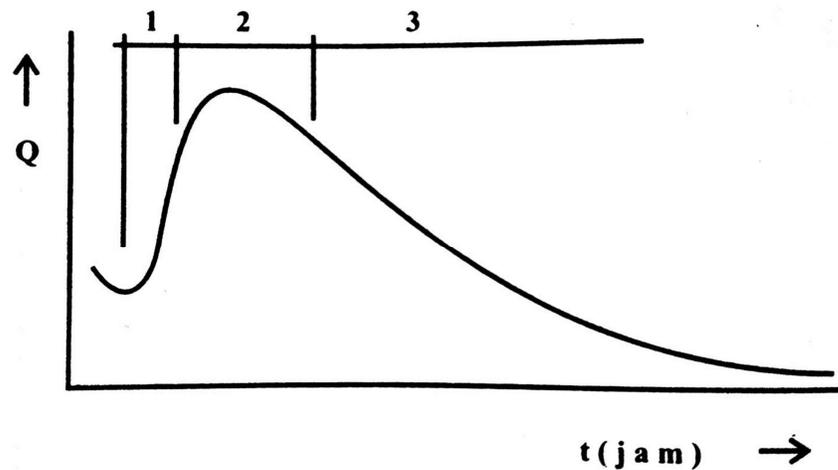


BAB III LANDASAN TEORI

3.1 Hidrograf Banjir

Menurut Sri Harto (2009) secara umum hidrograf diartikan sebagai variabilitas salah satu unsur aliran sebagai fungsi waktu di suatu titik kontrol tertentu. Hidrograf memiliki beberapa macam yaitu hidrograf tinggi muka air (*stage hydrograph*), hidrograf debit (*discharge hydrograph*), hidrograf kecepatan (*velocity hydrograph*), hidrograf sedimen (*sediment hydrograph*), hidrograf polutan (*polutan hydrograph*). Dalam pelaksanaannya yang dimaksud dalam hidrograf adalah hidrograf debit, kecuali disebutkan lainnya.



Gambar 3.1 Bagian-Bagian Hidrograf

(Sumber: Sriharto, 2000)

Pada dasarnya hidrograf dibagi menjadi tiga bagian pokok seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.1 di atas. Bagian 1 adalah sisi naik (*rising limb*), bagian 2 adalah puncak dari hidrograf (*crest*), dan bagian 3 adalah sisi turun atau resesi (*recession limb*). Pada bagian sebelum bagian 1 merupakan bagian akhir hidrograf sebelumnya atau disebut sebagai *approach segment*. Pada bagian resesi

atau sisi turun sebenarnya terdiri dari dua bagian, bagian atas yang mendekati puncak merupakan gabungan antara limpasan permukaan dan aliran antara. Sedangkan bagian bawah dari sisi resesi pada suatu titik tertentu merupakan aliran dasar yang bersumber dari pengatusan (*draining*) air tanah (akifer).

3.2 Debit Maksimum *Inflow*

Bangunan pelimpah pada bendungan berfungsi untuk melewati aliran banjir yang masuk ke bendungan apabila kapasitas tampungan waduk sudah maksimum. Apabila bangunan pelimpah tidak dapat melewati banjir dari hulu bendungan, maka air akan mengalir melalui puncak bendungan yang kemudian akan turun dan menggerus kaki pada tubuh bendungan di bagian hilir atau disebut dengan *overtopping*. Menurut Sri Harto (2009) setiap bangunan hidraulik harus dirancang sesuai dengan aturan dan syarat-syarat tertentu untuk besaran rancangannya, baik debit rancangannya (*design discharge*) maupun hujan rancangannya (*design rainfall*). Bangunan pelimpah dirancang berdasarkan besaran yang disebut *Probable Maximum Flood* (PMF) yang diolah dari data masukan berupa *Probable Maximum Precipitation* (PMP).

1. Debit Banjir PMF

Probable Maximum Flood (PMF) adalah banjir maksimum yang dapat terjadi di suatu daerah dengan durasi tertentu. Menurut Sri Harto (2009) debit banjir PMF dapat dihitung atau didefinisikan secara statistik apabila data catatan debit yang tersedia cukup panjang. Jika data debit tidak lengkap Q_{PMF} bisa ditetapkan dari hasil pengolahan data hujan terukur menjadi hujan maksimum PMP.

