

TUGAS AKHIR

**ANALISIS ALIRAN BANJIR AKIBAT KERUNTUHAN
BENDUNGAN SEMPOR MENGGUNAKAN
PROGRAM HEC-RAS 5.0.7
(*FLOOD FLOW ANALYSIS OF SEMPOR DAM
BREACH USING HEC-RAS 5.0.7 PROGRAM*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk
Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**ANDI KURNIAWAN
16511243**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2023**

TUGAS AKHIR

ANALISIS ALIRAN BANJIR AKIBAT KERUNTUHAN BENDUNGAN SEMPOR MENGGUNAKAN PROGRAM HEC-RAS 5.0.7 (FLOOD FLOW ANALYSIS OF SEMPOR DAM BREACH USING HEC-RAS 5.0.7 PROGRAM)

Disusun oleh



Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 24 Agustus 2023
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing I

Pradipta Nandi Wardhana, S.T., M.Eng.
NIK: 135111102

Penguji I

Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng.
NIK: 165110105

Penguji II

Shofwatul Fadilah, S.T.P., M.Eng.
NIK: 215111308

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil



Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya dengan tulus menyatakan bahwa laporan Tugas Akhir yang telah saya susun sebagai persyaratan untuk menyelesaikan program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia adalah hasil karya pribadi saya. Bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari karya orang lain telah saya referensikan secara jelas sesuai dengan aturan dan prinsip etika penulisan ilmiah. Saya siap menghadapi konsekuensi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya peroleh, sesuai dengan peraturan yang berlaku, jika terbukti bahwa laporan Tugas Akhir ini seluruhnya atau sebagian besar bukan hasil karya saya sendiri atau terdapat unsur plagiasi dalam bagian-bagian tertentu.

Yogyakarta, Agustus 2023



[Handwritten Signature]

Anqi Kurniawan
(16 511 243)



Kepada Mamak dan Bapakku tercinta,

Tidak ada kata yang mampu menggambarkan betapa besar rasa terima kasihku atas segala pengorbanan, doa, dan cinta tanpa batas yang kalian berikan selama ini. Tugas akhir ini adalah hasil dari perjuangan kita bersama dan dukungan tak tergantikan dari kalian. Dedikasi ini adalah bukti penghormatan dan penghargaanku kepada kalian, yang telah menjadikan diriku siap menghadapi tantangan dan meraih impian. Semoga dedikasi ini menjadi bentuk penghormatan sekecil-kecilnya atas kasih sayang yang kalian berikan.

Serta untuk orang-orang tercinta dalam hidupku; Mba Umi serta Mba Tya, yang selalu memberikan dukungan tanpa henti dan inspirasi tiada akhir. Dedikasi tugas akhir ini saya persembahkan sebagai bukti penghargaan atas cinta, doa, dan dorongan kalian semua.



KATA PENGANTAR

Assalamualaikum wr.wb.

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam yang senantiasa melimpahkan anugerah, kebaikan, dan berkat-Nya sehingga penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir berjudul *Analisis Aliran Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Sempor Menggunakan Program HEC-RAS 5.0.7*. Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik dalam menyelesaikan pendidikan tingkat Sarjana di Bidang Studi Teknik Sipil, yang berada di lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menghadapi berbagai tantangan yang berat. Namun, dengan dukungan, saran dan kritik, serta semangat yang diberikan oleh berbagai individu, penulis berhasil mengatasi semua rintangan tersebut. Oleh karena itu, dengan tulus hati, penulis ingin mengungkapkan rasa terima kasih yang mendalam kepada:

1. Bapak Pradipta Nandi Wardhana. S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir ini,
2. Ibu Dinia Anggraheni, S.T. M.Eng., selaku Dosen Penguji I,
3. Ibu Shofwatul Fadilah, S.T.P., M.Eng., selaku Dosen Penguji II,
4. Kedua orang tua penulis, Bapak Supriyatno dan Ibu Suri Asriatul Khasanah yang tercinta, yang telah berkorban begitu banyak dan mendukung penulis baik secara moril maupun materiel serta tak henti-henti memanjatkan doa untuk kelancaran, kemudahan dan kesuksesan penulis,
5. Kedua kakak penulis, *mbak* Umi Lestari dan *mbak* Ratna Setyaningrum beserta suami dan anak-anaknya, yang selalu mendukung dan memberikan motivasi serta semangat kepada penulis,
6. Sahabat tercinta Ganang Bintang Madya, Moch. Faisal Azhar, Annas Nur Rohman dan M. Ammar Ramadhan yang selalu menemani dan membantu penulis selama masa perkuliahan dari tahun pertama hingga tahun terakhir,

7. Seluruh teman-teman Teknik Sipil angkatan 2016 yang membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir, serta
8. Teman Kontrakan Condong Catur yang selalu menemani dan memberi dorongan kepada penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir beberapa bulan terakhir.

Dengan demikian, penulis berharap bahwa Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi semua pihak yang mengakses dan membacanya. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam terhadap topik yang dibahas serta memberikan kontribusi positif dalam konteks yang lebih luas.

Wassalamualaikum wr.wb.

Yogyakarta, Agustus 2023

Andi Kurniawan

16 511 243

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
ABSTRAK	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Umum	5
2.2 Penelitian Terdahulu	5
2.3 Keabsahan Penelitian	10
BAB III LANDASAN TEORI	13
3.1 Hidrograf Banjir	13
3.2 Aliran Banjir	14
3.3 Debit Banjir Rencana	14
3.3.1 <i>Probable Maximum Precipitation</i> (PMP)	15
3.3.2 <i>Probable Maximum Flood</i> (PMF)	15
3.4 Keruntuhan Bendungan	15

3.4.1	Keruntuhan Akibat <i>Overtopping</i>	17
3.4.2	Keruntuhan Akibat <i>Piping</i>	19
3.4.3	Parameter Keruntuhan	21
3.5	Kekasaran <i>Manning</i>	24
3.6	Program HEC-RAS	26
3.6.1	Persamaan Kontinuitas	28
3.6.2	Persamaan Momentum	29
BAB IV	METODE PENELITIAN	32
4.1	Lokasi Objek Penelitian	32
4.2	Metode dan Jenis Penelitian	33
4.3	Data Penelitian	33
4.4	Tahapan Penelitian	34
4.4.1	Pengumpulan Data Penelitian	34
4.4.2	Pemodelan Keruntuhan Bendungan Menggunakan HEC-RAS	39
BAB V	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	42
5.1	Penentuan Parameter Rekahan	42
5.2	Pemodelan Keruntuhan Bendungan pada HEC-RAS 5.0.7	44
5.2.1	Pemodelan Geometri Waduk	48
5.2.2	Pemodelan Sungai dan Hilir Bendungan	50
5.2.3	Pemodelan Geometri Aliran Banjir	50
5.2.4	Pemodelan Koneksi Waduk dengan Aliran Banjir	54
5.3	Analisis Tanpa Keruntuhan	61
5.4	Analisis Keruntuhan Bendungan	62
5.4.1	Skenario 1	62
5.4.2	Skenario 2	64
5.4.3	Skenario 3	66
5.4.4	Skenario 4	68
5.4.5	Skenario 5	70
5.5	Perbandingan Hasil Analisis	72

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	76
6.1 Kesimpulan	76
6.2 Saran	77
DAFTAR PUSTAKA	78
LAMPIRAN	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan	11
Tabel 3.1	Kemungkinan Penyebab Keruntuhan Bendungan Berdasarkan Tipe Bendungan	17
Tabel 3.2	Rentang Kemungkinan Nilai Karakteristik Rekahan	22
Tabel 3.3	Perkiraan Nilai Koefisien Kekasaran <i>Manning</i> pada Saluran Alam	25
Tabel 4.1	Data Karakteristik Waduk Sempor	36
Tabel 4.2	Data Hidrograf Banjir Rencana Q_{PMF}	38
Tabel 5.1	Nilai Parameter Keruntuhan <i>Piping</i> Bendungan Sempor	43
Tabel 5.2	Durasi Banjir Skenario 1, 2, 3, 4, dan 5	72
Tabel 6.1	Hasil Simulasi Keruntugan Bendungan Sempor	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Komponen Hidrograf Banjir	13
Gambar 3.2	Persentase Keruntuhan Bendungan	17
Gambar 3.3	Proses Keruntuhan Bendungan Akibat <i>Overtopping</i>	18
Gambar 3.4	Tampak Depan Pola Rekahan <i>Overtopping</i>	19
Gambar 3.5	Proses Keruntuhan Bendungan Akibat <i>Piping</i>	20
Gambar 3.6	Tampak Depan Pola Rekahan <i>Piping</i>	20
Gambar 3.7	Deskripsi Parameter Rekahan	22
Gambar 3.8	Tampilan Awal HEC-RAS 5.0.7	27
Gambar 3.9	Volume Kontrol Dasar untuk Penurunan Persamaan Kontinuitas dan Momentum	28
Gambar 4.1	Peta Lokasi Bendungan Sempor	32
Gambar 4.2	Situasi Bendungan Sempor	35
Gambar 4.3	Potongan Melintang Tubuh Bendungan Sempor	36
Gambar 4.4	Grafik Karakteristik Waduk Sempor	37
Gambar 4.5	Grafik Hidrograf Banjir Rencana Q_{PMF}	39
Gambar 4.6	Bagan Alir Penelitian	41
Gambar 5.1	Jendela <i>Set Projection for Project</i>	45
Gambar 5.2	Tampilan Jendela <i>New Terrain Layer</i>	46
Gambar 5.3	Tampilan <i>DEM (Digital Elevation Model)</i> pada <i>RAS Mapper</i>	46
Gambar 5.4	Tampilan <i>Map Layer</i>	47
Gambar 5.5	Tampilan Tata Guna Lahan pada <i>RAS Mapper</i>	47
Gambar 5.6	Tampilan <i>Storage Area</i>	49
Gambar 5.7	Tampilan <i>Storage Area Editor</i>	49
Gambar 5.8	Tampilan <i>Cross Section</i> pada Alur Sungai	50
Gambar 5.9	Tampilan Input <i>2D Flow Areas</i> dan <i>Computation Point Spacing</i>	51
Gambar 5.10	Tampilan <i>2D Flow Areas</i>	52
Gambar 5.11	Tampilan Input Data <i>Lateral Structure</i>	53
Gambar 5.12	Tampilan <i>Lateral Structure Editor</i>	53

Gambar 5.13	Tampilan <i>Gemotric Data</i>	54
Gambar 5.14	Tampilan <i>Input Data</i> Pemodelan Tubuh Bendungan	55
Gambar 5.15	Tampilan <i>Inline Structure</i>	56
Gambar 5.16	Tampilan <i>Dam (Inline Structure) Breach data</i>	57
Gambar 5.17	Tampilan <i>Input</i> Nilai Koefisien <i>Manning</i>	58
Gambar 5.18	Tampilan <i>Input Boundary Condition</i>	58
Gambar 5.19	Tampilan <i>Input Boundary Condition</i>	59
Gambar 5.20	Tampilan <i>Running</i> Simulasi <i>Unsteady Flow Analysis</i>	60
Gambar 5.21	Tampil Hasil Simulasi	60
Gambar 5.22	Hidrograf <i>Inflow</i> dan <i>Outflow</i>	61
Gambar 5.23	Hidrograf Muka Air Banjir pada <i>Sta. 27+318</i> Skenario 1	62
Gambar 5.24	Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-8	63
Gambar 5.25	Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 1	63
Gambar 5.26	Hidrograf Muka Air Banjir pada <i>Sta. 27+318</i> Skenario 2	64
Gambar 5.27	Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-8	65
Gambar 5.28	Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 2	65
Gambar 5.29	Hidrograf Muka Air Banjir pada <i>Sta. 27+318</i> Skenario 3	66
Gambar 5.30	Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-10	67
Gambar 5.31	Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 3	67
Gambar 5.32	Hidrograf Muka Air Banjir pada <i>Sta. 27+318</i> Skenario 4	68
Gambar 5.33	Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-12	69
Gambar 5.34	Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 4	69
Gambar 5.35	Hidrograf Muka Air Banjir pada <i>Sta. 27+318</i> Skenario 5	70
Gambar 5.36	Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-12	71
Gambar 5.37	Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 5	71
Gambar 5.38	Hidrograf Banjir Skenario 1, 2, 3 4, dan 5	72
Gambar 5.39	Perbandingan Debit Puncak Banjir	73
Gambar 5.40	Hidrograf Muka Air Skenario 1, 2, 3, 4 dan 5	74
Gambar 5.41	Profil Muka Air Maksimum pada Skenario 1, 2, 3, 4, serta 5	74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Gambar <i>As Build</i> Bendungan Sempor	81
Lampiran 2	Gambar Profil dan <i>Cross Section</i> Bendungan Sempor	82
Lampiran 3	Data Karakteristik Waduk Sempor	83
Lampiran 4	Data Hidrograf Banjir Rencana Q_{PMF}	84

ABSTRAK

Bendungan merupakan salah satu infrastruktur penting dalam pengelolaan sumber daya air. Namun, kendati telah direncanakan dan dibangun dengan standar yang ketat, terdapat kemungkinan terjadinya kegagalan atau kerusakan pada bendungan yang dapat menyebabkan dampak yang serius, seperti banjir. Banjir akibat keruntuhan bendungan dapat memiliki konsekuensi yang merugikan, termasuk kerusakan properti, hilangnya nyawa manusia, dan kerusakan lingkungan.

Pentingnya memahami dampak yang mungkin terjadi akibat keruntuhan bendungan menuntut adanya analisis yang mendalam dan akurat. Salah satu alat yang digunakan untuk menganalisis aliran banjir adalah dengan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*). HEC-RAS merupakan perangkat lunak yang dirancang khusus untuk melakukan simulasi hidrolika pada sungai dan aliran banjir.

Penelitian ini dilaksanakan pada Bendungan Sempor yang terletak di Kabupaten Kebumen, Jawa Tengah, Indonesia. Bendungan ini memiliki kapasitas tampungan efektif sebesar 46,5 juta m³. Untuk mensimulasikan potensi keruntuhan bendungan, peneliti menggunakan program HEC-RAS 5.0.7. Simulasi ini akan dilakukan dengan menggunakan rumus parameter empiris rekahan yang diterbitkan oleh Froelich (2008), dengan 5 (lima) variabel waktu keruntuhan serta diasumsikan bendungan mengalami keruntuhan akibat *piping*.

Dari hasil simulasi yang dilakukan, waktu formasi keruntuhan selama 1 (satu) jam mengakibatkan dampak banjir yang paling signifikan. Debit maksimum banjir mencapai 9.484,71 m³/s, dengan total volume air yang dikeluarkan dari waduk sebesar 38.113,24 x 1.000 m³.

Kata Kunci: Banjir, Keruntuhan Bendungan, *Piping*, HEC-RAS 5.0.7, Bendungan Sempor.

ABSTRACT

Dams are a crucial infrastructure in water resource management. However, despite being meticulously planned and constructed to stringent standards, there is a possibility of failure or damage to dams that could lead to significant impacts, such as floods. Floods resulting from dam failures can have detrimental consequences, including property damage, loss of human lives, and environmental destruction.

The importance of understanding the potential impacts resulting from dam failures necessitates a thorough and accurate analysis. One of the tools used to analyze flood flow is by using the HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) software. HEC-RAS is specialized software designed to conduct hydraulic simulations on rivers and flood flows.

The study was conducted at the Sempor Dam located in Kebumen Regency, Central Java, Indonesia. This dam has an effective storage capacity of 46.5 million m³. To simulate the potential dam failure, the researchers utilized the HEC-RAS 5.0.7 software program. This simulation will be carried out using the empirical crack parameter formula published by Froelich (2008), with 5 time variables for dam failure assumed to occur due to piping.

From the results of the conducted simulation, a dam failure formation time of 1 (one) hour resulted in the most significant flood impact. The maximum flood discharge reached 9.484,71 m³/s, with a total volume of water released from the reservoir amounting to 38.113,24 x 1.000 m³.

Keywords: *Flood, Dam Breach, Piping, HEC-RAS 5.0.7, Sempor Dam.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan elemen utama dalam kehidupan manusia. Air tidak hanya sekedar memenuhi kebutuhan mendasar guna menunjang kehidupan manusia, namun juga berfungsi sebagai penghidupan lainnya seperti halnya pengairan pada lahan pertanian. Indonesia merupakan negara agraris yang sebagian besar penduduknya mengandalkan sektor pertanian sebagai mata pencaharian, sehingga sangat membutuhkan persediaan air yang melimpah untuk kebutuhan irigasi pertanian.

Kebutuhan air juga dipastikan memiliki kecenderungan yang tidak sejalan dengan ketersediaannya baik terkait jumlah, waktu maupun iklim, mengingat Indonesia memiliki iklim tropis yang mengakibatkan perubahan cuaca yang ekstrem dari musim hujan ke musim kemarau. Maka dari itu, dilakukan langkah alternatif untuk mengatasi masalah tersebut yaitu dengan cara pembangunan bendungan. Bendungan merupakan bangunan yang berfungsi menahan dan menampung air dalam kapasitas besar pada saat musim hujan dan mengeluarkannya pada saat musim kemarau sehingga ketersediaan air untuk irigasi pertanian tetap terjaga. Selain untuk irigasi pertanian, pembangunan bendungan juga memiliki manfaat lain yaitu sebagai konservasi sumber daya air, persediaan air baku, pengendali banjir, pembangkit listrik, ataupun tempat rekreasi.

Pembangunan bendungan selain mempunyai manfaat dan peran penting, bendungan dapat pula mempunyai sebuah ancaman bencana (*hazard*) yang besar apabila terjadi keruntuhan bendungan. Keruntuhan bendungan akan mengakibatkan terjadinya banjir besar yang akan mengalir hingga ke bagian hilir dengan karakteristik debit yang besar serta kecepatan tinggi sehingga dapat menimbulkan banyak korban jiwa, harta benda, serta kerusakan lingkungan yang sangat parah di daerah bagian hilir.

Keruntuhan bendungan sering kali terjadi pada bendungan di Indonesia, misalnya yang paling fenomenal yaitu pada Bendungan Situ Gintung di Banten yang terjadi pada tahun 2009. Menurut data BNPB, bencana tersebut menelan korban jiwa sebanyak 100 orang meninggal dan sebanyak 206 rumah hilang terseret banjir bandang akibat keruntuhan bendungan. Secara umum, faktor utama keruntuhan bendungan di Indonesia disebabkan oleh melimpasnya air melalui puncak bendungan dikarenakan debit air yang tertampung oleh bendungan melebihi kapasitas tampang bendungan atau disebut dengan *overtopping*. Keruntuhan bendungan juga dapat disebabkan oleh mengalirnya air melalui rongga-rongga pada badan bendungan atau disebut dengan *piping*. Ofananta (2018) menjelaskan bahwa parameter keruntuhan bendungan dapat mempengaruhi sifat hidrograf banjir di bagian hilir bendungan. Parameter keruntuhan bendungan terdiri dari waktu keruntuhan, lebar rata-rata rekahan, serta kemiringan keruntuhan.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa keruntuhan bendungan merupakan ancaman bencana yang sangat perlu diperhatikan dan diwaspadai. Oleh karena itu, dalam pembangunan bendungan perlu ditetapkan regulasi untuk mengurangi dan mencegah potensi ancaman bencana. Oleh karena itu, pemerintah melalui Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2015 serta Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2015 tentang Bendungan yang menetapkan bahwa setiap pembangunan bendungan perlu disertai dokumen perencanaan tindak darurat yang dilengkapi dengan analisis keruntuhan sehingga dapat mengurangi serta mencegah risiko keruntuhan bendungan.

Salah satu bendungan yang perlu dilakukan analisis adalah Bendungan Sempor. Bendungan Sempor merupakan sebuah bendungan yang secara administratif berada di Kabupaten Kebumen, Provinsi Jawa Tengah. Pembuatan fisik Bendungan Sempor pertama kali dilakukan pada tahun 1958. Pada tahun 1967 Bendungan Sempor mengalami bencana, yaitu runtuhnya *cofferdam* akibat banjir besar yang melimpas di atas mercu yang menyebabkan korban 127 orang meninggal dunia. Kemudian, Bendungan Sempor dibangun kembali pada tahun 1975 dan pembangunan selesai pada tahun 1978. Daerah hilir Bendungan Sempor

merupakan wilayah pemukiman padat penduduk, dan dengan volume tampungan yang besar maka dapat menyebabkan tingkat ancaman bencana bertambah berbahaya dan perlu diperhatikan, oleh karena itu dilakukan analisis keruntuhan bendungan yang diharapkan dapat mengurangi serta mencegah terjadinya bencana banjir yang diakibatkan oleh keruntuhan Bendungan Sempor.

Bendungan Sempor memiliki volume tampungan efektif sebesar 46,5 juta m³, dengan tipe bendungan timbunan batu (*rockfill dam*) dengan inti kedap air, serta memiliki ketinggian tubuh bendungan setinggi 54 m. Ketinggian tubuh Bendungan Sempor dirancang melebihi elevasi muka air banjir (Q_{PMF}). Oleh karena itu, keruntuhan bendungan pada penelitian ini akan disimulasikan akibat *piping* atau keruntuhan yang diakibatkan mengalirnya air pada rongga-rongga tubuh bendungan berdasarkan persamaan empiris rekahan yang diterbitkan oleh Froelich (2008).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka masalah yang akan dirumuskan adalah bagaimana aliran banjir di wilayah hilir bendungan akibat keruntuhan bendungan yang diakibatkan oleh *piping* berdasarkan parameter empiris rekahan Froelich (2008)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pola aliran banjir akibat keruntuhan bendungan di wilayah hilir bendungan yang diakibatkan oleh *piping* berdasarkan parameter empiris rekahan Froelich (2008).

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian keruntuhan bendungan menggunakan program HEC-RAS 5.0.7 ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pola aliran banjir akibat keruntuhan bendungan di wilayah hilir bendungan yang diakibatkan oleh *piping* berdasarkan parameter empiris rekahan Froelich (2008) sehingga hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan mitigasi bencana apabila terjadi keruntuhan pada Bendungan Sempor.

1.5 Batasan Penelitian

Agar dapat memfokuskan penelitian yang dihadapi sehingga penelitian ini terstruktur dan terarah, maka terdapat batasan-batasan pada penelitian ini, yaitu sebagai berikut.

1. Penelitian berada di wilayah Bendungan Sempor yang berada di Kabupaten Kebumen, Provinsi Jawa Tengah.
2. Keruntuhan bendungan dimodelkan dengan keruntuhan akibat *piping* dengan menggunakan parameter empiris rekahan.
3. Keruntuhan Bendungan Sempor disimulasikan menggunakan program HEC-RAS versi 5.0.7 dengan pemodelan aliran sungai dalam metode 1 dimensi (1D) serta pemodelan genangan banjir dalam metode 2 dimensi (2D).
4. Data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data sekunder yang didapatkan dari PT. Dehas Inframedia Karsa dan PT. Caturbina Guna Persada melalui Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Serayu-Opak.
5. Penelitian ini tidak membahas biaya akibat keruntuhan bendungan.
6. Penelitian ini tidak meninjau bangunan-bangunan melintang maupun sejajar di sepanjang sungai.
7. Simulasi aliran banjir tidak membahas sedimen di sepanjang sungai.
8. Data yang dipakai berupa data debit Q_{PMF} pada waduk, data teknis bendungan, potongan melintang sungai serta geometri wilayah hilir bendungan yang dieleh berdasarkan dari data DEMNAS.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Menurut Peraturan Pemerintah Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 serta Peraturan Menteri PUPR Nomor 27 Tahun 2015 kegagalan atau keruntuhan bendungan diartikan sebagai keruntuhan sebagian atau seluruh bendungan atau bangunan pelengkap dan/atau kerusakan yang mengakibatkan tidak berfungsinya bendungan. Dari data sejarah, semua jenis bendungan mengalami keruntuhan disebabkan oleh satu atau lebih penyebab. Costa (1985) mengatakan bahwa semua tipe keruntuhan bendungan 34% keruntuhan bendungan diakibatkan oleh *overtopping*, 30% diakibatkan oleh kegagalan fondasi, 28% diakibatkan oleh *piping*, dan 8% diakibatkan oleh faktor lainnya. Rochmanhadi (1997) dalam Wijayanti dkk. (2013) suatu bendungan dapat dikatakan aman apabila bendungan tersebut menjamin adanya suatu tingkat perlindungan jiwa manusia serta harta benda terhadap kerusakan bendungan atau limpasan tanpa terjadinya kerusakan yang sesuai dengan kriteria keamanan yang biasa digunakan dalam bidang keteknikan.

2.2 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu yang berkaitan dengan keruntuhan bendungan adalah sebagai berikut.

1. Listia dkk. (2015) melakukan penelitian tentang analisis perilaku banjir bandang akibat keruntuhan bendungan alami pada daerah aliran Sungai Krueng Teungku Provinsi Aceh. Selama 15 tahun terakhir telah terjadi 3 (tiga) kejadian bencana banjir bandang (tahun 1987, 2000 dan 2013) di Daerah Aliran Sungai (DAS) Krueng Teungku. Kejadian pada tahun 2013 merupakan bencana yang menimbulkan dampak besar pada Desa Beureuneut Kecamatan Seulimeum Kabupaten Aceh Besar. Dari uraian tersebut, dilakukan penelitian guna menganalisis paramater-parameter yang mempengaruhi keruntuhan bendungan alam Krueng Teungku.

Simulasi pemodelan banjir bandang akibat keruntuhan bendungan ini menggunakan program HEC-RAS 5.0.7 yang disebabkan oleh *overtopping* dan *piping* dengan metode analisis hidrologi dan hidraulika. Metode analisis hidrologi berdasarkan hujan ekstrem pada hari kejadian sebesar 125 mm yang kemudian menghasilkan debit puncak banjir sebesar 334,83 m³/detik. Sedangkan, metode analisis hidraulika dilakukan terhadap geometri sungai bendungan alam dengan pendekatan topografi dan mengestimasi koefisien kekasaran *manning*. Uji kedekatan atau kecocokan data hasil analitis dan observasi dengan menggunakan koefisien determinasi menghasilkan nilai yang hampir sama dan mendekati 1 (satu). Hal ini memberikan informasi bahwa perkiraan ketelitian penelitian merupakan faktor dari lebar rerata rekahan (b_{avg}), durasi keruntuhan (t) serta lebar dasar rekahan (b) hampir menyamai dengan kondisi di lapangan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi yang mendukung adanya keruntuhan akibat *overtopping* juga terlihat pada hasil penelusuran banjir melewati pelimpah yaitu setinggi +67,22 m dpl menunjukkan bahwa debit puncak banjir melebihi tinggi puncak bendungan alam yaitu +66,75 m dpl, sehingga terjadi *overtopping* pada bendungan alam Krueng Teungku. Kemudian terdapat pembendungan pada *River Station* (RS) 27 Sungai Krueng Teungku yang membentuk tampungan dan menaikkan elevasi muka air menyebabkan semakin besar beda energinya terhadap sisi hilir sehingga debit puncak banjir membesar setelah adanya pembendungan. Simulasi kejadian banjir bandang pada 2 Januari 2013 akibat keruntuhan bendungan alam di DAS Krueng Teungku disebabkan oleh *overtopping* dengan jarak antara bendungan alam ke hilir sungai sejauh 6,72 km dengan waktu tiba banjir selama 1,104 jam.

2. Lisaputra (2016) membuat penelitian tentang prediksi banjir jika terjadi keruntuhan bendungan akibat *overtopping* dan *piping*. Dengan meninjau Bendungan Jatigede, penelitian ini memprediksi banjir jika terjadi keruntuhan bendungan pada bendungan. Bentuk keruntuhan dimodelkan karena *overtopping* dan *piping* dengan menggunakan program HEC-RAS 5.0.0. Hasil dari simulasi ini yaitu berupa gambaran proses keruntuhan Bendungan Jatigede, profil muka

air banjir di setiap penampang melintang sungai, serta kecepatan aliran banjir. Sementara untuk pemetaan genangan banjir menggunakan program AutoCAD 2010.

Berdasarkan hasil simulasi, menjelaskan bahwa pada Bendungan Jatigede mengalami keruntuhan diakibatkan oleh *overtopping* dan *piping*. Kecepatan yang dihasilkan akibat keruntuhan Bendungan Jatigede cenderung besar di bagian hulu dan berkurang setelah mencapai hilir. Kecepatan maksimum aliran pada skenario *overtopping* sebesar 11,38 m/s, pada skenario *piping* elevasi +247 m sebesar 14,18 m/s, dan pada skenario *piping* elevasi +221 m sebesar 13,33 m/s. Dari ketiga bentuk keruntuhan yang dimodelkan, keruntuhan akibat *overtopping* menimbulkan dampak yang lebih besar dibandingkan dengan akibat *piping*, dikarenakan keruntuhan oleh *overtopping* menghasilkan rata-rata muka air banjir tertinggi serta luasan genangan terbesar dibanding dua skenario lainnya yaitu sebesar 1.568,4 km². Genangan banjir yang dihasilkan meluas hingga mencapai Laut Jawa.

- Ikromi (2018) melakukan penelitian tentang analisis hidrodinamik keruntuhan Bendungan Cipanas. Bendungan Cipanas yang dibangun di Kabupaten Sumedang Jawa Barat memiliki kapasitas tampungan hingga 210 juta m³. Di bagian hilir bendungan merupakan pemukiman, Jalan Tol Cikopo-Palimanan, serta Bandara Internasional Kertajati sehingga mempunyai potensi terdampak bencana banjir akibat keruntuhan Bendungan Cipanas.

