

**STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
MINIHIDRO (PLTM) DI SUNGAI AEK SIMONGGO DESA SION
KABUPATEN HUMBANG HASUNDUTAN PROVINSI
SUMATERA UTARA**

SKRIPSI

**TEKNIK PENGAIRAN
KONSENTRASI PERENCANAAN TEKNIK BANGUNAN AIR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



**HARDIMAN MAHENDRA
NIM. 135060407111021**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

**STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
MINIHIDRO (PLTM) DI SUNGAI AEK SIMONGGO DESA SION
KABUPATEN HUMBANG HASUNDUTAN PROVINSI
SUMATERA UTARA**

SKRIPSI

**TEKNIK PENGAIRAN
KONSENTRASI PERENCANAAN TEKNIK BANGUNAN AIR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



**HARDIMAN MAHENDRA
NIM. 135060407111021**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
MINIHIDRO (PLTM) DI SUNGAI AEK SIMONGGO DESA SION
KABUPATEN HUMBANG HASUNDUTAN PROVINSI
SUMATERA UTARA**

SKRIPSI

**TEKNIK PENGAIRAN
KONSENTRASI PERENCANAAN TEKNIK BANGUNAN AIR**

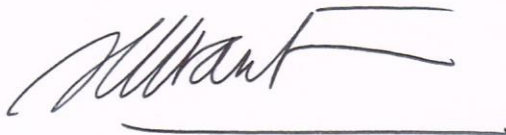
Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**HARDIMAN MAHENDRA
NIM. 135060407111021**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 20 Desember 2017

Dosen pembimbing I



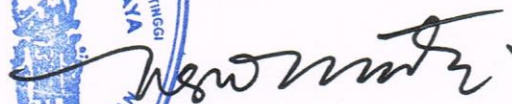
Ir. Suwanto Marsudi, MS.
NIP. 19611203 198603 1 004

Dosen pembimbing II



Prof. Dr. Ir. Lily Montarcih L., Msc.
NIP. 19620917 198701 2 001

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Pengairan**



Dr. Ir. Ussy Andawayanti, MS
NIP. 19610131 198609 2 001



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 8 /UN10.F07.14.11/TU/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

HARDIMAN MAHENDRA

Dengan Judul Skripsi :

**STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MINIHIDRO (PLTM) DI SUNGAI AEK
SIMONGGO DESA SION KABUPATEN HUMBANG HASUNDUTAN PROVINSI SUMATERA
UTARA**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 11 JANUARI 2018

Ketua Jurusan Teknik Pengajaran



Dr. Irf. Usy Andawayanti, MS
NIP. 19610131 198609 2 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Pengajaran

Dr. Very Dermawan, ST., MT
NIP. 19730217 199903 1001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 22 Desember 2017



Hardiman Mahendra
NIM. 135060407111021

*“Ya Allah.
Tambahkanlah Aku Ilmu, dan Berikan Aku Karunia untuk dapat Memahaminya, dan
Jadikanlah Aku Termasuk Golongan Orang-Orang yang Shoolih.
Ya Allah Kabulkanlah Do'aku Ini.*

*Teriring ucapan terimakasih kepada:
Ayah dan Ibu tercinta
yang tak pernah berhenti selalu mendoakan,
memberikan dukungan yang lebih untuk putranya

dan juga teruntuk keluarga, sahabat
serta teman-teman Teknik Pengairan angkatan 2013*

RINGKASAN

Hardiman Mahendra, Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, November 2017, *Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTMH) di Sungai Aek Simonggo Desa Sion Kabupaten Humbang Hasundutan Provinsi Sumatera Utara*. Dosen Pembimbing Ir. Suwanto Marsudi, MS dan Prof. Dr. Ir. Lily Montarcih Limantara M.Sc.

Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang dapat mengubah potensi air dengan ketinggian dan debit kelas menengah menjadi tenaga listrik, dengan menggunakan turbin air dan generator. Dalam pasal 4 ayat 4 UU No. 20 Tahun 2002 tentang ketenagalistrikan juga disebutkan, guna menjamin ketersediaan energi primer untuk pembangkit tenaga listrik, diprioritaskan penggunaan sumber energi setempat dengan kewajiban mengutamakan pemanfaatan sumber energi terbarukan. PLTM dipilih sebagai salah satu energi alternatif dikarenakan memiliki beberapa keunggulan dibanding dengan pembangkit listrik lainnya, antara lain adalah tenaga penggerak yang tidak akan habis atau berubah menjadi bentuk lain, biaya operasional dan pemeliharaannya lebih murah, dan pengoperasiannya dapat dihentikan setiap saat tanpa melalui prosedur yang rumit. Sistem PLTM pun sangat sederhana dan memiliki ketangguhan yang baik.

Pada penelitian ini, akan dilakukan perencanaan dan analisis terkait perencanaan pembangkit listrik di Aek Siomonggo, Desa Sion. Perencanaan mula-mula dilakukan analisis debit banjir rancangan dan debit andalan yang bertujuan untuk menentukan setiap dimensi bangunan hingga daya dan energi dari PLTM Sion. Bangunan yang direncanakan meliputi Bendung, Intake, Saluran Pengarah, Bak Pengendap, Saluran Pembawa, Bak Penenang, Pipa Pesat, Rumah Pembangkit, dan Saluran Pembuang. Nantinya, Setelah direncanakan seluruh komponen PLTM, maka akan diketahui nilai daya (Kw) yang dihasilkan serta produksi energi tahunan (kWh). Sebagai penentu kelayakan proyek, Analisa Ekonomi menjadi pilihan untuk mengetahui layak tidaknya perencanaan pembangunan PLTM Sion.

Hasil Perencanaan pada studi ini didapatkan debit banjir Q_{100} sebesar $682,31 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan debit pembangkit dengan keandalan 40% sebesar $15,88 \text{ m}^3/\text{detik}$. Tinggi bendung 4 meter dengan lebar 56 meter, peredam energi tipe bak tenggelam dengan jari-jari 6 meter, intake dengan tinggi ambang 2 meter dan lebar 4,5 meter (3 pintu), saluran pembawa dengan lebar 5,7 meter, bak pengendap dengan luas endapan $604,69 \text{ m}^3$, saluran pembawa dengan lebar 5 meter, pipa pesat dengan diameter 2,5 meter dan ketebalan 25 mm, bak penenang dengan volume $2.176,87 \text{ m}^3$, dan saluran pembuang dengan lebar 5 meter. Turbin yang digunakan adalah tipe francis, yang mampu menghasilkan $11.634,58 \text{ kW}$ dengan energi $80,06 \text{ GWh}$ dalam 1 tahun. Biaya yang dibutuhkan untuk pembangunan Rp $463,825,496,434.55$ dengan suku bunga 10,50%, *Benefit Cost Ratio* (BCR) sebesar 1,47, *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 12,44 %, *Payback Period* selama 13,6 tahun. Dari beberapa metode Analisa ekonomi yang digunakan dapat disimpulkan untuk pembangunan PLTM Sion layak secara ekonomi.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro, Turbin, Daya, Energi, Listrik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Hardiman Mahendra, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, November 2017, *Study of Designing a Mini Hydropower Plant in the Aek Simonggo, the village of Sion, Humbang Hasundutan Regency, North Sumatera Province*. Academic Supervisor: Ir. Suwanto Marsudi, MS and Prof. Dr. Ir. Lily Montarjih Limantara M.Sc.

Minihidro power plant (PLTM) is a system of power plant water potential which can change with height and discharge of the middle class into electric power, with the use of water turbine and generator. In article 4 paragraph 4 of UU No. 20 2002th about the electricity also mentioned to ensure availability of primary energy for power plants, prioritized use of local energy sources with the obligation of giving priority to utilization of renewable energy sources. PLTM selected as one of alternative energy because has several advantages compared with other power plants, others are the power plants that will not be exhausted or transformed into other forms of operational and maintenance costs, cheaper to operate, and can be discontinued at any time without going through a complicated procedure. PLTM system is very simple and has a good toughness.

In this study, the planning will be undertaken and related analysis of the planning of the power plant in Aek Siomonggo, village of Sion. Early planning is carried out an analysis of the design of flood discharge and discharge the mainstay that aims to determine the dimensions of each building up to the power and energy of PLTM Sion. The building is planned to include the Weirs, Intakes, settling basin, head race, penstock, forebay. After all the components planned PLTM, it will be known to the power rating (Kw) produced as well as annual energy production (kWh). As a determinant of economic analysis of the feasibility of the project, an option to find out whether a viable development planning PLTM Zion.

The potential of electric generation is very high so that the need for a planning study undertaken power plant Minihidro on the river Aek Simonggo, the Sion village, Humbang Hasundutan Regency, North Sumatera Province. Planning in this study the selected flood discharge Q_{100} to be $682.31 \text{ m}^3/\text{s}$ and plant discharge 40% to be $15.88 \text{ m}^3/\text{s}$. High Dam holds 4 meters with a width of 56 meters, the energy reducer type tub sink with a radius of 6 meters, the intake with a high threshold of 2 meters and a width of 4.5 metres (3 doors), settling basin with extensive deposits of 604.69 m^3 , the head race with a width of 5 meters, penstock with a diameter of 2.5 meters and a rapidly and thickness of 25 mm, a forebay with a volume of $2,176.87 \text{ m}^3$, and tail race with a width of 5 metres. The turbine used is capable of francis type, with the 11,634.58 kW or 67.99 GWh of energy in one year. The cost needed for the development of Rp 463,825,496,434.55 with interest rates 10.50%, Benefit Cost Ratio (BCR) of 1.47, Internal Rate of Return (IRR) of 12.44%, Payback Period for 13.6 years. Economic Analysis of some of the methods used can be inferred for PLTM Sion the development of economically viable.

Keyword: Minihidro Power Plant, Turbine, Power, Energy, Electric.

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua, segala puji dan syukur kehadirat Allah Subhanahu wa ta'ala karena rahmat, hidayah, dan limpahan ilmu dari-Nya hingga akhirnya skripsi yang berjudul *Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) di Sungai Aek Simonggo Desa Sion Kabupaten Humbang Hsundutan Provinsi Sumatera Utara* dapat terselesaikan dengan baik.

Skripsi ini disusun dalam rangka memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik yang ada di Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Dalam penyusunan Skripsi ini, banyak pihak yang terlibat. Oleh karena itu penyusun mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua Orang Tua saya tercinta yang telah memeberikan banyak dukungan dari segi apapun,
2. Bapak Ir. Suwanto Marsudi, MS dan Prof. Dr. Ir. Lily Montarcih L., MSc selaku dosen pembimbing yang memberikan saran, arahan dan motivasi dalam pengerjaan Skripsi,
3. Bapak Dr. Ir. Pitojo Tri Juwono MT. dan Bapak Prima Hadi Wicaksono, ST., MT selaku dosen penguji dalam pelaksanaan Skripsi, dan
4. Saudara seperjuangan saya Teknik Pengairan angkatan 2013 yang selalu memberikan semangat secara tidak langsung dan bantuan – bantuan dalam penyelesaian Skripsi.

Penulis menyadari bahwa laporan Skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis memerlukan tanggapan, kritik, dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak atas penyempurnaan laporan skripsi ini dengan harapan dapat menjadi arahan agar laporan skripsi ini dapat menjadi lebih baik.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua, sekian. Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatu.

Malang, Desember 2017

Hardiman Mahendra
NIM. 135060407111021

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR SIMBOL | xix |
| BAB 1 PENDAHULUAN | |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Identifikasi Masalah..... | 2 |
| 1.3. Rumusan Masalah | 2 |
| 1.4. Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5. Tujuan..... | 3 |
| 1.6. Manfaat | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1. Umum..... | 5 |
| 2.2. Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air..... | 6 |
| 2.2.1. <i>Run-off River</i> | 6 |
| 2.2.2. <i>Reservoir dan Dam Based</i> | 7 |
| 2.2.3. <i>Pumped Storage</i> | 8 |
| 2.2.4. <i>Diversion Canal</i> | 9 |
| 2.3. Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Air | 10 |
| 2.3.1. Pembagian Secara Teknis..... | 10 |
| 2.3.2. Pembagian Menurut Kapasitas | 10 |
| 2.3.3. Pembagian Menurut Tinggi Jatuh Air | 11 |
| 2.3.4. Pembagian Berdasarkan Topografi | 11 |
| 2.3.5. Pembagian Berdasarkan Ekonomi | 12 |
| 2.3.6. Pembagian Berdasarkan Pengadaan..... | 12 |
| 2.4. Analisa Hidrologi dalam Perencanaan PLTM..... | 12 |
| 2.4.1. Data Hujan | 13 |
| 2.4.2. Pemeriksaan Data Hujan..... | 13 |
| 2.4.2.1. Uji Outlier Data | 14 |
| 2.4.2.2. Uji Konsistensi Data..... | 14 |

| | |
|--|----|
| 2.4.3. Curah Hujan Rerata Daerah..... | 16 |
| 2.4.3.1. Aritmatik..... | 16 |
| 2.4.3.2. Polygon Thiessen | 16 |
| 2.4.4. Analisa Distribusi Curah Hujan | 18 |
| 2.4.4.1. Distribusi Gumbel | 18 |
| 2.4.4.2. Distribusi Log Pearson III | 21 |
| 2.4.4.3. Distribusi Log Normal | 22 |
| 2.4.5. Uji Keselarasan Distribusi Frekuensi | 23 |
| 2.4.5.1. Uji Chi – Square..... | 23 |
| 2.4.5.2. Uji Smirnov – Kolmogorov..... | 24 |
| 2.4.6. Analisa Curah Hujan Rancangan (Mononobe) | 26 |
| 2.4.7. Analisa Debit Banjir Rancangan..... | 27 |
| 2.4.7.1. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu | 28 |
| 2.4.7.2. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Gama I | 30 |
| 2.4.7.3. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Snyder..... | 31 |
| 2.4.7.4. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Limantara..... | 32 |
| 2.4.8. Analisa Debit Andalan | 34 |
| 2.4.8.1. Evapotranspirasi | 35 |
| 2.4.8.2. Metode FJ. Mock..... | 36 |
| 2.4.8.3. Metode Kurva Durasi (Flow Duration Curva) | 40 |
| 2.4.8.4 Metode Debit Pembangkit..... | 42 |
| 2.5. Analisa Hidrolika | 42 |
| 2.5.1. Tinggi Jatuh..... | 42 |
| 2.5.2. Kehilangan Tinggi Tekan (Head Lost)..... | 44 |
| 2.5.2.1. Saluran Terbuka..... | 44 |
| 2.5.2.2. Saluran Tertutup | 46 |
| 2.6. Komponen PLTM | 48 |
| 2.6.1. Bendung (Weir)..... | 49 |
| 2.6.1.1. Lebar Bendung | 49 |
| 2.6.1.2. Mercu Bendung | 51 |
| 2.6.2. Bangunan Pengambilan (Intake)..... | 57 |
| 2.6.3. Saluran Pembawa (Head Race)..... | 60 |
| 2.6.4. Bak Pengendap (Settling Basi) | 66 |
| 2.6.5. Bak Penenang (Forebay)..... | 70 |

| | |
|--|----|
| 2.6.6. Saringan (Trashrack)..... | 73 |
| 2.6.7. Pipa Pesat (Penstock)..... | 74 |
| 2.6.7.1. Diameter Pipa Pesat..... | 75 |
| 2.6.7.2. Tebal Pipa Pesat..... | 76 |
| 2.6.7.3. Jarak Tumpuan Pipa Pesat..... | 77 |
| 2.6.8. Saluran Pembuang (Tail Race)..... | 78 |
| 2.6.9. Turbin dan Generator..... | 79 |
| 2.6.10. Pemilihan Turbin..... | 79 |
| 2.6.11. Kecepatan Spesifik Turbin..... | 82 |
| 2.6.12. Kavitasi dan Titik Pusat Turbin..... | 83 |
| 2.6.13. Dimensi Turbin..... | 85 |
| 2.6.14. Generator..... | 87 |
| 2.7. Daya dan Energi..... | 88 |
| 2.7.1. Daya..... | 88 |
| 2.7.2. Energi..... | 89 |
| 2.8. Analisa Ekonomi..... | 89 |
| 2.8.1. Benefit (Komponen Manfaat)..... | 89 |
| 2.8.2. Cost (Komponen Biaya)..... | 89 |
| 2.8.3. Indikator Kelayakan Ekonomi..... | 89 |
| 2.8.3.1. BCR (Benefit Cost Ratio)..... | 90 |
| 2.8.3.2. NPV (Net Present Value)..... | 90 |
| 2.8.3.3. IRR..... | 90 |
| 2.8.3.4. Analisa Sensivitas..... | 91 |
| 2.8.3.5. Payback Periode..... | 91 |

BAB III METODE PENELITIAN

| | |
|---|----|
| 3.1. Deskripsi Daerah Studi..... | 93 |
| 3.1.1. Batas Administrasi..... | 94 |
| 3.1.2. Aksesibilitas Lokasi PLTM Sion..... | 94 |
| 3.1.3. Kondisi Geoteknik..... | 94 |
| 3.2. Data-data yang Digunakan..... | 94 |
| 3.2.1. Data Daerah Aliran Sungai (DAS)..... | 94 |
| 3.2.2. Data Curah Hujan..... | 95 |
| 3.2.3. Data Klimatologi..... | 95 |

| | |
|---|----|
| 3.2.4. Peta Topografi Lokasi Studi..... | 95 |
| 3.3. Tahapan Penyelesaian Studi..... | 95 |
| 3.4. Diagram Alir | 97 |

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

| | |
|---|-----|
| 4.1. Analisa Data Hidrologi | 99 |
| 4.1.1. Uji Konsistensi Data Hujan | 101 |
| 4.1.2. Uji Outlier..... | 112 |
| 4.1.3. Poligon Tiessen..... | 115 |
| 4.2. Analisa Debit Banjir..... | 117 |
| 4.2.1. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Log Normal..... | 117 |
| 4.2.2. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Gumbel..... | 119 |
| 4.2.3. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Log Pearson III | 120 |
| 4.2.4. Perhitungan Uji Chi Kuadrat | 121 |
| 4.2.5. Perhitungan Uji Smirnov Kolmogrof | 124 |
| 4.2.6. Perhitungan Jam-jaman..... | 126 |
| 4.2.7. Perhitungan Hujan Netto Jam-jaman..... | 128 |
| 4.2.8. Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu..... | 130 |
| 4.2.9. Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis Limantara..... | 139 |
| 4.2.10. Perhitungan Tinggi Muka Air Banjir | 147 |
| 4.3. Analisa Debit Andalan | 151 |
| 4.3.1. Perhitungan Evapotranspirasi | 151 |
| 4.3.2. Perhitungan Pembangkitan Debit dengan Metode F.J. Mock..... | 155 |
| 4.3.3. Perhitungan <i>Flow Duration Curve</i> (FDC)..... | 169 |
| 4.4. Penentuan Debit Pembangkit..... | 171 |
| 4.4.1. Penentuan Berdasarkan Energi Produksi Tahunan | 171 |
| 4.4.2. Penentuan Berdasarkan Biaya | 179 |
| 4.4.3. Penentuan Berdasarkan <i>BCR</i> | 180 |
| 4.5. Perencanaan Komponen PLTM | 180 |
| 4.5.1. Bendung | 181 |
| 4.5.1.1. Lebar Efektif..... | 181 |
| 4.5.1.2. H_1 dan H_d | 182 |
| 4.5.1.3. Profil Muka Air..... | 183 |
| 4.5.1.4. Peredam Energi | 184 |
| 4.5.2. Intake | 186 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.3. Saluran Pengarah | 188 |
| 4.5.4. Bak Pengendap | 189 |
| 4.5.5. Saluran Pembawa..... | 195 |
| 4.5.6. Pipa Pesat | 196 |
| 4.5.6.1. Dimensi Pipa Pesat | 196 |
| 4.5.6.2. Ketebalan Pipa Pesat | 198 |
| 4.5.6.3. Jarak Tumpuan Pipa Pesat | 199 |
| 4.5.7. Bak Penenang..... | 200 |
| 4.5.7.1. Vortisitas Pipa Pesat..... | 201 |
| 4.5.8. Saluran Pembuang..... | 202 |
| 4.6. Kehilangan Tinggi | 202 |
| 4.6.1. Pada Saluran Pengambilan..... | 203 |
| 4.6.2. Pada Saringan Pengambilan..... | 204 |
| 4.6.3. Pada Pintu Pengambilan..... | 204 |
| 4.6.4. Pada Saluran Pengarah..... | 204 |
| 4.6.5. Pada Pelebaran Menuju Bak Pengendap..... | 205 |
| 4.6.6. Pada Penyempitan Saluran Pembawa | 205 |
| 4.6.7. Pada Peleburan Menuju Bak Penenang | 206 |
| 4.6.8. Pada Saringan Bak Penenang..... | 206 |
| 4.6.9. Pada Pemasukan Pipa Pesat..... | 207 |
| 4.6.10. Pada Belokan 1 & 2 Pipa Pesat..... | 207 |
| 4.6.11. Pada Katup Pipa Pesat..... | 208 |
| 4.6.12. Rekapitulasi Kehilangan Tinggi | 208 |
| 4.7. Turbin dan Genrator | 209 |
| 4.7.1. Trubin | 209 |
| 4.7.2 Generator..... | 211 |
| 4.7.3. Rumah Pembangkit | 213 |
| 4.8. Daya dan Energi..... | 214 |
| 4.9. Analisa Ekonomi | 218 |
| 4.9.1. Komponen Biaya..... | 217 |
| 4.9.2. Nilai Sekarang (<i>Present Value</i>)..... | 222 |
| 4.9.3. <i>Benefit Cost Ratio</i> (BCR)..... | 224 |
| 4.9.4. <i>Net Present Value</i> (NPV) | 225 |

| | |
|---|-------|
| 4.9.5. <i>Internal Rate of Return</i> | 225 |
| 4.9.6. <i>Payback Period</i> | 228 |
| 4.9.7. Sensitivitas | 228 |
| BAB V PENUTUP | |
| 5.1. Kesimpulan | 233 |
| 5.2. Saran | 234 |
| DAFTAR PUSTAKA | xxi |
| LAMPIRAN | xxiii |

DAFTAR TABEL

| No. | Judul | Halaman |
|------------|--|---------|
| Tabel 2.1 | Nilai K_n dalam pengujian <i>Outlier</i> | 14 |
| Tabel 2.2 | Parameter Statistik | 18 |
| Tabel 2.3 | <i>Reduced Mean</i> Y_n | 19 |
| Tabel 2.4 | <i>Reduced Standard Deviation</i> S_n | 20 |
| Tabel 2.5 | <i>Reduced Variate</i> Y_t | 20 |
| Tabel 2.6 | Harga K untuk Distribusi <i>Log Pearson III</i> | 21 |
| Tabel 2.7 | Distribusi <i>Chi Square</i> | 24 |
| Tabel 2.8 | Nilai Kritis Δ_{cr} untuk Uji <i>Smirnov Kolmogorof</i> | 26 |
| Tabel 2.9 | Keadaan Hujan dan Intensitas Hujan | 26 |
| Tabel 2.10 | Harga R_Y untuk Indonesia (5o LU S/D 10o LS)..... | 36 |
| Tabel 2.11 | Harga – harga Koefisien Konstruksi | 49 |
| Tabel 2.12 | Harga-Harga K dan n | 55 |
| Tabel 2.13 | Tipe-tipe Saluran Pembawa untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil..... | 61 |
| Tabel 2.14 | Struktur Dasar Saluran untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil.... | 62 |
| Tabel 2.15 | Jenis Turbin..... | 81 |
| Tabel 2.16 | <i>Rang of D Values, Specific Speeds and Head</i> | 83 |
| Tabel 2.17 | <i>Runway Speed and Acceptable Head Variations</i> | 83 |
| Tabel 2.18 | Persamaan Dimensi <i>Spiral Case</i> | 87 |
| Tabel 2.19 | Perhitungan Dimensi <i>Draft Tube</i> | 87 |
| Tabel 2.20 | Nilai Kecepatan Generator untuk Generator Sinkron..... | 89 |
| Tabel 2.21 | Hubungan Antara Daya Generator dengan Efisiensi | 89 |
| Tabel 3.1 | Aksebelitas Menuju Lokasi PLTM Sion | 94 |
| Tabel 4.1 | Data Curah Hujan Bulanan dan Jumlah Hari Hujan Stasiun Parapat | 100 |
| Tabel 4.2 | Dara Curah Hujan Bulanan dan Jumlah Hari Hujan Stasiun Sibolga | 100 |
| Tabel 4.3 | Dara Curah Hujan Bulanan dan Jumlah Hari Hujan Stasiun Balige | 101 |
| Tabel 4.4 | Data Curah Hujan Tahunan..... | 102 |
| Tabel 4.5 | Uji Konsistensi Stasiun Parapat (mm/tahun)..... | 102 |
| Tabel 4.6 | Uji Konsistensi Stasiun Parapat Setelah Perbaikan (mm/tahun) | 104 |
| Tabel 4.7 | Uji Konsistensi Stasiun Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Bulanan Stasiun Parapat Setelah Perbaikan | 105 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 4.8 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Maksimum Tahunan Stasiun Parapat Setelah Pebaikan..... | 105 |
| Tabel 4.9 Uji Konsistensi Stasiun Sibolga (mm/tahun) | 106 |
| Tabel 4.10 Uji Konsistensi Stasiun Sibolga Setelah Perbaikan (mm/tahun)..... | 107 |
| Tabel 4.11 Uji Konsistensi Stasiun Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Bulanan Stasiun Sibolga Setelah Perbaikan..... | 108 |
| Tabel 4.12 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Maksimum Tahunan Stasiun Sibolga Setelah Pebaikan..... | 108 |
| Tabel 4.13 Uji Konsistensi Stasiun Balige (mm/tahun) | 109 |
| Tabel 4.14 Uji Konsistensi Stasiun Belige Setelah Perbaikan (mm/tahun) | 110 |
| Tabel 4.15 Uji Konsistensi Stasiun Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Bulanan Stasiun Parapat Setelah Perbaikan..... | 111 |
| Tabel 4.16 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Maksimum Tahunan Stasiun Belige Setelah Pebaikan..... | 111 |
| Tabel 4.17 Data Curah Hujan Maksimum Terurut pada Stasiun Parapat..... | 112 |
| Tabel 4.18 Perhitungan Uji Outlier Stasiun Parapat..... | 113 |
| Tabel 4.19 Perhitungan Uji Outlier Stasiun Sibolga | 114 |
| Tabel 4.20 Perhitungan Uji Outlier Stasiun Belige | 114 |
| Tabel 4.21 Hasil Koefisien dari Poligon Tiessen | 116 |
| Tabel 4.22 Curah Hujan Bulanan Rerata Daerah Hasil Perhitungan dari Poligon Tiessen | 116 |
| Tabel 4.23 Curah Hujan Maksimum Rerata Daerah Hasil Perhitungan dari Poligon Tiessen | 117 |
| Tabel 4.24 Parameter Statistik Distribusi Log Normal | 118 |
| Tabel 4.25 Hasil Hujan Rancangan Distribusi Log Normal..... | 119 |
| Tabel 4.26 Parameter Statistik Distribusi Gumbel | 119 |
| Tabel 4.27 Hasil Hujan Rancangan Distribusi Gumbel | 120 |
| Tabel 4.28 Parameter Statistik Distribusi Log Pearson III..... | 121 |
| Tabel 4.29 Hasil Hujan Rancangan Distribusi Log Pearson III | 122 |
| Tabel 4.30 Hasil Perhitungan Kelas Log Normal (Uji Chi Kuadrat)..... | 122 |
| Tabel 4.31 Hasil Uji Kuadrat Distribusi Log Normal | 123 |
| Tabel 4.32 Hasil Perhitungan Kelas Gumber (Uji Chi Kuadrat)..... | 123 |
| Tabel 4.33 Hasil Uji Kuadrat Distribusi Gumbel | 123 |
| Tabel 4.34 Hasil Perhitungan Kelas Log Pearson III (Uji Chi Kuadrat)..... | 124 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 4.35 Hasil Uji Kuadrat Distribusi Log Pearson III | 124 |
| Tabel 4.36 Hasil Uji Smirnov Kolmogrof Distribusi Log Normal..... | 125 |
| Tabel 4.37 Hasil Uji Smirnov Kolmogrof Distribusi Gumbel..... | 125 |
| Tabel 4.38 Hasil Uji Smirnov Komlogrof Distribusi Log Pearson III | 126 |
| Tabel 4.39 Perhitungan Distribusi Jam-jaman..... | 127 |
| Tabel 4.40 Koefisien Pengaliran Dipengaruhi Oleh Curah Hujan | 128 |
| Tabel 4.41 Koefisien Pengaliran (C) | 129 |
| Tabel 4.42 Hasil Hujan Netto Jam-jaman..... | 129 |
| Tabel 4.43 Ordinat Hidrograf Nakayasu..... | 131 |
| Tabel 4.44 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 2 Tahun..... | 133 |
| Tabel 4.45 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 5 Tahun..... | 134 |
| Tabel 4.46 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 10 Tahun..... | 135 |
| Tabel 4.47 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 25 Tahun..... | 136 |
| Tabel 4.48 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 50 Tahun..... | 137 |
| Tabel 4.49 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 100 Tahun..... | 138 |
| Tabel 4.50 Ordinat Hidrograf Limantara | 140 |
| Tabel 4.51 Debit Banjir Limantara Kala Ulang 2 Tahun..... | 141 |
| Tabel 4.52 Debit Banjir Limantara Kala Ulang 5 Tahun..... | 142 |
| Tabel 4.53 Debit Banjir Limantara Kala Ulang 10 Tahun..... | 143 |
| Tabel 4.54 Debit Banjir Limantara Kala Ulang 25 Tahun..... | 144 |
| Tabel 4.55 Debit Banjir Limantara Kala Ulang 50 Tahun..... | 145 |
| Tabel 4.56 Debit Banjir Limantara Kala Ulang 100 Tahun..... | 146 |
| Tabel 4.57 Rekapitulasi Hasil Analisa Debit Banjir | 147 |
| Tabel 4.58 Perhitungan Jenis Aliran Sungai Bagian Hulu (Bendung)..... | 148 |
| Tabel 4.59 Perhitungan Tinggi Muka Air Sungai Bagian Hulu (Bendung)..... | 149 |
| Tabel 4.60 Perhitungan Jenis Aliran Sungai Bagian Hilir (<i>Power House</i>)..... | 150 |
| Tabel 4.61 Perhitungan Tinggi Muka Air Sungai Bagian Hilir (<i>Power House</i>)..... | 150 |
| Tabel 4.62 Data Klimatologi Rerata Stasiun Parapat Tahun 2004-2013 | 152 |
| Tabel 4.63 Hubungan Suhu dengan Tekanan Uap Jenuh | 152 |
| Tabel 4.64 Hubungan Suhu, Ketinggian dan Faktor Penimbang (w) | 152 |
| Tabel 4.65 Hubungan Suhu dengan Nilai f(t)..... | 152 |
| Tabel 4.66 Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman | 154 |
| Tabel 4.67 Perhitungan Debit Metode F.J Mock Tahun 2004 | 157 |
| Tabel 4.68 Perhitungan Debit Metode F.J Mock Tahun 2005 | 158 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 4.69 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2006..... | 159 |
| Tabel 4.70 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2007..... | 160 |
| Tabel 4.71 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2008..... | 161 |
| Tabel 4.72 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2009..... | 162 |
| Tabel 4.73 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2010..... | 163 |
| Tabel 4.74 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2011..... | 164 |
| Tabel 4.75 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2012..... | 165 |
| Tabel 4.76 Perhitungan Debit Metode FJ Mock Tahun 2013..... | 166 |
| Tabel 4.77 Rekapitulasi Debit Sungai..... | 167 |
| Tabel 4.78 Probabilitas Debit..... | 170 |
| Tabel 4.79 Debit Andalan Rencana Probabilitas Tertentu..... | 172 |
| Tabel 4.80 Perhitungan Energi Q40%..... | 174 |
| Tabel 4.81 Perhitungan Energi Q50%..... | 175 |
| Tabel 4.82 Perhitungan Energi Q60%..... | 176 |
| Tabel 4.83 Perhitungan Energi Q70%..... | 177 |
| Tabel 4.84 Perhitungan Daya, Energi an Faktor Kapasitas..... | 178 |
| Tabel 4.85 Parameter Perhitungan Setiap Debit Andalan..... | 180 |
| Tabel 4.86 Estimasi Biaya Pembangunan Berdasarkan Debit Pembangkit dan Parameter..... | 179 |
| Tabel 4.87 <i>BCR</i> Setiap Debit Pembangkit..... | 180 |
| Tabel 4.88 Profil Muka Air pada Bendung..... | 183 |
| Tabel 4.89 Pola Operasi Pintu Pengambilan..... | 197 |
| Tabel 4.90 Perhitungan Saluran Pembawa..... | 196 |
| Tabel 4.91 Hasil Diameter Pipa Pesat..... | 198 |
| Tabel 4.92 Kehilangan Tinggi pada PLTM Sion..... | 208 |
| Tabel 4.93 Pemilihan Generator..... | 213 |
| Tabel 4.94 Hasil Perhitungan Daya dan Energi..... | 215 |
| Tabel 4.95 Rekapitulasi Harga Komponen PLTM Sion..... | 220 |
| Tabel 4.96 Rekapitulasi Biaya Keseluruhan PLTM Sion (Bunga 10,50%)..... | 221 |
| Tabel 4.97 Manfaat Tahungan PLTM Sion..... | 222 |
| Tabel 4.98 Manfaat 20 Tahun PLTM Sion (Bunga 10,50%)..... | 222 |
| Tabel 4.99 Manfaat PLTM Sion untuk Beberapa Suku Bunga..... | 223 |
| Tabel 4.100 Nilai Biaya, Manfaat, <i>BCR</i> , <i>NPV</i> untuk Beberapa Suku Bunga..... | 225 |
| Tabel 4.101 Hubungan Suku Bunga dengan <i>NPV</i> | 226 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 4.102 Hubungan Energi dengan NPV | 227 |
| Tabel 4.103 Hubungan Biaya dengan NPV | 228 |
| Tabel 4.104 Hubungan Biaya dengan Manfaat | 228 |
| Tabel 5.1 Rekapitulasi Hasil Analisa Debit Banjir | 231 |
| Tabel 5.2 Debit Andalan Rencana Probabilitas Tertentu | 232 |
| Tabel 5.3 Perhitungan Daya, Energi dan Faktor Kapasitas | 233 |
| Tabel 5.4 Estimasi Biaya Pembangunan Berdasarkan Debit Pembangkit dan Parameter | 233 |
| Tabel 5.5 <i>BCR</i> Setiap Debit Pembangkit | 233 |
| Tabel 5.6 Rekapitulasi Dimensi Bangunan..... | 234 |
| Tabel 5.7 Hasil Perhitungan Daya dan Energi | 235 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