2. Hujan Maksimum PMP

Sumarto (1995) mendefinisikan PMP (*Probable Maximum Precipitation*) sebagai kemungkinan hujan terbesar secara meteorologis dengan durasi tertentu pada suatu daerah pengaliran. Apabila terdapat kekurangan data meteorologis seperti data angin dan titik embun, maka dapat dilakukan perhitungan dengan pendekatan statistik. Untuk memperoleh nilai PMP dari pendekatan statistik, diperlukan data hujan yang cukup banyak. Siharto (2000) menjelaskan prosedur untuk melakukan perhitungan PMP beberapa konsultan

seperti SMEC, JICA, ACE, ELC, McDonald, DHV, dan Indra Karya mengadopsi besaran PMP untuk proyek di Pulau Jawa pada kisaran 650mm-800mm. Sedangkan Colenco Ltd menyarankan nilai PMP untuk seluruh Pulau Jawa adalah 800mm.

3.3 Penelusuran Banjir Hilir

Penelusuran banjir yang merambat menelusuri lembah sungai mengalami perubahan sifat aliran seperti pengurangan debit puncak, melambatnya kedatangan puncak banjir, serta perubahan bentuk hidrograf banjir. Hal tersebut disebabkan oleh efek tampungan pada bantaran sungai, adanya gesekan pada dasar dan tepi sungai, kehilangan debit, penyempitan atau pelebaran tampang sungai serta adanya bangunan pengendali lainnya (Salukh, 2004).

Penelusuran aliran (*steam routing*) adalah cara matematik yang digunakan untuk melacak aliran melewati sistem hidrologi (Chow, 1988 dalam Sri Harto, 2009). Menurut Fread (1993) dalam Sri Harto (2009) penelusuran aliran adalah cara atau prosedur yang digunakan untuk memperkirakan perubahan besaran, kecepatan, bentuk gelombang aliran (*flood wave*) sebagai fungsi waktu pada satu atau beberapa titik sungai.

Dalam praktiknya terdapat dua jenis penelusuran aliran, yaitu penelusuran hidrologis (*hydrologic routing*) dan penelusuran hidraulik (*hydraulic routing*). Penelusuran hidrologis juga disebut *lumped routing*, karena aliran dinyatakan sebagai fungsi waktu untuk satu titik sepanjang aliran, sedangkan penelusuran hidraulik disebut sebagai *distributed routing* karena aliran dinyatakan sebagai fungsi ruang dan waktu serentak untuk banyak titik sepanjang aliran, baik sungai (*channel*) maupun tampungan (*reservoir*) (Chow, 1988, Fread, 1993, dalam Sri Harto, 2009).

Salukh (2014) menjelaskan bahwa dalam melakukan penelusuran banjir akibat keruntuhan bendungan digunakan metode penelusuran hidraulik karena metode tersebut paling tepat untuk mensimulasi pergerakan gelombang banjir di hilir bendungan yang runtuh karena kemampuannya dalam memperhitungkan pengaruh percepatan pergerakan gelombang. Sehingga dalam penelitian ini,

penelusuran banjir dilakukan dengan program HEC-RAS untuk mempermudah analisis dan mendapatkan hasil yang lebih akurat.

3.4 Koefisien Kekasaran Manning

Penentuan nilai koefisien kekasaran Manning menjadi kendala tersendiri dalam pemakaian rumus Manning karena tidak ada kaidah tertentu dalam pemilihan nilai n . Brunner (2010) menjelaskan bahwa nilai koefisien kekasaran Manning sangat bervariasi tergantung 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. suhu, dan
11. endapan melayang dan kasar.

Ketepatan pemilihan nilai koefisien kekasaran Manning berpengaruh pada keakuratan hasil komputasi profil muka air. Chow (1959) dalam Brunner (2010) menyarankan nilai perkiraan koefisien Manning untuk saluran alam dari angka minimum, normal, dan maksimum yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Nilai Perkiraan n Manning Pada Saluran Alam

| No | Saluran Alam | Minimum | Normal | Maksimum |
|----|--|---------|--------|----------|
| 1 | Sungai Utama | | | |
| | a. Bersih, lurus, tidak ada celah/palung sungai. | 0,025 | 0,03 | 0,033 |
| | b. Sama seperti (1.a) ditambah dengan batu dan gulma | 0,03 | 0,035 | 0,04 |