Penelitian ini menganalisis aliran dari keruntuhan Bendungan Cipanas dengan menggunakan program HEC-RAS 5.0.5 yang dimodelkan secara 1 dimensi dan 2 dimensi. Keruntuhan diasumsikan akibat karena *piping* dengan 5 (lima) skenario waktu formasi keruntuhan. Hasil dari simulasi ini akan didapatkan hidrograf banjir pada hilir bendungan dan peta genangan banjir. Dari hasil simulasi tersebut, diketahui bahwa waktu keruntuhan 1 jam menghasilkan efek banjir terbesar. Debit maksimum banjir sebesar 40.689,65 m³/detik dengan volume air yang dikeluarkan dari waduk sebesar 179.390.501 m³. Waktu tiba banjir di Jembatan Tol Cikopo-Palimanan yaitu 45 menit setelah keruntuhan

dengan ketinggian banjir maksimum 15,78 m dari dasar sungai. Bandara Internasional Kertajati tidak tergenang banjir.

4. Rachmadan dkk. (2013) melakukan penelitian tentang analisa keruntuhan Bendungan Alam Way Ela dengan menggunakan program Zhong Xing HY21. Analisis keruntuhan Bendungan Alam Way Ela bertujuan untuk mengetahui perilaku banjir yang menggambarkan genangan dan waktu tiba gelombang ke bagian hilir, dikarenakan Bendungan Alam Way Ela telah mengalami keruntuhan pada 25 Juli 2013. Dalam studi analisa keruntuhan Bendungan Alam Way Ela ini menggunakan program Zhong Xing HY21 yang dapat menghasilkan hidrograf banjir, kedalaman banjir, kecepatan banjir serta peta genangan banjir di lokasi sepanjang sungai di hilir bendungan. *Input* dari program Zhong Xing HY21 ini berupa peta RBI digital yang diolah, kemudian data teknis Bendungan Alam Way Ela dan lengkung kapasitas waduk.

Keruntuhan Bendungan Alam Way Ela menggunakan skenario *overtopping* dan *piping*. Skenario *piping* dimodelkan dengan 3 (tiga) keadaan yakni *piping* bagian atas, tengah dan bawah. Hasil penelitian ini didapatkan bahwa keruntuhan Bendungan Alam Way Ela diakibatkan oleh *piping* atas yang diawali dengan runtuhnya pelimpah dan mengakibatkan munculnya rekahan pada badan bendungan bagian atas. Hasil penelitian juga menunjukkan luas genangan banjir yang terjadi seluas 66.879,24 m² dengan kesalahan relatif sebesar 56,73% apabila dibandingkan dengan data dari BNPB. Waktu tiba banjir di bagian hilir bendungan yakni Desa Negeri Lima selama 86 menit dengan waktu puncak banjir selama 2 jam 40 menit dan waktu surut selama 9 jam sesuai dengan data historis yang ada.

5. Aryadi dkk. (2014) membuat penelitian tentang analisa keruntuhan Bendungan Gondang dengan menggunakan program Zhong Xing HY21. Penelitian ini bermaksud untuk melakukan analisis dengan berbagai alternatif skenario keruntuhan bendungan dan dilakukan menggunakan bantuan program Zhong Xing HY21. Keruntuhan bendungan dilakukan dengan skenario *overtopping* dan *piping* dengan memasukkan parameter rekahan tertentu untuk menghasilkan bentuk hidrograf *outflow*.

Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini berupa data curah hujan, data luas dan volume tampungan waduk, data teknis Bendungan Gondang, peta rupa bumi (RBI) skala 1:25.000 dari Bakosurtanal serta Peta DEM dari Bakosurtanal. Dari hasil penelitian, keruntuhan Bendungan Gondang menyebabkan dampak paling besar apabila mengalami *overtopping* dengan Q_{inflow} sebesar 968,55 m³/detik dan menghasilkan $Q_{outflow}$ sebesar 7.671,57 m³/detik. Hasil penelusuran banjir tinggi muka air waduk berada pada elevasi +40,593 m dan diasumsikan puncak bendungan pada elevasi +40,00 m. Aliran banjir akan menelusuri Sungai Gondang dan menggenangi area persawahan serta pemukiman penduduk seluas 73 km².

6. Torimtubun (2018) membuat penelitian tentang analisis banjir akibat keruntuhan Bendungan Banyuwung dengan menggunakan HEC-RAS. Penyebab keruntuhan bendungan urugan seringkali diakibatkan oleh *overtopping* dan *piping*. Keruntuhan akibat *overtopping* terjadi karena melimpahnya air pada waduk melalui tubuh bendungan, sedangkan keruntuhan akibat *piping* tidak bisa dipastikan awal mula lokasinya dikarenakan gerusan yang disebabkan oleh rembesan terjadi di dalam tubuh bendungan. Maka perlu dilakukan penelitian analisis keruntuhan bendungan dengan menggunakan program HEC-RAS 5.0.3 dengan simulasi banjir dengan model 2 dimensi.

Pada penelitian ini Bendungan Banyuwung yang berada di Kabupaten Rembang Jawa Tengah dijadikan sebagai objek penelitian. Bendungan Banyuwung merupakan bendungan tipe urugan homogen. Dari hasil simulasi, keruntuhan akibat *overtopping* merupakan penyebab keruntuhan bendungan yang mengakibatkan dampak paling besar dengan banjir rencana 0,5PMF dengan debit puncak (Q_{inflow}) sebesar 239,9 m³/detik dan menghasilkan genangan banjir seluas 1.907,48 ha dengan tinggi genangan maksimum sebesar 7,95 m. Akibat dari keruntuhan Bendungan Banyuwung ini mengakibatkan 23 desa dan 4 kecamatan di daerah hilir bendungan terkena genangan banjir. Dengan jumlah penduduk terkena risiko tersebut dan jarak Bendungan Banyuwung sampai ke daerah hilir sejauh 9 km, maka keruntuhan Bendungan

Banyuwangi termasuk ke dalam klasifikasi bendungan dengan tingkat 4, yakni sangat tinggi.

2.3 Keabsahan Penelitian

Objek pada penelitian ini merupakan Bendungan Sempor yang berada di Kabupaten Kebumen Jawa Tengah yang akan disimulasikan mengalami keruntuhan bendungan akibat terjadinya *piping*. Penelitian ini akan menghasilkan hidrograf banjir akibat keruntuhan bendungan dengan cara memodelkan keruntuhan bendungan menggunakan parameter empiris rekahan, yakni lebar bawah bidang rekahan (b), waktu keruntuhan (τ) dan kemiringan lereng rekahan (z).

Simulasi pemodelan keruntuhan Bendungan Sempor dilakukan secara 1 dimensi untuk bagian aliran sungai dan 2 dimensi untuk genangan banjir dengan menggunakan program HEC-RAS 5.0.7. Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini berupa data teknis Bendungan Sempor, data karakteristik tampungan waduk, data hidrograf banjir rencana, serta data tampang lintang di hilir bendungan sungai yang didapatkan dari peta DEM (*Digital Elevation Model*). Hasil dari penelitian ini akan menghasilkan debit puncak akibat keruntuhan terbesar dan mengetahui aliran banjir akibat keruntuhan sehingga dapat menerapkan sistem peringatan dini akibat keruntuhan bendungan sesuai dengan pedoman Rencana Tindak Darurat (RTD) yang dibuat pemerintah.

Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

No.	Aspek	Listia, dkk. (2015)	Lisaputra (2016)	Ikromi (2018)	Rachmadan (2013)	Aryadi dkk. (2014)	Torimbubun (2018)	Kurniawan (2023)
1.	Judul	Analisis Perilaku Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Alami pada Daerah Aliran Sungai Krueng Teungku Provinsi Aceh	Prediksi Banjir Jika Terjadi Keruntuhan Bendungan Akibat <i>Overtopping</i> dan <i>Piping</i>	Analisis Hidrodinamik Keruntuhan Bendungan Cipanas	Analisa Keruntuhan Bendungan Alam Way Ela dengan Menggunakan Program Zhong Xing HY21	Analisa Keruntuhan Bendungan Gondang dengan Menggunakan Program Zhong Xing HY21	Analisis Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Banyukuwung dengan Menggunakan HEC-RAS	Analisis Aliran Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Sempor Menggunakan Program HEC-RAS 5.0.7
2.	Pemodelan Keruntuhan	<i>Overtopping</i> dan <i>Piping</i>	<i>Overtopping</i> dan <i>Piping</i>	<i>Piping</i>	<i>Overtopping</i> dan <i>Piping</i>	<i>Overtopping</i> dan <i>Piping</i>	<i>Overtopping</i> dan <i>Piping</i>	<i>Overtopping</i> dan <i>Piping</i>
3.	Program Pemodelan	HEC-RAS 5.0.7	HEC-RAS 5.0.0	HEC-RAS 5.0.5	Zhong Xing HY21	Zhong Xing HY21	HEC-RAS 5.0.3	HEC-RAS 5.0.7
4.	Lokasi	Bendungan Alam DAS Krueng Teungku, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh	Bendungan Jatigede, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat	Bendungan Cipanas, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat	Bendungan Way Ela, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku	Bendungan Gondang, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah	Bendungan Banyukuwung, Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa Tengah	Bendungan Sempor, Kabupaten Kebumen, Provinsi Jawa Tengah
5.	Luas Genangan Waduk	2,17 ha	4122 ha	1073,2 ha	-	660 ha	95,63 ha	270 ha
6.	Volume Tampungan Waduk	13.110,32 m ³	980 juta m ³	210 juta m ³	19,8 juta m ³	23 juta m ³	1,82 juta m ³	46,5 juta m ³

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan dilakukan

No.	Aspek	Listia, dkk. (2015)	Lisaputra (2016)	Ikromi (2018)	Rachmadan (2013)	Aryadi dkk. (2014)	Torimbubun (2018)	Kurniawan (2023)
7.	Hasil Penelitian	Dari hasil penelitian, keruntuhan bendungan alam di Sungai Krueng Teungku diakibatkan oleh <i>overtopping</i> . dengan jarak antara bendungan alam ke hilir sungai sejauh 6,72 km dengan waktu tiba banjir selama 1,104 jam.	Dari bentuk keruntuhan bendungan yang dimodelkan, keruntuhan diakibatkan oleh <i>overtopping</i> menimbulkan dampak paling besar. Kecepatan maksimum skenario <i>overtopping</i> sebesar 11,38 m/s. dikarenakan keruntuhan oleh <i>overtopping</i> menghasilkan rata-rata muka air banjir tertinggi serta luasan genangan terbesar dibanding dua skenario lainnya yaitu sebesar 1.568,4 km ² .	Keruntuhan bendungan dengan skenario keruntuhan 1 jam menyebabkan dampak yang cukup besar. Debit maksimum banjir sebesar 40.689,65 m ³ /d yang terjadi pada jam ke-4 dengan volume air yang keluar dari waduk sebesar 179.390.501 m ³ .	Keruntuhan Bendungan Alam Way Ela diakibatkan oleh <i>piping</i> atas yang diawali dengan runtuhnya pelimpah dan mengakibatkan munculnya rekahan pada badan bendungan bagian atas. Hasil penelitian juga menunjukkan luas genangan banjir yang terjadi seluas 66.879,24 m ² .	Keruntuhan Bendungan Gondang menyebabkan dampak paling besar apabila mengalami <i>overtopping</i> dengan Q_{inflow} sebesar 968,55 m ³ /detik, menghasilkan $Q_{outflow}$ sebesar 7.671,57 m ³ /detik serta menyebabkan luas genangan seluas 7167,82 ha.	Keruntuhan Bendungan Banyukuwung menimbulkan dampak kerusakan sepanjang 9 km di hilir bendungan. Kerusakan terparah diakibatkan oleh kondisi <i>overtopping</i> yang menyebabkan genangan seluas 1907 ha dengan tinggi maksimum 7,95. Terdapat 23 desa yang terkena genangan banjir	-

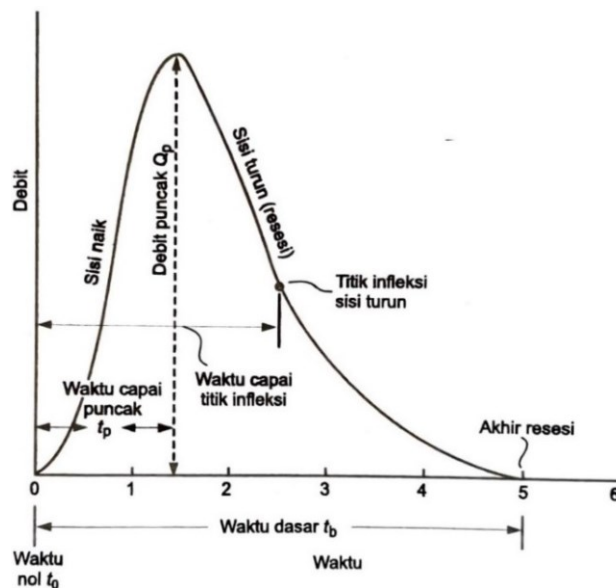
BAB III LANDASAN TEORI

3.1 Hidrograf Banjir

Triatmodjo (2008) mendefinisikan hidrograf sebagai kurva yang memberi hubungan antara parameter aliran dan waktu. Parameter tersebut berupa kedalaman aliran dan debit aliran, sehingga didapatkan dua macam hidrograf yaitu hidrograf muka air dan hidrograf debit. Hidrograf muka air dapat diubah menjadi hidrograf debit dengan menggunakan *rating curve*. Hidrograf memiliki tiga komponen pembentuk, antara lain aliran permukaan (*runoff*), aliran antara (*interflow*) serta aliran air tanah (*baseflow*). Dari hidrograf banjir dapat diketahui anggapan sebagai berikut ini.

1. Hubungan antara debit dan durasi banjir.
2. Debit dengan ketinggian banjir untuk 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.

Bentuk dari hidrograf dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Komponen Hidrograf Banjir

(Sumber: Triatmodjo, 2008)

Sherman (1932) dalam Triatmodjo (2008) mengenalkan konsep metode hidrograf satuan yang sering digunakan dalam menentukan atau memperkirakan banjir rencana dengan mentransformasikan hujan menjadi debit aliran. Hidrograf satuan didefinisikan sebagai hidrograf limpasan langsung (tanpa aliran dasar) yang ditimbulkan oleh hujan efektif sebesar satu satuan yang terjadi secara merata di permukaan Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan intensitas tetap dalam satu satuan waktu yang ditetapkan, yang disebut hujan satuan. Metode ini relatif sederhana, mudah dalam penerapannya, serta tidak membutuhkan data yang kompleks dan menghasilkan debit rencana yang cukup teliti.

3.2 Aliran Banjir

Banjir merupakan kejadian yang terjadi ketika aliran air di suatu tampang sungai mengalami peluapan sehingga dapat merendam suatu daratan. Peluapan air terjadi dikarenakan volume air yang masuk melebihi kapasitas suatu tampang sungai akibat curah hujan yang tinggi atau terjadinya keruntuhan bendungan. Riyanto (2019) mengatakan banjir akibat keruntuhan bendungan memiliki sifat yang berbeda dari banjir pada umumnya, antara lain puncak banjir sangat tinggi dengan waktu yang sangat singkat, waktu puncak banjir sama dengan waktu terbentuknya rekahan, berkisar selama beberapa menit sampai beberapa jam. Dengan ciri-ciri tersebut, menyebabkan banjir akibat keruntuhan bendungan memiliki komponen percepatan lebih besar dari banjir pada umumnya.

Triatmodjo (2008) menyebutkan dalam menentukan waktu dan debit aliran di suatu titik berdasarkan hidrograf yang diketahui di bagian hulu, maka diperlukan prosedur penelusuran banjir. Penelusuran banjir banyak dilakukan pada suatu penelitian pengendalian banjir, di mana perlu dilakukan analisis penelusuran banjir di sepanjang sungai atau suatu waduk. Apabila hidrograf di bagian hulu sungai atau waduk diketahui, maka akan dapat dihitung bentuk hidrograf banjir di bagian hilirnya.

3.3 Debit Banjir Rencana

Triatmodjo (2008) mengatakan bangunan pelimpah suatu bendungan harus dirancang untuk dapat melewati debit banjir maksimum yang mungkin terjadi.

Bangunan pelimpah dirancang berdasarkan analisis frekuensi data hidrologi. Analisis frekuensi dapat diterapkan untuk data debit sungai atau data hujan. Data yang digunakan merupakan data debit atau hujan maksimum tahunan, yaitu data terbesar yang terjadi selama satu tahun, yang tercatat selama beberapa tahun.

3.3.1 *Probable Maximum Precipitation (PMP)*

PMP atau juga disebut dengan kemungkinan hujan maksimum secara teoritis diartikan sebagai akumulasi ketebalan hujan maksimum yang mungkin terjadi di suatu DAS dalam kurun waktu tertentu. Asdak (2002) dalam Torimtubun (2018) mengartikan kata “kemungkinan” untuk menekankan bahwa proses fisik yang terjadi di atmosfer kurang dapat dimengerti dan adanya keterbatasan data iklim maka menjadi tidak mungkin untuk menentukan besarnya hujan maksimum dengan ketelitian tinggi. Untuk menghasilkan nilai PMP diperlukan data meteorologi yang lengkap dari stasiun hujan yang ada di sekitar DAS dan dapat dilakukan dengan pendekatan statistik.

3.3.2 *Probable Maximum Flood (PMF)*

PMF merupakan debit banjir maksimum di sungai atau waduk dengan periode kala ulang yang sudah ditentukan yang dapat mengalirkan air melewati bangunan pelimpah bendungan sehingga tidak membahayakan tubuh bendungan. Menurut Sri Harto (2009), PMF dapat dihitung secara statistik apabila data catatan debit yang tersedia cukup lengkap. Jika data tidak lengkap, PMF dapat ditetapkan dari hasil pengolahan data hujan terukur menjadi data hujan maksimum atau PMP.

3.4 **Keruntuhan Bendungan**

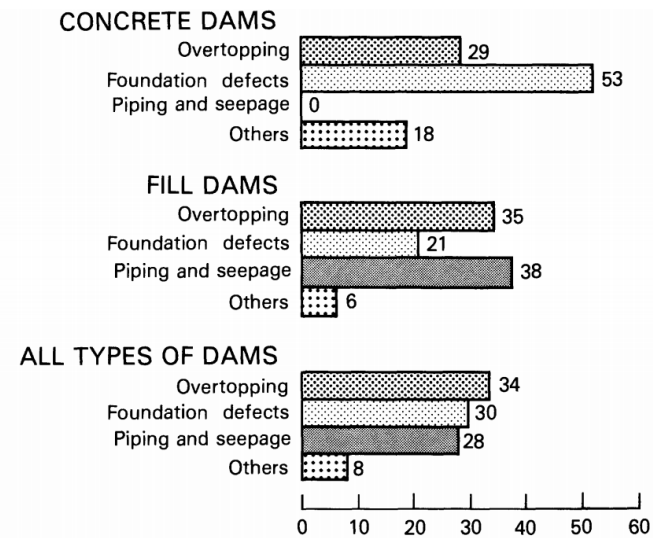
Keruntuhan bendungan didefinisikan sebagai keruntuhan sebagian atau seluruh bendungan atau bangunan pelengkap dan/atau kerusakan yang mengakibatkan tidak berfungsinya bendungan. Fread (1988) mengatakan bahwa keruntuhan bendungan umumnya terjadi diawali dengan rekahan (*breach*). Mekanisme runtuhnya suatu bendungan saat ini tidak diketahui secara pasti, baik bendungan beton maupun bendungan urugan tanah. Pada umumnya, runtuhnya bendungan diasumsikan terjadi secara menyeluruh dan dalam waktu yang relatif cukup singkat. Schocklitsch (1917) dan Army Corps of Engineers (1960) dalam Riyanto (2019) mengasumsikan runtuhnya bendungan terjadi secara sebagian saja

dan terjadi seketika, asumsi ini dianggap benar untuk kasus bendungan beton bertulang, akan tetapi tidak berlaku untuk bendungan urugan tanah maupun bendungan pasangan batu.

Riyanto (2019) menyimpulkan bahwa sebagian besar bendungan yang runtuh adalah bendungan dengan urugan tanah yang disebabkan oleh tingkat banjir tertentu. Dari data sejarah, semua tipe bendungan yang runtuh disebabkan oleh satu atau lebih penyebab. Beberapa hal yang dapat menyebabkan keruntuhan bendungan, antara lain

- a. kejadian banjir;
- b. *piping/seepage* (aliran dalam tanah pada tubuh bendungan);
- c. longsor pada tubuh bendungan;
- d. gempa bumi;
- e. kegagalan pondasi;
- f. kegagalan bangunan pelengkap (pintu air);
- g. kegagalan struktur;
- h. keruntuhan tubuh bendungan bagian hulu;
- i. penurunan muka air secara cepat;
- j. sabotase; serta
- k. perencanaan peruntuhan.

Costa (1985) menyebutkan bahwa peristiwa keruntuhan bendungan untuk bendungan tipe beton bertulang 29% keruntuhan diakibatkan oleh *overtopping*, 53% keruntuhan diakibatkan oleh kegagalan pondasi, dan 18% keruntuhan diakibatkan oleh faktor lainnya. Untuk tipe bendungan urugan tanah 35% keruntuhan diakibatkan oleh *overtopping*, 21% keruntuhan diakibatkan oleh kegagalan pondasi, 38% keruntuhan diakibatkan oleh *piping*, dan 6% keruntuhan diakibatkan oleh faktor lainnya. Sedangkan, untuk semua tipe bendungan 34% keruntuhan diakibatkan oleh *overtopping*, 30% keruntuhan diakibatkan oleh kegagalan pondasi, 28% keruntuhan diakibatkan oleh *piping*, dan 8% keruntuhan diakibatkan oleh faktor lainnya. Persentase penyebab keruntuhan bendungan menurut Costa (1985) dalam dilihat pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2 Persentase Keruntuhan Bendungan

(Sumber: Costa, 1985)

Kemungkinan penyebab keruntuhan bendungan berdasarkan tipe bendungan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Kemungkinan Penyebab Keruntuhan Bendungan Berdasarkan Tipe Bendungan

Tipe Keruntuhan	Urugan Tanah	Concrete Gravity	Concrete Arch	Concrete Buttress	Concrete Multi-Arch
<i>Overtopping</i>	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Piping/Seepage</i>	✓	✓	✓	✓	✓
Kegagalan Pondasi	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Sliding</i>	✓	✓		✓	
<i>Overturning</i>		✓	✓		
Keretakan	✓	✓	✓	✓	✓
Kegagalan Bangunan Pelengkap	✓	✓	✓	✓	✓

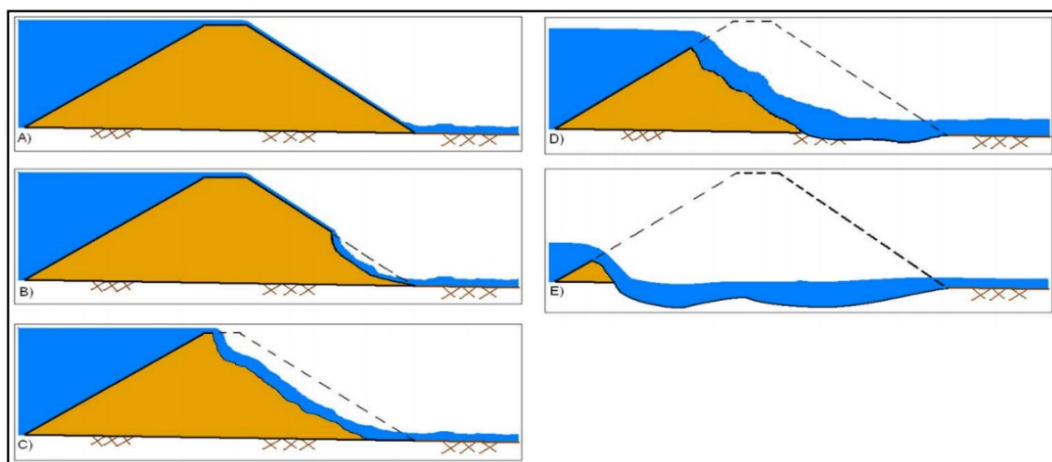
Sumber: Brunner (2014)

3.4.1 Keruntuhan Akibat *Overtopping*

Kondisi *overtopping* terjadi dikarenakan melimpasnya air pada waduk melalui puncak tubuh bendungan. Hal ini dapat disebabkan oleh pelimpah (*spillway*) yang tidak dapat mengalirkan air pada waduk sehingga air yang masuk melebihi kapasitas pelimpah dan mengalir melewati puncak tubuh bendungan. Zainuddin (2010) dalam Lisaputra (2016) menyebutkan bahwa keruntuhan akibat *overtopping* biasanya terjadi disebabkan oleh berikut ini.

1. Kapasitas pelimpah yang tidak mencukupi.
2. Pintu pelimpah gagal dioperasikan karena faktor manusia atau faktor teknis.
3. Longsor besar secara tiba-tiba masuk ke waduk menimbulkan gelombang besar.
4. Tinggi jagaan (*freeboard*) yang tidak cukup.

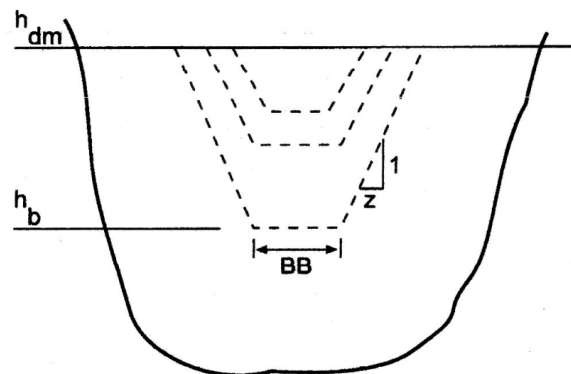
Pada Gambar 3.3, Brunner (2014) menjabarkan proses terjadinya keruntuhan akibat *overtopping* diawali dengan mengalirnya aliran dari puncak tubuh bendungan menuju hilir bendungan secara deras sehingga mengakibatkan terjadinya erosi pada kaki bagian hilir bendungan. Erosi tersebut akan menggerus hingga bagian puncak bendungan sehingga lebar puncak bendungan menjadi semakin kecil. Akibatnya, keruntuhan puncak bendungan akan langsung terjadi sehingga akan terbentuk rekahan menyerupai trapesium. Rekahan tersebut akan terus melebar dan meruntuhkan tubuh bendungan dengan lebar tertentu sesuai dengan aliran yang keluar dari bendungan yang menyebabkan gerusan.



Gambar 3.3 Proses Keruntuhan Bendungan Akibat *Overtopping*

(Sumber: Brunner, 2014)

Keruntuhan akibat *overtopping* disimulasikan berupa rekahan yang berbentuk segitiga, persegi dan trapesium. Rekahan tersebut makin lama akan makin membesar dengan waktu secara progresif dari puncak tubuh bendungan hingga ke bawah sampai mencapai pondasi. Pola rekahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Tampak Depan Pola Rekahan *Overtopping*

(Sumber: Fread, 1984)

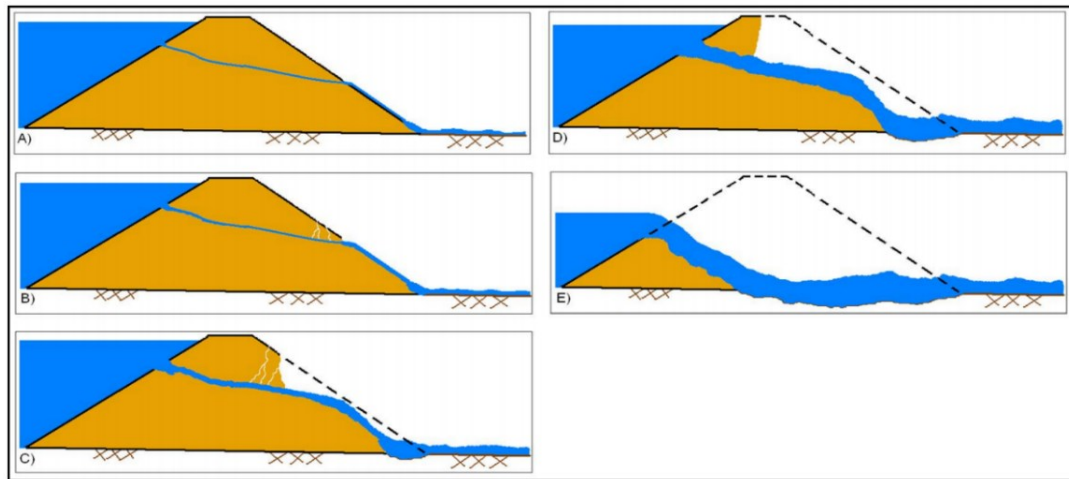
3.4.2 Keruntuhan Akibat *Piping*

Kondisi *piping* terjadi dikarenakan adanya rembesan yang melewati tubuh bendungan melalui pori-pori tanah yang menyebabkan erosi pada tubuh bendungan dan mengangkut material keluar dari tubuh bendungan. Lisaputra (2016) menyebutkan bahwa kondisi *piping* sering terjadi pada kondisi berikut ini.

1. Rembesan melalui lapisan tanah yang rawan tererosi dan tidak dilakukan upaya pengurangan rembesan untuk mengurangi gradien hidraulis.
2. Tidak adanya filter dan upaya pengurangan tekanan rembesan pada bagian keluaran untuk mencegah terbawanya butiran tanah.
3. Cara pengurangan rembesan tidak dilakukan dengan benar.

