



TESIS - RC185401

PEMODELAN NUMERIK GENANGAN BANJIR AKIBAT KERUNTUHAN BENDUNGAN

ZAFIRA NADIDA
NRP. 03111850097007

Dosen Pembimbing :
Dr. techn. Umbaro Lasminto, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TESIS - RC185401

PEMODELAN NUMERIK GENANGAN BANJIR AKIBAT KERUNTUHAN BENDUNGAN

**ZAFIRA NADIDA
NRP. 03111850097007**

**Dosen Pembimbing :
Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020**



THESIS - RC185401

NUMERICAL MODELING OF FLOOD INUNDATION DUE TO DAM BREAK

ZAFIRA NADIDA
NRP. 03111850097007

Supervisor :
Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN OF CIVIL ENGINEERING
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ZAFIRA NADIDA

NRP: 03111850097007

Tanggal Ujian: 5 Agustus 2020

Periode Wisuda: September 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Dr. techn. Umboro Lasminto, ST., M.Sc
NIP. 19721202 199802 1001

.....

Penguji:

1. Dr. Wasis Wardoyo, M.Sc
NIP. 19610927 198701 1001

.....

2. Dr. A. A. Ng. Satria Damar Negara, S.T., M.T
NIP: 198820191 1075

.....



Kepala Departemen Teknik Sipil

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc

NIP: 19721202 199802 1 001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: “**Pemodelan Numerik Genangan Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan**” ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tulisan untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tulisan yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulisan orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka.

Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiasi di dalam naskah **tesis** ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, Agustus 2020



Zafira Nadida

NRP: 03111850097007

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Laporan Tesis ini dengan judul “Pemodelan Numerik Genangan Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan”. Dalam kesempatan ini penulis bermaksud mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang mendukung dan membantu atas terselesaikannya Laporan Tesis ini:

1. Allah SWT, yang telah memudahkan hamba-Nya dalam menyelesaikan Laporan Tesis ini,
2. Seluruh keluarga, Frodo Baggins, anak-anak, ibuk, bapak, mertua, kakak, dan adik yang tiada hentinya selalu mendukung dan mendoakan dalam penyelesaian pendidikan S2,
3. Bapak Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan serta bimbingannya dalam proses penyusunan Laporan Tesis,
4. Bapak Dr. Wasis Wardoyo, M.Sc dan Bapak Dr. A. A. Ng. Satria Damar Negara, S.T., M.T, selaku dosen penguji yang juga meberikan arahan guna menyempurnakan Tesis ini,
5. Bapak Dr. Ir. Edijatno, DEA. dan seluruh dosen pengajar di Departemen Teknik Sipil yang telah memberikan ilmu serta bimbingannya selama masa perkuliahan,
6. Teman-teman Magister Hidroinformatika dan MRSA Tahun 2018 yang memberikan dukungan dan motivasi baik pada masa perkuliahan maupun pada saat pengerjaan tesis ini.
7. Janus Coffee Batu, Café Rakyat Jl. Diponegoro Batu, Excelso Manyar, Kamar adek Inah sebagai tempat paling nyaman dalam mengerjakan tesis ini.
8. Pihak-pihak lain yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, terima kasih atas masukan, saran, dan dukungan yang telah diberikan.

Surabaya, Agustus 2020

Zafira Nadida

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PEMODELAN NUMERIK GENANGAN BANJIR AKIBAT KERUNTUHAN BENDUNGAN

Nama Mahasiswa : Zafira Nadida
NRP : 03111850097007
Dosen Konsultasi : Dr. techn. Umboro Lasminto, ST., M.Sc.

ABSTRAK

Pembangunan bendungan merupakan upaya yang dilakukan manusia untuk mengendalikan ketersediaan air di darat. Di sisi lain, adanya bendungan menyimpan resiko bencana yang besar jika terjadi keruntuhan bendungan. Tampungan air dari bendungan dapat mengalir dengan kecepatan tinggi sehingga memiliki daya hancur yang dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur hingga adanya korban jiwa. Salah satu upaya mitigasi menghadapi keruntuhan bendungan adalah dengan analisis resiko keruntuhan bendungan. Tesis ini akan meneliti keruntuhan bendungan terhadap luas persebaran banjir.

Penelitian ini mengambil objek Bendungan Way Sekampung, yang terletak di Kabupaten Pringsewu Lampung. Batasan masalah keruntuhan bendungan yang dianalisis dalam penelitian ini disebabkan oleh *piping* dan *overtopping*, yang merupakan kasus terbanyak pada keruntuhan bendungan. *Piping* diteliti pada tiga titik yang berada di atas, tengah dan bawah tubuh bendungan. *Overtopping* diteliti dengan melakukan simulasi debit PMF dengan pintu pelimpah tidak difungsikan. Simulasi keruntuhan bendungan menggunakan gabungan model 1D dan 2D pada aplikasi HEC-RAS. Input model terdiri dari *Digital Elevation Model* (DEM) yang digunakan untuk proses peniruan geometri sungai dan bendungan. Semua skenario akan menggunakan input *Probable Maximum Flood* (PMF). Data DEM didapatkan dari DEMNAS dengan skala 1:50.000. Debit PMF dihitung menggunakan data Curah Hujan selama 10 tahun dan data *outflow* PMF Bendungan Batuteji.

Hasil analisis keruntuhan bendungan menunjukkan luas genangan banjir terbesar disebabkan *piping* pada elevasi 120 yaitu seluas 43,17 km², sedangkan kecepatan maksimum terjadi pada skenario *Piping* +120 yaitu sebesar 9,71 m/det.

Kata Kunci: *piping*, *overtopping*, genangan, Kombinasi 1D dan 2D , HEC-RAS

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

NUMERICAL MODELING OF FLOOD INUNDATION DUE TO DAM BREAK

Student Name : Zafira Nadida
NRP : 03111850097007
Supervisor : Dr. techn. Umboro Lasminto, ST., M.Sc.

ABSTRACT

Dam construction is an effort made by humans to control water availability on land. On the other hand, the existence of a dam saves a huge risk of disaster in the event of a dam failure. The water reservoir from the dam can flow at high speed, so that it has a destructive force that can cause damage in the downstream area as well as casualties. One of the mitigation efforts to deal with dam failure is by analyzing the risk of dam failure. This thesis examines the impact of dam failure on the extent of flood distribution.

This study took the object of the Way Sekampung Dam located in Pringsewu Regency, Lampung. The trigger factors for dam failure analyzed in this study were caused by piping and overtopping, which were the most common cases of dam failure. Piping was examined at three points of the dam's body, namely at the top, middle and bottom. Overtopping was investigated by simulating PMF discharge with the assumption that the overflow gate was not functioning. The dam failure simulation used a combination of 1D and 2D models in the HEC-RAS application. The input model consisted of the Digital Elevation Model (DEM) which was used to simulate the geometry of rivers and dams. All scenarios used Probable Maximum Flood (PMF) input. DEM data were obtained from DEMNAS on a scale of 1: 50,000. PMF discharge was calculated using rainfall data for 10 years and flood routing data for the PMF of Batutegi Dam.

The results of the dam failure analysis showed that the largest flood inundation area was due to piping at an elevation of 120, namely 43.17 km², while the maximum velocity occurred in the Piping +120 scenario, which was 9.71 m/sec.

Keywords: *piping, overtopping, puddles, 1D and 2D combination, HEC-RAS*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| LEMBAR PENGESAHAN | i |
| SURAT PERNYATAAN..... | iii |
| KATA PENGANTAR | v |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACT | ix |
| DAFTAR ISI..... | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL..... | xvii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 4 |
| 1.3 Tujuan..... | 4 |
| 1.4 Manfaat Penelitian..... | 4 |
| 1.5 Batasan Masalah Penelitian..... | 4 |
| BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... | 7 |
| 2.1 Penelitian Terdahulu..... | 7 |
| 2.2 Bendungan Urugan Batu | 8 |
| 2.3 Kegagalan Bendungan..... | 10 |
| 2.3.1 Proses Penerobosan..... | 11 |
| 2.4 HEC-RAS | 12 |
| 2.5 Kombinasi Model 1D 2D Pada HEC-RAS | 15 |
| 2.6 HEC-RAS untuk Simulasi Keruntuhan Bendungan..... | 16 |
| 2.6.1 Karakterisk Pelanggaran Bendungan..... | 18 |
| 2.6.2 <i>Piping</i> | 19 |
| 2.6.3 <i>Overtopping</i> | 21 |
| 2.7 Analisis Genangan..... | 22 |
| 2.8 Analisis Hidrologi | 23 |
| 2.8.1 Konsistensi Data Hujan..... | 24 |
| 2.8.2 Analisis Curah Hujan Rata-rata | 26 |
| 2.8.3 Analisa Curah Hujan Rencana | 27 |
| 2.8.4 Analisis Hujan Maksimum Boleh Jadi (BMB) | 28 |
| 2.8.5 ARF..... | 32 |
| 2.8.6 Curah Hujan Efektif | 32 |
| 2.8.7 Aliran Dasar | 33 |
| 2.8.8 Hidrograf Satuan | 34 |
| 2.8.9 Penelusuran Banjir | 36 |
| BAB 3 METODE PENELITIAN..... | 37 |
| 3.1 Rancangan Penelitian | 37 |
| 3.2 Studi Literatur..... | 37 |
| 3.3 Pengumpulan Data | 38 |
| 3.3.1 Data Hidrologi..... | 39 |

| | | |
|---------------------------------|--|-----|
| 3.3.2 | DEM | 40 |
| 3.3.3 | Data Teknis Bendungan..... | 40 |
| 3.3.4 | Kalibrasi | 40 |
| 3.3.5 | Simulasi Model..... | 40 |
| 3.3.6 | Analisis Genangan Banjir | 41 |
| BAB 4 ANALISIS DATA..... | | 43 |
| 4.1 | Lokasi Penelitian..... | 43 |
| 4.2 | Analisis Hidrologi | 44 |
| 4.2.1 | Daerah Aliran Sungai (DAS)..... | 45 |
| 4.2.2 | Analisis Debit PMF | 46 |
| 4.3 | Kalibrasi..... | 58 |
| 4.4 | Pemodelan Keruntuhan Bendungan..... | 60 |
| 4.4.1 | Pembuatan <i>Project</i> | 61 |
| 4.4.2 | Terrain Pada Rasmapper..... | 62 |
| 4.4.3 | Peniruan Geometri | 65 |
| 4.4.4 | <i>2D Flow Area</i> | 68 |
| 4.4.5 | Menghubungkan <i>2D flow area</i> dengan 1D..... | 70 |
| 4.4.6 | <i>Unsteady Flow Data</i> | 71 |
| 4.4.7 | Variabel Keruntuhan Bendungan | 72 |
| 4.4.8 | <i>Running Model</i> dan Output Simulasi | 75 |
| 4.5 | Kalibrasi Model | 76 |
| 4.6 | Analisis Hidrolika | 77 |
| 4.6.1 | Analisis Skenario <i>Overtopping</i> | 78 |
| 4.6.2 | Analisis Skenario <i>Piping</i> Elevasi +100 | 79 |
| 4.6.3 | Analisis Skenario <i>Piping</i> Elevasi +110 | 81 |
| 4.6.4 | Analisis Skenario <i>Piping</i> Elevasi +120 | 82 |
| 4.6.5 | Perbandingan Analisis Skenario | 84 |
| 4.7 | Analisis Genangan | 84 |
| 4.8 | Analisis Genangan dan Kecepatan | 89 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN..... | | 91 |
| 5.1 | Kesimpulan | 91 |
| 5.2 | Saran | 91 |
| LAMPIRAN | | 93 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 99 |
| BIODATA PENULIS | | 103 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Bendungan Urugan Batu: (a) Membran Hulu; (b) Inti Tegak..... | 9 |
| Gambar 2.2. Aliran Sungai dan Dataran Banjir | 13 |
| Gambar 2.3. Ilustrasi pemodelan <i>level pool routing</i> | 17 |
| Gambar 2.4. Mekanisme pipung pada tubuh bendungan. (1) dalam tubuh bendungan; (2) terjadi pada tubuh bendungan ke tanah pondasi; (3) terjadi pada tanah pondasi | 20 |
| Gambar 2.5. Proses keruntuhan bendungan akibat <i>pipung</i> | 21 |
| Gambar 2.6. Proses keruntuhan bendungan akibat <i>overtopping</i> | 22 |
| Gambar 2.7. Pembuatan Poligon Thiessen | 27 |
| Gambar 2.8. Grafik untuk menentukan nilai Km..... | 29 |
| Gambar 2.9. Grafik penyesuaian curah hujan rata-rata (f_1) | 30 |
| Gambar 2.10. Grafik Jumlah Data Pengamatan (f_2) | 30 |
| Gambar 2.11. Faktor penyesuaian simpangan baku (f_3) | 31 |
| Gambar 2.12 Faktor penyesuaian (f_4) | 31 |
| Gambar 2.13. Grafik HSS Nakayasu | 36 |
| Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian | 38 |
| Gambar 3.2 Lokasi Bendungan Way Sekampung | 39 |
| Gambar 4.1. Lokasi Penelitian Bendungan Way Sekampung | 43 |
| Gambar 4.2. Skema Pengaliran..... | 43 |
| Gambar 4.3. Daerah Pengaliran Sungai Bendungan Way Sekampung | 45 |
| Gambar 4.4 DAS Bendungan Way Sekampung dan Bendungan Batutegi..... | 46 |
| Gambar 4.5 Lokasi Pos Hujan Pada DAS Bendungan Way Sekampung..... | 47 |
| Gambar 4.6 Uji Konsistensi Data Pos Hujan Air Nanningan (R064)..... | 47 |
| Gambar 4.7 Uji Konsistensi Data Pos Hujan Gunung Magang (R284)..... | 48 |
| Gambar 4.8 Uji Konsistensi Data Stasiun Hujan Kunyir (R015) | 48 |
| Gambar 4.9 Poligon Thiessen Daerah Pengaliran Sungai Way Sekampung | 49 |
| Gambar 4.10 Penentuan Nilai Km | 52 |
| Gambar 4.11 Penentuan Nilai f_1 dan f_3 | 52 |
| Gambar 4.12 Penentuan Nilai f_3 dan f_4 | 53 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.13 | Histogram Intensitas Hujan Setiap Waktu..... | 55 |
| Gambar 4.14 | HSS Nakayasu DAS Way Sekampung..... | 56 |
| Gambar 4.15 | Debit Penelusuran Banjir PMF Bendungan Batutegei | 56 |
| Gambar 4.16 | Hidrograf Superposisi Bendungan Way Sekampung | 57 |
| Gambar 4.17 | Lokasi Pengambilan Data Kalibrasi | 58 |
| Gambar 4.18 | Grafik Pengukuran Kecepatan, Debit dan Kedalaman Sungai | 59 |
| Gambar 4.19 | Tampilan HEC-RAS | 61 |
| Gambar 4.20 | Penentuan Sistem Satuan | 62 |
| Gambar 4.21 | Menu yang Dipakai Untuk Pemodelan..... | 62 |
| Gambar 4.22 | Rasmapper Option | 63 |
| Gambar 4.23 | Tampilan Terrain pada Rasmapper..... | 64 |
| Gambar 4.24 | Layer properties terrain | 64 |
| Gambar 4.25 | Hasil Digitasi Lokasi Penelitian | 66 |
| Gambar 4.26 | Pembuatan Cross Section Pada Belokan Sungai | 67 |
| Gambar 4.27 | Pengaturan Inline Structure | 68 |
| Gambar 4.28 | Menu Editor <i>2D Flow Area</i> | 69 |
| Gambar 4.29 | Geometri model setelah penambahan area 2D | 69 |
| Gambar 4.30 | Penentuan lokasi <i>lateral structure</i> | 70 |
| Gambar 4.31 | Lateral Structure | 71 |
| Gambar 4.32 | Pemilihan <i>unsteady flow data</i> | 72 |
| Gambar 4.33 | Dimensi Keruntuhan Bendungan akibat <i>Piping</i> | 73 |
| Gambar 4.34 | Dimensi Keruntuhan Bendungan Akibat <i>Overtopping</i> | 74 |
| Gambar 4.35 | Pengaturan <i>Dam Inline Structure Breach Data</i> | 74 |
| Gambar 4.36 | Pengaturan <i>running</i> dan notifikasi <i>running</i> selesai | 75 |
| Gambar 4.37 | Penentuan mesh pada <i>2D Flow Area</i> | 76 |
| Gambar 4.38 | Hidrograf debit <i>head water</i> dan <i>tail water</i> | 77 |
| Gambar 4.39 | Kondisi Bendungan Setelah Keruntuhan..... | 78 |
| Gambar 4.40 | Profil muka air maksimum skenario <i>overtopping</i> | 78 |
| Gambar 4.41 | Profil muka air di akhir simulasi | 79 |
| Gambar 4.42 | Grafik Kecepatan Skenario <i>Overtopping</i> | 79 |
| Gambar 4.43 | Profil muka air maksimum skenario <i>piping</i> elevasi +100 | 80 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.44 Profil kecepatan Jam ke-6 Skenario <i>Piping</i> elevasi +100..... | 80 |
| Gambar 4.45 Profil aliran kondisi maksimum skenario <i>piping</i> elevasi +110..... | 81 |
| Gambar 4.46 Profil kecepatan aliran jam ke-6 skenario <i>piping</i> elevasi +110 | 81 |
| Gambar 4.47 Profil aliran kondisi maksimum skenario <i>piping</i> elevasi +120..... | 82 |
| Gambar 4.48 Profil kecepatan aliran menit ke-30 skenario <i>piping</i> +120 | 83 |
| Gambar 4.49 Perbandingan elevasi dan luas area..... | 83 |
| Gambar 4.50 Banjir Maksimum Skenario <i>Piping</i> +120 pada Rasmapper..... | 84 |
| Gambar 4.51 Peta Banjir Maksimum Skenario <i>Piping</i> +120..... | 85 |
| Gambar 4.52 Peta genangan banjir Skenario <i>Piping</i> +120 | 86 |
| Gambar 4.53 Daerah terdampak banjir per kecamatan..... | 88 |
| Gambar 4.54 <i>Overlay</i> genangan banjir terhadap area permukiman..... | 89 |
| Gambar 4.55 Grafik Hubungan Kecepatan dan Tinggi Muka Air..... | 90 |

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Klasifikasi Genangan Banjir | 23 |
| Tabel 2.2 Tabel Koefisien Pengaliran Mononobe..... | 32 |
| Tabel 3.1 Skenario Pemodelan..... | 41 |
| Tabel 4.1 Data Teknis Bendungan Way Sekampung..... | 44 |
| Tabel 4.2 Perhitungan Pengaruh Stasiun Hujan..... | 49 |
| Tabel 4.3 Data Hujan Maksimum Kawasan | 50 |
| Tabel 4.4 Rincian Perhitungan Statistik..... | 50 |
| Tabel 4.5 Rangkuman Hasil Perhitungan Statistik | 51 |
| Tabel 4.6 Parameter untuk menghitung Curah hujan CMB..... | 53 |
| Tabel 4.7 Ringkasan Perhitungan CMB..... | 54 |
| Tabel 4.8 Perhitungan Faktor Reduksi DAS..... | 54 |
| Tabel 4.9 Perhitungan Debit PMF | 54 |
| Tabel 4.10 Tabel Perhitungan HSS Nakayasu | 55 |
| Tabel 4.11 Data Input Kalibrasi | 59 |
| Tabel 4.12 Hasil Simulasi Variasi Nilai Manning | 60 |
| Tabel 4.13 Input Data Perhitungan Variabel Keruntuhan Bendungan | 72 |
| Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Variabel Keruntuhan Bendungan..... | 73 |
| Tabel 4.15 Perbandingan luasan genangan berdasarkan variasi mesh..... | 77 |
| Tabel 4.16 Perbandingan Analisis Data | 84 |
| Tabel 4.17 Perbandingan Luasan Genangan | 86 |

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Pembangunan bendungan merupakan salah satu upaya manusia untuk memenuhi kebutuhan air. Bendungan dapat menampung air yang kemudian digunakan sebagai berbagai macam keperluan seperti irigasi, PLTA, air baku, dll. Banyaknya manfaat bendungan tersebut menyebabkan pembangunan bendungan terus dilakukan. Manfaat ini juga yang menyebabkan terjadinya perkembangan masyarakat di daerah hilir (Aryadi, Juwono, Priyantoro, & Asmaranto, 2014).

Ditinjau dari tipe bendungan, tipe bendungan yang banyak dibangun di Indonesia adalah bendungan urugan. Keunggulan bendungan urugan yaitu dapat dibangun pada hampir semua kondisi tanah. Material yang digunakan untuk tubuh bendungan juga dapat diambil dari tanah di sekitar bendungan (Sosrodarsono & Takeda, 1977).

Disamping semua keunggulan di atas, bendungan urugan juga mempunyai kelemahan. Bendungan urugan mempunyai kelemahan yaitu tidak mampu menahan limpasan air di atas mercunya, sehingga limpasan yang terjadi akan mengakibatkan longoran pada lereng hilir sehingga bendungan menjadi hancur. Karena tubuh bendungan terdiri dari timbunan tanah atau timbunan batu yang berkomposisi lepas, maka bahaya keruntuhan bendungan umumnya disebabkan oleh hal-hal sebagai berikut: (1) Longoran yang terjadi baik pada lereng hulu maupun lereng hilir tubuh bendungan; (2) Terjadinya erosi dalam atau *piping*;

Costa (1985) dalam laporannya mencamtumkan bahwa pada 300 kasus keruntuhan bendungan di seluruh dunia dan melaporkan bahwa keruntuhan bendungan urugan 38% disebabkan *piping* dan *seepage*, 35% disebabkan *overtopping*, 21% karena cacat pondasi, dan 6% dikarenakan sebab lainnya.

Overtopping dapat terjadi ketika air dalam bendungan melewati tubuh bendungan sehingga mengikis lapisan atas dan menyebabkan longoran hilir. Rembesan (*seepage*) yang membawa material yaitu *internal erosion* atau yang dikenal dengan istilah *piping* dapat mengakibatkan keroposnya tubuh bendungan

yang juga dapat berakibat keruntuhan bendungan. Pertimbangan desain untuk mengantisipasi terjadinya *piping* sangat kompleks, karena harus mempertimbangkan distribusi butiran dari material timbunan maupun material tanah dasarnya.

Adanya kemungkinan bendungan mengalami kegagalan menyebabkan pengelola bendungan menerapkan sejumlah aturan. Salah satunya melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 27 Tahun 2015 tentang Bendungan. Aturan tersebut telah memuat tentang konsepsi keamanan bendungan yang terdiri dari keamanan struktur, operasi pemeliharaan pemantauan, dan kesiapsiagaan tindak darurat. Keamanan struktur terdiri dari serangkaian pelaksanaan pembangunan yang sesuai dengan aturan yang ada untuk meminimalisir resiko kegagalan struktur. Operasi pemeliharaan pemantauan dilakukan dalam rangka memfungsikan bendungan sesuai peruntukannya serta menjaga agar bendungan dapat beroperasi sesuai dengan yang direncanakan. Disusunnya dokumen kesiapsiagaan tindak darurat merupakan bentuk kesiapan pengelola bendungan dalam menghadapi kemungkinan terburuk dari bendungan, yaitu ketika bendungan mengalami keruntuhan.

Keruntuhan bendungan dapat menyebabkan banjir dengan kecepatan tinggi. Kondisi ini juga akan meningkatkan pergerakan sedimen dan puing-puing sehingga akan membuat daya hancur yang besar (George & Nair, 2015). Sebagai akibat dari keruntuhan bendungan, maka parameter banjir yang harus diperhitungkan adalah luas area yang terdampak banjir, kedalaman puncak banjir, waktu tiba gelombang banjir, dan waktu tiba puncak banjir. Karena besarnya volume air dan tingginya elevasi permukaan air di waduk maka waktu tiba gelombang relatif sangat cepat sehingga waktu yang tersedia untuk memberikan peringatan dini ke daerah hilir sangat pendek.

Besarnya dampak keruntuhan bendungan ini membuat studi tentang kegagalan bendungan dilakukan. Terdapat beberapa studi yang membahas tentang kegagalan bendungan diantaranya adalah Keruntuhan Bendungan Thenmala, India (Anila & Nair, 2015). Studi ini tidak membahas mengenai penyebab dari, akan tetapi lebih menganalisis banjir yang ditimbulkan ketika terjadi keruntuhan

bendungan. Variabel yang diteliti meliputi *reservoir routing*, waktu banjir, dan elevasi (kedalaman banjir). Penelitian lain tentang keruntuhan bendungan juga dilakukan pada Bendungan Tugu (Purwanto, Juwono, & Asmaranto, 2017) dan Bendungan Gondang (Aryadi, Juwono, Priyantoro, & Asmaranto, 2014). Studi keruntuhan bendungan dilakukan menggunakan software *Zhong Xing* dengan pemicu keruntuhan bendungan yaitu *overtopping* dan *piping*, akan tetapi tidak membahas tentang dimensi yang dihasilkan. Pada penelitian ini telah digunakan data spasial berupa peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dan DEM, sehingga pada penelitian ini dihasilkan peta genangan banjir, waktu datang banjir, waktu surut banjir dan hidrograf banjir. Penelitian tentang dimensi keruntuhan bendungan dilakukan oleh Froehlich (2008) yang meneliti tentang parameter keruntuhan bendungan pada bendungan urugan. Penelitian ini merupakan penyempurnaan dari penelitian Froehlich sebelumnya di tahun 1993 dan dihasilkan dari identifikasi 74 kegagalan bendungan urugan. Penelitian ini menghasilkan formulasi perhitungan dimensi keruntuhan bendungan yang terdiri dari lebar dan kemiringan, serta waktu deformasi keruntuhan bendungan. Penelitian froehlich ini juga telah digunakan Bruner (2014) yang menerangkan proses keruntuhan bendungan pada software HEC-RAS.

Dari literatur di atas, maka dapat disimpulkan penelitian genangan banjir akibat keruntuhan bendungan pada umumnya telah mempergunakan data spasial. Akan tetapi pertimbangan dimensi keruntuhan bendungan bendungan belum banyak dibahas. Oleh karena itu penelitian ini akan menganalisis genangan banjir akibat keruntuhan bendungan dengan parameter keruntuhan bendungan mengikuti formulasi Froehlich (2008). Mode kegagalan bendungan yaitu *overtopping* dan *piping*. Terdapat 4 skenario yang akan diteliti pada penelitian ini, yaitu genangan banjir akibat keruntuhan bendungan dengan mode kegagalan *overtopping*, *piping* pada lokasi tubuh bendungan bagian atas, *piping* di tubuh bendungan bagian tengah dan *piping* di tubuh bendungan bagian bawah. Variabel yang diteliti meliputi persebaran banjir, waktu tiba banjir, kedalaman banjir, dan kecepatan banjir.

Objek penelitian yaitu Bendungan Way Sekampung yang merupakan bendungan baru yang berada di Kabupaten Pringsewu. Bendungan dengan tipe urugan batu dengan volume tampungan mencapai 68 juta m³ ini dipilih volume bendungan yang besar dan letaknya yang tidak jauh dari pemukiman.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana kalibrasi model yang disusun terhadap debit penelusuran lapangan?
2. Berapa luas area yang terdampak banjir pada keruntuhan bendungan berdasarkan variasi *piping* dan *overtopping*?
3. Bagaimana hubungan antara variasi *piping* terhadap luas genangan?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menghitung hasil kalibrasi model terhadap debit penelusuran lapangan;
2. Menganalisis luas area yang terdampak banjir pada kasus keruntuhan bendungan akibat *piping* dan *overtopping*;
3. Menganalisis hubungan antara variasi *piping* terhadap luasan genangan;

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yaitu pertimbangan dalam mitigasi terjadinya kegagalan bendungan pada area yang terdampak serta pertimbangan pengembangan wilayah yang terdampak banjir akibat kegagalan bendungan.

1.5 Batasan Masalah Penelitian

Batasan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Penelitian ini hanya meneliti keruntuhan bendungan yang disebabkan *piping* dan *overtopping*;
2. Tidak memperhitungkan lateral inflow pada hilir bendungan;
3. Tidak memperhitungkan momentum yang terjadi ketika air melewati bangunan di hilir bendungan (jembatan, bendung, dll);

4. Lokasi genangan yang diteliti hanya terdiri dari 2 Kabupaten, yaitu Kabupaten Pringsewu dan Kabupaten Pesawaran;
5. Tidak mempertimbangkan kondisi sedimen di bendungan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Ketidakpastian proses terjadinya keruntuhan dan resiko yang ditimbulkan menjadikan penelitian tentang genangan banjir akibat keruntuhan bendungan menarik untuk diteliti. Penelitian persebaran banjir banyak dilakukan untuk mengetahui seberapa luas dampak yang ditimbulkan akibat aliran air dari kerusakan bendungan terhadap daerah di hilir. Beberapa penelitian yang berkaitan dengan penelitian ini antara lain:

1. Juwono (2001)

Juwono (2001) melakukan analisis penelusuran banjir akibat keruntuhan bendungan dengan objek 4 bendungan tunggal. Aplikasi yang digunakan pada penelitian ini berupa program BOSS DAMBRK yang menghasilkan informasi waktu tiba gelombang banjir, puncak banjir, dan kedalaman puncak banjir. Keandalan model diuji menggunakan nilai selang batas daerah kepercayaan distribusi uji-t. Adapun pada penelitian ini masih belum memperhitungkan topografi daerah yang terdampak banjir.

2. Aryadi, Juwono, Priyantoro, dan Asmaranto (2014)

Penelitian menganalisis menganalisis penelusuran banjir akibat keruntuhan bendungan yang dipicu oleh *piping* dan *overtopping*. Objek bendungan yaitu Bendungan Gondang yang merupakan bendungan dengan tipe urugan tanah. Simulasi dilakukan menggunakan aplikasi Zhong Xing HY21. Terdapat 4 skenario keruntuhan bendungan, yang terdiri dari *overtopping*, *piping* pada tubuh bendungan bagian bawah, tengah, dan atas. Pada penelitian ini belum mempertimbangkan dimensi rekahan.

3. Novan (2016)

Novan menganalisis hidrolika keruntuhan Bendungan Cipanas. Keruntuhan bendungan disebabkan oleh *piping* elevasi atas, tengah dan bawah. Pada penelitian ini peneliti membahas tentang parameter rekahan sesuai dengan

penelitian Froehlich (2008). Aplikasi yang digunakan yaitu Hecras dengan model 1D.

2.2 Bendungan Urugan Batu

Bendungan urugan batu merupakan bendungan yang elemen struktural utamanya terdiri dari batu. Dengangeli et.al. (2009) mendefinisikan bendungan urugan batu sebagai bendungan yang dibangun dari batu dan menahan tekanan air dengan beratnya. Jika material secara inheren tidak kedap air, maka bangunan akan dilapisi material kedap air atau memiliki inti kedap air.

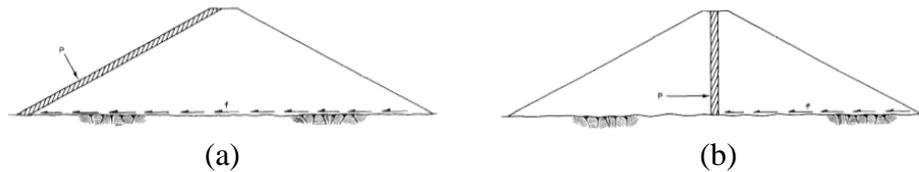
Bendungan urugan batu memiliki membran kedap yang digunakan sebagai penghalang air dan dapat ditempatkan baik dalam tubuh bendungan (membran internal) atau pada kemiringan hulu (membran eksternal). Material yang dapat digunakan sebagai membran antara lain tanah, beton, baja, beton aspal, dan kayu.

Secara ekonomis pembangunan bendungan urugan batu lebih mahal daripada bendungan urugan tanah. Akan tetapi bendungan urugan batu ini dapat dianggap layak dibangun pada kondisi sebagai berikut (Bureau of Reclamation , 1987):

1. Lokasi tempat pembangunan bendungan mempunyai ketersediaan batu besar yang cukup;
2. Bahan timbunan tanah sulit diperoleh atau memerlukan pemrosesan ekstensif sebelum digunakan;
3. Waktu pembangunan yang lebih cepat;
4. Kondisi iklim yang terlalu basah membatasi penempatan sejumlah material timbunan tanah;
5. Bendungan harus dibangun di lokasi tersebut.

Berdasarkan lokasi membran, bendungan urugan batu dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu: (1) inti pusat; (2) inti miring; (3) membran hulu. Setiap lokasi membran memiliki kelebihan dan kekurangan, yang bervariasi sesuai dengan jenis membran, bahan yang tersedia di lokasi, dan kondisi pondasi. Inti pusat dan inti miring merupakan membran internal, yang biasanya dibangun dari bahan-bahan tanah yang kedap air. Analisis ekonomi harus dilakukan untuk menentukan jenis

bahan yang digunakan dalam membangun membran, apakah itu internal atau eksternal. Jika membran internal dipilih, inti vertikal pusat dianjurkan. Jenis inti ini memberikan tekanan kontak maksimum dengan pondasi dan membutuhkan kontrol konstruksi yang kurang ketat dibandingkan dengan kemiringan inti (Bureau of Reclamation, 1987). Ilustrasi variasi bendungan urugan batu dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Bendungan Urugan Batu: (a) Membran Hulu; (b) Inti Tegak (Sumber: Bureau of Reclamation, 1987)

Keuntungan dari penggunaan membran internal yaitu area total kurang terkena air, grouting lebih pendek, dan perlindungan dari efek pelapukan dan kerusakan eksternal. Kelemahan utama dari membran internal adalah ketidakmampuan untuk menempatkan material batuan tanpa penempatan simultan bahan inti dan filter yang tidak tembus air, tidak dapat diaksesnya membran untuk inspeksi kerusakan, kesulitan dalam memperbaiki jika terjadi kerusakan, dan ketergantungan pada bagian bendungan yang lebih kecil untuk stabilitas terhadap geser (Bureau of Reclamation, 1987).