Lanjutan Tabel 3.1 Nilai Perkiraan n Manning Pada Saluran Alam

| No | Saluran Alam | Minimum | Normal | Maksimum |
|----|---|---------|--------|----------|
| | c. Bersih, berliku-liku, ada beberapa kolam dan dangkalan | 0,033 | 0,04 | 0,045 |
| | d. Sama seperti (1.c) ditambah dengan beberapa batu dan gulma | 0,035 | 0,045 | 0,05 |
| | e. Sama seperti (1.d) lebih dangkal, ada beberapa kemiringan saluran dan tampang yang tidak efektif | 0,04 | 0,048 | 0,055 |
| | f. Sama seperti (1.d) ditambah dengan batu | 0,035 | 0,05 | 0,06 |
| | g. Penggal sungai yang lambat, bergulma, dan berpalung. | 0,05 | 0,07 | 0,08 |
| | h. Penggal sungai dengan banyak gulma, palung, alur banjir dengan banyak pohon berbatang keras dan semak-semak. | 0,07 | 0,1 | 0,15 |
| 2 | Dataran Banjir | | | |
| | a. Padang rumput tanpa semak. | | | |
| | 1) Rumput pendek | 0,025 | 0,03 | 0,035 |
| | 2) Rumput tinggi | 0,03 | 0,035 | 0,05 |
| | b. Area pertanian/budidaya | | | |
| | 1) Tidak ada tanaman | 0,02 | 0,03 | 0,04 |
| | 2) Tanaman dewasa satu baris | 0,025 | 0,035 | 0,045 |
| | 3) Tanaman dewasa satu bidang | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| | c. Semak-semak | | | |
| | 1) Semak-semak tersebar dan banyak gulma | 0,035 | 0,05 | 0,07 |
| | 2) Semak-semak ringan dan pepohonan kecil pada musim dingin | 0,035 | 0,05 | 0,06 |
| | 3) Semak-semak ringan dan pepohonan kecil pada musim panas | 0,04 | 0,06 | 0,08 |
| | 4) Semak-semak medium-rimbun pada musim dingin | 0,045 | 0,07 | 0,11 |
| | 5) Semak-semak medium-rimbun pada musim panas | 0,07 | 0,1 | 0,16 |
| | d. Pepohonan | | | |
| | 1) Lahan yang dibuka dengan tanggul pohon, dan tidak ada tunas yang tubmbuh | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| | 2) Sama dengan {(2.d.1)} tetapi dengan banyak tunas yang tumbuh | 0,05 | 0,06 | 0,08 |

Lanjutan Tabel 3.1 Nilai Perkiraan n Manning Pada Saluran Alam

| No | Saluran Alam | Minimum | Normal | Maksimum |
|----|--|---------|--------|----------|
| | 3) banyak pohon berbatang keras, sedikit pohon muda, elevasi aliran masih di bawah cabang ranting pohon | 0,08 | 0,1 | 0,12 |
| | 4) Sama dengan {(2.d.3)} tetapi elevasi aliran sampai dengan cabang-ranting pohon | 0,1 | 0,12 | 0,16 |
| | 5) banyak pohon Willow pada musim panas | 0,11 | 0,15 | 0,2 |
| 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, cobbles</i> , dan sedikit <i>boulders</i> | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| | b. Dasar: <i>gravels, cobbles</i> , dan banyak <i>boulders</i> | 0,04 | 0,05 | 0,07 |

Sumber: Brunner (2011)

3.5 Keruntuhan Bendungan

Keruntuhan bendungan pada umumnya diawali dengan rekahan (*breach*) yang terbentuk pada tubuh bendungan (Fred, 1988 dalam Salukh 2004). Sebelumnya, mekanisme keruntuhan bendungan belum bisa diperkirakan, baik bendungan urugan tanah maupun beton bertulang. Dalam penelitian terdahulu mekanisme keruntuhan bendungan diasumsikan bahwa bendungan runtuh seluruhnya dalam waktu yang relatif singkat. Kemudian beberapa peneliti mencoba untuk memperkirakan ukuran, bentuk, dan waktu keruntuhan. Hingga pada akhirnya *US Army Corps of Engineers* telah mengembangkan sebuah model komputer yang digunakan untuk melakukan analisis keruntuhan bendungan dan penelusuran sungai, model komputer tersebut adalah program HEC-1 dan HEC-RAS yang digunakan dalam analisis keruntuhan bendungan (Fread, 1998 dalam Asrate, 2010).