Pada Gambar 3.5, Brunner (2014) menjabarkan proses terjadinya keruntuhan akibat *piping* diawali dengan terjadinya erosi kecil yang akan memicu terbentuknya suatu lubang kecil, di mana lubang tersebut memungkinkan keluarnya air yang lebih besar dan mengikis lebih banyak material pada tubuh bendungan. Selama proses aliran *piping*, erosi dan penggerusan akan mulai terjadi pada sisi hilir bendungan akibat dari aliran *piping*. Saat lubang *piping* semakin membesar, material di atas lubang akan mulai terkelupas dan jatuh dalam air yang bergerak. Proses penggerusan dan jatuhnya material di atas lubang akan merambat ke lereng bendungan pada bagian hulu, sedangkan lubang *piping* akan terus membesar secara bersamaan. Apabila lubang *piping* cukup besar, maka berat material di atas lubang akan terlalu besar juga sehingga tidak mampu dipertahankan dan material akan longsor. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya peningkatan aliran *outflow* sehingga

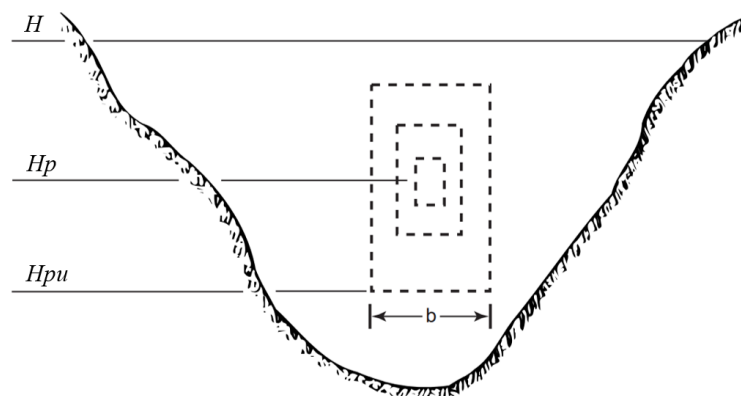
mempercepat proses tembusan. Pada titik ini, transisi hidraulik akan terjadi dari tipe aliran bertekanan dalam lubang menjadi aliran terbuka di atas ambang rekahan yang semakin melebar hingga terbentuk dasar aliran secara alami. Kemudian masuk pada fase pelebaran rekahan sampai batas waktu tertentu.



Gambar 3.5 Proses Keruntuhan Bendungan Akibat *Piping*

(Sumber: Brunner, 2014)

Keruntuhan akibat *piping* disimulasikan berupa rekahan persegi yang akan membesar seiring waktu dan berpusat pada ketinggian tertentu pada tubuh bendungan. Pola rekahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.6 di bawah ini. Fread (1984) menjelaskan daripada elevasi pusat lubang awal rembesan (H_p) yang berbentuk persegi. Dari lubang rembesan akan tergerus vertikal ke atas dengan kecepatan yang sama.



Gambar 3.6 Tampak Depan Pola Rekahan *Piping*

(Sumber: Fread, 1984)

Aliran ke dalam lubang dikontrol oleh persamaan berikut ini.

$$Q_b = \left[\frac{2g(H-H_p)}{\left(1 + \frac{fL}{D}\right)} \right] \quad (3.1)$$

dengan:

Q_b = debit aliran melewati lubang rembesan (m^3/det)

g = percepatan gravitasi (m/det^2)

A = luas penampang lubang (m^2)

$(H-H_p)$ = tinggi tekan hidrostatik pada lubang (m)

L = panjang lubang (m)

D = diameter atau lebar lubang (m)

f = koefisien kekasaran *Darcy-Weisbach*

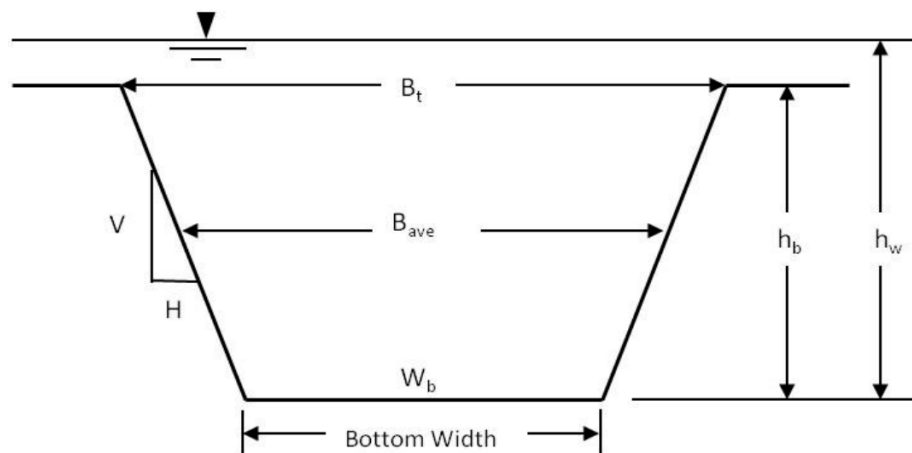
Puncak lubang (H_{pu}) akan tergerus ke atas sampai suatu titik di mana aliran akan berubah dari aliran lewat lubang menjadi aliran bebas, yaitu pada saat tinggi tekan dalam pipa lebih kecil daripada diameter lubang (Fread, 1988).

3.4.3 Parameter Keruntuhan

Dalam penelitian ini, penggunaan parameter empiris rekahan sangat penting untuk menghasilkan hidrograf banjir dan genangan banjir di bagian hilir bendungan yang akurat. Namun, parameter tersebut merupakan suatu ketidakpastian dalam setiap analisis. Saat ini, dalam HEC-RAS mempunyai 2 (dua) metodologi untuk dipilih dalam menganalisis keruntuhan bendungan, yaitu metode *User Entered Data* dan metode *Simplified Physical*. Metode *User Entered Data* peneliti diharuskan memasukkan semua parameter rekahan meliputi dimensi rekahan, waktu keruntuhan, progres rekahan, dan sebagainya. Sedangkan, metode *Simplified Physical* memungkinkan peneliti untuk memasukkan data hubungan kecepatan dan *breach downcutting* serta lebar rekahan, yang kemudian digunakan secara dinamis untuk mengetahui perkembangan rekahan serta kecepatan aktual yang dihitung melalui keruntuhan.

Brunner (2014) dalam Ikromi (2018) menjelaskan bahwa parameter keruntuhan dapat menjadi krusial dalam penelitian potensi risiko suatu bendungan dikarenakan parameter tersebut dapat berpengaruh langsung terhadap nilai debit

puncak, bentuk hidrograf *outflow* dan waktu peringatan yang tersedia untuk melakukan proses evakuasi di bagian hilir. Deskripsi parameter rekahan dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3.7 Deskripsi Parameter Rekahan

(Sumber: Brunner, 2014)

Brunner (2014) menjabarkan deskripsi rekahan akan terdiri dari ketinggian rekahan, lebar rekahan dan kemiringan sisi rekahan (H:V). Nilai-nilai tersebut menunjukkan ukuran rekahan maksimum. Dalam banyak persamaan, lebar rekahan digambarkan sebagai lebar rekahan rata-rata (B_{ave}). Namun, HEC-RAS memerlukan lebar bawah rekahan (W_b) untuk data masukan (*input*).

Beberapa lembaga pemerintah telah menerbitkan pedoman dalam bentuk rentang nilai untuk lebar rekahan, kemiringan sisi rekahan, dan waktu pengembangan yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Rentang Kemungkinan Nilai Karakteristik Rekahan

Tipe Bendungan	Lebar Rerata Rekahan	Kemiringan Sisi Rekahan (H:V)	Waktu Keruntuhan	Lembaga
Timbunan Tanah/Batu	(0,5 – 3,0) HD	0 – 1,0	0,5 – 4,0	USACE 1980
	(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 3.2 Rentang Kemungkinan Nilai Karakteristik Rekahan

Tipe Bendungan	Lebar Rerata Rekahan	Kemiringan Sisi Rekahan (H:V)	Waktu Keruntuhan	Lembaga
<i>Concrete Arch</i>	Lebar keseluruhan	Kemiringan dinding lembah	$\leq 0,1$	USACE 1980
	Lebar keseluruhan	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)

Parameter rekahan dapat diperkirakan dengan berbagai cara antara lain persamaan regresi, analisis komparatif, menggunakan hubungan kecepatan dan besarnya erosi, serta model komputer berbasis fisik. Beberapa peneliti telah mengembangkan persamaan regresi untuk menentukan dimensi rekahan (lebar rekahan, kemiringan rekahan, volume terkikis, dan lain-lain). Persamaan tersebut dikembangkan dari data kejadian keruntuhan bendungan timbunan tanah, bendungan timbunan tanah dengan inti kedap, dan bendungan timbunan batu. Maka dari itu, persamaan ini tidak dapat digunakan terhadap bendungan beton dan bendungan timbunan tanah dengan inti beton.

Sebelumnya pada tahun 1995, Froehlich telah membuat persamaan regresi untuk menentukan dimensi rekahan. Kemudian pada tahun 2008, Froehlich memperbarui persamaannya berdasarkan pada penambahan data baru. Froehlich meneliti 74 bendungan dengan tipe timbunan tanah, timbunan tanah dengan inti kedap (*clay*), dan timbunan batu untuk mengembangkan persamaan guna menentukan lebar rerata rekahan, kemiringan rekahan, serta waktu rekahan. Persamaan regresi tersebut adalah berikut ini.

$$B_{ave} = 0,27 K_o V_w^{0,32} h_b^{0,04} \quad (3.2)$$

$$B_{bottom} = B_{ave} - 2m \left(\frac{hb}{2} \right) \quad (3.3)$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}} \quad (3.4)$$

dengan:

B_{ave} = lebar rata-rata rekahan (m)

K_o = konstanta (1,3 untuk *overtopping*, 1,0 untuk *piping*)

V_w = volume waduk pada saat runtuh (m³)

h_b = tinggi akhir rekahan (m)

m = kemiringan sisi rekahan

g = kecepatan gravitasi (9,80665 m/d²)

t_f = waktu rekahan (d)

Froehlich menyebutkan bahwa kemiringan sisi rekahan pada *overtopping* adalah 1H:1V. Sedangkan, untuk *piping* adalah 0,7H:1V. Walaupun tidak disebutkan secara jelas dalam makalahnya, ketinggian akhir rekahan dapat diasumsikan terjadi dari atas puncak bendungan hingga permukaan tanah dasar.

3.5 Kekasaran *Manning*

Brunner (2016) menyebutkan bahwa nilai koefisien kekasaran *manning* memiliki berbagai variasi tergantung pada beberapa faktor, seperti

- a. kekasaran permukaan;
- b. vegetasi;
- c. ketidakteraturan saluran;
- d. alinyemen saluran;
- e. penggerusan dan deposisi;
- f. struktur penghambat;
- g. ukuran dan bentuk dari saluran;
- h. tinggi muka air debit;
- i. perubahan musim; serta
- j. suhu atau temperatur.

Pemilihan nilai koefisien kekasaran *manning* akan berpengaruh pada ketepatan hasil komputasi profil muka air. Chow (1959) dalam Brunner (2016) menyarankan nilai koefisien kekasaran *manning* untuk saluran alam dari angka minimum, normal dan maksimum yang dapat ditinjau pada Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.3 Perkiraan Nilai Koefisien Kekasaran *Manning* pada Saluran Alam

No	Saluran Alam	Minimum	Normal	Maksimum
1	Sungai Utama			
	a. Bersih, lurus, 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
	f. Sama seperti (1.d), lebih banyak batunya	0,045	0,050	0,060
	g. Penggal sungai yang lambat, bergulma dan berpalung	0,050	0,070	0,080
h. 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-semak			
	i. Rumput pendek	0,025	0,030	0,035
	ii. Rumput tinggi	0,030	0,035	0,050
	b. Area pertanian/budidaya			
	i. Tidak ada tanaman	0,020	0,030	0,040
	ii. Tanaman dewasa satu baris	0,025	0,035	0,045
	iii. Tanaman dewasa satu bidang	0,030	0,040	0,050
	c. Semak-semak			
	i. Semak-semak yang tersebar dan banyak gulma	0,035	0,050	0,070
	ii. Semak-semak ringan dan pepohonan kecil pada musim dingin	0,035	0,050	0,060
	iii. Semak-semak ringan dan pepohonan kecil pada musim panas	0,040	0,060	0,080
	iv. Semak-semak medium-rimbun pada musim dingin	0,045	0,070	0,110
	v. Semak-semak medium-rimbun pada musim panas	0,070	0,100	0,160
	d. Pepohonan			
	i. Lahan yang dibuka dengan tunggal pohon, dan tidak ada tunas yang tumbuh	0,030	0,040	0,050
	ii. Sama dengan (2.d.i), tetapi dengan banyak tunas yang tumbuh	0,050	0,060	0,080
	iii. Banyak pohon berbatang keras, sedikit pohon muda, elevasi aliran masih di bawah cabang ranting pohon	0,080	0,100	0,120
iv. Sama dengan (2.d.iii), tetapi elevasi aliran sampai dengan cabang-ranting pohon	0,100	0,120	0,160	
v. Banyak pohon Willow pada musim panas	0,110	0,150	0,200	

Lanjutan Tabel 3.3 Perkiraan Nilai Koefisien Kekasaran *Manning* pada Saluran Alam

No	Saluran Alam	Minimum	Normal	Maksimum
3	Saluran di pegunungan, tidak ada vegetasi pada saluran, kemiringan dasar curam, dengan pepohonan dan semak-semak yang terendam di tampungan			
	e. Dasar: <i>gravels, cobbles</i> , dan sedikit <i>boulders</i>	0,030	0,040	0,050
	f. Dasar: <i>cobbles</i> dengan banyak <i>boulders</i>	0,040	0,050	0,070

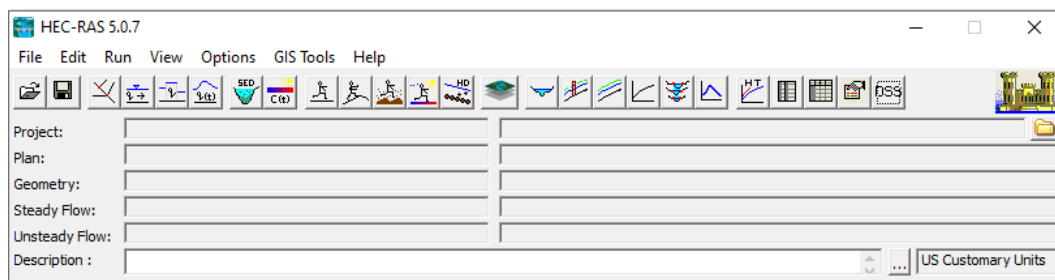
Sumber: Brunner (2016)

3.6 Program HEC-RAS

HEC-RAS adalah *software* untuk memodelkan aliran di sungai atau *River Analysis System* (RAS), yang dibuat dan dikembangkan 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 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan versi 5.0.7 yang dirilis pada bulan Maret tahun 2019. Pada program HEC-RAS versi 5.0.7 ini sudah dibekali dengan *GIS Tools* berupa *RAS Mapper*. *Tools* ini berfungsi untuk memproyeksikan data DEM (*Digital Elevation Model*) menjadi data geometri, hal ini sangat mempermudah dalam melakukan digitasi waduk dan bendungan. HEC-RAS juga mampu menjalankan pemodelan 1 dimensi, 2 dimensi, dan gabungan 1-2 dimensi. HEC-RAS mempunyai 4 (empat) komponen hidraulika satu dimensi untuk

- a. hitungan profil muka air aliran permanen;
- b. simulasi aliran tak permanen;
- c. hitungan transport sedimen; serta
- d. hitungan kualitas air.









Tampilan awal pada program HEC-RAS versi 5.0.7 dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut ini.



Gambar 3.8 Tampilan Awal HEC-RAS 5.0.7

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berikut ini merupakan deskripsi dari kegunaan dari beberapa *tools* yang ada pada program HEC-RAS versi 5.0.7.

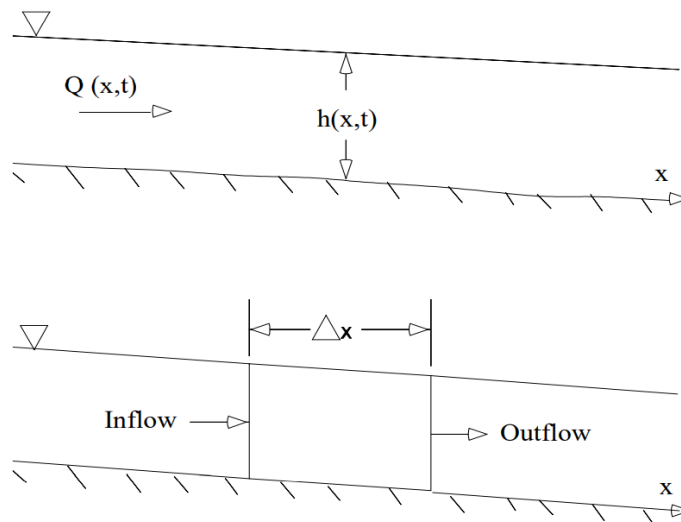
1. *View/Edit geometric data* () untuk membuat dan mengisi data geometri sungai yang akan disimulasikan.
2. *View/Edit unsteady flow data* () untuk memasukkan data aliran tidak permanen serta kondisi batas hulu dan hilir.
3. *Perform an unsteady flow simulation* () untuk running atau menjalankan simulasi aliran.
4. *RAS Mapper* () untuk memproyeksikan dan digitasi tampang waduk dan sungai menjadi data geometri.
5. *View cross sections* () untuk melihat potongan melintang sungai.
6. *View profiles* () untuk melihat potongan memanjang sungai.
7. *View 3D multiple cross section plot* () untuk melihat penampakan 3 (tiga) dimensi dari pemodelan yang telah dibuat.
8. *View summary output tables by profiles* () untuk melihat hasil *running* dalam bentuk tabel.

Simulasi aliran di saluran terbuka (*open channel*) merupakan salah satu cara untuk mempelajari pola aliran di sepanjang aliran tersebut. Hitungan hidraulika aliran pada dasarnya adalah mencari kecepatan dan kedalaman aliran di sepanjang saluran yang ditimbulkan oleh debit yang masuk ke dalam saluran. Perhitungan hidraulika aliran di dalam HEC-RAS dilakukan dengan membagi aliran ke dalam dua kategori, yaitu aliran permanen dan aliran tidak permanen. Aliran permanen merupakan kondisi aliran yang tidak akan terpengaruh oleh perubahan waktu.

Sedangkan, aliran tidak permanen merupakan kondisi aliran akan terpengaruh oleh perubahan waktu. Dalam melakukan analisis simulasi aliran pada keruntuhan bendungan, ada 2 (dua) persamaan yang digunakan oleh HEC-RAS yaitu persamaan kontinuitas dan persamaan momentum.

3.6.1 Persamaan Kontinuitas

Perhatikan volume kontrol dasar pada Gambar 3.9 di bawah ini. Pada gambar ini, jarak x diukur sepanjang saluran, seperti yang ditunjukkan. Pada titik tengah volume kontrol, aliran dan luas aliran total masing-masing dilambangkan dengan $Q(x,t)$ dan A_T .



Gambar 3.9 Volume Kontrol Dasar untuk Penurunan Persamaan Kontinuitas dan Momentum

(Sumber: Brunner, 2016)

Prinsip kontinuitas menyebutkan bahwa jumlah pertambahan volume sama dengan besarnya aliran netto yang melewati pias tersebut. Debit aliran masuk (*inflow*) volume kontrol pada pias dapat ditulis sebagai:

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (3.5)$$

debit aliran keluar (*outflow*) ditulis sebagai:

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (3.6)$$

dan perubahan volume pada pias ditulis sebagai:

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

Dengan mengasumsikan bahwa Δx kecil, maka perubahan massa dalam volume kontrol pada pias sama dengan:

$$\rho \frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_l \right] \quad (3.8)$$

Dengan Q_l adalah aliran lateral yang mengalir pada volume kontrol dan ρ adalah massa jenis zat cair. Kemudian menyederhanakan dengan membagi $\rho \Delta x$, maka akan menghasilkan bentuk akhir dari persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (3.9)$$

dengan q_l merupakan aliran masuk (*inflow*) lateral per satuan panjang.

3.6.2 Persamaan Momentum

Kekekalan momentum dinyatakan oleh hukum kedua Newton sebagai:

$$\sum F_x = \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (3.10)$$

Besarnya momentum pada suatu pias aliran adalah sama dengan besarnya resultan gaya-gaya yang bekerja pada pias tersebut. Ada 3 (tiga) gaya yang dipertimbangkan, yaitu gaya tekan, gaya gravitasi dan gaya gesek.

1. Gaya Tekan

Distribusi tekanan diasumsikan hidrostatis (tekanan bervariasi secara linear dengan kedalaman). Shames (1962) dalam Brunner (2016), menyatakan persamaan gaya tekan dapat ditulis sebagai:

$$F_{pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (3.11)$$

2. Gaya Gravitasi

Akibat gaya gravitasi dari fluida pada volume kontrol arah x adalah:

$$F_g = \rho A \sin \theta \Delta x \quad (3.12)$$

Dengan θ adalah sudut kemiringan pada saluran. Untuk sungai alam nilai θ sangat kecil, sehingga nilai $\sin \theta$ mendekati $\tan \theta \left(-\frac{\partial Z_0}{\partial x}\right)$, dengan Z_0 adalah elevasi *invert*. Maka persamaan akhir gaya gravitasi pada volume kontrol dapat ditulis sebagai:

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial Z_0}{\partial x} \Delta x \quad (3.13)$$

Gaya ini akan menjadi positif untuk kemiringan negatif.

3. Gaya Gesek

Gaya gesek yang bekerja pada pias yang ditinjau ditulis sebagai:

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x \quad (3.14)$$

dengan S_f adalah kemiringan garis energi.

4. Fluks Momentum

Fluks momentum yang masuk pada pias volume kontrol ditulis sebagai:

$$\rho = \left[QV - \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (3.15)$$

Kemudian fluks momentum yang keluar dari pias volume kontrol ditulis sebagai:

$$\rho = \left[QV + \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (3.16)$$

Oleh karena itu, aliran netto dari fluks momentum yang masuk pada volume kontrol adalah:

$$-\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x \quad (3.17)$$

Karena momentum fluida pada volume kontrol adalah $\rho Q \Delta x$, maka momentum dalam pias yang ditinjau dapat ditulis sebagai:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (3.18)$$

Mengulangi hukum kedua Newton yang dijelaskan di atas, karenanya persamaan momentum dapat ditulis sebagai:

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial Z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad (3.19)$$

Elevasi permukaan air dinotasikan sebagai z , maka z sebanding dengan $z_0 + h$. Oleh karena itu, persamaannya dapat ditulis sebagai:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (3.20)$$

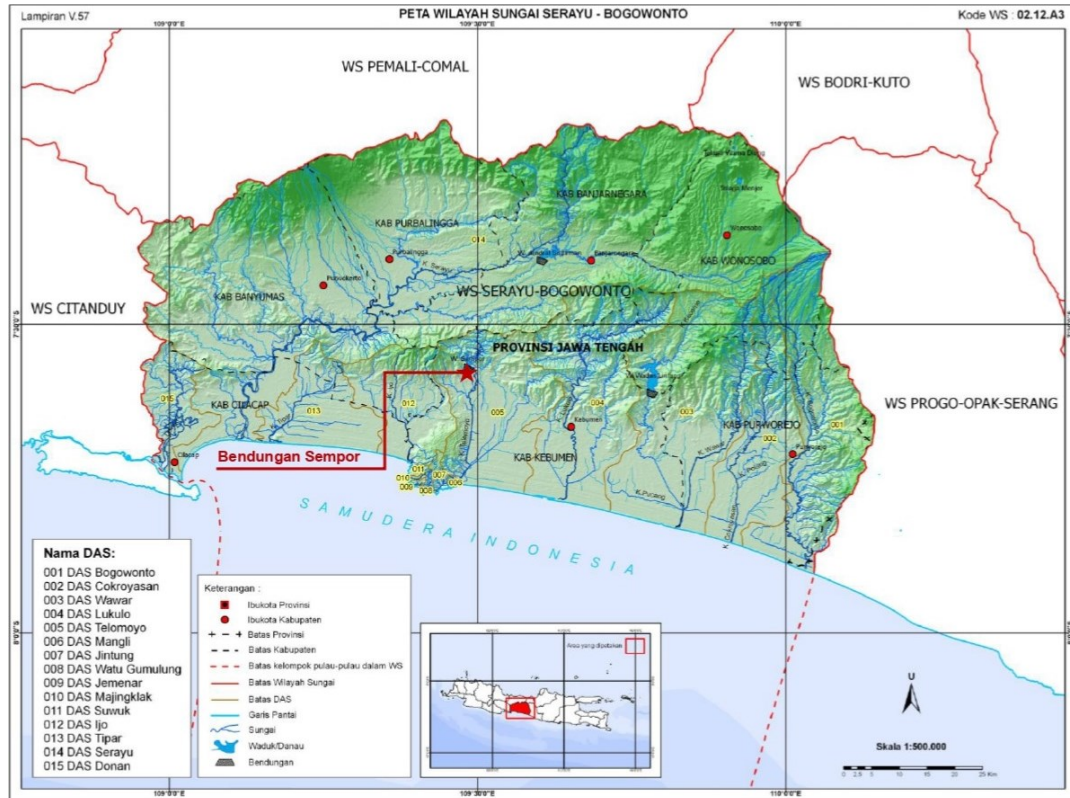
Dengan $\frac{\partial z}{\partial x}$ adalah kemiringan permukaan air. Mensubstitusikan persamaan (3.19) ke persamaan (3.18) dengan membaginya dengan $\rho \Delta x$, maka akan didapatkan hasil akhir dari persamaan momentum:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (3.21)$$

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1 Lokasi Objek Penelitian

Lokasi objek penelitian ini adalah di Bendungan Sempor yang berada di Desa Sempor, Kecamatan Sempor, Kabupaten Kebumen, Provinsi Jawa Tengah. Secara geografis, Bendungan Sempor terletak pada titik koordinat $7^{\circ}33'59,41''$ LS dan $109^{\circ}29'8,62''$ BT. Bendungan Sempor mempunyai peran penting dan fungsi utama sebagai pengairan irigasi persawahan seluas 6.485 ha. Bendungan Sempor berada pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Telomoyo Wilayah Sungai (WS) Serayu-Bogowonto dengan luas DAS sebesar $43,38 \text{ km}^2$. Bendungan ini mempunyai luas genangan waduk seluas 270 ha serta dirancang untuk menampung volume efektif waduk sebesar 46,5 juta m^3 . Lokasi Bendungan Sempor dapat dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4.1 Peta Lokasi Bendungan Sempor
(Sumber: PT. Caturbina Guna Persada, 2020)

4.2 Metode dan Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian yang menggunakan metode analisis studi kasus yang bersifat kuantitatif, yaitu penelitian yang berdasarkan teori dan data untuk melakukan sebuah analisis. Penelitian ini menganalisis data yang diperoleh dengan menggunakan program aplikasi HEC-RAS versi 5.0.7, sehingga akan diperoleh hasil akhir mengenai aliran banjir yang terjadi akibat keruntuhan bendungan. Simulasi keruntuhan diakibatkan oleh *piping* dengan menggunakan rumus empiris parameter rekahan Froehlich (2008) dan dikaitkan dengan Tabel 3.2 tentang rentang nilai karakteristik rekahan bendungan yang dikeluarkan oleh USACE.

4.3 Data Penelitian

Pengumpulan data penunjang penelitian merupakan tahap yang penting dalam melakukan sebuah analisis. Data yang benar dan akurat akan menghasilkan analisis keruntuhan bendungan yang sesuai dan dapat diterapkan pada kondisi di lapangan. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder, yaitu data yang tidak diambil secara langsung oleh penulis, melainkan data yang didapatkan dari berbagai instansi yang terkait dalam penelitian ini. Beberapa data yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut ini.

1. Data teknis Bendungan Sempor, yaitu data mengenai dimensi bendungan yang diperoleh dari Laporan Akhir Studi Optimasi Rencana Pengerukan Sedimen Waduk Sempor oleh PT. Caturbina Guna Persada melalui Badan Besar Wilayah Sungai (BBWS) Serayu-Opak.
2. Data hidrologi dan hidrolika Bendungan Sempor, yaitu data mengenai karakteristik tampungan Waduk serta data debit PMF (*Probably Maximum Flood*) yang diperoleh dari konsultan melalui Badan Besar Wilayah Sungai (BBWS) Serayu-Opak.
3. Data geomteri dan topografi daerah hulu dan hilir Bendungan Sempor, yaitu data mengenai fotogrametri berupa DEM (*Digital Elevation Model*) yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial Indonesia.
4. Data tata guna lahan yang diperoleh dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutan (KLHK).

4.4 Tahapan Penelitian

Dalam penelitian ini memiliki tahapan penelitian yang sistematis dan terencana agar dapat memperoleh hasil yang sesuai dan akurat. Adapun tahapan dan langkah-langkah dalam melakukan penelitian ini akan dijabarkan berikut ini.

4.4.1 Pengumpulan Data Penelitian

Beberapa data yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut ini.

