pendekatan trapesium tersebut diantaranya adalah Fread dan Harbaugh (1973), Fread (1984), USACE (1978), dan Brunner (2002). Berdasarkan pendekatan model tersebut, parameter keruntuhan dapat diuraikan menjadi lebar rata-rata rekahan, sudut kemiringan rekahan (bentuk trapesium), dan waktu total rekahan. Penyederhanaan model keruntuhan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.13 Deskripsi Parameter Keruntuhan Bendungan

Sumber : (Brunner, 2014)

Pada penelitian ini penulis menggunakan persamaan yang ditemukan oleh Froehlich yang tercantum pada *user guide* di aplikasi HEC-RAS yang sudah digunakan untuk beberapa perhitungan keamanan bendungan. Froehlich pada tahun 2008 meneliti 74 bendungan dengan tipe timbunan tanah, timbunan tanah dengan inti kedap (*clay*), dan timbunan batu untuk mengembangkan persamaan dalam memperkirakan lebar rata-rata rekahan, kemiringan rekahan, dan waktu keruntuhan.

$$B_{ave} = 0.27 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.04} \quad (2.18)$$

$$t_f = 63.2 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}} \quad (2.19)$$

Dimana :

B_{ave} = Lebar rerata rekahan (m)

K_o = Konstanta (1,3 untuk *overtopping*, 1,0 untuk *pipring*)

V_w = Volume waduk saat keruntuhan terjadi (m³)

h_b = Tinggi akhir rekahan (m)

g = Gravitasi (9.81 m/detik²)

t_f = Waktu keruntuhan (detik)

Froehlich menyimpulkan bahwa kemiringan sisi rekahan pada *overtopping* adalah 1H:1V sedangkan untuk *pipring* adalah 0.7H:1V. Berdasarkan penelitian sebelumnya dinyatakan bahwa kapasitas *Spillway* Bendungan Leuwikeris akibat adanya perubahan tutupan lahan pada Sub-DAS Citanduy Hulu dalam kurun waktu 50 tahun kondisinya menjadi tidak aman karena berpotensi besar akan terjadi *overtopping*.