Estimasi parameter posisi rekahan, dimensi dan waktu keruntuhan sangat penting dalam melakukan analisis keruntuhan bendungan. Parameter keruntuhan bendungan akan secara langsung mempengaruhi perkiraan debit puncak yang

keluar dari bendungan dan kemungkinan waktu tiba untuk memberikan peringatan pada daerah hilir bendungan guna mengurangi potensi resiko kematian dan kerusakan harta benda. Namun posisi rekahan, ukuran rekahan, dan waktu keruntuhan merupakan parameter yang paling tidak pasti dalam melakukan analisis keruntuhan bendungan. Dalam melakukan analisis keruntuhan bendungan ini, hal pertama yang harus dilakukan adalah menentukan dimensi dan waktu pengembangan pada setiap skenario keruntuhan. Setelah itu, HEC-RAS dapat digunakan untuk menghitung hidrograf keluaran dari keruntuhan bendungan dan menunjukkan penelusuran aliran pada hilir bendungan.

3.5.1 Penyebab Keruntuhan Bendungan

Berdasarkan kejadian yang terjadi, semua tipe bendungan pernah mengalami keruntuhan. Namun, sejauh ini mayoritas kegagalan bendungan yang telah terjadi adalah bendungan urugan tanah yang disebabkan oleh banjir di hulu. Ada beberapa hal yang bisa menyebabkan keruntuhan bendungan, diantara adalah:

1. kejadian banjir,
2. *piping/seepage* (aliran dalam tanah pada tubuh bendungan)
3. longsor pada tubuh bendungan,
4. gempa bumi,
5. kegagalan pondasi,
6. kegagalan bangunan pelengkap (pintu air),
7. kegagalan struktur,
8. keruntuhan tubuh bendungan bagian hulu,
9. penurunan muka air secara cepat, dan
10. sabotase.

Costa (1985, dalam Brunner 2014) menyimpulkan semua kejadian keruntuhan (semua tipe bendungan) pada tahun 1985, bahwa 34% kejadian keruntuhan bendungan disebabkan *overtopping*, 30% disebabkan oleh kegagalan pondasi, 28% disebabkan oleh *piping*, dan 8% sisanya disebabkan oleh beberapa faktor lainnya. Sedangkan untuk bendungan tipe urugan tanah, 35% disebabkan oleh *overtopping*, 38% disebabkan oleh *piping*, 21% disebabkan oleh kegagalan

pondasi, dan 6 % sisanya disebabkan oleh faktor lainnya. Tabel 3.2 menunjukkan kemungkinan penyebab keruntuhan berdasarkan tipe bendungan.

Tabel 3.2 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. | Kegagalan Pondasi | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4. | <i>Sliding</i> | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| 5. | <i>Overturning</i> | | ✓ | ✓ | | |
| 6. | <i>Cracking</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 7. | Kegagalan Bangunan Pelengkap | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

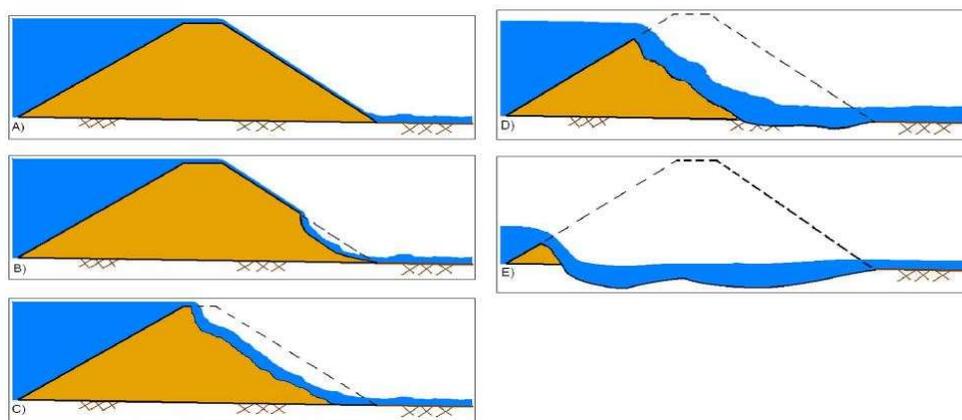
Sumber: Brunner (2014)

3.5.2 Model Keruntuhan

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya *overtopping*, *piping*, dan kegagalan pondasi adalah faktor yang paling sering menyebabkan keruntuhan bendungan urugan tanah. Dalam penelitian ini faktor keruntuhan yang ditinjau adalah *overtopping* dan *piping*. Selain karena alasan tersebut program HEC-RAS hanya mampu menganalisis model keruntuhan akibat *overtopping* dan *piping* saja.