1. Data teknis Bendungan Sempor

Data mengenai teknis bendungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Data umum

Lokasi : Desa Sempor Kec. Sempor Kab. Kebumen Jawa Tengah

Tahun konstruksi : 1975-1978 Masehi

Pengelola : Balai Besar Wilayah Sungai Serayu-Opak

b. Data hidrologi

Curah hujan : 3.182 mm

Daerah aliran sungai : Telomoyo

Luas DAS : 43,0 km²

Debit rata-rata : 2,80 m³/s

c. Data bendungan

Tipe urugan : Urugan batu dengan inti (tanah) kedap air

Panjang puncak : 220,0 m

Lebar puncak : 10,0 m

Tinggi puncak : 54,0 m (dari pondasi terdalam)

Elevasi puncak : + 77,0 m

Kemiringan Lereng Hulu : 1:2,2

Kemiringan Lereng Hilir : 1:1,9

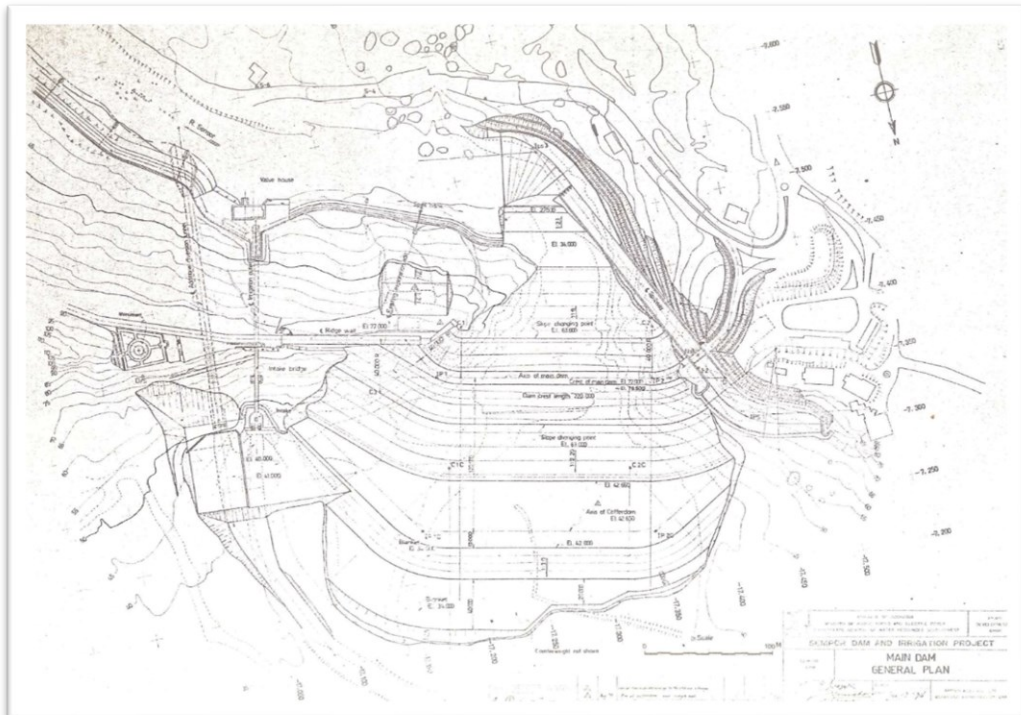
d. Data waduk

Elevasi muka air minimum : +43,0 m

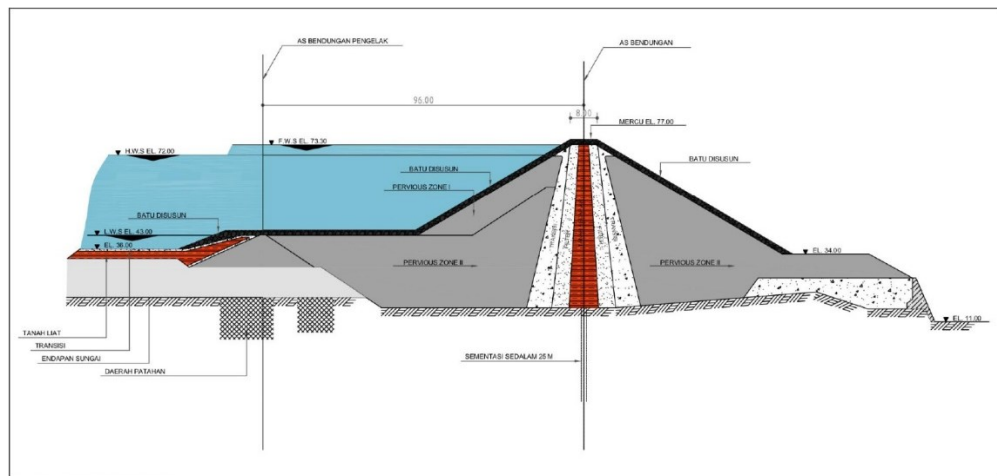
Elevasi muka air normal : +72,0 m

Elevasi muka air banjir : +73,78 m

Tampungan mati	: 5.500.00 m ³
Tampungan efektif	: 46.500.000 m ³
Tampungan normal	: 52.000.000 m ³
e. Pelimpah	
Tipe	: Ogee tanpa pintu
Elevasi mercu	: +72,0 m
Lebar mercu	: 105 m
f. Lain-lain	
Irigasi	: 6.485 ha
Daerah irigasi	: Saluran Induk Sempor Barat (500 ha) : Saluran Induk Sempor Timur (5.985 ha)
PLTA	: 1,10 Mega Watt
Bidang lain	: Konservasi dan Pariwisata



Gambar 4.2 Situasi Bendungan Sempor
(Sumber: Balai Besar Wilayah Sungai Serayu-Opak)



Gambar 4.3 Potongan Melintang Tubuh Bendungan Sempor
(Sumber: Balai Besar Wilayah Sungai Serayu-Opak, 2019)

2. Data mengenai karakteristik tampungan waduk yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan kurva elevasi versus volume Waduk Sempor yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Data Karakteristik Waduk Sempor

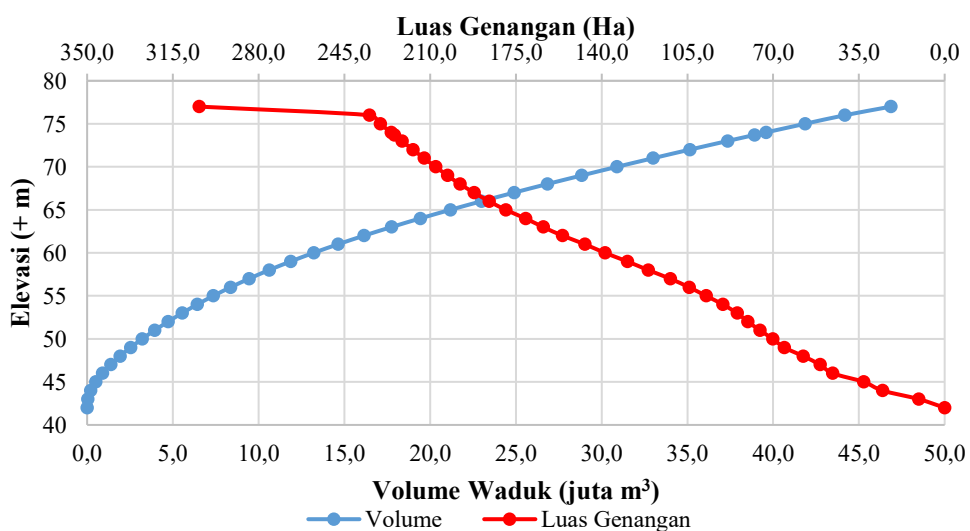
No.	Elevasi (mdpl)	Luas (Ha)	Volume (1000 m ³)	Keterangan
1	42	0,00	0,00	El. Dasar Bendungan
2	43	10,58	35,27	El. Muka Air Min.
3	44	25,39	209,79	
4	45	33,03	501,04	
5	46	45,7	892,98	
6	47	50,83	1.375,38	
7	48	57,77	1.917,99	
8	49	65,44	2.533,64	
9	50	70,21	3.211,75	
10	51	75,36	3.939,43	
11	52	80,33	4.717,71	
12	53	84,74	5.542,94	
13	54	90,51	6.419,02	
14	55	97,36	7.358,19	
15	56	104,3	8.366,34	
16	57	112,04	9.447,84	
17	58	121,02	10.612,86	
18	59	129,46	11.865,04	
19	60	138,68	13.205,48	
20	61	146,81	14.632,74	

Lanjutan Tabel 4.1 Data Karakteristik Waduk Sempor

No.	Elevasi (mdpl)	Luas (Ha)	Volume (1000 m ³)	Keterangan
21	62	155,99	16.146,49	
22	63	163,85	17.745,52	
23	64	171,1	19.420,15	
24	65	179,14	21.171,19	
25	66	185,94	22.996,49	
26	67	192,05	24.886,38	
27	68	197,87	26.835,95	
28	69	202,93	28.839,89	
29	70	207,76	30.893,28	
30	71	212,49	32.994,50	
31	72	217,03	35.142,08	El. <i>Spillway</i>
32	73	221,53	37.334,89	
33	73,7	224,63	38.901,08	El. Muka Air Banjir
34	74	225,96	39.572,31	
35	75	230,41	41.854,11	
36	76	234,76	44.179,92	
37	77	304,29	46.867,64	El. Puncak Bendungan

Sumber: Laporan Akhir Bendungan Sempor PT. Caturbina Guna Persada (2021)

Dari data di atas, maka akan didapatkan grafik karakteristik tampungan Waduk Sempor dari hubungan antara elevasi, luas dan volume waduk yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Grafik Karakteristik Waduk Sempor

(Sumber: Laporan Akhir Bendungan Sempor PT. Caturbina Guna Persada, 2021)

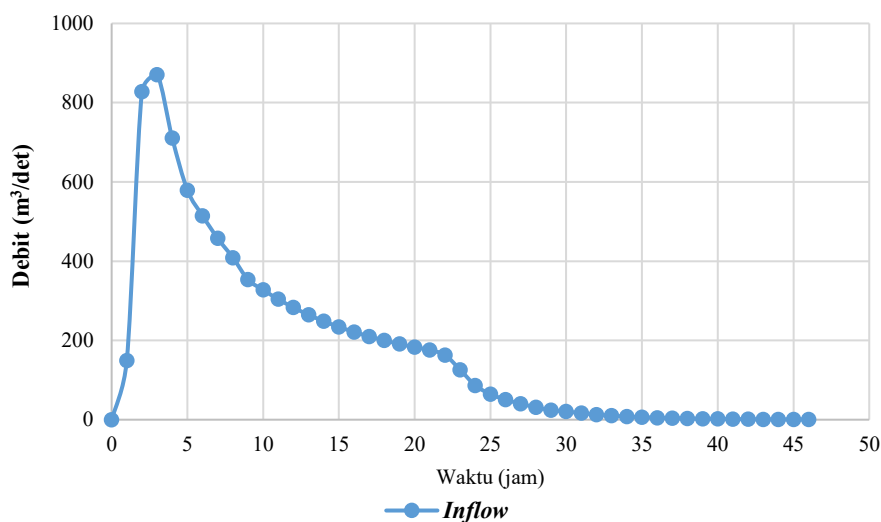
3. Data hidrograf rencana yaitu data mengenai debit PMF (*Probably Maximum Flood*) yang diperoleh dari Laporan Akhir Penyusunan Inspeksi Khusus dan Manual di Bendungan Sempor 2020 oleh PT. Dehas Inframedia Karsa melalui Badan Besar Wilayah Sungai (BBWS) Serayu-Opak. Data mengenai hidrograf rencana pada penelitian ini menggunakan data debit Q_{PMF} Waduk Sempor yang dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Data Hidrograf Banjir Rencana Q_{PMF}

No.	Jam	Debit (m^3/det)	No.	Jam	Debit (m^3/det)
1	0:00	0	25	24:00	86,438
2	1:00	149,514	26	25:00	64,456
3	2:00	828	27	26:00	50,466
4	3:00	870,970	28	27:00	40,445
5	4:00	710,389	29	28:00	31,169
6	5:00	579,322	30	29:00	24,377
7	6:00	514,674	31	30:00	20,500
8	7:00	457,587	32	31:00	16,630
9	8:00	408,955	33	32:00	12,756
10	9:00	353,674	34	33:00	10,009
11	10:00	327,509	35	34:00	7,854
12	11:00	303,964	36	35:00	6,163
13	12:00	283,109	37	36:00	4,836
14	13:00	264,709	38	37:00	3,795
15	14:00	248,475	39	38:00	2,978
16	15:00	234,131	40	39:00	2,337
17	16:00	221,423	41	40:00	1,834
18	17:00	210,130	42	41:00	1,439
19	18:00	200,059	43	42:00	1,129
20	19:00	191,044	44	43:00	0,886
21	20:00	182,941	45	44:00	0,695
22	21:00	175,629	46	45:00	0,546
23	22:00	163,095	47	46:00	0,428
24	23:00	126,037			

Sumber: Laporan Akhir Bendungan Sempor PT. Dehas Inframedia Karsa (2020)

Puncak debit sebesar 870,97 m³/detik yang terjadi pada jam ke-3. Dari data di atas, didapatkan grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5 Grafik Hidrograf Banjir Rencana QPMF

(Sumber: Laporan Akhir Bendungan Sempor PT. Dehas Inframedia Karsa, 2020)

4. Data geometri, yaitu data fotogrametri berupa DEM (*Digital Elevation Model*) yang digunakan untuk memodelkan tampang sungai pada program HEC-RAS yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial atau dapat diunduh pada situs srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/ atau tanahair.indonesia.go.id/demnas/ yang kemudian diproyeksikan menjadi data RAS *Mapper* menggunakan bantuan program ArcGIS.
5. Data tata guna lahan, yaitu data gambaran wilayah berupa batas penampakan area tutupan di atas permukaan bumi yang terdiri dari bentang alam dan/atau bentang buatan. Data ini berguna sebagai acuan penentuan koefisien *Manning*.

4.4.2 Pemodelan Keruntuhan Bendungan Menggunakan HEC-RAS

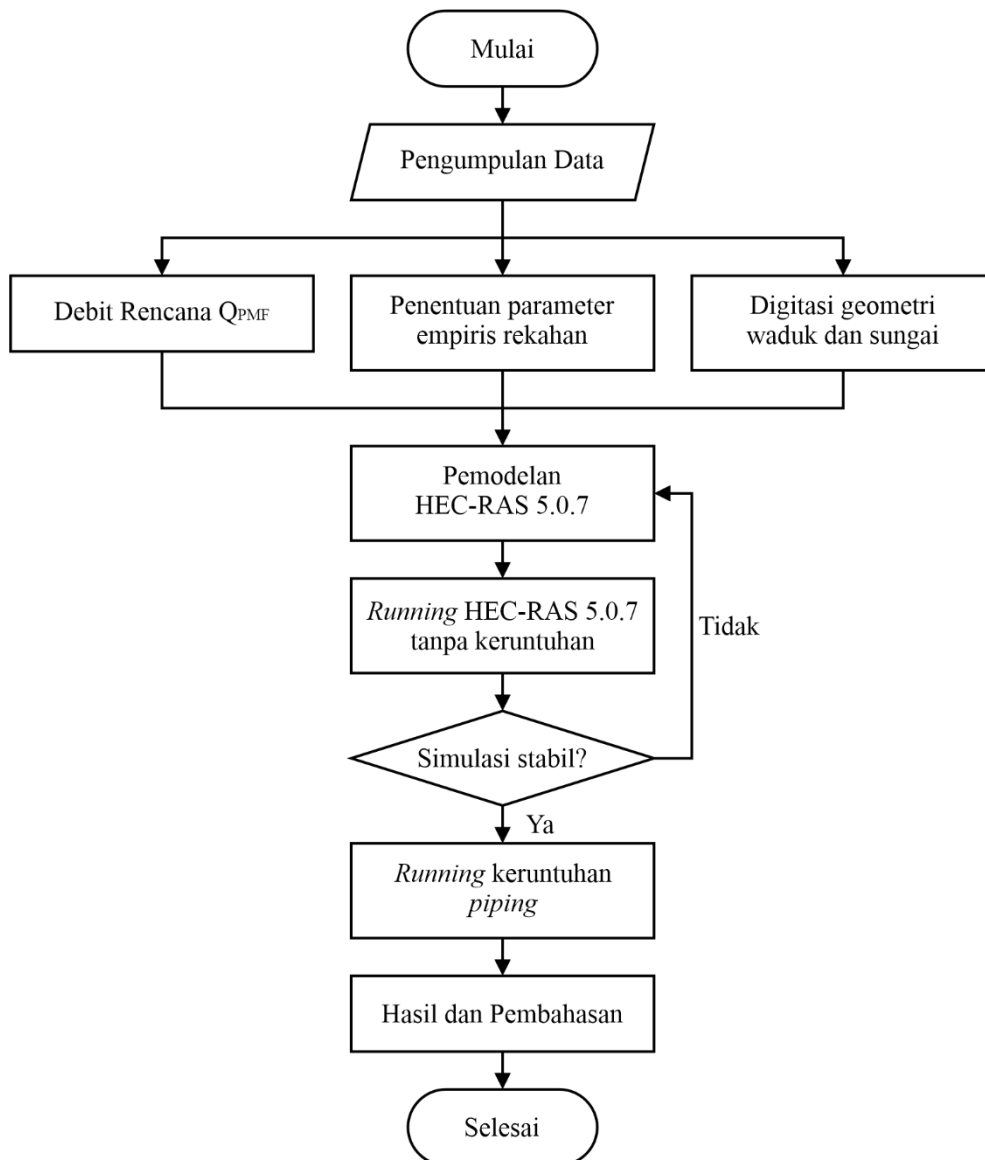
Analisis keruntuhan bendungan disimulasikan terjadi akibat oleh *overtopping* dan *piping*. Adapun berikut ini merupakan tahap-tahap analisis keruntuhan bendungan menggunakan program HEC-RAS versi 5.0.7.

1. Pembuatan *File Project*

Langkah pertama dalam pemodelan simulasi keruntuhan bendungan dengan HEC-RAS adalah membuat *file* proyek baru terlebih dahulu. Berikut ini merupakan langkah-langkahnya.

- a. Menekan menu *File*, kemudian menekan *New Project*.
 - b. Memilih folder lokasi penyimpanan *file*.
 - c. Menuliskan judul proyek pada kolom *Title*, maka nama *Project File* akan secara otomatis dituliskan sesuai judul proyek dan berformat *.prj.
 - d. Setelah itu menekan tombol *OK* pada layar konfirmasi.
2. Pemodelan geometri waduk dan sungai
- Setelah membuat *project file* baru pada program HEC-RAS 5.0.7, kemudian selanjutnya membuat *file* data geometri yang didapatkan dari data DEMNAS yang sudah diproyeksikan menjadi data *RAS Mapper*. *RAS Mapper* berguna untuk mengolah data geospasial menjadi data geometri. Pekerjaan yang dikerjakan pada *RAS Mapper* akan secara otomatis terkoneksi pada *file* data geometri.
3. Penentuan syarat batas dan syarat awal
- Setelah selesai digitasi geometri waduk dan sungai, langkah selanjutnya adalah menentukan Syarat Batas (*Boundary Condition*) dan Syarat Awal (*Initial Condition*). Langkah ini dimulai dengan memasukkan data kondisi waduk dan bendungan ke dalam tabel menggunakan menu *Inline Structure* pada program HEC-RAS. Data yang dimasukkan dalam tabel ini berupa elevasi puncak bendungan, lebar puncak bendungan, panjang bendungan, kemiringan hulu dan hilir bendungan, elevasi *spillway*, serta lebar *spillway*. Kondisi Syarat Batas digunakan untuk menentukan permukaan air mula-mula di hulu dan hilir sungai untuk memulai perhitungan.
4. Perhitungan hidraulika aliran dan presentasi hasil simulasi
- Setelah semua data dimasukkan ke dalam model, maka langkah selanjutnya adalah menjalankan (*running*) simulasi. Kemudian setelah menjalankan (*running*) simulasi, program HEC-RAS akan menampilkan hasil hitungan simulasi dalam bentuk grafik dan tabel.

Adapun secara umum tahapan pada penelitian ini dapat dilihat pada bagan alir penelitian di bawah ini.



Gambar 4.6 Bagan Alir Penelitian

BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Penentuan Parameter Rekahan

Dalam penelitian keruntuhan bendungan ini parameter rekahan menggunakan rumus empiris yang bersumber dari persamaan regresi yang dibuat oleh Froehlich (2008) pada persamaan 3.2, 3.3 dan 3.4. Persamaan tersebut akan menghasilkan parameter rekahan yang dapat digunakan untuk menganalisis keruntuhan bendungan, yaitu berupa lebar rerata rekahan, waktu formasi keruntuhan serta lebar bawah bidang rekahan. Hasil dari perhitungan parameter rekahan tersebut kemudian dihubungkan dengan Tabel 3.2 untuk meninjau rentang nilai karakteristik rekahan yang telah disediakan.

Untuk memperoleh nilai parameter rekahan di atas, dibutuhkan data volume tampungan waduk serta tinggi akhir rekahan. Untuk menentukan volume tampungan waduk diambil dari data kurva karakteristik tampungan waduk pada saat terjadi keruntuhan. Kemudian, untuk menentukan tinggi akhir rekahan diambil dari beda elevasi ketinggian bendungan dengan elevasi dasar rekahan. Berdasarkan data kemiringan rekahan dan lebar dasar bendungan yang mempertimbangkan gerusan pada pondasi, elevasi dasar rekahan ditentukan pada elevasi +47 m. Sehingga tinggi rekahan akhir didapatkan sebesar 30 m. Dari dokumen pekerjaan Laporan Akhir Studi Optimasi Rencana Pengerukan Sedimen Waduk Sempor, elevasi muka air waduk saat Q_{PMF} adalah +73.78 m. Maka dengan menggunakan kurva karakteristik bendungan didapatkan volume tampungan saat terjadi keruntuhan (V_w) sebesar $38.901,08 \times 1000 \text{ m}^3$. Berikut merupakan perhitungan parameter keruntuhan Bendungan Sempor.

$$\begin{aligned} B_{ave} &= 0,27 K_o V_w^{0,32} h_b^{0,04} \\ &= 0,27 (1,0) (38.901,08 \times 1000)^{0,32} (30)^{0,04} \\ &= 83,0303 \text{ m} \end{aligned}$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan lebar rerata rekahan (B_{ave}) sebesar 83,0303 m. Namun data yang dibutuhkan dalam pemodelan keruntuhan di HEC-RAS adalah lebar bawah bidang rekahan (B_{bottom}). Froehlich (2008) menjelaskan bahwa kemiringan rekahan pada keruntuhan piping adalah 1:0,7. Sehingga didapatkan nilai lebar bawah bidang rekahan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} B_{bottom} &= B_{ave} - 2m \left(\frac{hb}{2} \right) \\ &= 83,0303 - 2(0,7) \left(\frac{30}{2} \right) \\ &= 62,0303 \text{ m} \end{aligned}$$

Didapatkan nilai lebar bawah bidang rekahan sebesar 62,0303 m. Kemudian menghitung waktu formasi keruntuhan (tf) dengan nilai V_w dan hb yang sudah diketahui sebelumnya, perhitungan waktu formasi keruntuhan dijelaskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} tf &= 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}} \\ &= 63,2 \sqrt{\frac{38.901,08 \times 1000}{9,81 \times 30^2}} \\ &= 4,195.0984 \text{ detik} \approx 1,1653 \text{ jam} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan regresi dari Froehlich di atas, didapatkan waktu formasi keruntuhan bendungan yaitu 1,1653 jam. Ditinjau dari Tabel 3.2 yang diterbitkan oleh USACE pada tahun 2007, waktu formasi keruntuhan pada tipe bendungan timbunan tanah/batu berada dalam rentang waktu 0,1 – 4,0 jam. Dalam penelitian ini, penulis memilih bilangan bulat dengan selisih 1 jam di atas dan di bawah waktu formasi keruntuhan yang dihitung melalui persamaan Froehlich di atas. Nilai parameter rekahan yang digunakan dalam simulasi dapat ditemukan dalam Tabel 5.1 berikut ini.

Tabel 5.1 Nilai Parameter Keruntuhan *Piping* Bendungan Sempor

No.	Parameter	Skenario				
		1	2	3	4	5
1	El. puncak bendungan (m)	+77	+77	+77	+77	+77
2	El. Muka air awal (m)	+72	+72	+72	+72	+72
3	Lebar <i>Spillway</i> (m)	105	105	105	105	105

Lanjutan Tabel 5.1 Nilai Parameter Keruntuhan *Piping* Bendungan Sempor

No.	Parameter	Skenario				
		1	2	3	4	5
4	El. <i>Spillway</i> (m)	+72	+72	+72	+72	+72
5	Lebar bawah rekahan (m)	62,0303	62,0303	62,0303	62,0303	62,0303
6	El. dasar rekahan (m)	+47	+47	+47	+47	+47
7	El. muka air saat terjadi rekahan (m)	+72	+72	+72	+72	+72
8	Pusat rekahan	+62	+62	+62	+62	+62
9	Kemiringan rekahan	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
10	Waktu keruntuhan (jam)	1	1,1653	2	3	4

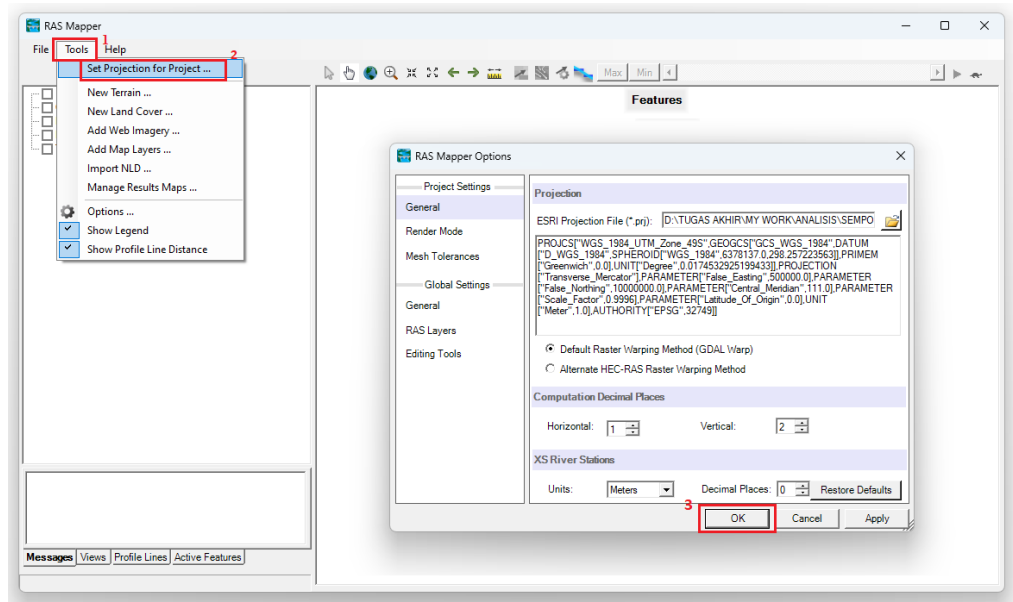
5.2 Pemodelan Keruntuhan Bendungan pada HEC-RAS 5.0.7

Data wilayah genangan waduk dan *cross section* sungai diperoleh dari data geospasial yang telah diolah menggunakan fitur RAS mapper pada HEC-RAS 5.0.7. Dalam tahap ini, dilakukan identifikasi area tampungan waduk (*storage area*), alur sungai (*river*), garis tepian sungai (*bank lines*), potongan melintang sungai (*cross section*) serta penentuan area yang terdampak banjir menggunakan metode *2D Flows Areas*.

Langkah awal dalam pemodelan waduk dan sungai adalah dengan membuat *Project File* terlebih dahulu dan menyimpannya di folder yang telah ditentukan. Setelah itu, membuat *file* data geometri yang juga disimpan dalam folder tersebut. Selanjutnya, masuk ke jendela *RAS Mapper* melalui ikon yang terdapat pada halaman utama HEC-RAS 5.0.7. Fungsi dari *RAS Mapper* adalah untuk mengolah data geospasial menjadi data geometri. Data geospasial yang digunakan dalam simulasi ini berasal dari data DEMNAS dengan ketelitian sebesar 8,3 meter. Setiap pekerjaan yang dilakukan di jendela *RAS Mapper* akan langsung terhubung dengan *file* data geometri yang sudah dibuat sebelumnya.

