

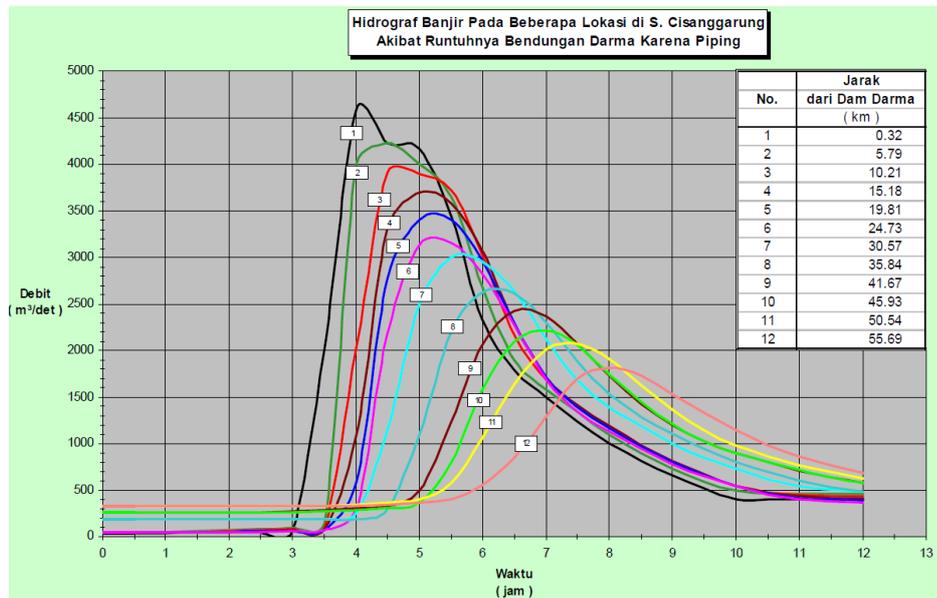
BAB III

LANDASAN TEORI

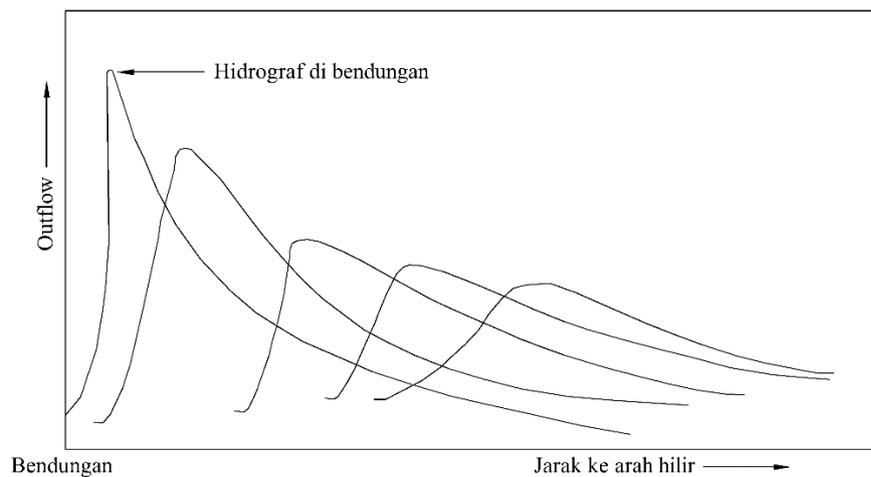
1.1 Banjir

Banjir terjadi dikarenakan peluapan air yang tidak dapat tertampung dalam suatu tampang sungai. Suatu tampang sungai memiliki kapasitas maksimum dalam mengalirkan debit air. Keluarnya sejumlah debit air akibat dari tampang sungai yang tidak mencukupi untuk mengalirkan sejumlah debit tersebut akibat curah hujan yang tinggi, atau runtuhnya bendungan sehingga menutupi kawasan sekitar sungai. Banjir akibat keruntuhan bendungan memiliki sifat yang berbeda dengan banjir biasa, diantaranya puncak banjir yang tinggi dengan waktu yang sangat singkat, waktu puncak banjir sama dengan waktu terbentuknya rekahan, berkisar antara beberapa menit sampai beberapa jam, ciri tersebut mengakibatkan banjir yang dihasilkan mempunyai percepatan jauh lebih besar dari pada banjir biasa (Bambang, 2017). Contoh analisis keruntuhan bendungan akibat *piping* menghasilkan hidrograf banjir pada beberapa lokasi pada hilir Bendungan Darma ditunjukkan pada Gambar 3.1.

Hidrograf banjir akibat keruntuhan bendungan akan diredam saat menjalar ke hilir. Efek peredaman bisa diamati dari pengukuran debit puncak pada tiap titik alur sungai di hilir tinjauan. Perubahan sifat aliran seperti pengurangan debit puncak, melambatnya waktu puncak banjir, dan perubahan bentuk hidrograf disebabkan oleh efek tampungan pada bantaran sungai, adanya gesekan dasar dan tebing sungai, perlambatan kecepatan gelombang banjir, kehilangan debit, penyempitan atau pelebaran tampang sungai, serta adanya bangunan-bangunan pengendali lainnya (Ndun, 2014). Peredaman hidrograf banjir akibat keruntuhan bendungan dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 1 Hidrograf Banjir akibat Runtuhnya Bendungan Darma
(Sumber: Bambang, 2017)



Gambar 3. 2 Peredaman Hidrograf Banjir akibat Keruntuhan Bendungan
(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum, 2011)

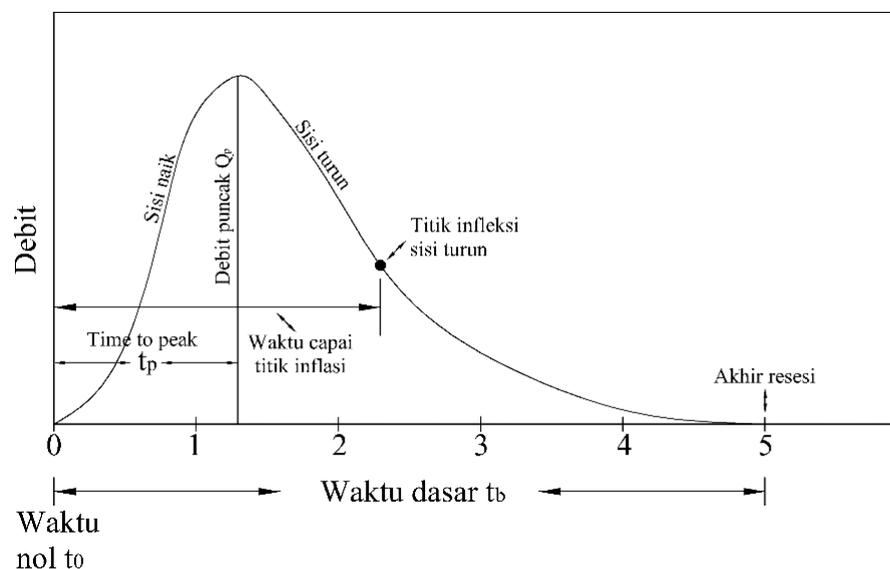
1.2 Hidrograf Banjir

Hidrograf banjir merupakan grafik hubungan antara parameter aliran dengan waktu. Hidrograf terdapat 3 macam yaitu hidrograf muka air (*storage hydrograph*), hidrograf debit (*discharge hydrograph*), dan hidrograf sedimen (*sediment hydrograph*). Sedangkan hidrograf banjir merupakan hubungan antara debit dengan

waktu terjadinya banjir. Dari hidrograf banjir dapat diketahui keterangan sebagai berikut ini.