Tahap pembangunan pondasi pada bendungan urugan batu cukup krusial karena harus menghasilkan pondasi batuan yang keras dan tahan erosi batuan. Semua material yang terdapat retakan, patahan dan lubang yang dalam dapat terkikis. Sosrodarsono dan Takeda (1977) menjabarkan beberapa kelemahan bendungan urugan batu antara lain:

1. Bendungan tipe urugan tidak mampu menahan limpasan air di atas mercunya, sehingga limpasan yang terjadi akan mengakibatkan longsor pada lereng hilir sehingga bendungan menjadi hancur.
2. Karena tubuh bendungan terdiri dari timbunan tanah atau timbunan batu yang berkomposisi lepas, maka bahaya keruntuhan bendungan umumnya disebabkan oleh hal-hal sebagai berikut.

- a. Longsoran yang terjadi baik pada lereng hulu maupun lereng hilir tubuh bendungan;
- b. Terjadinya *piping* yang disebabkan gaya-gaya yang timbul dalam aliran;
- c. Terdapat konstruksi kaku pada tubuh bendungan. Konstruksi ini tidak terlalu disarankan karena tidak dapat mengikuti gerakan konsolidasi tubuh bendungan;
- d. Proses pelaksanaan pembangunan biasanya sangat peka terhadap pengaruh iklim.

Baik kelemahan pada poin 1 maupun 2 di atas dapat menyebabkan kerusakan bendungan yang sampai berakibat kegagalan bendungan. Oleh karena itu upaya mitigasi terhadap kegagalan bendungan harus dilakukan.

2.3 Kegagalan Bendungan

Kegagalan bendungan didefinisikan sebagai **keruntuhan sebagian** atau **seluruh bendungan** atau **bangunan pelengkap**nya dan/atau **kerusakan yang mengakibatkan tidak berfungsinya bendungan** (Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015). Kegagalan bendungan dapat menyebabkan banjir besar di hilir. Namun, belajar dari kejadian yang lalu, kehilangan nyawa dan kerusakan dapat dikurangi secara drastis jika manajemen krisis diperkirakan sebelumnya. Perkiraan ini dapat berupa sistem peringatan dini, komunikasi terorganisir dan langkah-langkah struktural (Gourbesville, Cunge, & Caignaert, 2012). Manajemen kritis keruntuhan bendungan juga dibuat oleh setiap pemilik bendungan yang tertera pada Dokumen Rencana Tindak. Kewajiban terhadap dokumen Rencana Tindak Darurat tercantum pada PUPR No. 27 Tahun 2015 (2015), yang salah satu isinya berupa studi tentang keruntuhan bendungan. +

Prediksi gelombang banjir yang disebabkan oleh kegagalan bendungan dipengaruhi oleh tingkat ketidakpastian yang cukup besar. Karena sifat ekstrim dari peristiwa semacam itu, model numerik sulit dikalibrasi dan divalidasi. Parameterisasi hambatan aliran dirancang untuk rentang sifat aliran yang berbeda secara signifikan dari yang terjadi selama aliran bendungan. Sejumlah besar puing juga dapat diangkut oleh aliran, dan rincian skenario kegagalan biasanya tidak

diketahui, seperti urutan pelepasan fragmen dinding bendungan atau waktu pembentukan patahan. Meskipun demikian, sebagian besar studi aliran bendungan sejauh ini telah dilakukan tanpa ketidakpastian sistematis atau analisis sensitivitas. Hal ini sebagian disebabkan oleh tingginya biaya komputasi dari model aliran multidimensi yang digunakan untuk mensimulasikan aliran bendungan pada topografi alami.

Analisis genangan banjir akibat keruntuhan bendungan terdiri dari 3 bagian, yaitu:

1. Estimasi hidrograf air yang keluar saat terjadinya keruntuhan bendungan;
2. Rute hidrograf bendungan melalui lembah hilir;
3. Estimasi ketinggian genangan dan dampaknya terhadap daerah hilir.

Outflow hidrograf banjir dari keruntuhan bendungan bergantung pada banyak faktor, seperti karakter fisik bendungan, volume tampungan dan penyebab kegagalan bendungan. Parameter yang mengontrol besarnya debit puncak dan bentuk hidrograf aliran meliputi dimensi penerobosan air; cara dan lamanya waktu untuk penerobosan air untuk berkembang; kedalaman dan volume air yang disimpan di reservoir; dan arus masuk ke reservoir pada saat kegagalan. Sedangkan bentuk, ukuran dan waktu pengembangan dari penerobosan air bergantung pada geometri bendungan, bahan konstruksi, dan penyebab kegagalan (Barker & Schaefer, 2007).

Terdapat berbagai macam penyebab keruntuhan bendungan. Fell dkk dalam Sargawi dan Junaidi (2013) telah melakukan riset yang berisi statistik kegagalan pada timbunan besar yang dalam penelitian ini dapat dijadikan dasar penyebab keruntuhan pada bendungan tipe urugan. Hasil penelitian tersebut menyatakan terdapat 2 penyebab utama keruntuhan bendungan dikarenakan *piping* (44%) dan *overtopping* (42%).

2.3.1 Proses Penerobosan

Proses penerobosan yang sering dianalisis adalah yang disebabkan *overtopping* atau erosi / perpindahan rembesan (*piping*). Mekanisme penerobosan karena *overtopping* bendungan dengan tanah non kohesif diawali pada titik dimana

tegangan geser traktif melebihi resistensi kritis yang menjaga material tetap pada tempatnya. Untuk tanah yang kohesif, pelanggaran terjadi dengan penggerusan. Biasanya, gerusan dimulai di dekat ujung hilir bendungan, dan kemudian naik ke hulu sampai puncak bendungan yang diterobos. Untuk tanggul granular, permukaan tergelincir dengan cepat karena rembesan yang ada di lereng hilir; dan karenanya bahan granular dihilangkan dengan cepat lapis demi lapis. Untuk tanah kohesif, tidak ada rembesan di lereng karena permeabilitas rendah. Oleh karena itu, erosi sering dimulai pada ujung tanggul dan bergerak ke hulu, melemahkan lereng dan pada gilirannya menyebabkan pemindahan sejumlah besar material karena kegagalan tarik atau geser tanah pada lereng yang terlalu jauh (Xu & Zhang, 2009).

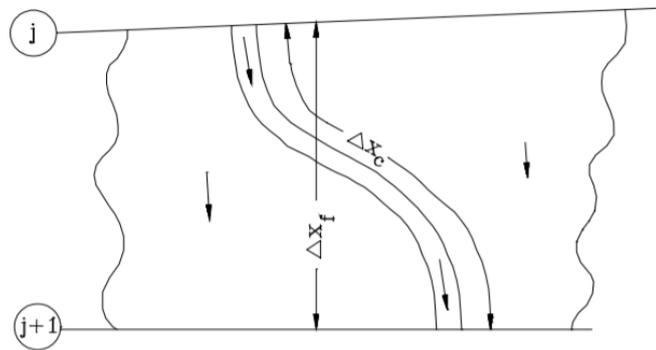
Kegagalan bendungan yang disebabkan oleh *piping* terjadi ketika air mengalir melalui celah atau retakan yang kemudian mengikis tanah dari dinding retakan. Terdapat empat fase dari proses *piping*, yaitu inisiasi, erosi yang terus menerus, pembentukan saluran baru, dan penerobosan air terbentuk (Xu & Zhang, 2009).

2.4 HEC-RAS

Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) merupakan *opensource software* yang dikembangkan oleh *Hydrologic Engineering Center's* (HEC). Empat komponen model aliran terdapat dalam HEC-RAS meliputi hitungan profil muka air aliran permanen (*steady flow*), simulasi aliran tak permanen (*unsteady flow*), hitungan transpor sedimen, serta analisis kualitas air (Istiarto, 2014).

Pada 1D komponen *unsteady flow*, hukum fisika yang mengatur aliran adalah: (1) prinsip kekekalan massa (kontinuitas), dan (2) prinsip kekekalan momentum. Hukum-hukum tersebut dinyatakan secara matematis dalam bentuk persamaan diferensial parsial, yang selanjutnya akan disebut sebagai persamaan kontinuitas dan momentum. Gambar 2.2 mengilustrasikan karakteristik dua dimensi dari interaksi antara saluran dan aliran dataran banjir. Saat air sungai naik, air bergerak ke samping menjauhi saluran, menggenangi dataran banjir dan mengisi area penyimpanan yang tersedia. Dengan bertambahnya kedalaman, dataran banjir

mulai mengalirkan air ke hilir secara umum sepanjang jalur yang lebih pendek dari saluran utama. Ketika tahapan sungai turun, air bergerak menuju saluran dari tepi sungai melengkapi aliran di saluran utama.



Gambar 2.2. Aliran Sungai dan Dataran Banjir (Sumber: Brunner, 2016)

Diakrenakan arah aliran diorientasikan di sepanjang saluran, bidang aliran dua dimensi ini seringkali dapat didekati secara akurat dengan representasi satu dimensi. Area genangan di luar saluran dapat dimodelkan dengan area penyimpanan yang bertukar air dengan saluran. Aliran di bantaran sungai dapat diperkirakan sebagai aliran melalui saluran terpisah. Masalah saluran / dataran banjir ini telah ditangani dengan berbagai cara. Pendekatan yang umum adalah mengabaikan pengangkutan bantaran sepenuhnya, dengan asumsi bahwa bantaran hanya digunakan untuk penyimpanan.

Persamaan 1D *unsteady flow* ini menggunakan pendekatan *implicit finite differences*, dan diselesaikan secara numerik menggunakan teknik iterasi Newton-Raphson. Model tersebut berhasil dan menghasilkan efek yang diinginkan dalam soal pengujian. Akan tetapi, osilasi numerik dapat terjadi ketika aliran pada satu node, yang membatasi *finite difference*, berada di dalam *banks* dan aliran di node lain tidak.

Aliran *unsteady* HEC-RAS menggabungkan tepian sungai kiri (*left banks*) dan tepian kanan (*right banks*) ke dalam kompartemen aliran tunggal yang disebut dataran banjir. Properti hidraulik untuk dataran banjir dihitung dengan menggabungkan elevasi permukaan sungai kiri dan kanan vs area, alat angkut, dan penyimpanan ke dalam satu set hubungan untuk bagian penampang dataran banjir.

Panjang jangkauan yang digunakan untuk area dataran banjir dihitung dengan mengambil rata-rata aritmatika panjang jangkauan tepian kiri dan kanan $(LL + LR) / 2 = LF$. Panjang jangkauan dataran banjir rata-rata digunakan dalam persamaan kontinuitas dan momentum untuk menghitung istilah masing-masing untuk kompartemen dataran banjir gabungan (tepi kiri dan kanan digabungkan bersama).

Pada *2D unsteady flow*, digunakan persamaan Navier-Stokes menggambarkan gerak fluida dalam tiga dimensi. Dalam konteks pemodelan saluran dan banjir, penyederhanaan lebih lanjut diterapkan. Salah satu persamaan yang disederhanakan adalah persamaan Air Dangkal atau *Shallow Water (SW)*. Aliran tidak dapat dimampatkan, kerapatan seragam dan tekanan hidrostatis diasumsikan dan persamaannya dirata-ratakan sehingga gerakan turbulen didekati dengan menggunakan viskositas pusaran. Diasumsikan juga bahwa skala panjang vertikal jauh lebih kecil daripada skala panjang horizontal. Akibatnya, kecepatan vertikal kecil dan tekanan bersifat hidrostatis, yang mengarah ke bentuk diferensial persamaan SW yang diturunkan pada bagian selanjutnya (Brunner, 2016).

Dalam beberapa aliran dangkal gradien tekanan barotropik (gravitasi) dan gesekan bawah adalah syarat dominan dalam persamaan momentum dan *unsteady*. Persamaan momentum kemudian menjadi bentuk dua dimensi dari Pendekatan Gelombang Difusi yang jika digabungkan dengan kekekalan massa akan menghasilkan satu model persamaan *Diffusive Wave Approximation of the Shallow Water (DSW)*. Selanjutnya, untuk meningkatkan waktu komputasi, pendekatan batimetri sub-grid dapat digunakan. Ide di balik pendekatan ini adalah dengan menggunakan grid komputasi yang relatif kasar dan informasi skala yang lebih halus tentang topografi yang mendasarinya. Persamaan kekekalan massa didiskritkan menggunakan teknik *finite volume*. Detail grid halus difaktorkan sebagai parameter yang mewakili beberapa integral atas volume dan area muka. Selanjutnya, transportasi massa fluida menghitung topografi skala halus di dalam setiap sel diskrit (Brunner, 2016).

2.5 Kombinasi Model 1D 2D Pada HEC-RAS

HEC-RAS memungkinkan adanya kombinasi model 1D dan 2D untuk melakukan penelusuran aliran. HEC-RAS mampu dipergunakan dalam (Brunner & dkk, 2015):

1. model 1D, 2D dan kombinasi 1D dan 2D;
2. Persamaan *full saint venant* atau *diffusion wave* pada 2D;
3. Algoritma implisit *Finite Volume Solution*;
4. Algoritma solusi pasangan 1D dan 2D;
5. *Unstructured* dan *Structured Computational Meshes*. Software ini dapat digunakan untuk mesh terstruktur dan tidak terstruktur;
6. Memetakan area genangan dan animasi dapat dijalankan menggunakan RAS Mapper;
7. Komputasi *2D Flow Area* telah diprogram untuk memanfaatkan multi-prosesor pada komputer (disebut sebagai paralelisasi).

Fungsi *2D Area* pada HEC-RAS memungkinkan adanya gabungan aliran 2D, dengan koneksi fleksibel ke elemen 1D, serta kondisi batas yang terhubung langsung. HEC-RAS akan secara langsung melakukan komputasi aliran 1D dan 2D sesuai *time step*. Proses ini memungkinkan perhitungan hidraulik yang lebih akurat untuk transfer aliran antara elemen 1D dan 2D. Kemampuan pemodelan 2D dalam HEC-RAS dibangun dari bawah (permukaan tanah) ke atas untuk diintegrasikan langsung ke dalam *unsteady flow* HEC-RAS (Brunner & dkk, 2015).

Algoritma model 1D dan 2D secara bersamaan digabungkan dan dimungkinkan terjadi peralihan antara aliran 1D dan 2D. Misalnya, pertimbangkan sungai yang dimodelkan dalam 1D dengan area di belakang tanggul yang dimodelkan dalam 2D (terhubung secara hidrolis dengan struktur lateral). Aliran di atas tanggul (struktur lateral) dan / atau melalui setiap tanggul tanggul dihitung dengan *headwater* dari sungai 1D dan *tailwater* dari *2D flow area* yang terhubung. Persamaan bendungan digunakan untuk menghitung aliran di atas tanggul dan melalui rekahan. Setiap langkah persamaan weir menggunakan hasil 1D dan 2D untuk menghitung aliran yang memungkinkan penghitungan yang akurat dari genangan bendung, pada setiap langkah waktu, ketika area interior terisi. Selain itu,

aliran dapat kembali menembus batas (dari area 2D ke 1D), begitu sungai mulai reda.

2.6 HEC-RAS untuk Simulasi Keruntuhan Bendungan

Pengembangan aplikasi HEC-RAS telah dilakukan sehingga dengan komponen model yang dimiliki dapat melakukan simulasi aliran sungai atau saluran, termasuk pemodelan genangan banjir akibat keruntuhan bendungan. Akurasi hasil simulasi yang ditampilkan oleh HEC-RAS ini akan sangat dipengaruhi oleh data terain dan data hidrologi yang digunakan sebagai kondisi batas. Selain itu, parameter model yang sesuai untuk kekasaran *terrain* dan struktur hidraulik harus diperkirakan dan kemudian dikalibrasi agar memiliki kepercayaan pada hasil model.

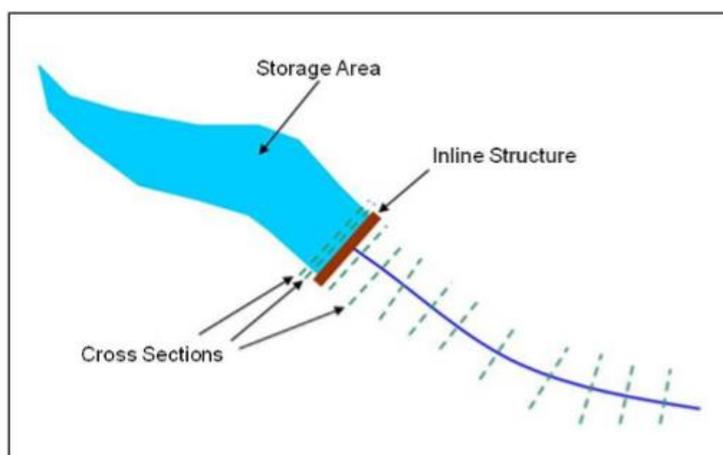
HEC-RAS dapat digunakan untuk menganalisis hidrograf banjir yang masuk melalui reservoir melalui metode *Saint Venant*, *Diffusion Wave*, atau dengan *pool routing*. Secara umum, *unsteady flow* akurat untuk skenario dengan atau tanpa pelanggaran. *Unsteady flow* dapat menggambarkan kemiringan permukaan air melalui kolam ketika hidrograf masuk tiba, serta perubahan kemiringan permukaan air yang terjadi selama pelanggaran bendungan. Reservoir dengan bentuk memanjang akan menunjukkan kemiringan permukaan air yang lebih besar di hulu bendungan dari pada reservoir yang lebar dan pendek. Oleh karena itu, teknik pemodelan yang paling akurat untuk menangkap ketinggian dan luapan kolam reservoir sempit yang panjang adalah *full dynamic wave (unsteady flow)* (Brunner, 2014).

Perutean *full dynamic wave (unsteady flow)* yang melalui reservoir merupakan metode yang paling akurat dan direkomendasikan untuk digunakan dalam pemodelan keruntuhan bendungan. Terdapat 2 dalam metode *full dynamic wave*, yaitu dengan membuat *cross section* di sepanjang reservoir atau membuat kolam reservoir sebagai satu aliran dua dimensi. Selanjutnya bendungan dimodelkan dengan opsi *inline structure*.

Pada pemodelan reservoir menggunakan *cross section*, kerusakan bendungan akan menyebabkan daerah hulu tidak lagi tergenang dan hanya seperti

sungai normal. Jika hidrograf masuk mengalir ke aliran sangat rendah, dimungkinkan terjadi ketidakstabilan model yang dihasilkan dari kombinasi aliran rendah dan geometri saluran yang tidak teratur. Salah satu cara untuk mengatasi hal ini adalah dengan meningkatkan aliran dasar pada resesi hidrograf hulu. Pendekatan lain adalah untuk menghaluskan segala penyimpangan utama dalam saluran terbalik untuk penampang hulu bendungan.

Pada teknik *level pool routing*, area pool dimodelkan dengan area penyimpanan (*storage area*), dimana area ini terhubung ke aliran sungai hilir yang harus memiliki *cross section* yang ada di dalam reservoir. Ilustrasi pemodelan menggunakan *level pool routing* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.3. Ilustrasi pemodelan *level pool routing* (Sumber: Brunner, 2014)

Cross section pertama dalam jangkauan diikat ke *storage area* oleh fakta bahwa itu akan selalu memiliki ketinggian permukaan air yang sama selama perhitungan. Bendungan dimodelkan sebagai struktur sebaris, yang membutuhkan satu bagian melintang hulu dari struktur sebaris. Namun, penampang hulu dari struktur sebaris terikat dengan kondisi batas struktur sebaris, dan itu tidak bisa menjadi penampang pertama dari jangkauan. Karena keterbatasan ini dalam HEC-RAS, hasilnya adalah bahwa model harus memiliki dua penampang hulu dari struktur inline satu penampang untuk koneksi ke area penyimpanan, dan penampang kedua untuk kondisi batas struktur inline. Kedua penampang hulu harus mewakili daerah *reservoir*.

2.6.1 Karakteristik Pelanggaran Bendungan

Parameter terjadinya pelanggaran bendungan seperti lokasi, dimensi dan waktu terjadinya pelanggaran merupakan hal yang krusial dalam penilaian resiko bendungan. Parameter pelanggaran akan secara langsung mempengaruhi estimasi aliran puncak yang keluar dari bendungan serta kemungkinan waktu peringatan untuk lokasi hilir. Akan tetapi, parameter tersebut seringkali menjadi informasi yang paling tidak pasti dalam analisis kegagalan bendungan. Langkah awal yang dilakukan untuk menganalisis keruntuhan bendungan yaitu dengan memperkirakan karakteristik pelanggaran tersebut. Setelah karakteristik pelanggaran diperkirakan, maka HEC-RAS dapat digunakan untuk menghitung hidrograf arus keluar dari pelanggaran sampai dengan hilir. Karakteristik pelanggaran bendungan dapat diperkirakan dengan berbagai cara diantaranya:

- a. analisis komparatif : membandingkan bendungan yang diteliti dengan bendungan lain yang mengalami kegagalan atau penelitian lain;
- b. persamaan regresi : persamaan yang dikembangkan dari kegagalan bendungan historis untuk memperkirakan luapan puncak atau ukuran pelanggar dan waktu;
- c. model komputer berbasis fisik : *software* yang mencoba memodelkan proses pelanggaran fisik dengan menggunakan transportasi sedimen / persamaan erosi, mekanika tanah, dan prinsip-prinsip hidrolika.

Penelitian tentang parameter rekahan bendungan dilakukan Frehlich (2008) yang melakukan analisis keruntuhan bendungan pada

Parameter rekahan bendungan mengikuti formula yang dikeluarkan oleh Frehlich (2008)

$$\bar{B} = 0,27K_0.V_w^{0,32}.H_b^{0,04} \quad (2.1)$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{v_w}{gh_b^2}} \quad (2.2)$$

$$B_t = \bar{B} + zH_b \quad (2.3)$$

$$B_t = \bar{B} - zH_b \quad (2.4)$$

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

t_f = waktu formasi rekahan (detik)

V_w = volume waduk saat keruntuhan (m^3)

H_b = tinggi rekahan (m)

Z = kemiringan rekahan (H:V)

B_t = lebar rekahan pada puncak

B_b = lebar rekahan pada dasar

B_t = lebar rekahan pada puncak (m)

B_b = lebar rekahan pada dasar (m)

g = percepatan grafitasi

$K_{\text{overtopping}} = 1,3$

$K_{\text{piping}} = 1,0$

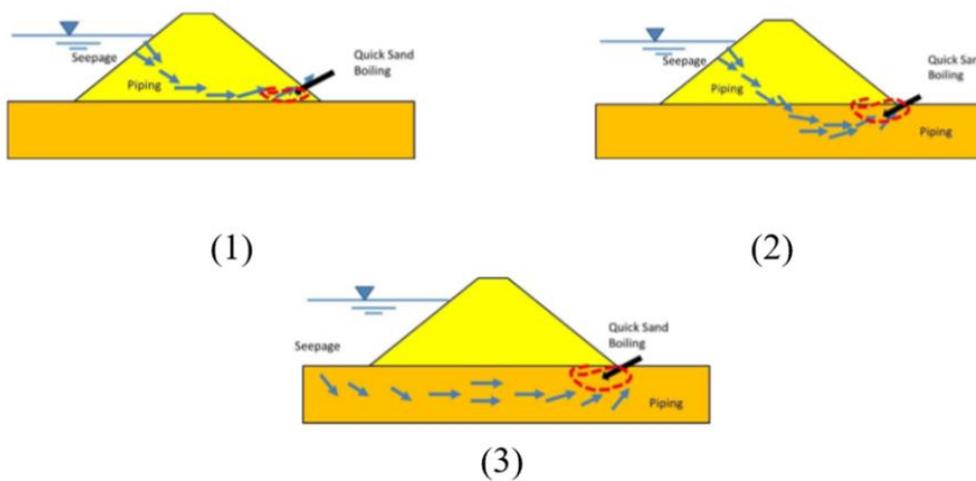
2.6.2 *Piping*

Terdapat beberapa istilah yang dipakai untuk menyebutkan istilah *piping* pada beberapa literatur, yaitu erosi buluh (PT. Indra Karya, 2-16) dan sufosi (Sosrodarsono & Takeda, 1977). *Piping* didefinisikan sebagai proses yang terjadi akibat aliran air dalam tubuh bendungan yang terjadi terus menerus. Terdapat 4 kondisi yang harus terpenuhi agar terjadi *piping failure* (Sargawi & Junaidi, 2013) yaitu:

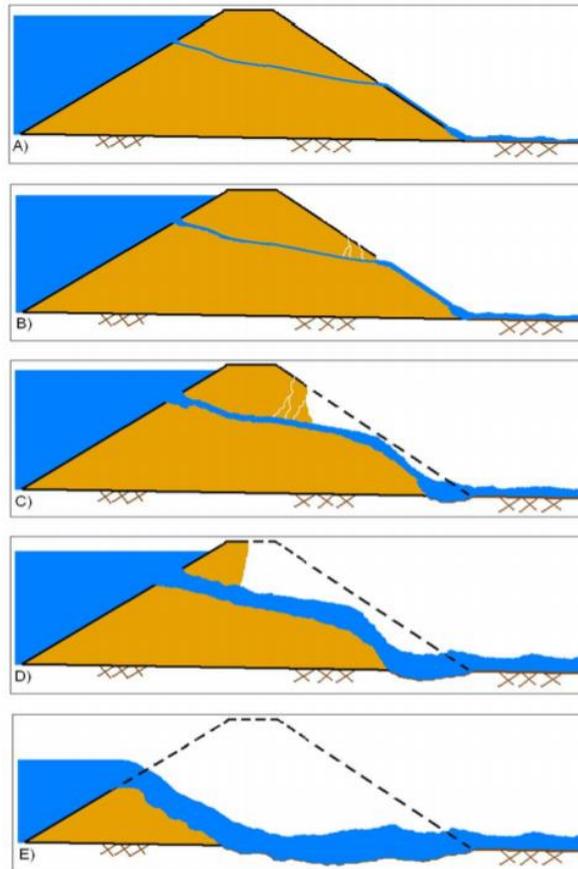
- a. ada aliran *seepage* dan sumber air,
- b. ada material yang mudah tergerus oleh air dan material ini mudah terbawa oleh air,
- c. tidak adanya perlindungan pada kaki bendungan untuk menghalangi material yang terbawa air tersebut agar tidak terbawa keluar,
- d. material bendungan tersebut mampu membentuk rongga dan bertahan terhadap aliran air yang lewat dibawahnya.

Daerah yang biasanya paling mudah terjadi kebocoran yaitu pada daerah kontak antara timbunan yang kedap air dengan tebing sungai. Oleh karena itu pada pembangunan bendungan disarankan agar penggalian untuk landasan inti tersebut pada tebing dan dasar sungai supaya dibuat berparit-parit agar kontak menjadi lebih luas dan tumpukan antara timbunan kedap air dengan alasnya lebih sempurna (Sosrodarsono & Takeda, 1977).

Gejala *piping* ada pada 3 bagian, yaitu terjadi di dalam tubuh bendungan, terjadi dari tubuh bendungan ke tanah pondasi, terjadi pada tanah pondasi (Gambar 2.4). Kehancuran bendungan akibat *piping* dapat disimulasikan dengan menentukan elevasi sumbu dari piping nya, dan disimulasikan sebagai rekahan lubang (*orifice*) berbentuk segi empat. Dilihat dari penampang melintang, Brunner (2014) menerangkan contoh proses terbentuknya rekahan yang dikarenakan *piping* seperti pada Gambar 2.5.



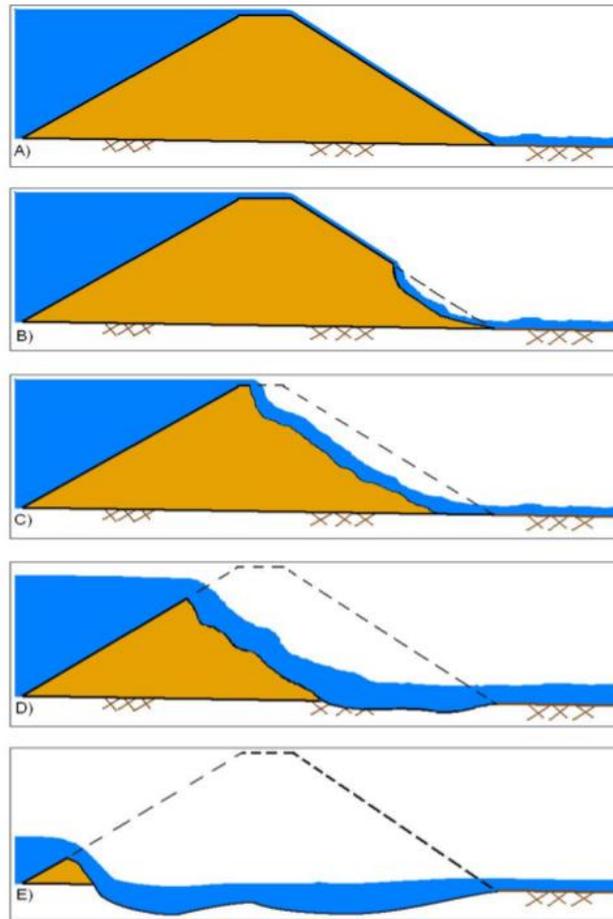
Gambar 2.4. Mekanisme piping pada tubuh bendungan. (1) dalam tubuh bendungan; (2) terjadi pada tubuh bendungan ke tanah pondasi; (3) terjadi pada tanah pondasi (Sumber : Sargawi & Junaidi, 2013)



Gambar 2.5. Proses keruntuhan bendungan akibat *piping* (Sumber: Brunner, 2014)

2.6.3 *Overtopping*

Overtopping pada bendungan merupakan kondisi terjadinya limpasan air di atas mercunya (Sjarief & Kodoatie, 2010) dan menggerus tubuh bendungan. Rekahan karena *overtopping* disimulasikan berbentuk segiempat, segitiga atau trapesium. Rekahan tersebut semakin lama semakin membesar secara progresif dari puncak ke bawah sampai mencapai podasi. Dilihat dari penampang melintang, Brunner (2014) menerangkan contoh proses terbentuknya rekahan yang dikarenakan *overtopping* seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Proses keruntuhan bendungan akibat *overtopping* (Sumber: Brunner, 2014)

2.7 Analisis Genangan

Model genangan banjir akibat keruntuhan bendungan perlu dilakukan sampai ke hilir bendungan untuk mengetahui seluruh area yang terkena dampak banjir. Selain itu, dapat juga digunakan sebagai dasar penyusunan rencana evakuasi penduduk. Penentuan genangan banjir dihitung menggunakan perhitungan aliran normal dan potongan melintang sungai. Persamaan Manning yang digunakan untuk koefisien kekasaran harus lebih besar dari 25% dari kondisi normal, dikarenakan adanya turbulensi dan kehilangan energi yang mungkin terjadi akibat gelombang banjir (Balai Bendungan, 2019).

Kategorisasi terhadap genangan banjir juga dapat dilakukan untuk klasifikasi tingkat bahaya banjir yang ditimbulkan. Wirustyastuko (2013) telah

melakukan klasifikasi daerah bahaya bencana berdasarkan tinggi genangan banjir, sesuai dengan sistem klasifikasi daerah bahaya yang dikeluarkan Direktorat Jenderal Sumber Daya Air pada Rencana Tindak Darurat Bendungan Tempuran tahun 2010. Adapun klasifikasi genangan banjir tersebut dapat dilihat pada Tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Klasifikasi Genangan Banjir

| Tinggi Genangan Banjir (m) | Klasifikasi Daerah Bahaya |
|----------------------------|---------------------------|
| 0 – 0,5 | 1 |
| 0,5 – 2 | 2 |
| >2 | 3 |

Sumber : Wirustyastuko (2013)

2.8 Analisis Hidrologi

Dalam siklus hidrologi, air hujan yang turun akibat dari penguapan air dipermukaan bumi sebagian akan mengalir melalui permukaan bumi ke arah horisontal sebagai limpasan (*run off*). Sebagian lagi akan bergerak secara vertikal, meresap kedalam tanah untuk nantinya akan keluar lagi menuju kepermukaan sebagai sumber mata air ataupun sebagai sungai bawah tanah, sedangkan sisanya akan menguap lagi menuju atmosfer. Air yang terinfiltrasi ke tanah mula-mula akan mengisi pori-pori tanah sampai mencapai kadar air jenuh. Apabila kondisi tersebut telah tercapai, maka air tersebut akan bergerak dalam dua arah, arah horisontal sebagai interflow dan arah vertikal sebagai perkolasi.

