

**OPTIMASI DAN EVALUASI KEBERLANJUTAN POLA OPERASI  
TAMPUNGAN BENDUNGAN WAY SEKAMPUNG MENGGUNAKAN  
PROGRAM DINAMIS VENSIM**

**(Tesis)**

**Oleh**

**Sefrinta Sasma Murdiagatma**



**PROGRAM PASCASARJANA TEKNIK SIPIL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2025**

**OPTIMASI DAN EVALUASI KEBERLANJUTAN POLA OPERASI  
TAMPUNGAN BENDUNGAN WAY SEKAMPUNG MENGGUNAKAN  
PROGRAM DINAMIS**

**Oleh**

**Sefrinta Sasma Murdiagatma**

**Tesis**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar**

**MAGISTER TEKNIK**

**pada**

**Program Pascasarjana Magister Teknik**

**Fakultas Teknik – Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA TEKNIK SIPIL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2025**

## ABSTRAK

### OPTIMASI DAN EVALUASI KEBERLANJUTAN POLA OPERASI TAMPUNGAN BENDUNGAN WAY SEKAMPUNG MENGGUNAKAN PROGRAM DINAMIS VENSIM

Oleh

SEFRINTA SASMA MURDIAGATMA

**Abstrak:** Keberlanjutan pengoperasian bendungan perlu ditinjau dari segi ketersediaan airnya, demi menjaga keberlangsungan permintaan air di semua sektor. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pola pengoperasian Bendungan Way Sekampung dan pembagian air menurut kebutuhannya menggunakan salah satu aplikasi dari program dinamis, Vensim. Dengan dua skenario berbasis data yang akan dijalankan melalui aplikasi Vensim, penelitian ini menganalisis ketersediaan *inflow*, kebutuhan *outflow*, kapasitas tampungan bendungan dan *spillway*, serta rencana suplai air baku ke Bandar Lampung dan Pringsewu, yang dianalisis selama 25 tahun. Hasil evaluasi penelitian menunjukkan bahwa bendungan mampu memenuhi kebutuhan air irigasi potensial seluas 76.006 Hektar dan menyuplai air baku dengan kapasitas total sebesar 2.737 lt/dt dengan keandalan 100% yang bisa dioptimalkan pada tahun 2027, dimana di tahun tersebut, tampungan bendungan sudah dalam keadaan optimal. Optimalisasi ketersediaan air di bendungan terjadi pada elevasi +124,0 m dengan kapasitas tampungan bendungan sebesar 68.006.000 m<sup>3</sup>. Hal ini dikarenakan bendungan harus menyesuaikan kebutuhan air terlebih dahulu namun tetap harus berada pada kondisi penuh. Penelitian ini menekankan perlunya strategi pengelolaan yang adaptif dengan memperbarui aturan dan menerapkan jadwal pelepasan air yang fleksibel, sehingga ketersediaan air tetap terjaga.

Kata Kunci: Pola Operasi Bendungan, Optimasi, Vensim

## **ABSTRACT**

### **OPTIMIZATION AND EVALUATION OF THE SUSTAINABILITY OF WAY SEKAMPUNG DAM OPERATION ROLE USING VENSIM DYNAMIC PROGRAM**

By

**SEFRINTA SASMA MURDIAGATMA**

**Abstract:** The sustainability of reservoir operations needs to be reviewed in terms of water availability, in order to maintain the continuity of water demand in all sectors. This study aims to optimize the operation role of Way Sekampung Dam and the distribution of water according to its needs using one of the dynamic program application, Vensim. With two data-driven scenarios to be run through the Vensim application, this study analyzed the availability of inflow, outflow requirements, dam and spillway storage capacity, and raw water supply plans to Bandar Lampung and Pringsewu, which were analyzed for 25 years. The results of the research evaluation show that the dam is able to meet the potential irrigation water needs of 76,006 Hectare and supply raw water with a total capacity of 2,737 lt/s with 100% reliability that can be optimized in 2027, where in that year, the dam reservoir is already in an optimal state. Optimization of water availability in the dam occurs at elevation +124.0 m with a dam storage capacity of 68.006.000 m<sup>3</sup>. This is because the dam must adjust the water demand first but still must be in full condition. This research emphasizes the need for an adaptive management strategy by updating the role and implementing a flexible water release schedule, so that water availability is maintained.

**Keywords:** Dam Operation Pattern, Optimization, Vensim



Judul Tesis

**: OPTIMASI DAN EVALUASI  
KEBERLANJUTAN POLA OPERASI  
BENDUNGAN WAY SEKAMPUNG DENGAN  
MENGUNAKAN PROGRAM DINAMIS  
VENSIM**

Nama Mahasiswa

**: Sefrinta Sasma Murdiagatma**

Nomor Pokok Mahasiswa

**: 2325011010**

Program Studi

**: Magister Teknik Sipil**

Fakultas

**: Teknik**



**1. Komisi Pembimbing**

**Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.**  
NIP 19700129 199512 1 001

**Prof. Dr. Dyah Indriana K., S.T., M.Sc.**  
NIP 19691219 199512 2 001

**2. Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil**

**Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.**  
NIP 19691030 200003 1 001



## MENGESAHKAN

### 1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.** 

Sekretaris : **Prof. Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc.** 

Penguji  
Bukan Pembimbing : **Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T., M.T.** 

**Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.** 

### 2. Dekan Fakultas Teknik



**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.** 

NIP 19750928 200112 1 002

### 3. Direktur Program Pascasarjana



**Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.** 

NIP 19640326 198902 1 001

4. Tanggal Lulus Ujian Tesis : **21 Januari 2025**



## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sefrinta Sasma Murdiagatma

NPM : 2325011010

Dengan ini menyatakan bahwa tesis saya yang berjudul “Optimasi dan Evaluasi Keberlanjutan Pola Operasi Tampungan Bendungan Way Sekampung Menggunakan Program Dinamis Vensim” merupakan karya saya sendiri, bukan karya orang lain. Semua tulisan yang tertulis dalam tesis ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Jika di kemudian hari bahwa karya tulis ilmiah saya, terbukti hasil menjiplak karya orang lain, maka saya siap menerima sanksi berupa pencabutan gelar yang telah saya peroleh.

Bandar Lampung, Januari 2025



Sefrinta Sasma Murdiagatma

NPM : 2325011010

## **RIWAYAT HIDUP**

Penulis dilahirkan di Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada tanggal 21 September 1988, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Soemiyoko dan Ibu Chatarina Sundariyati. Istri dari Dimas Budi Indra Kurniawan, S.E. dan ibu dari 2 orang anak Shevandra Boedi Anindyo dan Sheravinne Boedi Anindragatma.

Penulis menempuh pendidikan dasar dan menyelesaikan di Sekolah Dasar (SD) Fransiskus I Tanjung Karang, Bandar Lampung pada tahun 1994 – 2000, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di Fransiskus I Tanjung Karang, Bandar Lampung pada tahun 2000 – 2003, Sekolah Menengah Atas (SMA) di Fransiskus I Bumimanti, Bandar Lampung pada tahun 2003 – 2006, Strata 1 (S1) di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung (UNILA) pada tahun 2006 – 2011. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Lampung pada tahun 2023.

Penulis pernah bekerja di Perusahaan BUMN PT. Waskita Karya (Persero) pada Proyek Pembangunan Jalan Tol JORR, Cakung – Cilincing pada tahun 2012, bekerja di Perusahaan BUMN PT. Krakatau Engineering (Persero) pada Proyek EPC Tarahan – Bukit Asam pada tahun 2013 – 2014, Proyek Pembangunan Pabrik PT. KNSS, Cilegon – Banten pada tahun 2015 – 2018. Saat ini Penulis memiliki bisnis pada bidang kuliner dengan nama J TTEOKBOKKI, didirikan pada tahun 2018 – sekarang.



## SANWACANA

Puji segala syukur kepada Tuhan Yesus Kristus yang telah melimpahkan segala Berkah, Anugerah, Kekuatan dan Kuasa-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul **“Optimasi Dan Evaluasi Keberlanjutan Pola Operasi Tampungan Bendungan Way Sekampung Menggunakan Program Dinamis Vensim”** guna memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penulis menyadari kelemahan serta keterbatasan yang ada sehingga dalam menyelesaikan tesis ini, banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Pr. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ir. Endro Prasetyo Wahono, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Utama yang dengan penuh sabar dan telaten membimbing, mengarahkan, meluangkan waktu, tenaga dan pikiran, serta kesempatan untuk memperbolehkan Penulis menjadi Mahasiswa bimbingan Bapak sejak awal perkuliahan hingga terselesaikannya tesis ini.
5. Ibu Prof. Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Kedua atas bimbingan, bantuan, arahan, petunjuk dan kesabarannya selama proses bimbingan dan perkuliahan hingga terselesaikannya tesis ini.
6. Bapak Dr. Ofik Taupik Purwadi, S.T., M.T. selaku Penguji Pertama dengan penuh kesabaran memberikan masukan, arahan, dukungan dan saran moral selama proses perkuliahan hingga terselesaikannya tesis ini.

7. Bapak Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D. selaku Penguji Pertama dengan penuh kesabaran memberikan masukan, arahan, dukungan dan saran moral selama proses perkuliahan hingga terselesaikannya tesis ini.
8. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar pada Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah membekali penulis dengan ilmu, nilai – nilai luhur, bimbingan, arahan, dan motivasi selama mengikuti perkuliahan.
9. Staf administrasi dan karyawan Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah banyak membantu dalam kegiatan administrasi selama penulis menempuh studi.
10. Mama dan Ibu, dan saudara/i-ku semua yang tersayang atas doanya yang tak pernah putus, kasih sayang dan motivasi yang selalu tercurah kepada penulis.
11. Suami tercinta Dimas Budi Indra Kurniawan, S.E., dan anak – anakku yang kukasihi, atas motivasi, dukungan, restu dan cinta kasihnya hingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.
12. Seluruh teman – teman Magister Teknik Sipil Universitas Lampung terspesial angkatan 2023 dan Magister Teknik Sipil Konsentrasi Hidro Angkatan 2023, penulis menyampaikan terimakasih atas kebersamaan, kekeluargaan dan kekompakaannya.
13. Keluarga besar J Teokbokki atas dukungan, bantuan, cinta kasih dan motivasinya sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dan tesis ini.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu – persatu.

Penulis menyadari bahwa tesis ini jauh dari kata sempurna, namun Penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat dalam memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan bagi semuaorang secara umum dan bagi mahasiswa/i Teknik Sipil pada khususnya.

Bandar Lampung, Januari 2025

Penulis

**Sefrinta Sasma Murdiagatma**



Dalam Nama Yesus Kristus, Putra-Mu Yang Tunggal

Allah Bapa Putra dan Roh Kudus

Hanya Engkau yang memampukanku hingga berada di tahap ini

Halleluya, Amin

Kupersembahkan karya ini

Sebagai salah satu wujud cita - cita yang sudah lama terpendam

Kepada Yang Terkasih:

Mama, Ibu dan Suamiku, untuk restu dan dukungannya selama ini

Anak - anakku yang sangat kukasihi, terselip doa dan harapan

Agar kalian juga akan berada di pencapaian yang lebih baik

Saudara/i - ku, atas semangat, dorongan, dan doa yang selalu mengiring

Team J Tteokbokki atas dukungan dan doanya.

## DAFTAR ISI

|  |           |
|--|-----------|
| <b>DAFTAR ISI</b> .....                                    | <b>i</b>  |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....                                  | <b>iv</b> |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                                 | <b>vi</b> |
| <b>I. PENDAHULUAN</b> .....                                | <b>1</b>  |
| I.1 Latar Belakang.....                                    | 1         |
| I.2 Rumusan Masalah .....                                  | 2         |
| I.3 Tujuan Penelitian.....                                 | 3         |
| I.4 Batasan Masalah .....                                  | 3         |
| I.5 Manfaat Penelitian.....                                | 3         |
| <b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....                          | <b>4</b>  |
| II.1 Definisi Bendungan .....                              | 4         |
| II.2 Pengelolaan Sumber Daya Air dan Bendungan.....        | 5         |
| II. 3 Analisis Hidrologi.....                              | 7         |
| II.3.1 Curah Hujan Rerata.....                             | 7         |
| II.3.2 Uji Konsistensi Hujan .....                         | 7         |
| II.3.3 Curah Hujan Akhir ( $R_{eff}$ ) .....               | 8         |
| II.3.4 Evaporasi.....                                      | 10        |
| II.3.5 Penelusuran Data Debit Sungai dari Data Hujan ..... | 11        |
| II.3.6 Debit Andalan .....                                 | 14        |
| II.3.7 Analisis Kebutuhan Air Irigasi .....                | 15        |
| II.3.8 Analisis Air untuk Kebutuhan Air Baku.....          | 20        |
| II.4 Pendekatan Sistem Dinamis .....                       | 24        |
| II.4.1 Vensim PLE .....                                    | 26        |
| II.4.2 <i>Causal Loop Diagram</i> (CLD).....               | 27        |
| II.4.3 <i>Stock</i> dan <i>Flow</i> Diagram .....          | 29        |
| II.5 Analisis Model .....                                  | 33        |
| II.6 Evaluasi Kinerja Bendungan .....                      | 34        |
| <b>III. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....                    | <b>36</b> |



|  |           |
|--|-----------|
| III.1 Lokasi Daerah Penelitian.....  | 36        |
| III.2 Metode Penelitian.....   | 37        |
| III.3 Teknik Pengumpulan Data.....   | 38        |
| III.3.1 Data Hidrologi.....  | 38        |
| III.3.2 Data Klimatologi.....  | 38        |
| III.3.3 Data Spesifikasi Teknis Bendungan.....   | 38        |
| III.4 Analisis Data dan Tahapan Perhitungan.....   | 38        |
| <b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>   | <b>40</b> |
| IV.1 Data Teknis Bendungan.....  | 40        |
| IV.2 Pengaturan Elevasi Muka Air Bendungan Way Sekampung.....  | 41        |
| IV.3 Analisis Pola Operasi Eksisting.....  | 42        |
| IV.3.1 Pola Operasi Eksisting.....   | 42        |
| IV.3.2 Debit Masukan ( <i>Inflow</i> ) dan Keluaran ( <i>Outflow</i> ) Bendungan Way<br>Sekampung Eksisting..... | 44        |
| IV.4 Analisis Hidrologi.....   | 46        |
| IV.4.1 Data Curah Hujan.....   | 46        |
| IV.4.2 Uji Konsistensi Data.....   | 48        |
| IV.4.4 Evaporasi.....  | 49        |
| IV.5 Analisis Ketersediaan Debit.....  | 54        |
| IV.6 Analisis Kebutuhan Air (Komponen <i>Outflow</i> ).....  | 62        |
| IV.6.1 Kebutuhan Air Pertanian.....  | 62        |
| IV.6.2 Kebutuhan Air Baku.....   | 71        |
| IV.6.3 Kebutuhan Sektor Kota dan Industri.....   | 84        |
| IV.6.4 Kebutuhan Air Minum.....  | 84        |
| IV.6.5 Kebutuhan Pemeliharaan Sungai.....  | 84        |
| IV.6.6 Jumlah Air yang Hilang ( <i>Unaccounted Water</i> ).....  | 85        |
| IV.6.7 Kebutuhan Air untuk PLTMH.....  | 85        |
| IV.6.8 Kebutuhan Air Pariwisata.....   | 85        |
| IV.7 Keunggulan Menggunakan Program Dinamis Vensim dalam Optimasi<br>Tampungan Bendungan.....                    | 85        |
| IV. 8 Batasan Nilai Simulasi.....  | 86        |
| IV.9 Optimasi Pola Operasi dengan Sistem Dinamik.....  | 87        |
| IV.9.1 Pembuatan <i>Causal Loop Diagram</i> (CLD).....   | 87        |
| IV.9.2 <i>Stock and Flow Diagram</i> .....   | 89        |

|  |            |
|--|------------|
| IV.8.3 Optimasi Bendungan Way Sekampung Berdasarkan Hasil Grafik dan Tabel Vensim..... | 147        |
| IV.9 Evaluasi Kinerja Bendungan Berdasarkan Simulasi Vensim.....                       | 151        |
| <b>BAB V. SIMPULAN DAN SARAN.....</b>  | <b>153</b> |
| V.1 Simpulan .....   | 153        |
| V.2 Saran.....   | 153        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>   | <b>155</b> |



## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 1. Koefisien Tanaman Padi .....   | 16 |
| Tabel 2. Koefisien Tanaman Palawija .....   | 16 |
| Tabel 3. Tabel Besar Nilai Perkolasi .....  | 17 |
| Tabel 4. Tabel Perencanaan Air Baku .....   | 22 |
| Tabel 5. Kebutuhan Air Non Domestik .....   | 24 |
| Tabel 6. Tools Dasar Pada Vensim .....  | 26 |
| Tabel 7. Notasi Stock & Flow Diagram pada Vensim.....   | 30 |
| Tabel 8. Perbedaan Variabel Constant, Auxiliary, Level/Rate .....   | 31 |
| Tabel 9. Pelayanan Bendungan Way Sekampung Berdasarkan Daerah Irigasi.....  | 37 |
| Tabel 10. Debit Masukan (Inflow) dan Debit Keluaran (Outflow) Rerata<br>Bendungan Way Sekampung Eksisting.....              | 45 |
| Tabel 11. Tabel Data Curah Hujan Harian Maksimum di DAS Sekampung (dalam<br>m).....   | 47 |
| Tabel 12. Nilai Syarat Untuk Uji Konsistensi Data .....   | 48 |
| Tabel 13. Tabel Perhitungan Konsistensi Data Curah Hujan Dengan RAPS (dalam<br>mm).....                                     | 48 |
| Tabel 14. Perhitungan Nilai Q Kritis dan R Kritis.....  | 49 |
| Tabel 15. Perhitungan Evaporasi Potensial dengan Metode Penman Modifikasi<br>untuk Bendungan Way Sekampung Tahun 2023 ..... | 50 |
| Tabel 16. Perhitungan Evaporasi Potensial Rata – rata Tahun 2014 – 2023 .....   | 53 |
| Tabel 17. Perhitungan Debit dengan Metode FJ Mock tahun 2023 .....  | 55 |
| Tabel 18. Rekapitulasi Debit Inflow Total dengan Metode FJ Mock Tahun 2014 -<br>2023 .....                                  | 59 |
| Tabel 19. Rekapitulasi Debit Air Tanah dan Nilai Rerata Total untuk Input<br>Variabel Vensim .....                          | 60 |
| Tabel 20. Rekapitulasi Debit Air Permukaan dan Nilai Rerata Total untuk Nilai<br>Variabel Vensim .....                      | 61 |
| Tabel 21. Curah Hujan Rata - Rata Tahun 2014 - 2023 .....   | 64 |
| Tabel 22. Perhitungan Re Tanaman Padi pada bulan Januari.....   | 65 |
| Tabel 23. Perhitungan Re Tanaman Padi pada bulan Januari (Lanjutan) .....   | 66 |
| Tabel 24. Perhitungan Curah Hujan Kumulatif Re Padi dan Re Palawija.....  | 66 |
| Tabel 25. Perhitungan Kebutuhan Air untuk Tanaman .....   | 68 |
| Tabel 26. Kapasitas Kebutuhan Debit Air Irigasi Potensial dan Fungsional.....   | 70 |
| Tabel 27. Jumlah Penduduk Kabupaten Pringsewu.....  | 71 |
| Tabel 28. Proyeksi Jumlah Penduduk Kabupaten Pringsewu Tahun 2023 - 2045  | 72 |
| Tabel 29. Kebutuhan Air Baku untuk Sambungan Rumah Tangga.....  | 73 |
| Tabel 30. Kebutuhan Air Untuk Hidran Umum .....   | 74 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabel 31 Jumlah Pelajar di Kabupaten Pringsewu Tahun 2024 .....  | 76  |
| Tabel 32. Kebutuhan Air Baku untuk Fasilitas Pendidikan.....   | 76  |
| Tabel 33. Kebutuhan Air Baku untuk Fasilitas Puskesmas .....   | 77  |
| Tabel 34. Kebutuhan Air Baku untuk Fasilitas Rumah Sakit.....  | 78  |
| Tabel 35. Kebutuhan Air Baku untuk Fasilitas Masjid.....   | 79  |
| Tabel 36. Kebutuhan Air Baku untuk Fasilitas Perkantoran .....   | 80  |
| Tabel 37. Kebutuhan Air Baku untuk Fasilitas Pasar .....   | 81  |
| Tabel 38. Rekapitulasi Kebutuhan Air Domestik dan Air Non Domestik dan<br>Persentase Perbandingan Kebutuhan Air .....        | 83  |
| Tabel 39. Formulasi dan Persamaan Sub Model Inflow Bendungan.....  | 93  |
| Tabel 40. Data Hasil Running Aplikasi Vensim Untuk Sub-Model Inflow<br>Bendungan Way Sekampung dari Tahun 2020 – 2045 .....  | 99  |
| Tabel 41. Formulasi dan Persamaan Sub Model Outflow Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 1 .....                              | 102 |
| Tabel 42. Data hasil Running Aplikasi Vensim Untuk Sub-Model Outflow<br>Bendungan Way Sekampung dari Tahun 2020 – 2045 ..... | 113 |
| Tabel 43. Formulasi dan Penjelasan Sub Model Pengoperasian Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 1 .....                       | 116 |
| Tabel 44. Tabel Hasil Simulasi Sub Model Pengoperasian Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045.....     | 123 |
| Tabel 45. Formulasi dan Penjelasan Sub Model Outflow Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 2 .....                             | 127 |
| Tabel 46. Hasil Running Aplikasi Vensim untuk Outflow Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045.....      | 135 |
| Tabel 47. Formulasi dan Penjelasan Sub Model Pengoperasian Bendungan .....   | 138 |
| Tabel 48. Tabel Hasil Simulasi Sub Model Pengoperasian Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 2 dari Tahun 2020 - 2045 .....    | 145 |
| Tabel 49. Tabel Evaluasi Kinerja Bendungan .....   | 152 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |     |
|---|-----|
| Gambar 1. Contoh Causal Loop Diagram (CLD) Sebuah Bendungan (Koushali et al., 2015) yang memiliki hubungan sebab akibat antar variabelnya.... | 28  |
| Gambar 2. Contoh Diagram Stock & Flow Sebuah Bendungan (Sefridud Dam) (Koushali et al., 2015).....  | 30  |
| Gambar 3 Peta Daerah Tangkapan Air Bendungan Way Sekampung.....   | 37  |
| Gambar 4 Bagan Alir Penelitian .....  | 39  |
| Gambar 5. Gambar Potongan Melintang Bendungan Way Sekampung.....  | 41  |
| Gambar 6. Tampak Atas Bendungan Way Sekampung.....  | 41  |
| Gambar 7. Pola Operasi Aktual Bendungan Way Sekampung Tahun 2022 – 2024 .....   | 43  |
| Gambar 8 Skema Pengelolaan Sungai Way Sekampung.....  | 63  |
| Gambar 9 Grafik Proyeksi Pertumbuhan Penduduk Kabupaten Pringsewu Tahun 2023 – 2045.....  | 73  |
| Gambar 10. <i>Causal Loop Diagram</i> (CLD) Pengoperasian Bendungan Way Sekampung .....   | 88  |
| Gambar 11. Pengaturan Rentang Waktu (Time Stamp) Pada Base Model .....  | 91  |
| Gambar 12. Stock and Flow Diagram (SFD) Sub-Model Inflow Bendungan Way Sekampung.....   | 92  |
| Gambar 13. Formulasi Sub Model Inflow Bendungan dalam Software Vensim ..  | 94  |
| Gambar 14. Grafik Stock and Flow Air Permukaan dari Tahun 2020 – 2045 .....   | 95  |
| Gambar 15 Grafik Stock and Flow Air Tanah dari Tahun 2020 – 2045 .....  | 95  |
| Gambar 16 Grafik Stock and Flow Luas Catchment Daerah Tangkapan Air (DTA) dari Tahun 2020 – 2045 .....  | 96  |
| Gambar 17 Grafik Stock and Flow Ketersediaan Air Tanah dari Tahun 2020 – 2045.....  | 96  |
| Gambar 18 Grafik Stock and Flow Ketersediaan Air Permukaan dari Tahun 2020 – 2045.....  | 97  |
| Gambar 19 Grafik Hubungan Inflow dan Ketersediaan Tampungan Bendungan yang Dihasilkan Software Vensim dari Tahun 2020 – 2045 .....            | 97  |
| Gambar 20. Stock and Flow Diagram (SFD) Sub-Model Outflow Bendungan Way Sekampung Skenario 1 .....  | 102 |
| Gambar 21. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air Domestik dan Non Domestik Kabupaten Pringsewu dari Tahun 2020 – 2045 .....                     | 107 |
| Gambar 22. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air untuk Kota & Industri Kabupaten Pringsewu Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045.....               | 107 |
| Gambar 23. Grafik <i>Stock and Flow</i> Kebutuhan Air untuk Pariwisata Kabupaten Pringsewu Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045 .....            | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| Gambar 24. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air Minum di Kabupaten Pringsewu Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045 .....                               | 108 |
| Gambar 25. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air Pertanian Fungsional Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045 .....                                       | 109 |
| Gambar 26. Grafik Stock and Flow Kenaikan Unaccounted Water untuk Kebutuhan RKI Kabupaten Pringsewu Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045.....        | 109 |
| Gambar 27. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air Total Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045.....   | 110 |
| Gambar 28. Grafik Stock and Flow Outflow Bendungan Way Sekampung Skenario 1 Berdasarkan Hasil Running Aplikasi Vensim dari Tahun 2020 – 2045..... | 110 |
| Gambar 29. Stock and Flow Diagram (SFD) Sub Model Pengoperasian Bendungan Way Sekampung Skenario 1 .....  | 116 |
| Gambar 30. Grafik Stock and Flow Evaporasi Bendungan Way Sekampung Skenario 1 Tahun 2020 – 2045 .....   | 118 |
| Gambar 31. Grafik Stock and Flow Tampungan Akhir Bendungan Way Sekampung Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045 .....                                  | 119 |
| Gambar 32. Grafik Stock and Flow Spillway Bendungan Way Sekampung Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045 .....   | 119 |
| Gambar 33. Grafik Stock and Flow untuk Suplai Air Baku dari Bendungan Way Sekampung dari Tahun 2020 – 2045 .....                                  | 120 |
| Gambar 34. Grafik Stock and Flow Kapasitas Tampungan Bendungan Way Sekampung Skenario 1 dari Tahun 2020 – 2045 .....                              | 120 |
| Gambar 35. Grafik Keseimbangan Tampungan Bendungan Way Sekampung Hasil Running Aplikasi Vensim Tahun 2020 – 2045 .....                            | 121 |
| Gambar 36. Grafik Keseimbangan Kapasitas Tampungan Bendungan dalam Ms. Excel .....  | 122 |
| Gambar 37. Stock and Flow Diagram Pola Pengoperasian Bendungan Way Sekampung Skenario 1 .....   | 124 |
| Gambar 38. Stock and Flow Diagram (SFD) Sub Model Outflow Bendungan Way Sekampung Skenario 2 .....  | 126 |
| Gambar 39. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air Domestik dan Non Domestik Kabupaten Pringsewu Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045.....               | 130 |
| Gambar 40. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air untuk Kota dan Industri Kabupaten Pringsewu Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045.....                 | 130 |
| Gambar 41. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air Pertanian Bendungan Way Sekampung Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....                          | 131 |
| Gambar 42. Grafik Stock and Flow Kebutuhan Air Minum di Kabupaten Pringsewu Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....                               | 131 |
| Gambar 43. Grafik Stock and Flow Kenaikan Unaccounted Water untuk Kebutuhan RKI Kabupaten Pringsewu Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045.....        | 132 |
| Gambar 44. Grafik Stock and Flow Total Kebutuhan Air Bendungan Way Sekampung Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....                              | 132 |



|   |     |
|---|-----|
| Gambar 45. Grafik Stock and Flow Outflow Bendungan Way Sekampung<br>Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....                   | 133 |
| Gambar 46. Stock and Flow Diagram (SFD) Sub Model Pengoperasian<br>Bendungan Way Sekampung Skenario 2.....                    | 138 |
| Gambar 47. Grafik Stock and Flow Evaporasi Bendungan Way Sekampung<br>Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....                 | 140 |
| Gambar 48. Grafik Stock and Flow Tampungan Akhir Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....           | 141 |
| Gambar 49. Grafik Stock and Flow Spillway Bendungan Way Sekampung<br>Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....                  | 141 |
| Gambar 50. Grafik Stock and Flow Kapasitas Tampungan Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 2 dari Tahun 2020 – 2045 .....       | 142 |
| Gambar 51. Grafik Keseimbangan Tampungan Bendungan Way Sekampung<br>Hasil Running Aplikasi Vensim dari Tahun 2020 - 2045..... | 142 |
| Gambar 52. Grafik Keseimbangan Tampungan Bendungan dalam Ms. Excel ...  | 143 |
| Gambar 53. Stock and Flow Diagram Pola Pengoperasian Bendungan Way<br>Sekampung Skenario 2 .....                              | 146 |
| Gambar 54. Grafik Keseimbangan Tampungan Bendungan Terhadap Inflow<br>Skenario 1 .....  | 147 |
| Gambar 55. Grafik Keseimbangan Tampungan Bendungan Terhadap Outflow<br>Skenario 1 .....                                       | 148 |
| Gambar 56. Grafik Keseimbangan Tampungan Bendungan Terhadap Outflow<br>Skenario 2 .....                                       | 149 |

## **I. PENDAHULUAN**

### **I.I Latar Belakang**

Tantangan utama pembangunan bendungan adalah mencapai keseimbangan yang optimal antara pemenuhan kebutuhan air untuk sektor pertanian, industri, dan konsumsi masyarakat, serta meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan (Lee & Kang, 2020). Dengan adanya kenaikan jumlah penduduk dan alih fungsi lahan pertanian, dan kemudian adanya peningkatan permintaan akan sumber daya air dan energi, serta perubahan iklim, Bendungan Way Sekampung menghadapi tantangan dalam mengatasi keterbatasan pasokan air dan perluasan area irigasi, namun tetap menjaga kelestarian sumber daya dan keberlanjutan lingkungan (Rasul, 2014).

Pengelolaan sumber daya air secara efisien, merata, dan adil merupakan salah satu fokus utama dalam mencapai pembangunan berkelanjutan (Wei et al., 2012). Bendungan memberikan berbagai manfaat, termasuk mengawetkan air pada saat debit sedang tinggi atau musim penghujan untuk dapat digunakan pada saat musim kemarau atau saat debit air sangat rendah, sebagai sumber produksi energi bersih, penyediaan air, pengendalian banjir, irigasi, serta inovasi terbaru berupa Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung (PLTSAT). Untuk dapat memenuhi kebutuhan tersebut, maka diperlukan pengoptimalan dan evaluasi pengoperasian bendungan, guna menjaga keseimbangan kuantitas air saat musim kemarau.