| No. | Judul | Halaman |
|-------------|---|---------|
| Gambar 2.1 | Prinsip Kerja Suatu PLTM..... | 6 |
| Gambar 2.2 | Skema PLTM Jenis Sistem <i>Run-off River</i> | 7 |
| Gambar 2.3 | Skema PLTM Jenis Sistem <i>Reservoir and Dam Based</i> | 8 |
| Gambar 2.4 | Skema PLTM Jenis Sistem <i>Pumped Storge</i> | 9 |
| Gambar 2.5 | Skema PLTM Jenis Sistem <i>Diversion Canal</i> | 10 |
| Gambar 2.6 | Tinggi Jatuh (<i>Head</i>) | 11 |
| Gambar 2.7 | Skema PLTM Jenis Sistem <i>Multi Purpose</i> | 12 |
| Gambar 2.7 | Kurva Massa Ganda..... | 15 |
| Gambar 2.8 | <i>Polygon Thisessen</i> | 17 |
| Gambar 2.9 | HSS Metode <i>Nakayasu</i> | 29 |
| Gambar 2.10 | HSS Metode <i>Gama I</i> | 30 |
| Gambar 2.11 | HSS Metode <i>Snyder</i> | 32 |
| Gambar 2.12 | HSS Metode Limantara | 33 |
| Gambar 2.13 | Diagram Alir Metode <i>F.J Mock</i> | 39 |
| Gambar 2.14 | Siklus Hidrologi..... | 40 |
| Gambar 2.15 | Contoh <i>Flow Duration Curve</i> | 41 |
| Gambar 2.16 | Tinggi Jatuh (<i>Head</i>) | 42 |
| Gambar 2.17 | Koefisien Kehilangan Pada Inlet | 44 |
| Gambar 2.18 | Kehilangan Tinggi Pada Penyaring Sampah..... | 45 |
| Gambar 2.19 | Skema Panjang dan Diameter Pipa..... | 46 |
| Gambar 2.20 | Diagram <i>Moody</i> | 46 |
| Gambar 2.21 | Nilai K_c sebagai fungsi d/D | 47 |
| Gambar 2.22 | Koefisien Kehilangan Tinggi pada Belokan | 48 |
| Gambar 2.24 | Skema Lebar Efektif Mercu..... | 50 |
| Gambar 2.25 | Bentuk – Bentuk Mercu..... | 51 |
| Gambar 2.26 | Skema Bendung dengan Mercu Bulat | 52 |
| Gambar 2.27 | Tekanan pada Mercu Bendung Bulat Sebagai Fungsi Perbandingan H_1/r | 53 |
| Gambar 2.28 | Harga-Harga Koefisien C_0 untuk Bendung Ambagn Bulat Sebagai Fungsi Perbandingan H_1/r | 53 |
| Gambar 2.29 | Koefisien C_1 sebagai Fungsi Perbandingan p/H_1 | 54 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 2.30 Bentuk-Bentuk Bendung Mercu Ogee | 55 |
| Gambar 2.31 Faktor Koreksi untuk Selain Tinggi Energi Rencana pada Mercu Ogee..... | 56 |
| Gambar 2.32 Faktor Pengurangan Aliran Tenggelam Sebagai Fungsi p_2/H_1 dan H2/H1 Sumber: KP-02, 2013 | 56 |
| Gambar 2.33 Bangunan Pengambilan (<i>intake</i>)..... | 58 |
| Gambar 2.34 Skema Bangunan Pengambilan (<i>intake</i>)..... | 59 |
| Gambar 2.35 Skema Struktur Lengkap Bangunan <i>Intake</i> | 60 |
| Gambar 2.36 Saluran Pembawa (<i>Head Race</i>)..... | 61 |
| Gambar 2.37 Skema Penampang Melintang Saluran Pembawa | 67 |
| Gambar 2.38 Bak Pengendap (<i>Settling Basin</i>) | 67 |
| Gambar 2.39 Skema Bak Pengendap | 68 |
| Gambar 2.40 Menentukan Bagian Melintang | 69 |
| Gambar 2.41 Bak Penenang (<i>Head Tank</i>) | 71 |
| Gambar 2.42 Skema Bak Penenang | 71 |
| Gambar 2.43 Skema Penampang Melintang Bak Penenang | 72 |
| Gambar 2.44 Pipa Pesat (<i>Penstock</i>) | 75 |
| Gambar 2.45 Skema Pipa | 75 |
| Gambar 2.46 Sketsa <i>Vortisitas</i> | 76 |
| Gambar 2.47 Tipe <i>Vortisitas</i> | 76 |
| Gambar 2.48 Skema Saluran..... | 79 |
| Gambar 2.49 Bagian-bagian Turbin..... | 79 |
| Gambar 2.50 Grafik Penentuan Tipe Turbin Berdasarkan Tinggi Jatuh dan Daya | 80 |
| Gambar 2.51 Bentuk Jenis Turbin..... | 82 |
| Gambar 2.52 Skema Turbin | 85 |
| Gambar 2.53 Dimensi <i>Runner</i> turbin <i>Francis</i> | 86 |
| Gambar 2.54 Sketsa <i>Spiral Case</i> turbin <i>Francis</i> | 87 |
| Gambar 2.55 Sketsa <i>Draft Tube</i> Turbin <i>Francis</i> | 88 |
| Gambar 3.1 Lokasi Studi..... | 93 |
| Gambar 3.2 Skema Rencana PLTM Sion..... | 98 |
| Gambar 3.3 Diagram Alir Perencanaan PLTM Sion | 98 |
| Gambar 4.1 Kurva Massa Ganda Stasiun Parapat (Sebelum Dikoreksi) | 103 |
| Gambar 4.2 Kurva Massa Ganda Stasiun Parapat (Setelah Dikoreksi) | 104 |
| Gambar 4.3 Kurva Massa Ganda Stasiun Sibolga (Sebelum Dikoreksi)..... | 106 |
| Gambar 4.4 Kurva Massa Ganda Stasiun Sibolga (Setelah Dikoreksi) | 107 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 4.5 Kurva Massa Ganda Stasiun Belige (Sebelum Dikoreksi) | 109 |
| Gambar 4.6 Kurva Massa Ganda Stasiun Belige (Setelah Dikoreksi) | 110 |
| Gambar 4.7 Poligon Tiessen pada PLTM Sion..... | 116 |
| Gambar 4.8 Pola Distribusi Hujan..... | 127 |
| Gambar 4.9 Rasio Distribusi Hujan..... | 128 |
| Gambar 4.10 Distribusi Netto Hujan Jam-jaman | 130 |
| Gambar 4.11 Grafik Hidrograf Nakayasu | 132 |
| Gambar 4.12 Grafik Hidrograf Limantara..... | 140 |
| Gambar 4.13 Grafik Satuan Sintetis Limantara..... | 147 |
| Gambar 4.14 Hubungan Debit dengan Tinggi Muka Air (H) Bagian Hulu (Bendung) ... | 149 |
| Gambar 4.15 Penampang Sungai Bagian Hulu (Bendung) | 149 |
| Gambar 4.16 Hubungan Debit dengan Tinggi Muka Air (H) Bagian Hilir (<i>Power House</i>)..... | 150 |
| Gambar 4.17 Penampang Sungai Bagian Hilir (<i>Power House</i>) | 151 |
| Gambar 4.18 Grafik Hubungan Debit F.J Mock dengan Bulan | 168 |
| Gambar 4.19 Grafik Hubungan Debit F.J Mock dengan Curah Hujan Bulanan | 169 |
| Gambar 4.20 Kurva Durasi Aliran Asli | 170 |
| Gambar 4.21 Kurva Durasi Aliran Rencana..... | 171 |
| Gambar 4.22 Hubungan Energi Produksi dengan Hari Operasi..... | 178 |
| Gambar 4.23 Jari-jari Minimum Bak (Rmin)..... | 185 |
| Gambar 4.24 Batas Minimum Tinggi Hilir (Tmin) | 187 |
| Gambar 4.25 <i>Rating Curve</i> Bukaan Pintu | 188 |
| Gambar 4.26 Penentuan Kecepatan Endap Sedimen..... | 190 |
| Gambar 4.27 Pengecekan Efisiensi Bak Pengendap | 194 |
| Gambar 4.28 Pengecekan Gerak Sedimen | 195 |
| Gambar 4.29 Skema PLTM Sion..... | 203 |
| Gambar 4.30 Grafik Penentuan Tipe Turbin Berdasarkan Tinggi Jatuh dan Daya | 210 |
| Gambar 4.31 Efisiensi Turbin..... | 212 |
| Gambar 4.32 Hasil Perhitungan Daya dan Energi..... | 216 |
| Gambar 4.33 Hubungan Debit dengan Daya berdasarkan Probabilitas | 216 |
| Gambar 4.34 Hubungan Suku Bunga dengan NPV | 226 |
| Gambar 4.35 Hubungan Energi dengan NPV | 227 |
| Gambar 4.36 Hubungan Biaya dengan NPV..... | 228 |
| Gambar 4.37 Hubungan Biaya dan Energi dengan NPV | 229 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 4.38 Hubungan Setiap Perubahan dengan NPV | 229 |
| Gambar 4.39 Hubungan Setiap Perubahan dengan BCR | 230 |
| Gambar 4.40 Hubungan Setiap Perubahan dengan IRR | 230 |
| Gambar 5.1 Kurva Durasi Aliran Rencana..... | 232 |
| Gambar 5.2 Hasil Perhitungan Daya dan Energi | 236 |
| Gambar 5.3 Hubungan Debit dengan Daya berdasarkan Probabilitas | 236 |

DAFTAR SIMBOL

| Keterangan | Satuan | Simbol |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Daya | kW | P |
| Debit | m ³ /s | Q |
| Debit Andalan | m ³ /s | Q _{40%} |
| Diameter | meter (m) | D |
| Efisiensi Generator | | η_g |
| Efisiensi Turbin | | η_t |
| Energi | kWh | E |
| Jumlah Data | | n |
| Kecepatan Aliran | m/s | v |
| Kehilangan energi | meter (m) | H _e |
| Kehilangan Tinggi Jatuh | meter (m) | H _{loss} |
| Koefisien | | C |
| Luas | meter persegi (m ²) | A |
| Nomor Urut Kejadian | | m |
| Panjang | meter (m) | L |
| Percepatan Gravitasi | m/s ² | g |
| Probabilitas | | P |
| Temperatur | Derajat Celsius (C ^o) | T |
| Tinggi Jathu Efektif | meter (m) | H _{eff} |
| Volume | m ³ | V |
| Waktu | detik (s) | s |
| Waktu Pengoperasian Pompa | detik (s) | t |

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR SIMBOL | xix |
| BAB 1 PENDAHULUAN | |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Identifikasi Masalah..... | 2 |
| 1.3. Rumusan Masalah | 2 |
| 1.4. Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5. Tujuan..... | 3 |
| 1.6. Manfaat | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1. Umum..... | 5 |
| 2.2. Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air..... | 6 |
| 2.2.1. <i>Run-off River</i> | 6 |
| 2.2.2. <i>Reservoir dan Dam Based</i> | 7 |
| 2.2.3. <i>Pumped Storage</i> | 8 |
| 2.2.4. <i>Diversion Canal</i> | 9 |
| 2.3. Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Air | 10 |
| 2.3.1. Pembagian Secara Teknis..... | 10 |
| 2.3.2. Pembagian Menurut Kapasitas | 10 |
| 2.3.3. Pembagian Menurut Tinggi Jatuh Air | 11 |
| 2.3.4. Pembagian Berdasarkan Topografi | 11 |
| 2.3.5. Pembagian Berdasarkan Ekonomi | 12 |
| 2.3.6. Pembagian Berdasarkan Pengadaan..... | 12 |
| 2.4. Analisa Hidrologi dalam Perencanaan PLTM..... | 12 |
| 2.4.1. Data Hujan | 13 |
| 2.4.2. Pemeriksaan Data Hujan..... | 13 |
| 2.4.2.1. Uji Outlier Data | 14 |
| 2.4.2.2. Uji Konsistensi Data..... | 14 |

| | |
|--|----|
| 2.4.3. Curah Hujan Rerata Daerah..... | 16 |
| 2.4.3.1. Aritmatik..... | 16 |
| 2.4.3.2. Polygon Thiessen | 16 |
| 2.4.4. Analisa Distribusi Curah Hujan | 18 |
| 2.4.4.1. Distribusi Gumbel | 18 |
| 2.4.4.2. Distribusi Log Pearson III | 21 |
| 2.4.4.3. Distribusi Log Normal | 22 |
| 2.4.5. Uji Keselarasan Distribusi Frekuensi | 23 |
| 2.4.5.1. Uji Chi – Square..... | 23 |
| 2.4.5.2. Uji Smirnov – Kolmogorov..... | 24 |
| 2.4.6. Analisa Curah Hujan Rancangan (Mononobe) | 26 |
| 2.4.7. Analisa Debit Banjir Rancangan..... | 27 |
| 2.4.7.1. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu | 28 |
| 2.4.7.2. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Gama I | 30 |
| 2.4.7.3. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Snyder..... | 31 |
| 2.4.7.4. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Limantara..... | 32 |
| 2.4.8. Analisa Debit Andalan | 34 |
| 2.4.8.1. Evapotranspirasi | 35 |
| 2.4.8.2. Metode FJ. Mock..... | 36 |
| 2.4.8.3. Metode Kurva Durasi (Flow Duration Curva) | 40 |
| 2.4.8.4 Metode Debit Pembangkit..... | 42 |
| 2.5. Analisa Hidrolika | 42 |
| 2.5.1. Tinggi Jatuh..... | 42 |
| 2.5.2. Kehilangan Tinggi Tekan (Head Lost)..... | 44 |
| 2.5.2.1. Saluran Terbuka..... | 44 |
| 2.5.2.2. Saluran Tertutup | 46 |
| 2.6. Komponen PLTM | 48 |
| 2.6.1. Bendung (Weir)..... | 49 |
| 2.6.1.1. Lebar Bendung | 49 |
| 2.6.1.2. Mercu Bendung | 51 |
| 2.6.2. Bangunan Pengambilan (Intake)..... | 57 |
| 2.6.3. Saluran Pembawa (Head Race)..... | 60 |
| 2.6.4. Bak Pengendap (Settling Basi) | 66 |
| 2.6.5. Bak Penenang (Forebay)..... | 70 |

| | |
|--|----|
| 2.6.6. Saringan (Trashrack)..... | 73 |
| 2.6.7. Pipa Pesat (Penstock)..... | 74 |
| 2.6.7.1. Diameter Pipa Pesat..... | 75 |
| 2.6.7.2. Tebal Pipa Pesat..... | 76 |
| 2.6.7.3. Jarak Tumpuan Pipa Pesat..... | 77 |
| 2.6.8. Saluran Pembuang (Tail Race)..... | 78 |
| 2.6.9. Turbin dan Generator..... | 79 |
| 2.6.10. Pemilihan Turbin..... | 79 |
| 2.6.11. Kecepatan Spesifik Turbin..... | 82 |
| 2.6.12. Kavitasi dan Titik Pusat Turbin..... | 83 |
| 2.6.13. Dimensi Turbin..... | 85 |
| 2.6.14. Generator..... | 87 |
| 2.7. Daya dan Energi..... | 88 |
| 2.7.1. Daya..... | 88 |
| 2.7.2. Energi..... | 89 |
| 2.8. Analisa Ekonomi..... | 89 |
| 2.8.1. Benefit (Komponen Manfaat)..... | 89 |
| 2.8.2. Cost (Komponen Biaya)..... | 89 |
| 2.8.3. Indikator Kelayakan Ekonomi..... | 89 |
| 2.8.3.1. BCR (Benefit Cost Ratio)..... | 90 |
| 2.8.3.2. NPV (Net Present Value)..... | 90 |
| 2.8.3.3. IRR..... | 90 |
| 2.8.3.4. Analisa Sensivitas..... | 91 |
| 2.8.3.5. Payback Periode..... | 91 |

BAB III METODE PENELITIAN

| | |
|---|----|
| 3.1. Deskripsi Daerah Studi..... | 93 |
| 3.1.1. Batas Administrasi..... | 94 |
| 3.1.2. Aksesibilitas Lokasi PLTM Sion..... | 94 |
| 3.1.3. Kondisi Geoteknik..... | 94 |
| 3.2. Data-data yang Digunakan..... | 94 |
| 3.2.1. Data Daerah Aliran Sungai (DAS)..... | 94 |
| 3.2.2. Data Curah Hujan..... | 95 |
| 3.2.3. Data Klimatologi..... | 95 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.4. Peta Topografi Lokasi Studi..... | 95 |
| 3.3. Tahapan Penyelesaian Studi..... | 95 |
| 3.4. Diagram Alir | 97 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1. Analisa Data Hidrologi | 99 |
| 4.1.1. Uji Konsistensi Data Hujan | 101 |
| 4.1.2. Uji Outlier..... | 112 |
| 4.1.3. Poligon Tiessen..... | 115 |
| 4.2. Analisa Debit Banjir..... | 117 |
| 4.2.1. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Log Normal..... | 117 |
| 4.2.2. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Gumbel..... | 119 |
| 4.2.3. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Log Pearson III | 120 |
| 4.2.4. Perhitungan Uji Chi Kuadrat | 121 |
| 4.2.5. Perhitungan Uji Smirnov Kolmogrof | 124 |
| 4.2.6. Perhitungan Jam-jaman..... | 126 |
| 4.2.7. Perhitungan Hujan Netto Jam-jaman..... | 128 |
| 4.2.8. Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu..... | 130 |
| 4.2.9. Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis Limantara..... | 139 |
| 4.2.10. Perhitungan Tinggi Muka Air Banjir | 147 |
| 4.3. Analisa Debit Andalan | 151 |
| 4.3.1. Perhitungan Evapotranspirasi | 151 |
| 4.3.2. Perhitungan Pembangkitan Debit dengan Metode F.J. Mock..... | 155 |
| 4.3.3. Perhitungan <i>Flow Duration Curve</i> (FDC)..... | 169 |
| 4.4. Penentuan Debit Pembangkit..... | 171 |
| 4.4.1. Penentuan Berdasarkan Energi Produksi Tahunan | 171 |
| 4.4.2. Penentuan Berdasarkan Biaya | 179 |
| 4.4.3. Penentuan Berdasarkan <i>BCR</i> | 180 |
| 4.5. Perencanaan Komponen PLTM | 180 |
| 4.5.1. Bendung | 181 |
| 4.5.1.1. Lebar Efektif..... | 181 |
| 4.5.1.2. H_1 dan H_d | 182 |
| 4.5.1.3. Profil Muka Air..... | 183 |
| 4.5.1.4. Peredam Energi | 184 |
| 4.5.2. Intake | 186 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.3. Saluran Pengarah | 188 |
| 4.5.4. Bak Pengendap | 189 |
| 4.5.5. Saluran Pembawa..... | 195 |
| 4.5.6. Pipa Pesat | 196 |
| 4.5.6.1. Dimensi Pipa Pesat | 196 |
| 4.5.6.2. Ketebalan Pipa Pesat | 198 |
| 4.5.6.3. Jarak Tumpuan Pipa Pesat | 199 |
| 4.5.7. Bak Penenang..... | 200 |
| 4.5.7.1. Vortisitas Pipa Pesat..... | 201 |
| 4.5.8. Saluran Pembuang..... | 202 |
| 4.6. Kehilangan Tinggi | 202 |
| 4.6.1. Pada Saluran Pengambilan..... | 203 |
| 4.6.2. Pada Saringan Pengambilan..... | 204 |
| 4.6.3. Pada Pintu Pengambilan..... | 204 |
| 4.6.4. Pada Saluran Pengarah..... | 204 |
| 4.6.5. Pada Pelebaran Menuju Bak Pengendap..... | 205 |
| 4.6.6. Pada Penyempitan Saluran Pembawa | 205 |
| 4.6.7. Pada Peleburan Menuju Bak Penenang | 206 |
| 4.6.8. Pada Saringan Bak Penenang..... | 206 |
| 4.6.9. Pada Pemasukan Pipa Pesat..... | 207 |
| 4.6.10. Pada Belokan 1 & 2 Pipa Pesat..... | 207 |
| 4.6.11. Pada Katup Pipa Pesat..... | 208 |
| 4.6.12. Rekapitulasi Kehilangan Tinggi | 208 |
| 4.7. Turbin dan Genrator | 209 |
| 4.7.1. Trubin | 209 |
| 4.7.2 Generator..... | 211 |
| 4.7.3. Rumah Pembangkit | 213 |
| 4.8. Daya dan Energi..... | 214 |
| 4.9. Analisa Ekonomi | 218 |
| 4.9.1. Komponen Biaya..... | 217 |
| 4.9.2. Nilai Sekarang (<i>Present Value</i>)..... | 222 |
| 4.9.3. <i>Benefit Cost Ratio</i> (BCR)..... | 224 |
| 4.9.4. <i>Net Present Value</i> (NPV) | 225 |

| | |
|---|-------|
| 4.9.5. <i>Internal Rate of Return</i> | 225 |
| 4.9.6. <i>Payback Period</i> | 228 |
| 4.9.7. Sensitivitas | 228 |
| BAB V PENUTUP | |
| 5.1. Kesimpulan | 233 |
| 5.2. Saran | 234 |
| DAFTAR PUSTAKA | xxi |
| LAMPIRAN | xxiii |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi di Indonesia semakin meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan standar kehidupan masyarakatnya. Hal ini ditandai dengan meningkatnya peralatan yang menggunakan teknologi canggih dan modern, baik dalam sektor rumah tangga maupun industri, sehingga menyebabkan pertumbuhan permintaan energi listrik untuk sektor rumah tangga dan industri. Energi yang saat ini diunggulkan dan diproduksi dalam skala besar berasal dari fosil atau tidak terbarukan, seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara yang ketersediannya terbatas.

Adapun untuk mengatasi keterbatasan energi fosil, pemerintah mendorong upaya kebijakan pembaruan energi, yaitu dengan memaksimalkan Energi Baru Terbarukan (EBT) sebagai alternatif yang sangat berlimpah keberadaannya di Indonesia, namun pemanfaatannya masih terbatas seperti biomassa, surya, angin, panas bumi, dan air.