1. Hubungan antara debit dan lamanya banjir.
2. Daftar debit dengan ketinggian banjir untuk waktu-waktu tertentu.
3. Waktu tiba banjir atau waktu mulai banjir.
4. Waktu yang diperlukan dari mulai banjir sampai banjir maksimum.
5. Waktu yang diperlukan dari banjir maksimum sampai banjir surut.

Gambar hidrograf banjir dapat dilihat pada Gambar 3.3. dibawah ini.



Gambar 3. 3 Komponen Hidrograf Banjir

(Sumber: Triatmodjo, 2010)

1.3 Debit Banjir Maksimum

Sri Harto (2000) menyatakan bahwa bangunan pelimpah suatu bendungan yang menanggung risiko besar harus dirancang untuk dapat melewati debit banjir maksimum Q_{PMF} yang dapat diperoleh dari data terukur atau dengan model hidrologi terpilih dengan masukan berupa hujan maksimum PMP.

1. Hujan maksimum PMP

PMP (*Probable Maximum Precipitation*) diartikan dalam WMO (*World Meteorologi Organization*) merupakan hujan teoritik terbesar dengan lama hujan tertentu yang bisa terjadi di suatu DAS (Daerah Aliran Sungai) tertentu

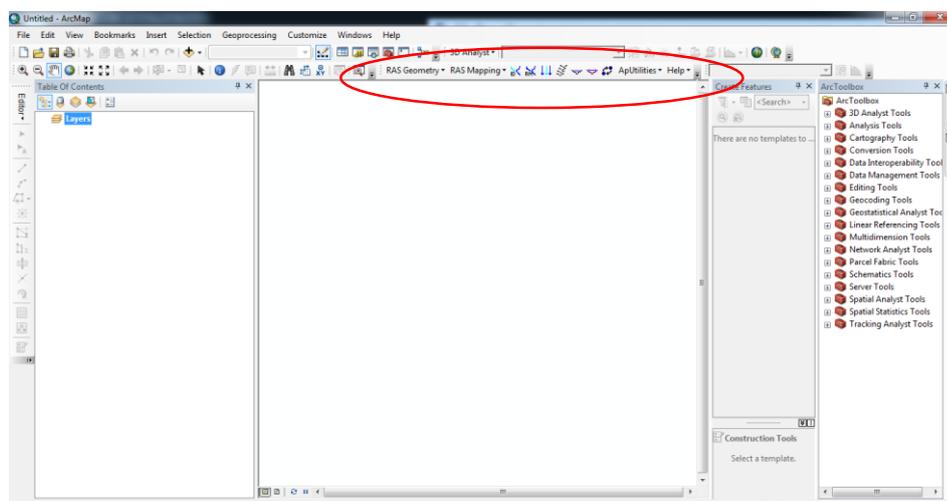
pada waktu tertentu. Dalam mendapat nilai PMP diperlukan data meteorologi yang lengkap dari stasiun hujan yang ada disekitar DAS. Kondisi dimana data meteorologi yang kurang atau perlu perkiraan secara cepat, metode Hershfield merupakan prosedur statistik yang dapat digunakan untuk memperkirakan PMP.

2. Debit banjir PMF

PMF (*Probable Maximum Flood*) dapat didapatkan secara statistik apabila data catatan debit yang tersedia lengkap, namun jika data debit kurang lengkap debit banjir PMF dapat dihasilkan dari pengolahan data hujan terukur menjadi hujan maksimum PMP (Ndun, 2014).

1.4 Program HEC-GeoRAS

HEC-GeoRAS merupakan salah satu *tools* yang ada didalam ArcGIS yang berguna untuk memproses data geospasial. Hasil proses tersebut dapat digunakan sebagai *input* data geometri pemodelan hidraulika pada aplikasi HEC-RAS. Dalam membuat geometri penampang sungai, pengguna harus memilik DEM (*Digital Elevation Model*) dengan resolusi yang tinggi dari sistem sungai. Data DEM tersebut kemudian dikonversi ke dalam format TIN (*Triangulated Irregular Network*). Tampilan *tools* HEC-GeoRAS pada ArcGIS ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Tampilan *tools* HEC-GeoRAS pada ArcGIS

Tools HEC-GeoRAS menyediakan empat menu dan tujuh tombol dengan kegunaan sebagai berikut ini.

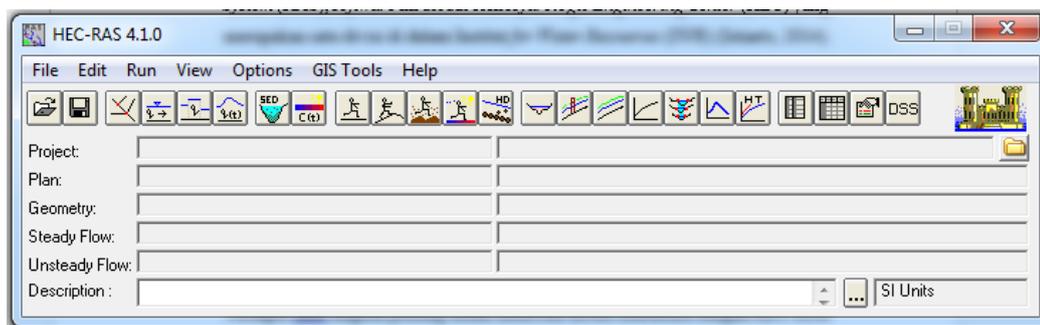
1. *RAS Geometri* untuk mengolah data geometri untuk diimpor ke HEC-RAS.
2. *RAS Mapping* untuk mengolah data hasil simulasi yang diekspor dari HEC-RAS.
3. *ApUtilities* fitur-fitur yang ada di *ApUtilities* dipakai di belakang layar untuk pengaturan *layer* data yang dibuat dengan GeoRAS.
4. *Help* menu yang menyediakan panduan *online* tentang HEC-GeoRAS.
5. *Assign River Code and Reach Code to River* () untuk menamai *river* dan *reach*.
6. *Assign From Station and To Station* () untuk menamai station.
7. *Select Flowpath and Assign Line Type Attributes* () untuk menandai sebuah *linetype* (*Left, Channel, Right*) pada *flowpaths*.
8. *Construct XS Cut Lines* () untuk membuat irisan tegak lurus sungai setiap selang jarak tertentu.
9. *Plot Cross Section* () untuk memplotkan tampang sungai.
10. *Assign Levee Elevation* () untuk memasukkan elevasi tanggul.
11. *Import RAS SDF File* () untuk mengubah hasil HEC-RAS dalam format SDF ke file XML.