Pola operasi bendungan adalah cara atau metode yang digunakan dalam mengelola dan mengoperasikan bendungan untuk mencapai tujuan tertentu, seperti penyediaan air bersih, irigasi, dan pembangkit energi listrik. Studi tentang optimasi pola operasi bendungan dilakukan untuk mengetahui potensi air yang tersedia di waduk dan mengoptimalkan pemanfaatannya (Barkah et al., 2021). Optimasi merupakan proses untuk mendapatkan hasil terbaik atau suatu

pencapaian nilai yang lebih Akhir. Dapat didefinisikan sebagai usaha untuk meningkatkan, merancang dan menciptakan sesuatu agar mencapai kondisi yang optimal (Noerhayati et al., 2017).

Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) mempengaruhi kebijakan pengelolaan air di Indonesia, melalui berbagai aspek yang berhubungan dengan akses, kualitas, dan efisiensi penggunaan air. Tujuan ke-6 dalam TPB bermaksud untuk menjamin bahwa setiap individu mendapatkan akses terhadap air bersih dan fasilitas sanitasi yang memadai. Contoh implementasi ini dapat dilihat dalam proyek-proyek seperti Pembangunan Bendungan Way Sekampung yang memiliki tujuan untuk mengoptimalkan akses terhadap air bersih dan pemenuhan kebutuhan air irigasi di DI Sekampung Sistem.

Pembangunan Bendungan Sekampung, diharapkan dapat meningkatkan ketahanan wilayah terhadap kekeringan, mengoptimalkan penggunaan air untuk pertanian, dan memberikan manfaat lainnya dalam kegiatan mengelola sumber daya air yang selaras dengan target TPB tentang ketahanan pangan (Tujuan 2) dan air baku yang bersih (Tujuan 6).

Untuk mencapai tujuan ini, diperlukan metode yang tidak hanya mampu menganalisis sistem air secara komprehensif, tetapi juga dapat menghasilkan evaluasi yang mendekati realitas melalui pemodelan sistem (Pleik, 2000). Pendekatan model dinamis telah banyak diterapkan dalam pengelolaan sumber daya air, pengendalian banjir, pemodelan perubahan iklim, serta mendukung pengambilan keputusan/kebijakan, dengan tujuan untuk memahami dan mensimulasikan interaksi antara sistem dengan berbagai elemen sosial, ekonomi, hidrologi, dan lingkungan.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian “**Optimasi Dan Evaluasi Keberlanjutan Pola Operasi Bendungan Way Sekampung Menggunakan Model Dinamis Vensim**” ini adalah bagaimana optimasi dan evaluasi keberlanjutan pola operasi bendungan terkait dengan ketersediaan air pada Bendungan Way Sekampung dengan menggunakan program dinamis Vensim sampai dengan

tahun 2045 (Tahun Indonesia Emas) dan bagaimana evaluasi kinerja Bendungan Way Sekampung sampai dengan tahun tersebut.

### **I.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian “**Optimasi Dan Evaluasi Keberlanjutan Pola Operasi Tampungan Bendungan Way Sekampung Menggunakan Program Dinamis Vensim**” ini adalah:

- a. Melakukan evaluasi kinerja Bendungan Way Sekampung sampai dengan tahun tersebut.
- b. Melakukan optimasi dan evaluasi keberlanjutan pola operasi bendungan terkait dengan ketersediaan air pada tampungan Bendungan Way Sekampung dengan menggunakan program dinamis Vensim sampai dengan tahun 2045 (Tahun Indonesia Emas).

### **I.4 Batasan Masalah**

Batasan dalam membahas permasalahan dari penelitian ini adalah:

- a. Penelitian ini berada di Bendungan Way Sekampung;
- b. Hanya difokuskan pada pengembangan/optimasi dan evaluasi pola operasi Bendungan Way Sekampung,
- c. Tidak merencanakan jaringan irigasi;
- d. Tidak menghitung sistem dan bangunan pembangkit listrik.

### **I.5 Manfaat Penelitian**

Sistem dinamik dapat memberikan model matematis yang lebih akurat untuk memahami interaksi kompleks antara variabel-variabel seperti curah hujan, *water level*, dan debit air. Pengendalian dan pengelolaan air berbasis model dinamis dapat digunakan dalam perhitungan pola operasi bendungan sehingga dapat dioptimalkan untuk manfaat irigasi, *flood control*, dan Pembangkit Tenaga Listrik Air (PLTA), sehingga dapat meminimalkan risiko kekurangan air.



## II. TINJAUAN PUSTAKA

### II.1 Definisi Bendungan

Bendungan adalah struktur yang dibuat dari urugan tanah, urugan batu, beton, dan/atau pasangan batu, berfungsi untuk menahan dan menyimpan air. Selain itu, bendungan juga dapat digunakan untuk menahan limbah tambang (tailing) atau lumpur sehingga membentuk waduk. Pembangunan bendungan dilakukan berdasarkan rencana pengelolaan sumber daya air di wilayah sungai terkait (Peraturan Pemerintah No 37 Th 2010, 2010).

Pengoperasian bendungan menurut (Nuramini, 2017), kapasitas tampungan bendungan dibagi menjadi beberapa bagian, seperti:

1. Kapasitas tampungan mati (*dead storage zone*) berfungsi sebagai tempat berkumpulnya sedimen dari hulu sungai.
2. Kapasitas tampungan Akhir (*effective/usefull storage*) berfungsi untuk mendukung konservasi sumber air, seperti air baku, irigasi, dan kebutuhan lainnya, sehingga pemanfaatan bendungan dapat mengoptimalkan kapasitas Akhirnya.
3. Kapasitas tampungan pengontrol banjir (*flood control*) berperan dalam mengendalikan kelebihan air serta mengurangi risiko kerusakan yang ditimbulkan oleh banjir.
4. Level Genangan Normal atau Level Konservasi Maksimum (NWL), adalah elevasi tertinggi yang dicapai oleh permukaan air selama pengoperasian normal.
5. Level Genangan Minimum (MWL) adalah elevasi permukaan air terendah yang harus tetap ada selama pengoperasian normal. Level ini biasanya ditentukan oleh posisi saluran keluaran terendah di waduk atau kebutuhan minimum agar waduk berfungsi secara optimal..

6. Tampungannya Aktif adalah volume air yang tersimpan di antara Level Genangan Minimum dan Level Genangan Normal. Pada bendungan multiguna, volume ini dapat dibagi menjadi tampungan untuk konservasi dan tampungan untuk pengendalian banjir.
7. Level Genangan Maksimum (HWL) adalah ketinggian maksimum permukaan air yang tercapai selama banjir besar. Ketika air meluap akibat banjir, permukaan air dapat naik di atas Level Genangan Normal hingga mencapai Level Genangan Maksimum.
8. Tampungannya Tambahan adalah volume air yang muncul selama banjir besar dan dapat diatur atau disimpan untuk digunakan di kemudian hari.
9. *Bank Storage* adalah merujuk pada air yang merembes ke dalam lapisan tanggul permeabel bendungan selama proses pengisian, yang akan kembali keluar saat waduk dikosongkan. Jumlah air ini kecil, hanya beberapa persen dari total volume waduk, tergantung pada kondisi geologi di area bendungan.
10. *Valley Storage* adalah air yang secara alami tersimpan di saluran sungai sebelum pembangunan bendungan.

## II.2 Pengelolaan Sumber Daya Air dan Bendungan

Mengacu pada Undang-Undang No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, pengelolaan sumber daya air meliputi perencanaan, pelaksanaan, pemantauan, dan evaluasi terhadap upaya konservasi, pemanfaatan, serta pengendalian kerusakan sumber daya air. Pengelolaan sumber daya air (SDA) dan bendungan menjadi dua aspek utama dalam manajemen air yang bertujuan untuk menjaga ketersediaan, kualitas, serta pemanfaatan air secara berkelanjutan (Indonesia, 2020).

Pengelolaan air di bendungan merupakan upaya sistematis dalam mengatur serta mengontrol aliran debit *inflow* dan *outflow* bendungan. Pengendalian ini bermaksud untuk memastikan pemanfaatan sumber air dapat terdistribusi secara efisien sesuai dengan berbagai kebutuhan manusia, guna mendukung kesejahteraan masyarakat. Sumber air yang diatur meliputi hasil tangkapan dari curah hujan serta pasokan air dari sungai yang mengisi bendungan,

sehingga penyediaan air dapat dilakukan pada waktu dan lokasi yang tepat sesuai volume yang dibutuhkan.

Untuk mengoptimalkan distribusi air dari bendungan, diperlukan pedoman yang komprehensif terkait pola pengoperasian bendungan. Faktor-faktor yang mempengaruhi pengelolaan bendungan seperti: debit air masuk, karakteristik fisik bendungan, debit air keluar, serta metode dan pendekatan yang diterapkan, untuk meningkatkan efisiensi pengoperasian bendungan.

Tiga aspek penting dalam pengelolaan sumber daya air bawah tanah yang perlu dipahami meliputi aspek penggunaan, pelestarian, dan pengendalian:.

- a. Aspek penggunaan dalam pengelolaan SDA melibatkan penggunaan air secara optimal untuk memenuhi kebutuhan manusia. Hal ini mencakup pengelolaan, penyediaan, pemanfaatan, dan pengembangan sumber daya air. Tujuannya adalah untuk mendapatkan keuntungan dari ketersediaan air, tetapi harus diingat bahwa setiap keuntungan juga memiliki kerugian.
- b. Aspek pelestarian bertujuan agar pemanfaatan SDA dapat berkelanjutan, termasuk upaya untuk mempertahankan kelestarian sumber daya air, baik dari sisi kuantitas maupun kualitasnya. Hal ini termasuk menjaga daerah tangkapan hujan dan mencegah pencemaran limbah agar debit air tetap stabil dan kualitasnya tetap baik.
- c. Aspek pengendalian melibatkan upaya untuk mencegah, menanggulangi, dan memulihkan kerusakan kualitas lingkungan yang disebabkan oleh daya rusak air. Ini termasuk mengendalikan pencemaran air dan mengelola sumber daya air agar tetap tersedia dalam kuantitas dan kualitas yang memadai.

Bendungan merupakan struktur bangunan yang berfungsi untuk menghentikan aliran air dan mengumpulkannya di suatu tempat. *Outflow* bendungan difungsikan untuk irigasi, PLTA, dan penyediaan air bersih. Bendungan memainkan peran penting dalam pengelolaan SDA, seperti membantu dalam mengatur aliran air, mengurangi banjir, dan memastikan ketersediaan air yang cukup untuk berbagai keperluan. Bendungan juga dapat digunakan untuk menampung air pada musim hujan dan melepaskannya pada

musim kemarau, sehingga berguna untuk memastikan ketersediaan air yang stabil bagi kebutuhan air di bagian hilir bendungan.

### II. 3 Analisis Hidrologi

Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan hidrologi yang diperlukan untuk menghitung curah hujan rerata setengah bulanan. Dalam perhitungan ini, distribusi hujan diasumsikan merata di seluruh daerah aliran sungai. Walaupun, terdapat intensitas hujan yang berbeda pada setiap pos hujan. Analisis ini merupakan langkah awal dalam perencanaan bendungan, saluran drainase, dan tanggul penahan banjir (Widyasari, 2021).

#### II.3.1 Curah Hujan Rerata

Berikut langkah perhitungan yang biasanya dilakukan:

- a. Pengumpulan Data: Mengumpulkan data curah hujan dari beberapa stasiun hujan.
- b. Perhitungan Rata-rata: Menjumlahkan total curah hujan selama periode yang ditentukan dan membaginya dengan jumlah pengamatan (misalnya, jumlah hari dalam bulan atau tahun).

$$R = \frac{1}{n} (R_1 + R_2 + \dots R_n) \quad (2.1)$$

Dimana:

R = Curah Hujan (mm)

n = Jumlah pos hujan

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>n</sub> = Curah hujan di tiap pos hujan (mm)

#### II.3.2 Uji Konsistensi Hujan

Uji konsistensi menggunakan metode RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*). Metode ini dilakukan dengan menghitung nilai kumulatif penyimpangan terhadap nilai rata-rata (*mean*) dengan menggunakan persamaan berikut:

$$S^*o = 0 \quad (2.2)$$

$$S^*k = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) \quad (2.3)$$



Dengan

$$K = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$S^{**k} = \frac{S^*k}{Dy} \quad (2.4)$$

$$Dy^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - Y)^2}{n} \quad (2.5)$$

Pengujian dilakukan dengan menggunakan data dari stasiun tersebut, yaitu dengan menghitung kumulatif penyimpangan terhadap nilai rata-rata, dibagi dengan akar dari kumulatif rerata penyimpangan kuadrat terhadap nilai rata – ratanya. Penjelasan lebih rinci dapat dilihat pada rumus, nilai statistik Q dan R.

Nilai statistik Q dan R:

$$Q = \text{maks } |S^{**k}| \text{ untuk } 0 \leq k \leq n$$

$$R = \text{maks } S^{**k} - \text{min } S^{**k}$$

Dengan:

$S^*o$  = simpangan awal

$S^*k$  = simpangan mutlak

$S^{**k}$  = nilai konsisten data

$n$  = jumlah data

$Dy$  = simpangan rata-rata

$Q$  = nilai statistik Q untuk  $0 \leq k \leq n$

$R$  = nilai statistik (*range*)

### II.3.3 Curah Hujan Akhir ( $R_{eff}$ )

Curah hujan Akhir merupakan jumlah air hujan yang ada untuk tanaman dan tanah setelah mempertimbangkan berbagai faktor yang mempengaruhi penyerapan dan penggunaan air tersebut. Faktor – faktor yang mempengaruhi curah hujan Akhir adalah infiltrasi tanah, Evaporasi, kondisi tanah, dan kondisi vegetasi itu sendiri.

Curah hujan Akhir (Reff) dihitung berdasarkan  $R_{80}$ , yang menggambarkan tingkat curah hujan yang dapat terlampaui 80%, atau terjadi 8 kali dalam 10 kejadian. Dengan kata lain, curah hujan yang lebih rendah dari  $R_{80}$  memiliki kemungkinan 20% untuk terjadi. Nilai curah hujan Akhir  $R_{80}$  dihitung menggunakan rumus berikut:

$$R_{80} = \frac{n}{5} + 1 \quad (2.6)$$

Dimana:

Reff =  $R_{80}$  = Curah Hujan Akhir 80% (mm/hari)

$n/5 + 1$  = Peringkat curah hujan Akhir dihitung dari curah hujan terkecil

n = Jumlah data

Dalam penelitian ini, curah hujan Akhir yang dihitung ditujukan untuk tanaman padi dan palawija. Berdasarkan (Standar perencanaan irigasi kp-1, 2016), perhitungan curah hujan untuk tanaman padi dan palawija adalah sebagai berikut:

a. Curah Hujan Akhir Padi

Curah hujan Akhir untuk padi adalah 70% dari curah hujan tengah bulanan, atau 80% dari waktu selama periode tersebut, yang dapat dihitung melalui simulasi dengan data curah hujan harian selama setidaknya 10 tahun.

$$Re_{padi} = \frac{R_{80} \times 70\%}{jumlah\ Pengamatan} \quad (2.7)$$

Dimana:

$Re_{padi}$  = Curah hujan Akhir tanaman padi (mm/hari)

$R_{80}$  = Curah hujan Akhir (mm/hari).

b. Curah Hujan Akhir Palawija

Curah hujan Akhir untuk palawija berbeda dengan curah hujan Akhir padi. Dalam perhitungan curah hujan Akhir palawija dibutuhkan kedalaman muka air tanah, dengan rumusan sebagai berikut:

$$Re_{pal} = fd \times (1,25 \times R_{50}^{0,824} - 2,93) \times 10^{0,00095 \times ETo} \quad (2.8)$$

Dimana :

$Re_{pal}$  = Curah hujan Akhir palawija (mm/hari).