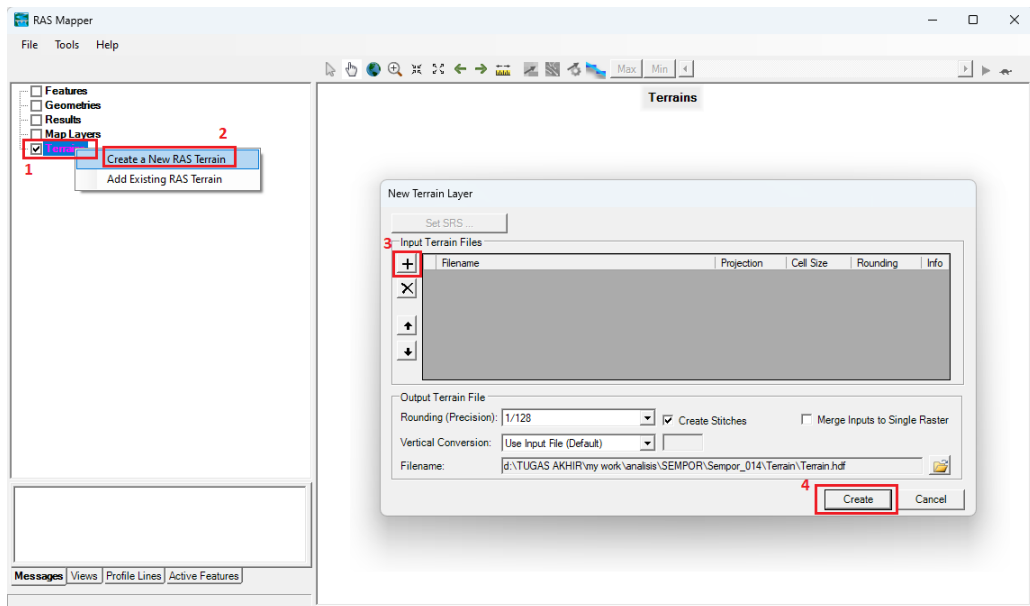
1. Untuk memulai proses pemodelan, menekan ikon *RAS Mapper* yang terdapat pada halaman utama HEC-RAS 5.0.7. Setelah itu, jendela *RAS Mapper* akan muncul, dan memilih menu *Tools* pada menubar *RAS Mapper*. Selanjutnya, pilih opsi *Set Projection for Project*. Setelah memilih opsi tersebut, akan muncul jendela *RAS Mapper Option* dan memasukkan data proyeksi pada kolom *ESRI Projection File*. Dalam penelitian ini, lokasinya berada di Kabupaten Kebumen,

sehingga akan menggunakan proyeksi WGS 1984 (*World Geodetic System*) dan UTM (*Universal Transverse Mercator*) zona 49S.

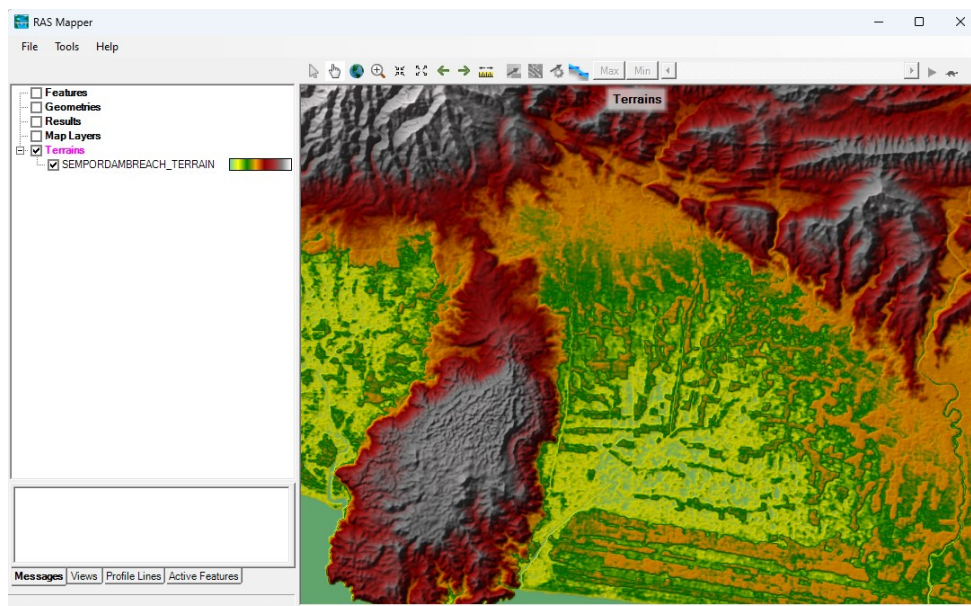


Gambar 5.1 *Jendela Set Projection for Project*

2. Langkah selanjutnya adalah dengan melakukan klik kanan pada menu *layer Terrains* dan menekan *Create a New RAS Terrain*. Setelah itu, jendela *New Terrain Layer* akan muncul, kemudian menekan ikon dan memilih *file DEMNAS* yang berlokasi di daerah penelitian. Setelah memilih *file*, klik *Open* dan *Create* untuk membuat *terrain layer*. Menunggu hingga proses pembuatan *terrain layer* selesai, dan hasil peta *DEMNAS* akan muncul di halaman utama *RAS Mapper*. Peta ini akan siap digunakan untuk proses selanjutnya dalam analisis dan simulasi pada *HEC-RAS 5.0.7*.

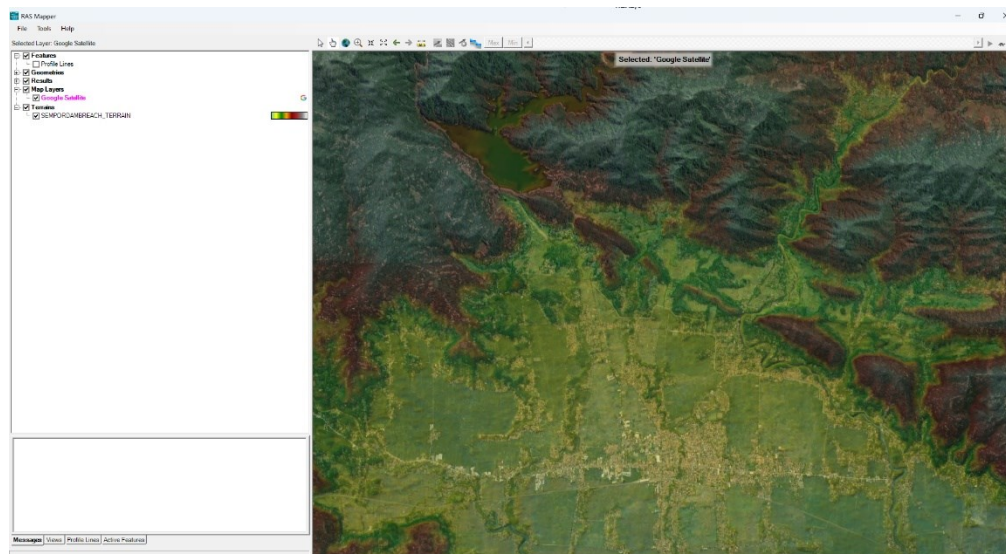


Gambar 5.2 Tampilan Jendela *New Terrain Layer*



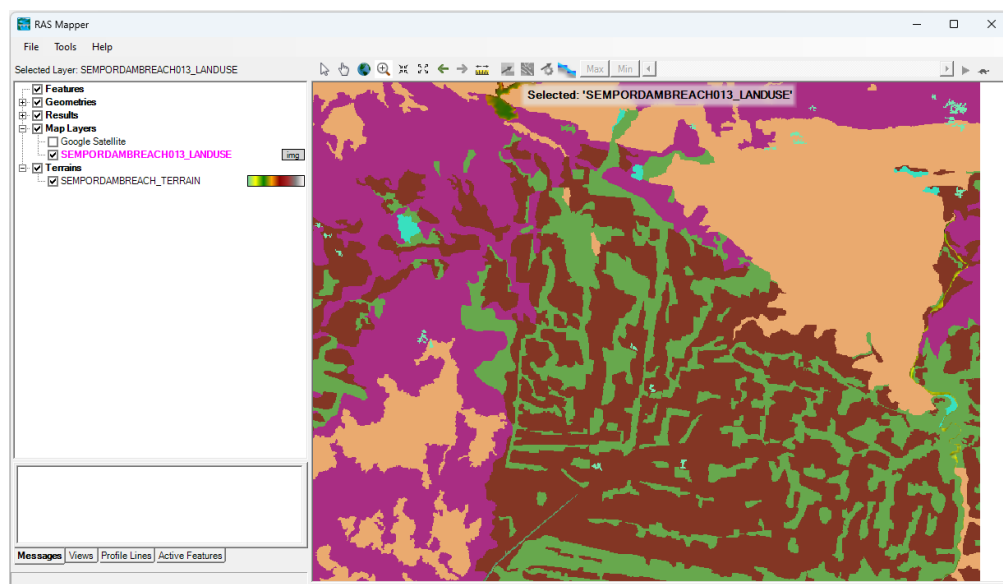
Gambar 5.3 Tampilan *DEM (Digital Elevation Model)* pada *RAS Mapper*

- Langkah berikutnya adalah melakukan klik kanan pada opsi *Map Layers* dan kemudian memilih *Add Web Imagery Layer* untuk menyisipkan peta satelit wilayah yang akan di tinjau. Dalam penelitian ini, peta yang digunakan adalah peta *Google Satellite*. Peta *Google Satellite* yang telah dipilih akan tumpang tindih (*overlay*) dengan peta DEMNAS yang sebelumnya telah dimasukkan.



Gambar 5.4 Tampilan *Map Layer*

4. Berikutnya adalah memasukan data peta tata guna lahan yang telah diunduh dengan cara melakukan klik ikon *Tools* pada menu *RAS Mapper*, lalu memilih submenu *New Land Cover*. Maka akan muncul tampilan *Manning's n Value Layer*. Kemudian melakukan klik pada ikon **+** dan masukkan *file* tata guna lahan dan masukkan nilai *Manning* sesuai dengan Tabel 3.3 sebelumnya. Selanjutnya melakukan klik *Create* dan menunggu hingga prosesnya selesai. Tampilan tata guna lahan atau *Land Use* dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut ini.



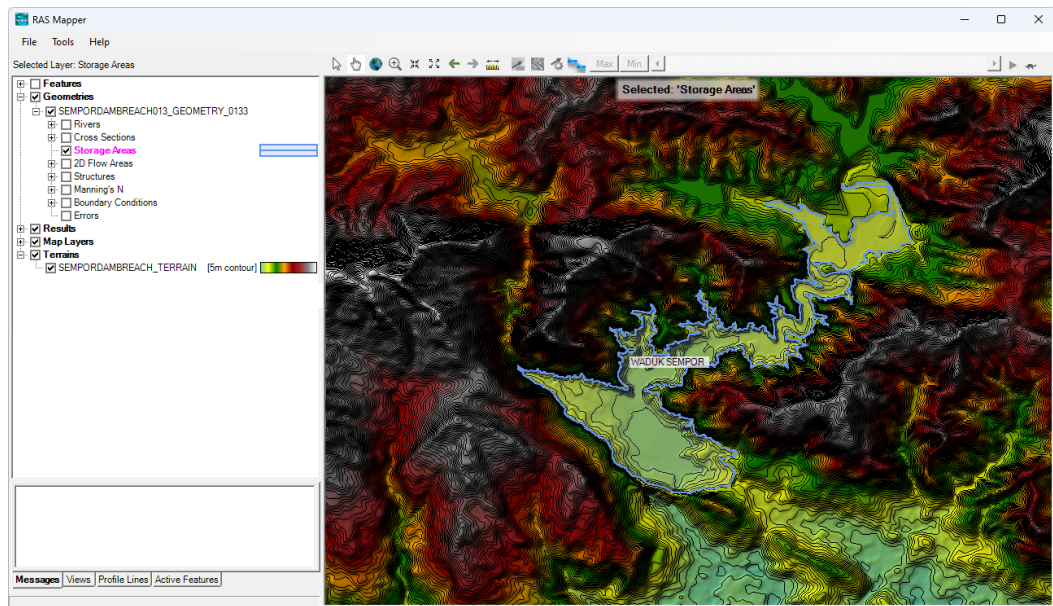
Gambar 5.5 Tampilan Tata Guna Lahan pada *RAS Mapper*

5. Setelah selesai melakukan pengolahan data geospasial, langkah selanjutnya adalah mengolah data geometri untuk simulasi keruntuhan bendungan. Caranya adalah dengan melakukan klik kanan pada menu *layer Geometries* dan memilih *Add New Geometry*. Maka akan muncul jendela *New Geometry Data* lalu harus memasukkan nama *file* geometri yang akan dibuat. Setelah *Layer Geometries* dibuat, selanjutnya akan dilakukan pemodelan semua komponen yang diperlukan dalam simulasi ini. Caranya adalah dengan melakukan klik kanan pada menu *layer geometries* dan pilih *Edit Geometry*.

Pada simulasi ini, terdapat 2 tipe genangan yang akan digunakan, yaitu genangan area waduk dan genangan banjir. Waduk dimodelkan dengan *Storage Area* berdasarkan hubungan antara elevasi dengan volume waduk, seperti yang tertera dalam Tabel 4.1 di atas. Sedangkan, area genangan banjir akan dimodelkan sebagai genangan *2D Flow Areas*. Untuk lebih jelasnya, langkah-langkah pemodelan kedua jenis genangan tersebut akan dijelaskan secara detail berikut ini.

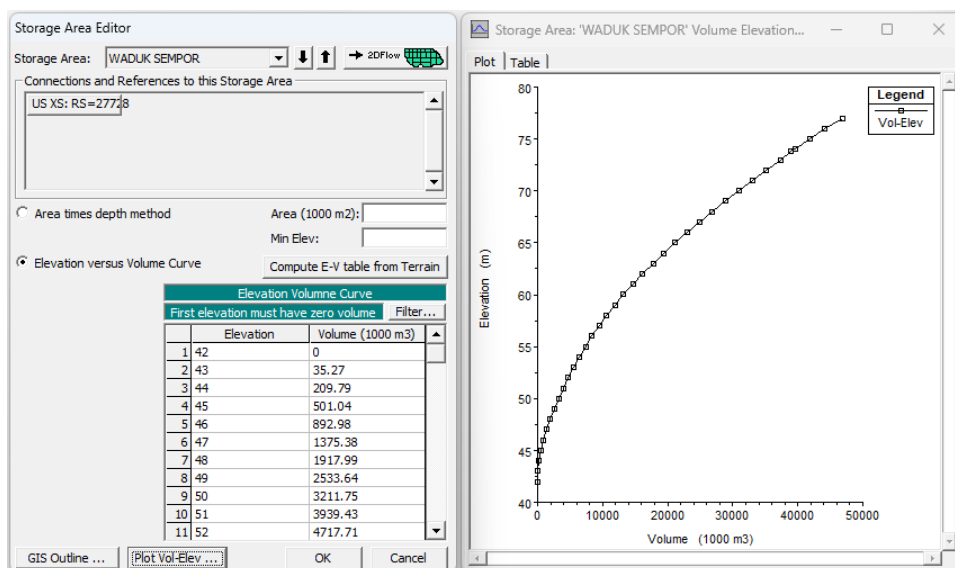
5.2.1 Pemodelan Geometri Waduk

Dalam pemodelan waduk, langkah pertama adalah menentukan area genangan waduk berdasarkan dokumen perencanaan Bendungan Sempor. Kemudian melakukan pemodelan area waduk dengan menggunakan *layer Storage Area* melalui *Tools* yang ada di *RAS Mapper*. Pembuatan area genangan waduk didasarkan pada tinggi kontur di daerah hulu bendungan. Data teknis bendungan menunjukkan bahwa elevasi muka air maksimum yang dapat ditampung oleh waduk adalah +73.78 m, maka garis kontur yang diambil untuk penggambaran waduk adalah garis kontur dengan elevasi +74m. Setelah melakukan penggambaran, perintah untuk memberi nama pada area genangan yang telah dibuat akan muncul. Dalam pemodelan ini *Storage Area* dinamai sebagai “Waduk Sempor”. Hasil pemodelan genangan waduk ditampilkan pada Gambar 5.6 berikut ini.



Gambar 5.6 Tampilan *Storage Area*

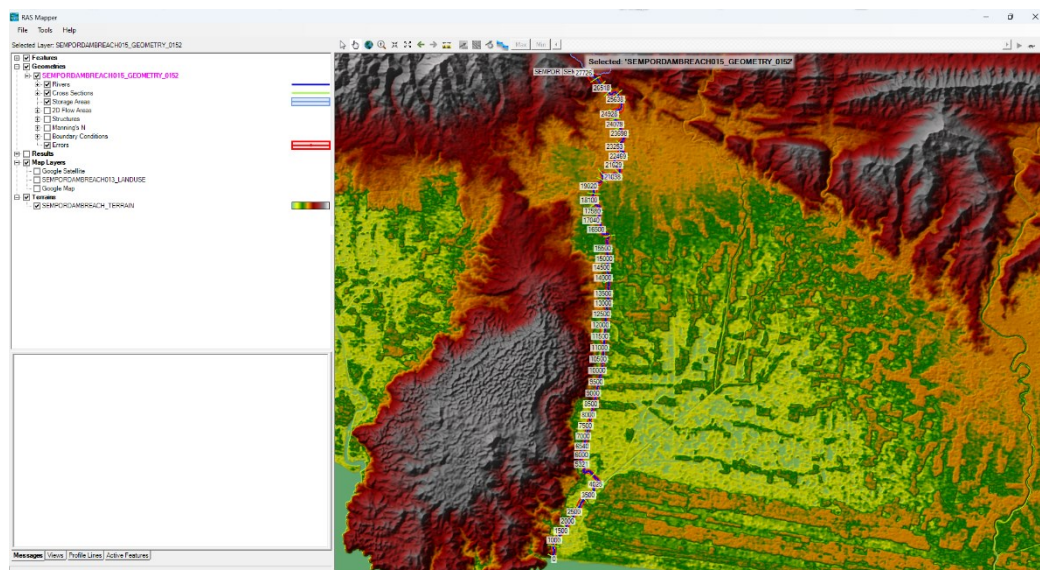
Langkah berikutnya adalah masuk ke jendela *Edit Geometric Data* untuk memasukkan data elevasi dan volume genangan waduk melalui *tools Storage Area Editor*. Untuk memasukkan data elevasi dan volume, pilih opsi *Elevation versus Volume Curve* dan masukkan data dengan mengklik *Plot Vol-Elev*. Setelah memastikan semua data yang dimasukkan benar, klik *OK* dan data akan tersimpan secara otomatis pada *file Geometric Data*. Tampilan dari *Storage Area Editor* dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut ini.



Gambar 5.7 Tampilan *Storage Area Editor*

5.2.2 Pemodelan Sungai dan Hilir Bendungan

Dalam penentuan alur dan bantaran sungai, digunakan gambar dari *layer Google Satellite* sebagai acuan, namun tetap disesuaikan dengan kondisi kontur yang ada di sungai. *Cross section* dimodelkan secara tegak lurus dengan alur sungai. Pada studi kasus penelitian ini, *Cross Section* dimodelkan selebar 500 m kemudian dengan jarak antar *Cross Section* sepanjang 500 m. Pada bantaran kanan dan kiri sungai merupakan dataran rendah yang tidak dibatasi dengan tebing tinggi. Oleh karena itu, untuk dataran banjir pada bagian bantaran kanan dan kiri sungai dilakukan analisis 2 dimensi. Penghubung antara sungai dengan dataran banjir adalah *Lateral Structure* yang berada di sepanjang sungai dan tidak dibatasi oleh tebing. Selanjutnya, dengan menggunakan data dan gambar-gambar ini, proses pemodelan genangan banjir dan analisis lainnya dilakukan dalam rangka penelitian tersebut. Tampilan *Cross Section* dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



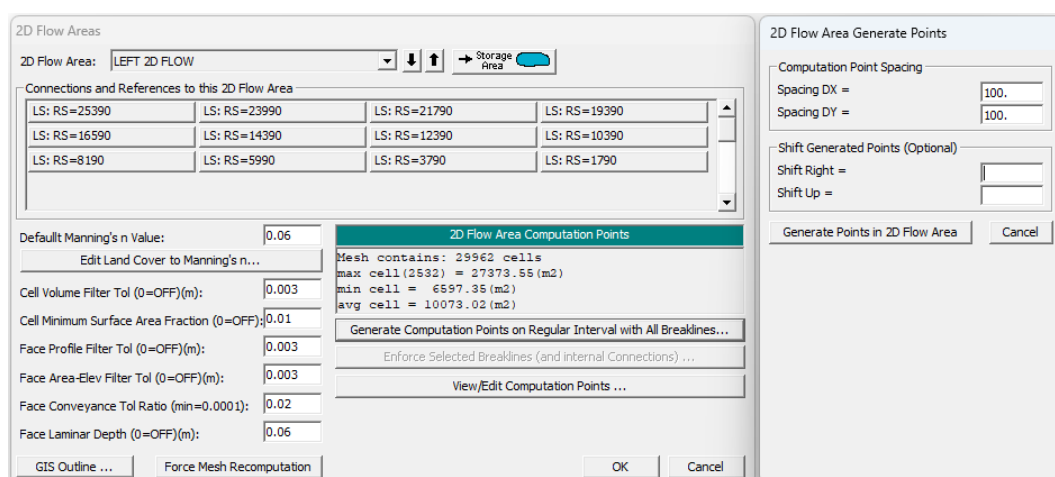
Gambar 5.8 Tampilan *Cross Section* pada Alur Sungai

5.2.3 Pemodelan Geometri Aliran Banjir

Pada awal simulasi, area terdampak banjir dimodelkan sebagai *cross section* sungai yang diperpanjang hingga mencapai kemungkinan terjauh aliran banjir yang akan terjadi. Namun, pada bantaran kanan dan kiri sungai tidak ada tebing yang membatasi aliran yang terjadi. Oleh karena keterbatasan HEC-RAS 1D, pemodelan genangan dengan menganggapnya sebagai bagian dari *cross section* tidak dapat

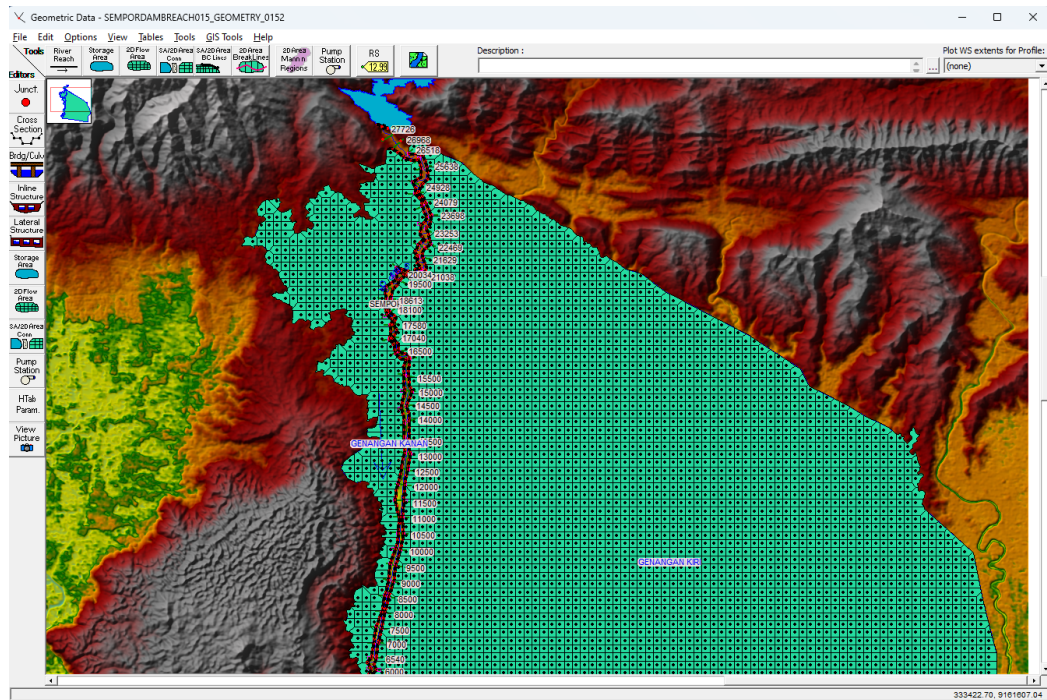
dilakukan. Maka dari itu, area genangan banjir dimodelkan sebagai area 2 dimensi. Langkah pertama adalah masuk pada jendela *RAS Mapper* untuk menentukan area genangan banjir. Pembuatan model dilakukan melalui *layer Perimeter* pada pilihan *2D Flow Areas*. Setelah pembuatan area genangan banjir selesai, akan muncul perintah untuk memberi nama area tersebut. Dalam simulasi ini, area genangan banjir sebelah kanan dinamakan sebagai *Genangan Kanan* serta untuk genangan sebelah kiri dinamakan sebagai *Genangan Kiri*, seperti yang terlihat pada Gambar 5.10 di berikut ini.

Langkah selanjutnya adalah memasukkan data pada model 2D. Data masukan meliputi nilai *n Manning* (koefisien *Manning*) dan *Computation Point Spacing* (jarak antara titik perhitungan). Nilai *n Manning* ditentukan berdasarkan Tabel 3.3 dan kondisi dataran banjir secara visual dengan bantuan *Google Satelite*. Misalnya, jika dataran yang terdampak banjir adalah area pertanian dengan berbagai tanaman, maka nilai *n Manning* yang digunakan adalah 0,04. Setelah memasukkan nilai *n Manning*, selanjutnya ditentukan *Computation Point Spacing* dengan menekan *Generate Computation Points on Regular Interval with All Breaklines*. Pada simulasi ini, nilai 100 dipilih untuk kedua arah *x* dan *y*. Setelah selesai, HEC-RAS 5.0.7 akan menghitung jumlah sel berdasarkan ukuran dan area yang telah ditentukan.



Gambar 5.9 Tampilan Input *2D Flow Areas* dan *Computation Point Spacing*

Kemudian hasil pemodelan area genangan banjir *2D Flow Areas* dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut ini.



Gambar 5.10 Tampilan *2D Flow Areas*

Langkah berikutnya adalah pembuatan model *Lateral Structure* sebagai penghubung antara sungai dengan dataran banjir melalui ikon *Lateral Structure*. *Lateral Structure* dianggap sebagai pelimpah dengan ketinggian yang sama pada lokasi garis as *Lateral Structure* yang dibuat, seperti yang terlihat pada Gambar 5.11 berikut ini.

Lateral Weir Embankment

Weir Data
 Weir Width: 1.
 Weir Computations: Standard Weir Eqn
 Standard Weir Equation Parameters
 Weir flow reference: Water Surface
 Weir Coefficient (Cd): 1.
 Weir Crest Shape: Zero Height

Weir Stationing Reference
 HW - Distance to Upstream XS: 10.

HW Connections ... TW Connections ...

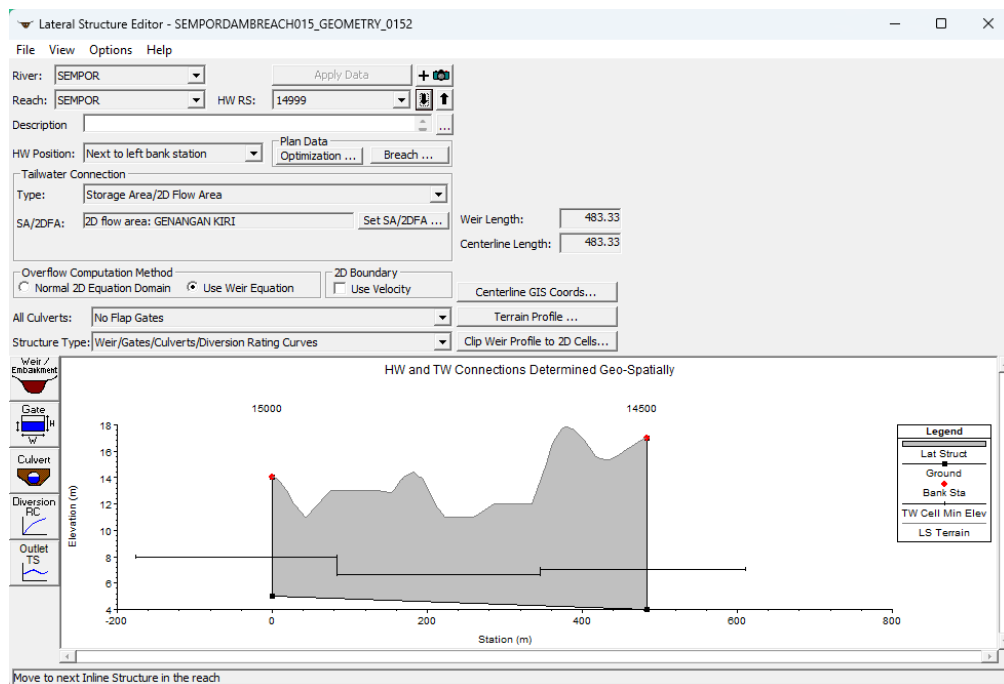
Embankment Station/Elevation Table

	Station	Elevation
1	0	43.122
2	8.109	42.925
3	14.575	42.809
4	19.868	42.51
5	24.975	42.243
6	26.548	42.201
7	31.627	41.807
8	36.527	41.479
9	38.522	41.441
10	43.386	41.159
11	48.079	40.924
12	50.495	40.885
13	66.903	40.2
14	71.182	39.983
15	74.442	39.747
16	78.662	39.508
17	82.734	39.248
18	86.415	38.893
19	90.421	38.574
20	94.286	38.23
21	96.301	37.996
22	98.389	37.729

OK Cancel

Gambar 5.11 Tampilan Input Data *Lateral Structure*

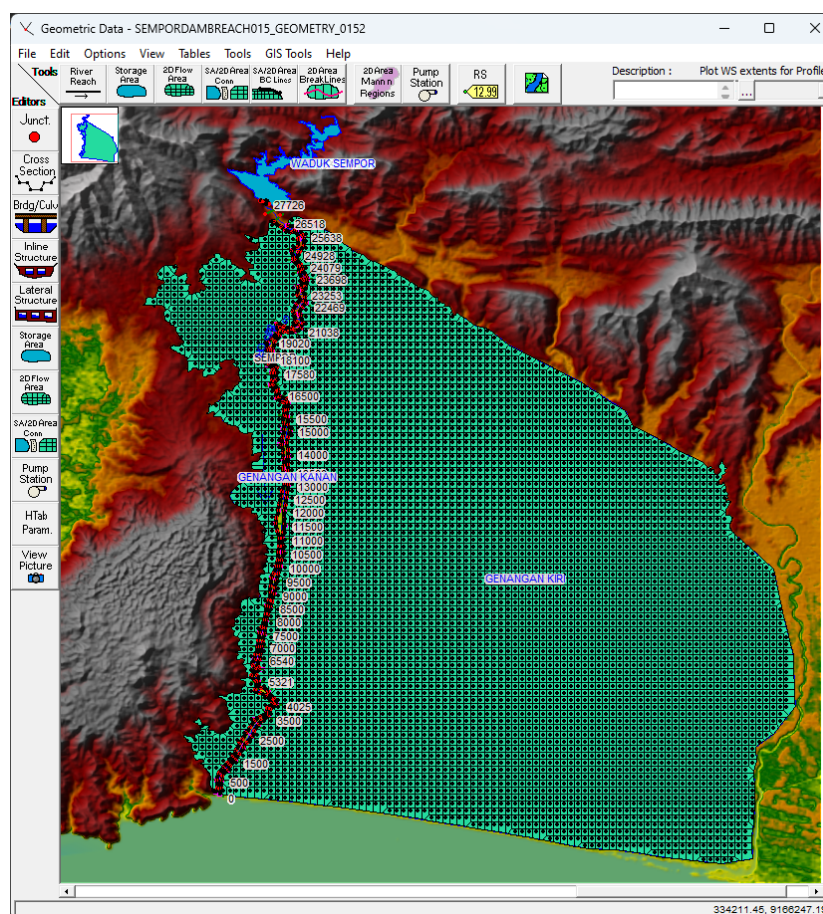
Lateral Structure kemudian dihubungkan dengan area *2D Flow Areas*, sehingga ketika *cross section* mengalami peluapan melebihi batas tebing, aliran akan langsung mengalir ke area genangan *2D Flow Areas*. Hasil pemodelan *Lateral Structure* dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut ini.