Dalam pasal 4 ayat 4 UU No. 20 Tahun 2002 tentang ketenagalistrikan juga disebutkan, guna menjamin ketersediaan energi primer untuk pembangkit tenaga listrik, diprioritaskan penggunaan sumber energi setempat dengan kewajiban mengutamakan pemanfaatan sumber energi terbarukan. Dalam pasal 2 Peraturan Pemerintah tersebut disebutkan:

- Ayat 3: Penyediaan tenaga listrik dilakukan dengan memanfaatkan seoptimal mungkin sumber energi yang terdapat di wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia.
- Ayat 4: Guna menjamin ketersediaan energi primer untuk penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum, diprioritaskan penggunaan sumber energi setempat dengan kewajiban mengutamakan pemanfaatan sumber energi terbarukan.

Hal ini juga ditegaskan dalam Peraturan Presiden No. 5 Tahun 2006 mengenai Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang menargetkan peningkatan penggunaan energi terbarukan sampai 15% di tahun 2025 dan mengurangi peran minyak bumi sampai 20% batu bara sampai 33%, dan peningkatan EBT lainnya hingga 5% atau lebih.

Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang dapat mengubah potensi air dengan ketinggian dan debit kelas menengah menjadi tenaga listrik, dengan menggunakan turbin air dan generator.

Sistem PLTM secara umum sama persis dengan PLTA pada umumnya. Namun, yang membedakan adalah daya yang dihasilkan. PLTM dapat memanfaatkan atau tanpa reservoir pun PLTM dapat beroperasi, karena dapat memanfaatkan potensi air yang termasuk pada kelas menengah.

PLTM dipilih sebagai salah satu energi alternatif dikarenakan memiliki beberapa keunggulan dibanding dengan pembangkit listrik lainnya, antara lain adalah tenaga penggerak yang tidak akan habis atau berubah menjadi bentuk lain, biaya operasional dan pemeliharaannya lebih murah, dan pengoperasiannya dapat dihentikan setiap saat tanpa melalui prosedur yang rumit. Sistem PLTM pun sangat sederhana dan memiliki ketangguhan yang baik. Terlebih lagi PLTM seiring dipakai sebagai proyek energi yang mengusung pembangunan berkelanjutan, termasuk di dalamnya adalah pembangunan sosial ekonominya. Lebih lanjut, penggunaan PLTM telah menyadarkan masyarakat akan pentingnya menjaga lingkungan sekitar, terutama air.

Dengan demikian sudah sepantasnya pemerintah mulai mengembangkan potensi PLTM lebih banyak lagi. Akan tetapi alam pembangunan suatu PLTM juga harus memperhatikan beberapa aspek, salah satunya aspek teknis.

1.2. Identifikasi Masalah

Desa Sion yang terletak di Kecamatan Parlilitan, Kabupaten Humbang Hasundutan, Sumatera Utara yang dilewati Sungai Aek Simonggo dan mengalirkan debit yang dapat diandalkan sepanjang tahunnya. Pemanfaatan sungai tersebut belum maksimal mengingat debitnya yang cukup ideal sebagai pembangkit listrik. Sungai tersebut juga memiliki kontur yang memenuhi teknis perencanaan untuk dibangun PLTM. Dengan kondisi demikian, sebaiknya Badan Usaha memanfaatkan untuk memenuhi ketahanan energi terbarukan yang ramah lingkungan dan nantinya diserahkan melalui pembelian oleh PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) sesuai Peraturan Menteri ESDM No 19 Tahun 2015.

1.3. Rumusan Masalah

Dengan adanya identifikasi masalah, maka permasalahan yang hendak dibahas dalam studi ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Berapa besar Debit Banjir Rancangan dan Debit Andalan yang digunakan dalam perencanaan PLTM Sion?
2. Berapa Dimensi Bangunan yang dibutuhkan dalam perencanaan PLTM Sion?
3. Berapa besar Daya dan Energi yang dihasilkan dari PLTM Sion?
4. Bagaimana Analisa Ekonomi dalam perencanaan PLTM Sion?

1.4. Batasan Masalah

Pembahasan masalah dilakukan agar penulisan skripsi dapat memberikan pemahaman yang terarah dan sesuai dengan yang diharapkan. Adapun batasan-batasan yang dimassud adalah:

1. Daerah studi adalah PLTM Sion di Sungai Aek Simonggo, Desa Sion, Kecamatan Parlilitan, Kabupaten Humbang Hasundutan, Provinsi Sumatera Utara.
2. Analisa hidrolika yang dibahas pada studi ini hanya pada bangunan bendung, saluran hantar (*waterway*) dengan bagian-bagiannya meliputi bangunan pengambilan (*intake*), bak pengendap (*settling basin*), saluran pembawa (*headrace*), bak penenang (*forebay*), serta pipa pesat (*penstock*).
3. Perencanaan bendung hanya pada penentuan dimensi lebar efektif, tinggi bangunannya dan peredam energi.
4. Perencanaan pipa pesat meliputi diameter, panjang, dan ketebalan.
5. Pemilihan dan perencanaan turbin hanya meliputi daya yang dibangkitkan dan pemilihan jenis turbin.
6. Tidak membahas analisa mengenai dampak lingkungan (AMDAL).
7. Tidak membahas sedimentasi.
8. Tidak membahas stabilitas konstruksi.
9. Tidak membahas detail komponen-komponen mekanikal dan elektrikal.

1.5. Tujuan

Studi Perencanaan ini bertujuan untuk memperhitungkan secara detail dalam Analisa Hidrologi serta perencanaan bangunan PLTM Sion dan menentukan kelayakan ekonomi dalam pembangunan PLTM Sion di Sungai Aek Simonggo, Desa Sion, Kecamatan Parlilitan, Kabupaten Humbang Hasundutan, Sumatera Utara. Adapun keluaran yang akan diperoleh antara lain:

- a. Debit Banjir Rancangan,
- b. Debit Andalan,
- c. Desain bangunan bendung (*weir*),

- d. Desain bangunan pengambilan (*intke*),
- e. Desain saluran pengarah (*diversion channel*)
- f. Desain bak pengendap (*settling basin*),
- g. Desain saluran pembawa (*headrace*),
- h. Desain bak penenang (*head pond*),
- i. Dimensi pipa pesat (*penstock*)
- j. Tinggi jatuh efektif,
- k. Jenis turbin,
- l. Daya dan Energi yang dihasilkan, dan
- m. Kelayakan Ekonomi.

1.6. Manfaat

Sedangkan manfaat dari studi perencanaan ini adalah sebagai pembelajaran kepada penulis maupun pembaca tentang perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) dan juga sebagai saran alternatif dalam perencanaan PLTM Sion di Sungai Aek Simonggo, Desa Sion, Kabupaten Humbang Hasundutan, Provinsi Sumatera Utara.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

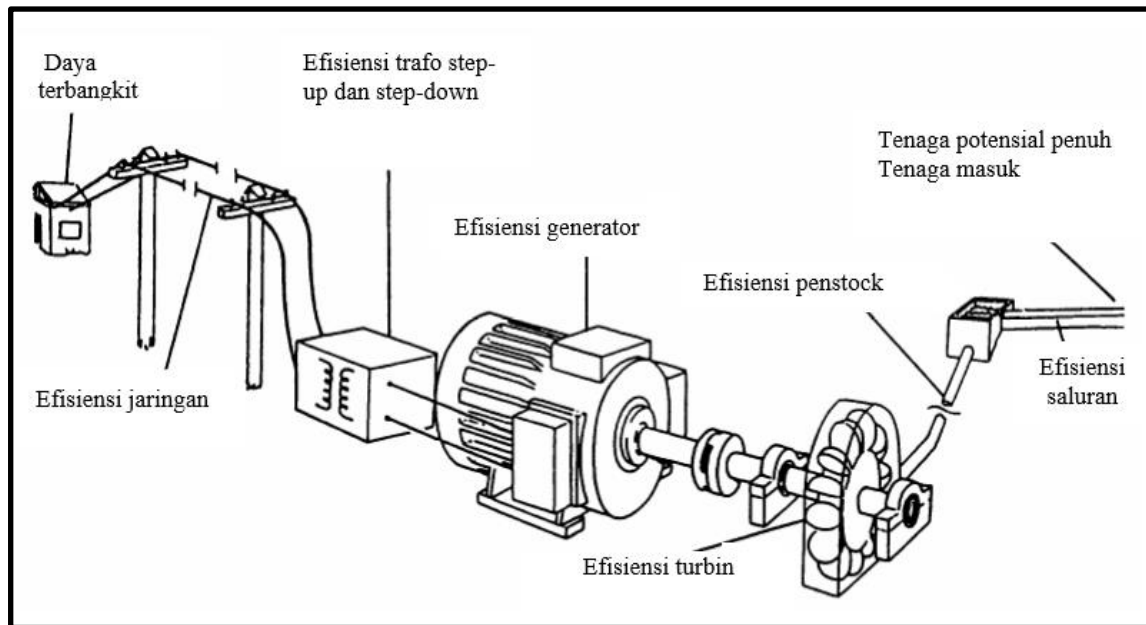
2.1. Umum

Pembangkit listrik dengan mengandalkan tenaga air yang dialirkan menuju turbin dan membuat rekayasa teknis untuk mendapatkan energi dari aliran air yang maksimal. Adapun pembangkit listrik yang memanfaatkan tenaga air, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Namun sebenarnya Pembangkit Listrik Tenaga Air dapat dibedakan menjadi beberapa kategori berdasarkan energi yang dihasilkan.

Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro secara umum adalah sebagai pembangkit listrik yang termasuk kategori sedang dengan sumber energi dari air yang berkapasitas antara 100 kW – 1000 kW. Daya yang mampu dibangkitkan dari sebuah pembangkit listrik minihidro tergantung dari beberapa variabel antara lain ketinggian jatuh (*head*) dan juga debit andalan. Tidak semuanya potensi air yang ada dapat diubah menjadi energi listrik, karena ada sebagian energi yang hilang akibat terjadinya gesekan sebelum memutar turbin, maupun pengupuan di saluran yang diakibatkan matahari.

Sesuai dengan apa yang disebutkan di atas, minihidro hanyalah sebuah sebutan. Mini artinya kecil sedangkan hidro artinya air, sehingga minihidro merupakan pembangkit listrik dengan tenaga air dengan skala mini. Dalam prakteknya istilah ini tidak merupakan sesuatu yang baku, namun bisa dibayangkan bahwa minihidro, pasti menggunakan air sebagai sumber energinya. Yang membedakan antara istilah minihidro dengan mikrohidro adalah *output* daya yang dihasilkan. Mikrohidro menghasilkan daya lebih kecil dari 100 Kw.

Cara kerja Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) dimulai dengan dari proses perubahan aliran air yang merupakan energi potensial menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran turbin, untuk kemudian dikonversi menjadi energi listrik pada generator. Air yang mengalir pada kapasitas tertentu atau debit andalan, disalurkan pada ketinggian tertentu (*head*) menuju turbin. Turbin akan menerima energi air, dan mengubahnya menjadi energi mekanik berupa berputarnya poros turbin. Poros yang berputar kemudian ditransmisikan ke generator dan akan dihasilkan energi listrik yang akan masuk ke sistem kontrol arus listrik sebelum dialirkan ke pengguna listrik.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Suatu PLTM
Sumber: JICA (2009:2-8)

Dari gambar Gambar 2.1 dapat disimpulkan bahwa suatu pembangkit listrik tenaga minihidro tergantung dengan:

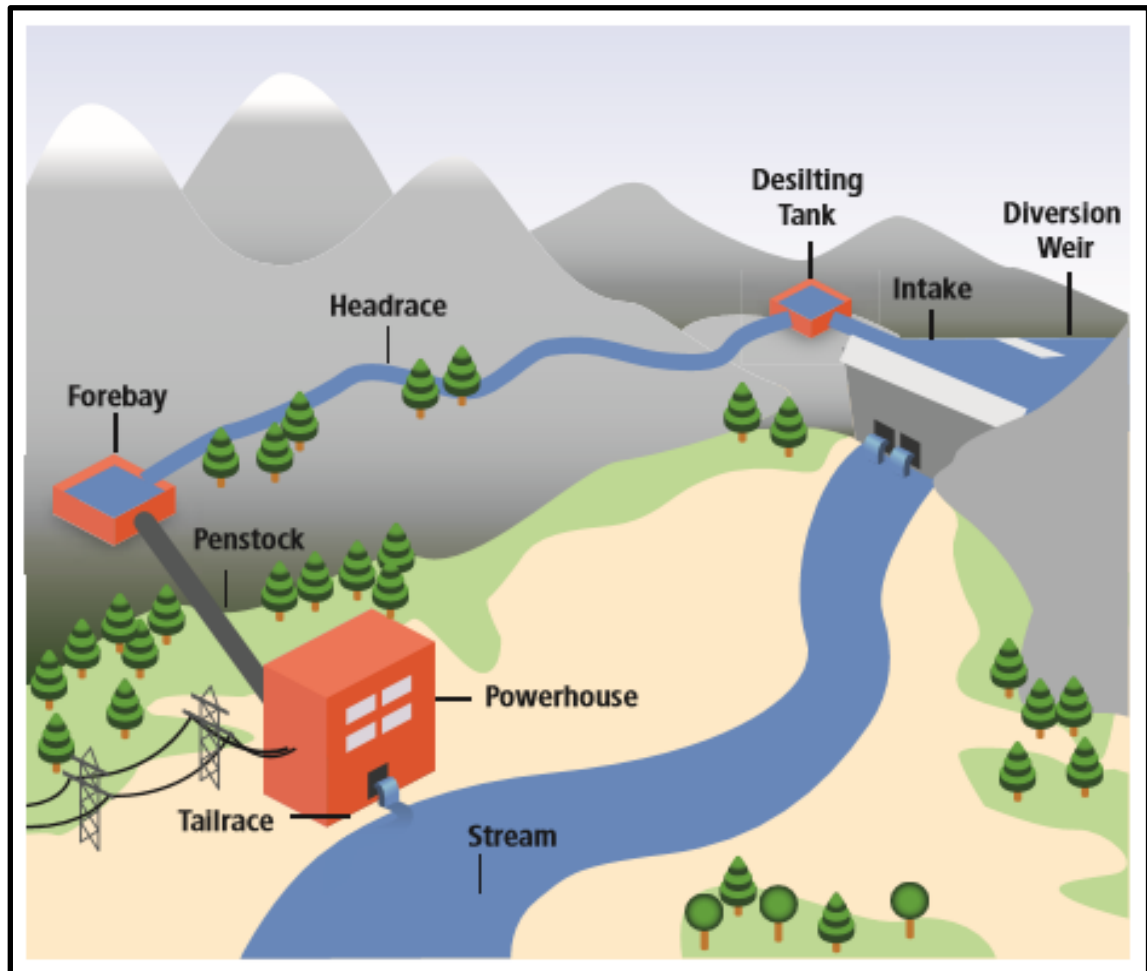
- ✓ Debit air (sumber energi),
- ✓ Ketinggian jatuh (*head*), dan
- ✓ Efisiensi (generator).

2.2. Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air

2.2.1. *Run-off River*

Pada umumnya pembangkit minihidro menggunakan sistem "*run-off river*" yang artinya tidak memerlukan adanya bangunan tampungan (*reservoir*) untuk menampung air sebelum melewati turbin sehingga air langsung melalui pipa kemudian digunakan untuk memutar turbin. Jenis ini merupakan sistem pembangkit tenaga air yang pertama kali diperkenalkan. Pada sistem ini debit aliran air pada sungai tersebut memiliki aliran yang rendah sehingga energi yang dihasilkan akan rendah pula.

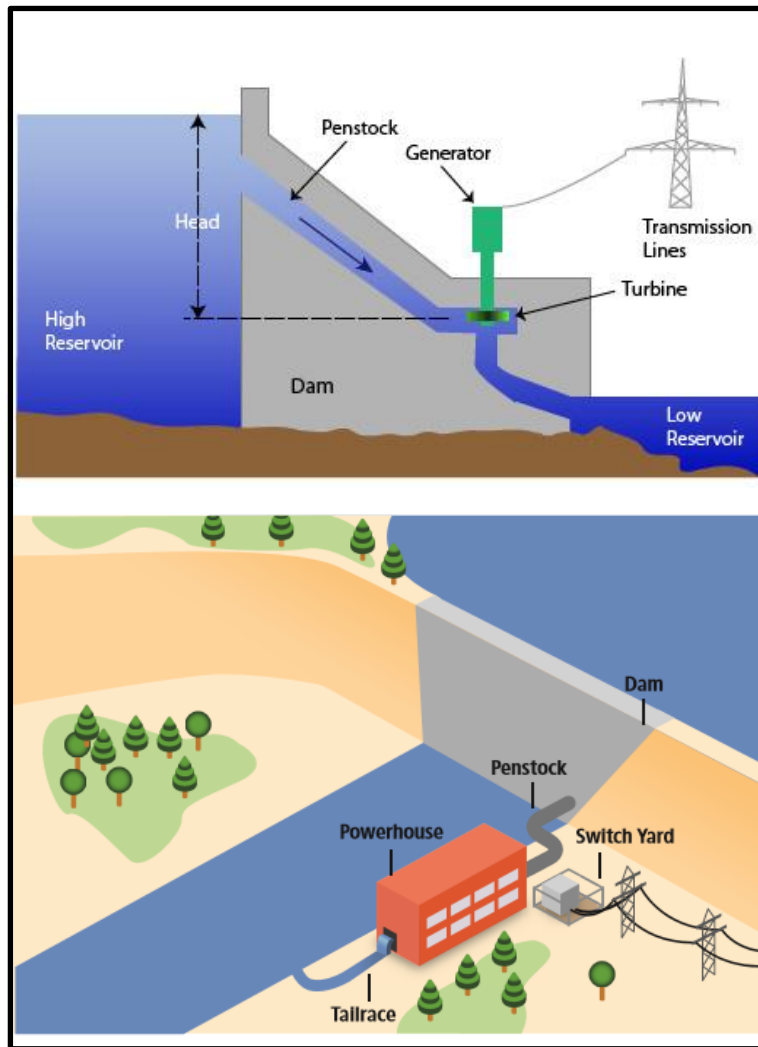
Keuntungan menggunakan sistem ini adalah biaya yang diperlukan untuk pembangunan dan dampak terhadap lingkungan akan lebih kecil. Namun sistem ini pun memiliki kekurangan yaitu aliran air yang melalui turbin kurang dapat dikendalikan karena tergantung pada debit aliran sungai yang ada.



Gambar 2.2 Skema PLTM Jenis Sistem *Run-off River*
 Sumber: Kumar & Schei (2011:451)

2.2.2. Reservoir dan Dam Based

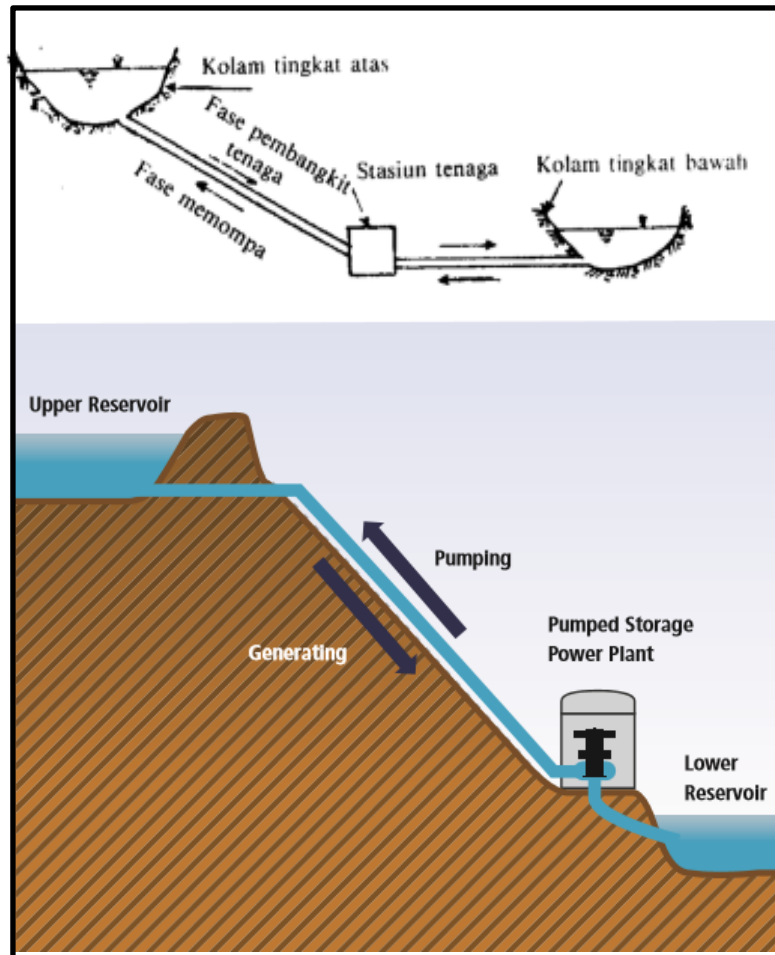
Pada sistem ini pembangkit memiliki kolam tampung atau *reservoir* sebagai tempat penampungan dan penimbungan juga sering disebut dengan *Storage Hydropower*. Selanjutnya air dari kolam tersebut dialirkan ke bagian saluran pembangkit untuk kemudian digunakan memutar turbin. Jenis dan desain tampungan ditentukan berdasarkan topografi dan banyak hal lain contohnya seperti bendungan atau waduk yang airnya ditampung terlebih dahulu.



Gambar 2.3 Skema PLTM Jenis Sistem *Reservoir and Dam Based*
 Sumber: Kumar & Schei (2011:451)

2.2.3. *Pumped Storage*

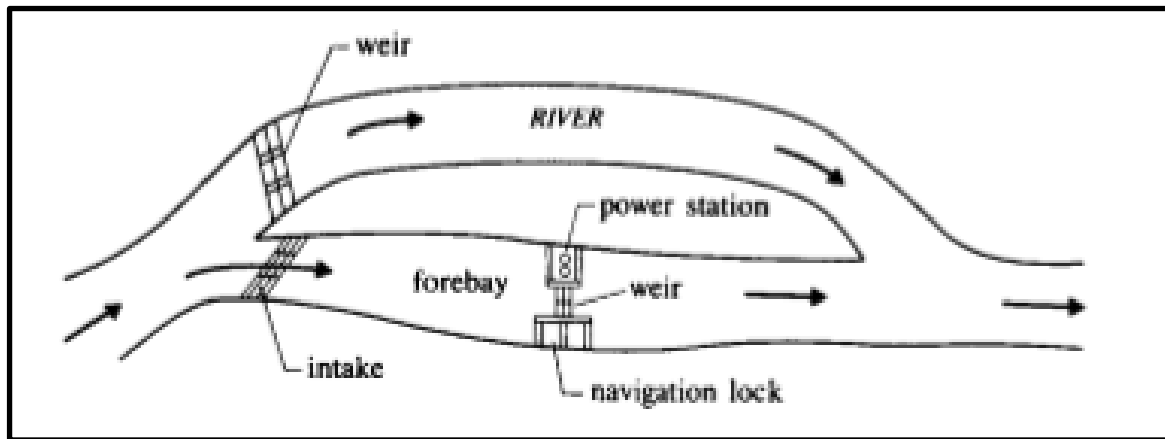
Pembangkit Listrik Tenaga Pompa adalah sebuah tipe khusus dari pembangkit listrik konvensional. Keistimewaan dari stasiun pembangkit tenaga listrik ini terletak pada keadaannya apabila stasiun pembangkit demikian tidak memproduksi tenaga listrik, maka dapat dipergunakan sebagai stasiun pompa yang memompa air dari saluran depan ke saluran samping pada saat cadangan air tinggi.



Gambar 2.4 Skema PLTM Jenis Sistem *Pumped Storage*
 Sumber: Kumar & Schei (2011:452)

2.2.4. Diversion Canal

Diversion Canal merupakan jenis pembangkit listrik tenaga air yang sesuai dengan kondisi topografi, geologi dan hidrologi yang alirannya dapat langsung dimanfaatkan sebagai pembangkit. Kondisi ini sangat meminimalisir ekonomi pembangunan dikarenakan hanya membutuhkan beberapa bangunan sebagai pengarah ke pembangkit listrik. Tinggi jatuhnya cukup tinggi tanpa harus membutuhkan jarak inti ke dengan pembangkit listrik.



Gambar 2.5 Skema PLTM Jenis Sistem *Diversion Canal*
Sumber: Novak (2007:500)

2.3. Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit listrik tenaga air dapat juga diklasifikasikan atas Dasar Sistem Permintaan. Pengoperasian pembangkit listrik dalam hubungan penyediaan tenaga listrik dapat dibagi sesuai dengan permintaan, atau pengoperasian pembangkit listrik dapat berbentuk suatu kesatuan sistem, tidak hanya dari tenaga air tetapi juga dari sumber panas atau tenaga nuklir. Pada zaman sekarang, sistem pembangkit listrik tenaga air dengan kebutuhan yang terpisah-pisah tidaklah biasa. Pembangkit listrik tenaga air dapat dibangun untuk konsumsi atau kebutuhan tersendiri, walaupun di berbagai negara hal tersebut tidak diizinkan. Untuk pembagian pembangkit listrik tenaga air dapat di klasifikasikan sebagai berikut:

2.3.1. Pembagian Secara Teknis

Dalam hal teknis PLTA dapat dibagi menjadi: (Patty, 1995 : 34)

- a. PLTA yang menggunakan air sungai atau air waduk,
- b. PLTA yang menggunakan air yang telah dipompa ke suatu reservoir yang diletakan lebih tinggi,
- c. PLTA yang menggunakan pasang surut air laut, dan
- d. PLTA yang menggunakan energi ombak.

2.3.2. Pembagian Menurut Kapasitas

Klasifikasi atas dasar kapasitas PLTA adalah sebagai berikut: (Dendakar, 1991:121)

- a. PLTA mikro dengan daya hingga 99 Kw,
- b. PLTA kapasitas rendah dengan daya 100 sampai 999 Kw (mikrohidro),
- c. PLTA kapasitas sedang dengan daya 1000 sampai 9999 Kw (minihidro), dan
- d. PLTA kapasitas tinggi dengan daya 10.000 kW ketas.

2.3.3. Pembagian Menurut Tinggi Jatuh Air

Dalam hal tinggi jatuh (H) air dapat dibagi menjadi (Novak, 2007:502):

- a. PLTA dengan tekanan rendah; $H < 50$ m

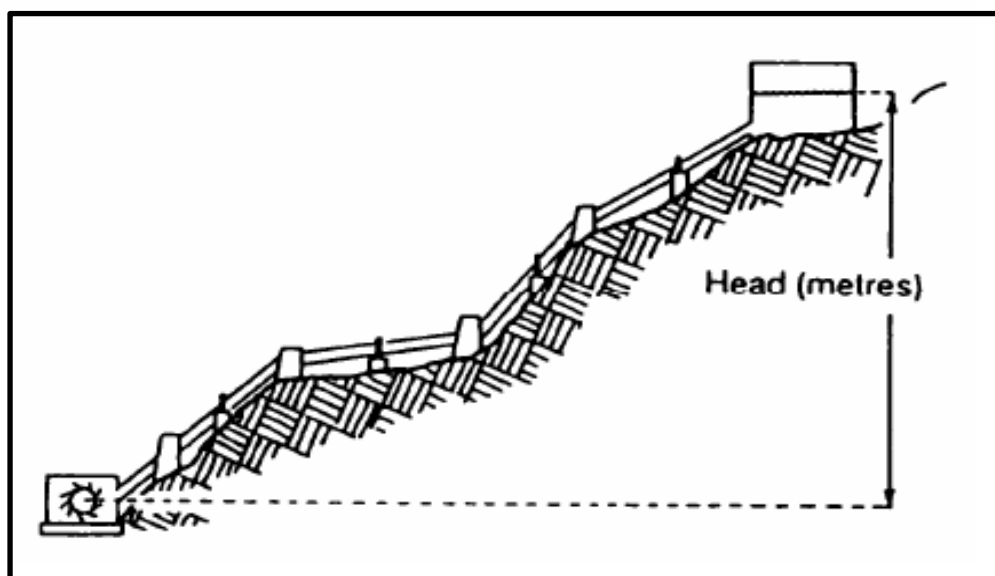
Klasifikasi ini biasanya terjadi pada tipe *run of river* dan juga dengan tenaga pasang surut termasuk dalam klasifikasi ini. Beberapa jenis pembangkit yang dapat digunakan dalam klasifikasi ini: Pitlochry, Scotland (17 m); Owen Falls, Uganda (21 m); St Lawrence, Canada (22m); La Rance Tidal plant, France (3 – 11 m).

- b. PLTA dengan tekanan sedang; $H = 50$ m hingga 300 m

Klasifikasi ini dapat dikendalikan secara lokal atau jarak jauh dengan sistem kontrol. Beberapa jenis pembangkit yang dapat digunakan dalam klasifikasi ini: Castelo de Bode; Portugal (97m), Hoover, AS (185 m); Tiga Ngarai, Cina (113 m); Itaipu, Brasil (126m); Guri, Venezuela (146 m); Kasnojarsk, Rusia (100 m).