$fd$  = Faktor kedalaman muka air tanah yang diperlukan.

$$= 0,53 + (0,00016 \times 10^{-5} \times D^2) + (2,32 \times 10^{-7} \times D^3)$$

$D$  = Kedalaman muka air tanah yang diperlukan.

### II.3.4 Evaporasi

Evaporasi adalah evaporasi dari permukaan lahan yang ditumbuhi tanaman. Berkaitan dengan tanaman, Evaporasi adalah kebutuhan air konsumtif yang didefinisikan sebagai penguapan total dari lahan dan air yang diperlukan oleh tanaman. Dalam praktiknya, hitungan evaporasi dan transpirasi dilakukan secara bersama-sama ((Triatmojdo, 2010).

Penelitian ini menggunakan Metode Penman Modifikasi untuk mencari hasil Evaporasi dan debit sungai yang mempengaruhi Bendungan Way Sekampung dengan menggunakan data klimatologi sebagai data dasar untuk menghasilkan data yang lebih realistis.

Rumus perhitungan Metode Penman Modifikasi ini adalah sebagai berikut:

$$ETo = c\{W.Rn + (1 - W).f(u).(ea - ed)\} \quad (2.9)$$

Dimana:

$ETo$  = Evaporasi tanaman acuan (mm/hari)

$C$  = Angka koreksi Penman untuk kompensasi efek kondisi cuaca siang dan malam hari (Tabel Penman)

$W$  = Faktor pemberat untuk pengaruh penyinaran matahari pada Evaporasi potensial (Tabel Penman)

$(1 - W)$  = Faktor pemberat untuk pengaruh kecepatan angin dan kelembaban (Tabel Penman)

$(e_a - e_d)$  = Perbedaan tekanan uap air jenuh pada suhu udara rata-rata dengan tekanan uap air nyata rata-rata di udara (mbar)

$$e_d = e_a \times RH \quad (2.10)$$

$RH$  = Kelembaban udara relatif (%)

$R_n$  = Radiasi penyinaran matahari dalam perbandingan penguapan atau radiasi matahari bersih (mm/hari) (Tabel Penman)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.11)$$

$R_{ns}$  =  $R_s (1 - \alpha)$

$\alpha$  = Koefisien pemantulan = 0,75

$R_s$  =  $(0,25 + 0,5 (n/N)) \cdot R_a$

$R_{nl}$  =  $2,01 \times 10^9 \cdot T_4 (0,34 - 0,44 e_d 0,5) \cdot (0,1 + 0,9 n/N)$

$f(u)$  = Fungsi pengaruh angin pada  $E_{to} = 0,27 \times (1 + U_2/100)$ , dimana  $U_2$  merupakan kecepatan angin selama 24 jam dalam km/hari di ketinggian 2 m.

### II.3.5 Penelusuran Data Debit Sungai dari Data Hujan

Prosedur analisis debit andalan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan data. Apabila terdapat data debit dalam jumlah cukup panjang, maka analisis ketersediaan air dapat dilakukan dengan melakukan analisis frekuensi terhadap data debit tersebut. Apabila tidak tersedia data debit jangka panjang, maka dapat dilakukan dengan simulasi hujan-aliran. Untuk itu dibuat hubungan antara data debit dan data hujan dalam periode waktu yang sama, selanjutnya berdasarkan hubungan tersebut dibangkitkan data debit berdasar data hujan yang tersedia.

Penelitian ini juga menggunakan Metode FJ Mock untuk mensimulasikan perhitungan data hujan menjadi data debit sungai (Nuramini, 2017). Adapun prosedur perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Hujan (P)

Nilai hujan bulanan (P) didapat dari pencatatan data hujan bulanan (mm) dan jumlah hari hujan pada bulan yang bersangkutan (h).

2. Evaporasi

Evaporasi terbatas adalah Evaporasi aktual dengan mempertimbangkan kondisi vegetasi dan permukaan tanah sehingga persamaannya adalah sebagai berikut:

$$E = ETo \times \frac{d}{30} \times m \quad (2.12)$$

dimana:

E = Perbedaan antara Evaporasi potensial dan Evaporasi terbatas (mm).

ETo = Evaporasi potensial (mm)

D = Jumlah hari kering atau hari tanpa hujan dalam 1 bulan.

m = Prosentase lahan yang tidak tertutup vegetasi, ditaksir dari peta tata guna lahan, diambil:

- m = 0% untuk lahan dengan hutan lebat.

- m = 0% pada akhir musim hujan, dan penambahan 10% setiap bulan kering untuk lahan dengan hutan sekunder.

- m = 10% - 40% untuk lahan yang terisolasi.

- m = 20% - 50% untuk lahan pertanian yang diolah (sawah, ladang, perkebunan, dsb).

Jumlah permukaan kering setengah bulanan (d), dihitung dengan asumsi bahwa tanah dalam satu hari hanya mampu menahan air 12 mm dan selalu menguap sebesar 4 mm. Berdasarkan frekuensi curah hujan di Indonesia dan sifat infiltrasi serta penguapan dari tanah permukaan, didapat hubungan:

$$d = 3/2 (18 - h) \text{ atau } d = 27 - 3/2h \quad (2.13)$$

dimana:

$h$  = Jumlah hari hujan dalam sebulan.

Selanjutnya dari persamaan (2.8) dan (2.9) didapat persamaan:

$$\frac{E}{ET_o} = \left(\frac{m}{20}\right)(18 - h) \quad (2.14)$$

$$Et = ET_o - E \quad (2.15)$$

dimana:

$Et$  = Evaporasi terbatas (mm).

### 3. Keseimbangan air di permukaan tanah

Keseimbangan air di permukaan tanah dihitung berdasarkan besarnya curah hujan bulanan dikurangi nilai Evaporasi terbatas rata-rata bulanan sehingga diperoleh persamaan:

$$\Delta S = P - Et \quad (2.16)$$

dimana:

$\Delta S$  = Perubahan kandungan air tanah (*soil storage*).

Nilai positif apabila  $P > Et$ , air masuk ke dalam tanah. Nilainya negatif apabila  $P < Et$ , sebagian air tanah akan keluar sehingga terjadi defisit.

*Soil storage* adalah perubahan volume air yang ditahan oleh tanah yang besarnya tergantung pada  $(P - Et)$ , *soil storage* bulan sebelumnya.

*Soil moisture* adalah volume air untuk melembabkan tanah yang besarnya tergantung  $(P - Et)$ , *soil storage* dan *soil moisture* bulan sebelumnya. Kapasitas *soil moisture* adalah volume air yang diperlukan untuk mencapai kapasitas kelengasan tanah.

*Water surplus* adalah volume air yang akan masuk ke permukaan tanah, yaitu  $water\ surplus = (P - E) - soil\ storage$  dan 0 jika  $(P - Et) < soil\ storage$ .

Simpanan awal (*initial storage*) didefinisikan sebagai besarnya volume pada saat permulaan mulainya perhitungan. Saat musim hujan nilainya bisa sama dengan *soil moisture capacity*, tetapi untuk musim kemarau pada umumnya dipakai data kadar air tanah

#### 4. Simpanan Air Tanah (*Ground Water Storage*)

Nilai *run off* dan *ground water* besarnya tergantung dari keseimbangan air dan kondisi tanahnya.

Data yang diperlukan adalah:

Koefisien infiltrasi = I diambil 0,2 – 0,5

Faktor resesi aliran air tanah = k, diambil 0,4 – 0,7

Persamaan:

$$I_n = \text{Water Surplus} \times I \quad (2.17)$$

$$V_n = k \cdot V_{(n-1)} + 0,5(1 + k)I_n \quad (2.18)$$

$$DV_n = V_n - V_{n-1} \quad (2.19)$$

dimana:

$I_n$  = Infiltrasi volume air yang masuk kedalam tanah.

$V_n$  = Volume air tanah.

$DV_n$  = Perubahan volume air tanah bulan ke-n.

$V_{(n-1)}$  = Volume air tanah bulan ke (n-1).

I = Koefisien Infiltrasi.

#### 5. Aliran Sungai

$$\text{Interflow} = \text{Infiltrasi} - \text{Volume air tanah (mm)}. \quad (2.20)$$

$$\text{Direct run off} = \text{Water surplus} - \text{Infiltrasi (mm)}. \quad (2.21)$$

$$\text{Baseflow} = \text{Aliran sungai yang ada sepanjang tahun (m}^3 \text{/dt)}.$$

$$\text{Run off} = \text{Interflow} + \text{Direct run off} + \text{Base flow (m}^3 \text{/dt)}. \quad (2.22)$$

### II.3.6 Debit Andalan

Debit andalan adalah debit yang tersedia sepanjang tahun untuk kebutuhan tertentu, seperti air minum, PLTA, dan irigasi, dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Perhitungan debit andalan disini dimasukan untuk mencari besarnya debit sesuai untuk pemanfaatan air baku dan air irigasi. Langkah awal untuk menentukan debit andalan yaitu dengan mengurutkan debit yang ada dari nilai terbesar hingga terkecil. Rumus yang digunakan yaitu rumus Weibull (Sosrodarsono, Suyono : 1985 dalam (Fachrurrozi, 2017):



$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (2.23)$$

Dimana:

P = Probabilitas (%)

m = Nomor urut data debit

n = Jumlah data pengamatan debit

### II.3.7 Analisis Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air irigasi adalah jumlah volume air yang dibutuhkan untuk memnuhi kebutuhan tanaman dan pengganti kehilangan air. Untuk menghitung kebutuhan air irigasi menurut rencana pola tata tanam, ada faktor yang harus diperhatikan, seperti:

1. Jenis dan variasi tanaman

Jenis tanaman yang ditanam adalah padi dan palawija. Variasi tanaman ini dikelompokkan menjadi dua sampai tiga musim dalam setahun. Dari jenis dan variasi tanaman akan terbentuk suatu pola tanam yang akan disusun berdasarkan debit andalan yang tersedia.

2. Variasi koefisien tanaman, tergantung pada jenis dan tahap pertumbuhan dari tanaman.

Faktor koefisien tanaman digunakan untuk mencari besarnya air yang habis terpakai untuk tanaman pada masa pertumbuhannya. Koefisien tanaman (Kc) untuk tanaman padi dan palawija dapat diperoleh dari Tabel 1 dan Tabel 2 berikut:

Tabel 1. Koefisien Tanaman Padi

| Periode<br>Tengah<br>Bulanan | PADI              |                    |                   |                    | Kedelai |
|------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------|
|                              | Nedeco/Prosida    |                    | FAO               |                    |         |
|                              | Varietas<br>Biasa | Varietas<br>Unggul | Varietas<br>Biasa | Varietas<br>Unggul |         |
| 1                            | 1,2               | 1,2                | 1,1               | 1,1                | 0,5     |
| 2                            | 1,2               | 1,27               | 1,1               | 1,1                | 0,75    |
| 3                            | 1,32              | 1,33               | 1,1               | 1,03               | 1,0     |
| 4                            | 1,4               | 1,30               | 1,1               | 1,05               | 0,82    |
| 5                            | 1,35              | 1,30               | 1,1               | 0,95               | 0,45    |
| 6                            | 1,24              | 0                  | 1,05              | 0                  |         |
| 7                            | 1,10              |                    | 0,95              |                    |         |
| 8                            | 0                 |                    | 0                 |                    |         |

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum Pengairan, 1986 dalam (Fitriansyah et al., 2020)

Tabel 2. Koefisien Tanaman Palawija

| Setengah<br>bulan ke | Koefisien Tanaman |        |            |        |        |       |
|----------------------|-------------------|--------|------------|--------|--------|-------|
|                      | Kedelai           | Jagung | Kac. Tanah | Bawang | Buncis | Kapas |
| 1                    | 0,50              | 0,50   | 0,50       | 0,50   | 0,50   | 0,50  |
| 2                    | 0,75              | 0,59   | 0,51       | 0,51   | 0,64   | 0,50  |
| 3                    | 1,00              | 0,96   | 0,66       | 0,69   | 0,89   | 0,58  |
| 4                    | 1,00              | 1,05   | 0,85       | 0,90   | 0,95   | 0,75  |
| 5                    | 0,82              | 1,02   | 0,95       | 0,95   | 0,88   | 0,91  |
| 6                    | 0,45              | 0,95   | 0,95       | -      | -      | 1,04  |
| 7                    | -                 | -      | -          | -      | -      | 1,05  |
| 8                    | -                 | -      | -          | -      | -      | 1,05  |
| 9                    | -                 | -      | -          | -      | -      | 1,05  |
| 10                   | -                 | -      | -          | -      | -      | 0,78  |
| 11                   | -                 | -      | -          | -      | -      | 0,65  |
| 12                   | -                 | -      | -          | -      | -      | 0,65  |
| 13                   | -                 | -      | -          | -      | -      | 0,65  |

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum Pengairan, 1986 dalam (Fitriansyah et al., 2020)

### 3. Luas areal yang akan digunakan

Luas areal tanam yang menjadi daerah aliran irigasi akan memengaruhi besarnya kebutuhan air irigasi.

### 4. Sistem Golongan

Sistem golongan yaitu dengan membagi suatu daerah irigasi menjadi beberapa golongan dan kemudian menentukan kapan dimulainya persiapan pengolahan lahan untuk masing-masing golongan. Selang waktu pengolahan tanahnya yaitu 10 atau 15 hari.

## 5. Perkolasi

Perkolasi merupakan gerakan air mengalir ke bagian *moisture content* atas yang lebih dalam sampai air tanah. Laju perkolasi sangat bergantung kepada sifat-sifat tanah. Pada tanah lempung berat dengan karakteristik pengolahan yang baik, laju perkolasi dapat mencapai 1-3 mm/hari. Pada tanah-tanah yang lebih ringan, laju perkolasi bisa lebih tinggi.

Dari hasil-hasil penyelidikan tanah pertanian, besarnya laju perkolasi serta tingkat kecocokan tanah untuk pengolahan lahan dapat ditetapkan dan dianjurkan pemakaiannya. Guna menentukan laju perkolasi, tinggi muka air tanah juga harus diperhitungkan. Perembesan terjadi akibat meresapnya air melalui tanggul sawah.

Bila tidak terdapat penelitian maka dapat digunakan data seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Tabel Besar Nilai Perkolasi

| No | Tekstur Tanah              | Perkolasi (mm/hari) |
|----|----------------------------|---------------------|
| 1  | Clay                       | 1 – 1,5             |
| 2  | Silty Clay                 | 1,5 – 2             |
| 3  | Clay Loan, Silty Clay Loan | 2 – 2,5             |
| 4  | Mudy Clay Loan             | 2,5 – 3             |
| 5  | Sandy Loan                 | 3 - 5               |

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum Pengairan, 1986 dalam (Fitriansyah et al., 2020)

## 6. Kebutuhan air untuk mengganti lapisan air (WLR)

Penggantian lapisan air diperlukan untuk mengurangi efek reduksi pada tanah dan pertumbuhan tanaman. Kebutuhan air 29 untuk mengganti lapisan air ditetapkan berdasarkan (Kp-01, 2010). Besar kebutuhan air untuk penggantian lapisan air adalah 50 mm/bulan (atau 3,3 mm/hari selama ½ bulan) selama sebulan dan dua bulan setelah transplantasi.