Overtopping secara umum disebabkan karena adanya aliran yang melalui puncak tubuh bendungan. Hal tersebut terjadi karena aliran *inflow* ke waduk tidak dapat dilewatkan melalui saluran pelimpah, sehingga air yang masuk melebihi kapasitas yang tersedia dan mengalir melewati puncak bendungan. Proses terjadinya *overtopping* dijelaskan pada Gambar 3.2. Diawali dengan meluncurnya aliran dari puncak bendungan menuju ke hilir bendungan (Gambar 3.2 A). Akibat derasnya arus yang meluncur dari puncak menyebabkan erosi pada kaki bagian hilir bendungan (Gambar 3.2 B). Gerusan yang terjadi akan semakin naik dan mulai

menggerus bagian puncak bendungan (*dam crest*), pada saat ini lebar puncak bendungan menjadi semakin kecil sehingga puncak bendungan berbentuk runcing (Gambar 3.2 C). Selanjutnya keruntuhan puncak bendungan akan langsung terjadi sehingga akan terbentuk rekahan yang menyerupai trapesium (Gambar 3.2 D). Gerusan akan terus berlangsung pada tubuh bendungan sejalan dengan aliran yang keluar pada tubuh bendungan, rekahan tersebut akan terus melebar dan meruntuhkan tubuh bendungan dengan lebar tertentu (Gambar 3.2 E).

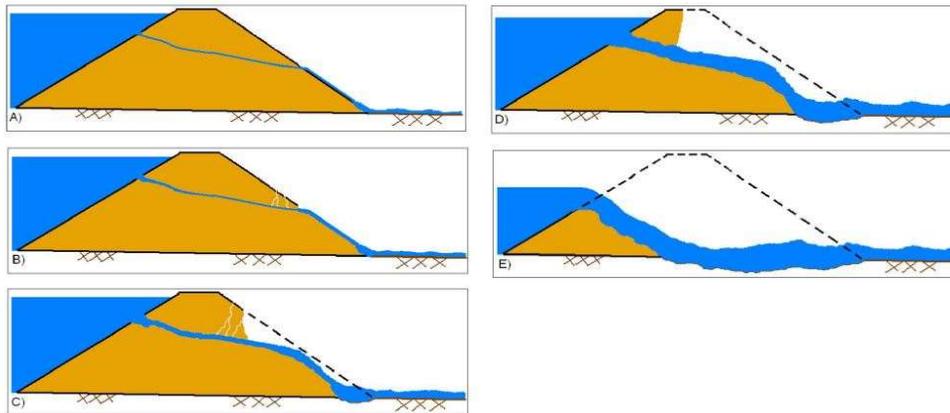


Gambar 3.2 Proses Keruntuhan Akibat *Overtopping*

(Sumber: Brunner, 2014)

Keruntuhan akibat *piping* secara umum disebabkan karena adanya rembesan yang melewati tubuh bendungan yang menyebabkan erosi pada tubuh bendungan dan mengangkut material keluar dari tubuh bendungan. Bersamaan dengan terjadinya erosi kecil tersebut akan memicu terbentuknya lubang, dimana lubang tersebut memungkinkan keluarnya aliran air yang lebih besar dan mengerosi lebih banyak material pada tubuh bendungan (Gambar 3.3 A). Selama proses aliran *piping*, erosi dan penggerusan akan mulai terjadi pada lereng bagian hilir bendungan (Gambar 3.3 B). Saat lubang *piping* semakin membesar material di atasnya akan mulai lepas atau runtuh dan berjatuh masuk ke dalam aliran air (Gambar 3.3 C). Proses penggerusan dan jatuhnya material bagian atas lubang akan menjalar ke lereng bendungan bagian hulu bersamaan dengan pertumbuhan ukuran lubang *piping* secara simultan (Gambar 3.3 D). Transisi hidraulik akan terjadi dari tipe aliran bertekanan dalam lubang menjadi aliran terbuka di atas ambang rekahan

yang semakin melebar hingga terbentuk dasar aliran secara alami (Gambar 3.3 E). Setelah itu masuk pada fase pelebaran rekahan sampai batas ukuran dan waktu tertentu