1.5 Program HEC-RAS

HEC-RAS merupakan aplikasi untuk memodelkan aliran di sungai, *River Analysis System* (RAS), *software* ini dibuat oleh *Hydrologic Engineering Center* (HEC) yang merupakan satu divisi di dalam *Institut for Water Resources* (IWR) (Istiarto, 2014). HEC-RAS merupakan *software* satu dimensi aliran permanen maupun tak permanen (*steady and unsteady one dimensional flow model*). HEC-RAS memiliki empat komponen analisa hidraulika satu dimensi untuk:

1. hitungan profil muka air aliran permanen,
2. simulai aliran tak permanen,
3. hitungan transport sedimen,
4. hitungan kualitas air.

Tampilan program HEC-RAS versi 4.1.0 ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Tampilan Menu Utama HEC-RAS 4.1.0

Berikut kegunaan tentang beberapa *tools* yang ada dalam *software* HEC-RAS.

1. *Edit/Enter Geometric Data* (📐) untuk membuat dan mengisi data geometri sungai yang akan dimodelkan.
2. *Edit/Enter Unsteady Flow Data* (📊) untuk memasukkan data aliran *unsteady* serta kondisi batas hulu dan hilir.
3. *Perform An Unsteady Flow Simulation* (🏃) untuk *running* simulasi aliran.
4. *View Cross Sections* (📏) untuk melihat potongan melintang sungai.
5. *View Profiles* (📈) untuk melihat potongan memanjang sungai.
6. *View 3D Multiple Cross Section Plot* (📐) untuk melihat penampakan 3D dari pemodelan yang telah dibuat.
7. *View Summary Output Tables by Profile* (📄) untuk melihat hasil *running* berupa tabel.

1.5.1 Prinsip Dasar Aliran

Saluran terbuka dibedakan menjadi saluran buatan (*artificial*) dan saluran alam (*natural*). Saluran buatan dibentuk oleh manusia seperti saluran banjir dan saluran irigasi. Sedangkan saluran alam adalah saluran yang terbentuk secara alami mulai dari anak sungai di pegunungan dan sungai besar sampai dengan muara sungai. Saluran terbuka diklasifikasikan menjadi dua tipe aliran yang dijelaskan sebagai berikut ini.

1. Aliran permanen (*steady flow*).
 - a. Seragam (*uniform*).
 - b. Berubah (*non-uniform*).
 - 1) Berubah lambat laun (*gradually*).
 - 2) Berubah tiba-tiba (*rapidly*).
2. Aliran tidak permanen (*unsteady flow*).
 - a. Seragam (*uniform*).
 - b. Berubah (*non-uniform*).
 - 1) Berubah lambat laun (*gradually*).
 - 2) Berubah tiba-tiba (*rapidly*).

Hitungan hidraulika aliran pada dasarnya adalah mencari kedalaman dan kecepatan aliran di sepanjang alur yang ditimbulkan oleh debit yang masuk kedalam alur dan kedalaman aliran dibatas hilir. Perhitungan hidraulika aliran di dalam HEC-RAS dilakukan dengan membagi aliran ke dalam dua kategori, yaitu aliran permanen dan aliran tak permanen. HEC-RAS menggunakan metode hitungan yang berbeda untuk masing-masing kategori aliran tersebut.

1. Aliran permanen (*steady flow*)

Dalam memodelkan aliran permanen HEC-RAS memakai persamaan energi kecuali di tempat-tempat yang kedalaman alirannya melewati kedalaman kritis, sedangkan di tempat terjadi loncat air, pertemuan alur, dan aliran dangkal melalui jembatan, HEC-RAS memakai persamaan (kekekalan) momentum. Di tempat terjadi terjunan, aliran melalui peluap, dan aliran melalui bendung, HEC-RAS memakai persamaan-persamaan empiris.

a. Persamaan energi

Dalam aliran permanen, HEC-RAS menghitung profil muka air di sepanjang alur urut dari satu tampang lintang ke tampang lintang berikutnya. Muka air dihitung dengan memakai persamaan energi yang diselesaikan dengan metode yang dikenal sebagai *standard step method*. Persamaan energi antara dua tampang lintang ditunjukkan pada Persamaan 3.1 berikut ini.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3.1)$$

dengan:

Y_1, Y_2 : kedalaman aliran,

Z_1, Z_2 : elevasi dasar saluran,

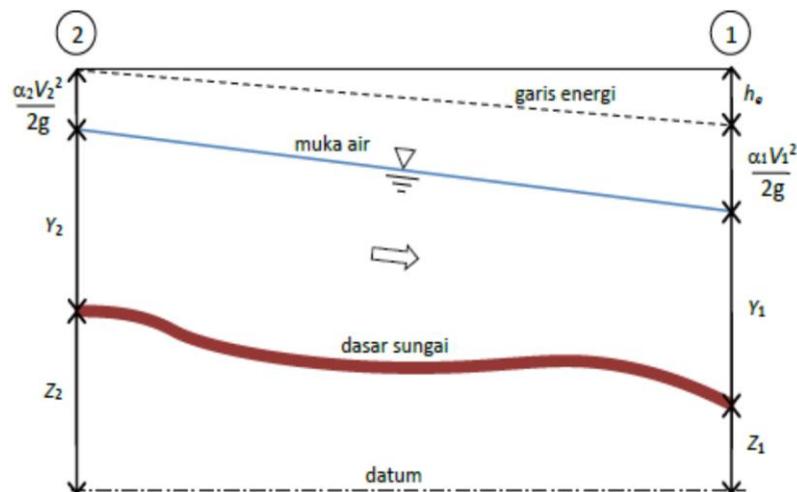
V_1, V_2 : kecepatan rata-rata (debit dibagi luas tampang basah),

α_1, α_2 : koefisien,

g : percepatan gravitasi,

h_e : kehilangan tinggi energi.

Berikut ini diagram aliran berubah beraturan ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Diagram Aliran Berubah Beraturan

(Sumber: Istiarto, 2014)

b. Kehilangan tinggi energi

Kehilangan tinggi energi h_e , di antara dua tampang lintang terdiri dari dua komponen, yaitu kehilangan energi karena gesekan (*friction losses*) dan kehilangan energi karena perubahan tampang (*contraction or expansion losses*). Kehilangan energi antara tampang 2 dan 1 dinyatakan dengan Persamaan 3.2 berikut ini.

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.2)$$

dengan:

L : panjang ruas sungai antar kedua tampang,

S_f : kemiringan gesekan (*friction slope*),

C : koefisien ekspansi dan kontraksi.

Panjang ruas sungai antar dua tampang (jarak sepanjang bentang) L , dinyatakan dengan Persamaan 3.3 berikut ini.

$$L = \frac{L_{lob}Q_{lob} + L_{ch}Q_{ch} + L_{rob}Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (3.3)$$

dengan:

L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} : jarak sepanjang potongan melintang pada aliran yang ditinjau di pinggir kiri sungai/*left overbank* (lob), saluran utama/*main channel* (ch), dan pinggir kanan sungai/*right overbank* (rob),

Q_{lob} , Q_{ch} , Q_{rob} : jarak sepanjang potongan melintang pada aliran yang ditinjau di pinggir kiri sungai (lob), saluran utama (ch), dan pinggir kanan sungai (rob).

c. Kapasitas angkut tampang

Kapasitas angkut dan kecepatan rata-rata di suatu tampang dihitung dengan membagi tampang menjadi beberapa bagian, di setiap bagian kecepatan terbagi merata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.