## 7. Kebutuhan air untuk penyiapan lahan.

Perhitungan kebutuhan air selama penyiapan lahan perlu memperhatikan jenis tanaman, usia tanaman sampai dengan panen, pola tanam, efisiensi irigasi, lama penyinaran malam dan lain-lain. Metode

yang digunakan adalah metode yang dikembangkan oleh Van De Goor dan Zijlstra (Kp-01, 2010), yaitu sebagai berikut:

$$IR = M \left( \frac{e^k}{e^k - 1} \right) \quad (2.26)$$

$$k = M \left( \frac{T}{S} \right) \quad (2.27)$$

dimana:

IR = Kebutuhan air irigasi di tingkat persawahan (mm/hari).

M = Kebutuhan air untuk mengganti kehilangan air akibat evaporasi dan perkolasi di sawah yang telah dijenuhkan =  $E_o + P$  (mm/hari).

P = Perkolasi (mm/hari).

$E_o$  = Evaporasi potensial (=  $1,1 \times ETo$ ) (mm/hari).

e = Koefisien.

S = Kebutuhan air untuk penjenuhan ditambah dengan 50 mm.

T = Waktu penyinaran matahari (hari).

Untuk tanah bertekstur berat tanpa retak-retak kebutuhan air untuk penyiapan lahan diambil 200 mm. Setelah transplantasi selesai, lapisan air disawah akan ditambah 50 mm. Secara keseluruhan, ini berarti bahwa lapisan air yang diperlukan menjadi 250 mm untuk penyiapan lahan dan lapisan air awal setelah transplantasi selesai. Bila lahan telah dibiarkan bero selama jangka waktu yang lama (2,5 bulan atau lebih), maka lapisan air yang diperlukan untuk penyiapan lahan diambil 300 mm, termasuk 50 mm untuk penggenangan setelah transplantasi (Kp-01, 2010).

#### 8. Kebutuhan Air Konsumtif

Kebutuhan air untuk tanaman di lahan diartikan sebagai kebutuhan air konsumtif dengan memasukkan factor koefisien tanaman ( $kc$ ). Kebutuhan air konsumtif (*consumptive use*) dirumuskan sebagai berikut:

$$ETc = ETo \times kc \quad (2.28)$$

dimana:

$ET_c$  = Kebutuhan air konsumtif (mm/hari).

$ET_o$  = Evaporasi (mm/hari).

$k_c$  = Koefisien tanaman.

#### 9. Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air irigasi dihitung sebagai *Net Field Requirement* (NFR).

Untuk rumusannya adalah sebagai berikut:

- Kebutuhan air irigasi untuk padi:

$$NFR = ET_c + P - Re + WLR \quad (2.29)$$

- Kebutuhan air irigasi untuk palawija:

$$NFR = ET_c + P - Re \quad (2.30)$$

dimana:

NFR = Kebutuhan air di sawah (mm/hari).

$ET_c$  = Kebutuhan air konsumtif (mm).

$P$  = Kehilangan air akibat perkolasi (mm/hari).

$Re$  = Curah hujan Akhir (mm/hari).

$WLR$  = Penggantian lapisan air (mm/hari).

#### 10. Efisiensi Irigasi (EI)

Efisiensi irigasi adalah faktor penentu utama pada sebuah sistem jaringan irigasi. Efisiensi irigasi terdiri dari efisiensi pengaliran yang biasanya terjadi di jaringan utama dan efisiensi di jaringan sekunder (dari bangunan pembagi sampai petak sawah). Nilai ini didasarkan pada asumsi bahwa sebagian jumlah air yang diambil akan hilang baik di saluran maupun di petak sawah. Kehilangan tersebut disebabkan oleh kegiatan eksploitasi, evaporasi dan rembesan. Oleh karena itu, pemberian air di bangunan pengambilan harus memperhitungkan efisiensi irigasi sehingga pemberian air harus lebih besar dari kebutuhan air di sawah.

#### 11. Kebutuhan Air di Pintu Pengambilan (*Intake*).

Kebutuhan air di pintu pengambilan dapat diketahui dengan rumus:

$$DR = \frac{NFR}{8,64EI} \quad (2.31)$$

Kebutuhan Air Irigasi dalam penelitian ini menggunakan kebutuhan air irigasi rencana secara keseluruhan sehingga nilainya tetap. Perhitungan kebutuhan air irigasi tidak dilakukan dalam penelitian ini, namun dapat diperhitungkan lebih detail pada penelitian selanjutnya.

### II.3.8 Analisis Air untuk Kebutuhan Air Baku

Pelayanan air baku untuk air bersih saat ini masih dihadapkan pada beberapa tantangan terkait kuantitas dan kualitas air. Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas ekonomi menuntut ketersediaan air yang terus meningkat. Ketersediaan air baku melalui sumber permukaan yang terbatas, menyebabkan pemanfaatan air tanah berlebihan di beberapa wilayah. Pemanfaatan yang berlebihan ini akhirnya berimplikasi pada menurunnya muka air tanah dan intrusi air laut di beberapa wilayah pesisir. Disisi lain, sumber-sumber air permukaan juga dihadapkan pada isu sedimentasi yang tidak hanya mempengaruhi kuantitas, tapi juga kualitas air. Sedimentasi dipengaruhi oleh perubahan (alih fungsi) lahan terutama di daerah hulu. Selain sedimentasi, kualitas air di berbagai sumber air juga dipengaruhi oleh pencemaran yang bersumber dari berbagai kegiatan masyarakat. (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020)

Kebutuhan air perlu diperhitungkan karena air merupakan kebutuhan manusia yang harus dipenuhi. Banyaknya kebutuhan air dapat dikelompokkan menjadi (Pusdiklat Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017):

- Kebutuhan rumah tangga (*domestic use*), untuk keperluan sehari-hari makan, minum, mandi, dan lainlain.
- Kebutuhan industri dan perdagangan (*industrial and commercial use*).
- Kebutuhan air untuk pertanian, peternakan, perikanan.
- Kebutuhan air untuk lingkungan atau pemeliharaan aliran sungai

Kebutuhan air domestik dan non domestik diperkirakan berdasar jumlah penduduk saat ini dan tahun yang diproyeksikan. Jumlah penduduk dan

tingkat pertumbuhannya diperoleh dari sensus penduduk. Kebutuhan air domestik dan non domestik dihitung berdasar jumlah penduduk dan konsumsi pemakaian air per kapita per hari. Jumlah penduduk antara penduduk kota dan desa, karena konsumsi pemakaian air untuk keduanya berbeda.

Perkiraan kebutuhan air bersih tergantung dari banyaknya jumlah penduduk. Maka dari itu data jumlah penduduk pada daerah yang akan mendapat suplai air bersih sangat diperlukan dari tahun ke tahun untuk diproyeksikan pada tahun-tahun yang akan datang.

Perhitungan proyeksi jumlah penduduk dapat dilakukan dengan menggunakan metode geometrik dimana perhitungan dengan metode ini adalah dengan berdasarkan perbandingan pertumbuhan penduduk rata-rata setiap tahun. Rumusnya adalah sebagai berikut:

$$P_n = P_o \times (1 + r)^n \quad (2.32)$$

$$r = \left(\frac{P_o}{P_t}\right)^{\frac{1}{t}} - 1 \quad (2.33)$$

Dimana:

$P_n$  = Jumlah Penduduk n tahun yang akan datang tahun ke-n.

$P_o$  = Jumlah Penduduk pada awal tahun data.

$r$  = Angka pertumbuhan penduduk (%).

$n$  = Interval waktu (tahun).

Untuk menghitung jumlah kebutuhan air baku digunakan rumus sebagai berikut:

$$Q = P_n \times q \quad (2.34)$$

Dimana:

$Q$  = Kebutuhan air baku.

$P_n$  = Jumlah penduduk terlayani (jiwa).



q = Debit keluaran individu.

Standar kebutuhan air dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Standar kebutuhan air domestik.

Standar kebutuhan air domestik yaitu kebutuhan air yang digunakan pada tempat-tempat hunian pribadi untuk memenuhi keperluan sehari-hari seperti memasak, minum, mencuci dan keperluan rumah tangga lainnya. Satuan yang dipakai adalah liter/orang/hari.

Tabel 4. Tabel Perencanaan Air Baku

| No | Uraian   | Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Penduduk (Jiwa) |  |                                      |                                     |                          |
|----|--|--|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
|    |  | >1.000.000<br>Kota Metropolitan                  | 500.000 s/d<br>1.000.000<br>Kota Besar | 100.000 sd<br>500.000<br>Kota Sedang | 50.000 s/d<br>100.000<br>Kota Kecil | <50.000<br>Desa          |
| 1  | Konsumsi unit Sambungan Rumah (SR) (lt/orang/hari) | >150   | 150 – 120                              | 90 – 120                             | 80 – 120                            | 60-80                    |
| 2  | Konsumsi unit Hidran Umum (HU) (lt/orang/hari)     | 30   | 30                                     | 30                                   | 30                                  | 30                       |
| 3  | Konsumsi Unit Non Domestik (lt/orang/hari)         | 20 – 30  | 20 – 30                                | 20 – 30                              | 20 – 30                             | 20 – 30                  |
| 4  | Kehilangan Air (%)                                 | 20 – 30  | 20 – 30                                | 20 – 30                              | 20 – 30                             | 20 – 30                  |
| 5  | Faktor Hari Maksimum (FHM)                         | 1,15 – 1,25<br>*harian                           | 1,15 – 1,25<br>*harian                 | 1,15 – 1,25<br>*harian               | 1,15 – 1,25<br>*harian              | 1,15 – 1,25<br>*harian   |
| 6  | Faktor Jam Puncak (FJP)                            | 1,75 – 2,0<br>*hari Maks                         | 1,75 – 2,0<br>*hari Maks               | 1,75 – 2,0<br>*hari Maks             | 1,75 – 2,0<br>*hari Maks            | 1,75 – 2,0<br>*hari Maks |
| 7  | Jumlah Jiwa per SR (jiwa)                          | 5  | 5                                      | 5                                    | 5                                   | 5                        |
| 8  | Jumlah Jiwa per HU (Jiwa)                          | 100  | 100                                    | 100                                  | 100 – 200                           | 200                      |
| 9  | Sisa Tekan di Penyediaan Distribusi (Meter)        | 10   | 10                                     | 10                                   | 10                                  | 10                       |
| 10 | Jam Operasi (Jam)                                  | 24   | 24                                     | 24                                   | 24                                  | 24                       |
| 11 | Volume Reservoir (% Max Day Demand)                | 15 – 25  | 15 – 25                                | 15 – 25                              | 15 – 25                             | 15 – 25                  |
| 12 | SR – HU  | 50 – 50 s/d 80 : 20                              | 50 – 50 s/d 80 : 20                    | 80 : 20                              | 70 : 30                             | 70 : 30                  |
| 13 | Cakupan Pelayanan (%)                              | 90   | 90                                     | 90                                   | 90                                  | 90                       |

Sumber: Kriteria Perencanaan Air Bersih Dirjen Cipta Karya Dinas PU, 1996 dalam (Tumanan et al., 2017)

## 2. Standar kebutuhan air non domestik

Standar kebutuhan air non domestik adalah kebutuhan air bersih diluar keperluan rumah tangga. Kebutuhan air non domestik terdiri dari penggunaan komersil dan industri, yaitu penggunaan air oleh badanbadan komersil dan industri. Dan penggunaan umum, yaitu penggunaan air untuk bangunan-bangunan pemerintah, rumah sakit, sekolah-sekolah dan tempattempat ibadah.

a. Kebutuhan air untuk perkantoran. Kebutuhan air bersih untuk kantor ditetapkan 10 liter/pegawai/hari (Direktorat Teknik Penyehatan, Dirjend Cipta Karya DPU), yang merupakan rerata kebutuhan air untuk minum, wudhu, mencuci tangan/kaki, kakus dan lain sebagainya yang berhubungan dengan keperluan air di kantor.

b. Kebutuhan air untuk rumah sakit.

Kebutuhan air untuk rumah sakit dihitung berdasarkan jumlah tempat tidur. Menurut Direktorat Teknik Penyehatan, Dirjend Cipta Karya DPU, pemakaian air untuk fasilitas kesehatan adalah sebesar 200 liter/tempat tidur/hari.

c. Kebutuhan air untuk pendidikan.

Menurut Direktorat Teknik Penyehatan, Dirjend Cipta Karya DPU, kebutuhan air bersih untuk siswa sekolah adalah sebesar 10 liter/siswa/hari.

d. Kebutuhan air untuk industri.

Analisis kebutuhan air untuk industri dapat dihitung dengan dua cara. Untuk wilayah yang data luas lahan rencana kawasan industrinya diketahui, kebutuhan industri dihitung dengan menggunakan metode penggunaan lahan industri yaitu sebesar 0,4 liter/detik/ha. Untuk wilayah yang tidak diperoleh data penggunaan lahan industri, kebutuhan air industri dihitung dengan menggunakan metode persamaan linier. Standar yang digunakan adalah dari Direktorat Teknik Penyehatan, Dirjend Cipta Karya DPU, yaitu kebutuhan air untuk industri sebesar 10% dari konsumsi air domestik.

e. Kebutuhan air untuk pariwisata

Kebutuhan air untuk pariwisata didapat dari data jumlah wisatawan yang menginap dan rata – rata durasi lama menginap di tempat wisata di Kabupaten Pringsewu, kemudian diproyeksikan menggunakan acuan SNI dari Dirjen Cipta Karya sumber daya air Tahun 2002. Rumus perhitungan kebutuhan air pariwisata adalah:

$$X = n \times t \times 90 \text{ L/hari} \quad (2.35)$$

Dengan:

X = jumlah kebutuhan air pariwisata

n = jumlah wisatawan

t = durasi menginap (hari), dalam penelitian ini, durasi menginap = 1

Untuk lebih lengkapnya, kebutuhan air untuk sektor non domestik dapat dilihat pada Tabel 5. Yang dikeluarkan oleh Direktorat Teknik Kesehatan, DirJend Cipta Karya DPU.

Tabel 5. Kebutuhan Air Non Domestik

| SEKTOR           | NILAI     | SATUAN                  |
|------------------|-----------|-------------------------|
| Sekolah          | 10        | Liter/murid/hari        |
| Rumah Sakit      | 200       | Liter/bed/hari          |
| Puskesmas        | 2000      | Liter/unit/hari         |
| Masjid           | 3000      | Liter/unit/hari         |
| Kantor           | 10        | Liter/pegawai/hari      |
| Pasar            | 12000     | Liter/hektar/hari       |
| Hotel            | 150       | Liter/bed/hari          |
| Rumah Makan      | 100       | Liter/tempat duduk/hari |
| Komplek Militer  | 60        | Liter/orang/hari        |
| Kawasan Industri | 0,2 – 0,8 | Liter/detik/hari        |
| Kawasan Wisata   | 0,1 – 0,3 | Liter/detik/hari        |

Sumber: Dirjen Cipta Karya Dinas PU, 1996 dalam (Musfira, 2018)

## II.4 Pendekatan Sistem Dinamis

Sistem dinamik adalah suatu metode analisis permasalahan dimana waktu merupakan salah satu faktor penting, dan meliputi pemahaman bagaimana suatu sistem dapat dipertahankan dari gangguan di luar sistem, atau dibuat sesuai dengan tujuan dari pemodelan sistem yang akan dibuat (Firmansyah &

Suryani, 2017). Ini berlaku untuk masalah-masalah dinamis yang terjadi dalam sistem sosial, manajemen, ekonomi, atau ekologi yang kompleks - secara harfiah setiap sistem dinamis ditandai oleh saling ketergantungan, kesamaan interaksi, informasi umpan balik, dan lingkaran sebab akibat (Khushik & Diemer, 2021).