Gambar 3.3 Proses Keruntuhan Akibat *Piping*

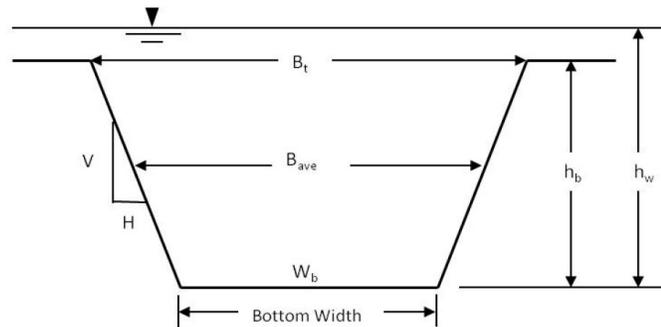
(Sumber: Brunner 2014)

3.5.3 Parameter Keruntuhan

Perkiraan parameter seperti posisi rekahan, ukuran rekahan, bentuk rekahan, dan waktu keruntuhan sangat penting untuk mendapatkan hidrograf *outflow* dan genangan di hilir bendungan akibat keruntuhan yang akurat. Namun parameter tersebut adalah hal yang paling tidak pasti dalam melakukan analisis. Parameter keruntuhan menjadi sangat krusial dalam penyusunan laporan penelitian potensi resiko suatu bendungan karena parameter tersebut berpengaruh langsung terhadap nilai debit puncak, bentuk hidrograf *outflow* dan waktu peringatan yang tersedia untuk melakukan proses evakuasi di hilir (Brunner, 2014).

Froehlich (2008) dalam Adilla (2016) menjelaskan bahwa berbagai variasi bentuk rekahan yang mungkin terjadi dan banyaknya faktor yang berpengaruh terhadap kecepatan erosi pada tubuh bendungan saat terjadi keruntuhan sangat sulit didefinisikan dalam formulasi matematika eksak. Karena tingkat kesulitan tersebut, beberapa peneliti melakukan penyederhanaan model keruntuhan bendungan dengan pendekatan bentuk trapezium seperti yang pernah dilakukan pada penelitian Fread dan Harbaugh (1973), Fread (1984), *USACE* (1978), dan Brunner (2002). Berdasarkan pendekatan model tersebut parameter keruntuhan diuraikan menjadi

lebar rerata rekahan, sudut kemiringan sisi rekahan (bentuk trapesium), dan waktu total rekahan. Penyederhanaan model keruntuhan ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Deskripsi Parameter Keruntuhan

(Sumber: Brunner, 2014)

Beberapa lembaga pemerintah telah mempublikasikan pedoman dalam bentuk rentang kemungkinan nilai lebar rekahan, kemiringan rekahan, dan waktu pengembangan yang disajikan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Rentang Kemungkinan Nilai Karakteristik Keruntuhan Bendungan

| Tipe Bendungan | Lebar Rata-Rata Rekahan | H:1V | Waktu Keruntuhan | Lembaga |
|---------------------|---------------------------|----------|------------------|------------|
| Timbunan Tanah/Batu | (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 |
| Concrete Gravity | <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 |

Lanjutan Tabel 3.3 Rentang Kemungkinan Nilai Karakteristik Keruntuhan Bendungan

| Tipe Bendungan | Lebar Rata-Rata | H:1V | Waktu Keruntuhan | Lembaga |
|----------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------------|
| <i>Concrete Arch</i> | Lebar Seluruhnya | Kemiringan dinding lembah | $\leq 0,1$ | 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)

Selain itu beberapa peneliti telah mengembangkan persamaan regresi untuk menentukan dimensi rekahan (lebar, kemiringan rekahan, volume tererosi, dan lain-lain). Persamaan tersebut diturunkan dari data kejadian bendungan timbunan tanah, bendungan timbunan tanah dengan inti kedap, dan bendungan timbunan batu. Maka, persamaan ini tidak tepat diaplikasikan terhadap bendungan beton dan timbunan tanah dengan inti beton.