Gambar 5.12 Tampilan *Lateral Structure Editor*

5.2.4 Pemodelan Koneksi Waduk dengan Aliran Banjir

Setelah proses digitasi alur sungai selesai, selanjutnya kembali ke jendela utama HEC-RAS 5.0.7 untuk menentukan syarat batas (*Boundary Condition*) dan syarat awal (*Initial Condition*). Selain itu, dilakukan pembuatan model bendungan dan struktur lateral sebagai penghubung antara analisis 1D dengan 2D. Tampilan data geometri setelah selesai melakukan digitasi sungai dan pemodelan area genangan menggunakan *RAS Mapper* dapat dilihat pada Gambar 5.13 di bawah ini.



Gambar 5.13 Tampilan Geometric Data

Pada langkah ini, dimulai dengan pembuatan model bendungan dengan memasukkan data yang sesuai dengan data teknis bendungan menggunakan fitur *In-line Structure*. *Spillway* pada rencana kerja diletakkan tegak lurus terhadap tubuh bendungan. Namun, karena keterbatasan HEC-RAS dalam pemodelan bendungan, model ini disederhanakan dengan membuat pelimpah yang sejajar dengan bendungan, tetapi masih memiliki elevasi dan lebar yang sama. Data masukan yang

diperlukan dalam pemodelan bendungan ini meliputi elevasi puncak bendungan, elevasi *spillway*, lebar puncak bendungan, lebar *spillway*, panjang bendungan, dan kemiringan lereng hulu dan hilir bendungan. Tampilan input data dalam pemodelan bendungan dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut ini.

Distance	Width	Weir Coef
10.	10.	2.18

Station	Elevation
1 0	77
2 225	77
3 225	72
4 330	72
5 330	77
6 400	77
7	
8	

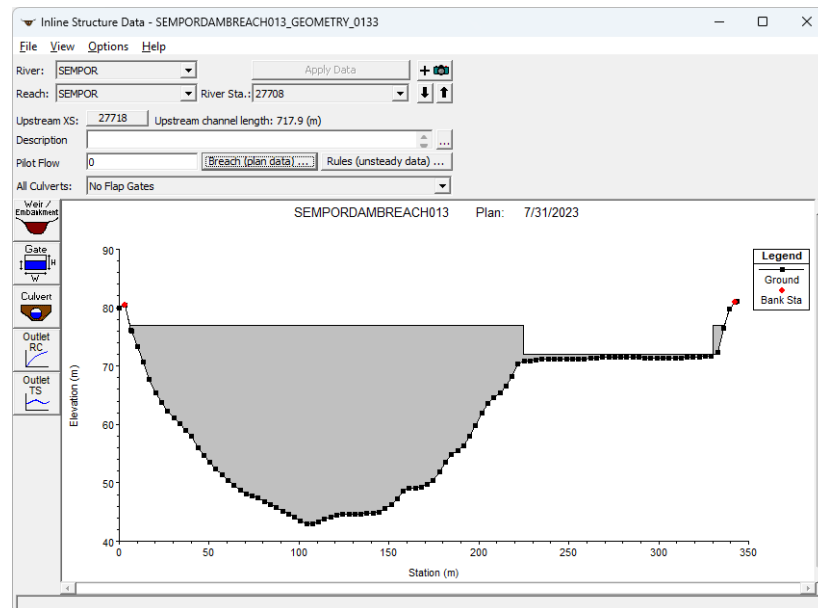
U.S Embankment SS: 2.2 D.S Embankment SS: 1.9

Weir Data
Weir Crest Shape
 Broad Crested
 Ogee
 Spillway Approach Height: 44.
 Design Energy Head: 1.78 **Cd ...**

Enter distance between upstream cross section and deck/roadway. (m)

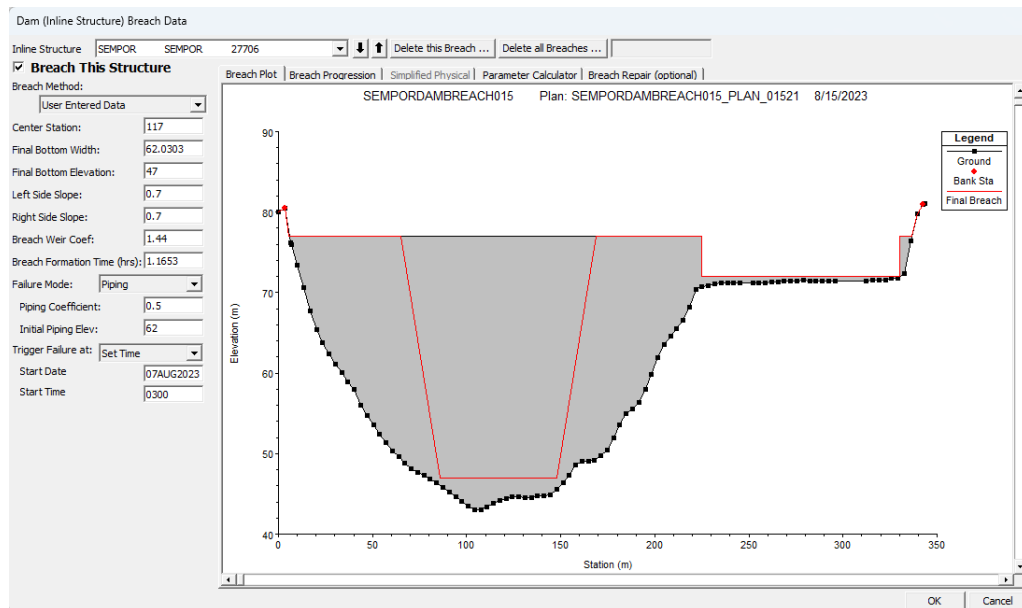
Gambar 5.14 Tampilan *Input* Data Pemodelan Tubuh Bendungan

Pada menu *Weir Data*, terdapat dua pilihan tipe mercu pelimpah, yaitu *Broad Crested* dan *Ogee*. Mercu pada *spillway* Bendungan Sempor memiliki bentuk *Ogee*, oleh karena itu dilakukan pemodelan dengan memasukkan beda tinggi mercu *spillway* dengan dasar sungai dan desain tinggi energi pada *spillway* untuk mendapatkan nilai *Cd* (koefisien bukaan). Gambar 5.15 di bawah ini merupakan tampilan hasil dari pemodelan bendungan yang telah selesai dilakukan *input* data, termasuk pemodelan mercu *spillway* berbentuk *Ogee*.



Gambar 5.15 Tampilan *Inline Structure*

Selanjutnya, langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai hasil perhitungan parameter keruntuhan pada model melalui jendela *Breach (plan data)*. Selain parameter keruntuhan yang telah dijelaskan sebelumnya, perlu memasukkan beberapa data tambahan untuk menentukan posisi dan kondisi keruntuhan. *Centre station* merupakan posisi dari as keruntuhan. Pada simulasi ini, posisi tersebut ditentukan di tengah tubuh bendungan, yaitu pada stasiun 117 m. Untuk *Breach Weir Coefficient* nilai yang ditentukan adalah 1,44, dan untuk *Piping Coefficient* ditetapkan sebesar 0,5. Selanjutnya, *Initial Piping Elevation* ditetapkan dengan nilai +62 meter pada titik tengah keruntuhan. Ada tiga pilihan pada *Trigger Failure*, yaitu *WS Elevation*, *WS Elevation+Duration*, dan *Set Time*. Pada pemodelan ini, dipilih pilihan *Set Time* untuk menentukan awal dari terjadinya keruntuhan pada jam ke-3. Pemilihan jam ke-3 didasarkan pada puncak debit pada hidrograf Q_{PMF} . Tampilan jendela *Breach (plan data)* dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut ini.



Gambar 5.16 Tampilan Dam (Inline Structure) Breach data

Langkah selanjutnya adalah memasukkan data koefisien *Manning* pada *cross section* sungai. Koefisien *Manning* ditetapkan berdasarkan Tabel 3.3 yang mempertimbangkan kondisi permukaan dataran yang dialiri oleh air. Penentuan koefisien *Manning* pada *cross section* dilakukan dengan mengamati peta gambaran batasan area tata guna lahan yang sudah dimasukkan pada data tata guna lahan di atas yang kemudian ditinjau berdasarkan Tabel 3.3. Penting untuk mencatat bahwa penentuan nilai koefisien *Manning* merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi stabilitas simulasi saat menjalankan program HEC-RAS. Oleh karena itu, perlu dilakukan penyesuaian angka *Manning* pada lokasi tertentu untuk mencapai simulasi yang stabil. Tampilan *input* nilai koefisien *Manning* pada HEC-RAS dapat dilihat pada Gambar 5.17 berikut ini.

Edit Manning's n or k Values

River: [SEMPOR] | Reach: [SEMPOR] | All Regions

Selected Area Edit Options: Add Constant ..., Multiply Factor ..., Set Values ..., Replace ..., Reduce to L Ch R ...

Channel n Values have a light green background

River Station	Frch (n/k)	n #1	n #2	n #3
1 27726	n	0.04	0.035	0.04
2 27716	n	0.04	0.035	0.04
3 27706	Infl Struct			
4 27318	n	0.04	0.035	0.04
5 26968	n	0.04	0.035	0.04
6 26966	Lat Struct			
7 26518	n	0.04	0.035	0.04
8 26517	Lat Struct			
9 26516	Lat Struct			
10 25998	n	0.04	0.035	0.04
11 25997	Lat Struct			
12 25996	Lat Struct			
13 25638	n	0.04	0.035	0.04
14 25637	Lat Struct			
15 25636	Lat Struct			
16 24928	n	0.04	0.035	0.04
17 24927	Lat Struct			
18 24926	Lat Struct			
19 24568	n	0.04	0.035	0.04
20 24567	Lat Struct			
21 24566	Lat Struct			
22 24079	n	0.04	0.035	0.04
23 24078	Lat Struct			
24 24077	Lat Struct			
25 23698	n	0.04	0.035	0.04
26 23697	Lat Struct			
27 23696	Lat Struct			
28 23253	n	0.04	0.035	0.04
29 23252	Lat Struct			
30 23251	Lat Struct			
31 22469	n	0.04	0.035	0.04
32 22468	Lat Struct			
33 22467	Lat Struct			
34 22130	n	0.04	0.035	0.04
35 22129	Lat Struct			
36 22128	Lat Struct			
37 21629	n	0.04	0.035	0.04
38 21628	Lat Struct			
39 21627	Lat Struct			

OK Cancel Help

Gambar 5.17 Tampilan Input Nilai Koefisien Manning

Langkah terakhir sebelum melakukan running simulasi adalah menentukan *Boundary Condition* dan *Initial Condition*. Simulasi ini menggunakan analisis Aliran Tidak Stabil (*Unsteady Flow*). Syarat Batas untuk bagian hilir menggunakan *Normal Depth* pada *River Sta. 0*. Sementara untuk bagian hulu menggunakan *Lateral Inflow Hydrograph* pada *Storage Area*. Data debit Q_{PMF} yang telah ditentukan sebelumnya dimasukkan ke dalam *Lateral Inflow Hydrograph*.

Unsteady Flow Data - SEMPORDAMBREACH015_HYDROLOGY_01521

File Options Help

Description: [] [Apply Data]

[Boundary Conditions] [Initial Conditions]

Boundary Condition Types

Stage Hydrograph	Flow Hydrograph	Stage/Flow Hydr.	Rating Curve
Normal Depth	Lateral Inflow Hydr.	Uniform Lateral Inflow	Groundwater Interflow
T.S. Gate Openings	Elev. Controlled Gates	Navigation Dams	IB Stage/Flow
Rules	Precipitation		

Add Boundary Condition Location

Add RS ... Add SA/ZD Flow Area ... Add SA Connection ... Add Pump Station ...

Select Location in table then select Boundary Condition Type

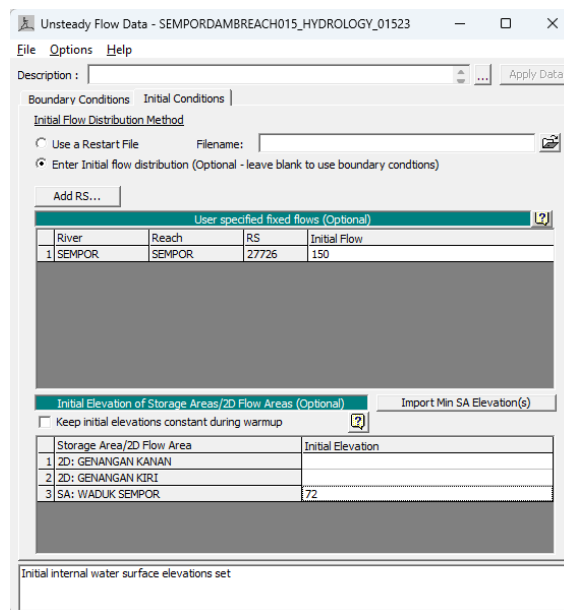
River	Reach	RS	Boundary Condition
1 SEMPOR	SEMPOR	0	Normal Depth

Storage/ZD Flow Areas	Boundary Condition
1 WADUK SEMPOR	Lateral Inflow Hydr.

Initial internal water surface elevations set

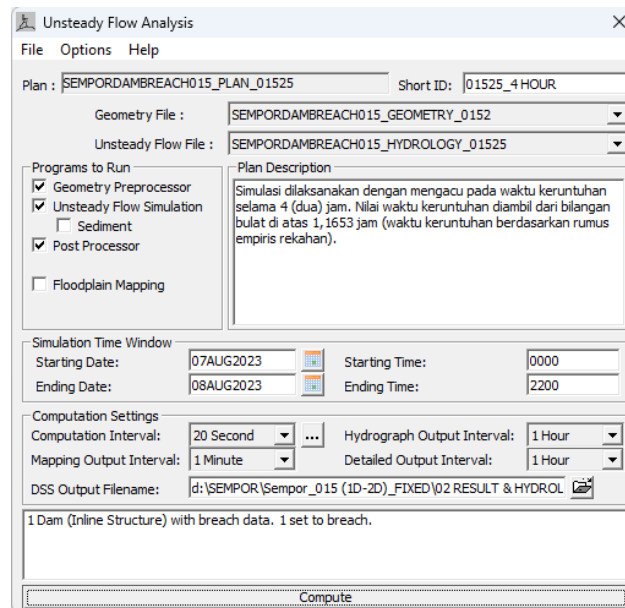
Gambar 5.18 Tampilan Input Boundary Condition

Data masukan untuk *Initial Condition* adalah elevasi awal pada *Storage Area*. Elevasi tersebut ditentukan dengan mempertimbangkan stabilitas simulasi. Pada simulasi ini, elevasi muka air pada *Storage Area* diambil sebesar +73,98 m. Tampilan *Initial Condition* dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut ini sebagai referensi dalam melakukan pengaturan dan persiapan sebelum menjalankan simulasi.



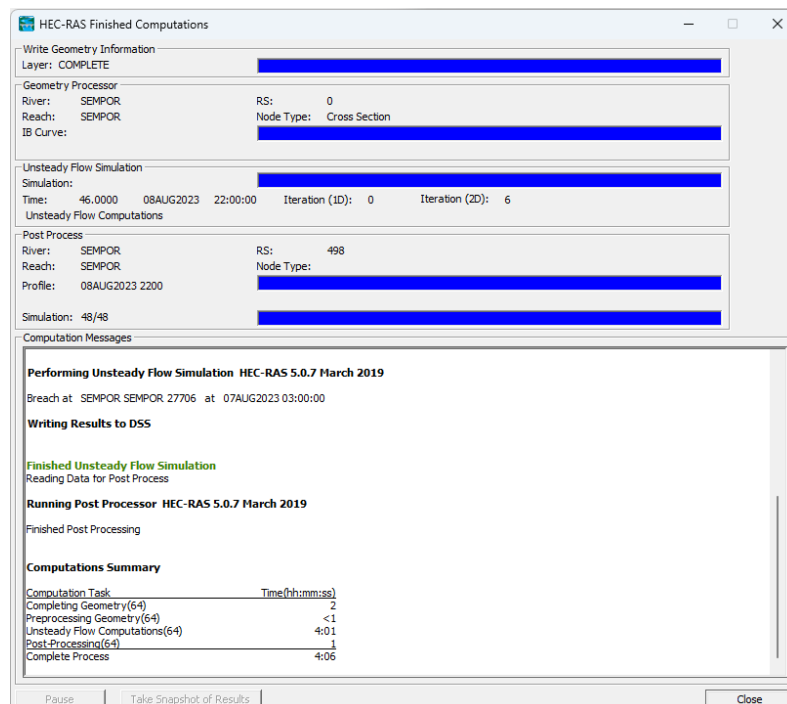
Gambar 5.19 Tampilan *Input Boundary Condition*

Setelah semua data dimasukkan ke dalam model, langkah selanjutnya adalah melakukan *running* simulasi. Pada *Simulation Time Window*, waktu simulasi ditentukan dari tanggal 7 Agustus 2023 pukul 00.00 hingga tanggal 8 Agustus 2023 pukul 22.00. Waktu ini berdasarkan data Q_{PMF} yang telah dimasukkan pada data *Lateral Flow Hydrograph* sebelumnya. Perlu diperhatikan untuk menentukan *Computation Interval* agar mendapatkan simulasi yang stabil. Selain itu, data masukan lainnya juga ditentukan dengan pertimbangan hasil simulasi yang lebih detail. Gambar 5.20 berikut ini merupakan tampilan saat menjalankan program dan simulasi sedang berjalan, di mana berbagai data dan hasil analisis akan ditampilkan pada layar untuk diperiksa dan dievaluasi.



Gambar 5.20 Tampilan *Running* Simulasi *Unsteady Flow Analysis*

Setelah semua data masukan diisi dan seluruh pemodelan telah selesai, maka pemodelan siap untuk dijalankan (*running*). Gambar 5.21 berikut ini merupakan tampilan hasil simulasi keruntuhan bendungan yang menunjukkan bahwa simulasi berjalan secara stabil.



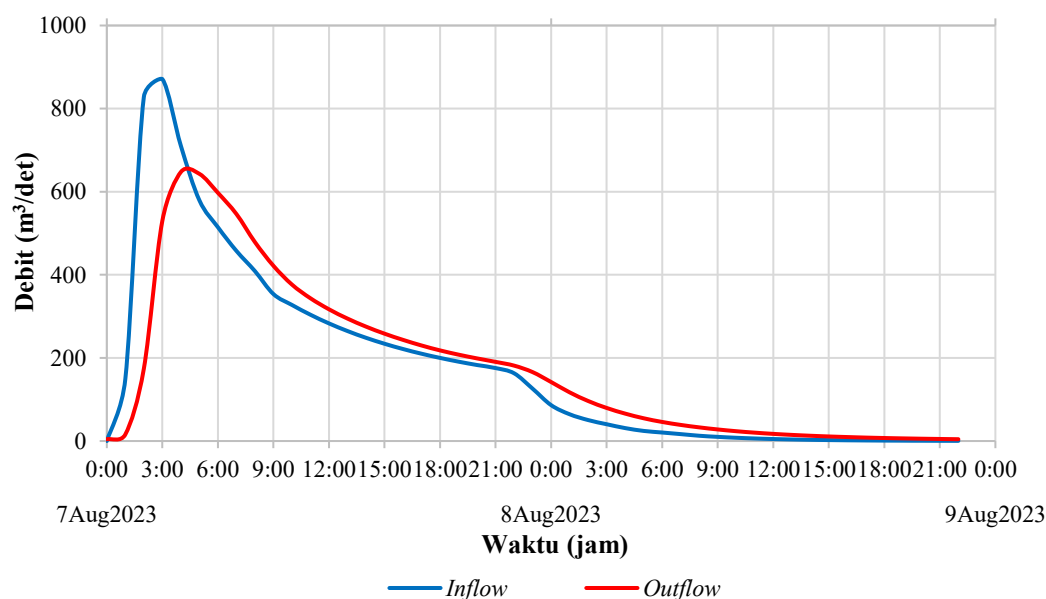
Gambar 5.21 Tampil Hasil Simulasi

5.3 Analisis Tanpa Keruntuhan

Sebelum melakukan simulasi tentang kemungkinan terjadinya keruntuhan bendungan, langkah awal yang perlu dilakukan adalah melakukan simulasi tanpa adanya keruntuhan terlebih dahulu. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk memeriksa stabilitas model dan menguji keandalan perhitungan hidrologi yang digunakan. Dalam simulasi ini, data masukan yang digunakan adalah debit *Inflow* Q_{PMF} dan *Initial Condition* waduk dengan elevasi muka air +72,08 m. Data masukan untuk kondisi awal waduk (*Initial Condition*) memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap stabilitas simulasi. Oleh karena itu, dibutuhkan tingkat ketelitian yang tinggi dalam menentukan data masukan ini. Setelah melakukan simulasi tanpa keruntuhan pada Bendungan Sempor, hasil simulasinya adalah sebagai berikut.

1. Debit puncak *Outflow* banjir sebesar 647,41 m³/s yang terjadi pada jam ke-4.
2. Debit puncak *Inflow* sebesar 870,97 m³/s yang terjadi pada jam ke-3.
3. Terdapat selisih debit puncak *Inflow* dan *Outflow* sebesar 223,56 m³/s yang mengindikasikan terjadinya peredaman banjir pada waduk.

Hidrograf perbandingan antara *Inflow* dan *Outflow* dapat dilihat pada Gambar 5.22 berikut ini.



Gambar 5.22 Hidrograf *Inflow* dan *Outflow*

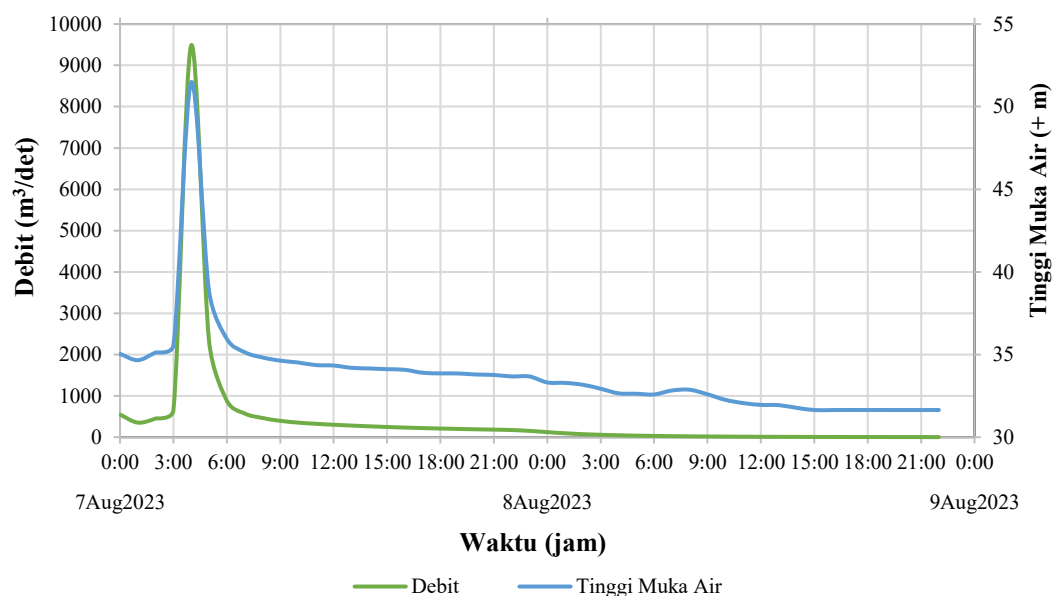
5.4 Analisis Keruntuhan Bendungan

Setelah mencapai kestabilan pada simulasi tanpa keruntuhan bendungan, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan skenario keruntuhan bendungan. Dalam penelitian ini, penulis menyajikan hasil simulasi keruntuhan Bendungan Sempor dengan memvariasikan 5 (lima) variabel waktu.

5.4.1 Skenario 1

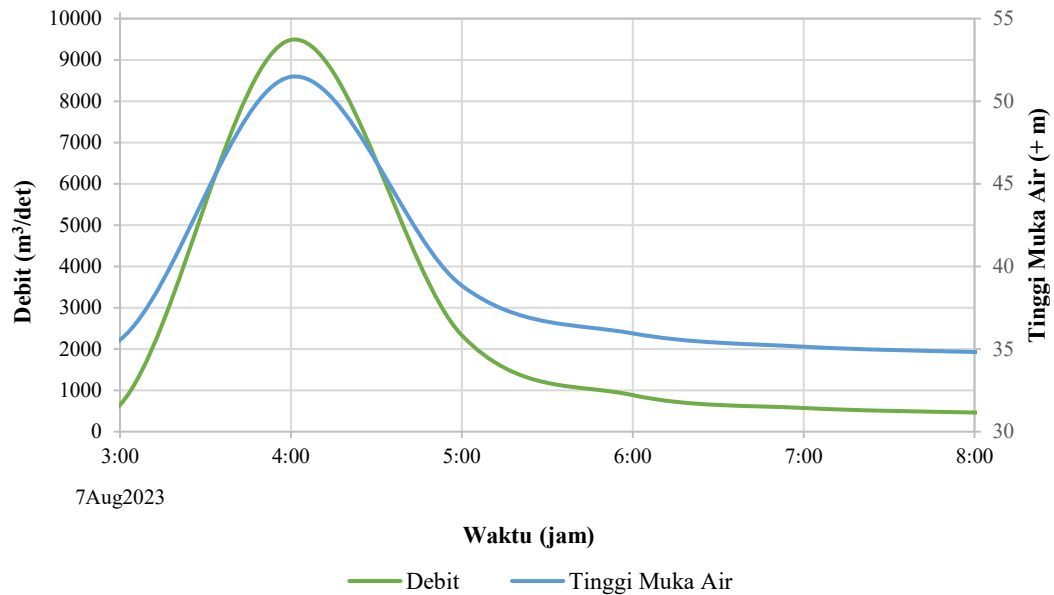
Simulasi skenario pertama dilaksanakan dengan mengacu pada waktu formasi keruntuhan selama 1 (satu) jam. Nilai waktu formasi keruntuhan ini diambil dari bilangan bulat di bawah 1,1653 jam (waktu keruntuhan berdasarkan rumus empiris rekahan). Pada puncaknya, debit aliran banjir mencapai 9.484,71 m³/s detik pada jam ke-4. Debit aliran banjir terendah sebesar 1,69 m³/detik tercatat pada akhir simulasi yaitu pada jam ke-46.

Ketinggian maksimum permukaan waduk mencapai +73,99 m dengan *Initial Condition* muka air pada ketinggian +73,98 m. Di *Cross Section* setelah bendungan, yaitu pada *Sta. 27+318* ketinggian muka air maksimum mencapai +51,48 m. Sedangkan pada *Sta. 0*, ketinggian muka air maksimum mencapai +5,37 m. Gambar 5.23 di bawah ini menampilkan hidrograf muka air dan debit pada penampang sungai setelah bendungan.