Analisis hidrologi diperlukan untuk untuk memperoleh besarnya debit banjir rencana. Debit banjir rencana merupakan debit maksimum rencana di sungai atau saluran alamiah dengan periode ulang tertentu yang dapat dialirkan tanpa membahayakan lingkungan sekitar dan stabilitas sungai. Untuk mendapatkan debit rencana tersebut dapat dengan cara melakukan pengamatan dan pengukuran langsung di lokasi sungai ataupun dengan menganalisis data curah hujan maksimum pada stasiun-stasiun pengukuran hujan yang berada di Daerah Aliran

Sungai tersebut. Dari data hidrologi yang ada (letak stasiun penakar hujan, curah hujan dan klimatologi) tahapan selanjutnya adalah analisa data hidrologi.

Tahapan analisis hidrologi untuk menghitung debit PMF menurut (Direktorat Bina Teknik Direktorat Jenderal Sumber Daya Air , 1999), adalah sebagai berikut:

1. Pengolahan Data Hujan, meliputi penyaringan atau pemeriksaan data dengan cara manual dan statistik serta pengisian data hilang;
2. Menghitung hujan rata-rata dengan poligon thiessen atau isohyet;
3. Analisis frekwensi hujan rata-rata dengan menggunakan cara distribusi Gumber, Log Pearson type III dan Log Normal;
4. Pemeriksaan kecocokan untuk memilih metode distribusi yang paling cocok dengan metode *Chisquare* dan *Kolmogorov Smirnov*;
5. Menetapkan besar koefisien reduksi dari analisis DAD (*Depth Area Duration*) atau dari kurva koefisien reduksi PSA 007;
6. Hitung curah hujan dari analisis frekwensi dikalikan dengan koefisien reduksi. Curah hujan ini merupakan curah hujan yang dicari;
7. Menghitung analisis curah hujan maksimum Boleh Jadi (CMB) atau *Probable Maximum Precipitation* (PMP).

2.8.1 Konsistensi Data Hujan

Uji konsistensi dilakukan untuk mengetahui apakah data yang digunakan telah konsisten atau tidak. Data yang tidak konsisten dapat terjadi karena pemindaan lokasi stasiun hujan, gangguan lingkungan, kerusakan instrumentasi, ketidaksesuaian prosedur pengukuran. Konsisi tersebut dapat menyebabkan perubahan terhadap nilai data hujan yang tercatat, sehingga akan mempengaruhi kualitas data yang dihasilkan dari pengolahan data.

Kesalahan pengamatan data hujan tidak dapat ditentukan dari setiap data pengamatan. Oleh karena itu dibutuhkan data curah hujan dalam waktu yang panjang untuk dibandingkan dengan data rata-rata sekelompok alat-alat ukur dalam periode yang sama. Metode yang dapat digunakan untuk menguji konsistensi data ini yaitu metode kurva massa ganda (*double mass curve*) (Sosrodarsono & Takeda,

1976). Searcy dan Hardison (1960) menyatakan bahwa metode kurva masa ganda dapat dipakai untuk mengukur konsistensi dari data hidrologi dengan cara membandingkan dengan pola data lain dari beberapa stasiun lain yang ada di kawasan tersebut.

Prosedur yang digunakan untuk melakukan uji konsistensi data ini adalah menggunakan analisa kurva massa ganda sebagai berikut :

- 1) Menghitung hujan tahunan untuk masing–masing stasiun.
- 2) Menghitung rata-rata hujan tahunan untuk stasiun pembanding.
- 3) Menghitung kumulatif hujan tahunan untuk stasiun yang akan diuji.
- 4) Menghitung kumulatif hujan tahunan untuk stasiun pembanding.
- 5) Melakukan penggambaran dalam bentuk diagram pencar (scatter diagram) antara stasiun yang akan diuji dan stasiun pembanding, Stasiun yang akan diuji pada sumbu Y dan stasiun pembanding pada sumbu X.
- 6) Melakukan analisa terhadap konsistensi data hujan dengan cara membuat garis lurus pada diagram pencar dan melakukan analisa menentukan apakah ada perubahan slope atau tidak pada garis lurus yang dibuat pada diagram pencar, jika terjadi perubahan *slope*, maka pada titik setelah mengalami perubahan perlu adanya koreksi terhadap pencatatan data hujan dengan cara mengalikan dengan koefisien (K) yang dihitung berdasarkan perbandingan slope setelah mengalami perubahan (S2) dan *Slope* sebelum mengalami perubahan (S1) atau $K = S2/S1$.

Pengujian dengan metode ini akan memberikan hasil yang baik, jika dalam suatu DAS terdapat banyak stasiun hujan, karena dengan jumlah stasiun hujan yang banyak akan memberikan nilai rata-rata hujan tahunan sebagai pembanding terhadap stasiun yang di uji lebih dapat mewakili secara baik. Oleh karena itu jumlah minimal stasiun hujan untuk pengujian ini adalah 3 stasiun hujan dan jika hanya terdapat 2 stasiun hujan atau bahkan 1 stasiun hujan, maka tidak dapat dilakukan pengujian konsistensi data hujan dan oleh karenanya kita asumsikan bahwa data yang ada adalah konsisten.

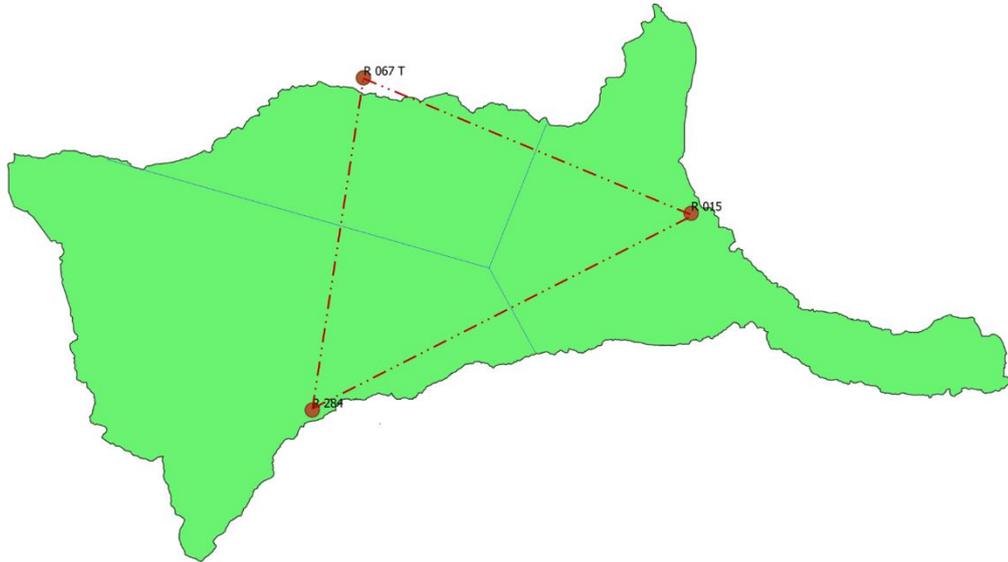
2.8.2 Analisis Curah Hujan Rata-rata

Terdapat banyak metode yang dapat digunakan untuk melakukan analisis curah hujan rata-rata pada suatu DAS. Tiga metode yang umum dipakai yaitu cara rata-rata aljabar (aritmatik), metode poligon thiessen, dan isohyet. Metode rata-rata aljabar merupakan metode paling sederhana. Metode ini dapat digunakan pada kawasan yang datar, untuk DAS dengan titik pengamatan (stasiun hujan) tersebar secara merata pada lokasi yang mewakili. Metode thiessen dipakai jika stasiun hujan dalam daerah itu tidak tersebar merata. Perhitungan metode thiessen adalah dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh tiap titik pengamatan. Sedangkan metode isohyet dapat dihitung menggunakan peta isohyet. Tata cara perhitungan yaitu dengan menggambar pada peta topografi dengan interval 10 – 20 mm berdasarkan data curah hujan pada stasiun hujan di dalam dan di sekitar lokasi studi. Cara ini merupakan cara rasional yang terbaik jika garis isohyet dapat digambar dengan teliti. Akan tetapi jika stasiun hujan yang dianalisis banyak dan variasi curah hujan besar, maka pembuatan peta ini rentan terjadi kesalahan (Sosrodarsono & Takeda, 1976).

Mempertimbangkan penggunaan dari masing-masing metode, maka metode analisis curah hujan rata-rata yang dipilih yaitu Metode Thiessen. Cara ini memperhitungkan luas daerah yang mewakili dari pos-pos hujan yang bersangkutan, untuk digunakan sebagai faktor bobot dalam perhitungan curah hujan rata-rata. Penentuan bobot dilakukan dengan menggambarkan dalam suatu gambar poligon yang dikenal dengan istilah poligon thiessen, yang disajikan pada Gambar 2.3. Cara membuat poligon thiessen yaitu dengan (Sosrodarsono & Takeda, 1976):

1. Mencantumkan titik stasiun hujan pada lokasi studi;
2. Menghubungkan tiap titik yang berdekatan dengan sebuah garis lurus sehingga tergambar garis segitiga yang menutupi seluruh daerah (pada Gambar 2.3 digambarkan dengan Garis putus-putus berwarna merah);
3. Daerah studi dibagi dalam poligon-poligon yang didapat dengan menggambar garis bagi tegak lurus pada tiap sisi segitiga sampai terjadi perpotongan (pada Gambar 2.7 diilustrasikan dengan dengan garis biru).

4. Hapus garis yang dibuat pada poin 2. Luasan daerah yang terpengaruh masing-masing pos hujan dapat terlihat dari bentukan garis biru.



Gambar 2.7. Pembuatan Poligon Thiessen

Selanjutnya bobot dapat dilakukan dengan rumus 2.5.

$$\bar{R} = R_1 W_1 + R_2 W_2 + R_3 W_3 \dots + R_n W_n \quad (2.5)$$

Dimana :

\bar{R} = curah hujan rata-rata (mm)

R_1 = besarnya curah hujan pada masing-masing stasiun hujan (mm)

W = faktor bobot masing-masing stasiun (%)

2.8.3 Analisa Curah Hujan Rencana

Hujan rencana merupakan kemungkinan tinggi hujan yang terjadi dalam kala ulang tertentu sebagai hasil dari suatu rangkaian analisis hidrologi yang biasa disebut analisis frekuensi. Secara sistematis metode analisis frekuensi perhitungan hujan rencana ini dilakukan secara berurutan sebagai berikut :

a. Parameter Statistik

Parameter yang digunakan dalam perhitungan analisis frekuensi meliputi parameter nilai rata-rata (\bar{X}), deviasi standar (Sd), koefisien variasi (Cv), koefisien kemiringan / skewness (Cs) dan koefisien kurtosis (Ck). Sementara untuk memperoleh harga parameter statistik dilakukan perhitungan dengan rumus dasar sebagai berikut (Soemarto, 1999) :

$$\bar{X} = \frac{\sum Rx}{n} \quad (2.6)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.7)$$

Dimana :

- \bar{X} = Rata-rata curah hujan harian maksimum selama n tahun (mm)
- $\sum Rx$ = Jumlah hujan harian maksimum selama n tahun (mm)
- X_i = Tinggi curah hujan tahun ke-i (mm)
- n = Jumlah tahun pencatatan data hujan
- Sd = Deviasi Standart

2.8.4 Analisis Hujan Maksimum Boleh Jadi (BMB)

Analisis hujan maksimum boleh jadi dilakukan untuk menghitung kemungkinan banjir maksimum. Rumus operhitungan hujan maksimum boleh jadi (BMB) mengikuti formulasi Hersfield seperti yang dijabarkan berikut ini:

$$X_m = \bar{X}_p + K_m \cdot S_p \quad (2.8)$$

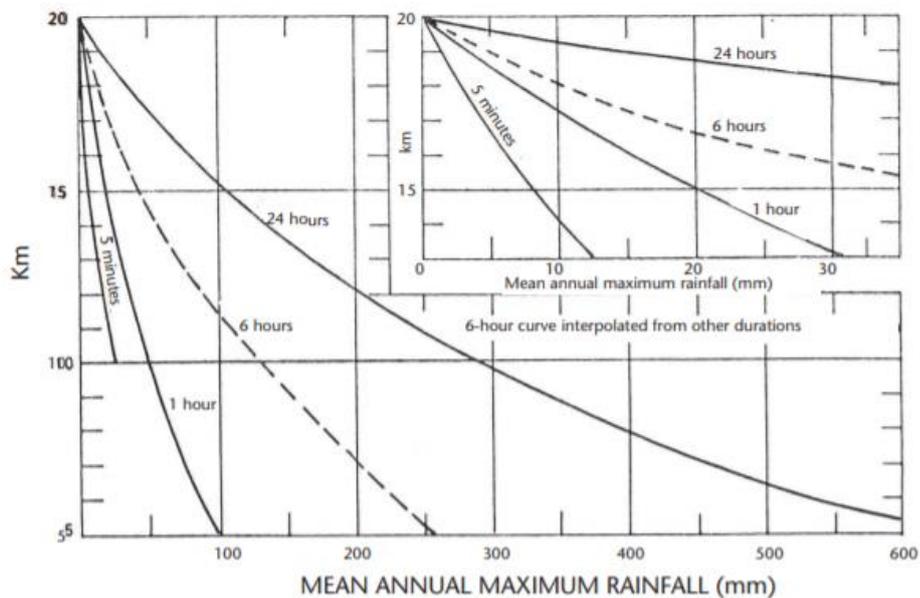
$$\bar{X}_p = X_n \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2.9)$$

$$S_p = S_n \cdot f_3 \cdot f_4 \quad (2.10)$$

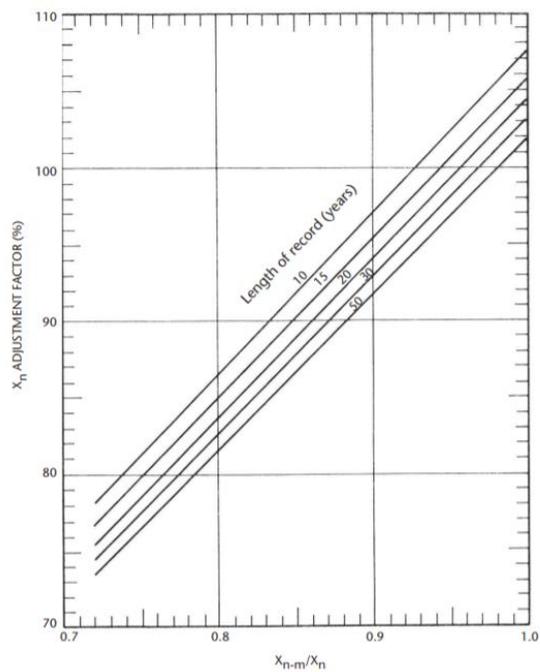
Dimana :

- X_m = nilai CMB (mm)
- \bar{X}_p = rata-rata seri hujan harian maksimum tahunan yang dikalikan faktor penyesuaian
- K_m = Nilai fungsi dari durasi hujan dan rata-rata hujan harian maksimum tahunan

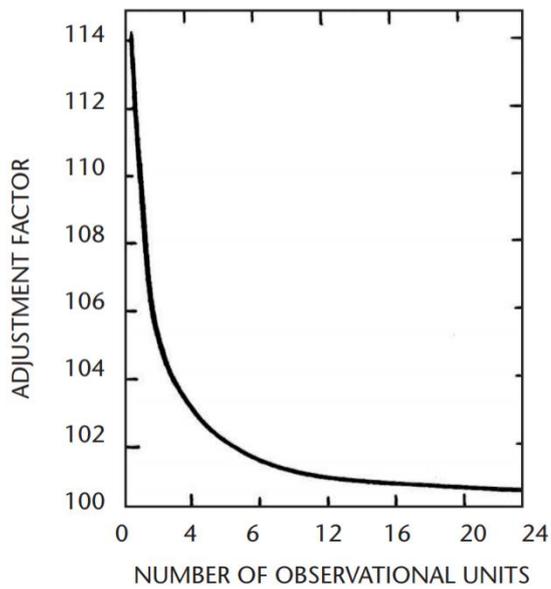
- S_p = Simpangan baku dari seri data hujan dan rata-rata hujan harian maksimum tahunan (Grafik pada Gambar 2.8)
- \bar{X}_n = Rata-rata hujan harian maksimum tahunan (mm)
- S_n = Simpangan baku hujan harian maksimum tahunan yang dikalikan faktor penyesuaian (mm)
- f_1 = faktor penyesuaian rata-rata terhadap pengamatan maksimum (Gambar 2.9)
- f_2 = faktor penyesuaian rata-rata terhadap panjang data (Gambar 2.10)
- f_3 = faktor penyesuaian simpangan baku terhadap pengamatan maksimum (Gambar 2.11)
- f_4 = faktor penyesuaian simpangan baku dan curah hujan rata-rata maksimum terhadap panjang data (Gambar 2.12)



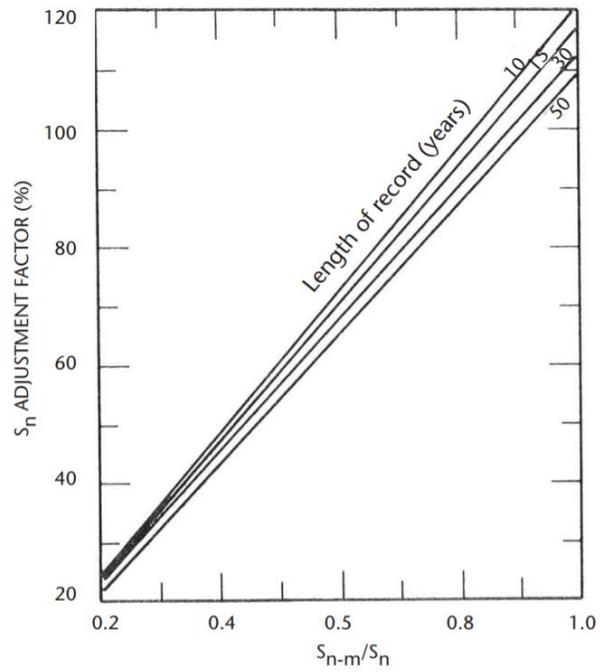
Gambar 2.8. Grafik untuk menentukan nilai Km (Sumber: WMO, 2009)



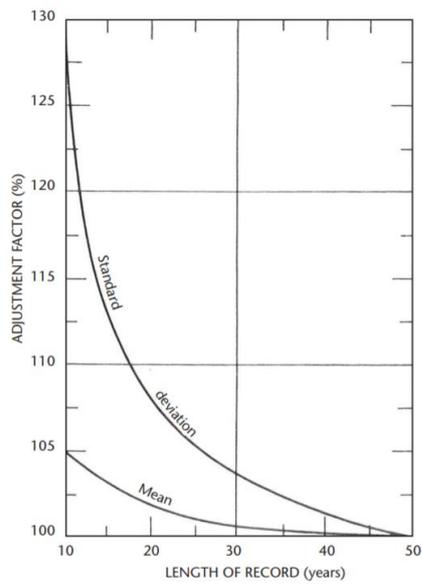
Gambar 2.9. Grafik penyesuaian curah hujan rata-rata (f_1) (Sumber: WMO, 2009)



Gambar 2.10. Grafik Jumlah Data Pengamatan (f_2) (Sumber: WMO, 2009)



Gambar 2.11. Faktor penyesuaian simpangan baku (f_3) (Sumber: WMO, 2009)



Gambar 2.12 Faktor penyesuaian (f_4) (Sumber: WMO, 2009)

2.8.5 ARF

Rumus faktor reduksi DAS Bendungan Way Sekampung untuk mendapatkan koefisien C dapat diformulasikan seperti rumus ARF (Badan Standarisasi Nasional, 2016) :

$$ARF = 1.152 - 0.1233 * \text{LOG}(A) \quad (2.11)$$

Dimana : ARF = *Area Reduction Factor* (Faktor reduksi DAS)

$$A = \text{Luas DAS (km}^2\text{)}$$

2.8.6 Curah Hujan Efektif

Hujan efektif adalah besarnya hujan total yang menghasilkan limpasan langsung (*direct run-off*), yang terdiri dari limpasan permukaan (*subsurface run-off*) dan limpasan bawah (*subdirect run-off*).

$$R_{eff} = C \times R_t \quad (2.12)$$

Dimana :

$$R_t = \text{Curah hujan rencana (mm)}$$

$$C = \text{Koefisien pengaliran}$$

$$R_{eff} = \text{Hujan efektif (mm)}$$

Koefisien pengaliran mempunyai nilai yang berbeda-beda, dipengaruhi oleh topografi daerah pengaliran, perbedaan penggunaan tanah, dll. Pada Tabel 2.2 disajikan tabel koefisien pengaliran Mononobe.

Tabel 2.2 Tabel Koefisien Pengaliran Mononobe

| Kondisi Daerah Pengaliran dan Sungai | Nilai C |
|--------------------------------------|-------------|
| Daerah pegunungan yang curam | 0,75 – 0,90 |
| Daerah pegunungan tersier | 0,70 – 0,80 |
| Tanah bergelombang dan hutan | 0,50 – 0,75 |
| Tanah dataran yang ditanami | 0,45 – 0,6 |
| Persawahan yang diairi | 0,70 – 0,80 |
| Sungai di daerah pegunungan | 0,75 – 0,85 |
| Sungai kecil di dataran | 0,45 – 0,75 |

| Kondisi Daerah Pengaliran dan Sungai | Nilai C |
|---|-------------|
| Sungai besar yang lebih dari setengah daerah pengalirannya terdiri dari dataran | 0,50 – 0,75 |

Sumber : Susrodarsono (1976)

Untuk menentukan Debit Banjir Rencana (*Design Flood*), perlu didapatkan harga suatu intensitas curah hujan terutama bila digunakan metode rasional.

Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada suatu kurun waktu di mana air tersebut berkonsentrasi. Analisis intensitas curah hujan ini dapat diproses dari data curah hujan yang telah terjadi pada masa lampau. Formulasi untuk menghitung intensitas curah hujan yang dapat digunakan yaitu rumus Mononobe, dimana rumus ini merupakan sebuah variasi dari rumus yang ditemukan Talbot tahun 1881, Sherman tahun 1905, dan Ishiguro tahun 1953, dimana rumus tersebut digunakan untuk perhitungan curah hujan jangka pendek. Sedangkan rumus yang dikemukakan Mononobe telah dapat menghitung intensitas hujan setiap waktu berdasarkan data curah hujan harian (Susrodarsono & Takeda, 1976). Rumus empiris Dr. Mononobe tersebut adalah sebagai berikut:

$$I = \frac{R_{24}}{tm} \left(\frac{tm}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.13)$$

$$R_t = t.R_T - (t-1).R_{(t-1)} \quad (2.14)$$

Dimana:

- I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
- R_t = Rata-rata hujan sampai jam ke (t)
- R₂₄ = Tinggi hujan dalam 24 jam
- R_T = Tinggi hujan pada jam ke T (mm)
- t = Waktu hujan (jam)
- R_(t-1) = Rata-rata hujan selama (t-1)

2.8.7 Aliran Dasar

Aliran dasar (*baseflow*) merupakan komponen aliran sungai yang berasal dari curah hujan yang tersimpan dalam tanah dan atau sumber alirannya berupa

aliran bawah permukaan (Latuamury, 2015). Formulasi perhitungan baseflow dijelaskan dalam rumus sebagai berikut:

$$Bf = 0,4751 A^{0,6444} D^{0,9430} \quad (2.15)$$

$$D = \frac{A}{P} \quad (2.16)$$

Dimana :

Bf = Aliran dasar (m^3/det)

A = Luas (km^2)

D = kerapatan jaringan kuras (km/km^2)

A = Panjang Sungai (km)

2.8.8 Hidrograf Satuan

Hidrograf didefinisikan sebagai diagram yang menggambarkan variasi debit atau permukaan air menurut waktu (Sosrodarsono & Takeda, 1976).

Komponen air dari hidrograf terdiri dari 3 sumber, yaitu:

- Curah hujan di saluran : air hujan yang jatuh langsung pada permukaan air di sungai utama dan anak-anak sungainya.
- Limpasan permukaan : terdiri dari air yang mengalir di atas permukaan tanah dan air yang menginfiltrasi dan mencapai lapisan yang impermeabel kemudian mengalir ke sungai.
- Aliran air tanah yang mencapai permukaan air dalam beberapa waktu tertentu.

Dalam analisis hidrologi, hidrograf satuan merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghitung transformasi perubahan volume limpasan atau hujan efektif menjadi hidrograf yang dihasilkan dari limpasan setinggi 1mm pada suatu DAS. Hidrograf dibagi menjadi dua, yaitu hidrograf satuan terukur dan hidrograf satuan sintetis. Hidrograf satuan terukur diperoleh dari pasangan data hujan dan data hidrograf banjir pada titik terkontrol DAS tinjauan. Sedangkan hidrograf satuan sintetis merupakan hidrograf yang diperoleh dari data karakteristik DAS.

Adanya keterbatasan data menyebabkan perhitungan Hidrograf sintetis banyak digunakan. Metode yang umum digunakan untuk menghitung hidrograf satuan sintesis di Indonesia yaitu HSS Nakayasu.

2.8.8.1 Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu

Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu dihitung menggunakan persamaan (M., Masrevaniah, & Sisinggih):

$$Q_p = \frac{A.R_0}{3,6 (0,3 T_p + T_{0,3})} \quad (2.17)$$

$$T_p = T_g + 0,8 T_r \quad (2.18)$$

$$T_r = 0,5 T_g \text{ sampai dengan } T_g \quad (2.19)$$

$$T_g = 0,21 L^{0,7} \text{ untuk } L < 15 \text{ km} \quad (2.20)$$

$$T_g = 0,4 + 0,058 L \text{ untuk } L > 15 \text{ km} \quad (2.21)$$

$$T_{0,3} = \alpha \cdot T_g$$

Dimana :

A = Luas DAS (m²)

Q_p = Debit puncak hidrograf satuan (m³/detik)

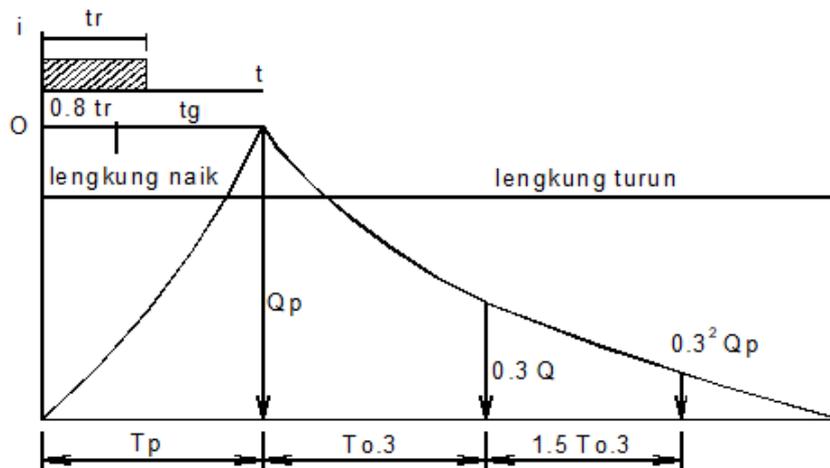
R₀ = Hujan satuan (1mm)

T_p = Tenggang Waktu dari permulaan hujan sampai banjir puncak

T_{0,3} = Waktu yang diperlukan oleh penurunan debit dari puncak sampai 30% dari debit puncak

T_g = waktu konsentrasi (jam)

L = panjang sungai



Gambar 2.13. Grafik HSS Nakayasu

2.8.9 Penelusuran Banjir

Penelusuran banjir merupakan teknik penentuan hidrograf banjir pada suatu bagian sungai dengan memanfaatkan data aliran banjir pada suatu bagian hulu. Analisis penelusuran banjir dapat dibedakan menjadi dua, yaitu *reservoir routing* dan *channel routing*.

Reservoir routing atau penelusuran banjir di waduk mempelajari akibat dari debit banjir yang masuk ke waduk, sehingga diketahui karakteristik volume-elevasi dan hubungannya terhadap volume-elevasi di spillway atau outlet lain di waduk.

Metode penelusuran dapat dibedakan menjadi dua kategori, yaitu penelusuran hidrologi dan penelusuran hidraulik. Metode penelusuran hidrologi menggunakan dasar persamaan kontinuitas. Pada metode penelusuran hidraulik menggunakan persamaan kontinuitas bersama dengan persamaan gerakan aliran *unsteady flow*. Persamaan differensial yang digunakan pada penelusuran hidraulik, misalnya persamaan St. Venant, mampu menggambarkan *unsteady flow* lebih baik daripada metode hidrologi.

Persamaan kontinuitas penelusuran banjir yaitu:

$$I - O = \Delta S \quad (2.22)$$

Dimana : ΔS = Perubahan tampungan air di embung

BAB 3

METODE PENELITIAN

Pemodelan genangan banjir akibat keruntuhan bendungan ini dilakukan dengan mensimulasikan adanya banjir dari keruntuhan Bendungan Way Sekampung yang disebabkan *piping* dan *overtopping*. Software yang digunakan untuk pemodelan yaitu HEC-RAS 1D dan 2D.

3.1 Rancangan Penelitian

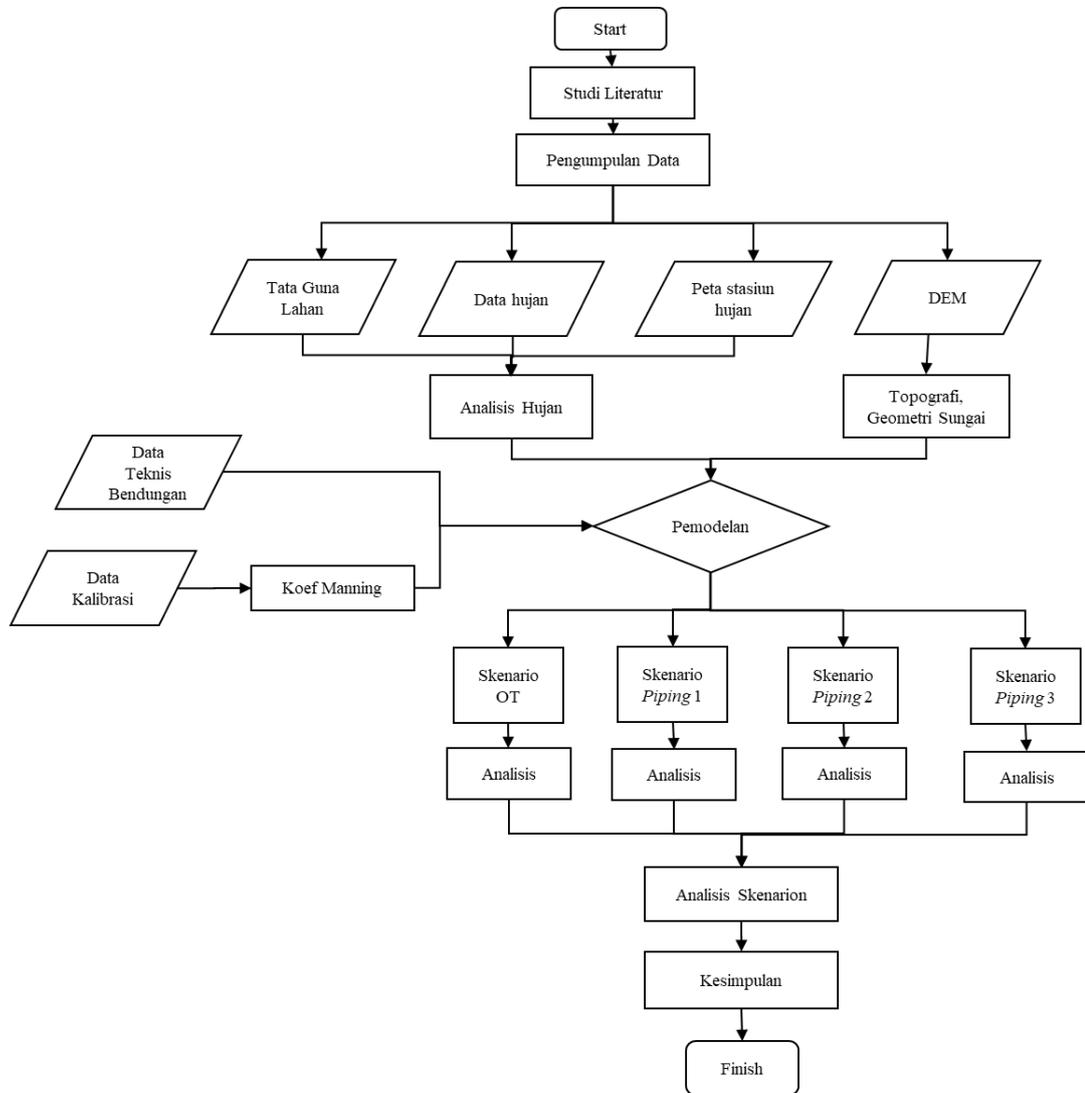
Metode yang digunakan pada penelitian ini secara sistematis dapat dilihat pada Bagan Alir Penelitian (Gambar 3.1). Proses dimulai dari Studi Literatur, Pengumpulan data yang terdiri dari data curah hujan, peta tata guna lahan, peta DEM dan data teknis bendungan. Masing-masing data tersebut kemudian diolah dan digunakan sebagai input dalam aplikasi HEC-RAS 5.07. Pemodelan yang digunakan dalam HEC-RAS terdiri dari 1 Dimensi dan 2 Dimensi. 1 dimensi digunakan untuk memodelkan air yang melewati sungai sedangkan 2 Dimensi digunakan untuk memodelkan area genangan yang terjadi akibat luapan air sungai.