Pada tahun 2008 Froehlich meneliti 74 bendungan yang bertipe timbunan tanah, timbunan tanah dengan inti kedap (*clay*), dan timbunan batu untuk mengembangkan persamaan untuk memperkirakan lebar rata-rata rekahan, kemiringan rekahan, dan waktu keruntuhan.

$$B_{ave} = 0,27 K_o V_w^{0,32} h_b^{0,04} \quad (3.1)$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}} \quad (3.2)$$

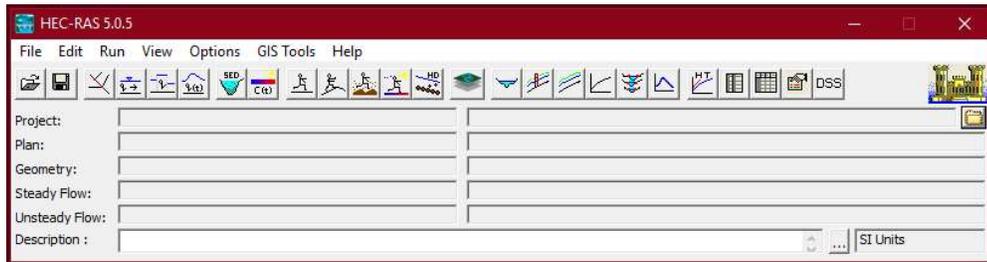
Froehlich menyatakan bahwa kemiringan sisi rekahan pada *overtopping* adalah 1H:1V sedangkan untuk *piping* adalah 0,7H:1V. Sama dengan penelitian sebelumnya bahwa tidak secara jelas dinyatakan perhitungan nilai tinggi akhir

rekahan, namun dapat diasumsikan rekahan terjadi dari atas puncak bendungan hingga permukaan tanah dasar.

3.6 HEC-RAS

Simulasi aliran di saluran terbuka (*open channel*) merupakan salah satu cara untuk mempelajari pola aliran di sepanjang saluran tersebut. Simulasi dilakukan secara nyata dengan mengalirkan air ke saluran yang umumnya dibuat dalam skala laboratorium yang disebut model fisik atau secara virtual dengan melakukan serangkaian hitungan hidraulik yang umumnya diwadahi dalam suatu perangkat program aplikasi komputer yang disebut model matematik. Melalui model fisik, sejumlah fenomena fisik aliran di saluran atau sungai nyata (prototipe) ditirukan di saluran atau sungai yang dibuat dengan ukuran yang lebih kecil (model). Interpretasi terhadap fenomena yang diamati atau diukur di model akan memberikan petunjuk terhadap fenomena yang terjadi di prototipe. Model matematik menirukan fenomena fisik aliran di saluran nyata (prototipe) melalui serangkaian persamaan matematik yang menjabarkan hubungan antar variabel-variabel aliran (variabel geometri, kinematik, dinamik). Apabila pada model fisik dilakukan pengukuran atau pengamatan untuk mendapatkan parameter aliran, pada model matematik parameter aliran diperoleh melalui hitungan atau penyelesaian persamaan matematik.

HEC-RAS merupakan program aplikasi untuk memodelkan aliran di sungai, *River Analysis System* (RAS), yang dibuat oleh *Hydrologic Engineering Center* (HEC) yang merupakan satu divisi di dalam *Institute for Water Resources* (IWR), di bawah *US Army Corps of Engineers* (USACE). HEC-RAS 5.0.5 merupakan versi terbaru dari HEC-RAS yang dirilis pada Juni 2018. Pada versi terbaru ini, HEC-RAS mampu melakukan pemodelan 1 dimensi, 2 dimensi, dan gabungan 1 dimensi-2 dimensi. Selain itu terdapat fitur *RAS Mapper Editing Tools*, dimana *RAS Mapper* terkoneksi secara langsung dengan file geometri data. Hal ini sangat mempermudah dalam melakukan digitasi sungai dari DEM.

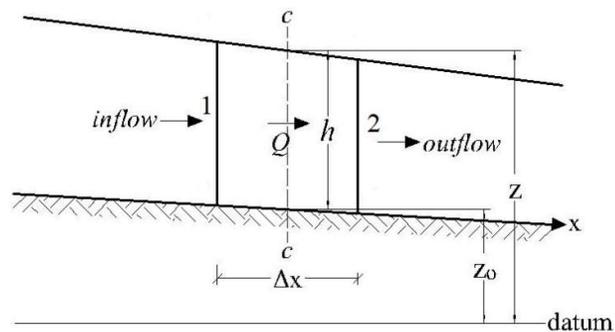


Gambar 3.5 Layar Utama HEC-RAS

Dalam menganalisis simulasi aliran, ada 2 persamaan dasar yang digunakan oleh HEC-RAS yaitu persamaan persamaan kontinuitas dan persamaan momentum yang dijelaskan sebagai berikut.