- c. PLTA dengan tekanan tinggi; $H > 300$ m

Beberapa jenis pembangkit yang dapat digunakan dalam klasifikasi ini: Laures, Italia (2030m); Reisseck-Kreuzeck, Austria (1771 m); Chandoline, Swiss (1750 m); Mar, Norwegia (780 m); Cruachan, Skotlandia (401 m); Dinorwic, Wales Utara (440 m).



Gambar 2.6 Tinggi Jatuh (*Head*)
Sumber: JICA (2009:2-8)

2.3.4. Pembagian Berdasarkan Topografi

Dalam hal topografi dapat dibagi menjadi:

- Daerah lembah,
- Daerah berbukit-bukit, dan
- Daerah bergunung-gunung.

2.3.5. Pembagian Berdasarkan Ekonomi

Dalam hal ekonomi dapat dibagi menjadi:

- a. PLTA yang bekerja sendiri,
- b. PLTA yang bekerjasama dengan sentral-sentral listrik yang lain dalam pemberian listrik kepada konsumen. Dengan hal ini PLTA dapat dipakai untuk:
 - ✓ Beban dasar (PLTA bekerja terus-menerus), dan
 - ✓ Beban maksimum (PLTA bekerja pada jam-jam tertentu)

2.3.6. Pembagian Berdasarkan Pengadaan

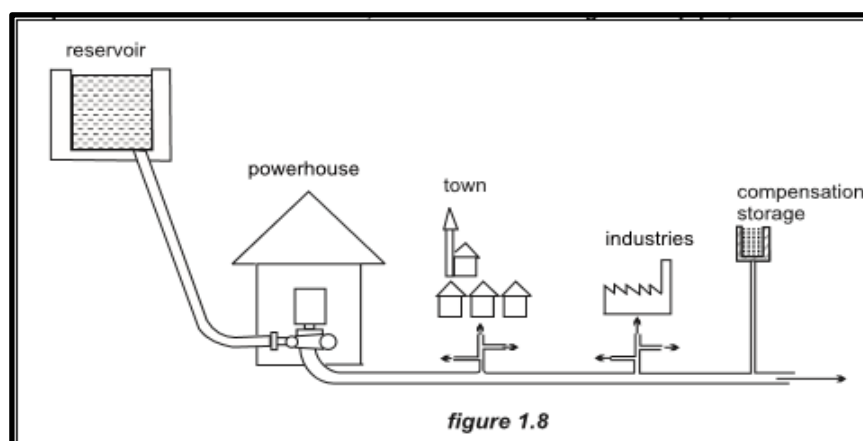
Pembangkit listrik tenaga air dapat juga dibedakan dalam hal pengadaan, yaitu:

a. *Single Purpose*

Infrastruktur pembangkit listrik tenaga air yang hanya digunakan air untuk satu peruntukan, yaitu menghasilkan listrik.

b. *Multi Purpose*

Infrastruktur pembangkit listrik tenaga air yang menyediakan air untuk kebutuhan lain selain untuk memproduksi listrik, adapun beberapa fungsi dari PLTA dengan peruntukan fungsi antara lain, yaitu irigasi lahan atau suplai air bersih.



Gambar 2.7 Skema PLTM Jenis Sistem *Multi Purpose*
Sumber: ESHA (1998:21)

2.4. Analisa Hidrologi dalam Perencanaan PLTM

Dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga air dibutuhkan analisis hidrologi. Analisis hidrologi yang akan dilakukan mulai dari uji data curah hujan hingga menghitung debit andalan.

Analisa Hidrologi dalam perencanaan PLTM harus dilakukan karena PLTM

memanfaatkan debit andalan dari sungai yang berpotensi untuk memutar turbin. Debit air yang diperhitungkan termasuk klimatologi setempat akan menentukan dimensi dari setiap bangunan dalam perencanaan PLTM hingga nantinya menentukan daya yang dihasilkan.

2.4.1. Data Hujan

Data curah hujan diukur dengan alat pengukur hujan (*raingauge*), baik yang manual ataupun yang otomatis (*automatic raingauge recorder*). Hasil pengukuran yang diperoleh dari setiap alat pengukuran data hujan lokal (*point rainfall*), sedangkan untuk keperluan analisis diperlukan data daerah tangkapan air (*catchment rainfall*).

Stasiun pencatatan hujan dipilih dengan persyaratan sebagai berikut:

- Pilih 1 lokasi stasiun pencatat hujan yang terdekat dengan lokasi dengan jarak < 10 km.
- Apabila tidak ada stasiun pencatat hujan dengan jarak < 10 km, maka dicari stasiun pencatat hujan dengan jarak , 10 – 20 km, minimal 2 stasiun pencatat hujan.
- Apabila tidak ada stasiun pencatat hujan dengan jarak 10 – 20 km, maka dicari stasiun hujan lain dengan jarak < 50 km, minimal 3 stasiun pencatat hujan

Apabila terdapat daerah tangkapan air yang tidak sesuai dengan kriteria diatas, maka setidaknya terdapat 1 stasiun pencatat hujan terdekat sebagai acuan dalam perhitungan data curah hujan.

Apabila juga tidak dapat memenuhi kriteria tersebut, maka dapat mengacu pada daerah tangkapan air terdekat yang memiliki data debit, data hujan atau hasil analisis debit lengkap. Metode acuan menggunakan cara perbandingan luas daerah tangkapan air.

Data hujan daerah tangkapan air yang paling nyata dihitung dengan menggunakan metode poligon Thiessen. Cara ini memperhitungkan luas daerah yang diwakili stasiun yang berpengaruh ssebagai faktor koreksi dalam menghitung hujan rata-rata. (IMIDAP, 2009:10-11)

2.4.2. Pemeriksaan Data Hujan

Pemeriksaan data hujan secara manual dilakukan untuk mengantisipasi kemungkinan kesalahan seperti kesalahan ketik, pencatatatan angka 999 yang berarti tidak ada data, harga maksimum tidak realistis atau sangat kecil dan kesalahan pembacaan atau pemasukan data dalam format pencatatan. Data yang meragukan tersebut diperiksa besarannya secara manual terhadap besaran di pos-pos terdekat pada tahun yang sama. Data yang lolos penyaringan adalah besaran hujan di pos yang diperiksa tidak jauh berbeda dengan besaran hujan di pos terdekat. Pemeriksaan lain dilakukan secara statistik meliputi pemeriksaan homogenitas dan pemeriksaan atau data di luar ambang batas (abnormalitas).

2.4.2.1. Uji Outlier Data

Pemeriksaan data *outlier* adalah data yang menyimpang cukup jauh dari *trend* kelompoknya. Keberadaan data *outlier* biasanya mengganggu pemilihan jenis distribusi suatu sampel data sehingga data *outlier* perlu dihapus dari data yang digunakan dalam analisis. Data *outlier* bawah dapat langsung dibuang namun data *outlier* atas harus dipertimbangkan dengan dibandingkan data hujan atau banjir historis dan informasi hujan atau banjir di stasiun terdekatnya. Pengujian metode ini menetapkan ambang bawah X_L dan ambang atas X_H sebagai berikut.

$$X_H = \exp(\bar{x} + Kn S) \quad (2-1)$$

$$X_L = \exp(\bar{x} - Kn S) \quad (2-2)$$

dengan:

X_H = nilai ambang atas

X_L = nilai ambang bawah

\bar{x} = nilai rata-rata dari logaritma sampel data

Kn = besaran yang tergantung pada jumlah sampel data disajikan pada Tabel 2.1

S = simpangan baku dari logaritma sampel data

n = jumlah sampel data

Tabel 2.1 Nilai Kn dalam pengujian *Outlier*

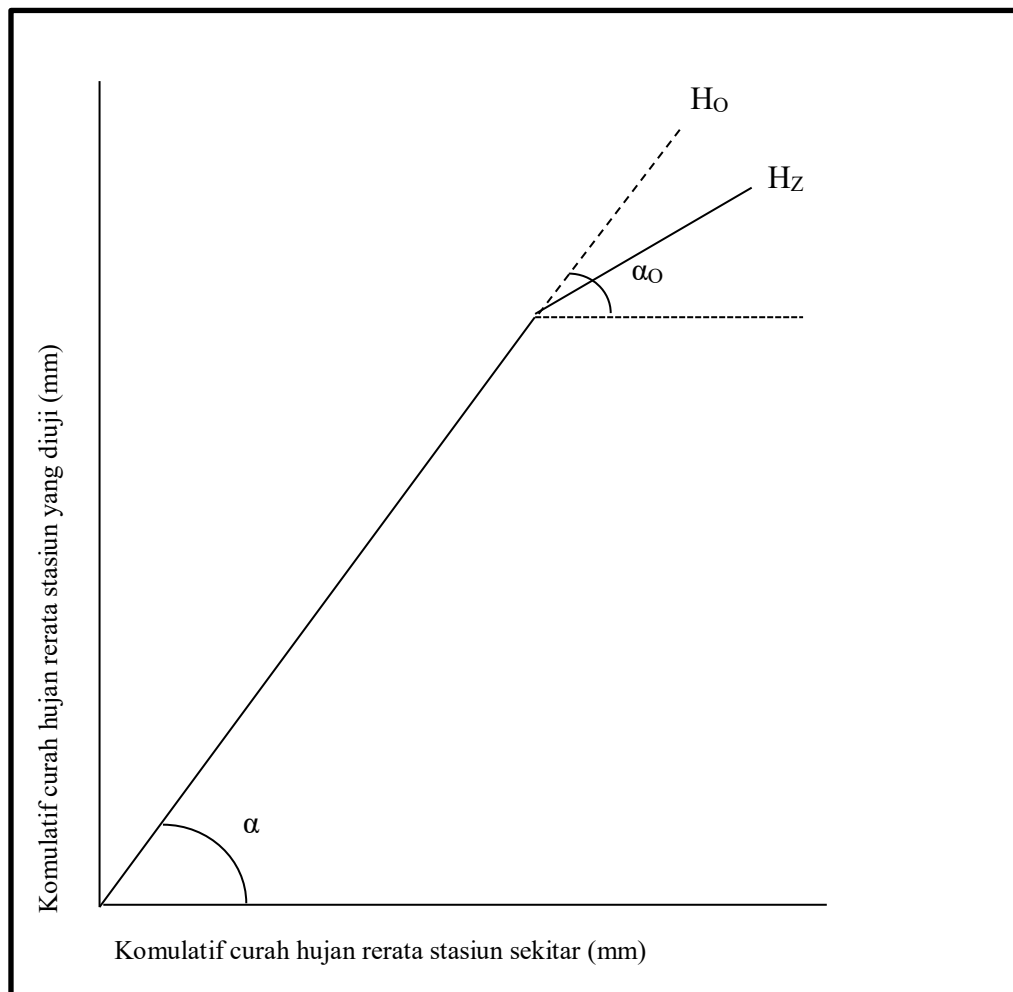
| Jumlah Data (n) | Kn |
|-----------------|-------|
| 10 | 2,036 |
| 11 | 2,088 |
| 12 | 2,134 |
| 13 | 2,175 |
| 14 | 2,213 |
| 15 | 2,247 |
| 16 | 2,279 |
| 17 | 2,309 |
| 18 | 2,335 |
| 19 | 2,361 |
| 20 | 2,385 |

Sumber : Chow, V. T. (1988:404)

2.4.2.2. Uji Konsistensi Data

Bila dalam suatu area terdapat beberapa alat pengukur curah hujan atau pencatat curah hujan, maka untuk mendapatkan nilai curah hujan daerah adalah dengan mengambil

harga rata-ratanya. Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rencana pemanfaatan air dan rencana pengendalian banjir adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah (*area rainfall*), bukan curah hujan pada suatu titik tertentu (*point rainfall*). Curah hujan ini disebut curah hujan wilayah/daerah dan dinyatakan dalam mm.



Gambar 2.8 Kurva Massa Ganda
Sumber: Indarto (1993:46)

Uji konsistensi data dilakukan terhadap data curah hujan harian maksimum yang dimaksudkan untuk mengetahui adanya penyimpangan data hujan, sehingga dapat disimpulkan apakah data tersebut layak dipakai dalam perhitungan analisis hidrologi atau tidak. Uji yang akan digunakan dalam studi ini adalah kurva massa ganda (*double mass curve*). Dengan cara ini dapat membandingkan curah hujan tahunan atau musiman akumulatif dari stasiun yang harus diteliti dengan harga-harga akumulatif curah hujan rata-rata dari suatu jaringan stasiun dasar yang bersesuaian.

Kurva atau lengkung massa ganda dimaksudkan untuk melakukan uji konsistensi data hujan dari pengujian tersebut dapat diketahui apakah terjadi perubahan lingkungan atau

perubahan cara menakar. Jika hasil uji menyatakan data hujan di suatu stasiun konsisten berarti pada daerah pengaruh stasiun tersebut tidak terjadi perubahan lingkungan dan tidak terjadi perubahan cara menakar selama pencatatan data tersebut dan sebaliknya. (Limantara 2010:46)

Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam uji konsistensi data:

$$P_{cv} = P \times \frac{Mc}{Ma} \quad (2-3)$$

dimana:

P_{cv} = curah hujan stasiun X pada waktu t setelah dikoreksi

P = data asli curah hujan stasiun X pada waktu tertentu

Mc = koreksi kemiringan kurva massa ganda

Ma = kemiringan asli kurva massa ganda

2.4.3. Curah Hujan Rerata Daerah

Curah hujan rerata daerah merupakan kebutuhan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir adalah curah hujan rerata di seluruh daerah yang bersangkutan, bukan curah hujan hujan pada satu stasiun. Dalam penjelasan ini terdapat 2 cara yang akan dijelaskan sebagai berikut (Soemarto, 1986:31):

2.4.3.1. Aritmatik

Tinggi rata-rata curah hujan didapatkan dengan mengambil harga rata-rata dari penakaran pada penakar hujan dalam daerah dengan persamaan sebagai berikut:

$$d = \frac{d_1+d_2+d_3+\dots+d_n}{n} \quad (2-4)$$

dengan:

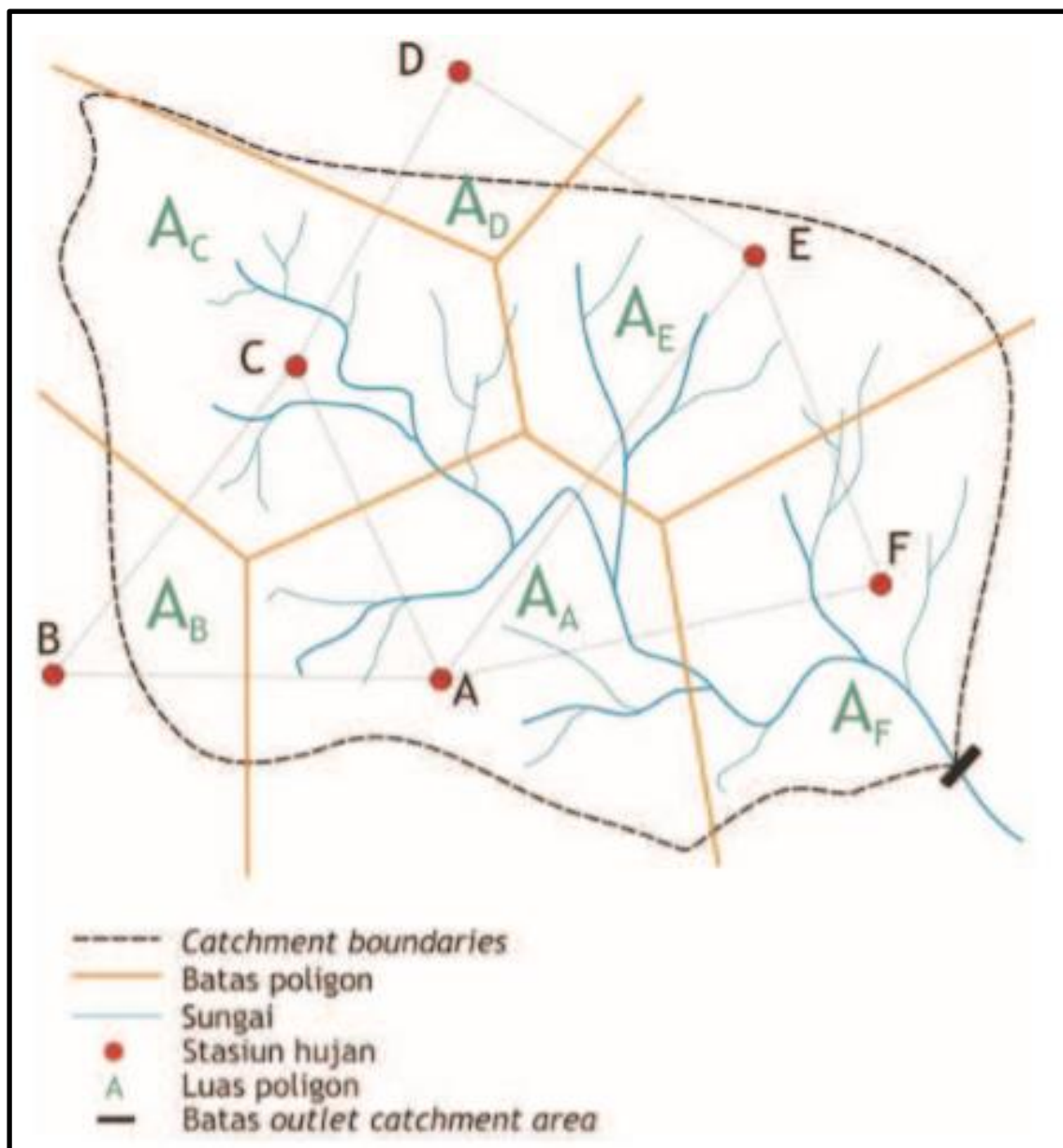
d = nilai curah hujan rerata

$d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ = nilai curah hujan pada stasiun hujan 1,2,3 ..., n

n = banyaknya stasiun hujan

2.4.3.2. Polygon Thiessen

Cara ini didasarkan atas dasar rata – rata timbang. Masing – masing stasiun hujan memiliki daerah pengaruh yang di bentuk dengan menggambarkan garis – garis sumbu tegak lurus terhadap garis penghubung antara stasiun hujan seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.9 *Polygon Thiessen*
Sumber: IMIDAP (2009:12)

Metode *Polygon Thiessen* cocok untuk menentukan tinggi hujan rata – rata apabila stasiun pencatat hujan tidak terlalu banyak, data dari stasiun hujan tersebut lengkap dan atau hujan yang terjadi tidak merata. Perhitungan analisa curah hujan rerata daerah dengan menggunakan persamaan *Polygon Thiessen* sebagai berikut:

$$R = P_1.d_1 + P_2.d_2 + \dots + P_n.d_n \quad \text{atau} \quad R = A_A \cdot A + A_B \cdot B + \dots A_n \cdot n \quad (2-5)$$

dengan:

R = curah hujan daerah (mm)

P = Koefisien Thiessen

n = jumlah data

d = tinggi hujan yang diukur di stasiun – stasiun pengukuran

2.4.4. Analisa Distribusi Curah Hujan

Distribusi frekuensi digunakan untuk memperoleh probabilitas besaran hujan rencana dalam berbagai periode kala ulang. Dasar perhitungan distribusi frekuensi, yaitu parameter yang berkaitan dengan analisis data yang meliputi rata-rata, simpangan baku, koefisien variasi, dan koefisien *skewness* (kepengcengan) ditunjukkan pada Tabel. 2.4 berikut ini:

Tabel 2.2 Parameter Statistik

| Parameter | Sampel |
|-----------------------|---|
| Rata-rata | $\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_1$ |
| Simpangan Baku | $s = \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2}$ |
| Koefisien Variasi | $Cv = \frac{s}{\bar{X}}$ |
| Koefisien Kepencengan | $Cs = \left[\frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)s^3} \right]$ |

Sumber: Soetopo, W., & Limantara, L. (2011:76)

dengan:

X = data

n = jumlah data

Analisa Frekuensi digunakan untuk memperhitungkan pendekatan agar mendapatkan hubungan antara intensitas hujan, frekuensi, dan waktu curah hujan. Dalam analisa frekuensi kali ini akan menjelaskan mengenai 2 (dua) metode Distribusi dengan penjelasan sebagai berikut:

2.4.4.1. Distribusi Gumbel

Untuk menghitung curah hujan rencana dengan metode yang digunakan distribusi Gumbel digunakan persamaan distribusi frekuensi empiris sebagai berikut (Soemarto, 1988:233-235):

$$R_T = \bar{R} + K_T S \quad (2-6)$$

$$K_T = \frac{(Y_t - Y_n)}{S_n} \quad (2-7)$$

$$y_t = - \left(0,834 + 2,303 \log \frac{t}{(t-1)} \right) \quad (2-8)$$

Hubungan antara periode ulang T dengan Y_T dapat dihitung dengan rumus:

Untuk $T \geq 20$, maka $Y = \ln T$

$$Y_t = -\ln \left(-\ln \frac{T_r - 1}{T} \right) \quad (2-9)$$

dengan:

R_T = Curah hujan untuk periode ulang T tahun

\bar{R} = Curah hujan harian maksimum rata-rata

S = Deviasi standar

S_n, Y_n = Faktor penurungan deviasi standar rata-rata sebagai fungsi dari jumlah data

K_T = Faktor frekuensi

Nilai Y_n, S_n , dan Y_t masing-masing dapat ditentukan berdasarkan pada Tabel 2.3, Tabel 2.4, dan Tabel 2.5 berikut:

Tabel 2.3 *Reduced Mean Y_n*

| N | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | 0,4952 | 0,4996 | 0,5035 | 0,5070 | 0,5100 | 0,5128 | 0,5157 | 0,5181 | 0,5202 | 0,5220 |
| 20 | 0,5236 | 0,5252 | 0,5268 | 0,5283 | 0,5296 | 0,5309 | 0,5320 | 0,5332 | 0,5343 | 0,5353 |
| 30 | 0,5362 | 0,5371 | 0,538 | 0,5388 | 0,5396 | 0,5403 | 0,5410 | 0,5418 | 0,5424 | 0,5436 |
| 40 | 0,5436 | 0,5442 | 0,5448 | 0,5453 | 0,5458 | 0,5463 | 0,5468 | 0,5473 | 0,5477 | 0,5481 |
| 50 | 0,5485 | 0,5489 | 0,5493 | 0,5497 | 0,5501 | 0,5504 | 0,5508 | 0,5511 | 0,5515 | 0,5518 |
| 60 | 0,5521 | 0,5524 | 0,5527 | 0,5530 | 0,5533 | 0,5535 | 0,5538 | 0,554 | 0,5543 | 0,5545 |
| 70 | 0,5548 | 0,5550 | 0,5552 | 0,5555 | 0,5557 | 0,5559 | 0,5562 | 0,5563 | 0,5565 | 0,5567 |
| 80 | 0,5569 | 0,5570 | 0,5572 | 0,5574 | 0,5576 | 0,5578 | 0,5580 | 0,5581 | 0,5583 | 0,5585 |
| 90 | 0,5586 | 0,5587 | 0,5589 | 0,5591 | 0,5592 | 0,5593 | 0,5595 | 0,5596 | 0,5598 | 0,5599 |
| 100 | 0,5600 | 0,5602 | 0,5603 | 0,5604 | 0,5606 | 0,5607 | 0,5608 | 0,5609 | 0,5610 | 0,5611 |

Sumber: Soetopo, W., & Limantara, L. (2011:77)

Tabel 2.4 *Reduced Standard Deviation S_n*

| N | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | 0,9496 | 0,9676 | 0,9833 | 0,9971 | 1,0095 | 1,0206 | 1,0316 | 1,0411 | 1,0493 | 1,0565 |
| 20 | 1,0628 | 1,0696 | 1,0754 | 1,0811 | 1,0864 | 1,0915 | 1,0961 | 1,1004 | 1,1047 | 1,108 |
| 30 | 1,1124 | 1,1159 | 1,1193 | 1,1226 | 1,1255 | 1,1285 | 1,1313 | 1,1339 | 1,1363 | 1,1388 |
| 40 | 1,1413 | 1,1436 | 1,1458 | 1,148 | 1,1499 | 1,1519 | 1,1538 | 1,1557 | 1,1574 | 1,159 |
| 50 | 1,1607 | 1,1623 | 1,1638 | 1,1658 | 1,1667 | 1,1681 | 1,1696 | 1,1708 | 1,1721 | 1,1734 |
| 60 | 1,1747 | 1,1759 | 1,177 | 1,1782 | 1,1793 | 1,1803 | 1,1814 | 1,1824 | 1,1834 | 1,1844 |
| 70 | 1,1854 | 1,1863 | 1,1873 | 1,1881 | 1,189 | 1,1898 | 1,1906 | 1,1915 | 1,1923 | 1,193 |
| 80 | 1,1938 | 1,1945 | 1,1953 | 1,1959 | 1,1967 | 1,1973 | 1,198 | 1,1987 | 1,1994 | 1,2001 |
| 90 | 1,2007 | 1,2013 | 1,202 | 1,2026 | 1,2032 | 1,2038 | 1,2044 | 1,2049 | 1,2055 | 1,206 |
| 100 | 1,2065 | 1,2069 | 1,2073 | 1,2077 | 1,2081 | 1,2084 | 1,2087 | 1,209 | 1,2093 | 1,2096 |

Sumber: Soetopo, W., & Limantara, L. (2011:77)

Tabel 2.5 *Reduced Variate Y_t*

| Periode | |
|----------------------|----------------|
| Ulang, Tr (Tahun) | Y _t |
| 2 | 0,3668 |
| 5 | 1,5004 |
| 10 | 2,251 |
| 20 | 2,9709 |
| 25 | 3,1993 |
| 50 | 3,9028 |
| 75 | 4,3117 |
| 100 | 4,6012 |
| 200 | 5,2969 |
| 250 | 5,5206 |
| 500 | 6,2149 |
| 1000 | 6,9087 |
| 5000 | 8,5188 |
| 10000 | 9,2121 |

Sumber: Soetopo, W., & Limantara, L. (2011:77)

2.4.4.2. Distribusi Log Pearson III

Terdapat 12 buah distribusi Pearson, tapi hanya distribusi Log Pearson III yang digunakan dalam analisa hidrologi. Tidak ada syarat khusus untuk distribusi ini, disebut Log Pearson III karena memperhitungkan 3 parameter statistik, yaitu harga rata-rata (*mean*), pengimpangan baku (*standard deviation*), koefisien kepeccengan (*skewness*). (Limantara, 2010:46)

Berikut merupakan tahapan atau prosedur dalam perhitungan Distribusi Log Pearson III:

- a) Mengubah data hujan sebanyak n buah (X_1, X_2, \dots, X_n) menjadi $\text{Log } X_1, \text{Log } X_2, \dots, \text{Log } X_n$,

Menghitung harga rata-rata: $\overline{\text{Log } X} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Log } X_i}{n}$, (2-10)

Menghitung harga simpangan baku (dalam log):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log } X_i - \overline{\text{Log } X})^2}{n-1}}, \quad (2-11)$$

Menghitung koefisien kepeccengan (dalam log): $C_s = \frac{n \sum (\text{Log } X_i - \overline{\text{Log } X})^3}{(n-1)(n-2)S^3}$, (2-12)

- b) Menghitung nilai ekstrim: $\overline{\text{Log } X} = \text{Log } X + G * S$, (2-13)

G = lihat tabel, fungsi dari C_s (koefisien kepeccengan) dan probabilitas (kala ulang),

- c) Mencari antilog dari $\text{Log } X$ untuk mendapatkan hujan (debit banjir) rancangan yang dikehendaki.