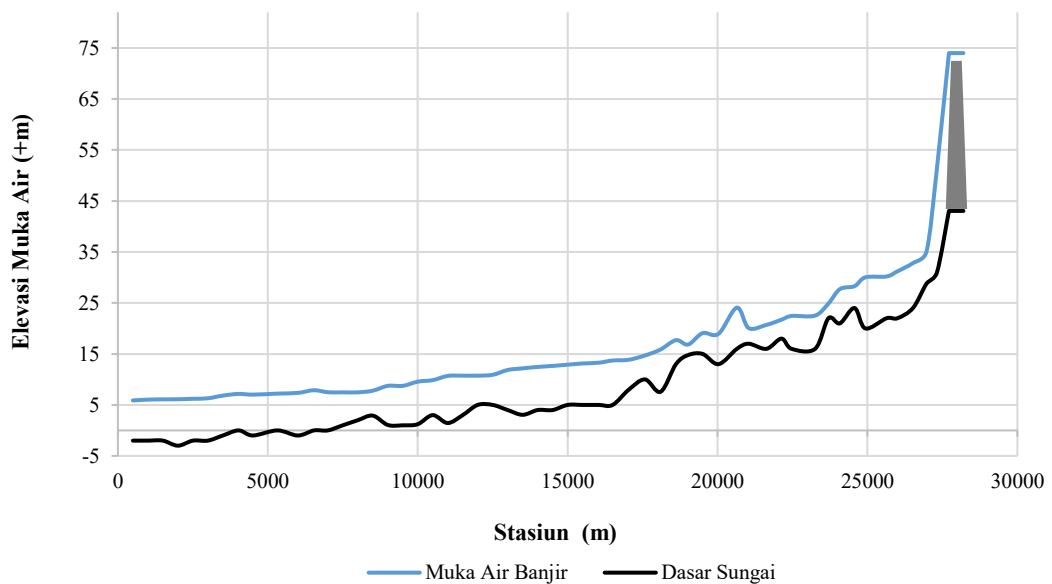
Gambar 5.23 Hidrograf Muka Air Banjir pada *Sta. 27+318* Skenario 1

Untuk mempermudah pengamatan, Gambar 5.24 di bawah ini menggambarkan segmen puncak hidrograf dari jam ke-3 sampai jam ke-8.



Gambar 5.24 Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-8 pada Sta. 27+318 Skenario 1

Berikut ini Gambar 5.25 menampilkan gambaran profil aliran muka air banjir maksimum dari hulu ke hilir sungai.

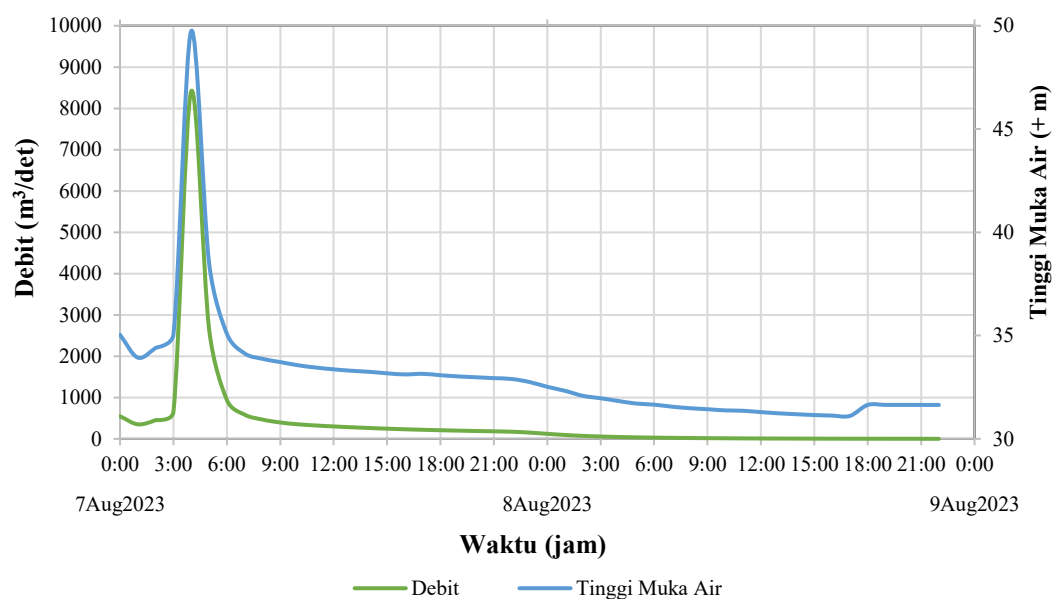


Gambar 5.25 Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 1

5.4.2 Skenario 2

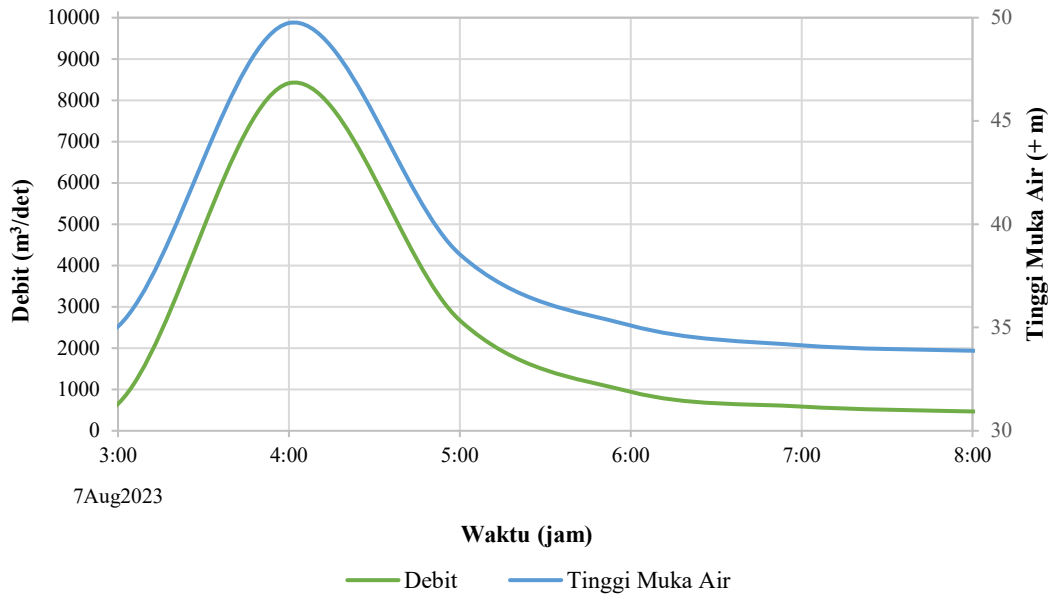
Simulasi skenario kedua dilaksanakan dengan mengacu pada waktu formasi keruntuhan selama 1,1653 jam. Nilai waktu formasi keruntuhan ini diambil berdasarkan rumus empiris rekahan. Pada puncaknya, debit aliran banjir mencapai $8.413,06 \text{ m}^3/\text{s}$ detik pada jam ke-4 menit ke-9. Debit aliran banjir terendah sebesar $1,69 \text{ m}^3/\text{detik}$ tercatat pada akhir simulasi yaitu pada jam ke-46.

Ketinggian maksimum permukaan waduk mencapai $+73,99 \text{ m}$ dengan *Initial Condition* muka air pada ketinggian $+73,98 \text{ m}$. Di *Cross Section* setelah bendungan, yaitu pada *Sta. 27+318* ketinggian muka air maksimum mencapai $+49,74 \text{ m}$. Sedangkan pada *Sta. 0*, ketinggian muka air maksimum mencapai $+7,20 \text{ m}$. Gambar 5.26 di bawah ini menampilkan hidrograf muka air dan debit pada penampang sungai setelah bendungan.



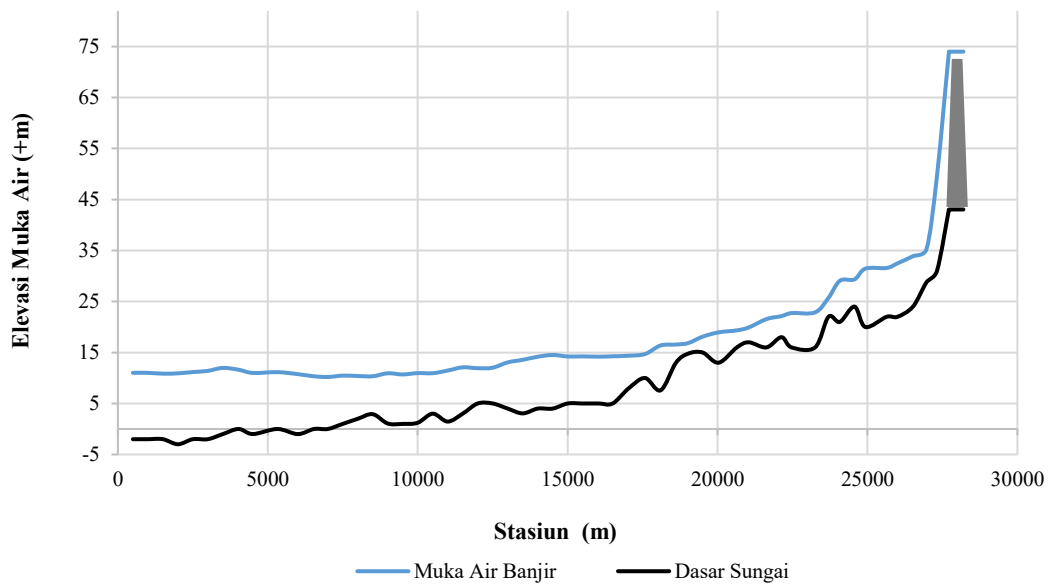
Gambar 5.26 Hidrograf Muka Air Banjir pada *Sta. 27+318* Skenario 2

Untuk mempermudah pengamatan, Gambar 5.27 di bawah ini menggambarkan segmen puncak hidrograf dari jam ke-3 sampai jam ke-8.



Gambar 5.27 Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-8 pada Sta. 27+318 Skenario 2

Berikut ini Gambar 5.28 menampilkan gambaran profil aliran muka air banjir maksimum dari hulu ke hilir sungai.

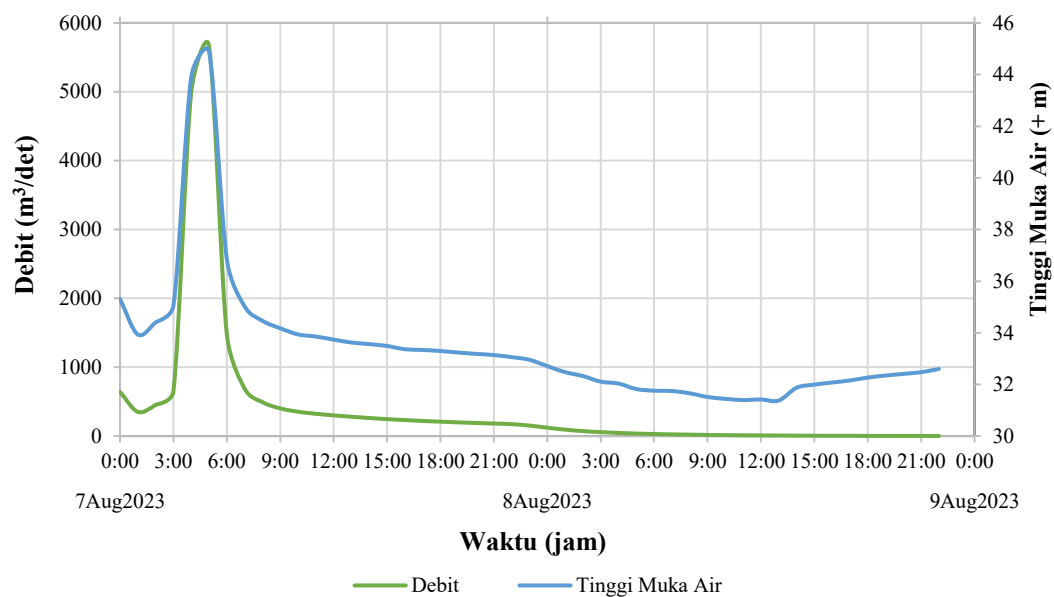


Gambar 5.28 Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 2

5.4.3 Skenario 3

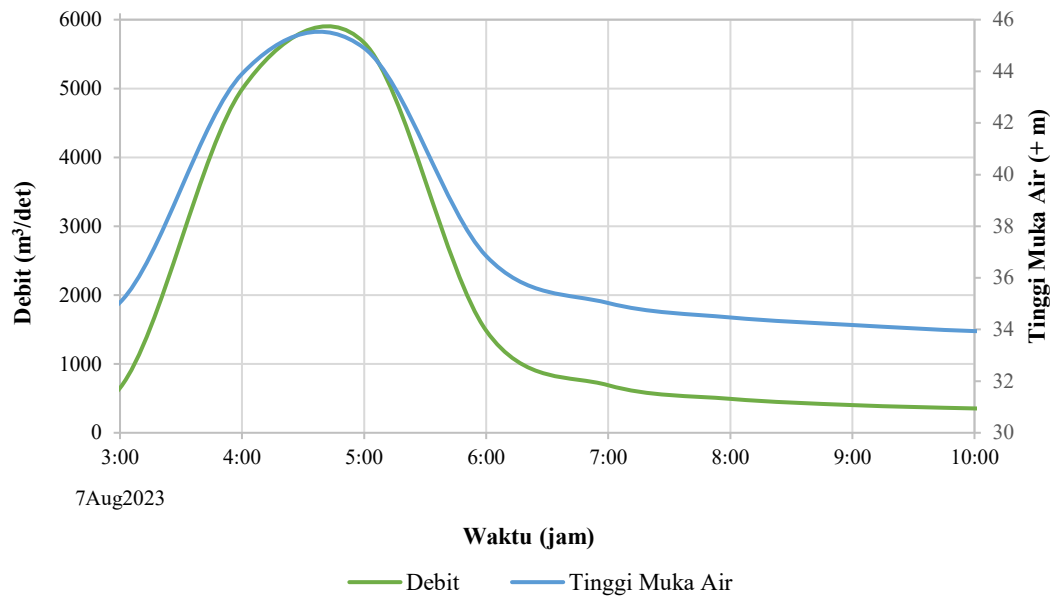
Simulasi skenario ketiga dilaksanakan dengan mengacu pada waktu formasi keruntuhan selama 2 (dua) jam. Nilai waktu formasi keruntuhan ini diambil dari bilangan bulat di atas 1,1653 jam (waktu keruntuhan berdasarkan rumus empiris rekahan). Pada puncaknya, debit aliran banjir mencapai 5.664,75 m³/s detik pada jam ke-4 menit ke-34. Debit aliran banjir terendah sebesar 1,69 m³/detik tercatat pada akhir simulasi yaitu pada jam ke-46.

Ketinggian maksimum permukaan waduk mencapai +73,99 m dengan *Initial Condition* muka air pada ketinggian + 73,98 m. Di *Cross Section* setelah bendungan, yaitu pada *Sta.* 27+318 ketinggian muka air maksimum mencapai +44,90 m. Sedangkan pada *Sta.* 0, ketinggian muka air maksimum mencapai +5,88 m. Gambar 5.29 di bawah ini menampilkan hidrograf muka air dan debit pada penampang sungai setelah bendungan.



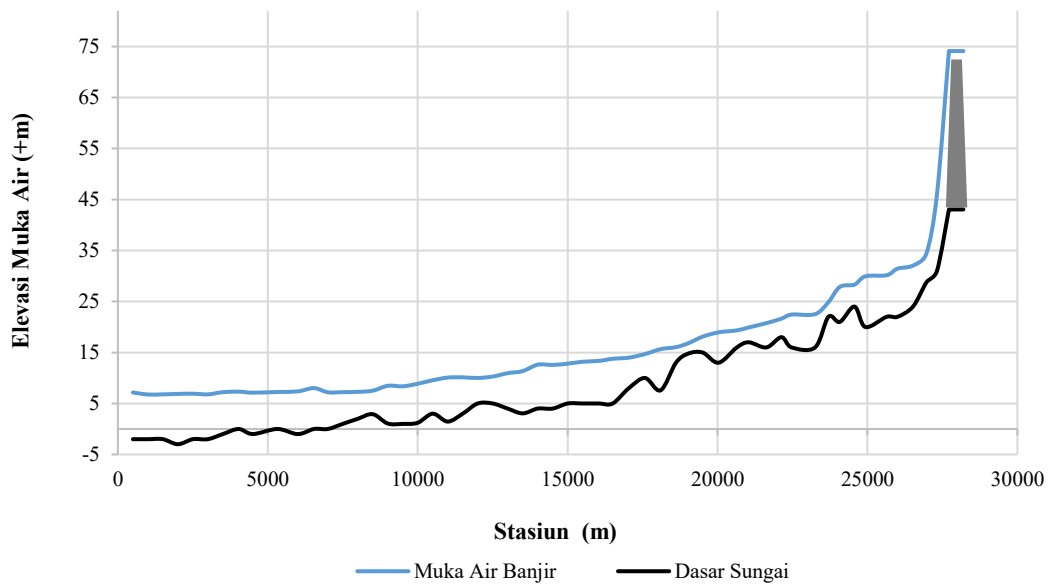
Gambar 5.29 Hidrograf Muka Air Banjir pada *Sta.* 27+318 Skenario 3

Untuk mempermudah pengamatan, Gambar 5.30 di bawah ini menggambarkan segmen puncak hidrograf dari jam ke-3 sampai jam ke-10.



Gambar 5.30 Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-10 pada Sta. 27+318 Skenario 3

Berikut ini Gambar 5.31 menampilkan gambaran profil aliran muka air banjir maksimum dari hulu ke hilir sungai.

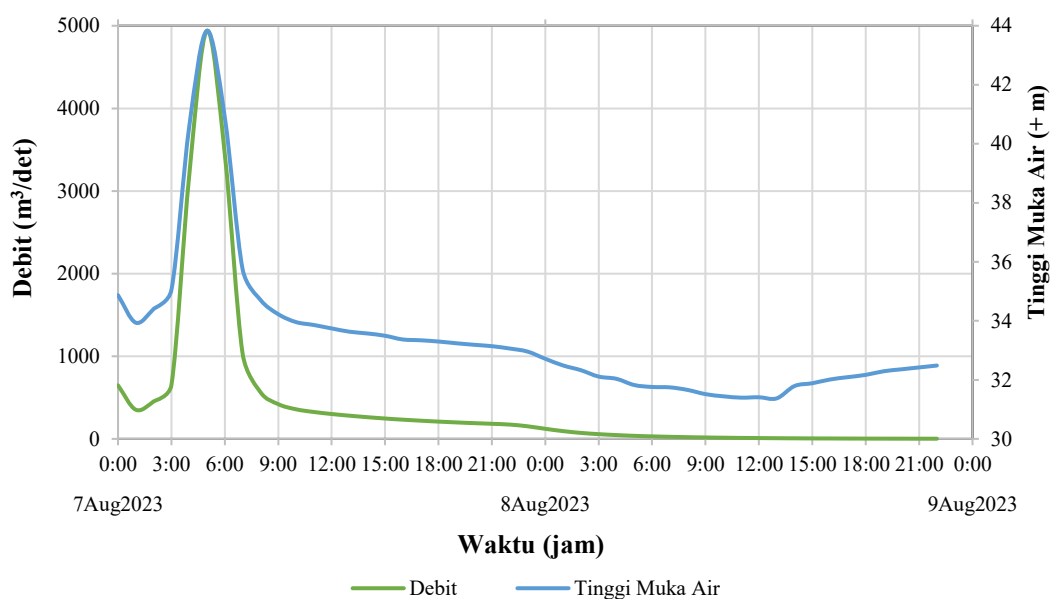


Gambar 5.31 Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 3

5.4.4 Skenario 4

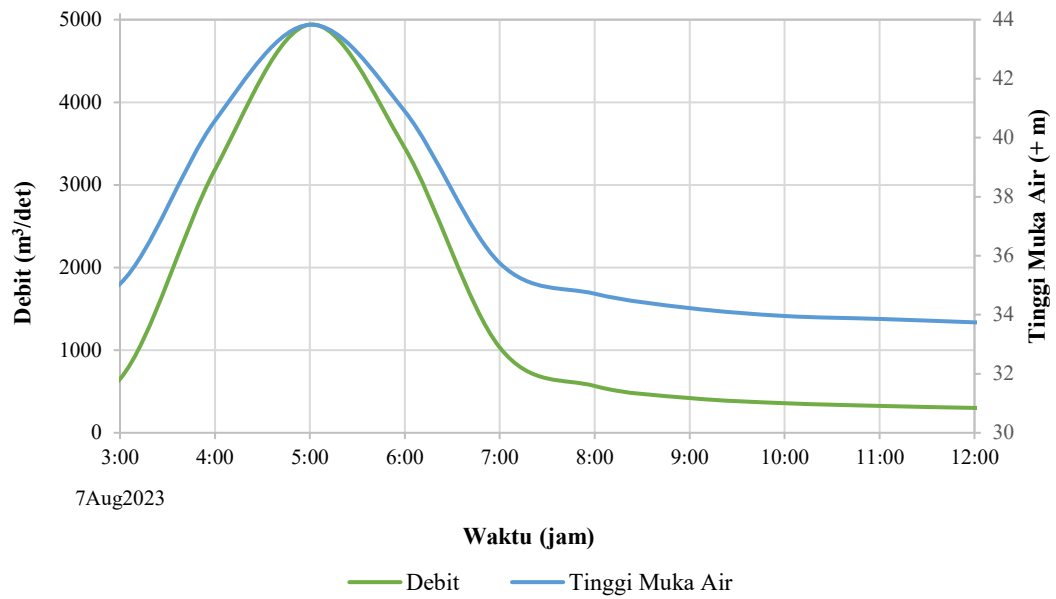
Simulasi skenario ketiga dilaksanakan dengan mengacu pada waktu formasi keruntuhan selama 3 (tiga) jam. Nilai waktu formasi keruntuhan ini diambil dari interval 1 jam pada skenario sebelumnya. Pada puncaknya, debit aliran banjir mencapai 4.940,14 m³/s detik pada jam ke-5. Debit aliran banjir terendah sebesar 1,69 m³/detik tercatat pada akhir simulasi yaitu pada jam ke-46.

Ketinggian maksimum permukaan waduk mencapai +73,99 m dengan *Initial Condition* muka air pada ketinggian +73,98 m. Di *Cross Section* setelah bendungan, yaitu pada *Sta. 27+318* ketinggian muka air maksimum mencapai +43,83 m. Sedangkan pada *Sta. 0*, ketinggian muka air maksimum mencapai +5,82 m. Gambar 5.32 di bawah ini menampilkan hidrograf muka air dan debit pada penampang sungai setelah bendungan.



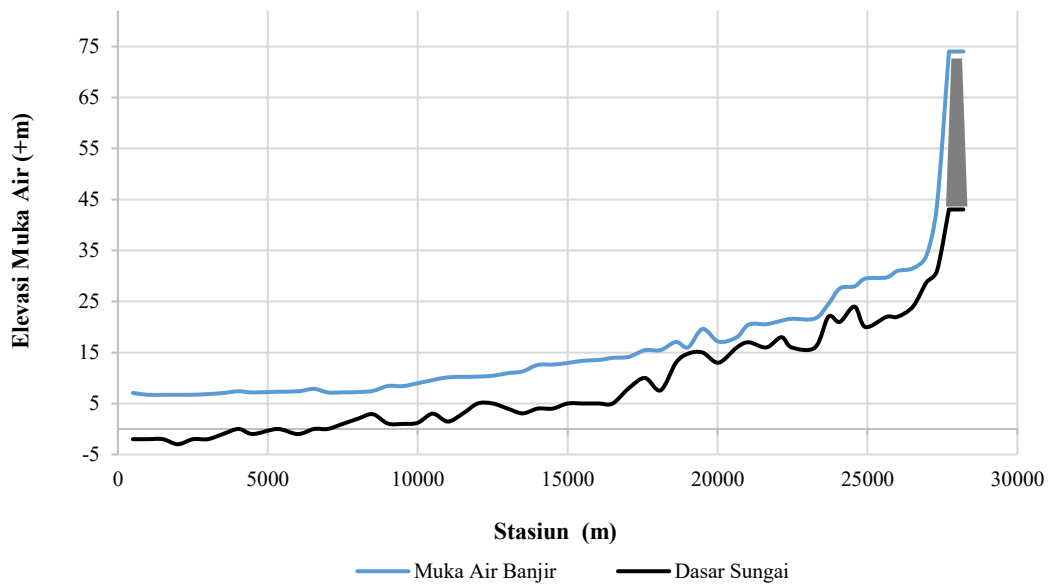
Gambar 5.32 Hidrograf Muka Air Banjir pada *Sta. 27+318* Skenario 4

Untuk mempermudah pengamatan, Gambar 5.33 di bawah ini menggambarkan segmen puncak hidrograf dari jam ke-3 sampai jam ke-12.



Gambar 5.33 Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-12 pada Sta. 27+318 Skenario 4

Berikut ini Gambar 5.34 menampilkan gambaran profil aliran muka air banjir maksimum dari hulu ke hilir sungai.

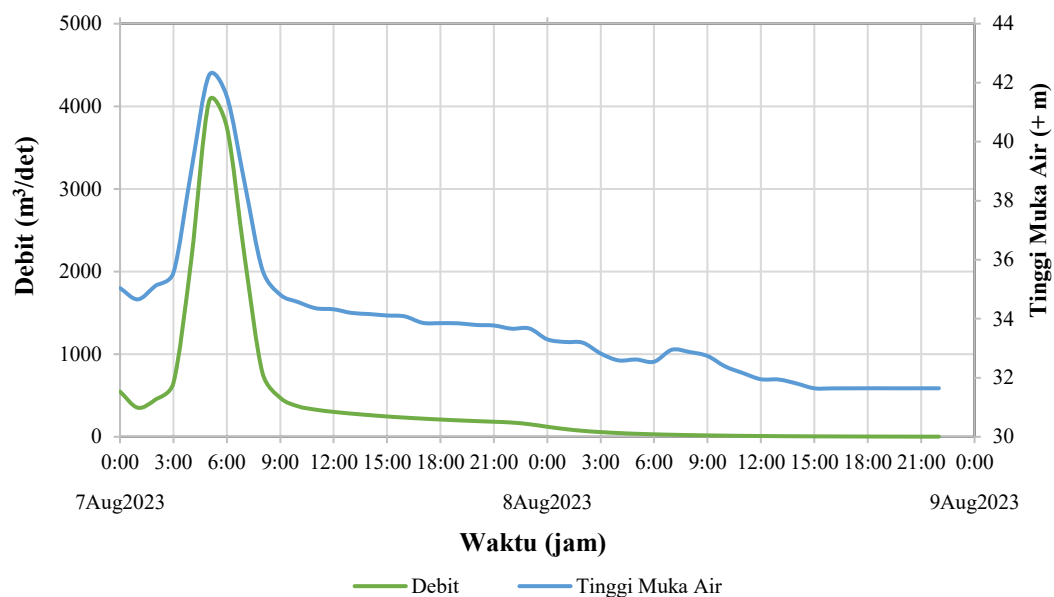


Gambar 5.34 Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 4

5.4.5 Skenario 5

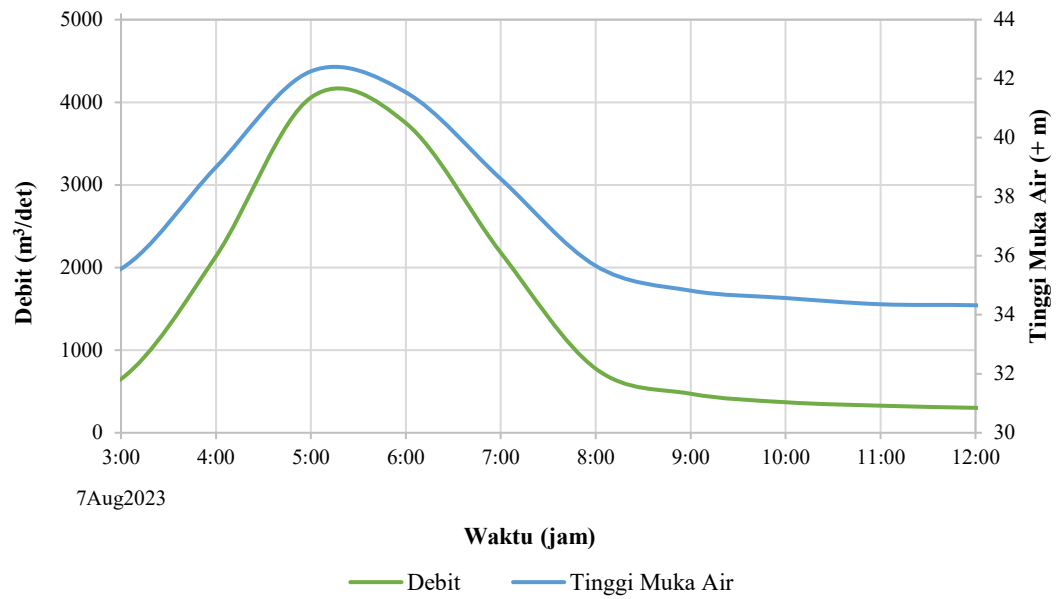
Simulasi skenario ketiga dilaksanakan dengan mengacu pada waktu formasi keruntuhan selama 4 (empat) jam. Nilai waktu formasi keruntuhan ini diambil dari interval 1 jam pada skenario sebelumnya. Pada puncaknya, debit aliran banjir mencapai 4.057,30 m³/s detik pada jam ke-5 menit ke-20. Debit aliran banjir terendah sebesar 1,69 m³/detik tercatat pada akhir simulasi yaitu pada jam ke-46.