Pada pemodelan genangan akibat keruntuhan bendungan ini terdapat 4 skenario, yaitu genangan yang terjadi pada kondisi lokasi *piping* di tubuh bendungan bagian atas, bagian tengah dan bawah, serta akibat *overtopping*. Dari hasil 4 model tersebut kemudian akan dianalisis besarnya genangan yang terjadi di masing-masing lokasi *piping*, Hasil akhir dari penelitian ini berupa peta genangan banjir yang terjadi karena keruntuhan bendungan yang dipicu *overtopping* dan *piping* pada tiga titik yang berbeda serta untuk menganalisis lokasi mana yang terdampak keruntuhan bendungan.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur diperlukan untuk mencari referensi yang sah terkait penelitian yang dilakukan. Literatur yang dipelajari ini meliputi bendungan urugan batu, pemodelan menggunakan aplikasi HEC-RAS, analisis hidrologi, serta studi tentang genangan banjir akibat keruntuhan bendungan. Referensi yang dipakai

didapatkan dari *textbook*, jurnal, dan modul, yang telah dijabarkan pada Bab 2. Referensi tersebut kemudian digunakan sebagai landasan dalam penentuan lingkup penelitian, pengumpulan data, tata cara pemodelan, serta analisis data.



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

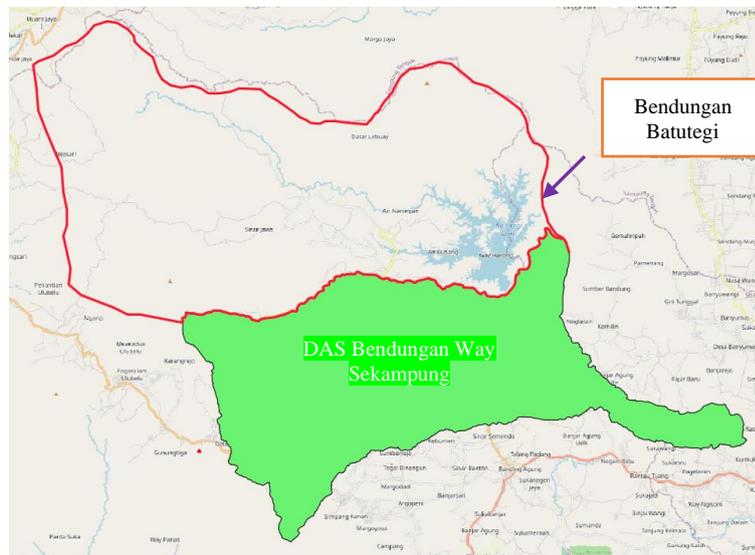
3.3 Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari data teknis bendungan, data curah hujan dari pos hujan yang berpengaruh pada Bendungan Way Sekampung, peta stasiun hujan, peta DEM, dan data kalibrasi.

3.3.1 Data Hidrologi

Data hidrologi yang digunakan untuk analisis hidrologi meliputi data curah hujan di DAS Bendungan Way Sekampung dan data penelusuran banjir Bendungan Batutegi. Analisis hidrologi dilakukan guna mendapatkan hidrograf debit banjir rencana yang diinputkan dalam simulasi. Berdasarkan spesifikasi Bendungan Way Sekampung, debit banjir rencana yang digunakan dalam perencanaan bendungan yaitu debit Banjir Maksimum Boleh Jadi atau *Probability Maximum Flood* (PMF).

Lokasi Bendungan Way Sekampung yang berada di hilir bendungan Batutegi (Gambar 3.1), menyebabkan perhitungan debit banjir Bendungan Way Sekampung dilakukan dalam dua tahap, yaitu perhitungan debit PMF dari DAS Bendungan Way Sekampung dan debit aliran PMF dari Bendungan Batutegi.



Gambar 3.2 Lokasi Bendungan Way Sekampung

Perhitungan debit PMF dari DAS Bendungan Way Sekampung dilakukan dengan pengolahan data curah hujan. Terdapat tiga stasiun hujan yang digunakan untuk menghitung curah hujan boleh jadi (CMB). Penentuan besarnya curah hujan CMB ini menggunakan metode Hearsfield. Selanjutnya dilakukan perhitungan debit PMF menggunakan metode rasional serta debit satuan sintetik menggunakan metode HSS Nakayasu. Penelusuran banjir dilakukan mendapatkan inflow dan outflow PMF dilakukan menggunakan persamaan kontinuitas. Hasil dari hidrograf outflow Bendungan Batutegi dan hidrograf satuan sintetik DAS Bendungan Way

Sekampung kemudian digabungkan untuk mendapatkan hidrograf superposisi Bendungan Way Sekampung.

3.3.2 DEM

Data *Digital Elevation Model* (DEM) merupakan data topografi yang mereferensikan titik awal permukaan bumi. DEM mengeliminasi objek yang berada di permukaan tanah, sehingga bangunan atau tanaman tidak termasuk di dalamnya. Data DEM didapatkan dari DEMNAS yang di unduh dari website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/>. Skala peta DEM yaitu 1:50.000 yang dibuat tahun 2012.

3.3.3 Data Teknis Bendungan

Data teknis bendungan digunakan meliputi **elevasi dasar bendungan**, panjang bendungan, lebar bendungan, panjang spillway, dan lebar pintu air. Data ini digunakan untuk peniruan geometri dalam model.

3.3.4 Kalibrasi

Kalibrasi diperlukan untuk mencocokkan kembali hasil pemodelan yang dibuat dengan kondisi yang ada di lapangan. Kalibrasi yang dilakukan pada penelitian bertujuan untuk menentukan nilai kekasaran manning. Proses kalibrasi dilakukan menggunakan aplikasi HEC-RAS secara *steady flow* menggunakan data pengukuran debit dengan kondisi geometri sungai sesuai yang didapatkan dari DEM.

Data kalibrasi yang digunakan dalam penelitian ini berupa data pengukuran lapangan yang didapatkan dari BBWS Mesuji Sekampung. Lokasi pengambilan data berada pada hulu bendungan Way Sekampung, tepatnya

3.3.5 Simulasi Model

Masing-masing skenario banjir akan disimulasikan menggunakan *software* HEC-RAS. Adapun skenario banjir ini terdiri dari:

- a. Skenario P1

Skenario P1 merupakan simulasi keruntuhan bendungan menggunakan mode kegagalan *piping*. Lokasi *piping* pada skenario 1 berada pada tubuh bendungan bagian atas.

b. Skenario P2

Skenario P2 merupakan simulasi keruntuhan bendungan menggunakan mode kegagalan *piping*. Lokasi *piping* pada skenario 1 berada pada tubuh bendungan bagian tengah.

c. Skenario P3

Skenario P3 merupakan simulasi keruntuhan bendungan menggunakan mode kegagalan *piping*. Lokasi *piping* pada skenario 3 berada pada tubuh bendungan bagian bawah.

d. Skenario OT

Skenario OT merupakan simulasi keruntuhan bendungan menggunakan mode kegagalan *overtopping*.

Tabel 3.1 Skenario Pemodelan

| Kode | Piping | | | Overtopping |
|------|--------|--------|-------|-------------|
| | Atas | Tengah | Bawah | |
| P1 | ✓ | | | |
| P2 | | ✓ | | |
| P3 | | | ✓ | |
| OT | | | | ✓ |

3.3.6 Analisis Genangan Banjir

Analisis genangan merupakan perbandingan dari masing-masing skenario kejadian banjir akibat *piping* dan *overtopping*. Analisis genangan dilakukan menggunakan menu Rasmapper dan QGIS 3.4.2 Medeira. Rasmapper digunakan untuk memperlihatkan hasil *running* model yang selanjutnya file dapat disimpan dengan format .TIF. QGIS digunakan untuk mengolah data dari format file .TIF

yang dihasilkan rasmapper menjadi data yang persebaran kecepatan, muka air maksimum, debit air yang limpas, serta persebaran genangan banjir.

BAB 4

ANALISIS DATA

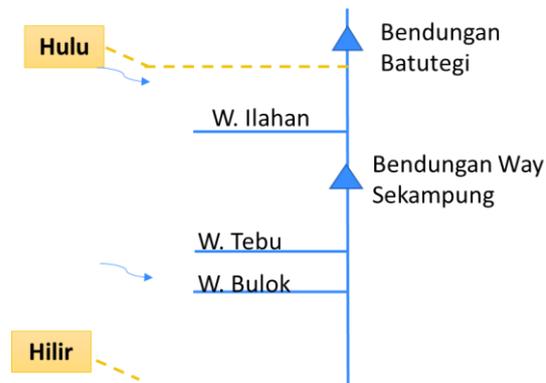
4.1 Lokasi Penelitian

Bendungan Way Sekampung” terletak di Desa Bumi Ratu, Kecamatan Pagelaran di kanan sungai dan Desa Banjarejo, Kecamatan Banyumas di kiri sungai, Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung yang terletak pada koordinat $104^{\circ} 48' - 105^{\circ} 08'$ Bujur Timur dan $5^{\circ} 12' - 5^{\circ} 33'$ Lintang Selatan. Adapun lokasi Bendungan Way Sekampung dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Lokasi Penelitian Bendungan Way Sekampung

Hulu Bendungan Way Sekampung terdapat Bendungan Batutegi, Sungai Way Harong dan Sungai Way Ilahan yang menjadi sumber utama aliran air ke Bendungan Way Sekampung. Ilustrasi lokasi Bendungan Way Sekampung disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Skema Pengaliran

Bendungan Way Sekampung merupakan bendungan tipe urugan batu dengan inti tegak di tengah. Pemilihan tipe bendungan ini mempertimbangkan ketersediaan material yang ada di sekitar lokasi bendungan. Bendungan yang memiliki daerah pengaliran sungai seluas 346 km² ini direncanakan dapat menampung 6,8 juta m³, dengan bentuk tampungan memanjang (*long storage*). Data teknis Bendungan Way Sekampung secara detail disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Teknis Bendungan Way Sekampung

| Waduk | |
|-----------------------------|--|
| Daerah Pengaliran Sungai | 346 km ² |
| Elevasi Muka Air PMF | + 127.5 m |
| Elevasi Muka Air Nomral | +124.0 m |
| Elevasi Muka Air Rendah | + 112.0 m |
| Kapasitas Tampungan Total | 68,06 x 10 ⁶ m ³ |
| Kapasitas Tampungan Efektif | 33,46 x 10 ⁶ m ³ |
| Bendungan | |
| Tipe Bendungan | Urugan Batu Inti Tegak |
| Elevasi Puncak | +130.0 m |
| Lebar Puncak | 10 m |
| Panjang Bendungan | 362 m |
| Tipe Pelimpah | Pelimpah Bebas dan Berpintu |
| Lebar Ambang Bebas | 85 m (El. +124) |
| Lebar Ambang Berpintu | 18 m (2 x @9m) |
| Panjang peredam energi | 42 m |

Sumber : PT Indra Karya (2016)

4.2 Analisis Hidrologi

Terdapat 4 langkah yang dilakukan dalam analisis hidrologi ini antara lain:

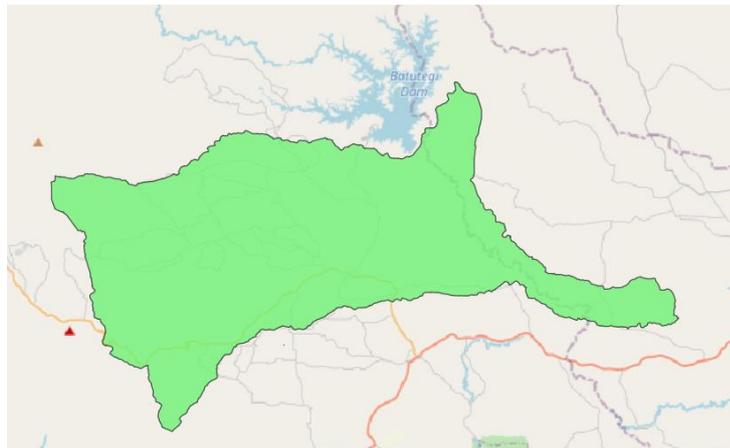
1. Penentuan Daerah Aliran Sungai Bendungan Way Sekampung;
2. Penentuan Pos Hujan yang berpengaruh pada Bendungan Way Sekampung;

3. Perhitungan curah hujan Maksimum Boleh jadi (CMB);
4. Perhitungan Debit Banjir atau PMF (*Probable Maximum Flood*).

Tahap pertama dari analisis hidrologi ini dijelaskan pada Sub Bab. 4.2.1, sedangkan tahap 2-4 dijelaskan pada sub bab 4.2.2.

4.2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

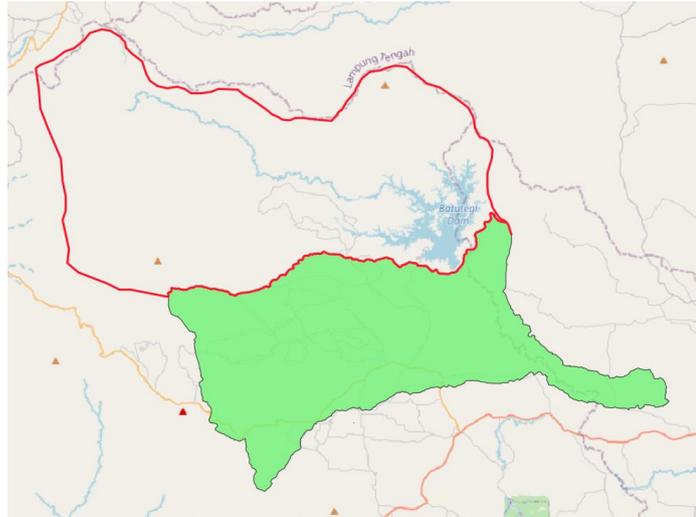
DAS Bendungan Way termasuk dalam Wilayah Sungai Seputih Sekampung. DAS Way Sekampung ini didasarkan pada topografi wilayah, yang dalam penelitian ini digunakan alat bantu berupa aplikasi *Global Mapper*. Dari hasil analisis tersebut, ditentukan bahwa luas efektif DAS Bendungan Way Sekampung seluas 286 km² (Gambar 4.3).



Gambar 4.3. Daerah Pengaliran Sungai Bendungan Way Sekampung

Selain dari daerah sekitar DAS, Bendungan Way Sekampung juga memperoleh aliran dari Bendungan Batutegi. Oleh karena itu, daerah pengaliran Bendungan Way Sekampung juga terpengaruh dari DAS Bendungan Batutegi. Luas DAS Bendungan Batutegi adalah sebesar Gambar 4.4 memperlihatkan DAS Bendungan Way Sekampung yang telah ditambah dengan DAS Bendungan Batutegi.

Lokasi Bendungan Way Sekampung yang terpengaruh aliran Bendungan Batutegi juga akan berdampak terhadap area perhitungan debit banjir rencana. Debit banjir rencana yang dipakai dalam studi keruntuhan bendungan ini yaitu Debit PMF.

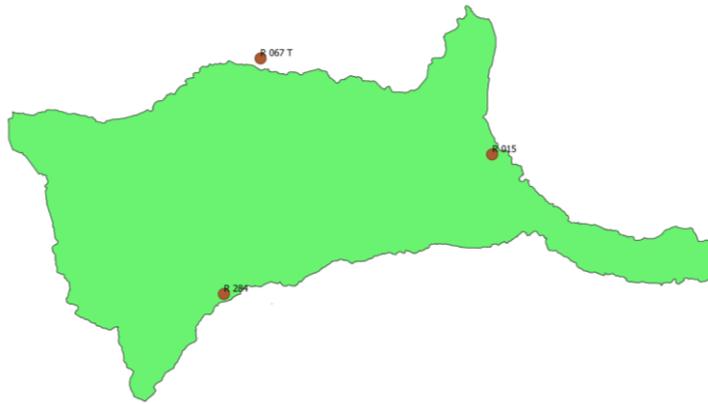


Gambar 4.4 DAS Bendungan Way Sekampung dan Bendungan Batuteги

4.2.2 Analisis Debit PMF

Analisis debit PMF dilakukan untuk mengetahui nilai debit PMF yang mengalir ke bendungan. Hasil yang diinginkan berupa hidrograf aliran yang akan menjadi input dalam simulasi menggunakan aplikasi HEC-RAS. Perhitungan Debit PMF Bendungan Way Sekampung dilakukan dalam 3 tahap, yaitu : (1) perhitungan hidrograf menggunakan debit PMF, yang dihitung menggunakan analisis curah Hujan di DAS Bendungan Way Sekampung; (2) Perhitungan hidrograf dari reservoir routing Bendungan Batuteги saat terjadinya Inflow PMF dan outflow PMF; (3) Perhitungan superposisi dari hidrograf.

Analisis debit PMF DAS Bendungan Way Sekampung dilakukan menggunakan analisis curah hujan. Terdapat 3 buah stasiun hujan yang berpengaruh terhadap aliran sungai Bendungan Way Sekampung, yaitu Air Naningan (R 067), Kunyir (R 015), dan Gunung Magang (R 284). Ketiga pos hujan ini memiliki pencatatan hujan harian, dimana data yang didapatkan untuk penelitian ini adalah dari Tahun 2009 – 2018. Lokasi Stasiun Hujan pada DAS Sekampung ini disajikan pada Gambar 4.5.



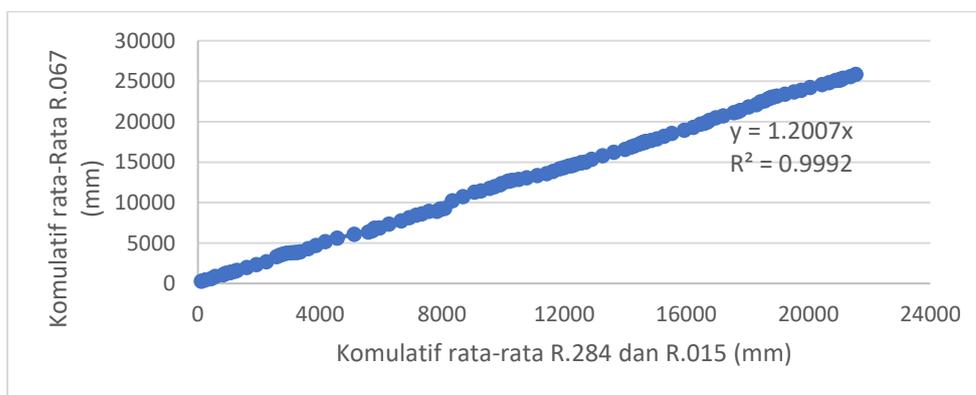
Gambar 4.5 Lokasi Pos Hujan Pada DAS Bendungan Way Sekampung

Proses terakhir dari penentuan debit PMF dilakukan dengan menggabungkan hidrograf Bendungan Way Sekampung dan Batutegi.

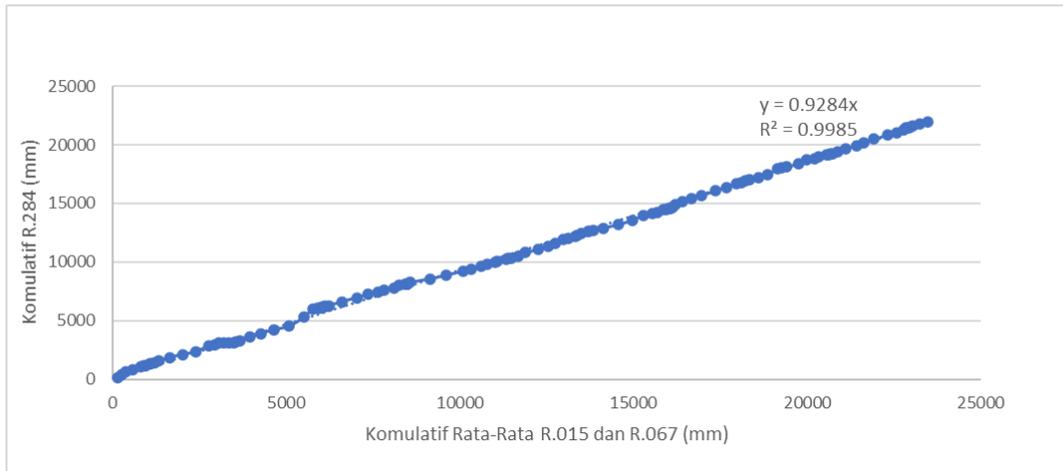
4.2.2.1 Uji Konsistensi

Pengujian terhadap konsistensi data hujan dilakukan untuk menguji kebenaran data hujan yang akan dianalisis. Pengujian konsistensi ini penting dilakukan untuk memastikan apakah data dari pos hujan dapat langsung dipakai atau harus dikoreksi terlebih dahulu. Tahapan uji konsistensi data sesuai dengan penjelasan sub bab 2.5.1.

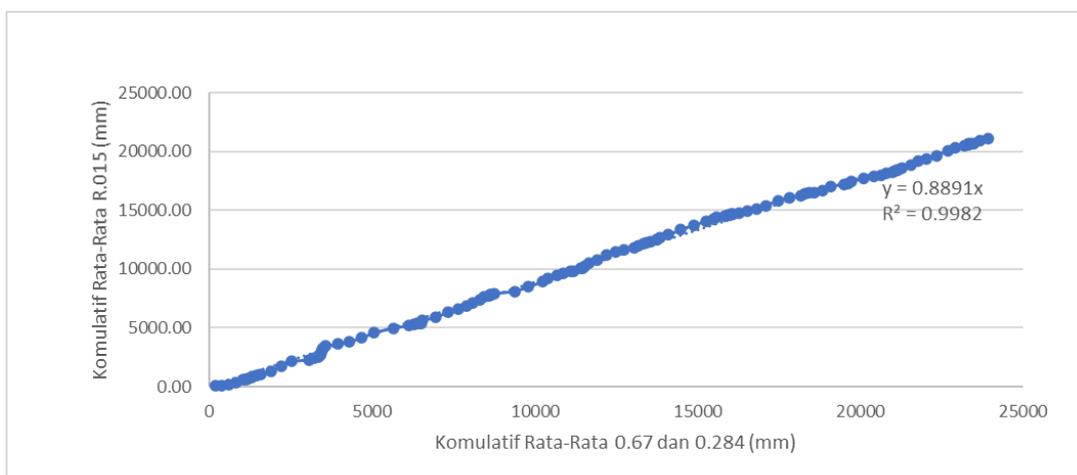
Uji konsistensi dilakukan dengan dibandingkan hujan rata-rata dari salah satu stasiun terhadap data dua stasiun hujan lainnya. Uji konsistensi pada penelitian ini disajikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.6 Uji Konsistensi Data Pos Hujan Air Nainingan (R064)



Gambar 4.7 Uji Konsistensi Data Pos Hujan Gunung Magang (R284)



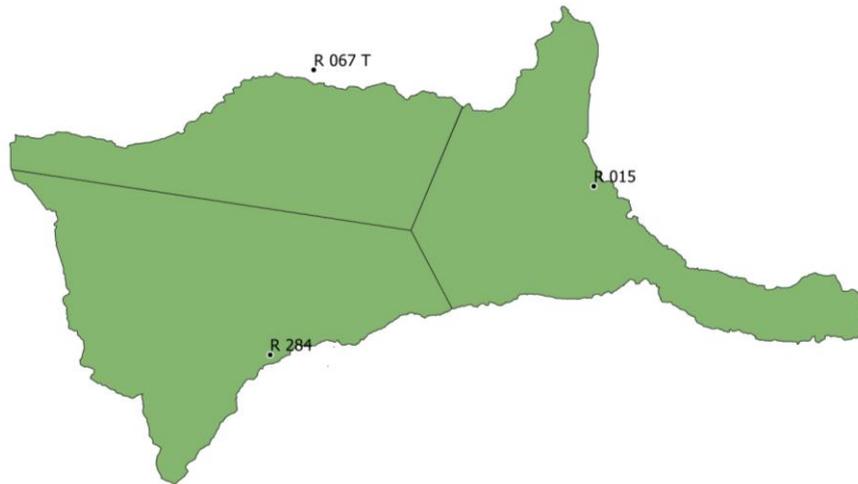
Gambar 4.8 Uji Konsistensi Data Stasiun Hujan Kunyir (R015)

Uji konsistensi menunjukkan data dari stasiun hujan telah konsisten dengan stasiun lainnya. Hal ini ditunjukkan dari nilai R^2 yang telah mendekati angka 1, yaitu 0,9985 untuk Stasiun Hujan Gunung Magang, nilai 0,9982 pada uji konsistensi data stasiun hujan Kunyir, serta 0,9992 pada uji konsistensi data stasiun hujan Air Nanning. Grafik juga tidak menunjukkan adanya patahan yang mengindikasikan adanya inkonsistensi data. Berdasarkan hasil uji ini maka data hujan pada 3 stasiun hujan tersebut dapat digunakan karena kriteria ini telah sesuai dengan dasar teori kriteria kurva massa ganda yang dijelaskan Searchy (1960) dan Sosrodarsono (1976).

4.2.2.2 Analisis Curah Hujan Rencana

Analisis frekwensi curah hujan digunakan untuk mencari besaran curah hujan maksimum boleh jadi (CMB), sehingga dapat dihitung debit hujan maksimum boleh jadi (PMF). Untuk menghitung nilai CMB, langkah-langkah yang dilakukan menurut sub bab 2.5.

Berdasarkan data yang dimiliki, maka perhitungan hujan kawasan dilakukan menggunakan poligon thiessen. Penentuan wilayah berdasarkan poligon thiessen dilakukan menggunakan aplikasi Qgis 3.4.7. Poligon thiessen yang dibuat dalam aplikasi ini dianggap telah valid karena telah sesuai dengan kaidah pembuatannya. Hasil penentuan wilayah berdasarkan poligon thiessen dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Poligon Thiessen Daerah Pengaliran Sungai Way Sekampung

Hasil dari poligon thiessen kemudian dihitung besar pengaruh tiap stasiun hujan terhadap debit yang mengalir ke Bendungan Way Sekampung. Perhitungan pengaruh stasiun hujan ini dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perhitungan Pengaruh Stasiun Hujan

| No | Stasiun Hujan | Bobot |
|--------------|-----------------------|---------|
| 1 | Air Nangingan (R 067) | 8.57 % |
| 2 | Kunyir (R 015) | 36.97 % |
| 3 | Gunung Magang (R 284) | 54.46 % |
| Total | | 100% |

Sumber : Hasil Perhitungan (2020)

Hasil dari pembobotan pada Tabel 4.2 di atas, dilakukan perhitungan hujan kawasan. Perhitungan curah hujan kawasan ini menggunakan rumus (2.5) yang telah disajikan pada Sub Bab 2.4.2. Perhitungan curah hujan kawasan dilakukan pada 3 stasiun hujan pada waktu yang sama, yang dikalikan dengan bobot thiessennya. Hasil perhitungan curah hujan kawasan kemudian dianalisis besar curah hujan maksimumnya. Tabel 4.3. menyajikan informasi nilai curah hujan kawasan maksimum per tahun.

Tabel 4.3 Data Hujan Maksimum Kawasan

| Tahun | Hujan Max (mm) |
|--------------|-----------------------|
| 2009 | 69.39 |
| 2010 | 62.02 |
| 2011 | 76.85 |
| 2012 | 89.70 |
| 2013 | 76.78 |
| 2014 | 63.59 |
| 2015 | 57.42 |
| 2016 | 76.51 |
| 2017 | 80.27 |
| 2018 | 68.79 |

Sumber : perhitungan (2020)

Dari data hujan maksimum kawasan, dapat dilakukan perhitungan perhitungan parameter statistik yang disajikan pada Tabel 4.4. Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan rumus (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), dan (2.10). Rincian perhitungan parameter statistik dapat dilihat pada Tabel 4.4. Sedangkan rangkuman hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Rincian Perhitungan Statistik

| No | Tahun | Xi (mm) |
|-----------|--------------|----------------|
| 1 | 2009 | 69.39 |

| No | Tahun | Xi (mm) |
|----------|-------|---------------|
| 2 | 2010 | 62.02 |
| 3 | 2011 | 76.85 |
| 4 | 2012 | 89.70 |
| 5 | 2013 | 76.78 |
| 6 | 2014 | 63.59 |
| 7 | 2015 | 57.42 |
| 8 | 2016 | 76.51 |
| 9 | 2017 | 80.27 |
| 10 | 2018 | 68.79 |
| Σ | | 721.32 |

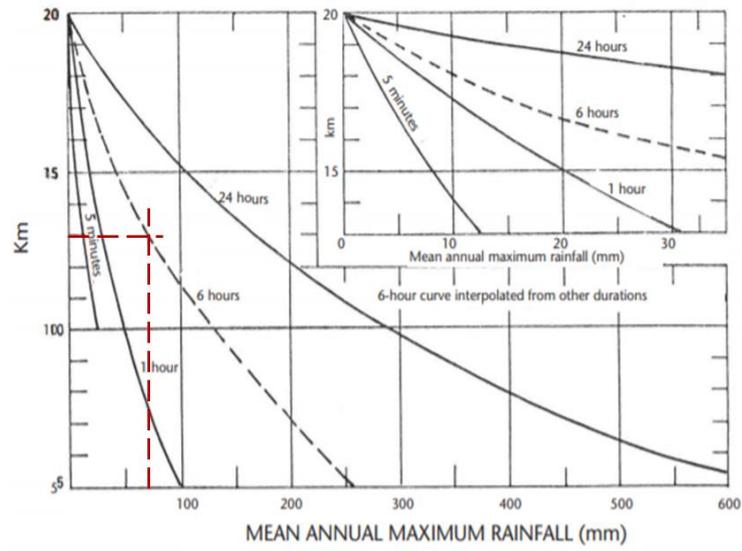
Sumber : Perhitungan (2020)

Tabel 4.5 Rangkuman Hasil Perhitungan Statistik

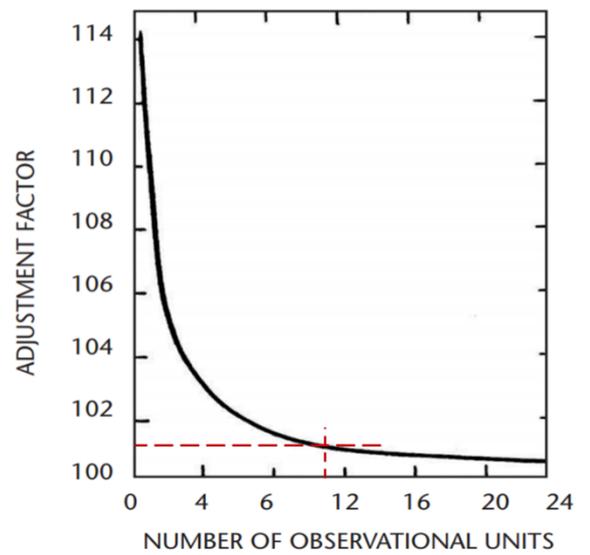
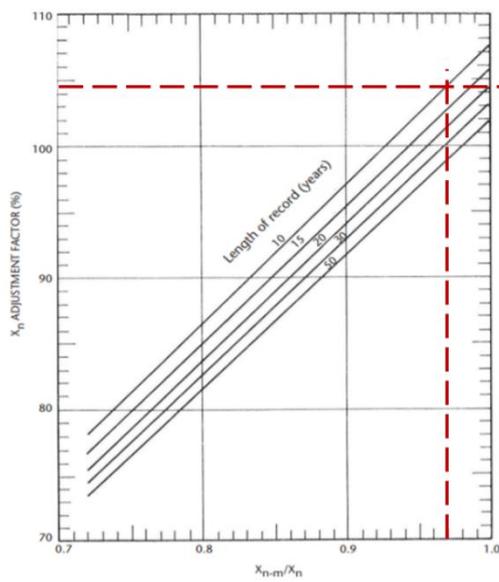
| Parameter | Nilai |
|-------------|-------|
| n | 10 |
| \bar{X}_n | 72,13 |
| S_n | 9,71 |
| X_{n-m} | 70.18 |
| S_{n-m} | 7.95 |

Sumber : Hasil Perhitungan (2020)

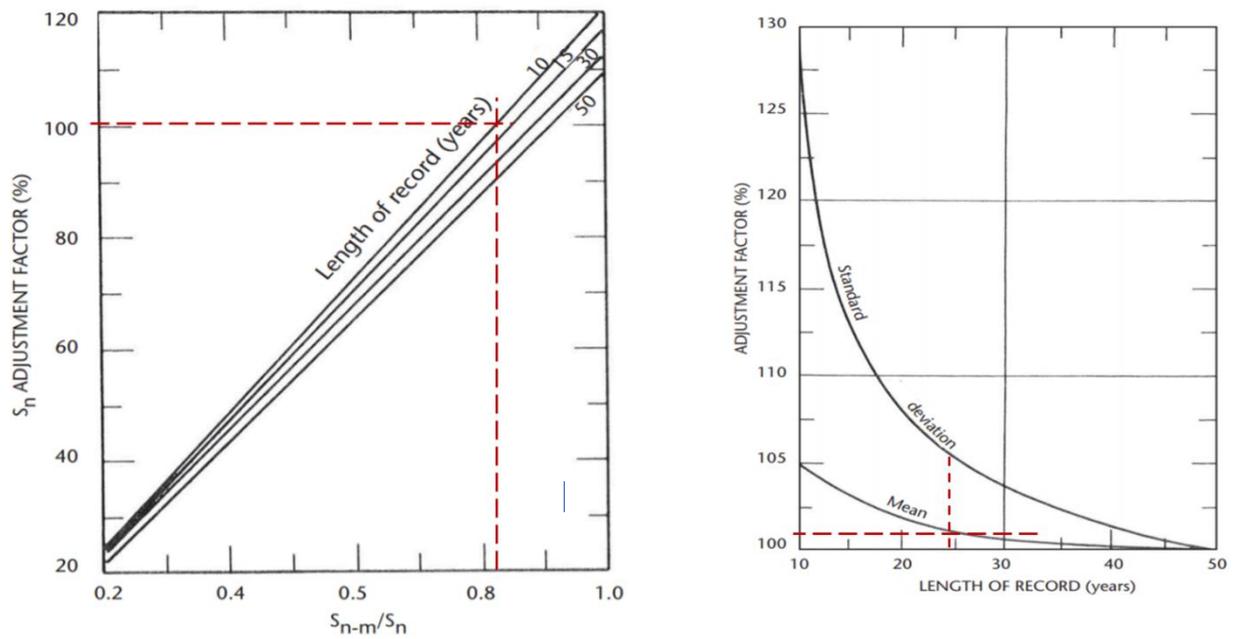
Untuk menghitung persamaan Hersfield perlu ditentukan nilai penyesuaian nilai rata-rata hujan maksimum dan simpangan baku. Hasil yang ditampilkan pada Tabel 4.5 kemudian digunakan sebagai acuan untuk melakukan plotting terhadap grafik pada Gambar 2.8 – Gambar 2.12. Hasil plotting grafik disajikan pada Gambar 4.10, 4.11, 4.12.