Pendekatan model sistem dinamis terdiri dari (Kunc, 2016):


- a) Menjelaskan masalah secara dinamis, dalam hubungan grafik terhadap waktu
- b) Melihat perilaku sistem yang penting, fokus ke dalam karakteristik dari sistem tersebut
- c) Memikirkan keseluruhan konsep pada sistem nyata sebagai kuantitas kontinyu yang saling berhubungan dalam *loops of information feedback and circular causality*
- d) Mengidentifikasi *stock* pada sistem

Metodologi Dinamika Sistem melibatkan dominasi dan non-linearitas dari loop, konsep perubahan endogen, struktur sistem (batas sistem, loop umpan balik, tingkat dan laju, tujuan, pengamatan keadaan, deviasi, tindakan yang diinginkan), stok (tingkat) dan aliran (laju) sebagai komponen penting dari struktur sistem, dan perilaku karena struktur tersebut. Transisi ke sistem dinamis memungkinkan integrasi pendekatan kualitatif dan kuantitatif ke dalam model, yang melalui simulasi komputer, memungkinkan simulasi jangka panjang (10 - 25 - 50 - 100 tahun) (Khushik & Diemer, 2021).

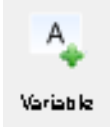



Hubungan variabel dan parameter dalam model sistem dinamis hanya memiliki hubungan sebab akibat langsung. Untuk membangun model sistem dinamis seseorang perlu melihat, mengidentifikasi dan memahami hubungan sebab akibat langsung dalam model tersebut. Oleh karena itu, sistem dinamis dapat digunakan untuk menyelidiki interaksi antara struktur dan perilaku kompleks yang dinamis dari suatu masalah. Kemudian dari hasil pengamatan dapat dikembangkan skenario dalam mencapai tujuan yang diinginkan (Morecroft, 2010).

### II.4.1 Vensim PLE

Vensim adalah alat pemodelan visual yang memungkinkan untuk melakukan pembuatan konsep, mendokumentasikan, menyimulasikan, menganalisis, dan mengoptimalkan model sistem dinamik (Almalik, 2021). Vensim menyediakan cara mudah dan sederhana untuk membangun model simulasi, baik itu *Causal Loop Diagram* (CLD) atau *Stock and Flow Diagram* (SFD) (Almalik, 2021).

Vensim PLE (*Personal Learning Edition*)  merupakan salah satu konfigurasi yang dirancang untuk memudahkan pengguna mempelajari sistem dinamis. Vensim PLE dapat memodelkan satu atau lebih kuantitas yang berubah seiring waktu. ‘Tools’ dasar dalam membuat model sistem dinamis dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. *Tools* Dasar Pada Vensim

| <i>Tool</i>  | <i>Icon</i>   | <i>Fungsi</i>  |
|--|---|--|
| <i>Variable-Auxiliary/Constant</i> atau <i>Converter</i> |  | Konversi; menyimpan persamaan ataupun nilai yang tetap; tidak terakumulasi |
| <i>Box Variable</i> atau <i>Stock</i>                    |  | Kata benda; mewakili sesuatu yang terakumulasi                             |
| <i>Arrow</i> atau <i>Connector</i>                       |  | Mengirim <i>input</i> dan informasi  |
| <i>Rate</i> atau <i>Flow</i>                             |  | Kata kerja; mengubah besaran <i>Box Variable</i>                           |

Pada istilah Vensim PLE, ‘*Box Variable*’ atau ‘*Stock*’ merupakan kata benda dan mewakili sesuatu yang terakumulasi. Contoh dari ‘*Stock*’ antara lain populasi, uang, dan pengunjung. Besaran ‘*Stock*’ memberi informasi gambaran dari sistem (Shiflet, 2006).

#### II.4.2 *Causal Loop Diagram (CLD)*

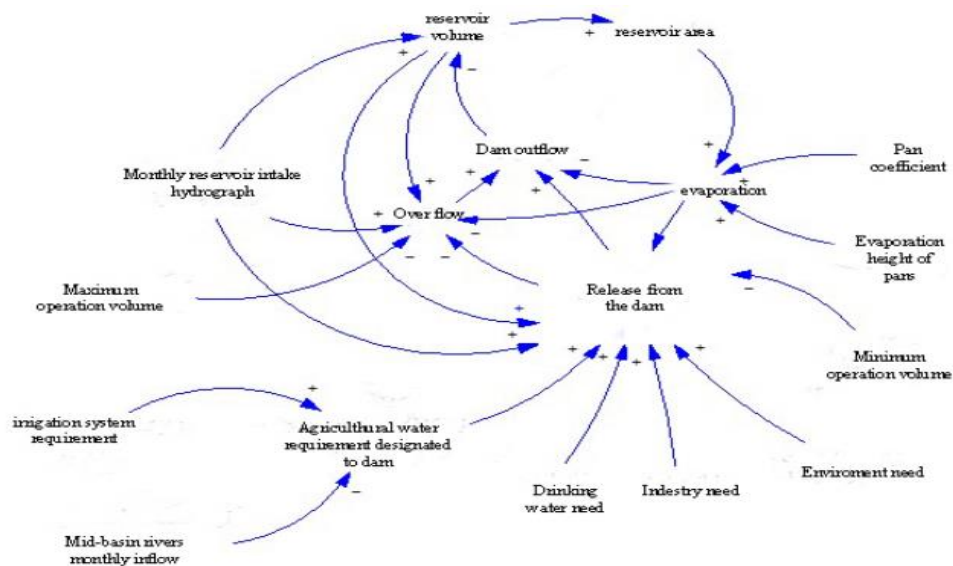
Sistem Dinamis memandang suatu masalah sebagai suatu hal yang memiliki dua sifat yaitu dinamis dan membentuk struktur umpan balik (*feedback loops*). Diagram yang digunakan untuk merepresentasikan struktur umpan balik ini adalah diagram *loop* sebab akibat (diagram kausal). Diagram ini akan menjadi dasar penyusunan diagram alir (*flow diagram*) (Wirabhuana, 2009). *Causal Loop Diagram* merupakan langkah awal dalam menyusun sebuah sistem dinamis karena memiliki dua alasan. Pertama, diagram ini cukup sederhana, *Causal Loop Diagram* terdiri dari beberapa variabel yang saling berhubungan, baik secara negatif atau positif, membentuk *feed back loop*. Kedua, *Causal Loop Diagram* mampu memberikan gambaran serta pemahaman dengan mudah terhadap topik yang akan dipelajari atau diteliti (Kunc, 2016).

Casual Loop Diagram (CLD) digunakan untuk mengetahui dan memahami perilaku dari suatu sistem, sehingga dapat digunakan untuk memberikan hipotesis terhadap suatu penyebab dalam sistem. Aturan untuk menggambar *causal loops diagram* sangat sederhana. Hubungan antara beberapa variabel pada *Casual Loop Diagram* (CLD) yang membentuk sebuah *loop*, dapat dikategorikan sebagai *balancing loop* ataupun *reinforcing loop*. *Reinforcing loop* adalah hubungan antara variabel yang saling menguatkan, ditandai dengan semua tanda *positive* (+) maupun memiliki tanda *negative* berjumlah genap. Sedangkan *balancing loop* adalah hubungan antar variabel yang seimbang, ditandai dengan adanya tanda anak panah negatif yang berjumlah ganjil.

Pembuatan *Causal Loop Diagram* (CLD) dapat digunakan untuk mengetahui pola perilaku dan hubungan antar variabel yang telah diidentifikasi sebelumnya, sehingga dapat dilihat kesesuaian model terhadap perilaku sesungguhnya dalam dunia nyata.

Hubungan sebab akibat ditunjukkan dengan dua tanda positif (+) dan negative (-), jika perubahan variabel independen dan dependen searah, maka

hubungan sebab akibat akan positif (+), dan jika perubahannya berlawanan arah, maka hubungan sebab akibat akan negatif (-).



Gambar 1. Contoh Causal Loop Diagram (CLD) Sebuah Bendungan (Koushali et al., 2015) yang memiliki hubungan sebab akibat antar variabelnya.

Identifikasi variabel perlu dilakukan dengan mengidentifikasi faktor – faktor apa saja yang saling berhubungan dan dapat digunakan dalam pembuatan model simulasi sistem dinamik. Berdasarkan hasil studi literatur dan dari berbagai penelitian lainnya terdapat beberapa hal yang dapat digunakan dalam mempengaruhi pengoperasian bendungan, diantaranya adalah:

1. Jumlah populasi Kabupaten Pringsewu (orang)
2. Jumlah kebutuhan air untuk industri dan pariwisata yang berhubungan dengan pertumbuhan ekonomi yang ada di Kabupaten Pringsewu (unit)
3. Jumlah kebutuhan air untuk pertanian dalam memenuhi kebutuhan pangan di Kabupaten Pringsewu ( $m^2$ )
4. Jumlah kapasitas tampungan bendungan untuk memenuhi kebutuhan air di Kabupaten Pringsewu ( $m^3$ )
5. Beberapa *impact factor* yang ada dan dapat berpengaruh terhadap penggunaan dan kebutuhan air di Bendungan Way Sekampung (persentase).

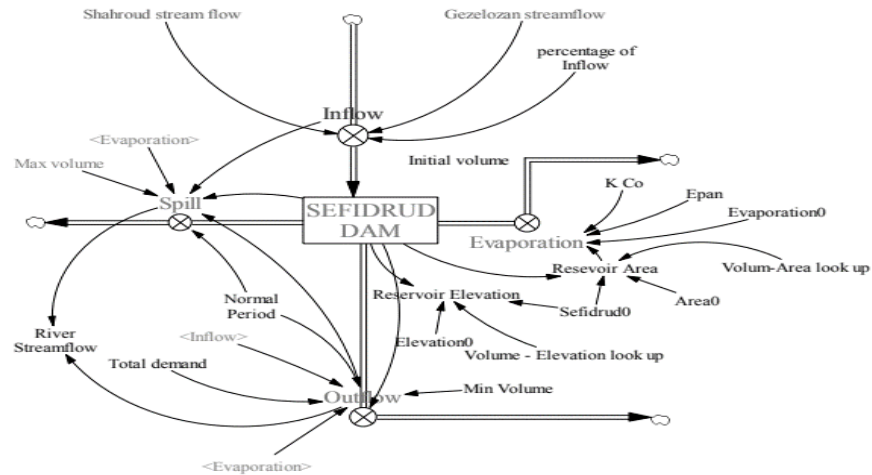


Beberapa hal yang telah disampaikan diatas merupakan faktor – faktor yang dapat dijadikan sebuah variabel untuk membantu pembuatan dan pengembangan *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock and Flow Diagram* (SFD). Variabel-variabel yang digunakan pada pengembangan model optimasi pola operasi Bendungan ini nantinya akan dijelaskan seiring dengan penjelasan pada saat pengembangan *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock and Flow Diagram* (SFD).

#### **II.4.3 Stock dan Flow Diagram**

*Stock and Flow Diagram* (SFD) merupakan bentuk pengembangan dari model *Causal Loop Diagram* (CLD) yang sudah dibuat sebelumnya. Setelah melakukan pembuatan pada *Causal Loop Diagram* (CLD), proses selanjutnya adalah melakukan perancangan *Stock and Flow Diagram* (SFD). *Stock and flow diagram* (SFD) yang ditampilkan merupakan representasi sistem dinamis yang mengelola sebuah bendungan dengan memperhitungkan interaksi antara sumber daya air (tanah, permukaan, dan penyimpanan bendungan) dengan pemanfaatannya di berbagai sektor.

*Stock and Flow Diagram* memiliki beberapa notasi diantaranya adalah *stock* (*level*), *flow* (*rate*), *auxiliary*, dan *system boundary* (*source/sink*). Notasi tersebut memiliki peran dan fungsi masing-masing dalam menciptakan sebuah model yang representatif dan dapat dihitung. *Stock* direpresentasikan sebagai persegi panjang, yang menunjukkan akumulasi, dan *flow* adalah gambar pipa yang menunjuk ke dalam atau keluar dari *stock*. Awal di awal atau akhir *flow* mencerminkan batas representasi model karena mereka mencerminkan sumber (*Inflows*) dan akhir (*Outflows*) (Series & Sterman, 2003).



Gambar 2. Contoh Diagram Stock & Flow Sebuah Bendungan (Sefridud Dam) (Koushali et al., 2015)

Tabel 7. Notasi *Stock & Flow Diagram* pada Vensim

| Variabel           | Simbol | Keterangan  |
|--------------------|--------|---|
| <i>Level</i>       |        | Merupakan variabel yang menyatakan akumulasi dari suatu benda dari waktu ke waktu. Dapat berupa manusia, barang, ataupun lainnya. Akumulasi <i>rate</i> dapat mengubah nilainya.                      |
| <i>Rate</i>        |        | Merupakan suatu aktivitas atau <i>movement</i> (pergerakan), atau aliran yang bergerak terhadap perubahan waktu. <i>Rate</i> ini dapat mengubah <i>state</i> dari level awal menuju level berikutnya. |
| <i>Auxiliary</i>   |        | Merupakan variabel yang merepresentasikan formulasi yang dapat mempengaruhi <i>rate</i> atau variabel lainnya.  |
| <i>Source/Sink</i> |        | Source merupakan variabel yang mengartikan system diluar batasan model dan Sink mengartikan terminasi sistem  |

Model sistem dinamis pada dasarnya adalah sistem persamaan integral di mana waktu dianggap berkelanjutan dan ukuran (ds) tercermin dalam ukuran langkah waktu dalam perangkat lunak pemodelan (misalnya Vensim, iThink, dll.) (Morecroft, 2010)

$$Stock(t) = \int_{t_0}^t [Inflow - Outflow] ds + Stock(t_0) \tag{2.36}$$

Dalam Vensim, istilah "*auxiliary*" merujuk pada jenis variabel atau elemen dalam model yang digunakan untuk menghitung nilai berdasarkan hubungan matematis atau logika. Variabel *auxiliary* biasanya tidak menyimpan nilai di

sepanjang waktu seperti level (*stock*), melainkan nilainya dihitung ulang setiap kali simulasi dijalankan berdasarkan input atau perubahan variabel lainnya. *Auxiliary* berfungsi untuk merepresentasikan persamaan, logika, atau transformasi matematika dari variabel lainnya. Contoh: Jika terdapat variabel Air Limpasan = Koefisien Infiltrasi \* Curah Hujan, maka Air Limpasan adalah *auxiliary*.

Istilah "level" merujuk pada jenis variabel yang digunakan untuk merepresentasikan stok atau akumulasi dalam suatu sistem dinamis. Variabel level menyimpan nilai yang berubah dari waktu ke waktu berdasarkan aliran masuk (*Inflow*) dan aliran keluar (*Outflow*). Level biasanya menjadi pusat dari model sistem dinamis karena mewakili keadaan sistem pada titik tertentu dalam waktu. Contoh: Jumlah air di bendungan, populasi manusia, cadangan sumber daya, atau volume air tanah. Level dapat merepresentasikan stok yang bersifat fisik (misalnya air, populasi) atau non-fisik (misalnya modal, pengetahuan, atau emosi).