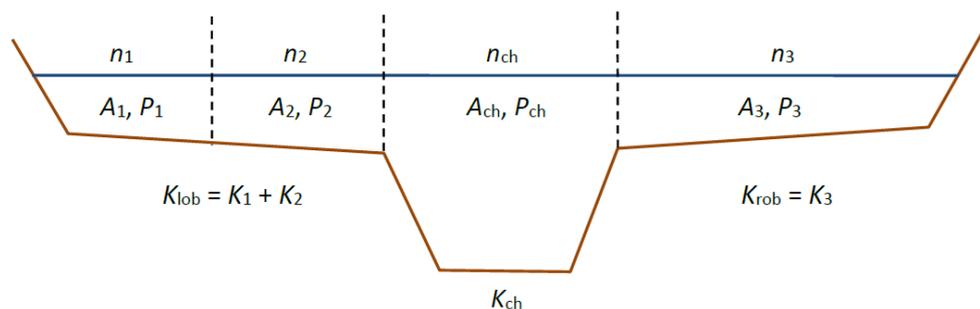
Bagian tersebut dikelompokkan menjadi tiga alur yaitu bantaran kiri (*left overbank*), alur utama (*main channel*), dan alur bantaran kanan (*right overbank*). Alur kiri ataupun alur kanan dapat terdiri dari beberapa bagian, sedangkan alur utama umumnya terdiri dari satu bagian tampang. Nilai koefisien *manning* ditetapkan di setiap bagian tampang tersebut. Setiap tampang kapasitas angkut dihitung dengan memakai persamaan manning yang dinyatakan pada Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.5 berikut ini.

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (3.4)$$

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (3.5)$$

dengan:

- K : kapasitas angkut tiap bagian tampang,
- n : koefisien kekasaran *manning* tiap bagian tampang,
- A : luas tampang basah tiap bagian tampang,
- R : radius hidraulik tiap bagian tampang.



Gambar 3. 7 Pembagian Tampang Kapasitas Angkut

(Sumber: Istiarto, 2014)

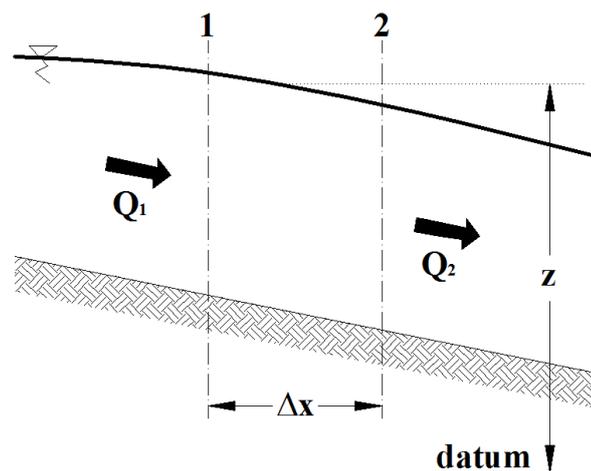
2. Aliran tidak permanen (*unsteady flow*)

Dalam aliran tak permanen, HEC-RAS memakai persamaan kekekalan massa (*continuity, conservation of mass*) dan persamaan momentum. Kedua persamaan dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial yang kemudian diselesaikan dengan metode *finite difference approximation* berskema implisit.

Aliran di saluran atau sungai merupakan proses fisik yang mengikuti hukum kekekalan massa dan kekekalan momentum. Proses fisik ini dapat digambarkan dengan persamaan matematik, yang dikenal sebagai Persamaan St. Venant. Persamaan St. Venant terdiri dari persamaan kontinuitas (prinsip konservasi massa) dan persamaan momentum (prinsip konservasi momentum) yang dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial sebagai berikut ini.

a. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas untuk aliran tidak permanen dapat diuraikan dengan mengguakan kerangka volume kontrol seperti pada Gambar 3.8 berikut.



Gambar 3. 8 Kerangka Volume Kontrol

Volume kontrol ini adalah pias air dibatasi sehingga debit air masuk dan keluar dapat diamati secara detail. Tujuan bidang antara pias 1 dan pias 2 memiliki nilai debit air Q_1 dan Q_2 . Permukaan air bebas, sehingga Q_1 tidak selalu sama dengan Q_2 , perbedaan tersebut dapat dinyatakan pada Persamaan 3.6 berikut ini.

$$Q_1 - Q_2 = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \quad (3.6)$$

Dimana Q_1 adalah debit masuk volume kontrol, Q_2 adalah debit keluar volume kontrol, Δx adalah pias volume kontrol, dan $\frac{\partial Q}{\partial x}$ adalah kecepatan perubahan nilai Q sepanjang Δx . Besar perubahan di sepanjang Δx tersebut dapat dinyatakan dalam Persamaan 3.7 berikut ini.

$$\frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (3.7)$$

Jika nilai persamaan 3.6 dan persamaan 3.7 besarnya sama tetapi berlawanan tanda, maka akan didapat persamaan kontinuitas untuk persamaan aliran tak tetap sebagaimana Persamaan 3.8.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.8)$$

Jika terdapat debit air masuk (*lateral inflow*) di sepanjang Δx maka menjadi Persamaan 3.9.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_1 \quad (3.9)$$

dengan:

A : luas penampang basah (m^2),

Q : debit aliran (m^3/dt),

q_1 : debir air masuk (*aliran inflow*) per satuan panjang dari kiri dan kanan sungai ($m^3/dt/m$),

x : jarak memanjang sungai (m),

t : waktu (dt).

b. Persamaan Momentum

Suatu aliran terbuka juga harus memenuhi hokum kekekalan momentum. Hokum kekekalan momentum pada aliran tidak permanen dituliskan pada Persamaan 3.10 sebagai berikut.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (3.10)$$

dengan:

A : luas penampang basah (m²),

Q : debit aliran (m³/dt),

g : percepatan gravitasi (m/dt²),

x : jarak memanjang sungai (m),

z : tinggi muka air (m),

t : waktu (dt),

S_f : kemiringan garis energi (*friction slope*), dihitung dengan persamaan *manning* pada Persamaan 3.11.

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^2} \quad (3.11)$$

dengan:

n : koefisien kekasaran *manning*,

R : radius hidraulik.

1.5.2 Langkah Pemodelan

Terdapat lima langkah penting dalam membuat model hidraulika dengan HEC-RAS berikut ini.

1. Pembuatan *project*

Agar memudahkan pengguna dalam melakukan pemodelan ada beberapa hal yang harus diatur, pengaturan yang sebaiknya dilakukan antara lain *Program Setup | Default Project Folder, Default Project Parameters | Expansion and Contraction Coef*, serta *Unit System (US Customary/SI)*.

2. Memasukkan data geometri sungai

Parameter geometri sungai yang dibutuhkan dalam pemodelan adalah penggambaran sistem sungai berdasarkan keadaan di lapangan, penampang sungai, meliputi data *stasioning* suatu penampang, elevasi, daerah bantaran

sungai, halangan (*obstacle*), tanggul, dan bendungan serta koefisien kekasaran *Manning* yang ditentukan berdasarkan kondisi dan kenampakan material alur sungai.