Gambar 4.10 Penentuan Nilai Km



Gambar 4.11 Penentuan Nilai f_1 dan f_3



Gambar 4.12 Penentuan Nilai f_3 dan f_4

Tabel hasil pengolahan data pada Tabel 4.5 dan Plotting Gambar 4.10, 4.11, dan 4.12. disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Parameter untuk menghitung Curah hujan CMB

| Parameter | Nilai |
|-----------------------|-------|
| X_{n-m} / \bar{X}_n | 0.97 |
| S_{n-m} / S_n | 0.82 |
| Km | 12.80 |
| f_1 | 1.40 |
| f_2 | 1.01 |
| f_3 | 1 |
| f_4 | 1.275 |

Sumber : Analisis Data (2020)

Berdasarkan Tabel 4.6 kemudian dihitung nilai CMB menggunakan rumus pada Bab 2 pada rumus 2.8, 2.9, 2.10. Hasil dari perhitungan tersebut terangkum dalam Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Ringkasan Perhitungan CMB

| Parameter | Nilai |
|-----------|--------|
| Sp | 12.38 |
| Xp | 102.00 |
| Xm | 260.44 |

Sumber : Perhitungan (2020)

Dapat diketahui nilai curah hujan CMB (Xm) adalah 260,44 mm. Berdasarkan hasil tersebut, maka perlu dihitung nilai CMB DAS dengan mengalikan nilai CMB dengan faktor reduksi ARF dengan rumus 2.11.

Tabel 4.8 Perhitungan Faktor Reduksi DAS

| Parameter | Nilai |
|----------------------|--------|
| A | 286,61 |
| ARF | 0,85 |
| X _{CMB-DAS} | 221,12 |

Sumber : Perhitungan (2020)

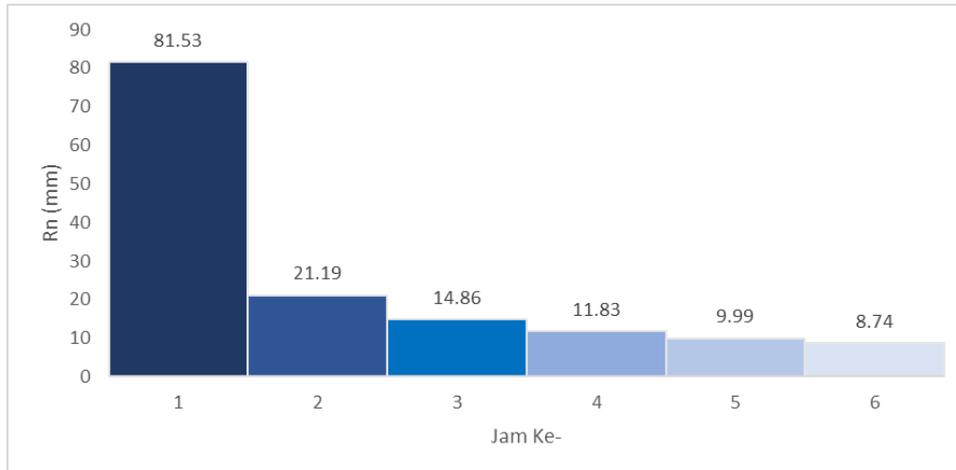
Perhitungan hujan efektif terlebih dahulu harus ditentukan nilai koefisien pengaliran. Pada tabel 2.2 telah disajikan daftar koefisien pengaliran menurut Mononobe. Koefisien C yang dianggap sesuai dengan kondisi topografi hulu bendungan Way Sekampung yaitu kondisi daerah pegunungan yang curam. Penilaian kecuraman topografi didasarkan pada kelas relief (topografi), perbedaan ketinggian di hulu bendungan mencapai 50 – 200, yang masuk kategori perbukitan curam (Bemana, 2006), yang mempunyai nilai 0,75 – 0,90. Resume perhitungan hujan efektif sesuai rumus 2.12. disajikan pada tabel 4.9 di bawah ini.

Tabel 4.9 Perhitungan Debit PMF

| Parameter | Nilai | Satuan |
|----------------------|--------|--------|
| X _{CMB-DAS} | 221,12 | mm |
| C | 0,67 | |
| R _{eff} | 148,15 | mm |

Sumber : Perhitungan (2020)

Dengan diketahuinya nilai curah hujan efektif, selanjutnya dilakukan perhitungan intensitas hujan setiap waktu menggunakan rumus Mononobe. Sesuai rumus 2.13 dan 2.14. Durasi hujan yang dihitung ditetapkan 6 jam, yang merupakan hujan yang sering terjadi di Indonesia. Hasil perhitungan intensitas berdasarkan rumus mononobe dapat dilihat pada Gambar 4.13



Gambar 4.13 Histogram Intensitas Hujan Setiap Waktu

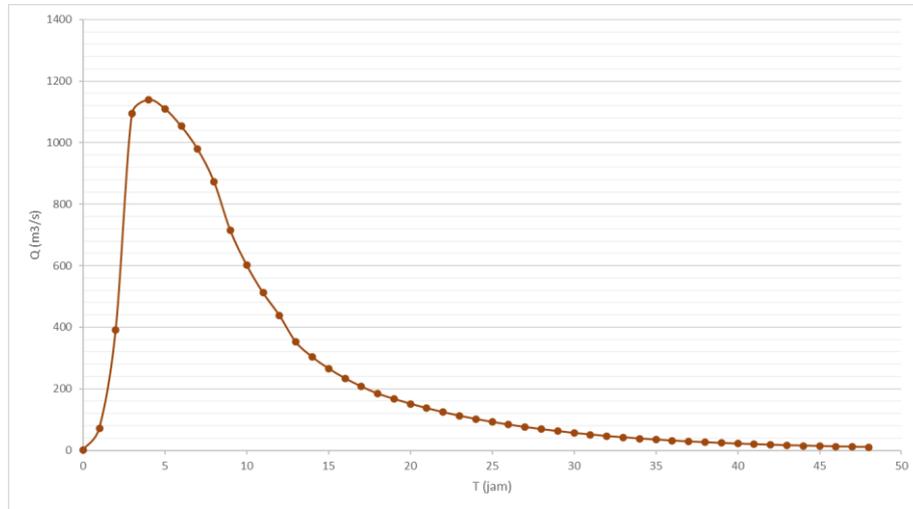
Perhitungan terakhir yaitu melakukan perhitungan hidrograf satuan menggunakan Hidrograf satuan nakayasu. Parameter perhitungan dalam perhitungan hidrograf satuan nakayasu mengikuti persamaan 2.17 – 2.21 dengan resume perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Tabel Perhitungan HSS Nakayasu

| Parameter | Nilai |
|-----------------|--------|
| A | 286.61 |
| L | 21.13 |
| R0 | 1 |
| α | 3.00 |
| Tg | 1.63 |
| Tr | 0.81 |
| Tp | 2.28 |
| T0,3 | 3.25 |
| Tp+T0,3 | 5.53 |
| 1,5*T0,3 | 4.88 |
| Tp+T0.3+0.5T0.3 | 7.15 |

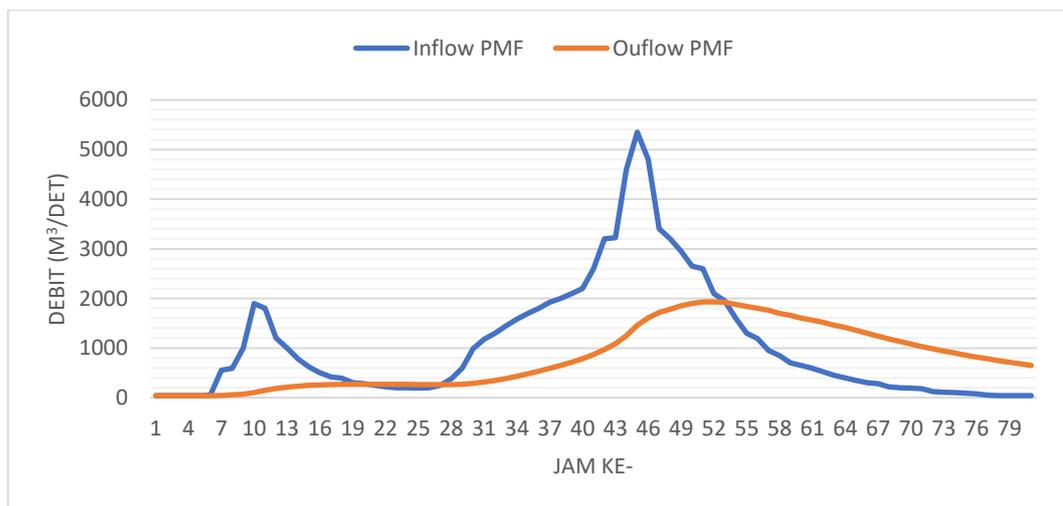
Sumber : Perhitungan (2020)

Hasil hidrograf yang di bentuk pada Gambar 4.15 merupakan HSS Nakayasu debit PMF pada DAS Sekampung. Dengan debit tertinggi yaitu 1139.061 m³/det.



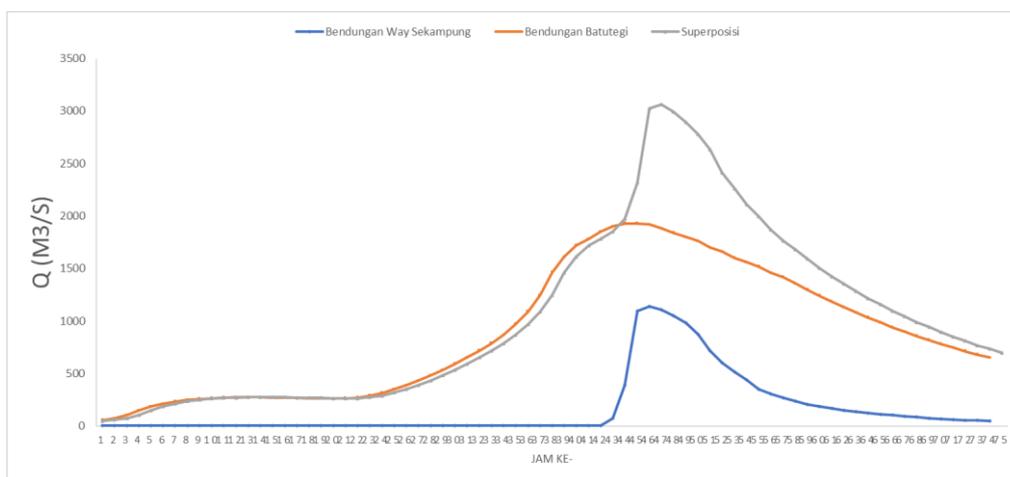
Gambar 4.14 HSS Nakayasu DAS Way Sekampung

Selanjutnya dilakukan perhitungan debit PMF dari Bendungan Batutegi dengan cara penelusuran banjir di waduk. Berdasarkan data Nota Desain Bendungan Way Sekampung, hasil penelusuran banjir Qpmf bendungan Batutegi disajikan pada Gambar 4.16 di bawah ini.



Gambar 4.15 Debit Penelusuran Banjir PMF Bendungan Batutegi (Sumber : Indra Karya, 2016)

Bedasarkan hidrograf DAS Bendungan Way Sekampung (Gambar 4.15) dan penelusuran banjir bendungan Batutegi (Gambar 4.16) maka dilakukan penggabungan kedua hidrograf. Penggabungan dapat langsung dilakukan karena grafik hidrograf telah mempunyai satuan waktu dan debit yang sama. Debit tertinggi dari hidrograf superposisi merupakan penambahan debit outflow tertinggi dari Bendungan Batutegi dan debit PMF dari Bendungan Way Sekampung. Kondisi ini dipilih dengan mempertimbangkan kondisi paling maksimum terjadinya banjir. Hasil dari penggabungan hidrograf dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.16 Hidrograf Superposisi Bendungan Way Sekampung

Hasil debit superposisi Bendungan Way Sekampung dan Bendungan Batutegi menunjukkan debit puncak adalah sebesar 3.010,311 m³/det. Jika dibandingkan dengan Laporan Hidrologi Pekerjaan Desain Bendungan Way Sekampung (2016), debit superposisi Bendungan Way Sekampung adalah sebesar 2836,97 m³/det. Perbedaan perhitungan nilai debit PMF ini terjadi karena adanya perbedaan pada:

1. Data stasiun hujan yang digunakan,
2. Panjang data curah hujan, pada laporan hidrologi terdapat Pekerjaan Desain Bendungan WAY Sekampung data curah hujan yang digunakan adalah 42 tahun, yaitu mulai Tahun 1972 – 2014. Sedangkan pada tesis ini hanya digunakan data curah hujan selama 10 tahun.

3. Penentuan luas DAS bendungan. Pada Laporan histologi Luas DAS Bendungan Way Sekampung adalah sebesar 364 km², sedangkan berdasarkan analisis yang dilakukan pada tesis ini adalah 286 km².
4. Perbedaan pemilihan metode hidrograf satuan sintetis.

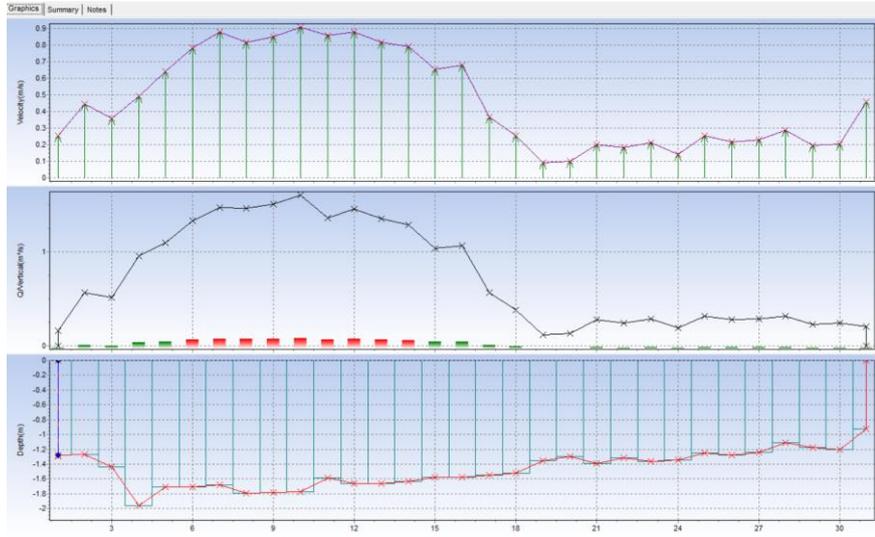
4.3 Kalibrasi

Kalibrasi bertujuan mengetahui tingkat akurasi hasil pemodelan dengan kondisi di lapangan. Pada penelitian ini kalibrasi dilakukan menggunakan data pengukuran kecepatan dan debit aliran sungai yang terdapat padahulu bendungan Way Sekampung. Lokasi pengambilan data kalibrasi terhadap Bendungan Way Sekampung ditunjukkan (Gambar 4.16).



Gambar 4.17 Lokasi Pengambilan Data Kalibrasi

Data pengukuran lapangan ini merupakan data sekunder yang didapatkan dari BBWS Mesuji Sekampung. Data diambil pada tanggal 31 Oktober 2018 pukul 14:35 WIB. Pengukuran lapangan dilakukan menggunakan *flowmeter* yang dapat mengukur kecepatan aliran, debit, dan kedalaman sungai. Grafik pengukuran dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.18 Grafik Pengukuran Kecepatan, Debit dan Kedalaman Sungai (Sumber: BBWS Mesuji Sekampung)

Pengukuran ini dilakukan pada 39 titik di sepanjang penampang sungai. Alat akan secara otomatis menghitung lebar sungai, serta rata-rata kecepatan, debit dan kedalaman sungai di setiap titik, kemudian dapat dihitung rata-rata kedalaman sungai, rata-rata kecepatan sungai, debit sungai, dan luas penampang sungai. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Data Input Kalibrasi

| Variabel | Nilai | Satuan |
|---------------------|--------|---------------------|
| Kedalaman Rata-rata | 1,477 | m |
| Kecepatan Rata-rata | 0,504 | m/det |
| Debit | 22,345 | m ³ /det |
| Luas Penampang | 44,3 | m ² |
| Lebar | 30 | m |

Sumber: Data BBWS Mesuji Sekampung (2018)

Kalibrasi dilakukan menggunakan aplikasi HEC-RAS dengan *steady flow analysis*. Kalibrasi ini dikatakan mendekati kondisi lapangan apabila didapatkan nilai kedalaman dari simulasi sama mendekati kedalaman di lapangan.

Kondisi batas hulu adalah debit pengukuran lapangan 22,345 m³/det. Kondisi batas hilir menggunakan *normal depth* karena tidak terdapat data

pencatatan air di hilir. Variasi nilai *maninng* dicoba dari nilai 0,025 – 0,040. Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan rumus

$$Q = V.A$$

$$V = 1/n R^{2/3} S^{1/2}$$

Hasil simulasi ketinggian muka air hasil simulasi terangkum dalam Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil Simulasi Variasi Nilai Manning

| Debit Kalibrasi (m ³ /s) | Nilai Manning (n) | Q (m ³ /s) | % Δ Q |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|-------|
| 22.345 | 0.025 | 34.88 | 0.561 |
| | 0.028 | 31.14 | 0.394 |
| | 0.03 | 29.06 | 0.301 |
| | 0.039 | 22.36 | 0.001 |
| | 0.04 | 21.8 | 0.024 |

Sumber: Analisis Data (2020)

Hasil kalibrasi menunjukkan nilai Q_{hitung} paling mendekati lapangan yaitu 22.36 m dengan nilai manning sungai sebesar 0,039. Nilai manning bantaran ditentukan sebesar 0.045 dengan mempertimbangkan nilai perkiraan nilai manning pada saluran alam. Dari hasil kalibrasi ini maka nilai “n” manning yang digunakan pada model yaitu 0,039 pada saluran utama dan 0,045 pada bantaran kiri dan kanan.

4.4 Pemodelan Keruntuhan Bendungan

Pemodelan keruntuhan bendungan dilakukan menggunakan program aplikasi HEC-RAS 5.07 model 1 Dimensi dan 2 Dimensi. Model 1 Dimensi digunakan untuk memodelkan aliran di sungai, sedangkan model 2D digunakan untuk memodelkan aliran air yang meluap ke luar sungai.

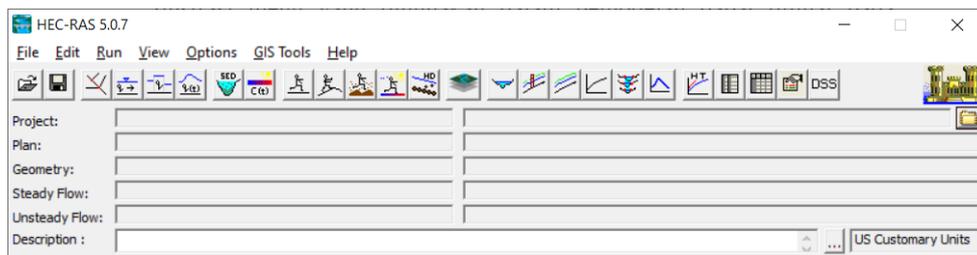
Tahapan dalam pembuatan model dalam aplikasi HEC-RAS 5.07 yang digunakan untuk memodelkan genangan banjir ini terdiri dari:

1. Pembuatan *project*;

2. Memasukkan data geometri. Pembuatan geometri sungai dapat lebih mudah dilakukan dengan menu RasMapper. Rasmapper memungkinkan dalam membuat aliran sungai, yang dihubungkan dengan data terrain. Data geometri yang diinput antara lain geometri sungai, cross section, jarak antar cross section, nilai “n” manning, dan geometri bendungan yang terdiri dari tinggi bendungan, lebar bendungan;
3. Membuat area 2D dan lateral structure;
4. Memasukkan boundary condition untuk *unsteady flow*;
5. Menentukan variabel rekahan bendungan;
6. Melakukan perhitungan hidraulika secara *unsteady flow*;
7. Menampilkan dan mencetak hasil perhitungan.

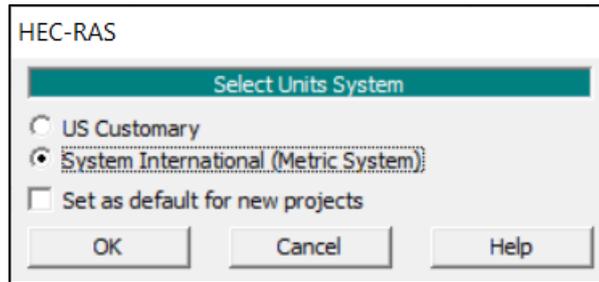
4.4.1 Pembuatan *Project*

Pembuatan *project* merupakan tahapan pertama dilakukan setelah aplikasi terbuka. Langkah ini terdiri dari penentuan area penyimpanan data yang dilakukan dengan cara Membuka Menu *File > New File > Mengisi Nama Project > Menentukan lokasi Penyimpanan*. Untuk lebih jelasnya Gambar 4.18 telah menampilkan halaman utama aplikasi HEC-RAS 5.07.



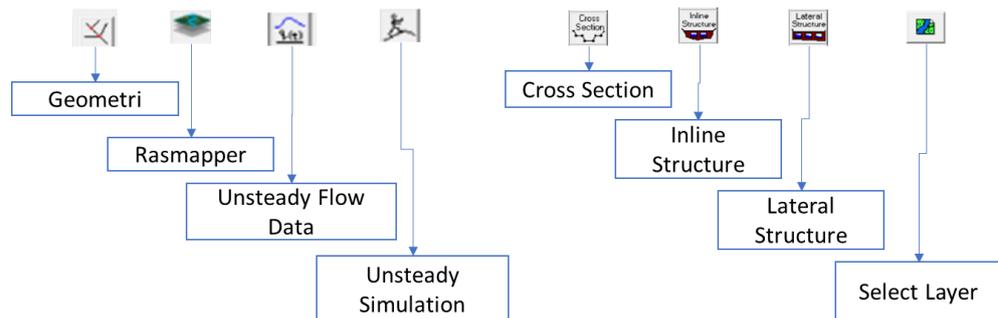
Gambar 4.19 Tampilan HEC-RAS

Pada tahap ini juga penting untuk melakukan pengaturan unit system. *Default* sistem satuan yang dipakai dalam HEC-RAS yaitu US Customary, akan tetapi karena data yang didapatkan dari lapangan dan sistem satuan yang dipakai di Indonesia yaitu Sistem Internasional, maka perlu dilakukan perubahan unit system dengan cara memilih menu *Options > Convert Project Units*.



Gambar 4.20 Penentuan Sistem Satuan

Menu lain yang digunakan dalam pemodelan ini antara lain geometri untuk membuat dan menampilkan geometri saluran yang diinterpretasikan dengan *cross section*, bendungan yang dibuat dengan menu inline structure, dan struktur lateral yang dibuat melalui lateral structure. Selain itu, untuk menambahkan background geometri seperti terrain, layer google map, maupun shape file. Ilustrasi menu yang digunakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Menu yang Dipakai Untuk Pemodelan

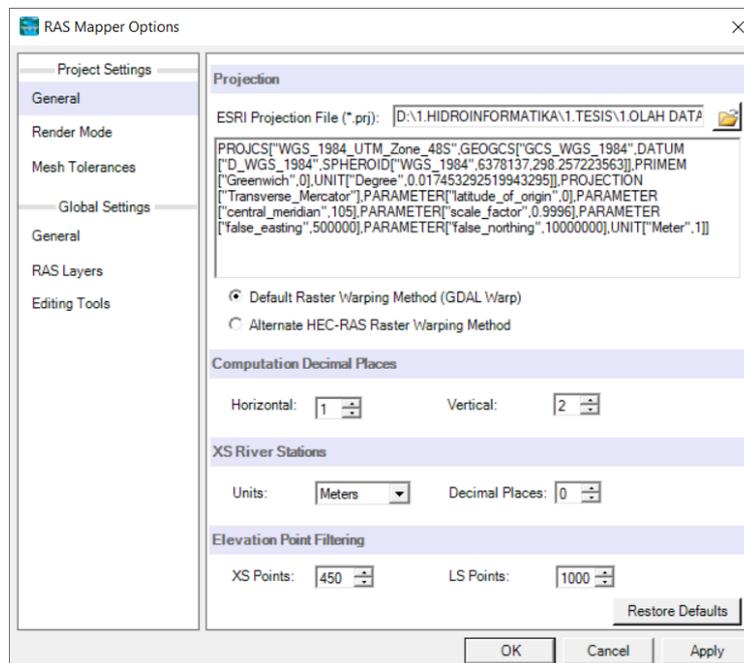
4.4.2 Terrain Pada Rasmapper

Pengolahan data spasial pada HEC-RAS dilakukan menggunakan menu RasMapper. Data Spasial yang digunakan diambil dari DEMNAS. Hasil validasi DEM di Sumatera menunjukkan bahwa akurasi DEMNAS lebih baik dibandingkan dengan model data tinggi yang dibentuk dari *masspoint*, *spotheight* dan *breakline* (selanjutnya akan disebut DTM). Data DEMNAS, DTM dan DSM (IFSAR, TERRASAR-X dan ALOS-PALSAR) untuk wilayah Sumatera memiliki *Root Mean Square Error* (RMSE) masing-masing sebesar 2.79m, 3.24m dan 3.71m

dengan *bias error* -0.13m, -0.63m dan 2.21m untuk data DEMNAS, DTM dan DSM.

Input terrain pada HEC-RAS dilakukan melalui menu *rasmapper*. Sebelum memasukkan data terrain, perlu dilakukan pengaturan proyeksi untuk menentukan koordinat lokasi penelitian. Tanpa adanya pengaturan proyeksi, maka sistem koordinat dalam terrain tidak dapat terbaca.

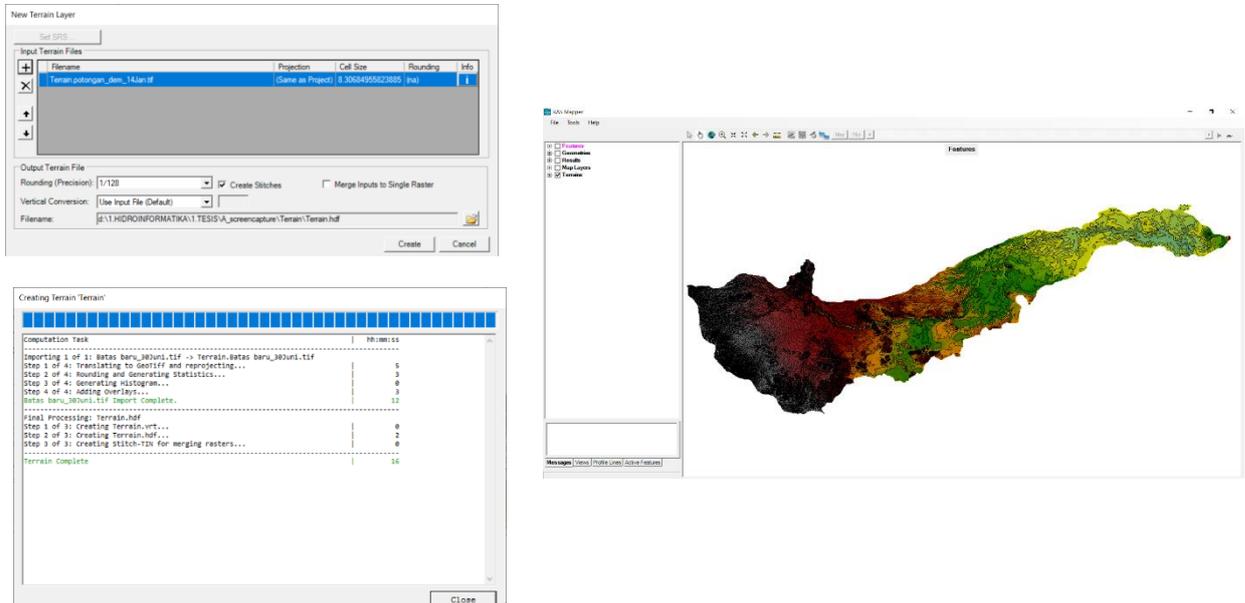
Langkah memasukkan file proyeksi yaitu dengan memilih menu *tools > Set Projection For Project > Projection Setting > General >* memasukkan file *.prj* ke *Esri Projection File*. Selanjutnya mengubah setting XS River Station dari feet ke metric, agar tampilan data dari terrain terbaca dengan sistem satuan meter. Hasil dari proses masukan file proyeksi ditampilkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 *Rasmapper Option*

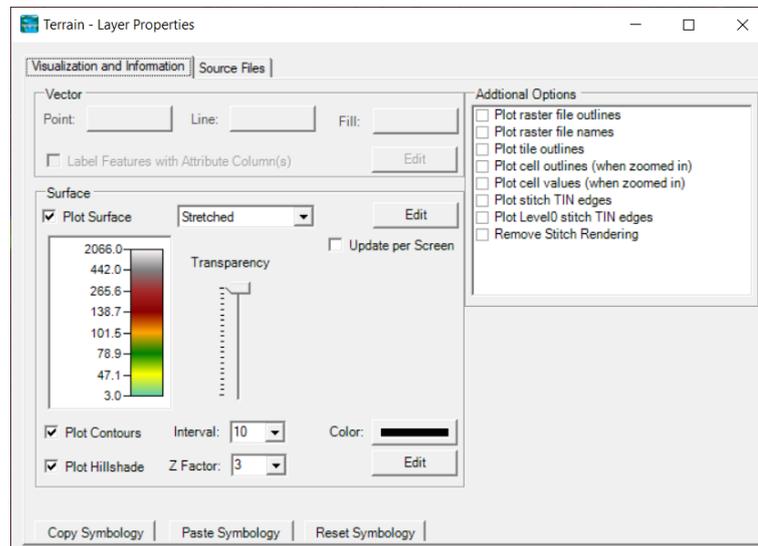
Proses selanjutnya yaitu memasukkan terrain dengan memilih menu *tools > new terrain. Rounding (precision)* merupakan informasi pemotongan dan ukuran terrain dan sangat berpengaruh terhadap pembacaan data yang lebih detail dan akurat. Nilai yang dipilih yaitu 1/128 yang berarti semua nilai dalam geotiff akhir akan berada dalam 1/256 dari nilai data. Lamanya proses menampilkan terrain akan bergantung kepada ukuran yang diinput.

Pada tahap ini akan diinput terrain berupa DEM lokasi penelitian. Ilustrasi dari tahapan ini dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Tampilan Terrain pada Rasmapper

Setelah terrain terbaca, dapat dilakukan beberapa pengaturan seperti menampilkan garis kontur, mengatur warna terrain, dan mengatur transparency dari terrain.



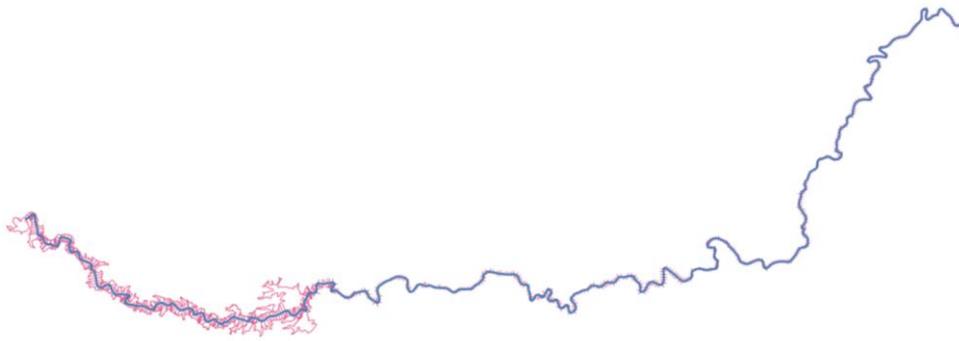
Gambar 4.24 Layer properties terrain

Z factor merepresentasikan nilai perubahan elevasi. Untuk melakukan pengaturan pencahayaan dapat dimodifikasi dengan memilih menu edit > *Azimuth dan Zenith*. Tampilan yang diberikan setelah dilakukan edit *Z factor* dapat dilihat pada Gambar 4.24.