Dan istilah "*constant*" mengacu pada jenis variabel yang memiliki nilai tetap sepanjang simulasi. Variabel *constant* digunakan untuk mewakili parameter atau nilai yang tidak berubah selama periode simulasi, sehingga menjadi dasar untuk perhitungan variabel lain dalam model. Biasanya digunakan untuk merepresentasikan nilai yang diketahui dari suatu sistem atau kondisi, seperti koefisien, faktor koreksi, atau batasan fisik. Contoh: Koefisien infiltrasi, faktor evaporasi, laju pertumbuhan, atau luas genangan.

Tabel 8. Perbedaan Variabel *Constant*, *Auxiliary*, *Level/Rate*

| Komponen         | Fungsi  | Contoh                                 |
|------------------|---|--|
| <i>Constant</i>  | Nilai tetap, digunakan sebagai parameter dasar              | Koefisien Infiltrasi, Laju Pertumbuhan |
| <i>Auxiliary</i> | Menghitung hubungan logis antara variabel lain              | Infiltrasi, Limpasan Air               |
| <i>Level</i>     | Mewakili perubahan <i>stock</i> atau akumulasi dalam sistem | Air Tanah, Populasi, Volume Bendungan  |
| <i>Rate</i>      | Mewakili perubahan <i>stock</i> ( <i>Inflow/Outflow</i> )   | Air Tanah Masuk, Air Tanah Keluar      |

Dalam pembuatan *Stock and Flow Diagram* (SFD) akan dibuat menjadi beberapa sub-model untuk mempermudah dalam pengamatan dan analisis. Pembentukan sub-model tersebut berdasarkan variabel-variabel yang signifikan terhadap tujuan dilakukannya penelitian ini. Masing-masing sub-model akan dijelaskan formula dari setiap variabel yang digunakan. Formulasi tersebut didapatkan melalui proses pengambilan data yang telah diolah saat melakukan pengumpulan data maupun studi literatur. Sebelum melangkah kedalam pembuatan SFD ada beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan variabel mana saja yang memiliki peran penting dalam model pola operasi bendungan.
2. Menentukan variabel mana yang dapat dijadikan *level* maupun *auxiliary* dan mana variabel yang dapat dijadikan *rate*.
3. Menentukan interval waktu (*time stamp*) yang akan digunakan dalam simulasi, sehingga data yang diperoleh nantinya dapat sesuai dengan penentuan waktu simulasi. Hal ini untuk mempermudah proses validasi nantinya

Setelah melakukan perancangan *Stock and Flow Diagram* (SFD), tahapan selanjutnya adalah melakukan verifikasi pada model. Proses verifikasi model ini dilakukan untuk memastikan bahwa *Stock and Flow Diagram* (SFD) yang telah dibuat terbebas dari *error* yang menyebabkan model tidak dapat dijalankan. Setelah pembuatan model beserta formulasinya maka akan dilakukan *running* terhadap model tersebut menggunakan *tools* aplikasi *Ventana Simulation* (Vensim).

Setelah proses verifikasi berhasil dilakukan dan tidak terdapat *error* pada model, langkah berikutnya adalah melakukan pengujian atau validasi terhadap model yang sudah dibuat. Setelah rancangan pada *base model* telah memenuhi syarat dalam verifikasi dan validasi, tahapan selanjutnya akan dilakukan pada penelitian ini adalah melakukan pengembangan skenario berdasarkan *base model* yang telah dirancang sebelumnya. Pengembangan skenario ini dilakukan untuk memenuhi tujuan dari penelitian yang

dilakukan, yaitu meningkatkan keandalan Bendungan dalam memenuhi kebutuhan air dalam semua sektor

## II.5 Analisis Model

Simulasi dapat dipahami sebagai suatu metode permodelan yang digunakan untuk merepresentasikan perilaku suatu sistem ke dalam suatu model. Metode ini digunakan untuk menganalisis potensi dampak dari berbagai input/skenario yang diberikan pada sistem melalui pemahaman terhadap berbagai skenario yang diuji. Meskipun demikian, simulasi bukanlah suatu prosedur yang bertujuan untuk mengukur tingkat keandalan atau kegagalan dalam konteks operasional. Namun, simulasi operasi bendungan diperlukan untuk menilai performa sistem dalam berbagai kondisi operasional yang mungkin terjadi.

Metode simulasi ada beberapa tipe, diantaranya:

- a. Simulasi fisik, contoh: model skala fisik hidraulik
- b. Simulasi analog, contoh: models imulasi dengan bentuk rangkaian listrik
- c. Simulasi digital, dengan menggunakan persamaan matematis, contoh: perhitungan keseimbangan air untuk simulasi bendungan
- d. Simulasi dengan program dinamis, contoh: simulasi kinerja pengoperasian bendungan dengan program VenSim, PowerSim, Stella, dll.

Simulasi dengan program dinamis berfungsi untuk mengevaluasi hasil pola pengoperasian bendungan dalam memenuhi kebutuhan pelayanannya. Model simulasi akan menganalisis probabilitas keandalan atau kegagalan rencana operasi yang telah ditetapkan. Prinsip dasar simulasi merupakan pengembangan dari persamaan berikut:

$$\Delta S = I - O \quad (2.37)$$

Dimana:

$\Delta S$  = Perubahan simpanan air (*Change of storage*)

$I$  = Masukan (*Inflow*)

$O$  = Keluaran (*Outflow*)

Bentuk persamaan tampungan yang sering digunakan untuk operasi bendungan adalah persamaan kontinuitas yang memberi hubungan antara masukan, keluaran dan perubahan tampungan yang disebut analisis perilaku (model simulasi) seperti yang ditunjukkan oleh gambar 1. Persamaan tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$S_{(t+1)} = S_t + Qt - Dt - Et - Lt \text{ dengan } 0 < S_t \leq C \quad (2.38)$$

Dalam proses simulasi model dinamis, yang ditetapkan sebagai masukan (*input*) ke dalam sistem adalah debit *Inflow* bendungan dan tampungan bendungan dari hujan yang terjadi (*presipitasi/rainfall*), dan sebagai keluaran (*output*) adalah kebutuhan air irigasi, kebutuhan air baku, kebutuhan air untuk pariwisata dan industri ditambah dengan evaporasi.

## II.6 Evaluasi Kinerja Bendungan

Dari simulasi tampungan bendungan, maka didapat peluang kegagalan dan keandalan bendungan. Ada tiga indikator yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja bendungan yaitu keandalan, kelentingan dan kerawanan. Indikator-indikator tersebut kemudian digunakan untuk mengevaluasi kinerja bendungan dalam memenuhi kebutuhan air di hilir bendungan dan juga mengevaluasi kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan pembangkit listrik tenaga air.

### 1. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan adalah persentase waktu di mana kebutuhan air terpenuhi, yang dapat dihitung dengan membandingkan jumlah tahun ketika *Inflow* + *storage* cukup untuk memenuhi *Outflow*. Kondisi kebutuhan terpenuhi:

$$Inflow \text{ (m}^3\text{/tahun)} + Storage \text{ (m}^3\text{)} \geq Outflow \text{ (m}^3\text{/tahun)} \quad (2.39)$$

### 2. Kerawanan (*Vulnerability*)

Kerawanan adalah rata-rata defisit air selama periode kebutuhan tidak terpenuhi, dihitung untuk tahun di mana defisit terjadi, dengan persamaan perhitungan:

$$\text{Kerawanan} = \frac{\text{Total Defisit}}{\text{Jumlah Tahun Defisit}} \quad (2.40)$$

Defisit air dihitung sebagai:

$$\text{Defisit} = Outflow - (Inflow + Storage) \quad (2.41)$$

### 3. Kelentingan (*Resilience*)

Pemulihan terjadi jika kebutuhan kembali terpenuhi setelah satu atau lebih tahun deficit. Kelentingan adalah rasio jumlah tahun pemulihan terhadap jumlah tahun defisit, dihitung dengan persamaan:

$$\text{Kelentingan} = \frac{\text{Jumlah Tahun Pemulihan}}{\text{Jumlah Tahun Defisit}} \quad (2.42)$$

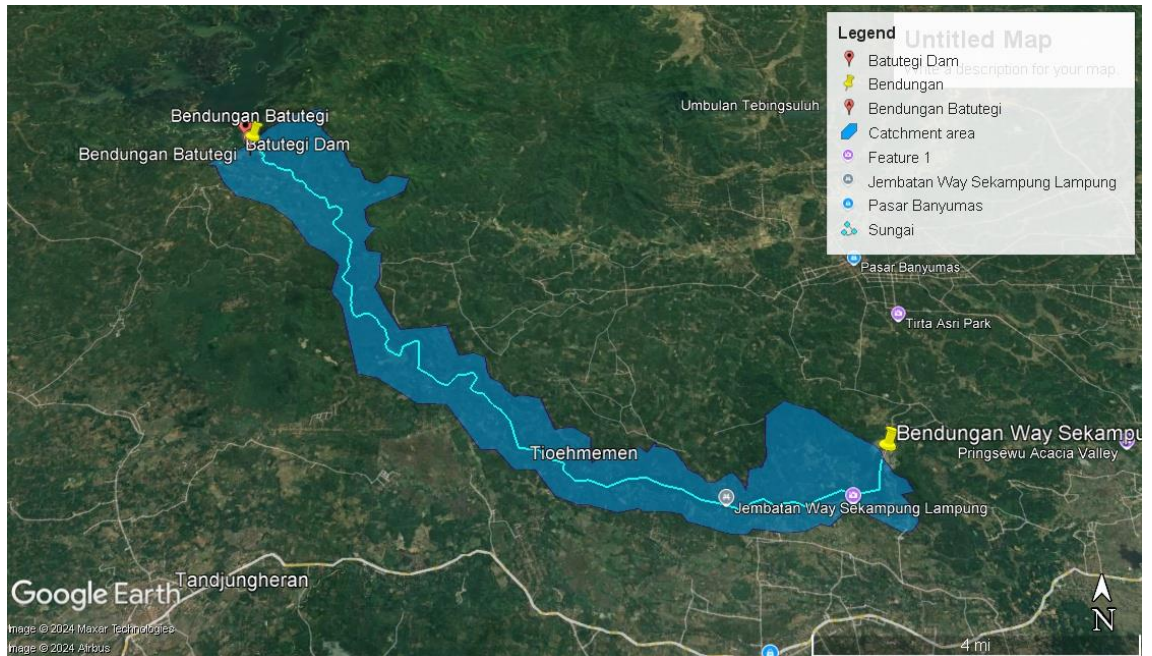
### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### III.1 Lokasi Daerah Penelitian

Secara administratif, lokasi penelitian studi ini berada di Bendungan Way Sekampung yang terletak di Provinsi Lampung, Indonesia pada koordinat 104°48' – 105°08' Bujur Timur dan 5°12' – 5°33' Lintang Selatan. Secara geografis, bendungan ini dapat memberikan manfaat bagi wilayah sekitarnya dalam pengelolaan air. Bendungan Sekampung memiliki beberapa fungsi utama antara lain untuk irigasi (mendukung sektor pertanian), pengendalian banjir (mengurangi risiko banjir), dan pembangkit listrik *mini hydro* (memanfaatkan energi air untuk menghasilkan listrik) (Kirmanto, 2017).

Bendungan Way Sekampung memiliki kapasitas tampung sekitar 68 juta m<sup>3</sup> yang dapat dimanfaatkan untuk menambah areal irigasi seluas 15.000 hektar dalam Sistem Irigasi Sekampung yang semula 55.373 hektar menjadi total seluas 76.000 hektar (meliputi intensifikasi areal 55.373 hektar dan pengembangan D.I Rumbia Extension dengan luas 17.334 hektar) sehingga meningkatkan intensitas tanam menjadi 270% terutama untuk Kabupaten Pringsewu. Bendungan Way Sekampung juga dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan air baku sebesar 2.482 l/det untuk kota Bandar Lampung dan daerah sekitar Branti yang umumnya diambil dari sungai atau waduk yang kemudian dialirkan ke areal persawahan melalui sistem jaringan irigasi teknis maupun non teknis untuk memenuhi kebutuhan air pada tanaman selama masa tanam (Suprpto & Noerhayati, 2021).





Gambar 3 Peta Daerah Tangkapan Air Bendungan Way Sekampung

Tabel 9. Pelayanan Bendungan Way Sekampung Berdasarkan Daerah Irigasi

| No | Daerah Irigasi       | Luas Baku (Ha) | Luas Fungsi (Ha) |
|----|----------------------|----------------|------------------|
| 1  | Punggur Utara        | 29.350         | 21.181           |
| 2  | Bekri                | 6.500          | 5.000            |
| 3  | Rumbia               | 6.075          | 5.106            |
| 4  | Sekampung Batanghari | 12.485         | 9.852            |
| 5  | Sekampung Bunut      | 7.612          | 5.297            |
| 6  | Batanghari Utara     | 7.680          | 4.721            |
| 7  | Raman Utara          | 6.304          | 4.216            |
|    | Total                | 76.006         | 55.373           |

Sumber: data BBWS Mesuji-Sekampung, 2022

### III.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif dengan pendekatan kuantitatif. Metode deskriptif melibatkan pengumpulan data untuk menguji hipotesis atau menjawab pertanyaan tentang pendapat orang atas sebuah isu atau topik. Penelitian kuantitatif menekankan analisisnya pada data-data numerikal yang diolah dengan metode statistik. Dengan metode kuantitatif akan diperoleh signifikansi hubungan antar variabel.

### **III.3 Teknik Pengumpulan Data**

Teknik pengumpulan data merupakan cara yang dilakukan peneliti untuk mengungkap atau menjangkau informasi kuantitatif dari responden sesuai lingkup penelitian (Sujarweni, 2018). Pada penelitian ini, pengumpulan data yang dilakukan berupa: Peta, Data Teknis Waduk, Data Karakteristik Tampung, Data Hidrologi,.

#### **III.3.1 Data Hidrologi**

Data hidrologi bertujuan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menginterpretasi data terkait dengan peristiwa-peristiwa hidrologi seperti curah hujan, aliran sungai, kelembaban tanah, dan parameter hidrologi lainnya.

#### **III.3.2 Data Klimatologi**

Data klimatologi memainkan peranan penting untuk memahami kondisi iklim yang mempengaruhi berbagai fenomena alam dan kegiatan manusia. Data klimatologi, yang mencakup informasi tentang pola suhu, curah hujan, kelembaban, tekanan atmosfer, dan kecepatan angin, sangat dibutuhkan dalam banyak bidang penelitian, seperti pertanian, sumber daya air, kesehatan masyarakat, dan perubahan iklim.

#### **III.3.3 Data Spesifikasi Teknis Bendungan**

Meliputi data teknis Bendungan Way Sekampung dan data – data pendukung lainnya untuk menunjang perhitungan – perhitungan yang akan dilakukan.