Tabel 2.6 Harga K untuk Distribusi Log Pearson III

| Kepeccengan (C_s) | Periode Ulang Tahun | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1,0101 | 1,25 | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| | Peluang (%) | | | | | | | |
| | 99,0001 | 80 | 50 | 20 | 10 | 4 | 2 | 1 |
| 3,0 | -0,667 | -0,636 | 0,396 | 0,420 | 1,180 | 2,278 | 3,151 | 4,051 |
| 2,8 | -0,714 | -0,666 | 0,384 | 0,460 | 1,210 | 2,275 | 3,114 | 3,973 |
| 2,6 | -0,769 | -0,696 | 0,368 | 0,499 | 1,238 | 2,267 | 3,071 | 3,889 |
| 2,4 | -0,832 | -0,725 | 0,351 | 0,537 | 1,262 | 2,256 | 3,023 | 3,800 |
| 2,2 | -0,805 | -0,752 | 0,330 | 0,574 | 1,284 | 2,240 | 2,970 | 3,705 |
| 2,0 | -0,990 | -0,777 | 0,307 | 0,609 | 1,302 | 2,219 | 2,920 | 3,605 |

Lanjutan Tabel 2.6 Harga K untuk Distribusi Log Pearson III

| | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,8 | -1,087 | -0,799 | 0,282 | 0,643 | 1,318 | 2,193 | 2,848 | 3,499 |
| 1,6 | -1,197 | -0,817 | 0,254 | 0,675 | 1,329 | 2,163 | 2,780 | 3,388 |
| 1,4 | -1,318 | -0,832 | 0,225 | 0,705 | 1,337 | 2,128 | 2,706 | 3,271 |
| 1,2 | -1,449 | 0,844 | 0,195 | 0,732 | 1,340 | 2,087 | 2,697 | 3,149 |
| 1,0 | -1,588 | -0,852 | 0,164 | 0,758 | 1,340 | 2,043 | 2,542 | 3,022 |
| 0,8 | -1,733 | -0,856 | 0,132 | 0,780 | 1,336 | 1,993 | 2,453 | 2,891 |
| 0,6 | -1,880 | -0,857 | 0,099 | 0,800 | 1,328 | 1,939 | 2,359 | 2,755 |
| 0,4 | -2,029 | -0,855 | 0,066 | 0,816 | 1,317 | 1,880 | 2,261 | 2,615 |
| 0,2 | -2,178 | -0,850 | 0,033 | 0,830 | 1,301 | 1,818 | 2,159 | 2,472 |
| 0,0 | -2,326 | -0,842 | 0,000 | 0,842 | 1,282 | 1,751 | 2,051 | 2,326 |
| -0,2 | -2,472 | -0,830 | -0,033 | 0,850 | 1,258 | 1,680 | 1,945 | 2,178 |
| -0,4 | -2,615 | -0,816 | -0,066 | 0,855 | 1,231 | 1,606 | 1,834 | 2,029 |
| -0,6 | -2,755 | -0,800 | -0,099 | 0,857 | 1,200 | 1,528 | 1,720 | 1,880 |
| -0,8 | -2,891 | -0,780 | -0,132 | 0,856 | 1,166 | 1,448 | 1,606 | 1,733 |
| -1,0 | -3,022 | -0,758 | -0,164 | 0,852 | 1,128 | 1,266 | 1,492 | 1,588 |
| -1,2 | -3,149 | -0,732 | -0,195 | 0,844 | 1,086 | 1,282 | 1,379 | 1,449 |
| -1,4 | -3,271 | -0,705 | -0,225 | 0,832 | 1,041 | 1,198 | 1,270 | 1,318 |
| -1,6 | -3,388 | -0,675 | -0,254 | 0,817 | 0,994 | 1,116 | 1,166 | 1,197 |
| -1,8 | -3,499 | -0,643 | -0,282 | 0,799 | 0,945 | 1,035 | 1,069 | 1,087 |
| -2,0 | -3,605 | -0,609 | -0,307 | 0,777 | 0,895 | 0,959 | 0,980 | 0,990 |
| -2,2 | -3,705 | -0,574 | -0,330 | 0,752 | 0,844 | 0,888 | 0,900 | 0,832 |
| -2,4 | -3,800 | -0,537 | -0,351 | 0,725 | 0,795 | 0,823 | 0,830 | 0,805 |
| -2,6 | -3,889 | -0,499 | -0,368 | 0,696 | 0,747 | 0,764 | 0,768 | 0,769 |
| -2,8 | -3,973 | -0,460 | -0,384 | 0,666 | 0,702 | 0,712 | 0,714 | 0,714 |
| -3,0 | -4,051 | -0,420 | -0,396 | 0,636 | 0,660 | 0,666 | 0,666 | 0,667 |

Sumber: Soetopo, W., & Limantara, L. (2011:80)

2.4.4.3. Distribusi Log Normal

Distribusi Log Normal merupakan lah khusus dari Log Pearson III, yaitu dengan koefisien (skewness): $C_s = 0$ (Limantara, 2010:64)

2.4.5. Uji Keselarasan Distribusi Frekuensi

Untuk menguji diterima atau tidaknya distribusi tersebut, maka dilakukan pengujian simpangan vertikal, yaitu uji *Chi – Square* dan pengujian simpangan horizontal, yaitu *Smirnov – Kormogorov*.

2.4.5.1. Uji *Chi – Square*

Uji ini dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Agar distribusi frekuensi yang dipilih diterima, maka harga $X^2_{hitung} < X^2_{critis}$. Harga X^2_{critis} dapat dilihat dari Tabel 2.7 yang tergantung pada taraf signifikan (α) dan derajat kebebasan (dk).

Persamaan yang digunakan dalam Uji *Chi – Square*, yaitu:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i + E_i)^2}{E_i} \quad (2-14)$$

dengan:

X^2 = harga chi – square terhitung

O_i = jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok ke-i

E_i = jumlah nilai teoritis pada sub kelompok ke-1

N = jumlah data

Dari hasil pengamatan yang didapat dicari penyimpangannya dengan *Chi – Square* kritis yang bernilai paling kecil. Untuk suatu nilai nyata tertentu (level of signification), yang sering diambil adalah 5 %. Derajat kebebasan ini secara umum dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut (Soewarno, 1995:195):

$$Dk = K - (P+1) \quad (2-15)$$

dengan:

Dk = Derajat kebebasan

K = Koefisien

P = Nilai untuk distribusi Metode Gumbel, P = 1

Adapun kriteria penialaian hasilnya adalah sebagai berikut :

- Jika peluang lebih dari 5% maka persamaan distribusi teoritis yang digunakan dapat diterima.
- Jika peluang lebih kecil dari 1% maka persamaan distribusi teoritis yang digunakan dapat diterima.
- Jika peluang 1% - 5% maka tidak mungkin mengambil keputusan, perlu penambahan data.

Tabel 2.7 Distribusi Chi Square

| Derajat Bebas (Dk) | 20% | 10% | 5% | 1% | 0,1% |
|-------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 1,642 | 2,706 | 3,841 | 6,635 | 10,827 |
| 2 | 3,219 | 4,605 | 5,991 | 9,210 | 13,815 |
| 3 | 4,642 | 6,251 | 7,815 | 11,345 | 16,268 |
| 4 | 5,989 | 7,779 | 9,488 | 13,277 | 18,465 |
| 5 | 7,289 | 9,236 | 11,070 | 15,086 | 20,517 |
| 6 | 8,558 | 10,645 | 12,592 | 16,812 | 22,457 |
| 7 | 9,803 | 12,017 | 14,067 | 18,475 | 24,322 |
| 8 | 11,030 | 13,362 | 15,507 | 20,090 | 26,125 |
| 9 | 12,242 | 14,987 | 16,919 | 21,666 | 27,877 |
| 10 | 13,442 | 15,987 | 18,307 | 23,209 | 29,588 |
| 11 | 14,631 | 17,275 | 19,675 | 24,725 | 31,264 |
| 12 | 15,812 | 18,549 | 21,026 | 26,217 | 32,909 |
| 13 | 16,985 | 19,812 | 22,362 | 27,688 | 34,528 |
| 14 | 18,151 | 21,064 | 23,685 | 29,141 | 36,123 |
| 15 | 19,311 | 22,307 | 24,996 | 30,578 | 37,697 |
| 16 | 20,465 | 23,542 | 26,296 | 32,000 | 39,252 |
| 17 | 21,615 | 24,769 | 27,587 | 33,409 | 40,790 |
| 18 | 22,760 | 25,989 | 28,869 | 34,805 | 42,312 |
| 19 | 23,900 | 27,204 | 30,144 | 36,191 | 43,820 |
| 20 | 25,038 | 28,412 | 31,410 | 37,566 | 45,315 |

Sumber : Soemarto (2010:84)

2.4.5.2. Uji *Smirnov – Kolmogorov*

Uji Smirnov – Kolmogorov adalah uji distribusi terhadap penyimpangan data kearah horizontal untuk mengetahui suatu data sesuai dengan jenis sebaran teoritis yang dipilih atau tidak. Uji Smirnov Kolmogorov sering disebut juga uji kecocokan non-parametric, Karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu. Pengujian dilakukan dengan membandingkan probabilitas tiap data, antara sebaran empiris dan sebaran teoritis yang dinyatakan dalam Δ . Harga Δ terbesar ($\Delta maks$) dibandingkan dengan $\Delta kritis$ (dari Tabel 2.8) dengan tingkat keyakinan (α) tertentu. Distribusi dianggap sesuai jika: $\Delta maks < \Delta kritis$.

Uji keselarasan Smirnov-Kolmogorof, sering juga disebut uji keselarasan non parametrik (*non parametrik test*), karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu. Prosedurnya adalah sebagai berikut :

Rumus yang dipakai :

$$\alpha = \frac{P_{max}}{P} - \frac{P(x)}{\Delta_{cr}} \quad (2-16)$$

dimana:

α = tingkat keyakinan

P_{max} = probabilitas maksimum

P = probabilitas

Δ_{cr} = simpanan kritis (Tabel 2.8)

Adapun prosedur penggunaan uji ini adalah sebagai berikut:

- a. Urutkan data (dari besar ke kecil atau sebaliknya) dan tentukan besarnya peluang dari masing-masing data tersebut

$$X_1 = P (X_1)$$

$$X_2 = P (X_2)$$

$$X_3 = P (X_3), \text{ dan seterusnya}$$

- b. Urutkan nilai masing-masing peluang teoritis dari hasil penggambaran data atau persamaan distribusinya.

$$X_1 = P' (X_1)$$

$$X_2 = P' (X_2)$$

$$X_3 = P' (X_3), \text{ dan seterusnya}$$

- c. Dari kedua nilai peluang diatas, tentukan selisih terbesarnya antar peluang pengamatan dengan peluang teoritis.

$$\Delta_{maks} = |S (X_n) - P (X_n)| \quad (2-17)$$

dimana:

Δ_{maks} = selisih maksimum antara peluang empiris dan teoritis

$S (X_n)$ = peluang empiris

$P (X_n)$ = peluang teoritis

- d. Berdasarkan Tabel 2.8 nilai kritis Δ_{cr}

Tabel 2.8 Nilai Kritis Δ_{cr} untuk Uji Smirnov Kolmogorof

| N | Derajat Kepercayaan (α) | | | |
|-----|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,01 |
| 5 | 0,45 | 0,51 | 0,56 | 0,67 |
| 10 | 0,32 | 0,37 | 0,41 | 0,49 |
| 15 | 0,27 | 0,30 | 0,34 | 0,40 |
| 20 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,36 |
| 25 | 0,21 | 0,24 | 0,27 | 0,32 |
| 30 | 0,19 | 0,22 | 0,24 | 0,29 |
| 35 | 0,18 | 0,20 | 0,23 | 0,27 |
| 40 | 0,17 | 0,19 | 0,21 | 0,25 |
| 45 | 0,16 | 0,18 | 0,20 | 0,24 |
| 50 | 0,15 | 0,17 | 0,19 | 0,23 |
| >50 | $\frac{1,07}{\sqrt{N}}$ | $\frac{1,22}{\sqrt{N}}$ | $\frac{1,36}{\sqrt{N}}$ | $\frac{1,63}{\sqrt{N}}$ |

Sumber: Suwarno, (1995:199)

dengan:

N = jumlah data

2.4.6. Analisa Curah Hujan Rancangan (*Mononobe*)

Karakteristik hujan meliputi tebal hujan, intensitas hujan dan durasi. Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada suatu kurun waktu. Analisa intensitas curah hujan dapat diproses dari data curah hujan yang terjadi pada masa lampau. Hujan umumnya dibedakan menjadi lima tingkatan sesuai intensitasnya seperti yang disajikan pada Tabel 2.9 berikut ini.

Tabel 2.9 Keadaan Hujan dan Intensitas Hujan

| Keadaan Hujan | Intensitas Hujan (mm) | |
|---------------------|-----------------------|----------|
| | 1 Jam | 24 Jam |
| Hujan sangat ringan | < 1 | < 5 |
| Hujan ringan | 1 - 5 | 5 - 20 |
| Hujan normal | 5 - 10 | 20 - 50 |
| Hujan lebat | 10 - 20 | 50 - 100 |
| Hujan sangat lebat | > 20 | > 100 |

Sumber: Triadmojo, B. (2008:20)

Tujuan analisa curah hujan rancangan adalah untuk memperkirakan persentase dari hujan total yang turun dalam tiap jam. Hujan jam-jaman diproses dan dirata-ratakan. Metode yang dapat digunakan salah satunya dengan cara Mononobe dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_T = \frac{R_{24}}{t} \left(\frac{t}{T} \right)^{2/3} \quad (2-18)$$

dengan:

I_T = intensitas curah hujan dalam T jam (mm/jam)

R_{24} = curah hujan harian (mm)

T = waktu hujan dari awal sampai jam ke t (jam)

t = lama curah hujan (jam)

2.4.7. Analisa Debit Banjir Rancangan

Debit banjir rancangan (*design flood*) merupakan besarnya debit yang secara statistik akan disamai atau dilampaui sekali dalam kala ualng tertentu. Sebagai contoh: Q_5 , Q_{10} , Q_{25} , Q_{100} dan seterusnya. Dengan demikian, Q_{100} (banjir rancangan 100 tahun) artinya debit yang secara statistik akan terjadi sekali dalam 100 tahun dengan peluang kejadian tiap tahun adalah 1/100.

Kala ualng (*return period*) merupakan waktu hipotek, yang mana hujan atau debit dengan suatu besaran tertentu akan disamai atau dilampaui sekali dalam waktu jangka tertentu. Jadi, tidak ada pengertian bahwa kejadian tersebut akan berulang secara teratur setiap kalaulang tertentu.

Ada 2 (dua) jenis data yang secara umum bisa dipakai untuk menentukan banjir rancangan, yaitu data debit dan data hujan. Masing-masing data digunakan mempunyai spesifikasi baik mengenai input, autput maupun proses yang dipakai. Untuk proses analisa data hujan menggunakan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS).

Berdasarkan cara-cara untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan, diperlukan serangkaian data antara lain data tinggi muka air (rekaman AWLR), data pengukuran debit, data hujan harian dan data hujan jam-jama. Data tersebut seringkali diperoleh atau bahkan tidak tersedia.

Untuk membuat hidrograf banjir pada sungai-sungai yang tidak ada atau sedikit sekali dilakukan pengamatan (observasi) hidrograf banjirnya, maka perlu dicari karakteristik atau parameter daerah pengaliran tersebut terlebih dahulu. Karakteristik atau parameter tersbut

antara lain waktu untuk mencapai puncak hidrograf, lebar dasar, luas, kemiringan, panjang alur terpanjang, koefisien limpasan dan sebagainya. Untuk sungai-sungai yang tidak mempunyai hidrograf-hidrograf sintetis yang telah dikembangkan di negara-negara lain, yang parameter-parameternya harus disesuaikan terlebih dahulu dengan karakteristik daerah pengaliran yang ditinjau.

Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) yang telah dikembangkan oleh para pakar antara lain HSS Snyder, HSS Nakayasu, HSS SCS, HSS Gama I, HSS Limantara dan lain-lain. Hidrograf Satuan Sintetis merupakan suatu cara untuk memperkirakan penggunaan konsep hidrograf satuan dalam suatu perencanaan yang tidak tersedia pengukuran-pengukuran langsung mengenai hidrograf banjir. (Limantara, 2010)

2.4.7.1. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu

Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu, yang asalnya dari Negara Jepang. Parameter yang diperlukan dalam analisa menggunakan HSS Nakayasu antara lain (Limantara, 2010:147):

1. Tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak hidrograf (*Time to Peak Magnitude*), T_p
2. Tenggang waktu dari titik berat hujan sampai titik berat hidrograf (*Time Long*), t_g
3. Tenggang waktu hidrograf (*Time Base of Hydrograph*), T_b
4. Luas daerah pengaliran (*Catchment Area*), A
5. Panjang alur sungai utama terpanjang (*Length of The Longest Channel*), L
6. Koefisien pengaliran (*Run off Coefficient*), C

Rumus penunjang yang digunakan:

$$T_p = t_g + 0,8 t_r \quad (2-19)$$

$$T_{0,3} = \alpha t_g \quad (2-20)$$

dengan:

T_p = tenggang waktu (*time long*) dari permulaan hujan sampei puncak banjir (jam)

t_g = waktu konsentrasi hujan (jam)

$T_{0,3}$ = waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari debit puncak sampai menjadi 30% dari debit unak (jam)

Catatan menentukan t_g :

$$\text{Jika } L \geq 15 \text{ km, maka } t_g = 0,40 + 0,058 L \quad (2-21)$$

$$L < 15 \text{ km, maka } t_g = 0,21 L^{0,7} \quad (2-22)$$

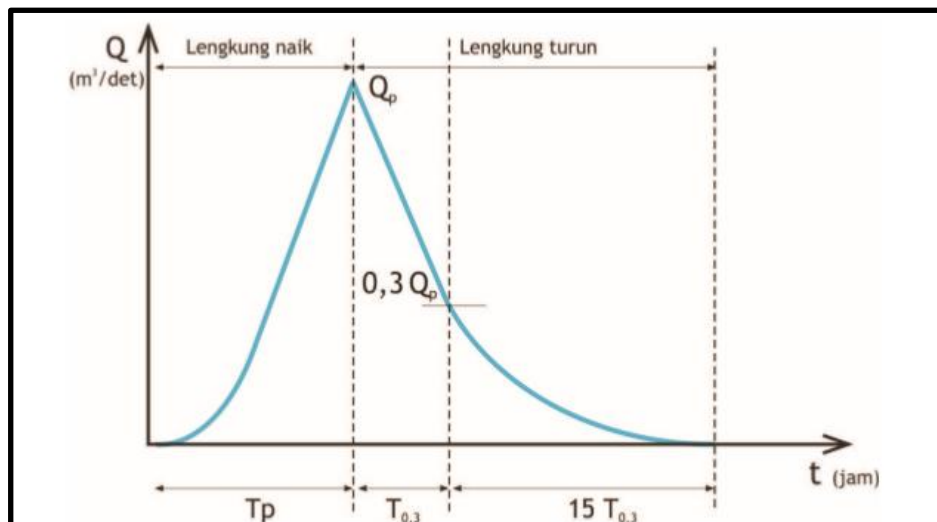
dengan:

α = parameter hidrograf

$t_r = 0,5 \times t_g$ sampai $1 \times t_g$

Catatan:

- Daerah pengaliran biasa: $\alpha = 2$
- Bagian naik hidrograf yang lambat dan bagian menurun yang cepat: $\alpha = 1,5$
- Bagian naik hidrograf yang cepat dan bagian menurun yang lambat: $\alpha = 3$
- Menurut pengalaman dan penelitian yang dilakukan, untuk mendapatkan hasil yang akurat dan sesuai dengan kondisi karakteristik DAS di Indonesia, perlu melakukan kalibrasi: α tersebut.



Gambar 2.10 HSS Metode Nakayasu
Sumber: IMIDAP (2009 :43)

Debit Puncak Banjir:

$$Q_p = \frac{A \cdot R_o}{3,6 (0,3T_p + T_{0,3})} \quad (2-23)$$

dengan:

Q_p = Q_{maks} , merupakan debit puncak banjir (m^3 / det)

A = luas DAS (sampai ke *outlet*) (km^2)

R_o = hujan satuna (mm)

T_p = tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

$T_{0,3}$ = waktu yang diperlukan untuk penurunan debit, dari debit puncak sampai menjadi 30% dari debit puncak (jam)

2.4.7.2. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Gama I

Satuan Hidrograf Sintetik (HSS) Gama I dikembangkan oleh Dr. Sri Harto pada tahun 1980-an. Gama I dibentuk dengan tiga komponen dasar, yaitu waktu naik (T_R), debit puncak (Q_p) dan waktu dasar (T_B) dengan uraian sebagai berikut (Montarcih, 2010):

1. Waktu Naik

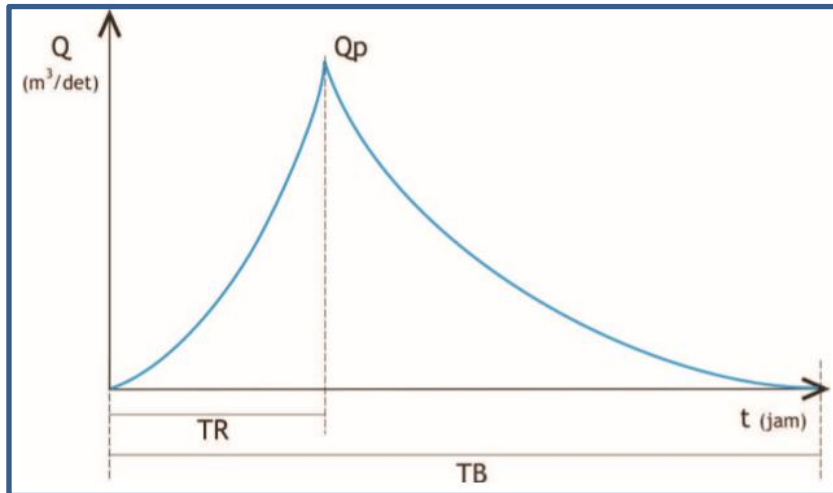
$$TR = 0,43 \left(\frac{L}{100SF} \right)^2 + 1,0665SIM + 1,2775 \quad (2-24)$$

2. Debit Puncak

$$Qp = 0,1836A^{0,5886}JN^{0,2381}TR^{-0,4008} \quad (2-25)$$

3. Waktu Dasar

$$TB = 27,4132TR^{0,1457}S^{-0,0966}SN^{0,7344}RUA^{0,2574} \quad (2-26)$$



Gambar 2.11 HSS Metode Gama I
Sumber: IMIDAP (2009:42)

Hujan efektif didapat dengan cara metode PHI Indeks yang dipengaruhi luas fingsi daerah tangkapan air, dan frekuensi sumber (SN) dirumuskan sebagai berikut:

$$\emptyset = 10,4903 - 3,589 \cdot 10^{-6} A^2 + 1,6985 \cdot 10^{-13} \left(\frac{A}{SN} \right)^4 \quad (2-27)$$

dengan:

R = curah hujan (mm)

TR = waktu naik (jam)

L = panjang sungai (km)

SF = faktor sumber yaitu perbandingan jumlah panjang sungai tingkat 1 dengan semua tingkat

SIM = faktor simetri ditetapkan sebagai hasil kali antara faktor lebar (WF) dengan luas relatif DAS sebelah hulu (RUA)

WF = faktor lebar adalah perbandingan antara lebar DPS yang diukur dari titik di sungai yang berjarak $\frac{3}{4}L$ dan lebar DPS yang diikuti dari titik yang berjarak $\frac{1}{4}L$ dari titik tempat pengukuran

JN = jumlah pertemuan sungai

- TB = waktu dasar (jam)
 S = landai sungai rata-rata
 SN = frekuensi sumber yaitu perbandingan antara jumlah segmen sungai-sungai tingkat 1 dengan jumlah sungai semua tingkat.
 RUA = luas DPS sebelah hulu (km²)
 Ø = indeks (mm/jam)
 A = luas daerah tangkapan air (km²)
 SN = frekuensi sumber

2.4.7.3. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Snyder

Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Snyder, yang asalnya dari Negara USA tahun 1938.

Parameter yang diperlukn dalam analisis HSS Snyder antara lain (Limantara, 2010:156):

1. Luas DAS (A)
2. Panjang sungai utama (L)
3. Jarak antara titik berat DAS dengan outler (Lc)

Rumus HSS Snyder:

$$tp = Ct \cdot (L \cdot Lc)^n \quad (2-28)$$

dengan:

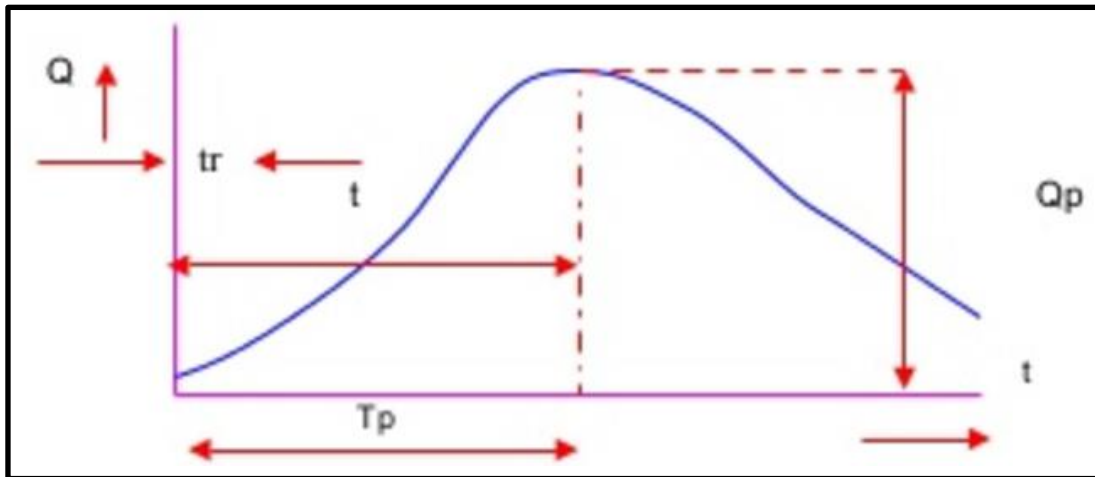
- L = panjang aliran sungai utama (km)
 Lc = panjang aliran utama dari titik berat DAS ke pelepasan DAS (km)
 tp = waktu mulai titik berat hujan sampai debit puncak (jam)
 Ct = koefisien bergantung pada karakteristik DAS $\approx 1,10 - 1,14$
 $Ct \approx 0,03$

$$Qp = 2,78 \times \frac{Cp \cdot A}{tp} \quad \text{dan} \quad Tb = \frac{72+3 Tp}{24} \quad (2-29)$$

$$Qp = 0,278 \times \frac{Cp}{trp} \quad \text{dan} \quad Qp = qp \times A \quad (2-30)$$

dengan:

- Qp = debit puncak (m³/dt/mm)
 qp = puncak hidrograf satuan (m³/dt/mm/km²)
 Cp = koefisien bergantung pada karakteristik DAS $\approx 0,58 - 0,69$
 Tp = waktu mulai titik berat hujan sampai debit puncak (jam)
 A = luas DAS (km²)
 Tp = waktu mencapai puncak binjir (jam)
 Tb = waktu dasar hidrograf (jam)



Gambar 2.12 HSS Metode Snyder
Sumber: IMIDAP (2009 :45)

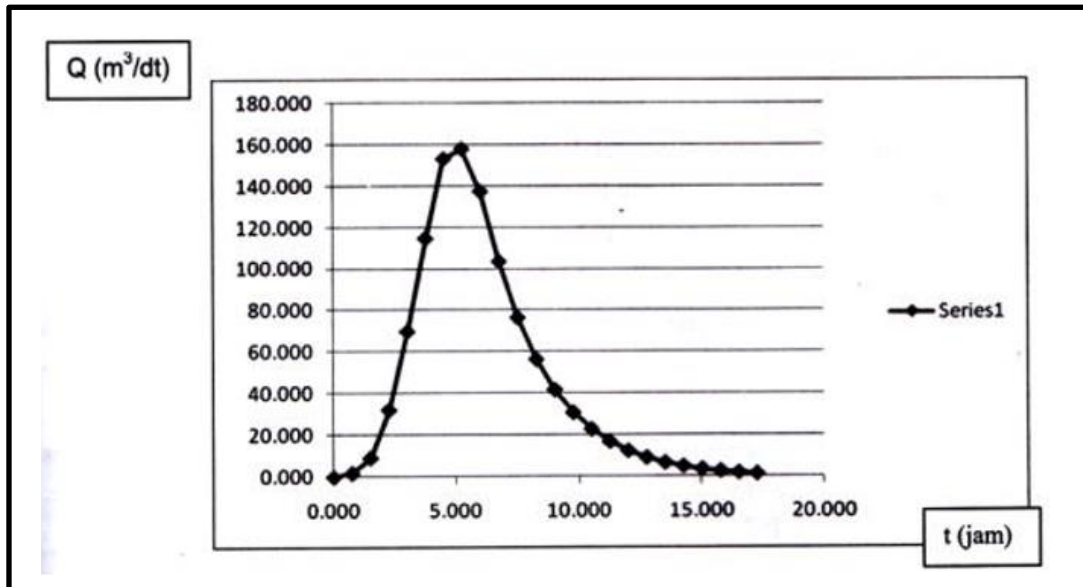
Catatan:

Menurut pengalaman dan penelitian yang telah dilakukan, untuk mendapatkan hasil yang akurat dan sesuai dengan kondisi karakteristik DAS Indonesia, perlu melakukan kalibrasi parameter: C_t dan C_p . (Limantara, 2010:157)

2.4.7.4. Metode Hidrograf Satuan Sintetis Limantara

Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Limantara, yang asalnya dari Indonesia, ditemukan oleh Prof. Lily Montarich Limantara, tahun 2006. Parameter DAS yang dipakai ada 5 (lima) antara lain (Limantara, 2010):

- a. Luas DAS (A)
- b. Panjang sungai utama (L)
- c. Panjang sungai diukur sampai titik terdekat dengan titik berat DAS (L_c)
- d. Kemiringan sungai (S)
- e. Koefisien kekasaran (n)



Gambar 2.13 HSS Metode Limantara
Sumber: Limantara (2010:74)

Persamaan HSS Limantara:

a. Persamaan Debit Puncak

$$Q_p = 0,042 \cdot A^{0,451} \cdot L^{0,497} \cdot L_c^{0,356} \cdot S^{-0,131} \cdot n^{0,168} \quad (2-31)$$

dengan:

Q_p = debit puncak banjir hidrograf satuan ($m^3/dt/mm$)

A = luas DAS (km^2)

L = panjang sungai utama (km)

L_c = panjang sungai dari outlet sampai titik terdekat dengan titik berat DAS (km)

S = kemiringan sungai utama

n = koefisien kekasaran DAS

0,042 = koefisien untuk konfersi satuan ($m^{0,25}/dt$)

b. Persamaan Kurva Naik:

$$Q_n = Q_p \cdot [(t/T_p)]^{1,107} \quad (2-32)$$

Q_n = debit pada persamaan kurva naik ($m^3/dt/mm$)

Q_p = debit puncak hidrograf satuan ($m^3/dt/mm$)

t = waktu hidrograf (jam)

T_p = waktu naik hidrograf atau waktu mencapai puncak hidrograf (jam)

c. Persamaan Kurva Turun:

$$Q_t = Q_p \cdot 10^{0,175(T_p - t)} \quad (2-33)$$

2.4.8.1. Evapotranspirasi

Evapotranspirasi merupakan laju penguapan dari permukaan tanah. Beberapa metode evapotranspirasi antara lain Thornwhite, Balnney Criddle, Hargeaves dan Penman. Metode-metode tersebut berada dalam macam data yang digunakan untuk perhitungan. Analisis evapotranspirasi di Indonesia umumnya menggunakan Penman yang sudah direkomendasikan FAO (1970) karena menghasilkan perhitungan yang lebih akurat dimana cakupan data meteorologi yang digunakan paling lengkap di antara metode-metode yang lain.