3. Memasukkan data aliran dan kondisi batas

Data aliran dimasukkan langsung ke dalam tabel, data tersebut dimasukkan dari hulu ke hilir. Setelah data aliran dimasukkan, besarnya aliran dianggap tetap sampai menemui lokasi yang memiliki nilai aliran yang berbeda. Aliran dapat berupa aliran *sub kritis*, *superkritis*, atau gabungan dari keduanya. Setelah semua data aliran dimasukkan, langkah selanjutnya adalah kondisi batas yang mungkin dibutuhkan. Kondisi batas diperlukan untuk menentukan permukaan air mula-mula di ujung-ujung sistem sungai (hulu dan hilir). Muka air awal dibutuhkan untuk memulai perhitungan. Pada rezim aliran *sub kritis*, kondisi batas hanya diperlukan di ujung sistem sungai bagian hilir. Jika rezim aliran *superkritis* yang hendak dihitung, kondisi batas hanya diperlukan pada ujung hulu dari sistem sungai. Jika perhitungan rezim aliran campuran yang akan dibuat, kondisi batas harus dimasukkan pada kedua ujung sistem sungai. Pada aliran *steady*, *Boundary Condition* yang perlu dimasukkan adalah data yang ada di hulu maupun di hilir sungai dengan cara mengklik salah satu ikon *Known W.S.*, *Critical Depth*, *Normal Depth*, dan *Rating Curve*. Data yang dimasukkan harus sesuai dengan kondisi yang ada dan pada kondisi puncak. Jika memilih *Known W.S.* berarti mengetahui muka air di hilir saluran, jika memilih *Critical Depth* berarti pengguna mengasumsikan bahwa di hilir saluran akan terjadi muka air kritis, sedangkan apabila memilih *Normal Depth*, akan diminta untuk memasukkan kemiringan dasar saluran (*slope*), dan jika memilih *rating curve*, berarti pengguna sudah memiliki data elevasi vs debit, yang biasanya terdapat pada bendung.

Pada aliran *unsteady*, *Boundary Condition* data yang dimasukkan hampir sama dengan kondisi batas pada aliran *steady*. Hanya saja, data yang dimasukkan bukan hanya pada kondisi puncak melainkan data aliran tiap waktu. Data yang dimasukkan bisa tiap detik, menit, jam, hari bahkan bulan. Untuk *Boundary Condition* pada *unsteady* dibedakan menjadi 2 yaitu kondisi batas di

hulu (*upstream boundary conditions*) dan kondisi batas hilir (*downstream boundary conditions*). *Upstream boundary conditions* diperlukan pada akhir hulu dari semua *reach* yang tidak terhubung ke *reach* lain atau *storage areas*. Kondisi batas hulu diterapkan sebagai hidrograf aliran debit terhadap waktu (*Flow Hydrograph*). Sementara untuk *downstream boundary conditions* diperlukan pada akhir hilir yang tidak terhubung ke *reach* lain ataupun *storage area*. Terdiri dari 4 kondisi dari *downstream boundary conditions* yaitu *Stage Hydrograph*, *Flow Hydrograph*, *Single-Valued Rating Curve*, dan *Normal Depth*. Pada aliran *unsteady*, selain data *boundary condition*, data *initial conditions* juga harus dimasukkan. Data *initial condition* ini merupakan asumsi aliran pada jam ke-nol.

4. Perhitungan hidraulika aliran

Hitungan penelusuran aliran banjir (*hydraulic flood routing*) dengan syarat batas dan syarat awal yang telah disiapkan dilakukan melalui menu *Run*.

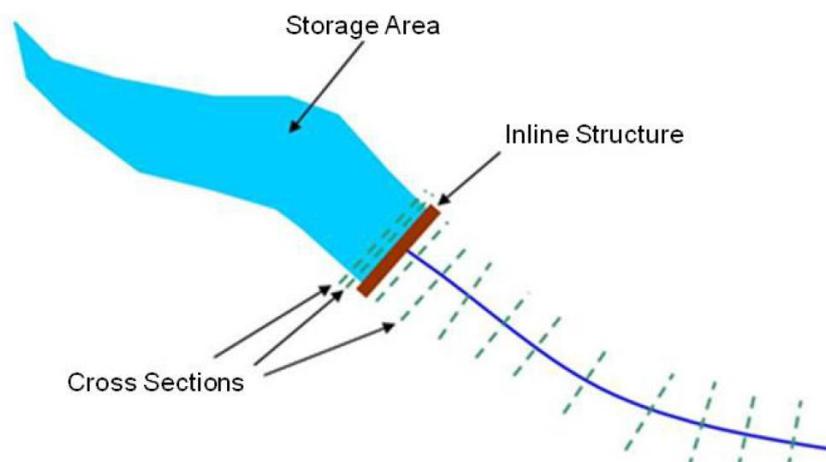
5. Presentasi hasil hitungan

HEC-RAS menampilkan hasil hitungan dalam bentuk grafik atau tabel. Presentasi dalam bentuk grafik dipakai untuk menampilkan tampang lintang di suatu *River Reach*, tampang panjang (profil muka air sepanjang alur), kurva ukur debit, gambar perspektif alur, atau hidrograf. Presentasi dalam bentuk tabel dipakai untuk menampilkan hasil rinci berupa angka (nilai) variabel di lokasi/titik tertentu atau di sepanjang alur. Pada setiap layar tampilan hasil hitungan/simulasi disediakan menu *Options*. Menu ini untuk mengatur tampilan. Pengguna dapat memilih *plan*, parameter, variabel, atau ruas sungai yang ditampilkan.

1.5.3 Penelusuran *Inflow* ke Kolam Waduk

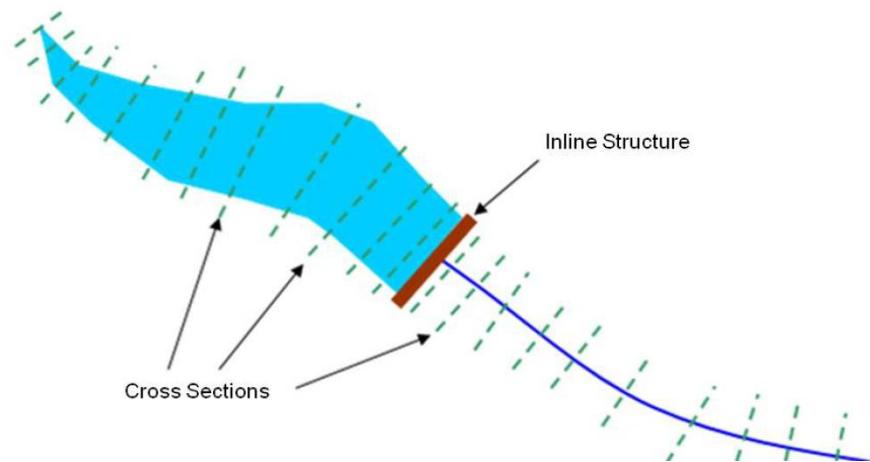
HEC-RAS dalam penelusuran *inflow* ke kolam waduk terdapat dua jenis metode yaitu *level pool routing* dan *dynamic wave routing*. Apabila tidak memungkinkan untuk melakukan penelusuran dengan metode *dynamic wave routing* atau jika terdapat anggapan kedua metode tersebut perbedaannya sangat kecil, maka *level pool routing* dapat diaplikasikan dalam HEC-RAS (Brunner,