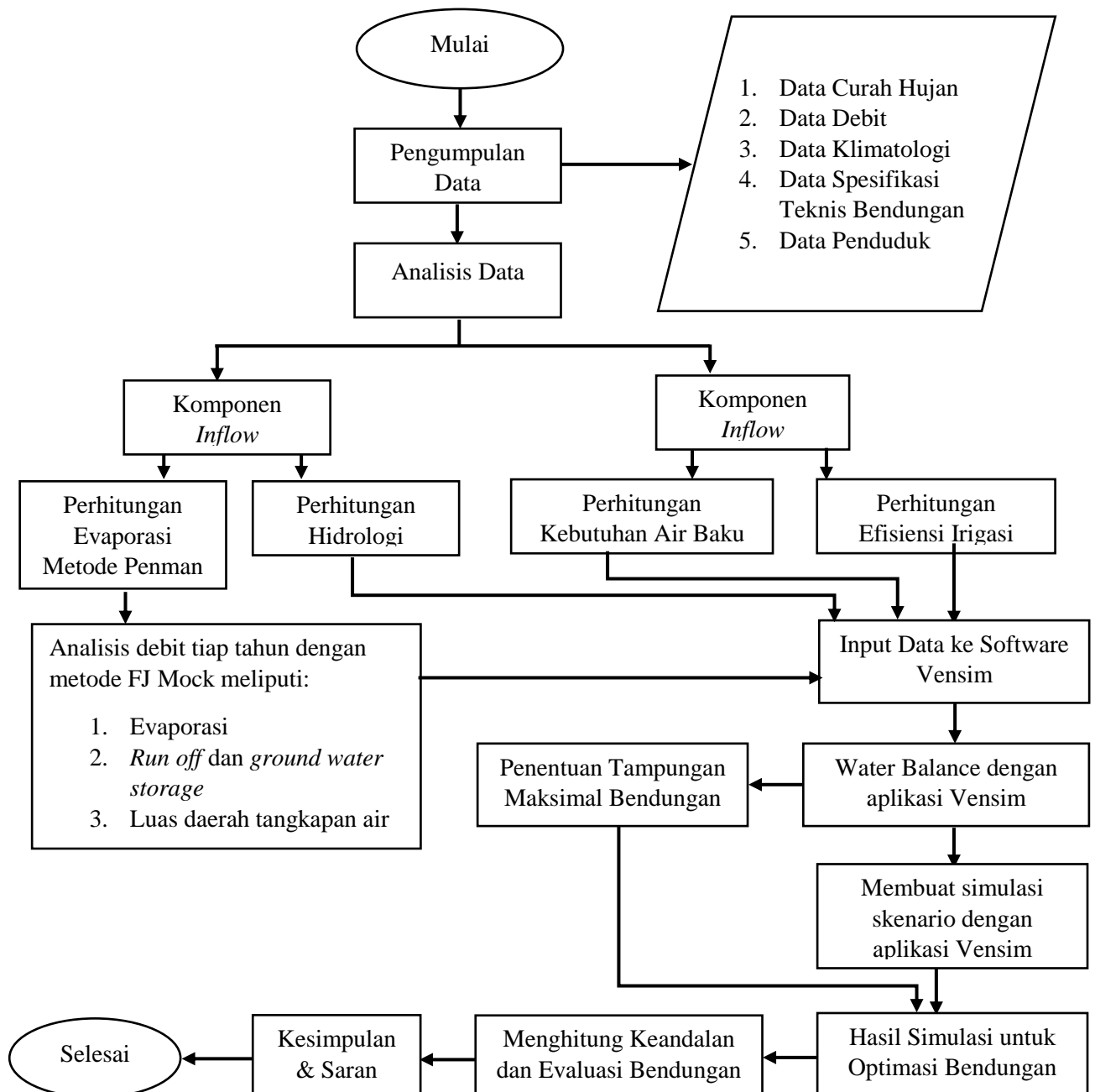
### **III.4 Analisis Data dan Tahapan Perhitungan**

Adapun Analisis data dan tahap perhitungan yang dimaksud meliputi :

1. Perhitungan Evaporasi
2. Analisis hidrologi meliputi :
  - Analisis curah hujan rata – rata
  - Analisis curah hujan Akhir
3. Perhitungan data debit Bendungan Way Sekampung dengan metode FJ Mock
4. Perhitungan penambahan perluasan lahan pertanian

5. Perhitungan kebutuhan air baku
6. Perhitungan dan simulasi *water balance* dengan menggunakan software Vensim
7. Penjabaran Optimasi Bendungan Way Sekampung
8. Perhitungan keandalan Bendungan Way Sekampung

### III.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 4 Bagan Alir Penelitian

## **BAB V. SIMPULAN DAN SARAN**

### **V.1 Simpulan**

Berdasarkan uraian dan penjelasan diatas, didapatkan kesimpulan:

- a. Secara keseluruhan, hasil simulasi skenario Vensim pada sistem bendungan menunjukkan bahwa bendungan Way Sekampung memiliki keandalan operasional yang tinggi berdasarkan kondisi ideal. Nilai kinerja bendungan yang didapatkan dari simulasi aplikasi Vensim adalah keandalan 100%, kelentingan 0% dan kerawanan 0%. Bendungan mampu memenuhi kebutuhan permintaan air di hilir dan mampu kembali ke keadaan semula dengan cepat.
- b. Dengan menggunakan aplikasi program dinamis Vensim, didapatkan optimalisasi tampungan Bendungan Way Sekampung dari simulasi skenario yang diberikan. Hasil simulasi skenario tersebut adalah air dari tampungan bendungan mampu untuk memenuhi kebutuhan air pertanian dengan luas lahan potensial 76.006 Ha dan kebutuhan suplai air baku ke Bandar Lampung dan Pringsewu dengan target capaian kapasitas sebesar 2.737 lt/dt pada tahun 2027. Namun perlu adanya nilai prioritas dalam pemenuhan kebutuhan air di hilir dan perubahan serta kebijakan pola pengoperasian bendungan setelah tahun 2040, untuk menjaga keberlanjutan Bendungan Way Sekampung agar ketersediaan air di tampungan bendungan tidak terganggu.

### **V.2 Saran**

Berikut adalah saran/rekomendasi untuk mendukung keberlanjutan bendungan:

- a. Optimasi pengelolaan bendungan sebaiknya dimulai dengan pengambilan keputusan yang didasarkan pada potensi peningkatan kebutuhan di wilayah hilir. Hal ini mencakup penyusunan kebijakan atau pembagian debit air

berdasarkan permintaan di hilir, yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan *Outflow* di wilayah hulu.

- b. Perlu adanya penelitian pola pengoperasian bendungan lebih lanjut dengan menggunakan Vensim tentang optimasi bendungan dengan rentang waktu bulanan sehingga data yang dihasilkan lebih dinamis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Almalik, L. (2021). *Pengenalan Pemodelan Sistem Dinamik menggunakan Vnesim PLE*.
- Augustone, N., & Pamungkas, P. (2020). Potensi Perencanaan Aliran Air Bendungan Sei Gong Sebagai Sumber Energi Terbarukan Melalui Pltmh. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.37253/jcep.v1i1.714>
- Babolhakami, A., Gholami, M. A., Sefidkouhi, & Emadi, A. (2023). Application of system dynamics model for reservoir performance under future climatic scenarios in Gelevard Dam, Iran. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(7), 1115–1129. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.193>
- Barkah, J. S., Ramadan, A., & Asniar, N. (2021). Studi Pola Operasi Bendungan Leuwikeris Menggunakan HEC-ResSim. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 01(02), 1–9. <http://www.e-journal.unper.ac.id/index.php/JITSi/article/view/547>
- Fachrurrozi, M. (2017). Studi Optimasi Pemanfaatan Waduk Bagong Di Kabupaten Trenggalek Untuk Jaringan Irigasi , Kebutuhan Air Baku , Dan Potensi PLTA. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 139.
- Firmansyah, A., & Suryani, E. (2017). Model Sistem Dinamik Untuk Pengembangan Smart Economy (Studi Kasus: Kota Surabaya). *Jurnal Teknik ITS*, 6(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.23167>
- Fitriansyah, F., Widuri, E. S., & Ulmi, E. I. (2020). Analisa Kebutuhan Air Irigasi Untuk Tanaman Padi Dan Palawija Pada Daerah Irigasi Rawa (DIR) Danda Besar Kabupaten Barito Kuala. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 8(2), 79–87. <https://doi.org/10.33084/mits.v8i2.1405>
- Gorguner, M., & Kavvas, M. L. (2020). Modeling impacts of future climate change on reservoir storages and irrigation water demands in a Mediterranean basin. *Science of the Total Environment*, 748, 141246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141246>
- Indonesia, P. P. (2020). Integrated Water Resources Management in Brazil. *Undang-Undang (UU) Nomor 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air*, 18 Maret 2004, 13–26. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16565-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16565-9_2)

- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2020). Rencana Strategis Direktorat Jendral Sumber Daya Air 2020-2024. *Direktorat Jenderal Sumber Daya Air*. [https://sda.pu.go.id/produk/view\\_produk/Rencana\\_Strategis\\_2020-2024](https://sda.pu.go.id/produk/view_produk/Rencana_Strategis_2020-2024)
- Khushik, F., & Diemer, A. (2021). Using the iSDG Model as a Policy-Making Guiding Tool to Achieve SDG 4 in Developing Countries: A Case Study on Pakistan. *Modern Economy*, 12(01), 227–246. <https://doi.org/10.4236/me.2021.121012>
- Kirmanto, D. (2017). Pola Pengelolaan Sumber daya Air Wilayah Sungai Seputih - Sekampung. *Kementrian Pekerjaan Umum*, 1–126.
- Koushali, H. P., Moshtagh, R., & Mastoori, R. (2015). Water Resources Modelling Using System Dynamic in Vensim. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, 4(3), 251–256. <https://doi.org/10.5963/jwrhe0403006>
- Kp-01. (2010). Jaringan Irigasi 14 Kriteria Perencanaan – Jaringan Irigasi. In *Kp-01* (pp. 1–79). <https://sipilpedia.com/standar-perencanaan-irigasi-kp01-kp07/>
- Kunc, M. (2016). *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and S. E. Chick, eds.* 53–64.
- Lampung, G. (2016). *Izin Lingkungan Rencana Kegiatan/Usaha Pembangunan Regulating Dam Way Sekampung di Kabupate Pringsewu dan Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung Oleh Balai Besar Wilayah Sungai Mesuji Sekampung.*
- Lee, S., & Kang, D. (2020). Analyzing the effectiveness of a multi-purpose dam using a system dynamics model. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041062>
- Morecroft, J. (2010). System dynamics. In *Systems Approaches to Managing Change: A Practical Guide*. [https://doi.org/10.1007/978-1-84882-809-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-809-4_2)
- Musfira. (2018). Kajian Ketersediaan dan Kebutuhan Air Bersih di Distrik Jayapura Selatan Kota Jayapura. *Median Jurnal Arsitektur Dan Planologi*, 8(1), 1–16.
- Nisa, S. Q. Z. (2019). Penyusunan Strategi Pengendalian Kualitas Air Waduk dengan Pendekatan Sistem Dinamis (Studi Kasus: Waduk Sutami). *Tesis*, 1–135.
- Noerhayati, E. N., Suprpto, B. S., & Syahid, A. A. (2017). Peningkatan Keuntungan Melalui Optimasi Sistem Pemberian Air Daerah Irigasi Molek Dengan Program Linier. *Jurnal Teknika*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.30736/teknika.v9i1.6>
- Nuramini, T. M. (2017). Studi Optimasi Pola Pengoperasian Waduk Bajulmati. *Skripsi. Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 21.
- Paraga, D. B., Nurhayati, ), & Yulianto, E. (2020). Uji Konsistensi Data Hujan

- Dari Stasiun Hujan yang Berpengaruh di Wilayah Kota Pontianak. *JeLAST J. Elektron. Laut, Sipil, Tambang*, 7(3), 1–6.
- Peraturan Pemerintah No 37 Th 2010. (2010). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 Tentang Bendungan. In *Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2010: Vol.*
- Peraturan Pemerintah No 38 Th 2011. (2011). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2011 Tentang Sungai*. 53(9), 1–44.
- Pleik, P. (2000). The changing water paradigm: a look at twenty-first century water resource development. *Water International*, 25(1), 127–138.  
[http://www.mendeley.com/research/the-changing-water-paradigm-a-look-at-twentyfirst-century-water-resources-development/%5Cnhttp://www.unc.edu/~charack/pdf/Gleick\\_Article.pdf](http://www.mendeley.com/research/the-changing-water-paradigm-a-look-at-twentyfirst-century-water-resources-development/%5Cnhttp://www.unc.edu/~charack/pdf/Gleick_Article.pdf)
- Pusdiklat Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017). Modul 05 - Modul Hidrologi, Kebutuhan dan Ketersediaan air. *Modul Pelatihan Alokasi Air*, 5, 42.
- Rasul, G. (2014). Food, water, and energy security in South Asia: A nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan region {star, open}. *Environmental Science and Policy*, 39, 35–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.01.010>
- Safaa, R. F., Sachro, S. S., & Wulandari, D. A. (2023). Studi Optimasi Operasi Waduk Bili-Bili Dengan Program Dinamik. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 6(1), 65–75. <https://doi.org/10.24815/jarsp.v6i1.27522>
- Series, W. P., & Serman, J. D. (2003). System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *European Journal of Computer Science*, 21(3), 35–39.
- Shiflet, A. (2006). 3 . 1 *System Dynamics Tool : Vensim PLE Tutorial 1 Introduction to Computational Science : Modeling and Simulation for the Sciences*. April 2016.
- Sofyan, S. A. A. (2021). Optimasi Operasi Waduk Jatigede Menggunakan Linear Programming dan Chance Constraint Non Linear Programming. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering*, Vol. 1 No.(Oktober 2021), 1–11.
- Standar perencanaan irigasi kp-1. (2016). *Perencanaan Jaringan Irigasi KP - 01*. 1–23.
- Suprpto, B., & Noerhayati, E. (2021). Pembangunan Pintu Air Irigasi Untuk Efisiensi Distribusi Air Bagi Petani Di Daerah Tumpang Kabupaten Malang. *Jurnal Abdimas Berdaya : Jurnal Pembelajaran, Pemberdayaan Dan Pengabdian Masyarakat*, 4(01), 1. <https://doi.org/10.30736/jab.v4i01.84>
- Triatmojdo, B. (2010). Hidrologi Terapan. *Beta Offset*, 1, 1–358.
- Tumanan, Y. K., Binilang, A., & Mangangka, I. R. (2017). Pengembangan Sistem Penyediaan Air Bersih di Desa Uuwan Kecamatan Dumoga Barat Kabupaten Bolaang Mongondow. *Jurnal Sipil Statik*, 5(4), 195–204.



- Wei, S., Yang, H., Song, J., Abbaspour, K. C., & Xu, Z. (2012). System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. *European Journal of Operational Research*, 221(1), 248–262.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.014>
- Widyasari, T. (2021). Hidrologi: Edisi Banjir Rancangan. *Eureka Media Aksara*.  
<https://repository.penerbiteureka.com/publications/565032/hidrologi-edisi-banjir-rancangan#cite>
- Wirabhuna, A. (2009). *Lecture Note Introduction To Industrial and System Dynamics*. Department of Industrial Engineering The Sunan Kalijaga State Islamic University, 1–141.

- Tabel nilai dibuat pangkat  $10^6$  atau  $10^3$ , gambar dibesarkan.
- Kalimat operation pattern diganti operation rule
- Judul diganti dengan optimasi dan evaluasi keberlanjutan pola operasi tampungan bendungan way sekampung menggunakan program dinamis Vensim
- Titik koma diganti
- Kesimpulan diganti
- Tujuan diganti
- Skenario dijelaskan (scenario dijelaskan tanpa ada menyebut scenario 1 atau 2)
- Garis grafik diberi penjelasan, grafik inflow atau outflow yang mana
- Grafik visual vensim ditambahkan grafik excel utk mengetahui balancing nilai outflow inflow
- Referensi rumus didapat darimana (jurnal atau buku)
- Saran dari penelitian untuk digunakan selanjutnya (timeframe diganti bulan, asumsi yang digunakan lebih dinamis bukan flat)
- Kelebihan dan kekurangan program vensim dibandingkan dengan manual
- Tambah referensi manual book dr vensim
- Membandingkan dengan literature lainnya.(keunggulan vensim dibandingkan dengan program yang lain dibagian evaluasi atau optimasinya)