Perhitungan evapotranspirasi dengan metode Penman memerlukan parameter suhu udara, penyinaran matahari, kelembaban udara dan kecepatan angin, penyinaran matahari, kelembaban udara dan kecepatan angin.

Data terukur yang digunakan pada Metode Penman adalah suhu rerata bulanan ($^{\circ}\text{C}$), kelembaban relatif bulanan rerata (RH : %) kecerahan matahari bulanan (n/N : %), kecepatan angin bulanan rerata (U : m/detik), letak lintang daerah dan angka koreksi (c)

$$E_{to} = c \cdot E_{To}^* \quad (2-34)$$

$$E_{To}^* = w \cdot (0,75 R_s - R_{n1}) + (1-w)f(U)(\epsilon d) \quad (2-35)$$

dengan:

w = faktor pengaruh suhu dan elevasi ketinggian daerah

R_s = radiasi gelombang pendek yang diterima bumi (mm/hr)

$$R_s = (0,25 + 0,54 \frac{n}{N}) \cdot R_r$$

$\frac{n}{N}$ = kecerahan matahari (%)

R_r = radiasi gelombang pendek yang memenuhi batas luar atmosfer

$F(U)$ = fungsi kecepatan angin ketinggian 2 m

$$= 0,27 \cdot (1 + 0,864 \cdot U) \quad (2-36)$$

$$R_{n1} = f(t) \cdot f(\epsilon d) \cdot f(\frac{n}{N}) \quad (2-27)$$

dengan:

$f(t)$ = fungsi suhu: $\sigma \cdot T_a^4$ (Tabel Penman)

$$f(\epsilon d) = \text{fungsi tekanan uap} = 0,34 - 0,44 \sqrt{\epsilon d} \quad (2-38)$$

$$f(\frac{n}{N}) = \text{fungsi kecerahan matahari} = 0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \quad (2-39)$$

$(rd - \epsilon d)$ = perbedaan tekanan uap jenuh dengan tekanan uap sebenarnya

$$\epsilon d = \epsilon d \cdot RH \quad (2-40)$$

rd = tekanan uap sebenarnya = $f(t)$

RH = kelembaban relatif (%)

C = angka koreksi

Tabel 2.10 Harga RY untuk Indonesia (5° LU S/D 10° LS)

| Bulan | LU | | | 0 | LS | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 4 | 2 | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Jan | 13,0 | 14,3 | 14,7 | 15,0 | 15,3 | 15,5 | 15,8 | 16,1 | 16,1 |
| Feb | 14,0 | 15,0 | 15,3 | 15,5 | 15,7 | 15,8 | 16,0 | 16,1 | 16,0 |
| Mar | 15,0 | 15,5 | 15,6 | 15,7 | 15,7 | 15,6 | 15,6 | 15,1 | 15,3 |
| Apr | 15,1 | 15,5 | 15,3 | 15,3 | 15,1 | 14,9 | 14,7 | 14,1 | 14,0 |
| Mei | 15,3 | 14,9 | 14,6 | 14,4 | 14,1 | 13,8 | 13,4 | 13,1 | 12,6 |
| Jun | 15,0 | 14,4 | 14,2 | 13,9 | 13,9 | 13,2 | 12,8 | 12,4 | 12,6 |
| Jul | 15,1 | 14,6 | 14,3 | 14,1 | 14,1 | 13,4 | 13,1 | 12,7 | 11,8 |
| Ags | 15,3 | 15,1 | 14,9 | 14,8 | 14,8 | 14,3 | 14,0 | 13,7 | 12,2 |
| Sep | 15,1 | 15,3 | 15,3 | 15,3 | 15,3 | 15,1 | 15,0 | 14,9 | 13,1 |
| Okt | 15,7 | 15,1 | 15,3 | 15,4 | 15,4 | 15,6 | 15,7 | 15,8 | 14,6 |
| Nov | 14,8 | 14,5 | 14,8 | 15,1 | 15,1 | 15,5 | 15,8 | 16,0 | 15,6 |
| Des | 14,6 | 14,1 | 14,4 | 14,8 | 14,8 | 15,4 | 15,7 | 16,0 | 16,0 |

Sumber: Limantara (2010:27)

2.4.8.2. Metode FJ. Mock

Perhitungan debit andalan dengan cara empiris untuk desain bangunan air di Indonesia umumnya menggunakan beberapa metode, yaitu metode FJ. Mock, NRECA dan Tank Model. Analisis debit dari ketiga metode tersebut direkomendasikan berdasarkan tingkat empiris, ketepatan hasil dan kemudahan perhitungan. Berdasarkan pengalaman lapangan, metode Mock merupakan metode yang direkomendasikan untuk mendukung desain. Data debit diperoleh dari hasil pembangkitan data/konversi data hujan menggunakan metode F.J. Mock.

Secara umum metode ini disebut analisis keseimbangan air untuk menghitung harga debit bulanan, evapotranspirasi, kelembaban tanah dan tampungan air tanah. Metode empiris tersebut digunakan apabila terdapat catatan debit sungai yang hilang.

Prinsip metode Mock menyatakan bahwa hujan yang jatuh pada daerah tangkapan air, sebagian akan hilang akibat evapotranspirasi, sebagian akan langsung menjadi direct runoff dan sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah atau terjadi infiltrasi. Infiltrasi ini mula-mula akan menjenuhkan permukaan tanah, kemudian terjadi perkolasi permukaan tanah, kemudian terjadi perkolasi ke air tanah dan akan keluar sebagai *base flow*. Hal ini terdapat keseimbangan antara air hujan yang jatuh dengan evapotranspirasi, direct runoff dan infiltrasi, dimana infiltrasi ini kemudian berupa *soil moisture* dan *ground water discharge*.

Aliran dalam sungai adalah jumlah aliran yang langsung di permukaan tanah dan *base flow*.

Curah hujan rata-rata bulanan di daerah pengaliran sungai dihitung berdasarkan data pengukuran yang sebenarnya dari data meteorologi dengan menggunakan metode Penman dan karakteristik vegetasi. Perbedaan antara curah hujan dan evapotranspirasi mengakibatkan limpasan air hujan langsung (*direct runoff*), aliran dasar/air tanah dan limpasan air hujan lebat (*storm runoff*). (IMIDAP, 2009:17)

Kriteria perhitungan dan asumsi yang digunakan dalam analisa ini adalah sebagai berikut (IMIDAP, 2009:16):

1. Evaporasi Aktual (E_a)/Evaporasi Terbatas (E_t)

Evaporasi aktual dihitung dari evaporasi potensial metode Penman (E_{To}). Hubungan antara Evaporasi dengan Evaporasi Aktual dihitung dengan rumus:

$$E_a = E_{To} - \Delta E \rightarrow (E_a = E_t) \quad (2-41)$$

$$\Delta E = E_{To} \times \left(\frac{m}{20}\right) \times (18 - n) \rightarrow (E = \Delta E) \quad (2-42)$$

dengan:

E_a = evapotranspirasi aktual (mm/hari)

E_t = evapotranspirasi terbatas (mm/hari)

E_{To} = evaporasi potensial Penman

m = presentase lahan yang tidak tertutupi tanaman

= 0 untuk lahan dengan hutan lebat

= 0 untuk lahan dengan hutan sekunder pada akhir musim hujan dan bertambah 10% setiap bulan kering berikutnya

= 10% - 40% untuk lahan yang tererosi

= 30% - 50% untuk lahan pertanian yang diolah

n = jumlah hujan dalam sebulan

2. Keseimbangan Air di Permukaan Tanah

a. Air hujan yang mencapai permukaan tanah dapat dirumuskan sebagai berikut

$$D_s = P - E_t \quad (2-43)$$

dengan:

D_s = air hujan yang mencapai permukaan tanah (mm/hari)

P = curah hujan

E_t = evapotranspirasi terbatas (mm/hari)

b. Bila harga D_s positif ($P > E_t$) maka air akan masuk ke dalam tanah bila kapasitas kelembaban tanah belum terpenuhi, dan sebaliknya akan melimpas

bila kondisi tanah jenuh. Bila harga ds negatif ($P < E_t$), maka sebagian air tanah keluar dan terjadi kekurangan (*defisit*). P = curah hujan

- c. Perubahan kandungan air tanah (*soil storage*) tergantung dari harga Ds. Bila harga Ds negatif maka kapasitas kelembaban tanah akan akan berkurang dan bila Ds positif akan menambah kekurangan kapasistas kelembababn tanah bulan sebelumnya.
- d. Perkiraan kapasitas kelembaban tanah (*Soil Moisture Capacity*) awal diperlukan pada saat dimulainya simulasi dan besarnya tergantung dari kondisi porositas lapisan tanah atas dari daerah pengaliran. Biasanya diambil 50 s/d 250 mm, yaitu kapasitas kandungan air dalam tanah per m^3 . Jika porositas tanah lapisan atas tersebut maskin besar, maka kapasitas kelembaban tanah akan makin besar pula.

3. Limpasan

a. Koefisien Infiltrasi (i)

Koefisien infiltrasi ditaksir berdasarkan kondisi porositas tanah dan kemiringan daerah pengaliran. Lahan yang porous misalnya pasir halus mempunyai infiltrasi lebih tinggi dibandingkan tanah lempung berat. Lahan yang terjal dimana air tidak sempat infiltrasi kedalam tanah maka koefisien infiltrasi akan lebih kecil. Batasan koefisien infiltrasi adalah 0 – 1.

b. Penyimpanan air tanah (*groundwater storage*)

Pada permulaan simulasi harus ditentukan penyimpanan awal (*initial storage*) yang besarnya tergantung dari kondisi geologi setempat dan waktu. Sebagai contoh : dalam daerah pengaliran kecil yang mana kondisi geologi lapisan bawah adalah tidak tembus air dan mungkin tidak ada air disungai pada musim kemarau, maka penyimpanan air tanah menjadi nol.

Perasamaan yang digunakan:

$$V_n = k \cdot V_{n-1} + \frac{1}{2} (1 + k) \cdot I_n \quad (2-44)$$

$$DV_n = V_n - V_{n-1} \quad (2-45)$$

dengan:

V_n = volume air tanah bulan ke n

V_{n-1} = volume air tanah bulan ke (n-1)

k = q_t/q_0 = faktor resesi aliran air tanah

q_t = aliran air tanah pada waktu ke t (bulan ke t)

q_0 = aliran air tanah pada awal (bulan ke 0)

DV_{n-1} = perubahan volume aliran air tanah

Faktor resesi air tanah (k) adalah 0 – 1,0. Harga K yang tinggi akan memberikan resesi yang lambat seperti pada kondisi geologi lapisan bawah yang sangat lulus air.

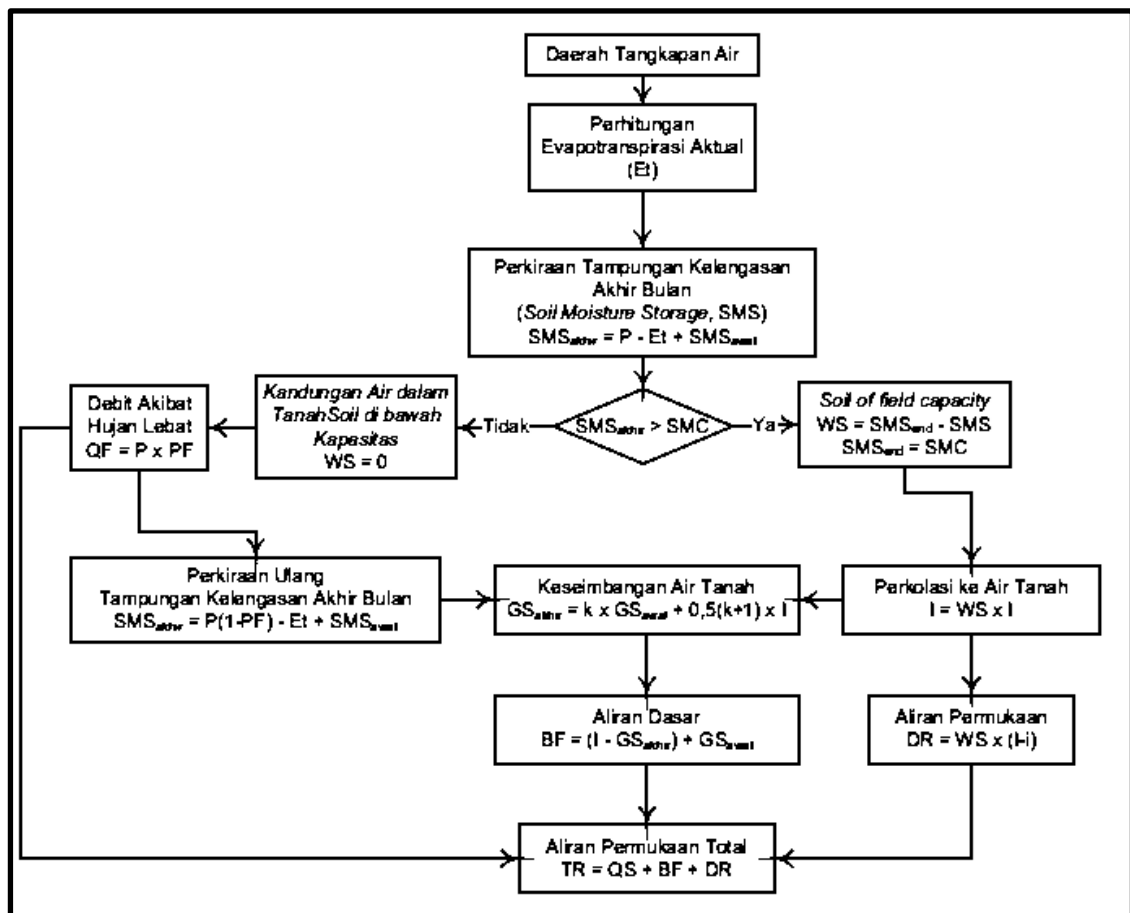
c. Limpasan (*Run Off*)

Aliran dasar : infiltrasi dikurangi perubahan volume aliran air dalam tanah

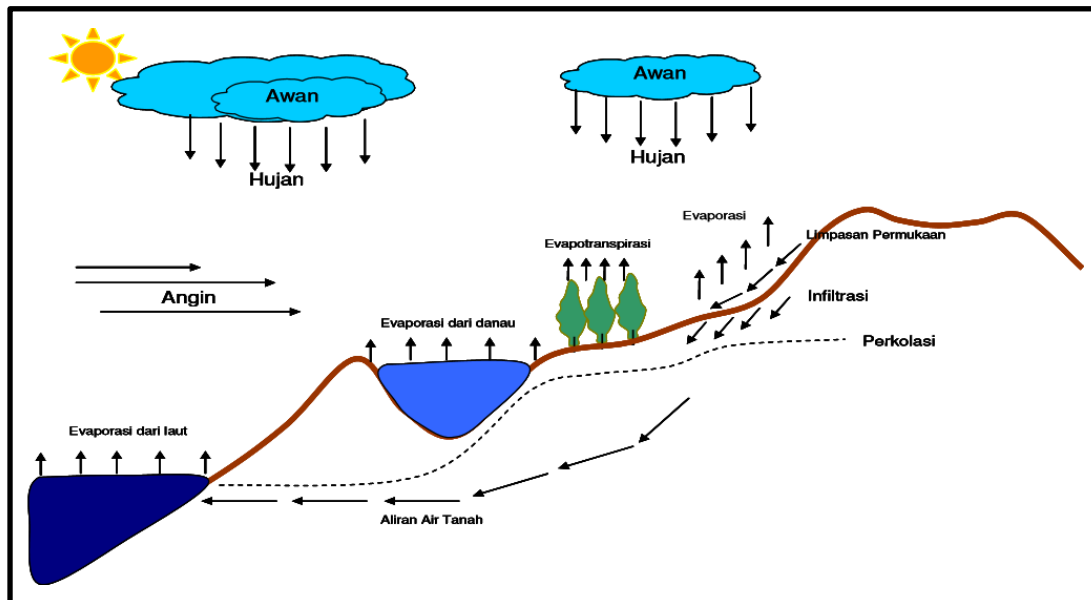
Limpasan langsung : kelebihan air (*water surplus*) – infiltrasi

Limpasan : aliran dasar + limpasan

Debit andalan : aliran sungai dinyatakan dalam m^3 /bulan



Gambar 2.14 Diagram Alir Metode F.J Mock
Sumber : IMIDAP (2009:16)



Gambar 2.15 Siklus Hidrologi
Sumber : Soemarto (1987:34)

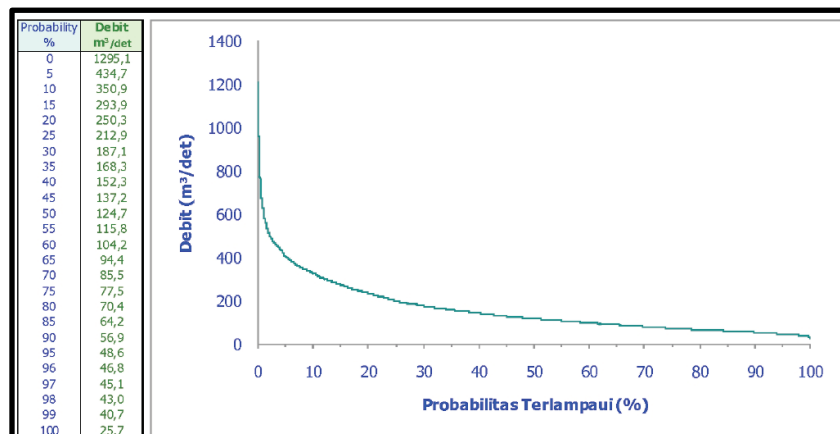
Berikut adalah Langkah-langkah perhitungan debit Metode F.J. Mock:

1. Mempersiapkan data-data yang dibutuhkan, antara lain: rerata hujan daerah (P), evapotranspirasi potensial (ETo), jumlah air hujan (n), faktor resesi aliran air tanah (k), dan angka koefisien infiltrasi (c).
2. Menentukan evapotranspirasi terbatas.
3. Menentukan besar hujan di permukaan tanah (Ds).
4. Menentukan harga kelembaban tanah (SMC).
5. Menentukan infiltrasi, koefisien antara 0 – 1.
6. Menentukan air lebihan tanah (*water surplus*).
7. Menentukan kandungan air bawah tanah (Vn).
8. Menentukan perubahan kandungan air bawah tanah (DVn).
9. Menentukan aliran dasar dan aliran langsung.
10. Menentukan debit tersedia disungai.

2.4.8.3. Metode Kurva Durasi (*Flow Duration Curva*)

Setelah data debit didapat, kemudian dilanjutkan mencari debit rencana/andalan dengan menggunakan metode *Flow Duration Curva* (FDC). FDC akan menyajikan probabilitas dari adanya satu aliran besarnya debit dengan probabilitas keandalannya (%). FDC memungkinkan menaksir variasi debit yang nantinya akan diusulkan untuk mendisgn bangunan air dan untuk memntukan debit dengan keandalan tertentu untuk sistem pembangkit listrik tenaga air. Debit yang digunakan untuk medesign sistem pembangkit

listrik tenaga air ini merupakan debit dimana turbin dapat berputar atau beroperasi seefisien mungkin dan debit rata-rata maksimum dapat terjadi pada pembangkit tersebut untuk waktu yang lama.



Gambar 2.16 Contoh *Flow Duration Curve*
Sumber: IMIDAP (2009:22)

Ketika melihat FDC, langkah awal dalam memperkirakan debit yang digunakan untuk mendesign suatu pembangkit listrik tenaga minihidro debit yang biasanya digunakan merupakan debit dengan keandalan antara 30% dan 60%. Seperti contoh pada FDC diatas debit yang digunakan untuk mendesign yaitu debit dengan keandalan 30% dan keandalan 60% yang menunjukkan debit masing-masing sebesar 500 cfs dan 250 cfs (1cfs = 0,02837 m³/s). Debit dengan keandalan 60% berarti debit itu mampu menjalankan pembangkit secara maksimum yaitu sebesar 60% tiap tahunnya. Hal tersebut merupakan design yang lebih konservatif dibanding debit dengan keandalan 30% karena hanya mengalir dengan maksimum 30% tiap tahunnya.

Flow duration curve dilakukan dengan cara data debit pencatatan pos duga muka air untuk jangka waktu tertentu disusun dari angka terbesar hingga terkecil dan tiap debit diberikan probabilitas yang dihitung dengan persamaan Weibull berikut ini. (IMIDAP, 2008:21)

$$P = \frac{i}{n} \times 100\% \quad (2-46)$$

dengan:

P = probabilitas

i = nomor urut debit

n = jumlah data debit

2.4.8.4. Metode Debit Pembangkit

Debit pembangkit didapatkan dari proses optimasi debit yang akan didapatkan debit optimum untuk digunakan sebagai dasaran design bangunan PLTM dan penentu daya & energi yang dihasilkan. (ESHA, 2004:24) Untuk menentukan debit yang optimum dapat digunakan parameter kapasitas faktor dengan minimal sebesar 65%. (Permen ESDM No.12, 2017). Kapasitas factor berguna untuk mengukur efisiensi dari suatu pembangkit listrik. Kapasitas faktor dapat dihitung dengan energid an daya untuk periode tertentu.

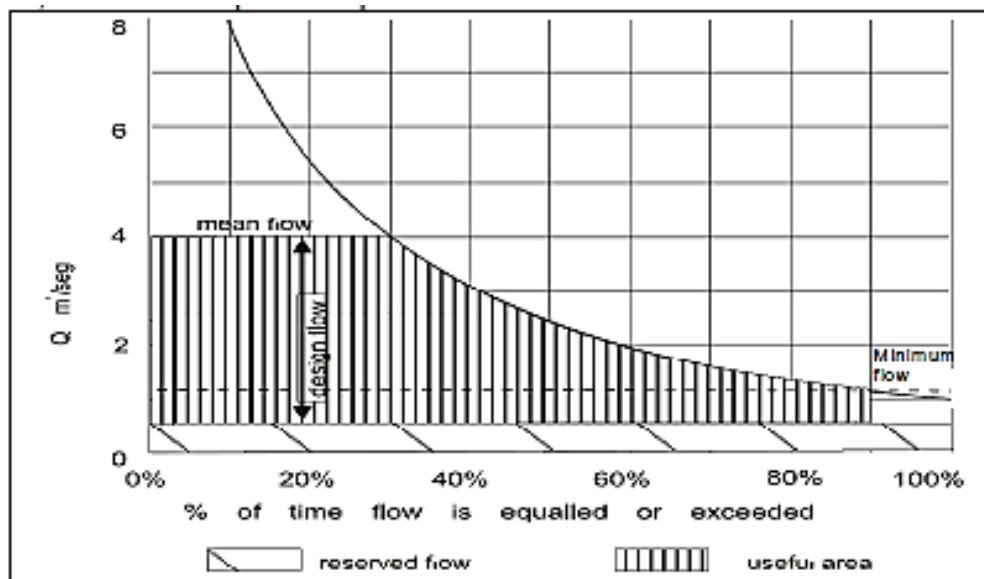
$$K = \frac{E}{8760 \cdot P_{desain}} \quad (2-47)$$

dengan:

K = Kapasitas Faktor (%)

E = Energi Tahunan (kWh)

P_{desain} = Daya pada waktu Q_{desain} (kW)



Gambar 2.17 Contoh Debit Pembangkit 40%
Sumber: ESHA (2004:61)

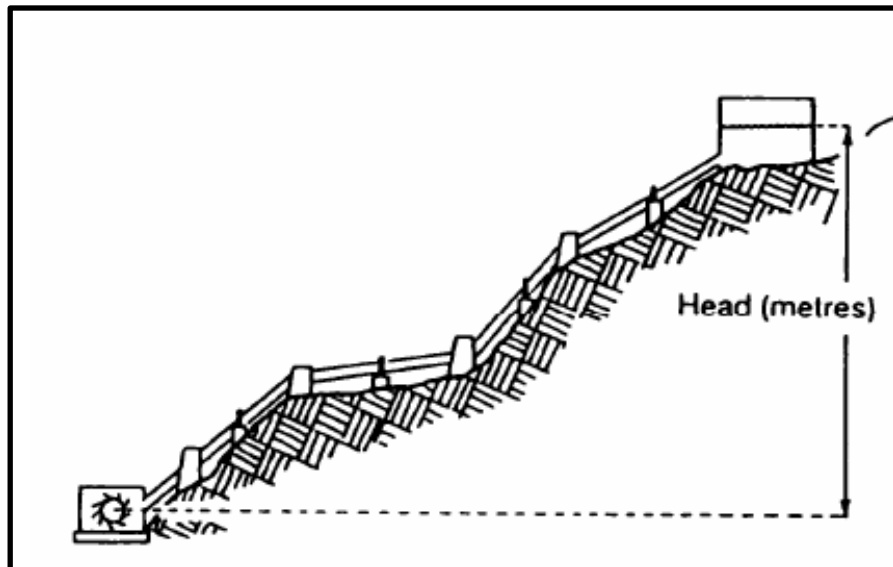
2.5. Analisa Hidrolika

2.5.1. Tinggi Jatuh

Tinggi Jatuh (*Head*) menjadi salah satu elemen yang penting untuk penentu daya yang dihasilkan. Head merupakan tekanan yang tersedia pada PLTM yang dinyatakan dengan meter. Harus dibedakan antara *gross head*, yang merupakan perbedaan elevasi antara muka air dari *forebay* atau bak penenang, dengan *tail race* dengan *net head*, yang merupakan tekanan aktual yang tersedia untuk turbin.