3.6.1 Persamaan Kontinuitas

Ditinjau dari suatu pias 1-2 dengan panjang Δx pada saluran terbuka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6. Prinsip kontinuitas menyatakan bahwa jumlah pertambahan volume sama dengan besarnya aliran netto yang melewati pias tersebut.



Gambar 3.6 Aliran Debit Melalui Suatu Pias

(Sumber: Brunner, 2010)

Apabila debit dan kedalaman disimbolkan berturut-turut sebagai Q dan h pada pusat $c-c$ pada setiap waktu t , maka debit *inflow* yang mengalir dinyatakan sebagai.

$$Q = \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (3.3)$$

Debit *outflow* yang mengalir pada pias dinyatakan sebagai.

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (3.4)$$

Apabila luas tampang pada potongan *c-c* adalah *A*, maka perubahan volume pada pias tersebut dinyatakan dengan.

$$\frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (3.5)$$

Dengan menganggap Δx sangat kecil, maka perubahan massa dalam kontrol volume pada pias tersebut dinyatakan dengan

$$\rho \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_l \right] \quad (3.6)$$

Dengan Q_l adalah debit lateral yang mengalir pada pias dan ρ adalah masa jenis zat cair. Persamaan tersebut disederhanakan dengan membagi $\rho \Delta x$, maka didapatkan hasil akhir dari persamaan kontinuitas sebagai berikut.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (3.7)$$

3.6.2 Persamaan Momentum

Hukum kedua Newton menyatakan bahwa besarnya momentum pada suatu pias aliran adalah sama dengan besarnya resultan gaya-gaya yang bekerja pada pias tersebut. Ada 3 gaya yang bekerja yaitu tekanan hidrostatis, gaya berat, dan gaya gesek.

1. Tekanan hidrostatis

Persamaan tekanan hidrostatis pada pias yang ditinjau dinyatakan sebagai.

$$F_{Pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (3.8)$$

2. Gaya berat

Gaya akibat gravitasi dari zat cair pada kontrol volume pada arah *x* adalah.

$$F_g = \rho A \sin \theta \Delta x \quad (3.9)$$

Dimana θ merupakan sudut kemiringan pada saluran. Untuk sungai alam nilai θ sangat kecil, sehingga nilai $\sin \theta$ mendekati $\tan \theta$ ($-\frac{\partial z_0}{\partial x}$). Maka persamaan akhir gaya berat air pada volume kontrol menjadi.

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x \quad (3.10)$$

3. Gaya gesek

Gaya gesek yang bekerja pada pada pias yang ditinjau dinyatakan dengan.

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x \quad (3.11)$$

Dengan S_f merupakan kemiringan garis energi.

4. Fluks momentum

Apabila volume dinotasikan sebagai V , maka fluks momentum yang masuk pada pias kontrol volume dinyatakan dengan.

$$\rho \left[QV - \frac{\partial QV \Delta x}{\partial x} \frac{1}{2} \right] \quad (3.12)$$

Selanjutnya fluks momentum yang meninggalkan pias pada kontrol volume adalah.

$$\rho \left[QV + \frac{\partial QV \Delta x}{\partial x} \frac{1}{2} \right] \quad (3.13)$$

Maka perubahan fluks momentum yang melewati pias yang ditinjau adalah.

$$-\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x \quad (3.14)$$

Karena momentum zat cair pada kontrol volume adalah $\rho Q \Delta x$, maka momentum dalam pias yang ditinjau adalah sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (3.15)$$

Berdasarkan Hukum Newton kedua yang sudah dijelaskan sebelumnya, maka persamaan momentum dinyatakan dengan.

$$(3.16)$$

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x$$

Apabila elevasi permukaan air disimbolkan sebagai z , maka z sebanding dengan $z_0 + h$. Sehingga persamaannya adalah sebagai berikut.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (3.17)$$

Kemudian mensubstitusikan persamaan (3.17) ke persamaan (3.16) dan membaginya dengan $\rho \Delta x$, maka didapatkan hasil akhir dari persamaan momentum sebagai berikut

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (3.18)$$