2014). Pada metode *level pool routing* kurva karakteristik hubungan elevasi muka air dengan volume dalam waduk harus didefinisikan terlebih dahulu. Area tampungan waduk pada metode ini ditempatkan sebagai kondisi batas hulu dalam pemodelan. *Level pool routing* menganggap profil muka air pada kolam waduk selalu datar dan penurunannya secara serempak ketika terjadi keruntuhan bendungan (Widiantoro, 2017). Berikut gambaran mengenai penelurusan *inflow* ke waduk dengan metode *level pool routing* dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Penelurusan *Inflow* ke Waduk Metode *Level Pool Routing*
(Sumber: Brunner, 2014)

Metode *dynamic wave routing* memodelkan area tampungan waduk menjadi sejumlah penampang satu dimensi seperti dalam pemodelan penggal sungai di hilir. Hidrograf *inflow* yang telah dihitung sebelumnya dalam analisis hidrologi dimasukkan sebagai batas hulu pada penampang paling hulu area tampungan. Ketika terjadi keruntuhan bendungan, muka air waduk akan turun secara signifikan dengan membentuk suatu kemiringan permukaan air ke arah lubang rekahan. Fenomena tersebut dapat terakomodir dengan menerapkan *dynamic wave routing*. Berikut gambaran mengenai penelurusan *inflow* ke waduk dengan metode *dynamic wave routing* dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Penelusuran *Inflow* ke Waduk Metode *Dynamic Wave Routing*
(Sumber: Brunner, 2014)

1.6 Parameter Keruntuhan Bendungan

Keruntuhan bendungan diawali dengan rekahan (*breach*) yang terbentuk pada tubuh bendungan. Rekahan adalah bukaan yang terbentuk pada proses runtuhnya tubuh bendungan. Mekanisme keruntuhan bendungan tidak dapat dipahami dengan baik dan dapat diperkirakan. Keruntuhan bendungan dapat disimulasikan dengan anggapan bendungan runtuh secara total dan mendadak. Asumsi rekahan total dan secara mendadak ini digunakan untuk mempermudah jika diterapkan dalam teknik matematika untuk menganalisis gelombang banjir dari keruntuhan bendungan.

Costa (1985) melaporkan bahwa 35% keruntuhan bendungan disebabkan oleh *overtopping*, 38% diakibatkan oleh *piping*, 21% diakibatkan oleh kegagalan fondasi, dan 6% oleh penyebab lainnya.

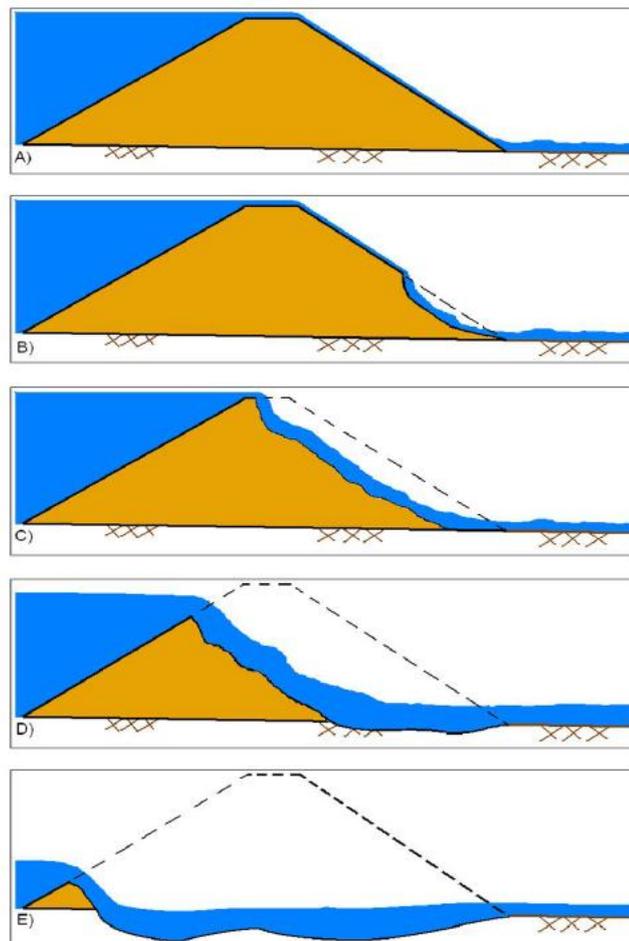
Berbagai variasi bentuk rekahan yang mungkin terjadi dan banyaknya faktor yang berpengaruh pada kecepatan erosi pada tubuh bendungan sangat sulit untuk dijelaskan dalam formulasi matematika eksak. Karena tingkat kesulitan tersebut, beberapa peneliti membuat penyederhanaan model keruntuhan bendungan dengan pendekatan bentuk trapesium seperti yang pernah diaplikasikan pada penelitian Fread dan Harbaugh (1973), Fread (1984), *USACE* (1978), Brunner (2002), dan Froehlich (2008). Wahl (2004) juga menyarankan bentuk trapesium sebagai

pendekatan model keruntuhan bendungan yang kemudian diuraikan menjadi lebar dasar rekahan, sudut kemiringan sisi rekahan, dan lebar rerata rekahan.

Hanson dkk. (2005) membagi proses keruntuhan *overtopping* menjadi tahapan sebagai berikut:

1. proses penggerusan pertama dimulai pertama pada sisi bagian hilir bendungan,
2. penggerusan kaki lereng pada bagian hilir bendungan,
3. penggerusan menjalar sampai dengan ke puncak bendungan,
4. rekahan awal terjadi saat gerusan memasuki tampungan waduk,
5. terjadi ekspansi lateral dari rekahan sampai kolam waduk kosong.

Tahapan proses keruntuhan akibat *overtopping* ditunjukkan pada Gambar 3.11.