Berdasarkan tinggi jatuh (*Head*) yang dieksploitasi untuk produksi listrik. Pembangkit Listrik Tenaga air (PLTA) dibagi menjadi beberapa kategori sebagai berikut:

1. *High Head* yaitu $H > 100$ meter
2. *Medium Head* yaitu $30 \text{ meter} < H < 100$ meter
3. *Low Head* yaitu $H < 30$ meter



Gambar 2.18 Tinggi Jatuh (*Head*)
Sumber: JICA (2009:2-8)

Persamaan konversi dari sistem pembangkitan ini, yaitu:

Tenaga yang masuk = tenaga yang keluar + tenaga yang hilang (loss)

Tenaga yang keluar = tenaga yang masuk \times efisiensi konversi

Untuk mendapatkan *net head*, maka perlu dihitung kehilangan-kehilangan tinggi karena beberapa aspek. Pada umumnya kehilangan tinggi terjadi pada belokan, perubahan penampang saluran, penyaring sampah (*trashrack*) dan pipa pesat. Dalam pertimbangan perencanaan maka perlu dihitung *net head*, dengan rumus sebagai berikut:

$$H_{\text{net}} = H_{\text{gross}} - hL \quad (2-48)$$

dengan:

H_{net} = tinggi jatuh nett (m)

H_{gross} = tinggi jatuh kotor (m)

hL = kehilangan tinggi

Persamaan diatas menggambarkan perbedaan kecil antara daya yang masuk, atau total daya yang diserap oleh skema hidro, adalah daya kotor, P_{gross} . Daya yang manfaatnya dikirim adalah daya bersih P_{net} .

Daya kotor adalah head kotor (H_{gross}) yang dikalikan dengan debit air (Q) dan juga dikalikan dengan faktor gravitasi ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), sehingga persamaan dasar pembangkit listrik adalah :

$$P_{\text{net}} = g \times H_{\text{gross}} \times Q \times \eta \quad (2-49)$$

dengan:

P = Daya dalam kilowatt (kW)

g = gravitasi dengan nilai $9,81 \text{ m/s}^2$

H_{gross} = tinggi jatuh kotor (m)

Q = Debit (m^3/detik)

η = Efisiensi

Pada umumnya efisiensi masing-masing adalah sebagai berikut:

| | |
|-------------------|---|
| Ekonstruksi sipil | : $1.0 - (\text{panjang saluran} \times 0.002 \sim 0.005) / H_{\text{gross}}$ |
| Epenstock | : $0.90 \sim 0.95$ (tergantung pada panjangnya) |
| Eturbin | : $0.70 \sim 0.85$ (tergantung pada tipe turbin) |
| Egenerator | : $0.80 \sim 0.95$ (tergantung pada kapasistas generator) |
| Esistem kontrol | : 0.97 |
| Ejaringan | : $0.90 \sim 0.98$ (tergantung pada panjang jaringan) |
| Etrafo | : 0.98 |

2.5.2. Kehilangan Tinggi Tekan (*Head Lost*)

Kehilangan tinggi energi adalah penurunan besarnya energi karena gesekan (*friction*) maupun kontraksi (*contraction*) yang terjadi selama pengaliran, berdasarkan hukum kekal energi pada persamaan Bernaulli besarnya energi adalah sama, namun akan terjadi penurunan atau kehilangan energi pada section-section tertentu karena faktor gesekan, belokan dll.

Dalam perhitungan kehilangan tinggi pada perencanaan sistem pembangkit listrik mikro/mini hidro dapat dibedakan menjadi 2 yaitu pada saluran terbuka dan tertutup:

2.5.2.1. Saluran Terbuka

Dalam penjelasan saluran terbuka di PLTM dapat dijelaskan pada bagian bangunan pengambil dan penyaring sampah sebagai berikut:

- Pada Bangunan Pengambil (*intake*)

$$H_f = f \frac{V^2}{2g} \quad (2-50)$$

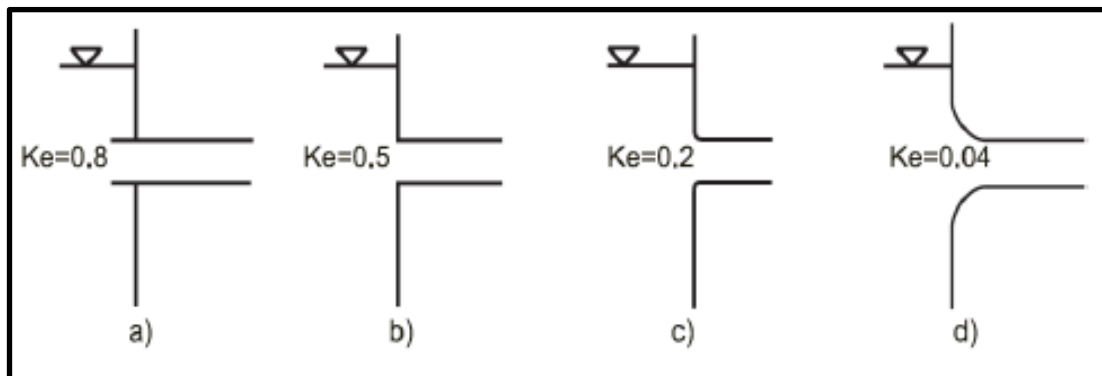
dengan:

H_f = kehilangan tinggi pada bangunan pengambil (m)

V = kecepatan

g = gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

f = koefisien kehilangan tinggi



Gambar 2.19 Koefisien Kehilangan Pada Inlet
Sumber: ESHA (2001:35)

- Pada Penyaring Sampah (*trashrack*)

$$H_t = Kt \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \left(\frac{V_o^2}{2g}\right) \sin \emptyset \quad (2-51)$$

dengan:

H_t = head lost (m)

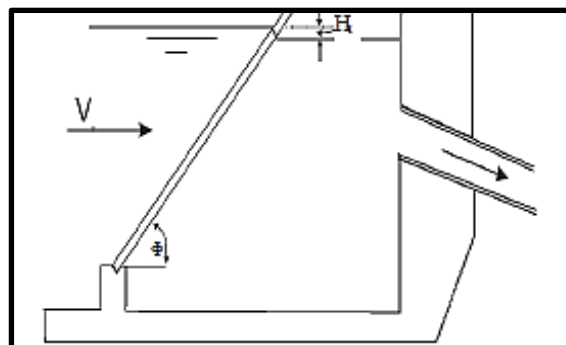
t = ketebalan penyaringan (m)

b = lebar antar jeruji (m)

V = kecepatan (m/detik)

g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/detik}^2$)

\emptyset = sudut dasar teruji ($^\circ$)



Gambar 2.20 Kehilangan Tinggi Pada Penyaring Sampah
Sumber: ESHA (2001:37)

2.5.2.2. Saluran Tertutup

Dalam penjelasan saluran tertutup di PLTM dapat dijelaskan pada bagian gesekan pipa, penyempitan atau pelebaran pipa dan belokan sebagai berikut:

- Pada Gesekan Pipa

$$hf = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \frac{V_0^2}{2g} \quad (2-52)$$

dengan:

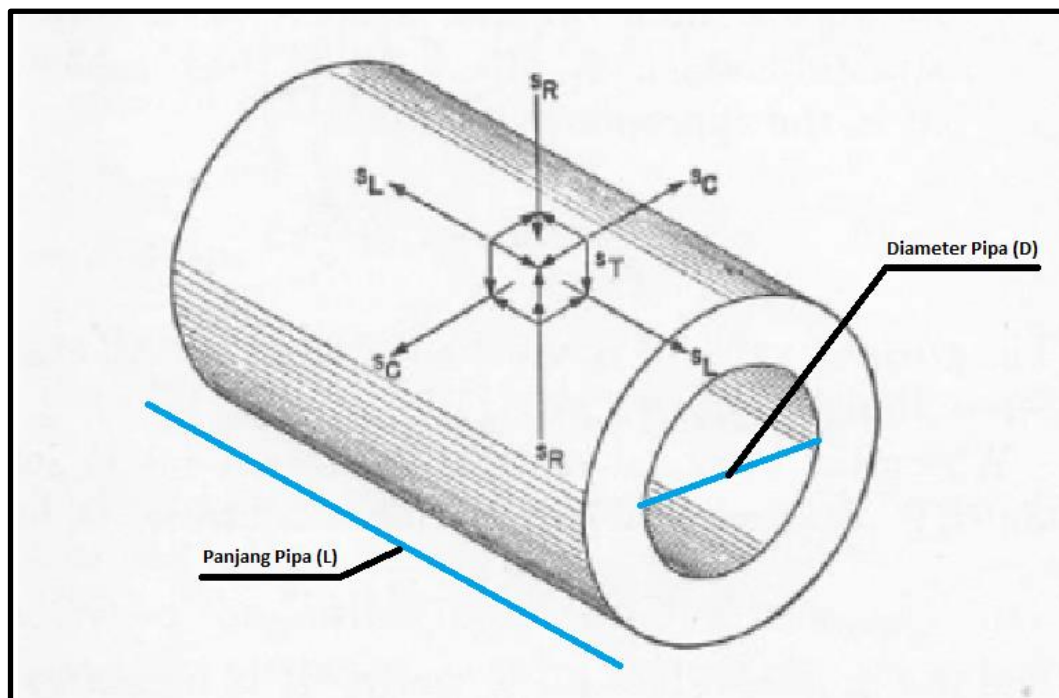
f = koefisien gesekan

L = panjang pipa (m)

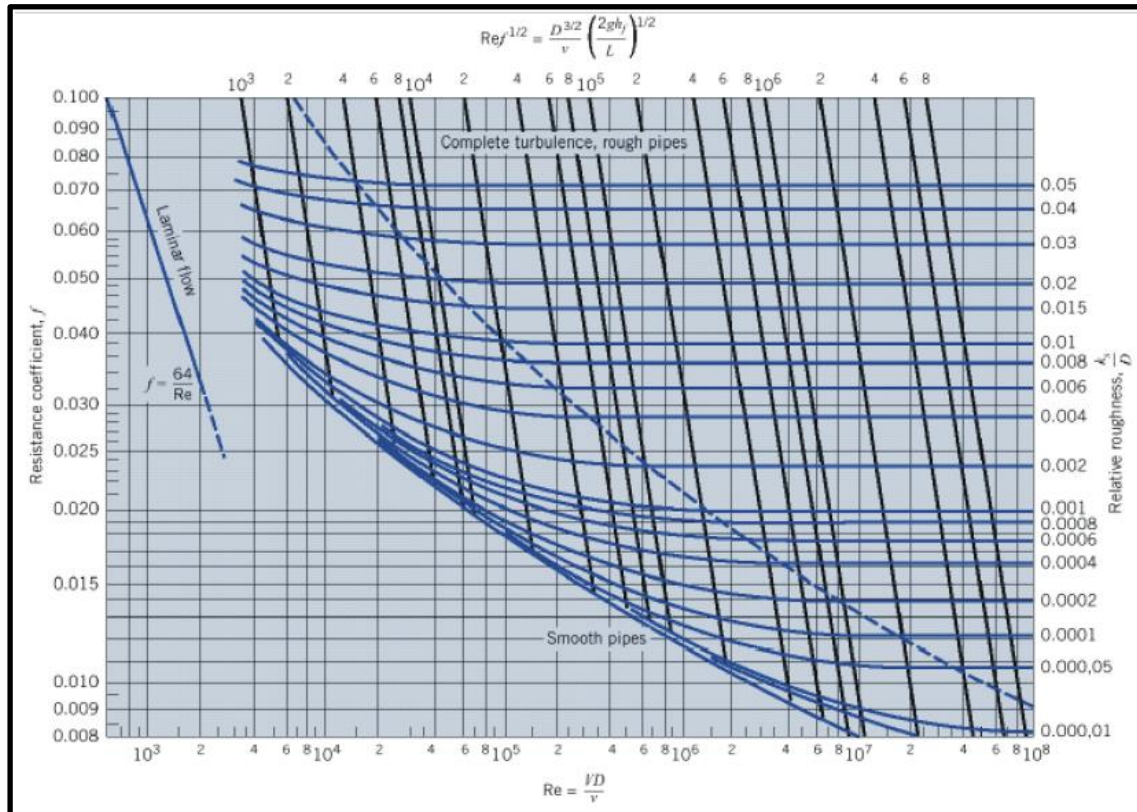
D = diameter pipa (m)

V = kecepatan aliran (m/detik)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/detik²)



Gambar 2.21 Skema Panjang dan Diameter Pipa
Sumber: Penulis, 2017



Gambar 2.22 Diagram *Moody*
 Sumber: ESHA (1998:34)

- Pada Penyempitan atau Pelebaran Pipa

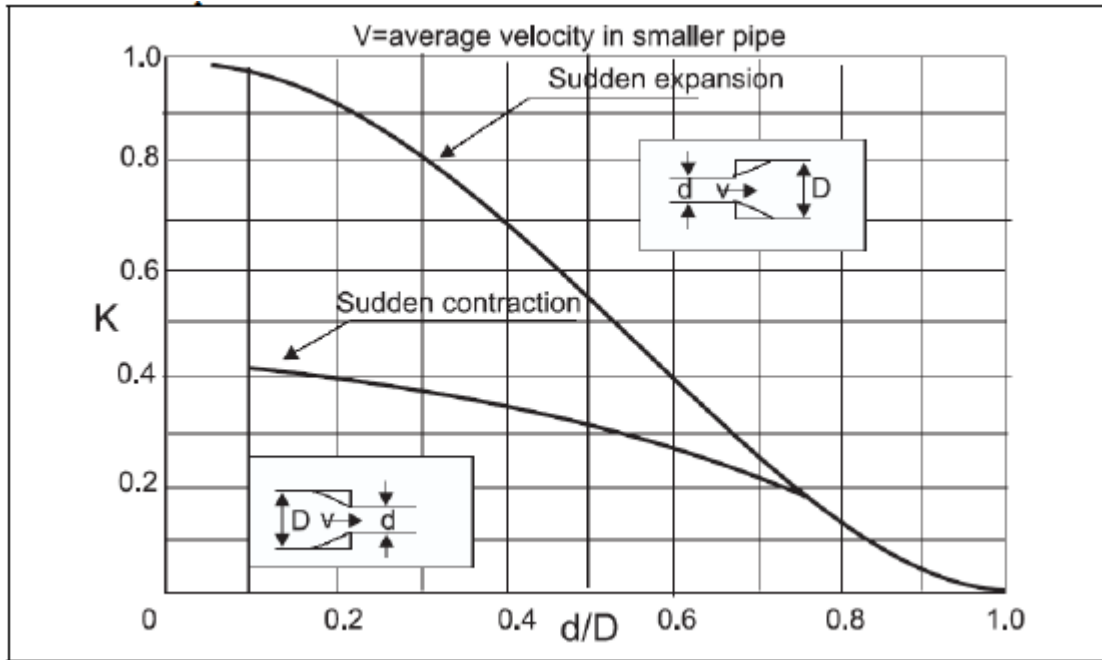
$$H_c = K_c \cdot \left(\frac{V_2^2}{2g}\right) \quad (2-53)$$

dengan:

$$K_c = 0,42 (1 - (d^2/D^2))$$

V = kecepatan aliran (m/detik)

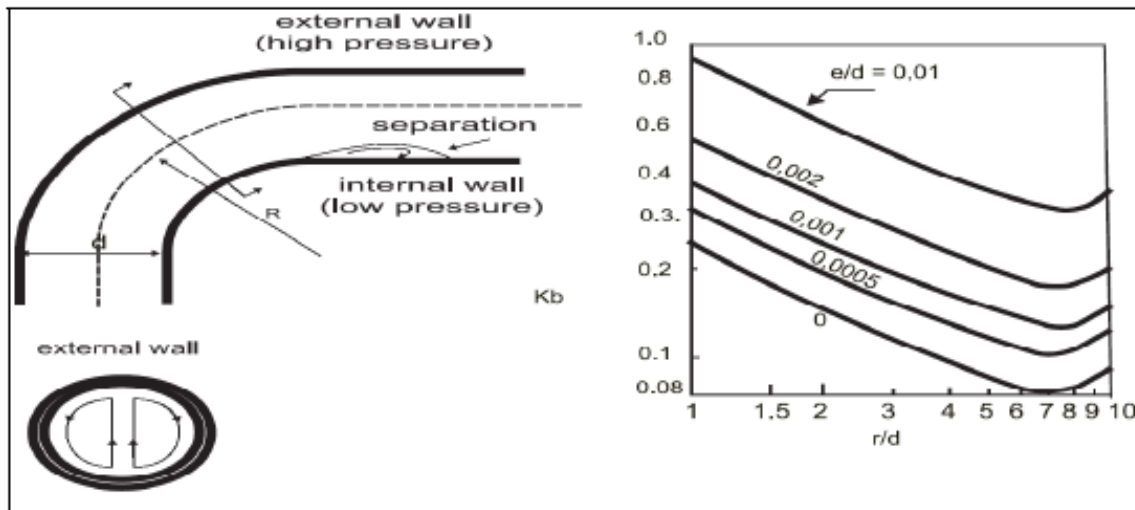
g = percepatan gravitasi (9,81 m/detik²)



Gambar 2.23 Nilai K_c sebagai fungsi d/D
 Sumber: ESHA (1998:37)

- Pada Belokan

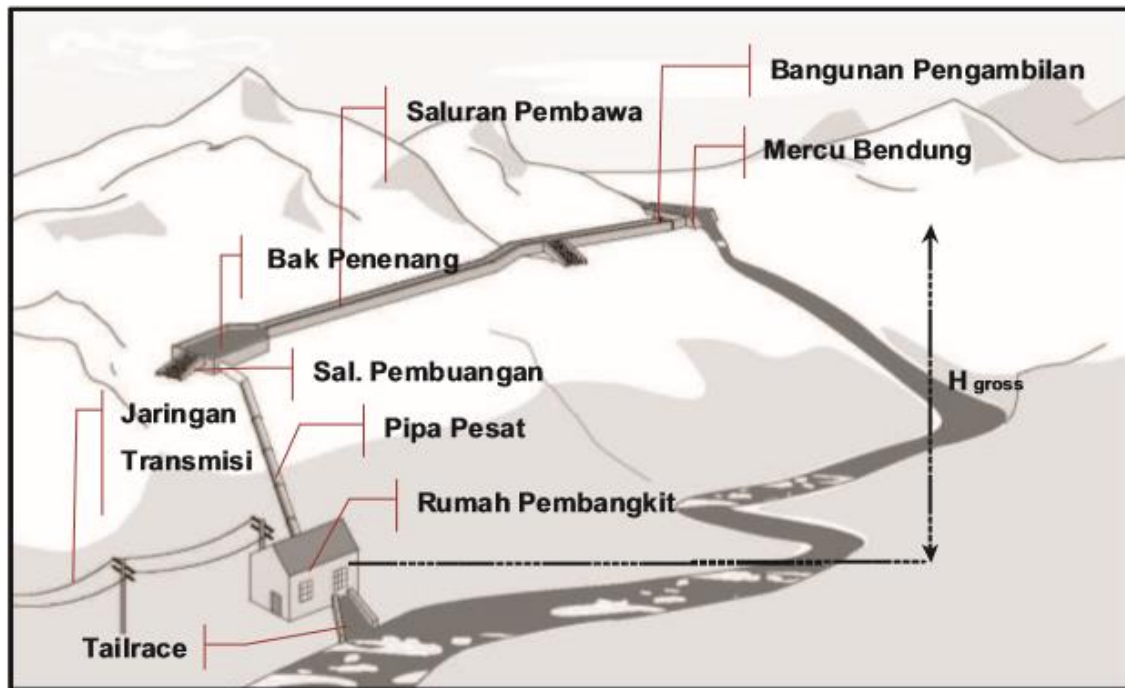
Pada belokan, aliran air dalam pipa mengalami peningkatan tekanan disepanjang dinding luar dan penurunan tekanan sepanjang dinding dalam. Ketidakseimbangan tekanan ini menyebabkan arus sekunder seperti ditunjukkan pada Gambar 2.24. Kehilangan ini tergantung pada jari-jari pipa dan diameter.



Gambar 2.24 Koefisien Kehilangan Tinggi pada Belokan
 Sumber: ESHA (1998:40)

2.6. Komponen PLTM

Dalam sub bab ini akan dijelaskan mengenai perhitungan untuk mendapatkan dimensi penentuan lokasi bangunan dan dimensi dari Bendung hingga Saluran Pembuang:



Gambar 2.25 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro
Sumber: IMIDAP (2008:6)

2.6.1. Bendung (*Weir*)

Bangunan bendung (*Weir*) merupakan Bangunan bendung (*Weir*) merupakan bagian dari bangunan utama yang benar-benar dibangun di dalam air. Bangunan ini diperlukan untuk memungkinkan dibelokkannya air sungai ke intake, dengan jalan menaikkan muka air di sungai..

2.6.1.1. Lebar Bendung

Yaitu jarak antara pangkal – pangkalnya (*abutment*), harus sama dengan atau tidak lebih dari 1,2 kali lebar rata-rata sungai pada bagian yang stabil. Di bagian ruas bawah sungai, lebar rata-rata ini dapat diambil pada debit penuh (*bankful discharge*) di bagian ruas atas mungkin sulit untuk menentukan debit penuh. Dalam hal ini banjir mean tahunan dapat diambil untuk menentukan lebar rata-rata bendung.

Agar pembuatan bangunan peredam energi tidak terlalu mahal, maka aliran per satuan lebar hendaknya dibatasi sampai sekitar 12-14 m³/dt.m¹, yang memberikan tinggi energi maksimum sebesar 3,5 – 4,5 m (lihat Gambar 2.19). Adapun persamaannya sebagai berikut (Kp-02, 2013):

$$Be = B - 2 (n \cdot Kp + Ka) H_1 \quad (2-54)$$

dengan:

n = jumlah pilar

- Kp = koefisien konstruksi pilar
- Ka = koefisien konstruksi pangkal bendung
- H₁ = tinggi energi (m)
- B = lebar mercu yang sebenarnya
- Be = lebar efektif mercu

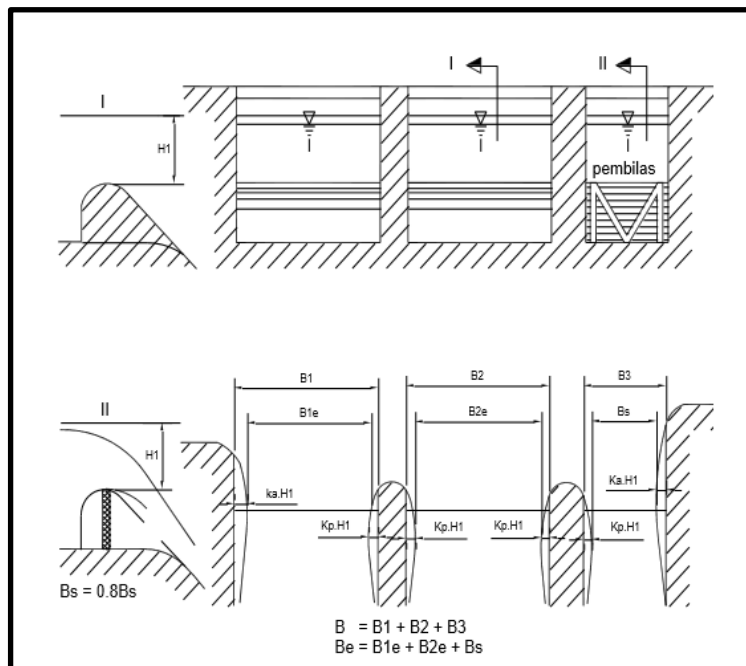
Harga-harga koefisien Ka dan Kp diberikan pada Tabel 2.10

Tabel 2.11 Harga – harga Koefisien Konstruksi

| Uraian | Kp |
|--|------|
| Untuk pilar berujung segu empat dengan sudut-sudut yang dibulatkan pada jari-jari yang hampir sama dengan 0,3 dari tabel pilar | 0,02 |
| Untuk pilar berujung bulat | 0,01 |
| Untuk pilar berujung runcing | 0 |

| Bentuk Pangkal Tembok | Ka |
|---|------|
| Untuk pangkal tembik segi empat dengan tembok hulu pada 90 ⁰ kearah aliran | 0,20 |
| Untuk pangkal tembok bulat dengan tembok hulu pada 90 ⁰ dengan ke arah aliran 0,5 H ₁ > r > 0,15 H ₁ | 0,10 |
| Untuk pangkal tembok dimana r > 0,5 H ₁ dan tembok tembok hulu tidak lebih dari 45 ⁰ kearah aliran | 0 |

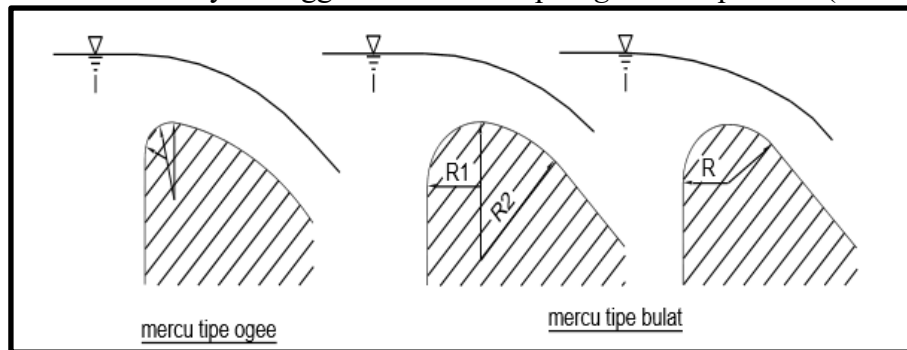
Sumber: KP-02 (2013:50)



Gambar 2.26 Skema Lebar Efektif Mercu
 Sumber: KP-02 (2013:51)

2.6.1.2. Mercu Bendung

Di Indonesia biasanya menggunakan mercu tipe *Ogee* dan tipe bulat (Gamabar 2.20).



Gambar 2.27 Bentuk – Bentuk Mercu
Sumber: KP-02 (2013:50)

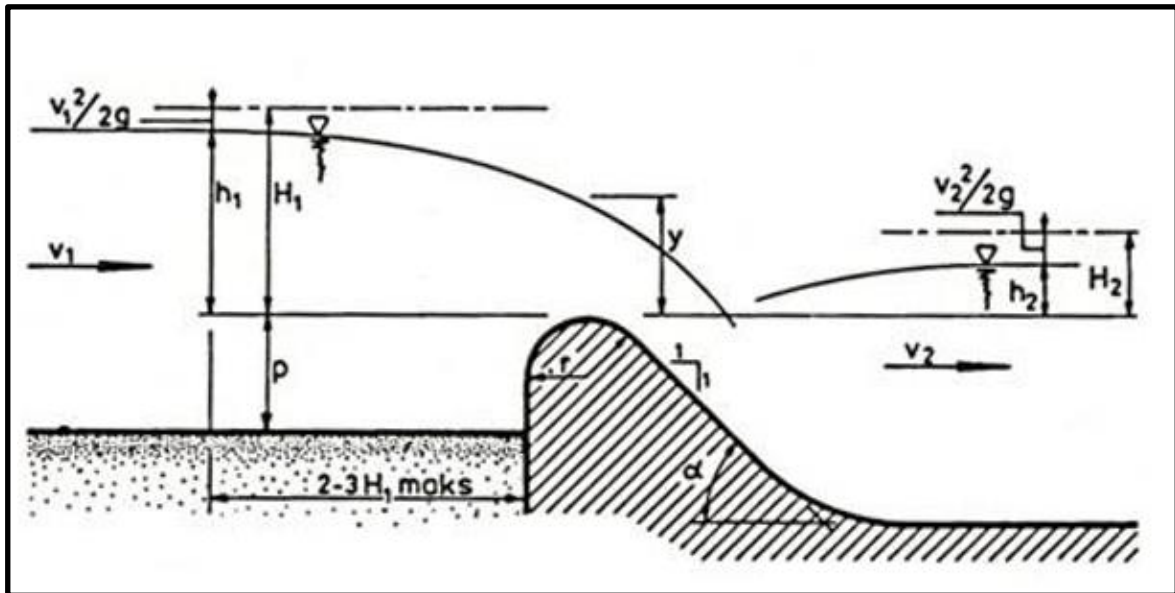
Kedua bentuk mercu tersebut dapat dipakai baik untuk konstruksi beton maupun pasangan batu atau bentuk kombinasi dari keduanya. Kemiringan maksimum muka bendung bagian hilir yang dibicarakan di sini berkemiringan 1 banding 1 batas bendung dengan muka hilir vertikal mungkin menguntungkan jika bahan pondasinya dibuat dari batu keras dan tidak diperlukan kolam olak. Dalam hal ini kavitasi dan aerasi tirai luapan harus diperhitungkan dengan baik KP-02 (2013:50).

- Mercu Bulat

Bendung dengan tipe bulat memiliki harga koefisien debit yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan koefisien bendung ambang lebar. Bendung akan memberikan banyak keuntungan bagi sungai, karena bangunan ini akan mengurangi tinggi muka air hulu selama banjir. Harga koefisien debit menjadi lebih tinggi, karena lengkung *streamline* dan tekanan negatif pada mercu.

Tekanan pada mercu adalah fungsi perbandingan antara H_1 dan r (H_1/r). Untuk bendung dengan dua jari – jari (R_2), jari – jari hilir akan digunakan untuk menemukan harga koefisien debit.