Ketinggian maksimum permukaan waduk mencapai +73,99 m dengan *Initial Condition* muka air pada ketinggian +73,98 m. Di *Cross Section* setelah bendungan, yaitu pada *Sta. 27+318* ketinggian muka air maksimum mencapai +42,25 m. Sedangkan pada *Sta. 0*, ketinggian muka air maksimum mencapai +5,24 m. Gambar 5.35 di bawah ini menampilkan hidrograf muka air dan debit pada penampang sungai setelah bendungan.



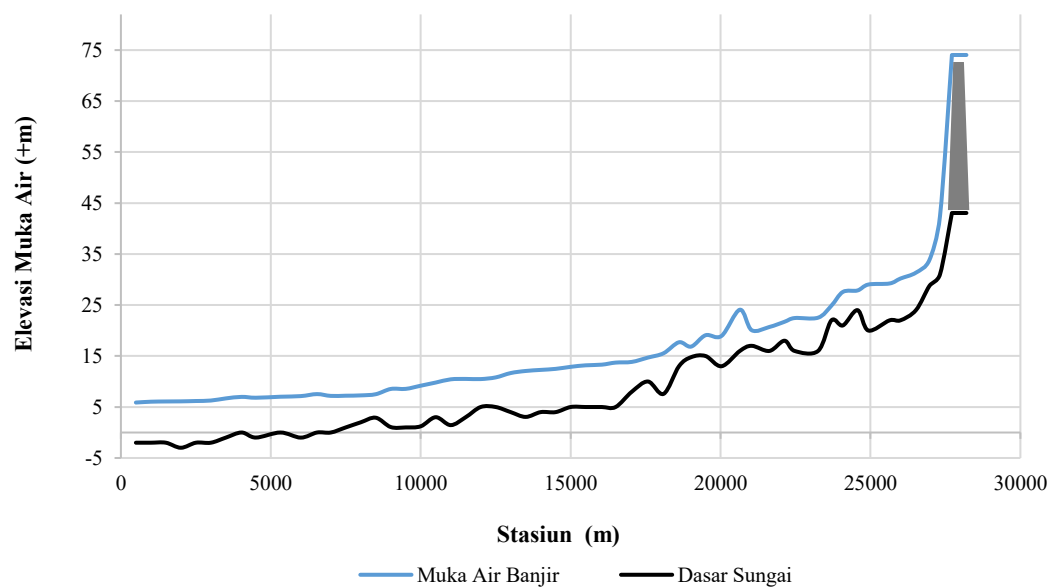
Gambar 5.35 Hidrograf Muka Air Banjir pada *Sta. 27+318* Skenario 5

Untuk mempermudah pengamatan, Gambar 5.36 di bawah ini menggambarkan segmen puncak hidrograf dari jam ke-3 sampai jam ke-12.



Gambar 5.36 Hidrograf Muka Air Banjir Jam Ke-3 Sampai Jam Ke-12 pada *Sta.* 27+318 Skenario 5

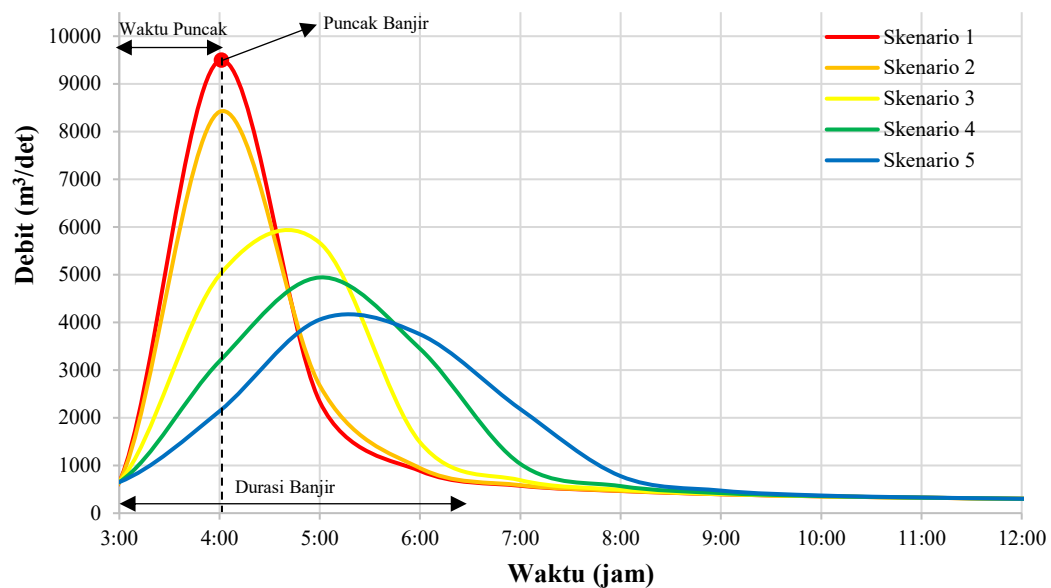
Berikut ini Gambar 5.37 menampilkan gambaran profil aliran muka air banjir maksimum dari hulu ke hilir sungai.



Gambar 5.37 Profil Muka Air Banjir Maksimum Skenario 5

5.5 Perbandingan Hasil Analisis

Hasil dari lima skenario simulasi di atas menunjukkan bahwa keruntuhan dalam waktu formasi 1 jam mengakibatkan puncak aliran banjir tertinggi sebesar 9.484,71 m³/s. Perbandingan hidrograf banjir antara skenario 1, 2, 3, 4 serta 5 dapat diamati pada Gambar 5.38 di bawah ini.



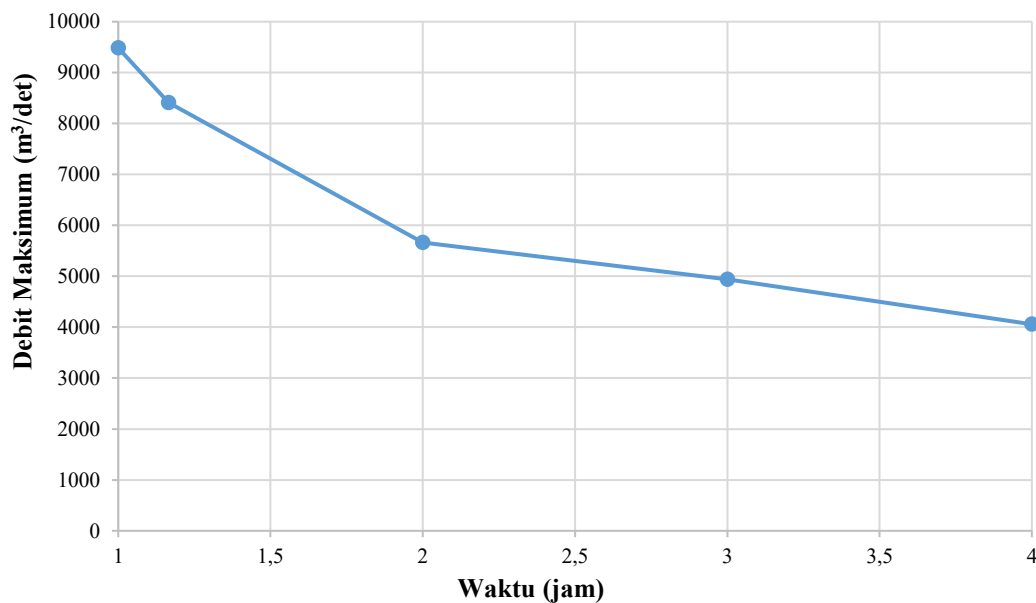
Gambar 5.38 Hidrograf Banjir Skenario 1, 2, 3 4, dan 5

Dari analisis perbandingan hidrograf tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu keruntuhan, maka durasi banjir yang terjadi juga semakin panjang. Durasi banjir ini merujuk pada periode dari fase naik hingga fase turun. Hasil mengenai waktu puncak dan durasi banjir untuk masing-masing skenario dapat dijumpai pada Tabel 5.2 di bawah ini.

Tabel 5.2 Durasi Banjir Skenario 1, 2, 3, 4, dan 5

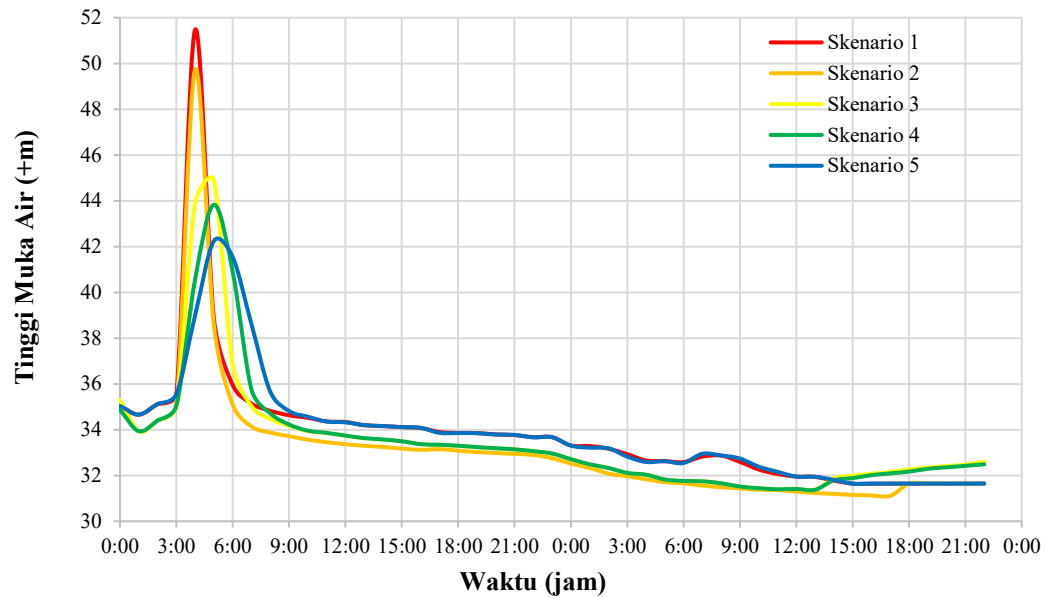
No.	Skenario	Waktu Puncak	Durasi Banjir	Debit Puncak Banjir (m ³ /s)
1	1	1 jam	2 jam 15 menit	9.484,71
2	2	1 jam 9 menit	2 jam 20 menit	8.413,06
3	3	1 jam 34 menit	2 jam 55 menit	5.664,75
4	4	2 jam	3 jam 30 menit	4.940,14
5	5	2 jam 20 menit	4 jam 15 menit	4.057,30

Kemudian dapat diketahui bahwa semakin lama proses formasi keruntuhan, maka debit puncak yang terjadi akan menjadi lebih rendah. Ilustrasi visual dari keterkaitan antara debit maksimum banjir dengan waktu formasi keruntuhan bendungan dapat ditinjau dalam Gambar 5.39 di bawah ini.



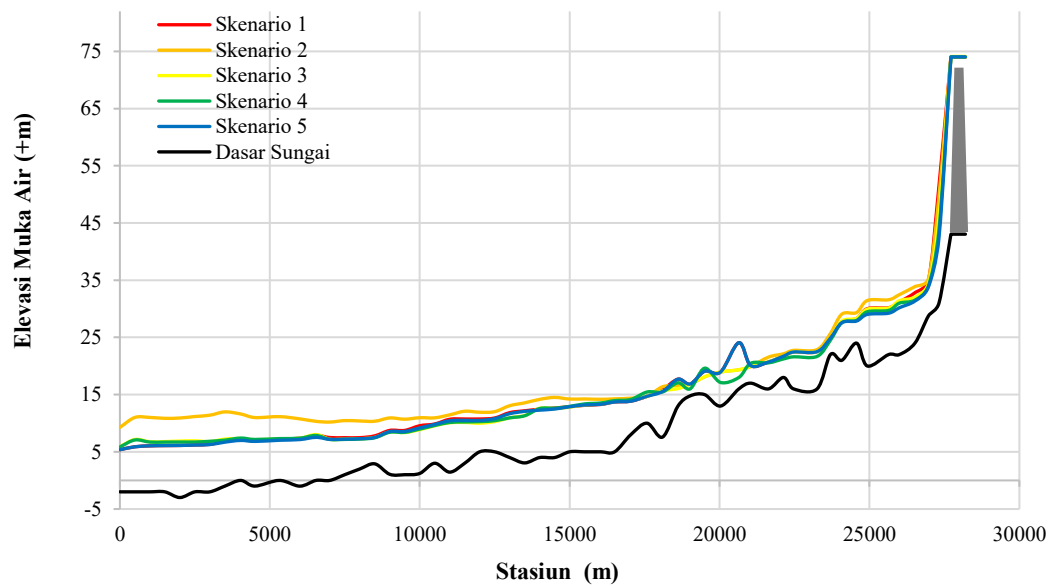
Gambar 5.39 Perbandingan Debit Puncak Banjir

Perubahan waktu formasi keruntuhan juga memiliki dampak pada kedalaman banjir pada setiap *Cross Section*. Pada *Cross Section* yang terletak langsung setelah bendungan, yaitu pada *Sta. 27+318* ketinggian air banjir tertinggi adalah +51,48 m akibat keruntuhan dengan waktu formasi keruntuhan selama 1 jam. Waktu formasi keruntuhan selama 4 jam, ketinggian permukaan air banjir mencapai elevasi +42,25 m. Detail mengenai perubahan muka air pada semua skenario dapat ditinjau dalam Gambar 5.40 di bawah ini.



Gambar 5.40 Hidrograf Muka Air Skenario 1, 2, 3, 4 dan 5

Pada *Sta. 0*, ketinggian permukaan air pada skenario 1 mencapai +5,37 m, sementara pada skenario 5 mencapai +5,24 m. Gambar 5.41 menunjukkan perbandingan ketinggian maksimum permukaan air banjir dari hulu ke hilir pada setiap skenario.



Gambar 5.41 Profil Muka Air Maksimum pada Skenario 1, 2, 3, 4, serta 5

Setelah bendungan mengalami runtuh, elevasi akhir waduk mencapai +47,08 m, mengalami penurunan sebanyak 26,91 m dari elevasi maksimalnya pada +73,99 m. Jumlah total air yang keluar dari waduk mencapai $38.113,24 \times 1.000 \text{ m}^3$.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Analisis aliran banjir akibat keruntuhan Bendungan Sempor pada penelitian ini disimulasikan dalam 5 (lima) skenario. Simulasi dimodelkan dengan keruntuhan akibat *piping* dengan 5 (lima) waktu keruntuhan yang berbeda. Hasil analisis di atas didapatkan kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Berdasarkan hasil simulasi keruntuhan bendungan menggunakan program HEC-RAS 5.0.7 dengan 5 (lima) waktu formasi keruntuhan, diperoleh hasil berikut ini.

Tabel 6.1 Hasil Simulasi Keruntuhan Bendungan Sempor

No.	Waktu Keruntuhan (jam)	Debit Puncak Banjir (m^3/s)	Waktu Puncak	Durasi Banjir
1	1	9.484,71	1 jam	2 jam 15 menit
2	1,1653	8.413,06	1 jam 9 menit	2 jam 20 menit
3	2	5.664,75	1 jam 34 menit	2 jam 55 menit
4	3	4.940,14	2 jam	3 jam 30 menit
5	4	4.057,30	2 jam 20 menit	4 jam 15 menit

2. Berdasarkan Tabel 6.1 di atas, keruntuhan bendungan dengan waktu formasi keruntuhan 1 (satu) jam memiliki nilai debit puncak banjir yang besar serta waktu puncak yang sangat cepat.
3. Debit puncak banjir yang pada keruntuhan 1 (satu) jam sebesar 9.484,71 m^3/s yang terjadi pada jam ke-4, dengan keruntuhan dimulai pada jam ke-3. Sehingga banjir mencapai waktu puncaknya selama 1 jam dengan durasi banjir selama 2 jam 15 menit.
4. Volume air yang mengalir dari Waduk Sempor mencapai 38.113.240 m^3 .
5. Dengan demikian, peneliti menyimpulkan bahwa semakin kecil waktu formasi keruntuhan maka debit puncak banjir yang terjadi akan semakin besar.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Keruntuhan dapat dilakukan menggunakan parameter empiris rekahan yang telah diterbitkan oleh beberapa peneliti lain, semisal Froelich (1995a,b), MacDonald dan Langridge-Monopolis (1984), serta Von Thun dan Gillete (1990).
2. Diperlukan pengembangan studi lebih lanjut dengan memanfaatkan data topografi atau data DEM yang diambil langsung dari lapangan guna mencapai hasil simulasi yang lebih presisi dan akurat.

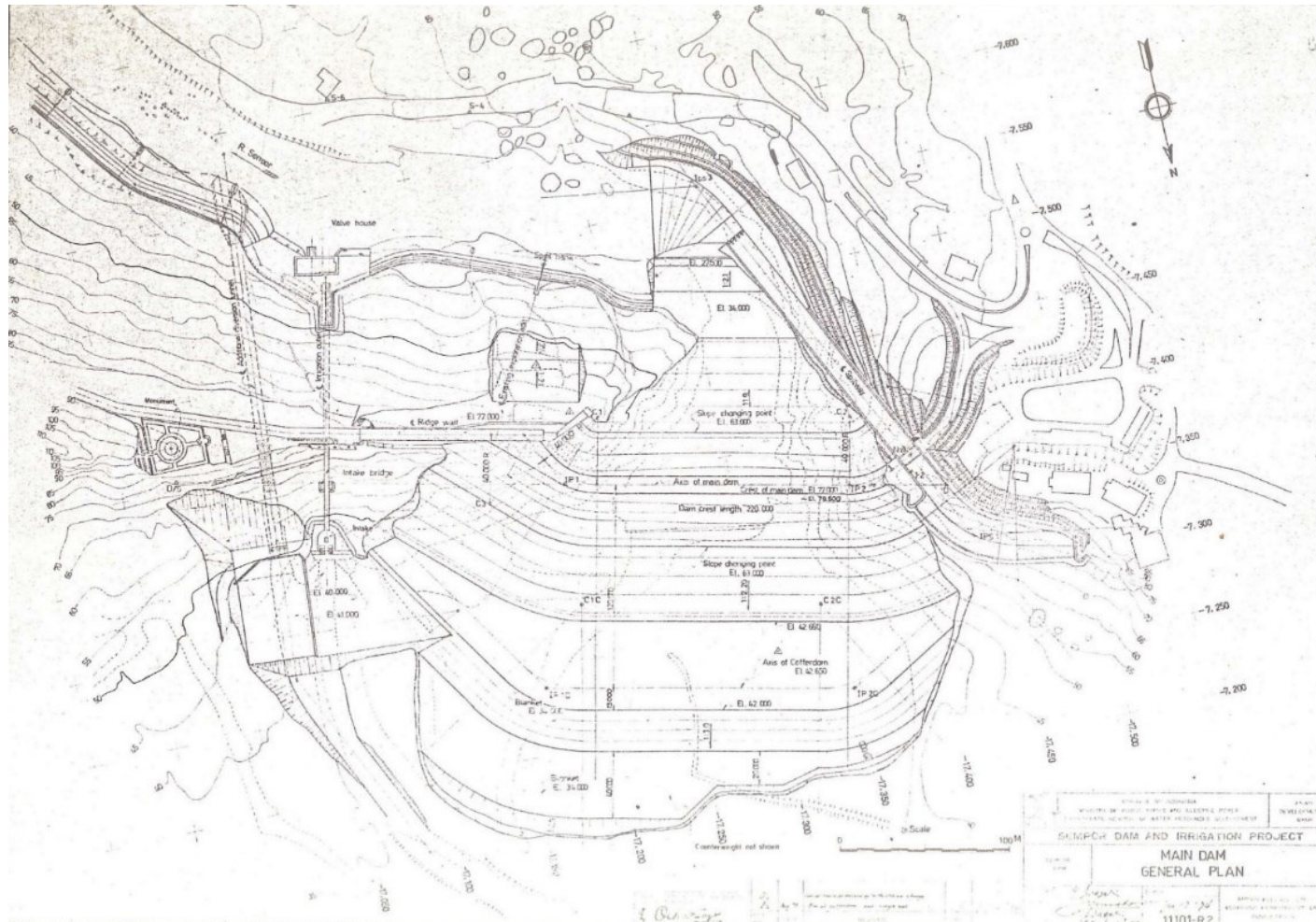
DAFTAR PUSTAKA

- Aryadi, E.V., Juwono, P.T., Priyantoro, D. dan Asmaranto, R. 2014. Analisa Keruntuhan Bendungan Gondang dengan Menggunakan Program Zhong Xing HY21. *Jurnal Teknik Pengairan*, Vol.5 No.1:110-118. Malang.
- Brunner, G. W. 2014. *Using HEC-RAS for Dam Break Studies*. USACE, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. Davis.
- Brunner, G. W. 2016. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. USACE, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. Davis.
- Costa, J.E. 1985. *Floods from Dam Failures* (Vol. 85, No. 560). US Geological Survey. Denver.
- Fread, D.L. 1984. *A Breach Erosion Model for Earthen Dams*. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA. Maryland.
- Fread, D.L. 1988. *BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures*. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA. Maryland.
- Ikromi, A.I. 2018. Analisis Hidrodinamik Keruntuhan Bendungan Cipanas (*Hydrodynamic Analysis of Cipanas Dam Breach*). *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Lisaputra, R.D.M. 2016. Prediksi Banjir Jika Terjadi Keruntuhan Bendungan Akibat Overtopping Dan Piping. *Tugas Akhir*. Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung.
- Listia, V., Azmeri, A., dan Yulianur, A. 2015. Analisis Perilaku Banjir Bandang Akibat Keruntuhan Bendungan Alam pada Daerah Aliran Sungai Krueng Teungku Provinsi Aceh. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*. Vol.22 No.3. Banda Aceh.
- Ofananta, Y. 2018. Analisis Aliran Akibat Keruntuhan Bendungan Gonggang Dengan Menggunakan HEC-RAS 4.1.0. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Rachmadan, C.R., Juwono, P.T., dan Asmaranto, R. 2013. Analisa Keruntuhan Bendungan Alam Way Ela dengan Menggunakan Program Zhong Xing HY21. *Jurnal Universitas Brawijaya*. Malang.
- Riyanto, B.A. 2019. 01. Teori Keruntuhan Bendungan (DAMBRK-BREACH). *Bimbingan Teknis Analisis Keruntuhan Bendungan*. Makassar. 23-26 September.
- Riyanto, B.A. 2019. 02. Analisis Keruntuhan Bendungan Menggunakan HEC-RAS. *Bimbingan Teknis Analisis Keruntuhan Bendungan*. Makassar. 23-26 September.

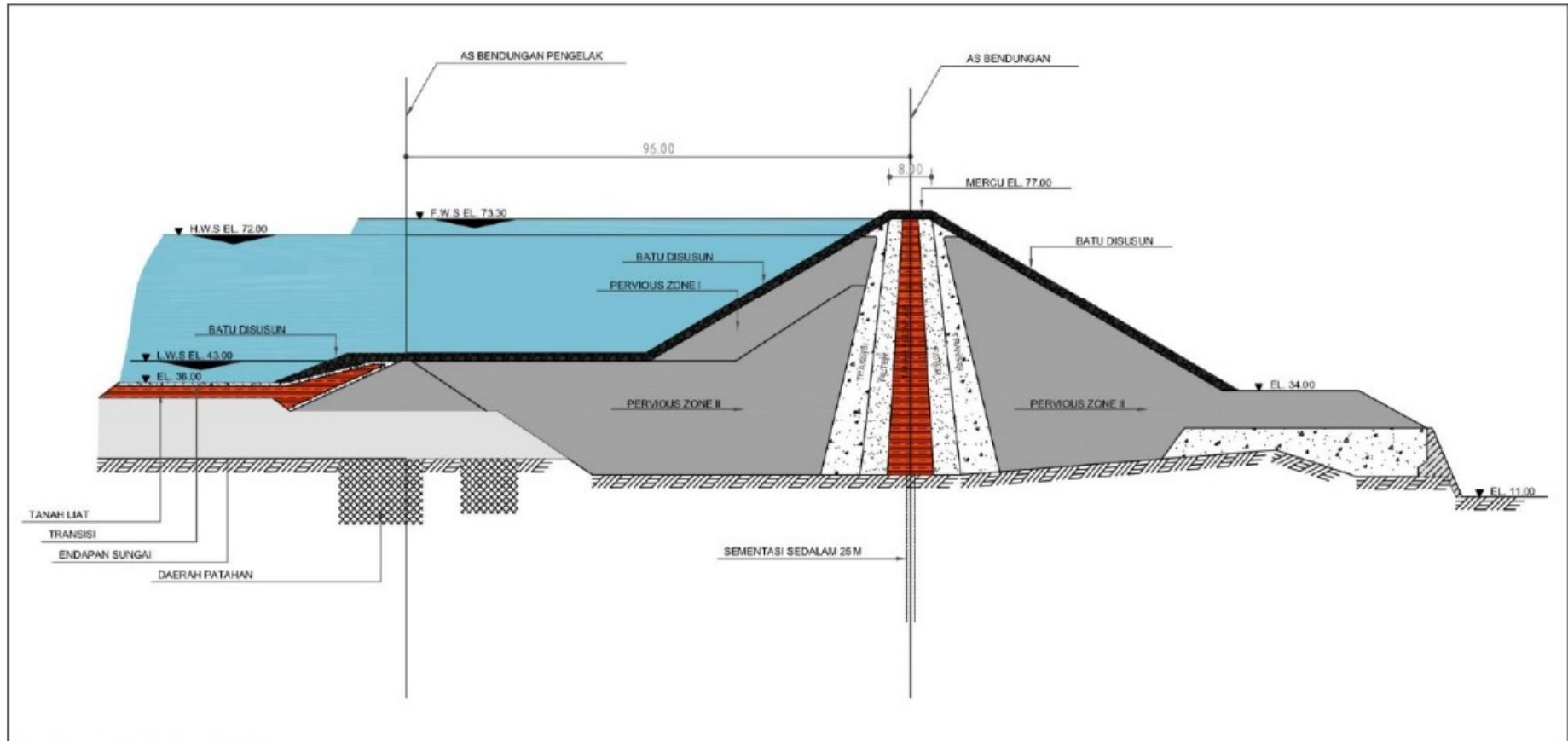
- Sri Harto Br. 2009. *Hidrologi Teori, Masalah dan Penyelesaian*. Nafiri. Yogyakarta.
- Torimtubun, A.T. 2018. Analisa Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Banyuwung dengan Menggunakan HEC-RAS. *Tugas Akhir*. Universitas Brawijaya. Malang.
- Triatmodjo, B. 2008. *Hidrologi Terapan*. Beta Offset. Yogyakarta.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar *As Build* Bendungan Sempor



Lampiran 2 Gambar Profil dan *Cross Section* Bendungan Sempor



Lampiran 3 Data Karakteristik Waduk Sempor

No.	Elevasi (mdpl)	Luas (Ha)	Volume (1000 m ³)	Keterangan
1	42	0,00	0,00	El. Dasar Bendungan
2	43	10,58	35,27	El. Muka Air Min.
3	44	25,39	209,79	
4	45	33,03	501,04	
5	46	45,7	892,98	
6	47	50,83	1.375,38	
7	48	57,77	1.917,99	
8	49	65,44	2.533,64	
9	50	70,21	3.211,75	
10	51	75,36	3.939,43	
11	52	80,33	4.717,71	
12	53	84,74	5.542,94	
13	54	90,51	6.419,02	
14	55	97,36	7.358,19	
15	56	104,3	8.366,34	
16	57	112,04	9.447,84	
17	58	121,02	10.612,86	
18	59	129,46	11.865,04	
19	60	138,68	13.205,48	
20	61	146,81	14.632,74	
21	62	155,99	16.146,49	
22	63	163,85	17.745,52	
23	64	171,1	19.420,15	
24	65	179,14	21.171,19	
25	66	185,94	22.996,49	
26	67	192,05	24.886,38	
27	68	197,87	26.835,95	
28	69	202,93	28.839,89	
29	70	207,76	30.893,28	
30	71	212,49	32.994,50	
31	72	217,03	35.142,08	El. <i>Spillway</i>
32	73	221,53	37.334,89	
33	73,7	224,63	38.901,08	El. Muka Air Banjir
34	74	225,96	39.572,31	
35	75	230,41	41.854,11	
36	76	234,76	44.179,92	
37	77	304,29	46.867,64	El. Puncak Bendungan

Lampiran 4 Data Hidrograf Banjir Rencana Q_{PMF}

No.	Jam	Debit (m³/det)	No.	Jam	Debit (m³/det)
1	0:00	0	25	24:00	86,438
2	1:00	149,514	26	25:00	64,456
3	2:00	828	27	26:00	50,466
4	3:00	870,970	28	27:00	40,445
5	4:00	710,389	29	28:00	31,169
6	5:00	579,322	30	29:00	24,377
7	6:00	514,674	31	30:00	20,500
8	7:00	457,587	32	31:00	16,630
9	8:00	408,955	33	32:00	12,756
10	9:00	353,674	34	33:00	10,009
11	10:00	327,509	35	34:00	7,854
12	11:00	303,964	36	35:00	6,163
13	12:00	283,109	37	36:00	4,836
14	13:00	264,709	38	37:00	3,795
15	14:00	248,475	39	38:00	2,978
16	15:00	234,131	40	39:00	2,337
17	16:00	221,423	41	40:00	1,834
18	17:00	210,130	42	41:00	1,439
19	18:00	200,059	43	42:00	1,129
20	19:00	191,044	44	43:00	0,886
21	20:00	182,941	45	44:00	0,695
22	21:00	175,629	46	45:00	0,546
23	22:00	163,095	47	46:00	0,428
24	23:00	126,037			