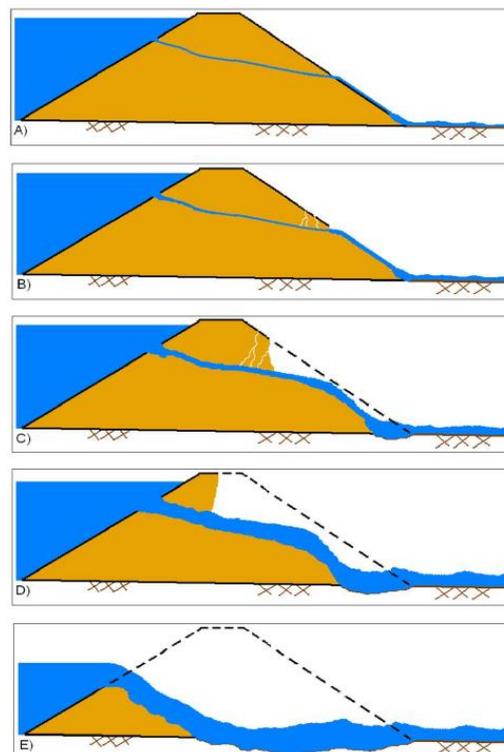
Gambar 3. 11 Tahapan Proses Keruntuhan akibat *Overtopping*

(Sumber: Brunner, 2014)

Brunner (2014) membagi proses keruntuhan bendungan akibat *piping* dengan tahapan sebagai berikut:

1. ukuran lubang dalam tubuh bendungan bertambah seiring dengan aliran air yang membawa material erosi internal dan aliran air dimodelkan sebagai aliran bertekanan dalam lubang,
2. proses aliran *piping*, erosi, dan penggerusan mulai terjadi pada sisi hilir bendungan,
3. saat lubang semakin besar material yang berada di atasnya akan lepas dan jatuh ke dalam aliran air,
4. proses penggerusan dan jatuhnya material yang berada di atasnya akan menjalar ke arah sisi hulu bendungan bersamaan dengan bertambahnya lubang *piping*,
5. transisi hidraulika aliran terjadi dari tipe aliran bertekanan dalam lubang menjadi tipe aliran terbuka di atas ambang dan rekahan tumbuh sampai batas maksimal sesuai dengan volume tampungan waduk.

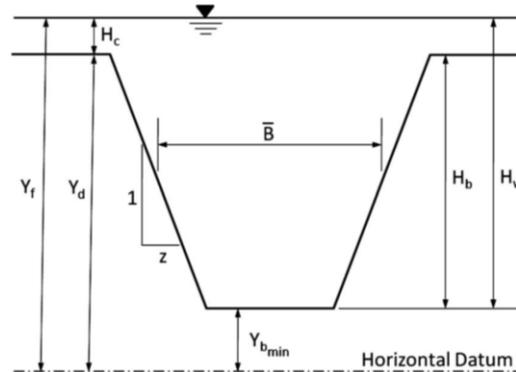
Tahapan proses keruntuhan akibat *piping* ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Tahapan Proses Keruntuhan akibat *Piping*

(Sumber: Brunner, 2014)

Parameter keruntuhan bendungan yang mempengaruhi sifat hidrograf banjir yang ditimbulkan tepat di sebelah hilir bendungan dapat disederhanakan seperti pada Gambar 3.13 dibawah ini.



Gambar 3. 13 Penyederhanaan Model Keruntuhan Bendungan

(Sumber: Froehlich, 2008)

Parameter keruntuhan dapat dicari dengan pendekatan *regresi* dari data kejadian kejadian keruntuhan Froehlich (2008) menyarankan beberapa persamaan untuk memperoleh parameter keruntuhan yang ditunjukkan pada Persamaan 3.12 dan Persamaan 3.13 berikut ini.

$$\bar{B} = 0,27K_0V_w^{0,32}H_b^{0,04} \quad (3.12)$$

$$t_f = 63,2\sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}} \quad (3.13)$$

dengan:

\bar{B} : lebar rerata rekahan (m),

t_f : waktu formasi rekahan (detik),

V_w : volume waduk saat keruntuhan (m^3),

H_b : tinggi akhir rekahan (m),

K_0 : konstanta (1,3 untuk keruntuhan *overtopping* dan 1,0 untuk *piping*).

g : percepatan gravitasi ($9,80665 \text{ m/s}^2$)

Froehlich (2008) menggunakan kemiringan sisi rekahan sebesar 1,0:1,0 (H:V) untuk tipe keruntuhan *overtopping* dan 0,7:1,0 (H:V) untuk tipe keruntuhan *piping*. Lebar rekahan pada puncak dan dasar dapat dituliskan dengan Persamaan 3.14 dan Persamaan 3.15 berikut ini.

$$B_t = \bar{B} + zH_b \quad (3.14)$$

$$B_b = \bar{B} - zH_b \quad (3.15)$$

dengan:

B_t : lebar rekahan pada puncak (m),

B_b : lebar rekahan pada dasar (m),

z : kemiringan rekahan (H:V).

Beberapa badan Pemerintah Faderal Amerika Serikat telah mempublikasikan petunjuk penentuan angka kisaran parameter keruntuhan bendungan yang mungkin terjadi. Apabila hasil parameter yang diperoleh dari pendekatan persamaan regresi tidak sesuai dengan kondisi topografi dan geologi lapangan, maka kisaran angka yang telah ditetapkan tersebut dapat digunakan sebagai batas minimum dan maksimum untuk mengestimasi parameter keruntuhan bendungan. Prediksi dalam menentukan parameter keruntuhan bendungan ditunjukkan pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3. 1 Perkiraan Karakteristik Keruntuhan Bendungan

Tipe Bendungan	Lebar Rata Rata Rekahan	Kemiringan Rekahan (H:V)	Waktu Keruntuhan (Jam)	Badan Federal
<i>Earthen/Rockfill</i>	$(0,5-3,0) \times HD$	0 - 1,0	0,5 - 4,0	USACE
	$(1,0-5,0) \times HD$	0 - 1,0	0,1 - 1,0	FERC
	$(2,0-5,0) \times HD$	0 - 1,0 (<i>slightly larger</i>)	0,1 - 1,0	NWS

(Sumber: Brunner, 2014)

HD : tinggi bendungan

1.7 Koefisien Kekasaran *Manning*

Brunner (2010) nilai koefisien kekasaran *manning* sangat bervariasi dan bergantung pada beberapa faktor seperti:

1. kekasaran permukaan,
2. vegetasi,
3. ketidakteraturan saluran,
4. alinyemen saluran,
5. penggerusan dan deposisi,
6. struktur penghambat,
7. ukuran dan bentuk dari saluran,
8. tinggi muka air dan debit,
9. perubahan musim,
10. temperature.

Pemilihan nilai koefisien kekasaran *manning* berpengaruh pada hasil komputasi profil muka air. Chow (1959) dalam Brunner (2010) memberikan angka minimum, normal, dan maksimum yang seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Perkiraan Nilai *Manning* pada Saluran Alam

Saluran Alam		Minimum	Normal	Maksimum
1.	Sungai Utama			
	a. Bersih, lurus, penuh, tidak ada celah palung sungai.	0,025	0,030	0,033
	b. Sama seperti (1.a), ditambah dengan batu dan gulma	0,030	0,035	0,040
	c. Bersih, berliku-liku, ada beberapa kolam dan dangkalan.	0,033	0,040	0,045
	d. Sama seperti (1.c), ditambah dengan beberapa batu dan gulma.	0,035	0,045	0,050
	e. Sama seperti (1.d), lebih dangkal. Ada beberapa kemiringan saluran dan tampang yang tidak efektif	0,040	0,048	0,055