4.4.3 Peniruan Geometri

Peniruan geometri yang dilakukan pertama kali yaitu layer sungai yang dilakukan dengan cara digitasi dari hulu ke hilir. Penentuan hulu dan hilir dapat dilakukan dengan melihat topografi wilayah. Proses selanjutnya itu melakukan digitasi *bank lines* dan *flow paths* *Bank lines* mendefinisikan batas sungai utama dengan bantaran sungai. Terdapat dua *bank lines* yang didigit yaitu, *bank lines* sebelah kanan dan sebelah kiri. Sama dengan *bank lines* *flow paths* juga didigitasi di sebelah kiri dan kanan. *Flow paths* ini mendefinisikan jalur aliran pada sungai utama. Layer terakhir yang dibuat pada RasMapper yaitu *cross section*. *Cross section* dibuat dari hilir ke hulu dengan penomoran *cross section* hilir lebih kecil dari *cross section* hulu. Pembuatan *cross section* yaitu memotong penampang sungai tegak lurus dengan arah aliran. *Cross section* dibuat dari arah kiri ke kanan dan memotong garis bantaran dan *flow paths* sungai. Dengan cara yang demikian maka aplikasi akan dapat membaca jarak sungai dan *bank lines* secara otomatis. Pembuatan *cross section* juga tidak boleh memotong *cross section* lainnya. Kondisi tersebut biasanya terjadi di belokan sehingga harus dilakukan pembelokan arah *cross section*.

Pembuatan layer geometri dilakukan dengan *Geometries* → *Add Geometry data* > tulis nama geometry data Geometri yang dibuat meliputi sungai, *bank lines*, *flow paths* dan *cross section*. Tahapan yang dilakukan untuk melakukan digitasi sungai, *bank lines*, *flow paths* dan *cross section* dilakukan dengan cara klik kanan > *edit geometry* (BETA) > *add new feature*. Hasil dari digitasi lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.25.

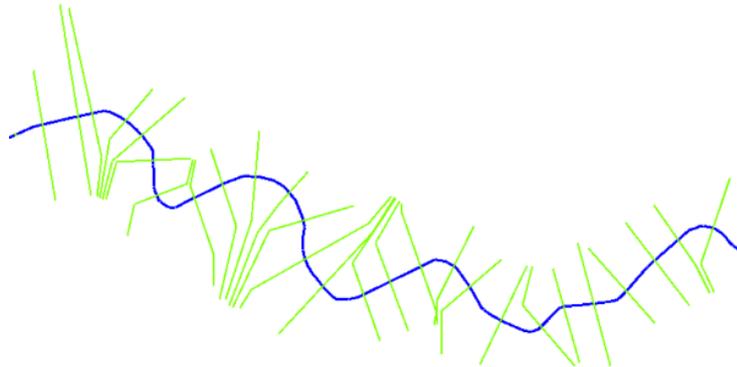


Gambar 4.25 Hasil Digitasi Lokasi Penelitian

Digitasi sungai dibatasi sepanjang 60 km. *Upstream boundary condition* berada pada lokasi paling ujung berada pada *cross section* 61992 dan merupakan area paling ujung dari area genangan Bendungan Way Sekampung. Lokasi genangan Bendungan Way Sekampung berada pada Kabupaten Tanggamus dan Pringsewu. Bendungan Way Sekampung pada model berada pada *cross section* 45752. Hilir bendungan Way Sekampung yang modelkan sepanjang 40 km dengan *downstream boundary condition* berada di Desa Kresno Widodo, Kecamatan Tegineneng, Kabupaten Pesawaran. Dari penentuan *boundary condition* tersebut, maka lokasi penelitian terdiri tiga kabupaten, yaitu Kabupaten Tanggamus, Pringsewu, dan Pesawaran. Pertimbangan dalam penentuan *boundary condition* ini memperhatikan hal-hal seperti lokasi genangan bendungan, lokasi permukiman dan pusat kegiatan masyarakat yang berada di hilir bendungan.

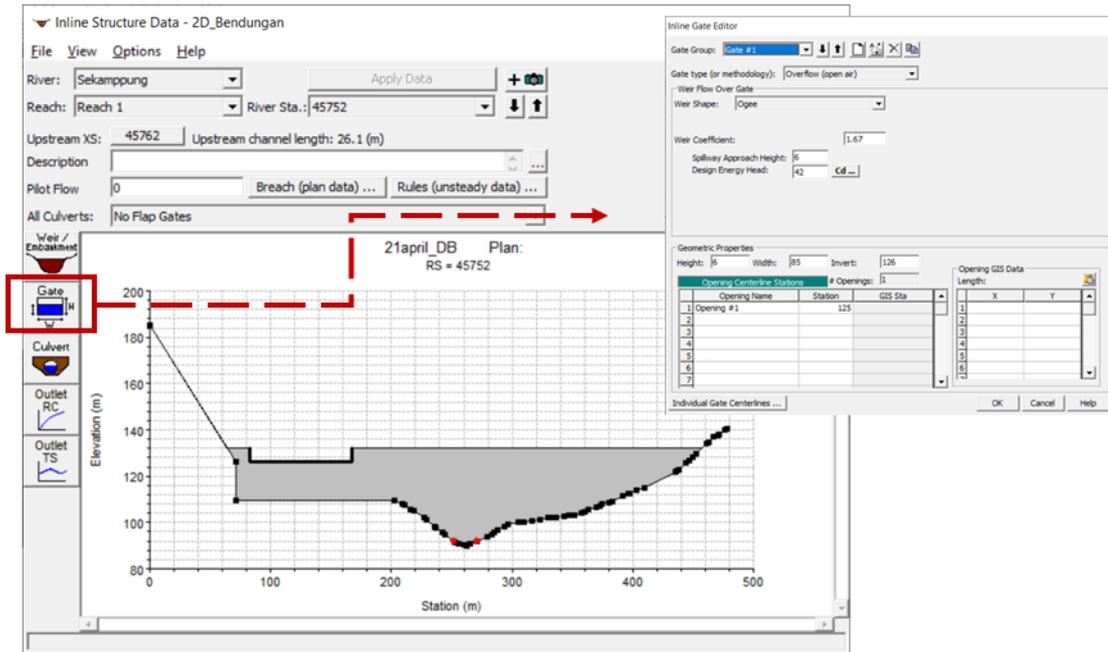
Pada *cross section*, pembuatan dilakukan dari kanan ke kiri, arah kanan dilihat dari arah aliran sungai. Jarak antar *cross section* dibuat ± 100 m pada sungai lurus dan lebih rapat lagi pada sungai yang berkelok. Penentuan jarak 100 m ini ditentungkan berdasarkan asumsi bahwa dengan jarak 100 m cukup representatif untuk mengetahui bentuk sungai dan dapat dibuat simulasinya. Semakin rapat *cross section* maka diharapkan hasil simulasi akan lebih sesuai dengan kondisi di lapangan. Pada sungai yang berkelok (*meandering*), *cross section* yang lebar dan berdekatan akan mengakibatkan perpotongan. Kondisi ini dapat disiasati dengan melakukan belokan pada *cross section* agar tidak saling memotong. Akan tetapi cara ini akan membuat geometri sungai kurang sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Ilustrasi *cross section* pada daerah berbelok hasil keseluruhan digitasi geometri dapat dilihat pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Pembuatan Cross Section Pada Belokan Sungai

Cross section yang dibuat pada menu Rasmapper akan terbaca pada menu *cross section* di menu geometri. Selanjutnya dilakukan peniruan geometri bendungan. Pada Tabel 4.1 dijelaskan bahwa puncak Bendungan Way Sekampung ada pada elevasi +130. Akan tetapi, terdapat perbedaan elevasi pada DEM dan lapangan. Pada data lapangan, elevasi tanah asli bendungan adalah +87 sedangkan pada DEM, elevasi terendah yaitu +90, sehingga geometri bendungan ditinggikan dari yang +130 menjadi +133. *Spillway* yang dibuat pada model hanya menggunakan pelimpah bebas. Hal ini sesuai dengan batasan masalah penelitian ini, yang tidak memodelkan pelimpah berpintu. Hasil dari peniruan geometri bendungan dapat dilihat pada Gambar 4.27.

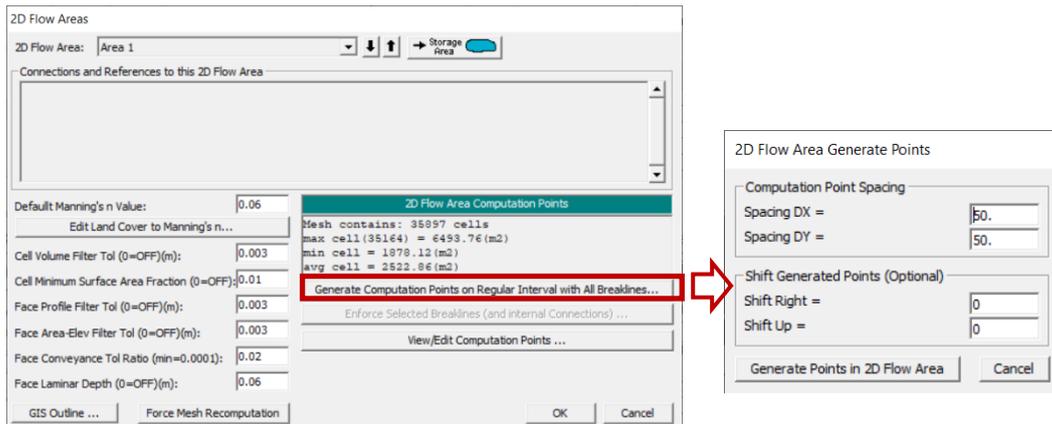


Gambar 4.27 Pengaturan *Inline Structure*

4.4.4 2D Flow Area

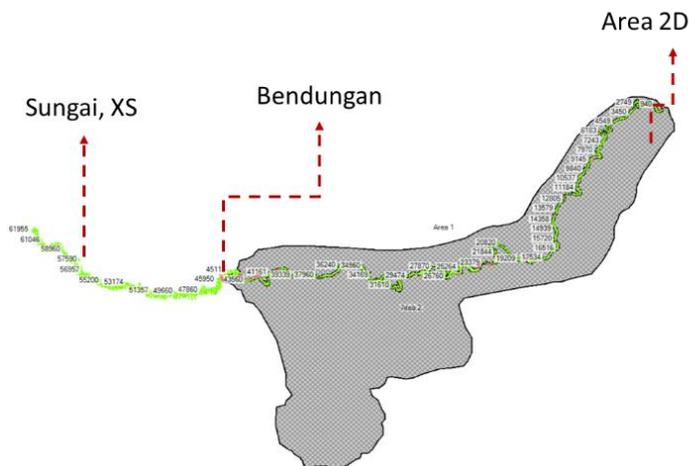
2D flow area pada studi ini merupakan daerah genangan yang berada sisi luar sungai. Genangan yang terjadi pada area ini disebabkan meluapnya air dari Sungai Way Sekampung akibat tumpukan air dari keruntuhan Bendungan Way Sekampung. Penentuan *2D flow area* didasarkan pada lokasi yang memiliki elevasi bantaran sungai rendah.

Pembuatan *2D flow area* dapat dilakukan melalui menu Rasmapper dengan cara mengaktifkan *geometry 2D Flow Areas > Perimeters > add new feature*. Aturan dalam digitasi *2D flow area* harus menyentuh bagian *cross section* agar dapat terhubung dengan model 1D. Setelah *2D flow area* dibuat, dapat dilakukan editing dengan cara mengaktifkan menu *editor geometric* data seperti pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Menu Editor 2D Flow Area

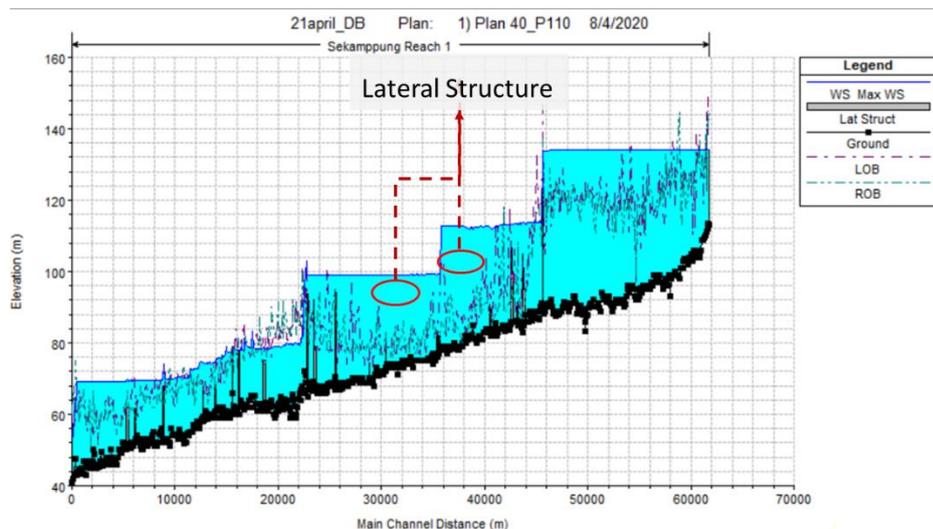
Pada Menu Edit 2D Flow Area, terdapat pengaturan *Default Manning's value* untuk memasukkan nilai manning yang merepresentasikan kekasaran lahan pada area 2D. Jika terdapat perbedaan nilai kekasaran manning, terdapat opsi penambahan klasifikasi penggunaan lahan dengan mengaktifkan menu *land cover*. Akan tetapi pada penelitian ini tidak diberikan nilai manning yang berbeda karena belum mempertimbangkan tata guna lahan yang ada di hilir, sehingga nilai manning yang digunakan yaitu 0,06. Nilai 0,06 ini merupakan nilai manning tepi kiri dan kanan sungai ditambah dengan 25% nilai tersebut. Hal ini sesuai dengan literatur Balai Bendungan (2019) yang menyebutkan persamaan manning harus lebih tinggi 25% dari kondisi normal dikarenakan adanya turbulensi dan kehilangan energi yang ditimbulkan gelombang banjir akibat keruntuhan bendungan. Adapun hasil dari penambahan 2D area pada model dapat dilihat pada Gambar 4.29.



Gambar 4.29 Geometri model setelah penambahan area 2D

4.4.5 Menghubungkan 2D flow area dengan 1D

Model 1D dan 2D dapat dihubungnkan melalui pembuatan *lateral structure*. *Lateral structure* ini terbaca dalam model sebagai tanggul berfungsi mengalirkan air dari model 1D ke *area* 2D. Pemilihan lokasi *lateral structure* memperhatikan lokasi daerah yang tergenang. Pada Gambar 4.30 memperlihatkan penentuan lokasi *lateral structure* memperhatikan lokasi tinggi genangan yang lebih tinggi dari tepian sungai kiri dan tepian sungai kanan sehingga air akan meluap ke *area* 2D.



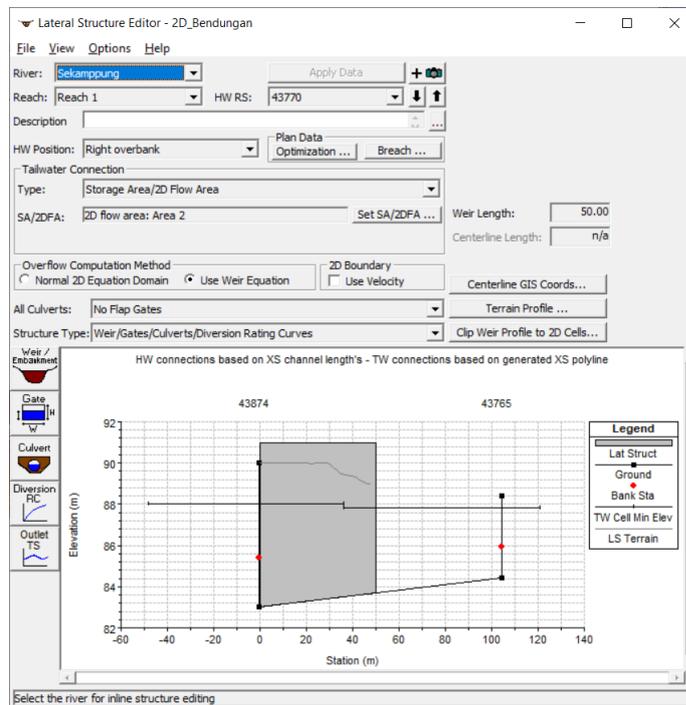
Gambar 4.30 Penentuan lokasi *lateral structure*

Dari Gambar 4.30 dapat dilihat bahwa *lateral structure* dibuat pada 4 lokasi, yaitu pada *cross section* 43770, 38260, 35665, dan 23422. Pertimbangan pemilihan lokasi ini yaitu kondisi dimana ketinggian air pada posisi maksimum melebihi posisi tepian sungai.

Proses yang dilakukan untuk menghubungkan model 1D dan 2D adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis lokasi hilir bendungan yang memiliki elevasi rendah,
2. Mengaktifkan menu lateral Structure, dengan memilih menu *Lateral Structure > Option*,
3. Menentukan besarnya *lateral structure* dengan cara memilih *weir / embankment > mengisi tabel embankment station / elevation table > mengisi weir coefficient > mengisi HW distance to upstream XS*.

Tampilan penentuan *lateral structure* ditampilkan pada Gambar 4.31.



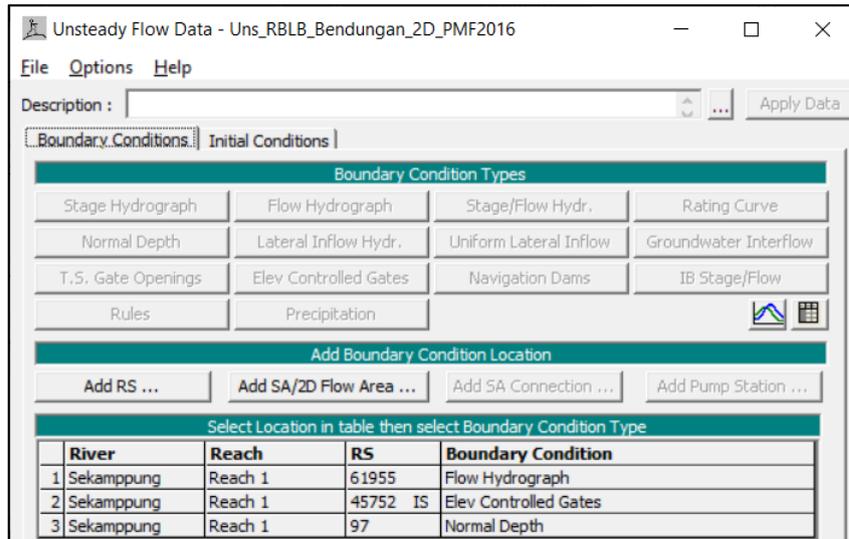
Gambar 4.31 *Lateral Structure*

4.4.6 *Unsteady Flow Data*

Unsteady flow data yang diinput pada aplikasi ini terdiri dari dua kondisi, yaitu pada kondisi batas hulu (*upstream boundary condition*) dan kondisi batas hilir (*downstream boundary condition*). Tipe kondisi batas hulu yang dipergunakan pada simulasi ini yaitu hidrograf aliran debit terhadap waktu (*flow hydrograph*). Sedangkan pada kondisi batas hilir ditetapkan menggunakan *normal depth*, karena tidak terdapat data pencatatan air di hilir.

Pengisian data untuk *flow hydrograph* dilakukan berdasarkan data hidrologi yang telah dijelaskan pada Gambar 4.15. Tipe kondisi batas *normal depth* diisi berdasarkan data kemiringan (*slope*). Perhitungan *slope* dilakukan dengan membagi nilai beda elevasi hulu – hilir dengan panjang sungai. Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai *slope* adalah sebesar 0,0035.

Adanya pelimpah bebas yang dimodelkan menggunakan menu *gate* menyebabkan pengisian *unsteady flow data* ini juga memerlukan pengisian kondisi pintu air. Ilustrasi pengisian pintu air dapat dilihat pada Gambar 4.32.



Gambar 4.32 Pemilihan *unsteady flow data*

4.4.7 Variabel Keruntuhan Bendungan

Pengaturan variabel keruntuhan bendungan mengikuti formulasi Froehlich (2008), dimana variabel yang dibutuhkan untuk data perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Input Data Perhitungan Variabel Keruntuhan Bendungan

| Variabel | <i>Overtopping</i> | <i>Piping</i> | Satuan |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|---------|
| Elevasi Puncak Bendungan | +132 | +132 | m |
| Elevasi Dasar Bendungan | + 95 | + 95 | m |
| Tinggi Rekahan (H_b) | 37 | 37 | m |
| Volume Waduk saat Rekahan (V_w) | 68×10^6 | 68×10^6 | m^3 |
| Percepatan grafitasi (g) | 9,81 | 9,81 | m/s^2 |
| $K_{\text{overtopping}}$ | 1,3 | 1 | |
| Kemiringan sudut rekahan (H/V) | 1 | 0,7 | |

Sumber : Analisis (2020)

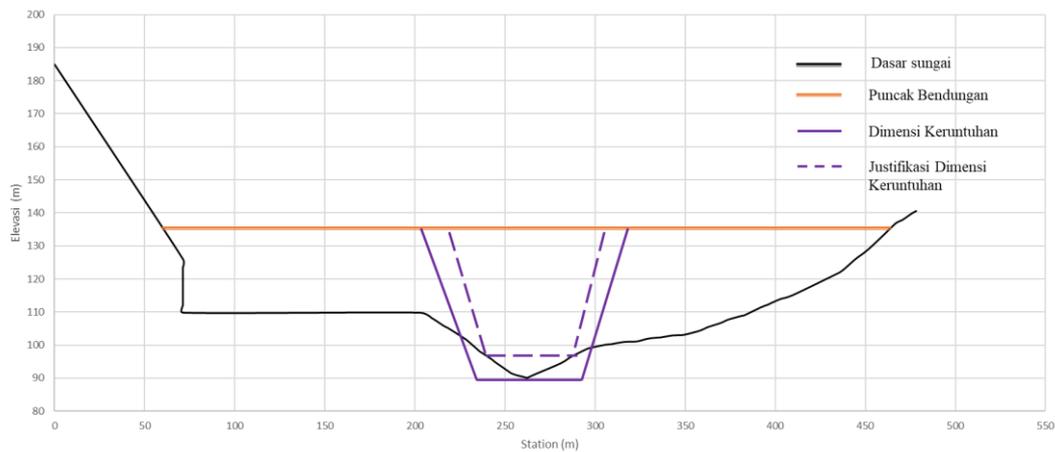
Hasil dari analisis pada tabel 4.9 kemudian dihitung menggunakan rumus (2.1) (2.2), (2.3) dan (2.4) yang telah disajikan pada **sub bab 2.3.1**.

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Variabel Keruntuhan Bendungan

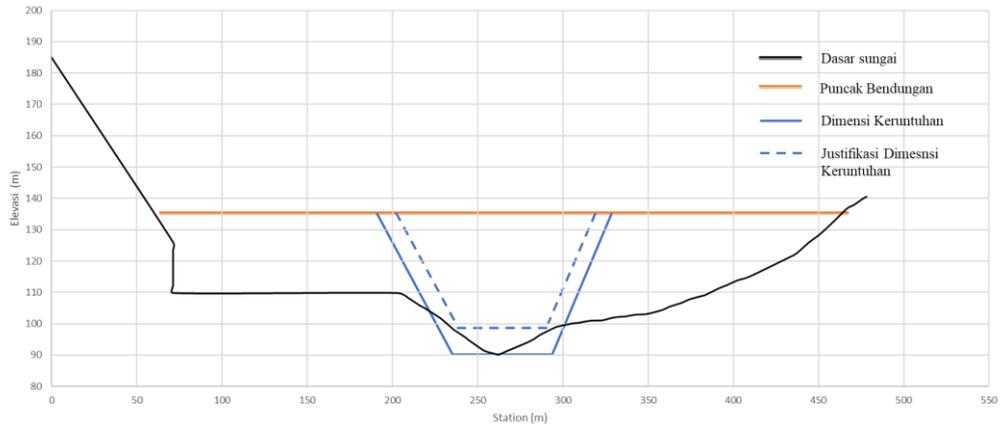
| Variabel | <i>Overtopping</i> | <i>Piping</i> | Satuan |
|---------------------------------------|--------------------|---------------|--------|
| Waktu Formasi (t_f) | 1.25 | 1.25 | jam |
| Lebar rekahan rata-rata (\bar{B}) | 130.18 | 100.14 | m |
| Lebar rekahan atas | 167,18 | 126,04 | m |
| Lebar rekahan bawah | 93,18 | 74,24 | m |

Sumber : Analisis (2020)

Berdasarkan perhitungan di atas kemudian dilakukan pengaturan dimensi keruntuhan bendungan. Sebelum dilakukan plotting pada aplikasi, perlu dilakukan penyesuaian terhadap hasil perhitungan. Berdasarkan literatur dari Froehlich (2008), formulasi perhitungan rekahan Froehlich tidak mengakomodir gerusan pada topografi lembah. Oleh sebab itu sesuai yang dilakukan Novan (2016), dilakukan justifikasi variabel dimensi keruntuhan bendungan yang sesuai dengan topografi lembah daerah studi. Justifikasi dimensi keruntuhan bendungan Way Sekampung dapat dilihat pada Gambar 2.33 dan 4.34.

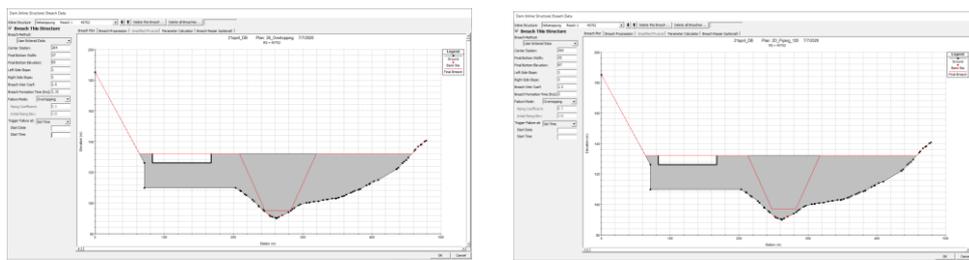


Gambar 4.33 Dimensi Keruntuhan Bendungan akibat *Piping*



Gambar 4.34 Dimensi Keruntuhan Bendungan Akibat *Overtopping*

Hasil justifikasi dimensi keruntuhan bendungan kemudian dimasukkan ke dalam menu *dam inline structure breach data* yang berada pada menu *Unsteady flow simulation > Option > dam inline (structure breach)*. Ilustrasi pengaturan dapat dilihat pada Gambar 4.35.



Gambar 4.35 Pengaturan *Dam Inline Structure Breach Data*

Gambar 4.35 memperlihatkan pengaturan variabel keruntuhan bendungan dengan mode kegagalan *piping* dan *overtopping*. Pengaturan mode kegagalan diatur sesuai dengan skenario penelitian, yang terdiri dari *piping* pada elevasi tubuh bendung bagian atas, tengah dan bawah, serta *overtopping*. Elevasi *piping* yang dipilih yaitu elevasi 100, 110 dan 120. Pertimbangan pemilihan elevasi *piping* didasarkan pada topografi dasar sungai dan justifikasi dimensi keruntuhan bendungan. Topografi dasar sungai terendah berada pada elevasi 90 serta hasil justifikasi dimensi keruntuhan bendungan terendah yang berada pada elevasi 95, sehingga dipilih elevasi terendah *piping* terdapat pada elevasi 100. Selanjutnya elevasi *piping* tertinggi ditentukan berada pada +120 berdasarkan pertimbangan elevasi muka air normal bendungan yang berada pada elevasi +126. Pada skenario

overtopping hanya dilakukan satu kali karena *overtopping* hanya dipengaruhi debit PMF. Pada semua skenario, pengaturan waktu terjadinya keruntuhan bendungan berada pada saat debit PMF.

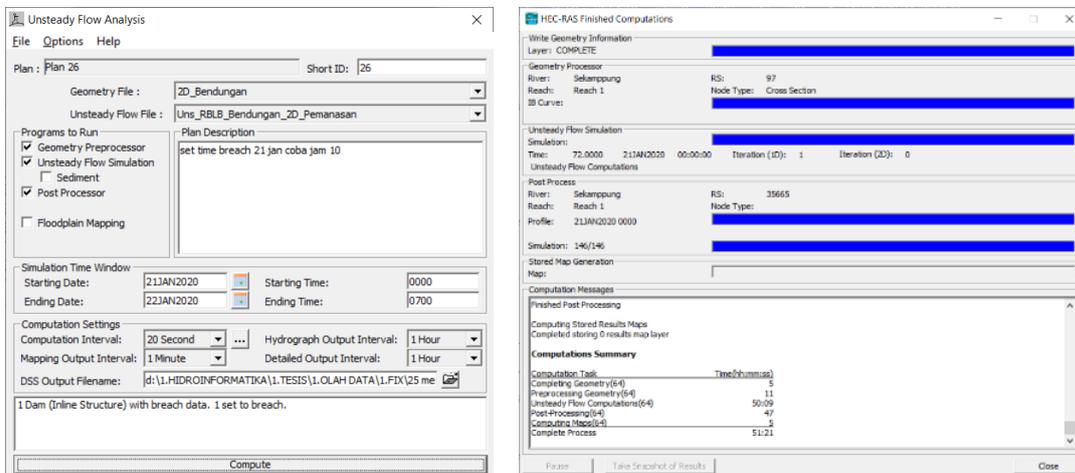
Setelah dilakukan pengaturan variabel keruntuhan bendungan, dipilih opsi *breach this structure* sehingga HEC-RAS akan melakukan simulasi dengan skenario dengan kondisi bendungan runtuh. Selanjutnya simulasi keruntuhan bendungan dapat dijalankan.

4.4.8 Running Model dan Output Simulasi

Terdapat beberapa pengaturan yang dilakukan sebelum model dapat dijalankan, yaitu:

1. Waktu simulasi : pengisian dilakukan sesuai dengan data yang diisi pada *flow hydrograf* , yaitu selama 31 jam.
2. Selang waktu komputasi (*time step*) : 10 detik
3. Selang waktu keluaran : 1 menit.

Gambar 4.35 menunjukkan pengaturan simulasi model dan contoh notifikasi HEC-RAS ketika *running* yang dilakukan berhasil.



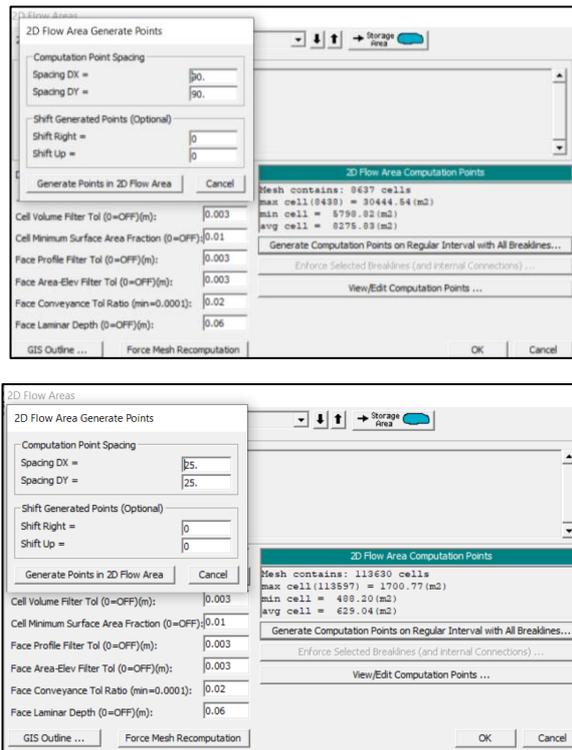
Gambar 4.36 Pengaturan *running* dan notifikasi *running* selesai

Hasil *running* ke-4 skenario menghasilkan informasi sebagai berikut:

1. Profil muka air sungai;
2. Kedalaman, kecepatan dan debit;
3. Hidrograf debit dan elevasi muka air

4.5 Kalibrasi Model

Kalibrasi model dilakukan dengan melakukan perbandingan hasil yang *running* model dengan variasi mesh. Nilai *mesh* yang diujikan pada model terdiri dari 3 nilai, yaitu : 25 x 25, 50 x 50, dan 90 x90. Gambar 4.37 menyajikan perbandingan *cell* pada menu *2D flow area*. *Cell* yang terdapat pada *mesh* 25x25 akan lebih banyak dibandingkan dengan *cell* pada *mesh* 50 x 50 dan 90 x 90. Hal ini menunjukkan semakin kecil mesh yang ditentukan akan memperbesar jumlah *cell* yang dihasilkan.



Gambar 4.37 Penentuan mesh pada *2D Flow Area*

Geometri dari setiap mesh kemudian dimodelkan dengan *boundary condition* yang sama. Pada model ini *boundary condition* menggunakan *unsteady flow data*, debit PMF, dan skenario yang diuji adalah skenario *piping* di elevasi +120. Dari hasil *running* model terdapat perbedaan luasan genangan banjir yang dihasilkan. Adapun perbedaan tersebut disajikan pada tabel 4.15.