Lanjutan Tabel 3.2 Perkiraan Nilai *Manning* pada Saluran Alam

Saluran Alam		Minimum	Normal	Maksimum
	f. Bersih, lurus, penuh, tidak ada celah palung sungai.	0,025	0,030	0,033
	g. Sama seperti (1.a), ditambah dengan batu dan gulma	0,030	0,035	0,040
	h. Bersih, berliku-liku, ada beberapa kolam dan dangkalan.	0,033	0,040	0,045
	i. Sama seperti (1.c), ditambah dengan beberapa batu dan gulma.	0,035	0,045	0,050
	j. Sama seperti (1.d), lebih dangkal. Ada beberapa kemiringan saluran dan tampang yang tidak efektif	0,040	0,048	0,055
	k. Sama seperti (1.d), lebih banyak batunya.	0,045	0,050	0,060
	l. Penggal sungai yang lambat, bergulma, dan berpaling.	0,050	0,070	0,080
	m. Penggal sungai dengan banyak gulma, palung, alur banjir dengan banyak pohon berbatang keras dan semak-semak.	0,070	0,100	0,150
2.	Dataran banjir			
	a. Padang rumput tanpa semak			
	1. Rumput pendek	0,025	0,030	0,035
	2. Rumput tinggi	0,030	0,035	0,050
	b. Area pertanian/budidaya			
	1. Tidak ada tanaman	0,020	0,030	0,040
	2. Tanaman dewasa satu baris	0,025	0,035	0,045
	3. Tanaman dewasa satu bidang	0,030	0,040	0,050
	c. Semak-semak			
	1. Semak-semak yang tersebar dan banyak gulma	0,035	0,050	0,070
	2. Semak-semak ringan dan pepohonan kecil pada musim dingin	0,035	0,050	0,060

Lanjutan Tabel 3.2 Perkiraan Nilai *Manning* pada Saluran Alam

Saluran Alam		Minimum	Normal	Maksimum
	3. Semak-semak ringan dan pepohonan kecil pada musim panas	0,040	0,060	0,080
	4. Semak-semak medium- rimbun pada musim dingin	0,045	0,070	0,110
	5. Semak-semak medium- simbun pada musim panas	0,070	0,100	0,160
	d. Pepohonan			
	1. Lahan yang dibuka dengan tunggul pohon, dan tidak ada tunas yang tumbuh	0,030	0,040	0,050
	2. Sama dengan (2.d.1), tetapi dengan banyak tunas yang tumbuh	0,050	0,060	0,080
	3. Banyak pohon berbatang keras, sedikit pohon muda, elevasi aliran masih di bawah cabang- ranting pohon	0,080	0,100	0,120
	4. Sama dengan (II.d3), tetapi elevasi aliran sampai dengan cabang- ranting pohon	0,100	0,120	0,160
	5. Banyak pohon Willow pada musim panas	0,110	0,150	0,200
3.	Saluran di pegunungan, tidak ada vegetasi pada saluran, kemiringan dasar curam, dengan pepohonan dan semak-semak yang terendam di tampungan			
	a. Dasar: <i>gravels</i> , <i>cobbles</i> , dan sedikit <i>boulders</i>	0,030	0,040	0,050
	b. Dasar: <i>cobbles</i> dengan banyak <i>boulders</i>	0,040	0,050	0,070

(Sumber: Brunner, 2014)

1.8 Sistem Siaga Bertingkat

Dalam Pedoman Penyiapan Rencana Tindak Darurat tahun 1998. Siaga bendungan adalah setiap perkembangan kondisi bahaya yang merupakan ancaman bagi keamanan bendungan yang dapat mengarah kepada runtuhnya bendungan. Untuk bendungan yang memiliki potensi bahaya yang tinggi, pemilik bendungan wajib memasang sistim peringatan dini, sebagai tanggung jawab terhadap keselamatan penduduk yang bermukim di bagian hilir bendungan.

Untuk menentukan sistem peringatan dini dibutuhkan perangkat dan tingkat komunikasi. Sebagai contoh, melalui peringatan sirene. Jika penduduk mendengarkan sirene, kemudian mengikuti perkembangan keadaan darurat selanjutnya melalui radio. Untuk mengaktifkan sistem pemberitahuan, diperlukan kerjasama antara Pemerintah Daerah setempat dengan Pengelola Bendungan. Keadaan darurat bisa terjadi dengan kondisi yang bermacam-macam, dan kadang-kadang tingkat bahayanya sukar untuk diperkirakan. Kondisinya bisa lambat, dan bisa terjadi secara mendadak dan sangat berbahaya. Untuk keselamatan penduduk di bagian hilir bendungan, diperlukan kegiatan yang sesuai dengan perkembangan keadaan darurat dengan mengaplikasikan Sistem Siaga Bertingkat.

Terjadinya keadaan darurat dengan kondisi yang bermacam-macam, dan tingkat kerusakannya sukar untuk diperkirakan. Kondisinya bisa lambat dalam perkembangannya, atau keadaannya tidak berubah, dan bisa juga tiba-tiba terjadi kondisi yang sangat berbahaya, dimana diperlukan segera suatu kegiatan untuk menyelamatkan penduduk dari bencana. Organisasi yang bertanggung jawab akan bereaksi atau kurang bereaksi atas situasi yang gawat, dan hal ini tergantung kepada keakuratan dan ketepatan informasi yang diterima mengenai gawatnya situasi.

Pelaksanaan tugas untuk tingkat siaga keadaan darurat tertentu harus disusun berdasarkan kriteria sebagai berikut ini.

1. Observasi atas kejadian.
2. Identifikasi mengenai kejadian.
3. Analisa kejadian.
4. Parahnya suatu kejadian.
5. Kapan kejadian terjadi.

Agar tidak bereaksi berlebihan atau kurang bereaksi atas kejadian darurat, maka keadaan darurat perlu diklasifikasikan setelah dilakukan observasi terhadap keadaan ke dalam tiga klasifikasi sebagai berikut ini.

1. Tingkat Siaga III

Tingkat siaga III merupakan tingkat siaga yang paling rendah. Pengumuman mengenai Tingkat III berarti bahwa organisasi terkait agar siap menghadapi kegiatan keadaan darurat. Tidak ada kegiatan yang menonjol yang perlu dilakukan dalam tingkat siaga ini, kecuali tetap waspada setelah ditemukan dan diobservasi serta dianalisa perkembangan kejadiannya.

2. Tingkat Siaga II

Dengan diumumkannya Tingkat II, maka organisasi terkait harus dalam keadaan siap, sebab kondisinya semakin serius dibandingkan Tingkat I. Dalam Tingkat Siaga II, bendungan belum kadaan gagal atau kemungkinan sebentar lagi terjadi kegagalan. Hal ini berarti bahwa keadaan akan menjadi parah dan mungkin diperlukan pengungsian bila keadaan tidak terkendali.

3. Tingkat Siaga I

Dengan diumumkannya Tingkat Siaga I, hal ini berarti bahwa semua organisasi terkait harus “Lakukan Kegiatan”, sebab tingkat siaga ini adalah tingkat yang paling berbahaya. Pengumuman pelaksanaan Tingkat Siaga I ini operasi penyelamatan ancaman terhadap jiwa manusia dilakukan, kerusakan besar pada struktur akan terjadi, atau kondisi fisik bendungan menurun, sehingga pengadaan stabilisasi tidak mungkin dilakukan dan bendungan akan runtuh. Penduduk yang terkena dampak bahaya keruntuhan bendungan perlu segera diungsikan ke tempat yang sudah ditentukan.