Tabel 4.15 Perbandingan luasan genangan berdasarkan variasi mesh

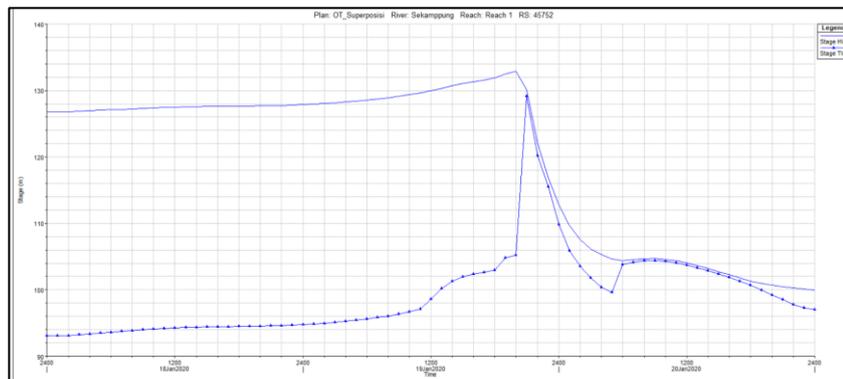
| Variasi Mesh | Luas genangan |
|--------------|----------------------|
| 25 | 35,6 km ² |
| 90 | 39,2 km ² |

Sumber : analisis data (2020)

Dari Tabel 4.15 dapat dilihat bahwa adanya perbedaan mesh berpengaruh terhadap luasan genangan banjir. Oleh karena itu dapat disimpulkan model ini telah dapat digunakan untuk melakukan pemodelan.

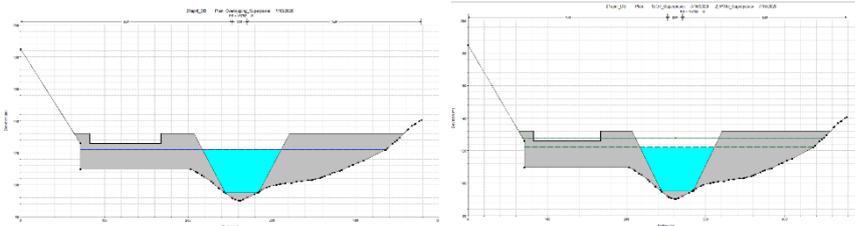
4.6 Analisis Hidrolika

Analisis hidrolika dilakukan untuk mengetahui kondisi penampang sungai dan aliran hilir dalam menampung aliran banjir. Analisis hidrolika ini kemudian dapat diolah menjadi data genangan. Setelah dilakukannya *running* model, didapatkan data bahwa pada debit PMF, aliran air telah melampaui tinggi bendungan yaitu setinggi 133.1 (Gambar 4.38). tingginya air sampai melebihi puncak bendungan dikarenakan kapasitas pelimpah bebas tidak mencukupi untuk mengalirkan debit PMF. Tidak berfungsinya pelimpah berpintu menyebabkan air melimpah melewati puncak bendungan, sehingga skenario *overtopping* dapat dilakukan.



Gambar 4.38 Hidrograf debit *head water* dan *tail water*

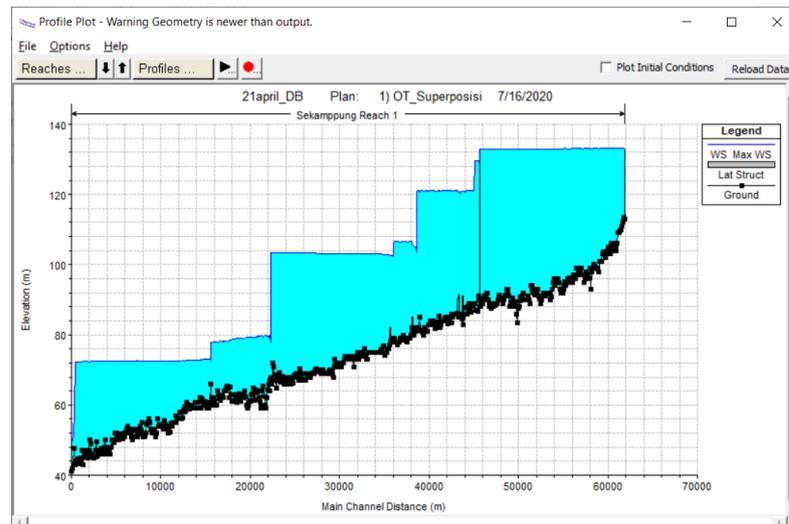
Gambar 4.39 memperlihatkan kondisi bendungan setelah mengalami keruntuhan. Terlihat adanya rekahan sesuai dengan dimensi yang ditentukan pada tabel 4.14.



Gambar 4.39 Kondisi Bendungan Setelah Keruntuhan

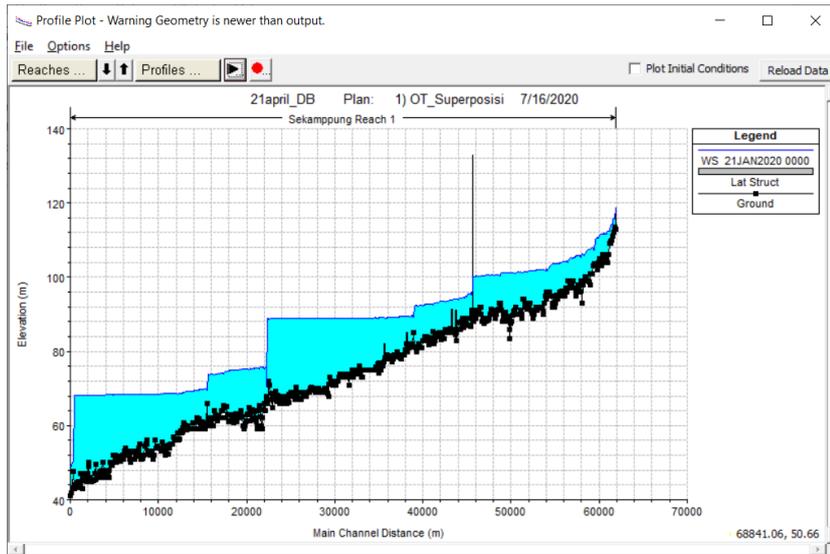
4.6.1 Analisis Skenario *Overtopping*

Berdasarkan hasil simulasi, adanya aliran debit di hulu yang bertambah dengan tiba-tiba menyebabkan kenaikan muka air di hilir. Gambar 4.41 dan 4.41 menunjukkan perbedaan antara profil muka air pada kondisi maksimum dan saat simulasi berakhir. Pada saat kondisi ketinggian air maksimum di *cross section* 45690 elevasi muka air berada pada +129.34 dan kedalaman sebesar 36,32 m.



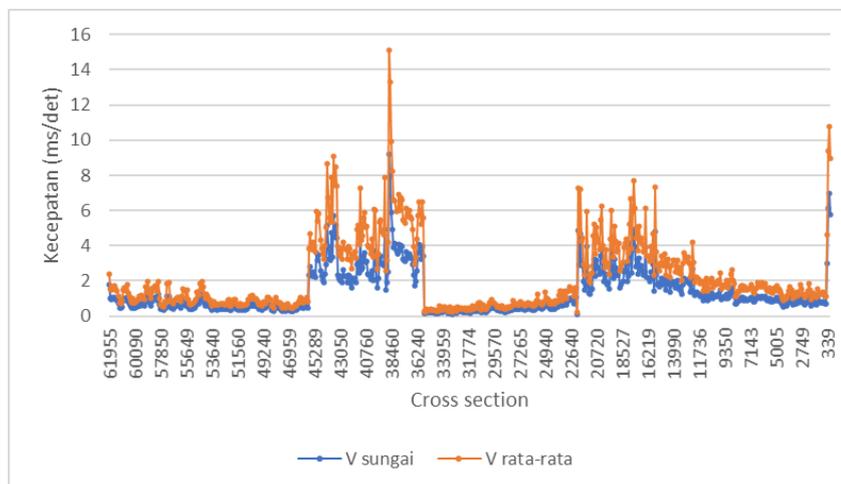
Gambar 4.40 Profil muka air maksimum skenario *overtopping*

Kondisi waduk setelah simulasi berakhir terlihat elevasi muka air dalam bendungan mengalami penurunan karena bendungan telah hancur dan air mengalir ke hilir.



Gambar 4.41 Profil muka air di akhir simulasi

Gambar 4.42 menunjukkan kecepatan aliran yang terjadi di sepanjang sungai pada kondisi maksimum. Besarnya kecepatan aliran dapat dipengaruhi beberapa faktor seperti kemiringan dasar sungai, bentuk penampang sungai, tingkat kekasaran penampang sungai dan volume air. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan besar kecepatan terbesar pada aliran utama adalah 9.21 m/det dan kecepatan rata-rata adalah 5,91 m/det.

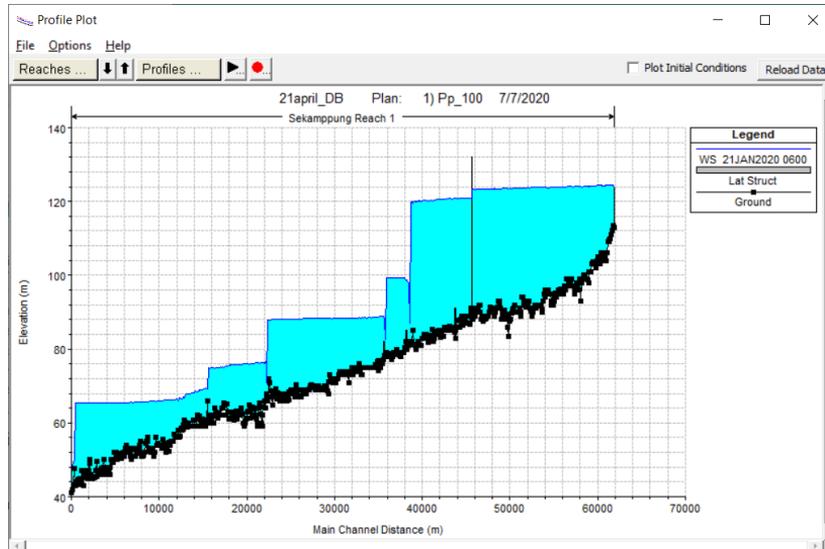


Gambar 4.42 Grafik Kecepatan Skenario *Overtopping*

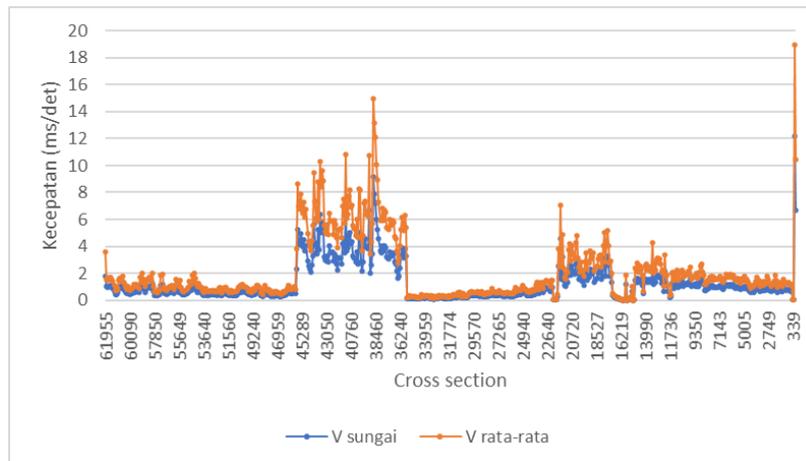
4.6.2 Analisis Skenario *Piping* Elevasi +100

Hasil Simulasi keruntuhan dengan *failure mode piping* di elevasi 100 menunjukkan bahwa setelah terjadinya keruntuhan bendungan, kedalaman pada

cross section 45690 yang berada 50 m yaitu sebesar 29,81 m. Kedalaman pada lokasi ini yang paling tinggi karena jaraknya yang paling dekat dengan bendungan. Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.43.



Gambar 4.43 Profil muka air maksimum skenario *piping* elevasi +100

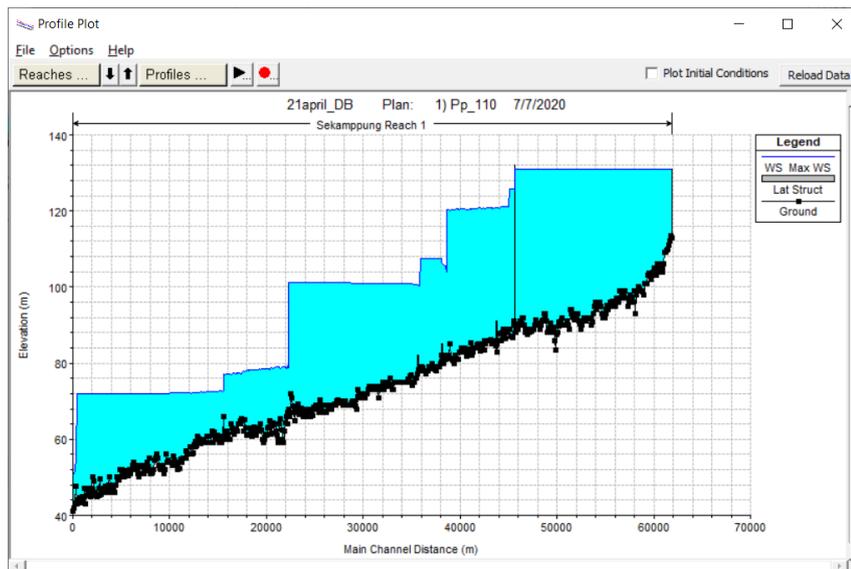


Gambar 4.44 Profil kecepatan Jam ke-6 Skenario *Piping* elevasi +100

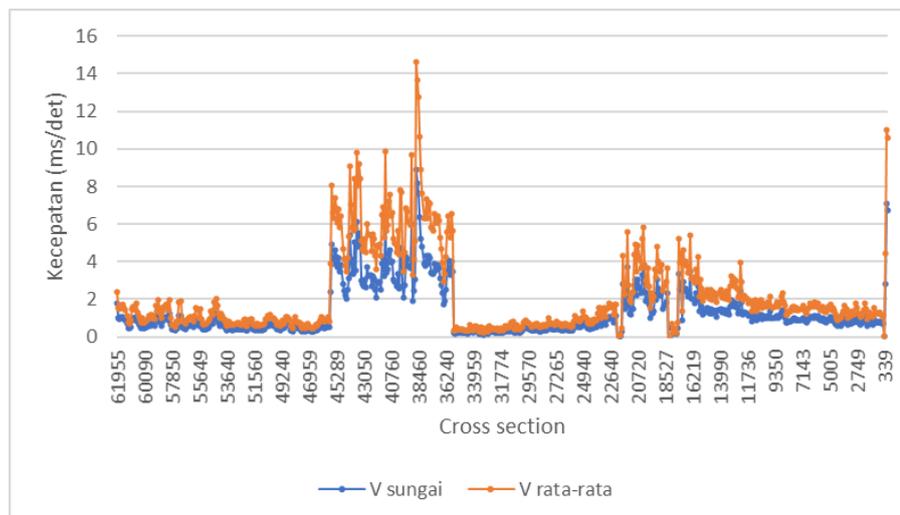
Gambar 4.44. menunjukkan kecepatan aliran yang terjadi di sepanjang sungai sesaat setelah terjadinya keruntuhan bendungan. Besarnya kecepatan aliran dapat dipengaruhi beberapa faktor seperti kemiringan dasar sungai, bentuk penampang sungai, tingkat kekasaran penampang sungai dan volume air. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan kecepatan terbesar pada skenario *piping* +100 adalah 12,19 m/det pada *cross section* 238.

4.6.3 Analisis Skenario *Piping* Elevasi +110

Hasil Simulasi keruntuhan dengan *failure mode piping* di elevasi 110 menunjukkan bahwa setelah terjadinya keruntuhan bendungan, kedalaman terbesar terjadi pada *cross section* 45690 yang berada 50 m dari dengan kedalaman sebesar 29,69 m. Kedalaman pada lokasi ini yang paling tinggi karena jaraknya yang paling dekat dengan bendungan. Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.45.



Gambar 4.45 Profil aliran kondisi maksimum skenario *piping* elevasi +110

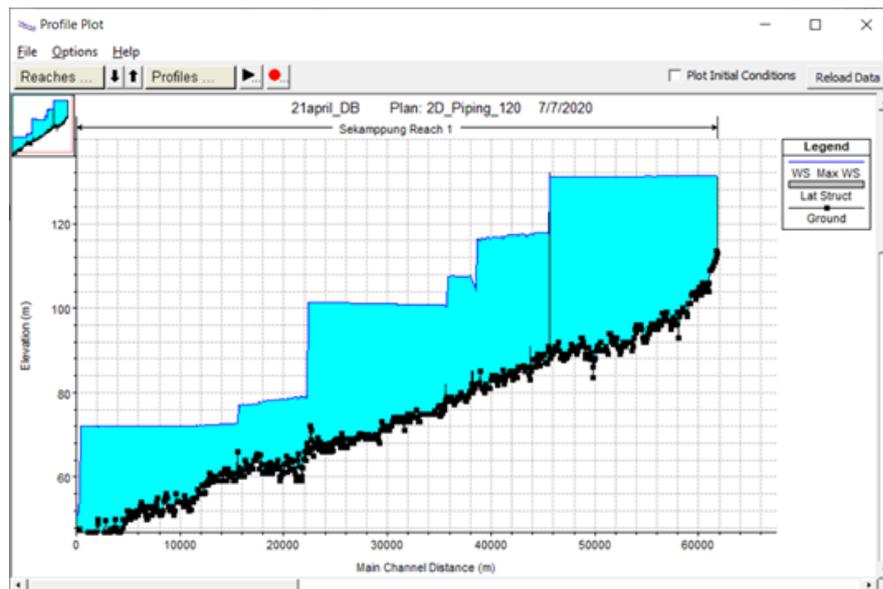


Gambar 4.46 Profil kecepatan aliran jam ke-6 skenario *piping* elevasi +110

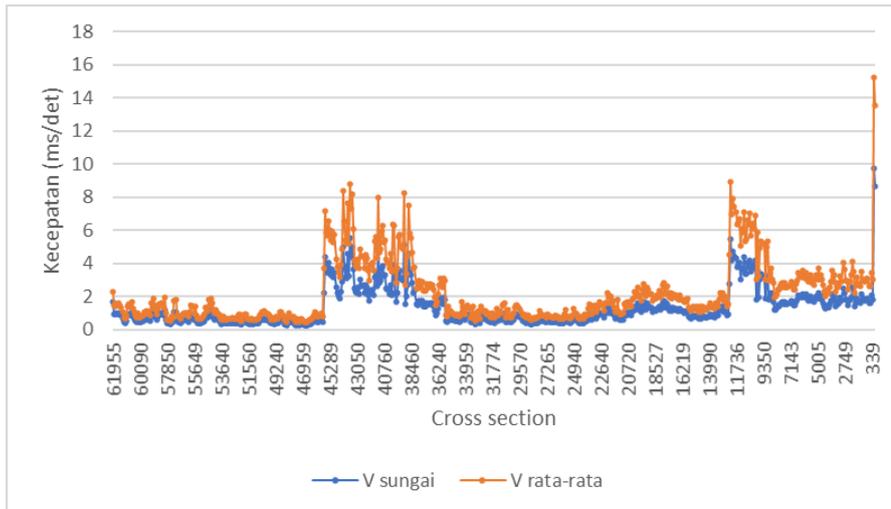
Besarnya kecepatan aliran dapat dipengaruhi beberapa faktor seperti kemiringan dasar sungai, bentuk penampang sungai, tingkat kekasaran penampang sungai dan volume air. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan besar kecepatan terbesar berada pada aliran sungai *cross section* 38669 yaitu sebesar 8,93 m/det. Rata-rata kecepatan dihitung berdasarkan rata-rata kecepatan pada sungai utama, tepi kiri dan tepi kanan sungai, yang menghasilkan kecepatan sebesar 5,54 m/det.

4.6.4 Analisis Skenario *Piping* Elevasi +120

Hasil Simulasi keruntuhan dengan *failure mode piping* di elevasi +120 menunjukkan setelah terjadinya keruntuhan, kedalaman terbesar terjadi pada *cross section* 45690 yang berada 50 m dari bendungan, yaitu sebesar 26,67 m. Kedalaman pada lokasi ini yang paling tinggi karena jaraknya yang paling dekat dengan bendungan. Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.47.

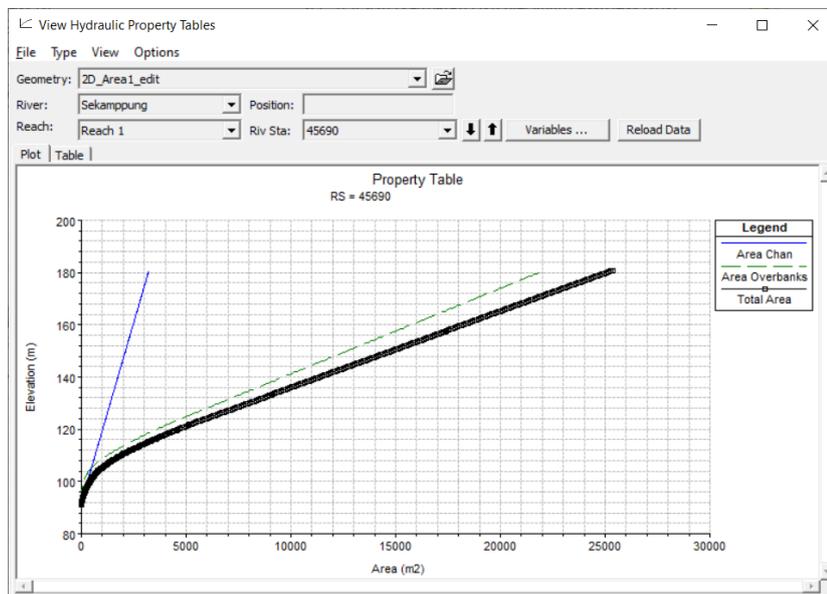


Gambar 4.47 Profil aliran kondisi maksimum skenario *piping* elevasi +120



Gambar 4.48 Profil kecepatan aliran menit ke-30 skenario *piping* +120

Besarnya kecepatan aliran terbesar pada skenario Piping +120 pada sungai utama adalah sebesar 9,71 m/det yang terjadi pada *cross section* 97. Berdasarkan hitungan rata-rata kecepatan air di saluran dan tepi kiri kanan sungai, didapatkan rata-rata kecepatan adalah 5.54 m/det pada *cross section* 238.



Gambar 4.49 Perbandingan elevasi dan luas area

Gambar 4.49 memperlihatkan perbandingan elevasi dan luas area pada *cross section* 45690. *Cross section* ini dipilih karena merupakan *cross section* daerah hilir yang letaknya paling dekat dengan bendungan. Luasan area yang ditampilkan pada Gambar 4.48 terdiri dari luas area saluran (sungai), area tepi

sungai dan total area sungai ditambah dengan tepi kanan dan kiri sungai. Jumlah luasan total adalah pada 25.337 m² dengan evelasi +180,68.

4.6.5 Perbandingan Analisis Skenario

Berdasarkan analisis skenario *overtopping* dan *piping*, dilakukan perbandingan analisis data kecepatan pada setiap skenario, yang disajikan pada Tabel 4.16.

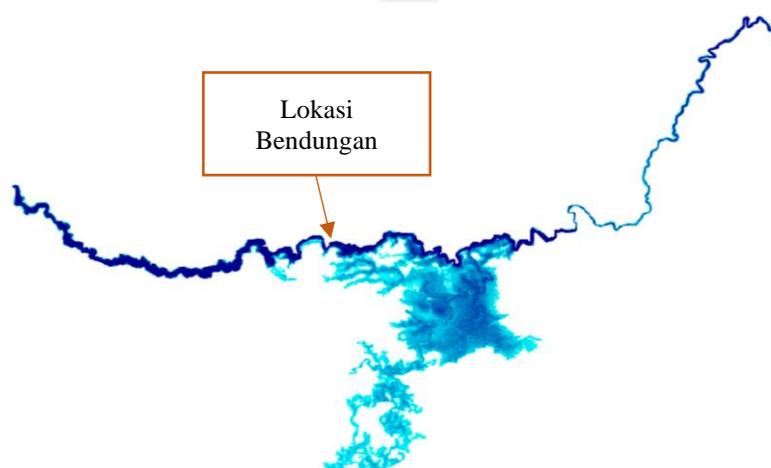
Tabel 4.16 Perbandingan Analisis Data

| Skenario | V _{max} (m/det) | V _{rata-rata} (m/det) | Lokasi <i>Cross section</i> |
|--------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| <i>Overtopping</i> | 9,21 | 5,91 | 22415 |
| <i>Piping</i> +100 | 12,19 | 6,75 | 238 |
| <i>Piping</i> +110 | 8,93 | 5,72 | 38669 |
| <i>Piping</i> +120 | 9,71 | 5,54 | 238 |

Sumber : Analisis Data (2020)

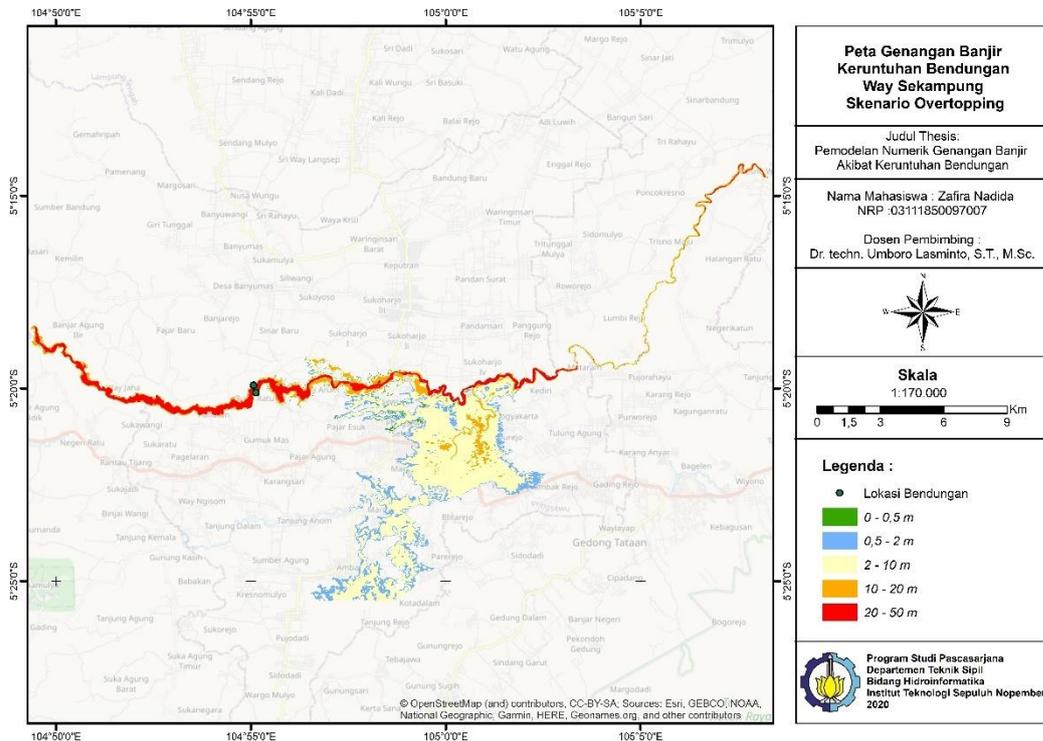
4.7 Analisis Genangan

Analisis genangan banjir dilakukan menggunakan rasmapper dan QGIS 3.4 Madeira. Hasil dari peta kedalaman dari *Rasmapper* ini kemudian di-export ke dalam aplikasi QGIS. Format *file* yang didapatkan dari *Rasmapper* adalah tif, kemudian diubah menggunakan QGIS menjadi data vektor.



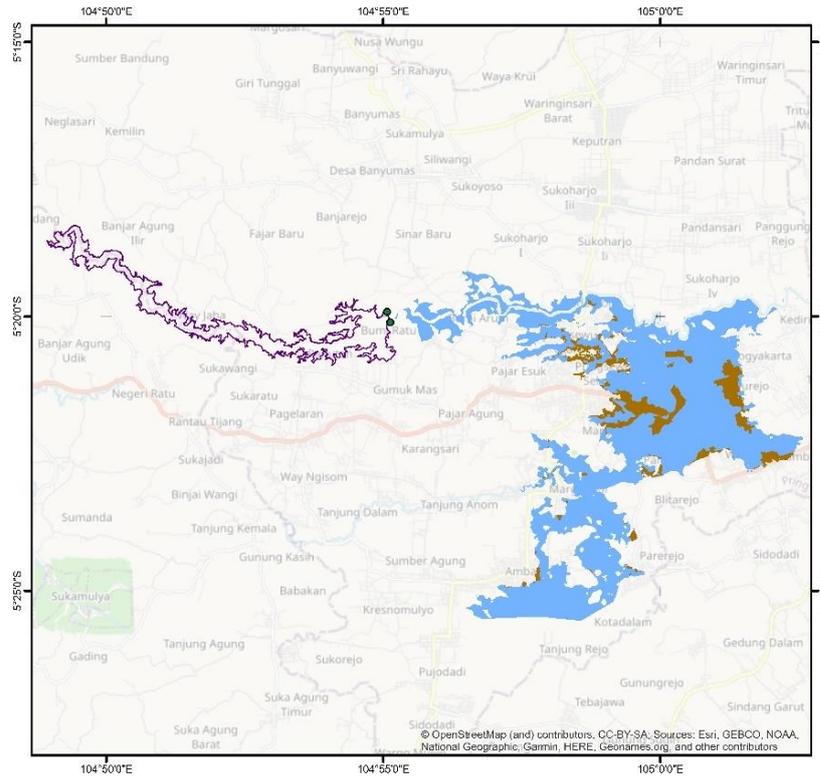
Gambar 4.50 Banjir Maksimum Skenario *Piping* +120 pada Rasmapper

Pemrosesan data yang dilakukan pada aplikasi QGIS meliputi penggolongan kedalaman pada wilayah studi dan analisis luas genangan. Klasifikasi kedalaman dibagi menjadi 5, yaitu kedalaman 0 – 2 m, 2 – 5 m, 5 – 10 m, 10 – 25, dan 15 – 48 m. Dasar klasifikasi ini dikembangkan dari penelitian yang dilakukan Wirustyastoko (2013) seperti yang telah dijabarkan pada Tabel 2.1. Hasil dari klasifikasi ketinggian genangan kemudian disajikan pada Gambar 4.46. Kondisi yang disajikan pada Gambar 4.46 adalah kondisi ketinggian air maksimum skenario *piping +120*.



Gambar 4.51 Peta Banjir Maksimum Skenario *Piping +120*

Setelah dilakukan klasifikasi ketinggian genangan, dilakukan *overlay* antara gambar 4.51 area genangan diluar saluran utama, yang dalam penelitian direpresentasikan oleh area 2D. Gambar 4.51 memperlihatkan hasil *overlay* Gambar 4.52 dengan area 2D pada skenario *piping +120*.



Gambar 4.52 Peta genangan banjir Skenario *Piping +120*

Analisis luas genangan dilakukan pada ke-4 skenario, sehingga menghasilkan data yang disajikan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Perbandingan Luasan Genangan

| Kode | Ketinggian (m) | Luas (km ²) | | | |
|--------------|----------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | <i>Overtopping</i> | <i>Piping +100</i> | <i>Piping +110</i> | <i>Piping +120</i> |
| 1 | 0-2 | 0.47 | 8.55 | 8.60 | 7.35 |
| 2 | 2-5 | 8.14 | 12.63 | 12.66 | 12.76 |
| 3 | 5-10 | 28.34 | 15.64 | 15.66 | 17.28 |
| 4 | 10-15 | 3.55 | 2.82 | 2.81 | 4.66 |
| 5 | 15-30 | 0.70 | 1.15 | 1.08 | 1.13 |
| Total | | 41.20 | 40.79 | 40.81 | 43.17 |

Sumber: Analisis Data (2020)

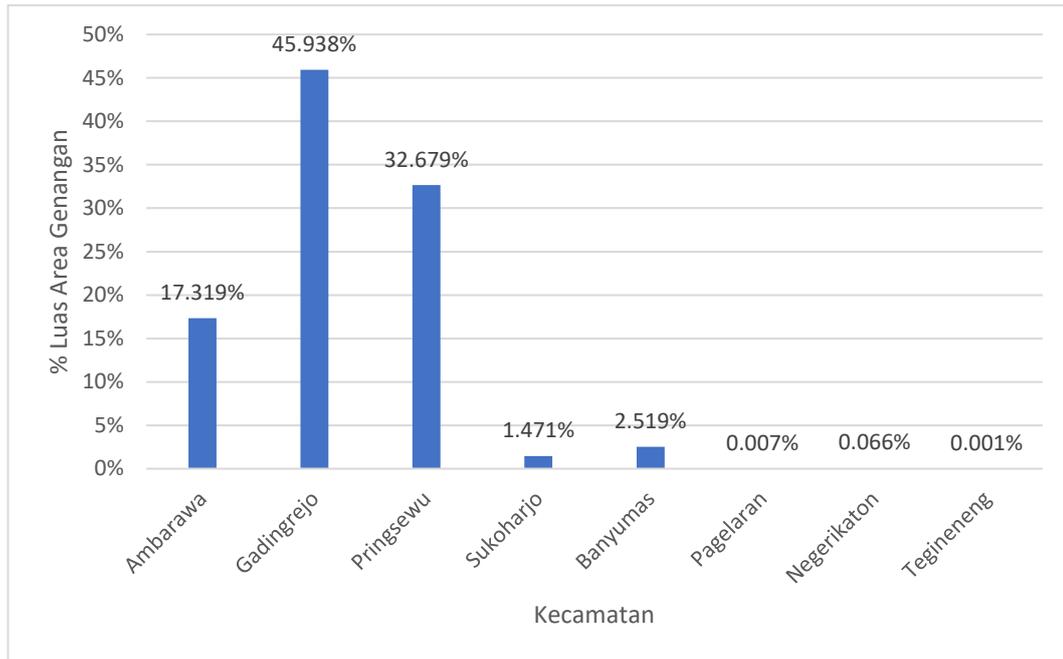
Pada gambar 4.48 diperlihatkan bahwa klasifikasi ketinggian air sampai dengan 50m, akan tetapi setelah dilakukan analisis lebih lanjut, ketinggian air 30-50 m hanya terjadi pada genangan waduk dan saluran utama di sungai. Oleh sebab itu

pada analisis genangan pada Tabel 4.17 hanya kriteria genangan kode 5 pada genangan banjir di hilir dari 15 m – 30m.

Berdasarkan perbandingan luas genangan pada Tabel 4.16, dapat disimpulkan bahwa ketinggian genangan 5m – 10m merupakan ketinggian genangan terluas pada semua skenario. Selanjutnya adalah genangan dengan ketinggian 0m – 2m, 2m – 5m, 10m – 15m, dan terakhir adalah 15m – 30m. Ketinggian air 30m berada pada daerah sekitar *lateral structure* 43770, atau berada 200 m dari *spillway* bendungan. Selanjutnya ketinggian air di hilir tertinggi yaitu adalah 15m.

Berdasarkan perbandingan total luasan, keruntuhan bendungan yang disebabkan *overtopping* menghasilkan genangan yang lebih luas dibandingkan dengan *piping +100* dan *piping +110*. Kondisi ini dapat disebabkan dimensi rekahan yang dihasilkan *overtopping* lebih besar dibandingkan dengan *piping +100* dan *piping +110*. Sedangkan pada *piping +120* merupakan skenario dengan genangan paling luas. Dilihat dari proses rekahannya, skenario *piping +120* lebih tinggi mempunyai elevasi yang lebih tinggi dari skenario *piping* lainnya sehingga mempunyai tekanan air yang lebih besar dan menghasilkan kecepatan aliran yang tinggi. Selanjutnya dilakukan analisis genangan pada skenario *piping* di elevasi +120, sebagai skenario dengan genangan banjir paling luas.

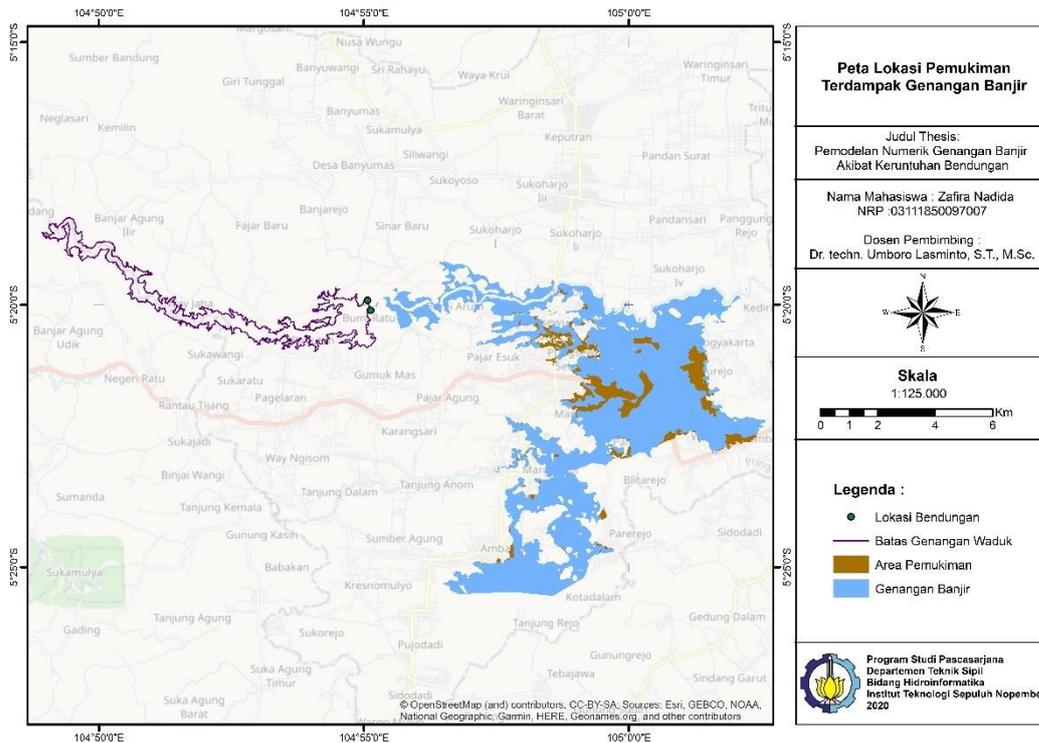
Berdasarkan analisis genangan, didapatkan hasil luasan genangan per kecamatan. Terdapat 8 kecamatan yang terdampak genangan banjir, dengan rincian enam kecamatan dari Kabupaten Pringsewu dan satu Kecamatan Pesawaran. Kecamatan di Kabupaten Pringsewu yang terdampak yaitu Kecamatan Ambarawa, Pringsewu, Gadingrejo, Sukoharjo, Pagelaran, dan Banyumas. Sedangkan dua Kecamatan di Pesawaran yang terdampak banjir yaitu Kecamatan Negrikaton dan Kecamatan Tegineneng.



Gambar 4.53 Daerah terdampak banjir per kecamatan

Gambar 4.53 menunjukkan Kecamatan Gadingrejo merupakan kecamatan dengan luasan genangan banjir paling tinggi, yaitu sebesar 19,8 km² (45,94%). Kecamatan Pringsewu mempunyai luasan genangan banjir 14,1 km² (32,61%), Kecamatan Ambarawa dengan luas genangan 7,45 km² (17,3%), kemudian Kecamatan Banyumas 1,087 km² (2,5%), Kecamatan Sukoharjo dengan 0,63 km² (1,471%), Kecamatan Negerikaton 0,03 km² (0,066%), dan Kecamatan Tegineneng 0,004 km² (0,001%)

Analisis genangan juga dilakukan dengan melakukan perhitungan luasan area permukiman yang terdampak genangan banjir. Dari hasil *overlay* luasan genangan banjir terhadap area permukiman diketahui luas area permukiman yang terdampak adalah sebesar 4,58 km². Peta hasil *overlay* dapat dilihat pada Gambar 4.54.

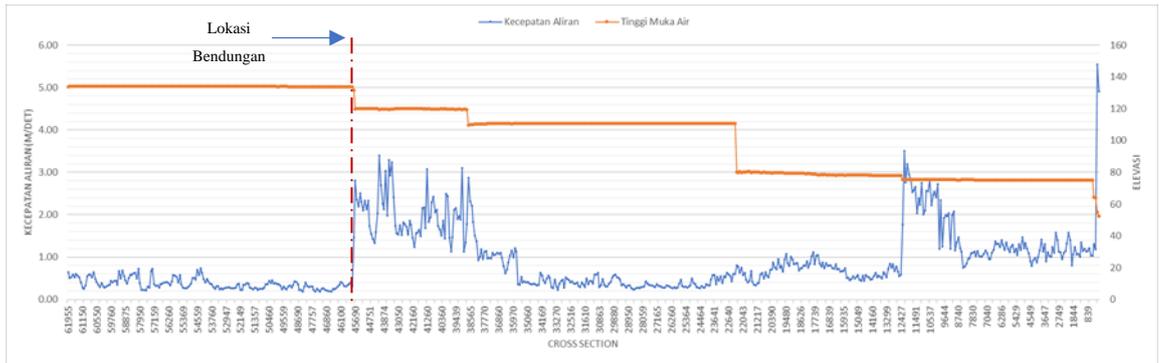


Gambar 4.54 Overlay genangan banjir terhadap area permukiman

4.8 Analisis Genangan dan Kecepatan

Selain luasan genangan banjir, variabel lain yang perlu dicermati pada analisis genangan banjir akibat keruntuhan bendungan adalah kecepatan. Kecepatan yang tinggi disertai dengan debit yang besar dapat menyebabkan daya rusak pada daerah yang dilalui banjir. Oleh karena itu dilakukan analisis genangan dan kecepatan untuk mengidentifikasi lokasi yang beresiko tinggi.

Gambar 4.55 menyajikan grafik hubungan antara kecepatan aliran dengan tinggi muka air. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan kondisi paling berisiko adalah pada *cross section* 45690 – 38565, karena kondisi muka air yang tinggi bersamaan dengan kondisi kecepatan aliran yang tinggi.



Gambar 4.55 Grafik Hubungan Kecepatan dan Tinggi Muka Air

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dalam studi ini, kesimpulan yang dapat diambil yaitu:

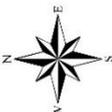
1. Berdasarkan kalibrasi yang dilakukan didapatkan nilai “n” manning sebesar 0,0039. Nilai ini kemudian digunakan sebagai nilai maning dalam simulasi. Faktor *error* dari kalibarasi kedalaman sebesar 0,01%.
2. Hasil analisis keruntuhan bendungan menunjukkan luas genangan banjir terbesar disebabkan *piping* +120 yaitu sebesar 43,17 km².
3. Hasil perbandingan kecepatan aliran dan luas pada analisis *piping* adalah sebagai berikut:
 - Pada analisis genangan maksimum, luasan genangan yang ditimbulkan *piping* +120 menghasilkan luasan terbesar yaitu 43,17 km².
 - Kecepatan kondisi muka air maksimum *piping* +120 adalah yang 9,71 m/det.

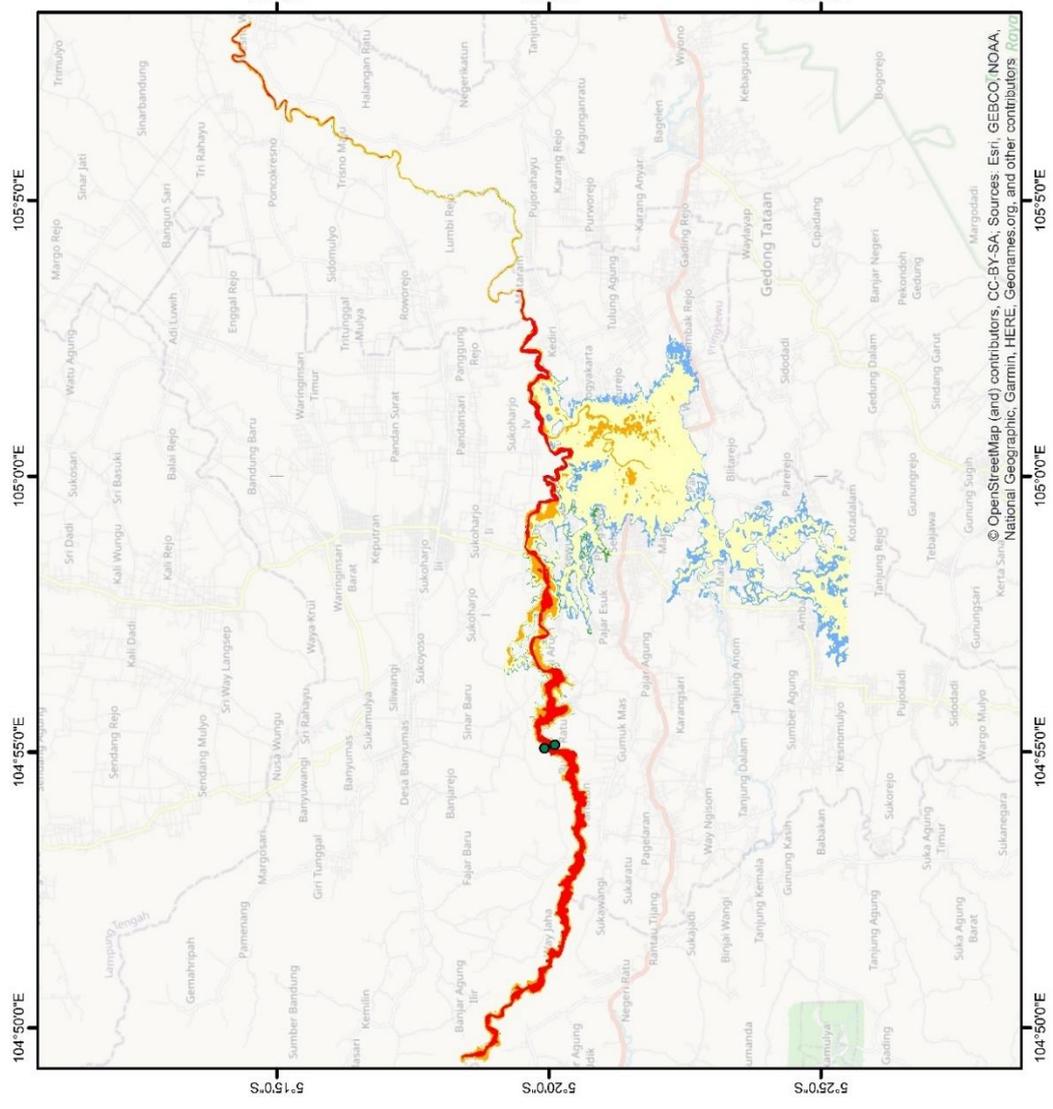
5.2 Saran

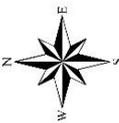
- Data DEM yang digunakan pada studi ini memiliki skala 1:50.000. Diperlukan peta DEM dengan skala yang lebih besar agar menghasilkan model yang lebih baik.

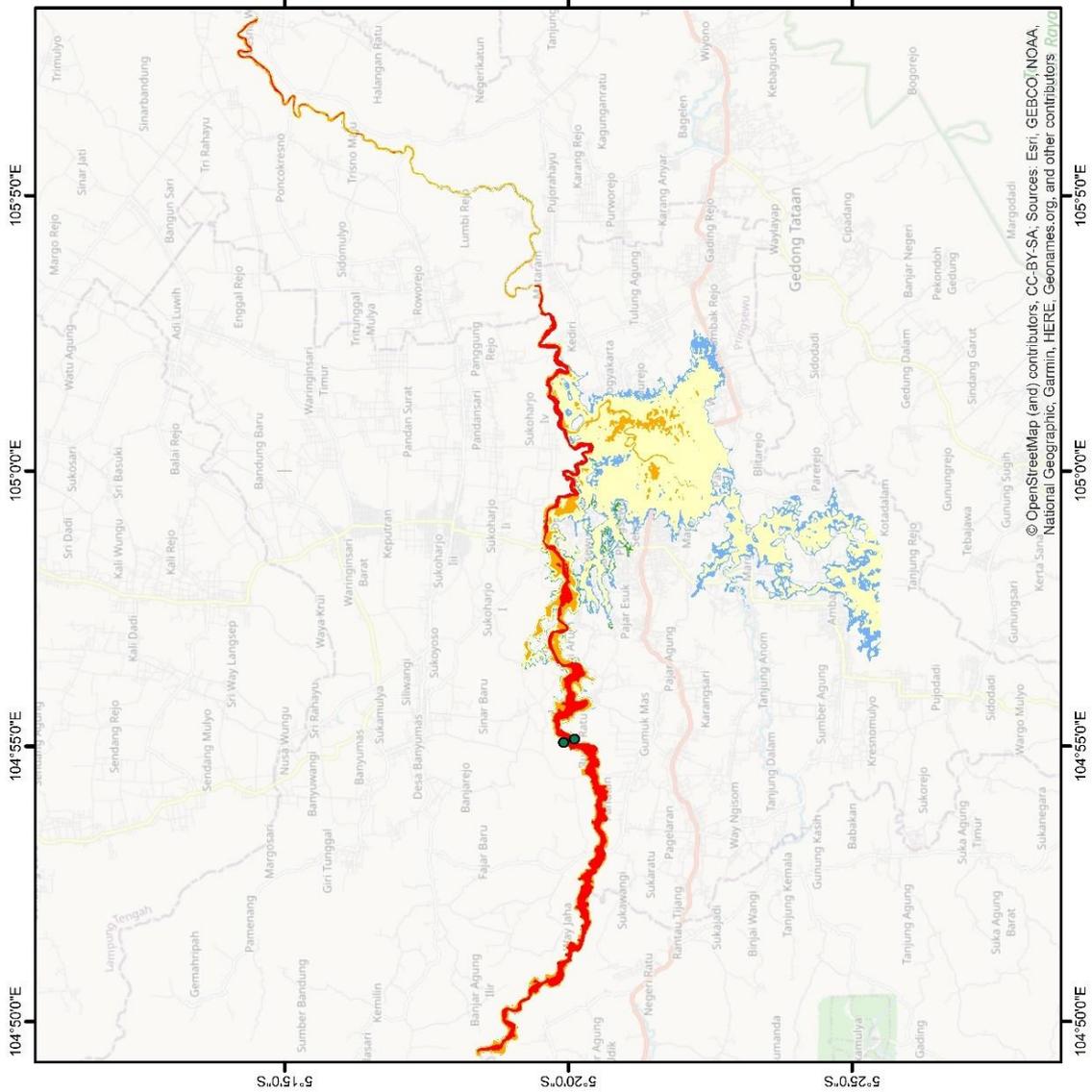
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

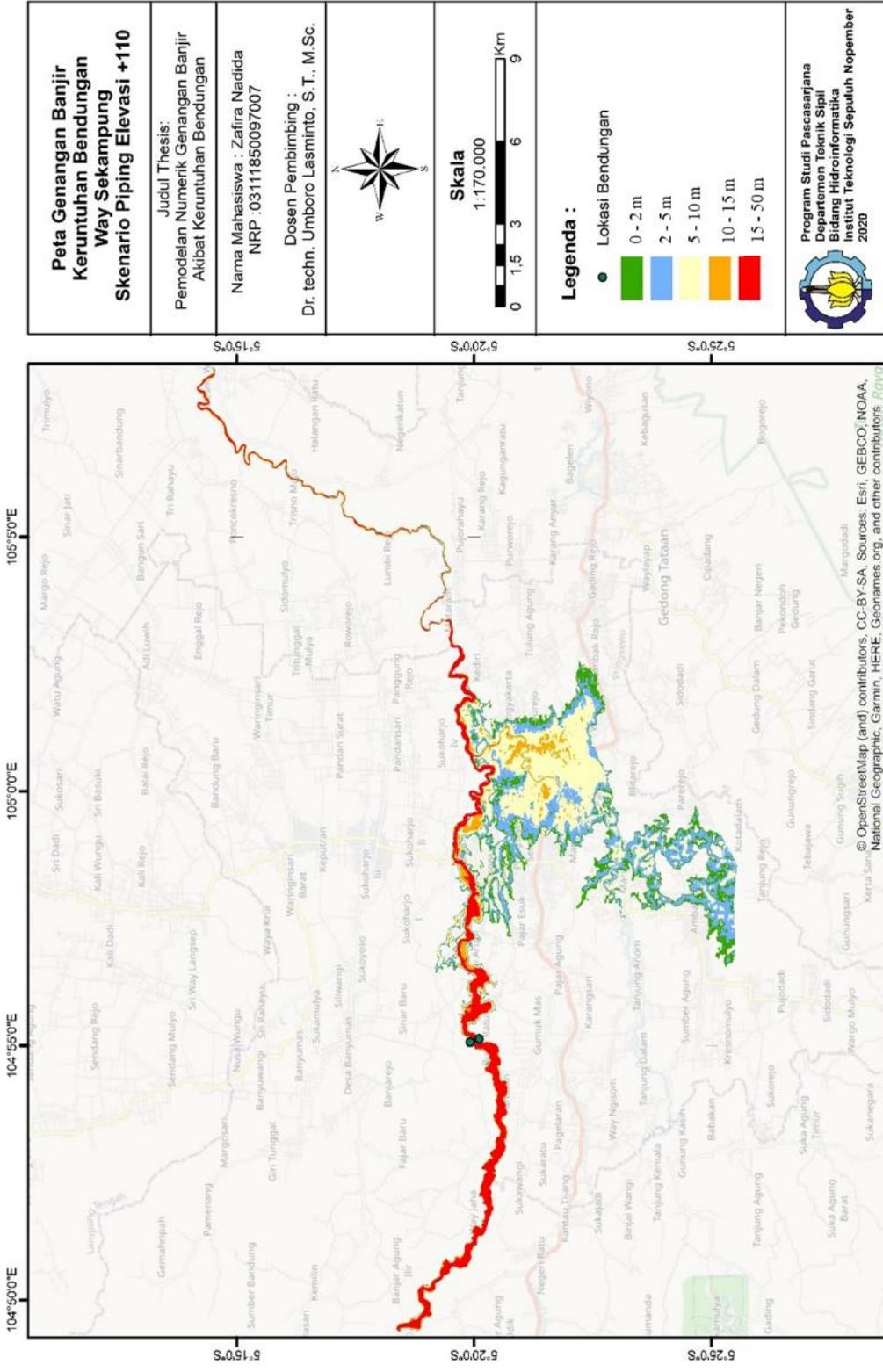
LAMPIRAN

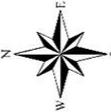
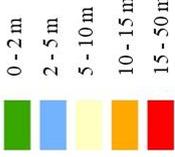
| | |
|---|--|
| <p align="center">Peta Genangan Banjir Keruntuhan Bendungan Way Sekampung Skenario Overtopping</p> | |
| <p align="center">Judul Thesis: Pemodelan Numerik Genangan Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan</p> | |
| <p align="center">Nama Mahasiswa : Zafira Nadida NRP :03111850097007</p> | |
| <p align="center">Dosen Pembimbing : Dr. techn. Umboro Lasmino, S.T., M.Sc.</p> | |
|  | |
| <p>Skala 1:170.000</p>  | |
| <p>Legenda :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Lokasi Bendungan 0 - 2 2 - 5 5 - 10 10 - 15 15 - 50 | |
|  <p align="center">Program Studi Pascasarjana Departemen Teknik Sipil Bidang Hidroinformatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember 2020</p> | |

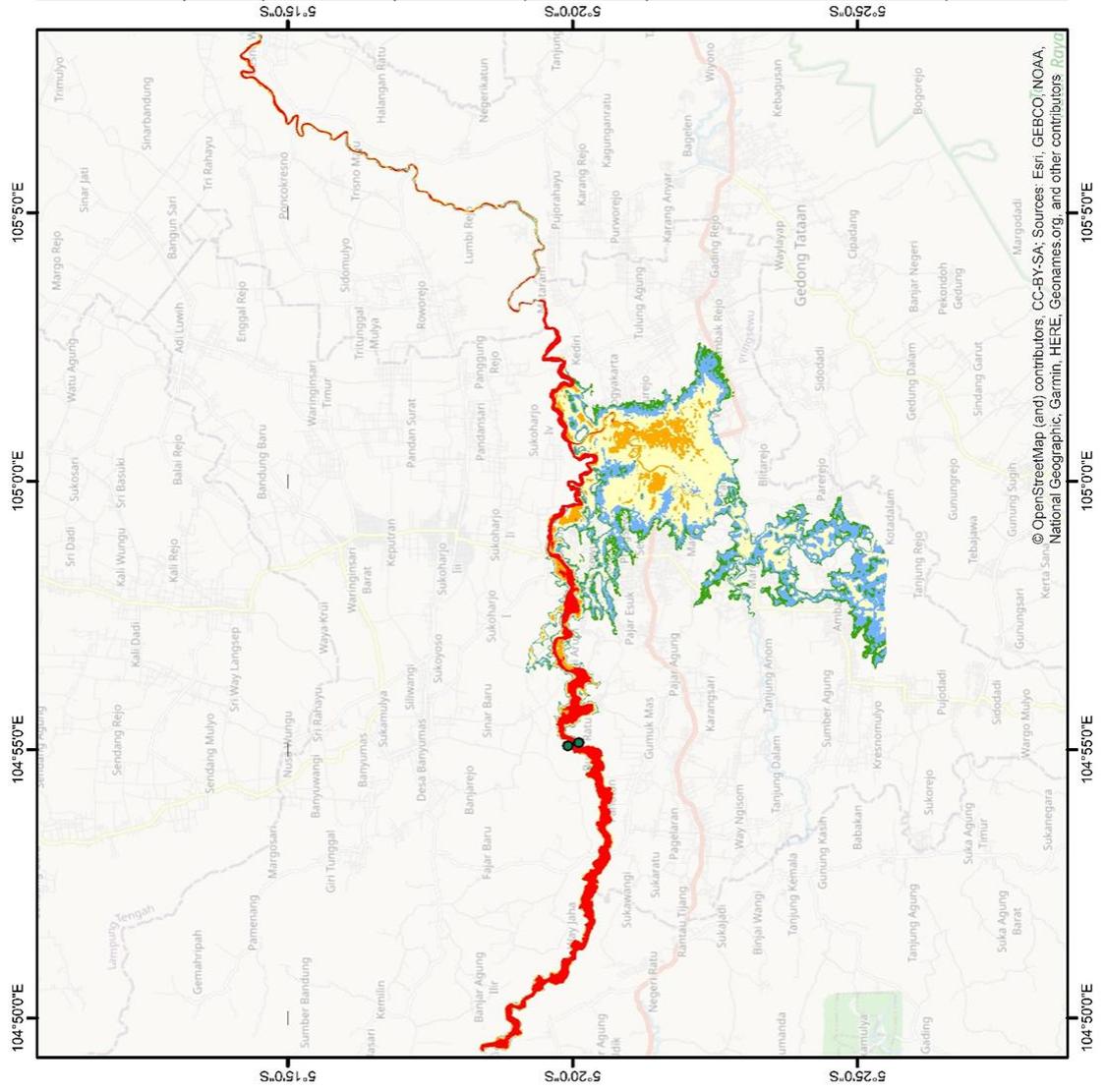


| |
|---|
| Peta Genangan Banjir Keruntuhan Bendungan Way Sekampung Skenario Overtopping |
| Judul Thesis: Pemodelan Numerik Genangan Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan |
| Nama Mahasiswa : Zafira Nadia NRP :03111850097007 |
| Dosen Pembimbing : Dr. techn. Umboro Laisminto, S.T., M.Sc. |
|  |
| Skala 1:170.000  |
| Legenda : <ul style="list-style-type: none"> ● Lokasi Bendungan 0 - 2 2 - 5 5 - 10 10 - 15 15 - 50 |
|  <p>Program Studi Pascasarjana Departemen Teknik Sipil Bidang Hidroinformatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember 2020</p> |





| | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|---|---|
| Peta Genangan Banjir Keruntuhan Bendungan Way Sekampung Skenario Piping Elevasi +120 | Judul Thesis: Pemodelan Numerik Genangan Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan | Nama Mahasiswa : Zafira Nacida NRP : 03111850097007 | Dosen Pembimbing : Dr. techn. Umboro Lasmino, S.T., M.Sc. |  | Skala 1:170.000  | Legenda : ● Lokasi Bendungan  |  |
|--|---|--|--|---|--|---|---|



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Anila , G. C., & Nair, B. T. (2015). *Dam Break Analysis Using BOSS DAMBRK. Science Direct. Aquatic Procedia. Volume 4*, pages 853-850.
- Aryadi, E. V., Juwono, P. T., Priyantoro, D., & Asmaranto, R. (2014). Analisa Keruntuhan Bendungan Gondang Dengan Menggunakan Program Zhong Xing Hy21. *Jurnal Teknik Pengairan Volume 5, Nomor 1, Mei 2014*, , 110–118.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 2415:2016 Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Barker, B., & Schaefer, M. (2007). *Dam Safety Guidelines and Downstream Hazard Classification*. Washington: Water Resources Program Publications.
- Bemana, I. (2006). Klasifikasi Geomorfologi Untuk Pemetaan Geologi yang Telah Dibakukan. *Bulletin of Scientific Contribution, Volume 4, Nomor 2 Agustus 2006*, 161-173.
- Bhaskara, L., Asmaranto, R., & Cahya, E. N. (2017). Aplikasi Zhong Xing HY21 Untuk Analisis Keruntuhan Bendungan Darma Kabupaten Kuningan Provinsi Jawa Barat . *Jurnal Teknik Pengairan* .
- Brunner, G. (2014). *Using HEC-RAS for Dam Break Studies*. Davis, California: Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center .
- Brunner, G. W. (2016). *HER-RAS River Analysis System*. California: US Army Corps Engineering Center.
- Brunner, G. W., & dkk. (2015). *Combined 1D and 2D Hydraulic Modelling within HEC-RAS. World Environment and Water Resources Congress 2015* (pp. pages 1432-1443). ASCE.
- Bureau of Reclamation . (1987). *Design of Small Dam Third Edition* . Washington DC: United State Department of The Interior .
- Deangeli, C., Giani, G. P., Chiaia, B., & Fantili, A. P. (2009). Dam Failures. *WIT Transactions on State of The Art in Science and Engineering Vol. 36*, 1-50.

- Direktorat Bina Teknik Direktorat Jenderal Sumber Daya Air . (1999). *Panduan Perencanaan Bendungan Urugan Volume II (Analisis Hidrologi)*. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum .
- George, A. C., & Nair, B. T. (2015). Dam Break Analysis Using BOSS DAMBRK. *Elsevier , Aquatic Procedia* 4, page 853-869.
- Gourbesville, P., Cunge, J., & Caignaert, G. (2012). *Dam Break Flow Modelling with Uncertainty Analysis. Advances in Hydroinformatics, Springer Hydrology*, hal. 107-116.
- Istiarto. (2014). Modul Pelatihan Simulasi Aliran 1-Dimensi Dengan Bantuan Paket Program Hidrodinamika Hec-ras, Jenjang Dasar : Simple Geometry RIver. Yogyakarta .
- Juwono, P. T. (2001). *Analisis Penelusuran Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Dengan Penerapan BOSS DAMBRK Program Studi Kasus Pada Bendungan Way Sekampung* . Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Latuamury, B. (2015). Analisis Geospasial Aliran Dasar Sungai (Baseflow) Pada Pertemuan Ilmiah Tahunan Ke-2 Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia (IABI) Grha Sabha Pramana UGM, Yogyakarta, 26-28 Mei. Yogyakarta: Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia (IABI).
- M., A. S., Masrevaniah, A., & Sisinggih , D. (n.d.). Studi Penentuan Control Water Level Maksimum Waduk Sutami Dan Lahor Untuk Menghindari Kemungkinan Terjadi *Overtopping* Akibat Banjir PMF .
- Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 27 tentang Bendungan. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Purwanto, P. I., Juwono, P. T., & Asmaranto, R. (2017). Analisa Keruntuhan Bendungan Tugu Kabupaten Trenggalek. *Jurnal Teknik Pengairan, Volume 8, Nomor 2*, hal. 222-230.
- Sargawi, R., & Junaidi, A. (2013). Tindakan Pencegahan Kegagalan Akibat “Piping” Pada Tanggul Pengarah Aliran Sungai. *Konferensi Nasional*

- Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7)* (pp. hal. G25-G32). Solo: Universitas Sebelas Maret.
- Searchy, James K. dan Hardison, Clayton H. (1960). *Manual of Hydrology : Part 1. General Surface-Water Techniques*. Geological Survey Water-Supply Paper 1541-B. Page 31-66
- Sjarief, R., & Kodoatie, R. J. (2010). *Tata Ruang Air* . Yogyakarta: Andi Yogyakarta.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1976). *Hidrologi Untuk Pengairan*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita .
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1977). *Bendungan Type Urugan* . Jakarta: PT. Pradnya Paramita .
- Srbulov, M. (1988). *Estimation of soil internal erosion potential*. Elsevier, *Computers and Geotechnics, Vol. 6. Issue 4* , Pages 265-276.
- Wirustyastuko, Dandi dan Nugroho, Joko. (2013). Analisis Wilayah Tergenang dan Perilaku Banjir Pada Simulasi Kegagalan Bendungan Ciawi. *Jurnal teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*. Vol. 20 No. 2. hal. 121-132.
- World Meteorological Organization. (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. WMO: Geneva.
- Xu, Y., & Zhang, L. M. (2009). *Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams*. *Journal of Geotechnical and Geoenvi-*, page 1957-1970.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS

Zafira Nadida,

Penulis dilahirkan di Batu, 23 Februari 1988. Penulis sebelumnya telah menempuh S1 di Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Tahun 2006 dan lulus Tahun 2010. Selanjutnya penulis bekerja di Kementerian Pekerjaan Umum yang kini berubah nomenklatur menjadi Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Sejak Tahun 2011. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S2 Magister Hidroinformatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas beasiswa karyasiswa Kementerian PUPR. Bagi penulis merupakan suatu kebanggaan dapat menyelesaikan pendidikannya kembali di ITS, dan penulis berharap untuk menjadi lebih baik. Bagi pembaca yang ingin berdiskusi, memberikan saran dan kritik dapat berkorespondensi melalui email nadida.zafira@gmail.com