Untuk menghindari bahaya kavitaasi lokal, tekanan minimum pada mercu bandung harus dibatasi sampai dengan -4 m tekanan air, jika bangunan tersebut dari beton. Untuk konstruksi pasangan batu, tekanan sub atmosfer sebaiknya dibatasi sampai dengan -1 m tekanan air.



Gambar 2.28 Skema Bendung dengan Mercu Bulat
Sumber: KP-02 (2013:52)

Persamaan energi yang digunakan dan debit untuk bendung pendek dengan pengontrol segi empat adalah sebagai berikut:

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot b \cdot H_1^{1,5}} \quad (2-55)$$

dengan:

Q = Debit (m^3/dt)

C_d = koefisien debit ($C_d = C_0 C_1 C_2$)

C_0 = fungsi H_1/r (Gambar 2.22)

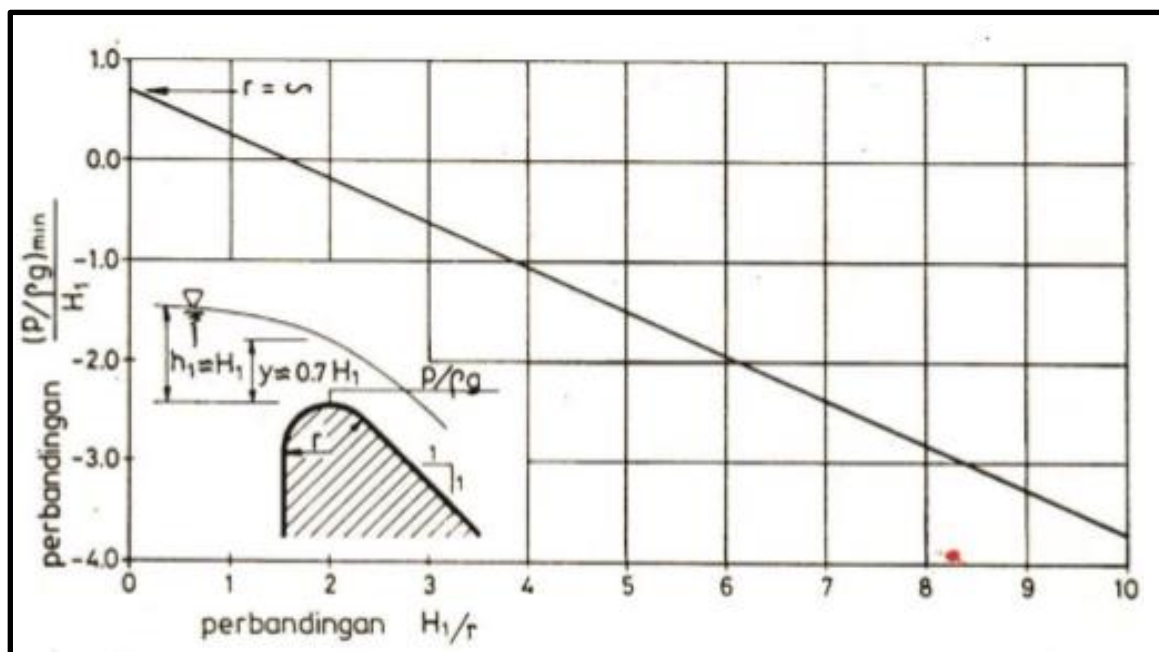
C_1 = fungsi p/H_1 (Gambar 2.23)

C_2 = fungsi p/H_1 dan kemiringan muka hulu bendung (Gambar 2.24)

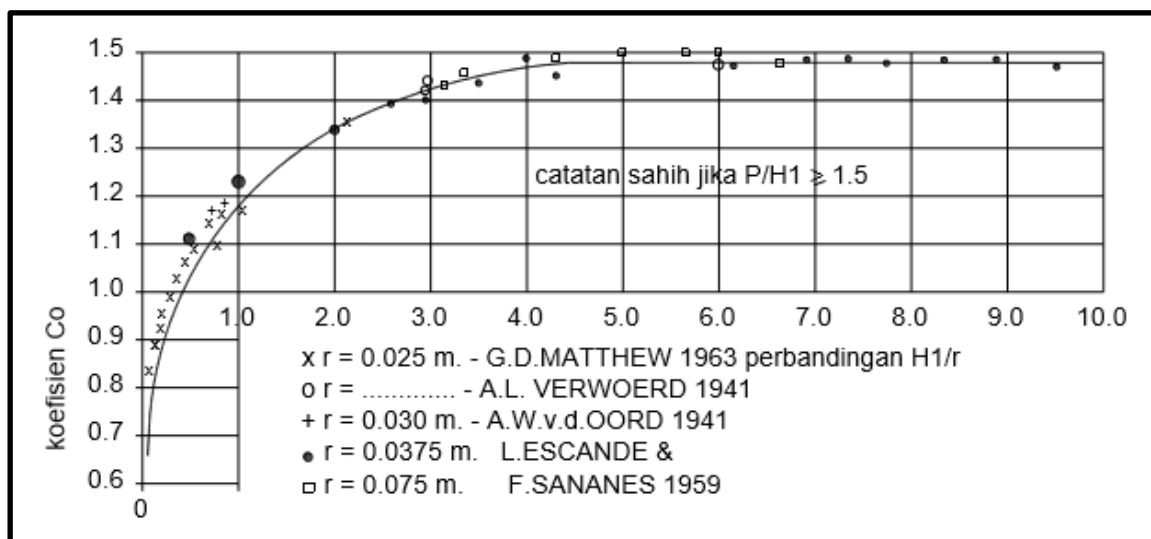
g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/detik}^2$)

b = bentang efektif bendung (m)

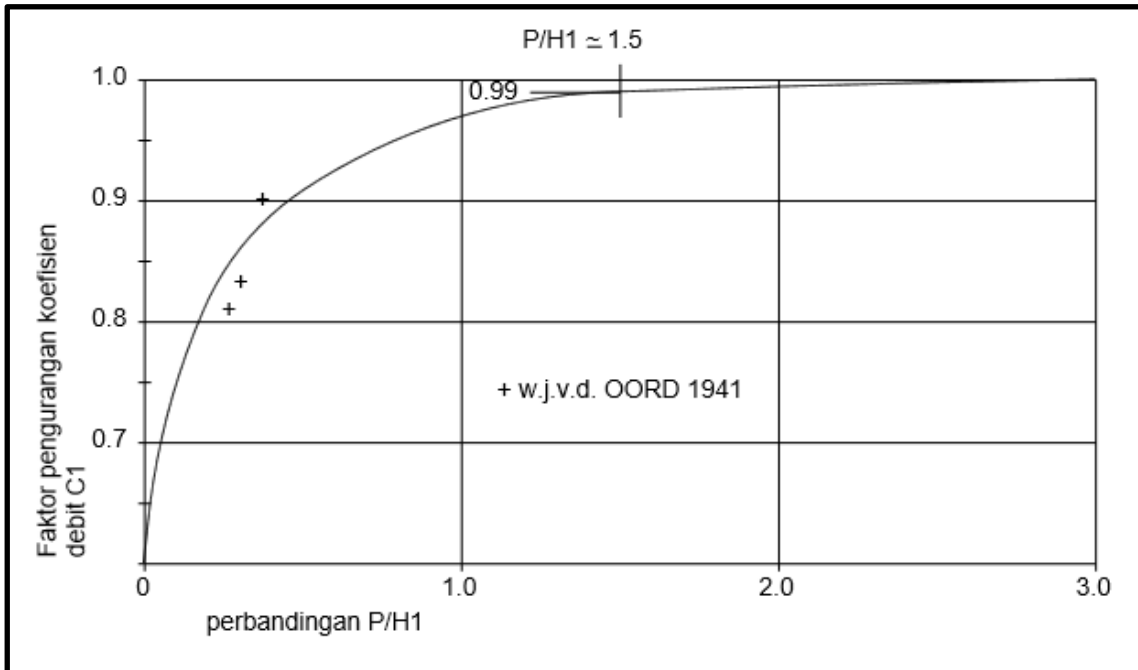
H_1 = tinggi energi diatas ambang (m)



Gambar 2.29 Tekanan pada Mercu Bendung Bulat Sebagai Fungsi Perbandingan H_1/r
 Sumber: KP-02 (2013:53)



Gambar 2.30 Harga-Harga Koefisien C_0 untuk Bendung Ambang Bulat Sebagai Fungsi Perbandingan H_1/r
 Sumber: KP-02 (2013:53)



Gambar 2.31 Koefisien C_1 sebagai Fungsi Perbandingan p/H_1
 Sumber: KP-02 (2013:54)

- Mercu *Ogee*

Mercu *Ogee* adalah mercu berbentuk tirai luapan bawah dari bendung ambang tajam (aerasi). Oleh kerana itu, mercu tidak akan memberikan tekanan sub atmosfer pada permukaan mercu sewaktu bendung pengaliran air pada debit rencana. Untuk debit yang lebih rendah, air akan memberikan tekanan ke bawah pada mercu.

Untuk merencanakan mercu ogee bagian hilir, *U.S Army Corps of Engineers* mengembangkan persamaan sebagai berikut (KP-02, 2013:55):

$$\frac{Y}{hd} = \frac{1}{k} \left[\frac{x}{hd} \right]^n \quad (2-56)$$

dengan:

X dan Y = koordinat – koordinat permukaan hilir

hd = tinggi rencana atas mercu

k dan n = parameter (Tabel 2.12)

Tabel 2.12 Harga-Harga K dan n

| Kemiringan Permukaan Hilir | K | n |
|-------------------------------|-------|-------|
| Vertikal | 2,000 | 1,850 |
| 3:1 | 1,936 | 1,836 |
| 3:2 | 1,939 | 1,810 |
| 1:1 | 1,873 | 1,776 |

Sumber: KP-02 (2013:56)

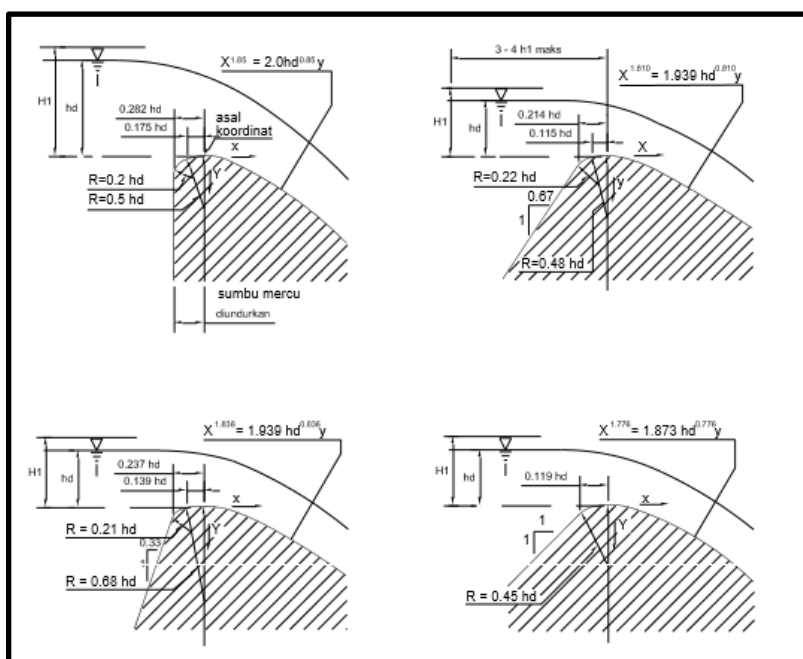
Bagian hulu mercu bervariasi sesuai dengan kemiringan permukaan hilir (Gambar 2.32). Persamaan antara tinggi energi dan debit untuk bendung mercu Ogee adalah (KP-02, 2013:56):

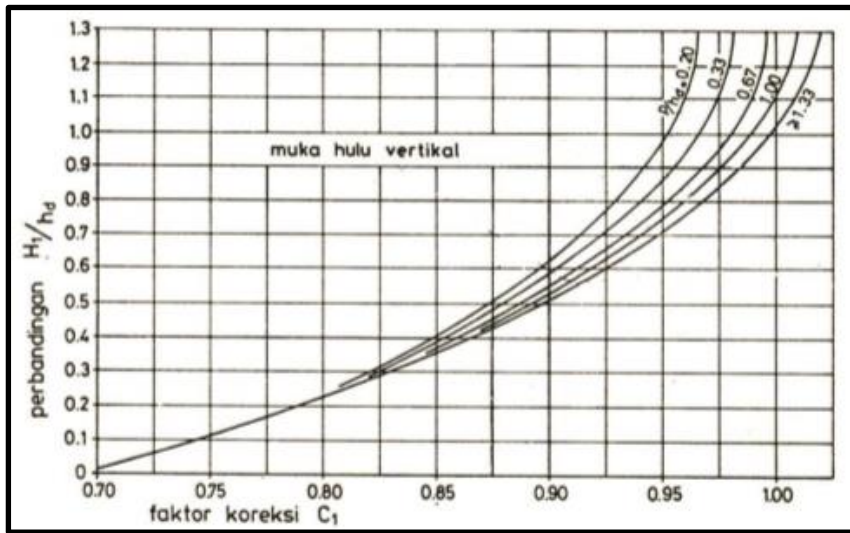
$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{(2/3gb)} H_1^{1,5} \quad (2-57)$$

dengan:

Q = debit, m³/dtC_d = koefisien debit (C_d = C₀ C₁ C₂)g = percepatan gravitasi, m/dt² (9,8 m/dt²)

b = lebar mercu (meter)

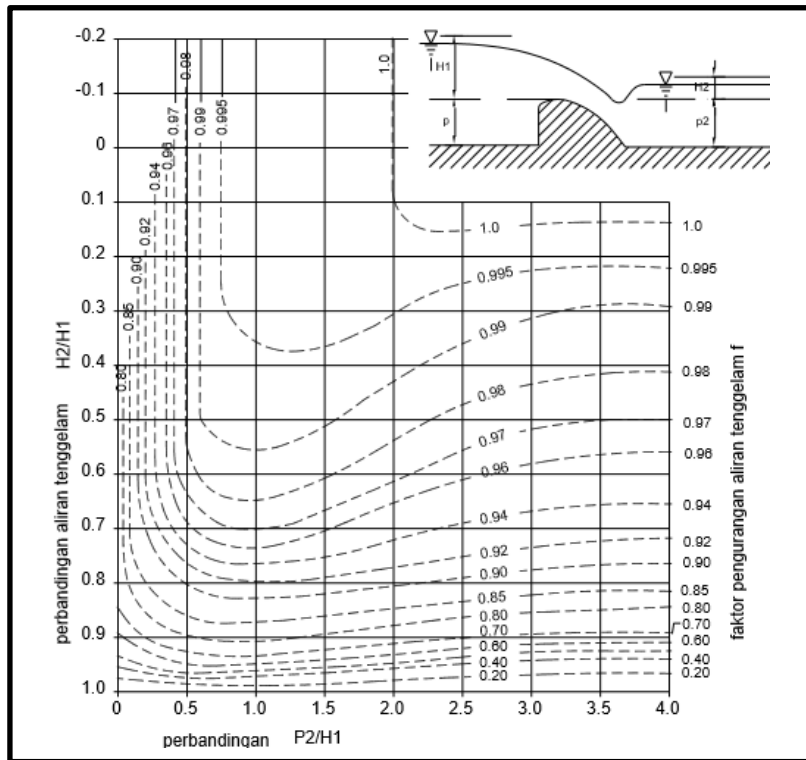
H₁ = tinggi energi di atas ambang (meter)Gambar 2.32 Bentuk-Bentuk Bendung Mercu Ogee
Sumber: KP-02 (2013:57)



Gambar 2.33 Faktor Koreksi untuk Selain Tinggi Energi Rencana pada Mercu Ogee
 Sumber: KP-02 (2013:58)

Koefisien debit efektif C_e adalah hasil C_0, C_1 dan C_2 ($C_e = C_0 C_1 C_2$) (2-58)

- C_0 adalah konstanta (= 1,30),
- C_1 adalah fungsi p/hd dan H_1/hd' dan
- C_2 adalah faktor koreksi untuk permukaan hulu.



Gambar 2.34 Faktor Pengurangan Aliran Tenggelam Sebagai Fungsi p_2/H_1 dan H_2/H_1
 Sumber: KP-02 (2013:59)

2.6.2. Bangunan Pengambilan (*Intake*)

Bangunan pengambilan atau *intake* adalah suatu unit yang berfungsi untuk menyadap atau mengambil air dari badan sungai sesuai dengan debit yang diperlukan untuk pengolahan. Variasi kualitas air permukaan sangat berarti dalam menentukan titik pengambilan air. Dimana terdapat adanya variasi yang konstan (tidak berfluktuasi), di tempat seperti inilah merupakan titik pengambilan yang diharapkan.

Analisa kualitas air permukaan pada setiap bagian penampang di titik yang dinilai cocok untuk pengambilan air sangat penting bagi penetapan lokasi intake, terutama intake langsung. Dan analisa kualitas pada bagian air permukaan horisontal sangat pokok untuk menetapkan titik pengambilan semua jenis intake.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan intake:

1. Intake sebaiknya terletak ditempat dimana tidak ada aliran deras yang bisa membahayakan intake.
2. Tanah disekitar intake seharusnya di cukup stabil dan tidak mudah terkena erosi.
3. Inlet, sebaiknya berada dibawah permukaan badan air untuk mencegah masuknya benda-benda terapung. Disamping itu inlet sebaiknya terletak cukup diatas air.
4. Intake seharusnya terletak jauh sebelum sumber kontaminasi.
5. Intake sebaiknya terletak di hulu sungai suatu kota.
6. Intake sebaiknya dilengkapi dengan saringan kasar yang selalu dibersihkan. Ujung pipa pengambilan air yang berhubungan dengan pompa sebaiknya diberi saringan (stariner)
7. Untuk muka air yang berfluktuasi, inlet yang ke sumur pengumpul sebaiknya dibuat pada beberapa level.
8. Jika permukaan badan air selalu konstan dan tebing sungai terendam air, maka dapat dibuat didekat sungai.



Gambar 2.35 Bangunan Pengambilan (*intake*)
Sumber: JICA (2009:2-2)

Rumus-rumus berikut dapat memperkirakan kecepatan yang akan melalui bangunan pengambilan

$$V^2 \geq 32 \left(\frac{h}{d}\right)^{\frac{1}{3}} d \quad (2-59)$$

dengan:

V = kecepatan rata-rata (m/detik)

h = kedalaman air (meter)

d = diameter butir (meter)

- Dalam kondisi biasa, rumus ini dapat disederhanakan menjadi

$$v \approx 10d^{0,5} \quad (2-60)$$

dengan:

V = kecepatan rata-rata (m/detik)

d = diameter butir (meter)

- Apabila kecepatan masuk sebesar 1,0 – 2,0 m/detik yang merupakan besaran perencanaan normal, dapat diharapkan butir-butir berdiameter 0,01 sampai 0,04 meter dapat masuk.

$$Q = \mu b a \sqrt{2gz} \quad (2-61)$$

dengan:

Q = debit (m^3/detik)

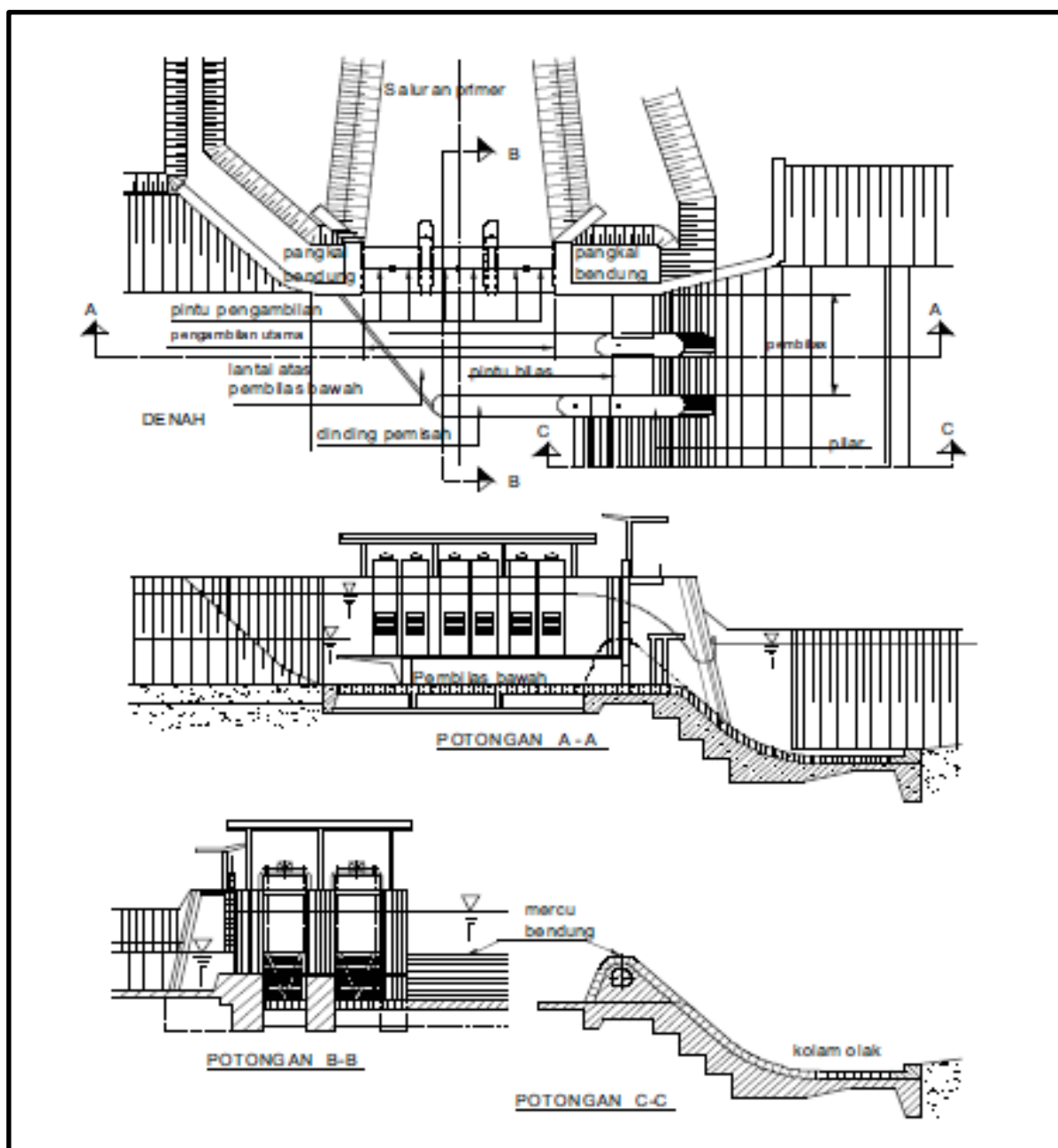
μ = koefisien debit ($\mu = 80$)

b = lebar bukaan (meter)

a = tinggi bukaan (meter)

g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/detik}^2$)

z = kehilangan tinggi energi pada bukaan (meter)



Gambar 2.36 Skema Struktur Lengkap Bangunan Intake
Sumber: IMIDAP (2009:9)


2.6.3. Saluran Pembawa (*Head Race*)

Waterway adalah saluran penghubung antara saluran pengambilan (*intake*) menuju bak penenang (*headpond*). Dalam perencanaan waterway biasanya mengikuti suatu kontur dalam perencanaannya. Ada berbagai macam saluran pembawa, antara lain terowongan, saluran terbuka dan saluran tertutup. Konstruksi saluran pembawa dapat berupa pasangan batu kali atau hanya berupa tanah yang digali. Pada saluran yang panjang perlu dilengkapi dengan saluran pelimpah pada jarak tertentu. Ini untuk menjaga jika terjadi banjir maka kelebihan air akan terbuang melalui saluran.



Gambar 2.37 Saluran Pembawa (*Head Race*)
Sumber: JICA (2009:2-3)

Tabel 2.13 Tipe-tipe Saluran Pembawa untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil

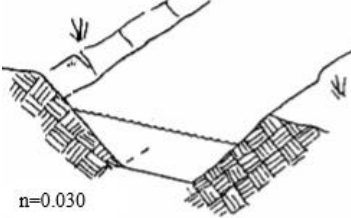
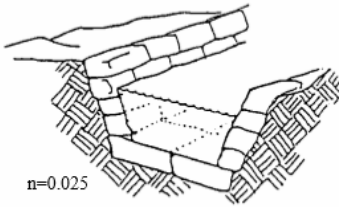
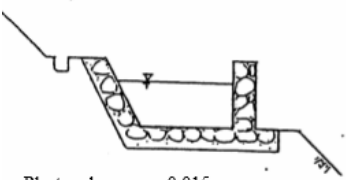
| Tipe | Gambar | Keuntungan dan Permasalahan | Kekhasan Struktur |
|-----------------|--|---|---|
| Saluran terbuka |  | <p>< Keuntungan ></p> <ul style="list-style-type: none"> • Relatif murah • Mudah mengkonstruksinya <p>< Permasalahan ></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan aliran sedimen dari lereng di atasnya • Tingginya tingkat jatuh daun – daunan, dll. | <ul style="list-style-type: none"> • Saluran tanah sederhana • Jalur saluran (jalur pasangan batu basah atau kering, jalur beton) • Pagar Saluran (terbuat dari kayu, beton atau tembaga) • Jalur saluran berbentuk lembaran • Saluran berbentuk setengah tabung (seperti pipa – pipa yang berbelok - belok, dll) |

Sumber: JICA (2009:6-14)

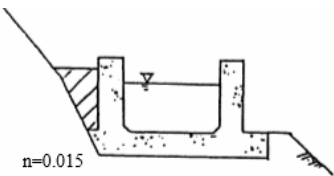
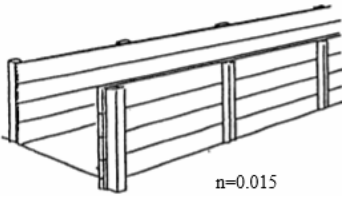
Tabel 2.14 Struktur Dasar Saluran untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil

| Tipe | Garis Besar Diagram | Keuntungan dan Permasalahan |
|-------------------------|---------------------|---|
| Saluran tanah sederhana | | <p>< Keuntungan ></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mudah dikonstruksi • Murah • Mudah diperbaiki <p>< Permasalahan ></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mudah mengalami |

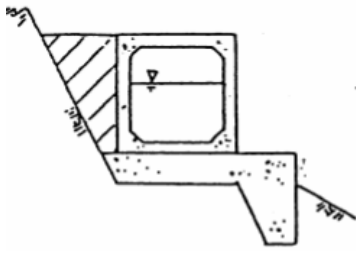
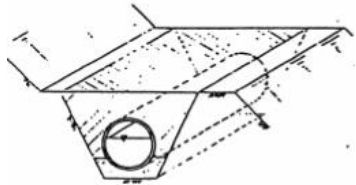
Lanjutan Tabel 2.14 Struktur Dasar Saluran untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| |  <p>n=0.030</p> | <p>kerusakan pada dindingnya • Tidak dapat diterapkan pada tanah yang tinggi tingkat permeabelnya (permeable = mudah ditembus air) • Sulit untuk membersihkan timbunan sedimennya.</p> |
| Saluran lajur (batu dan batu keras) |  <p>n=0.025</p> | <p>< Keuntungan > • Konstruksinya relatif mudah • Dapat dibangun dengan menggunakan bahan - bahan lokal • Ketahanan tinggi terhadap gerusan • Relatif mudah diperbaiki</p> <p>< Permasalahan > Tidak dapat diterapkan pada tanah yang tinggi tingkat permeabelnya (permeable = mudah ditembus air)</p> |
| Saluran pasangan batu basah |  <p>Plastered : n=0.015 Non Plastered : n=0.020</p> | <p>< Keuntungan > • Dapat dibangun dengan menggunakan bahan - bahan lokal • Ketahanan yang tinggi terhadap gerusan • Dapat diterapkan pada tanah yang tinggi tingkat permeabelnya (permeable = mudah ditembus air)</p> |

Lanjutan Tabel 2.14 Struktur Dasar Saluran untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil

| | | |
|-----------------------|---|---|
| | | <p>< Permasalahan > • Lebih mahal daripada saluran tanah sederhana atau saluran pasangan batu kering (saluran lajur batu/batu keras). • Relatif banyak memerlukan tenaga kerja Saluran</p> |
| Saluran beton |  | <p>< Keuntungan > • Tingkat kebebasan yang cukup tinggi untuk desain potongan melintang.</p> <p>< Permasalahan > • Konstruksi sulit jika diameter dalamnya kecil • Masa konstruksinya relatif lama</p> |
| Saluran berpagar kayu |  | <p>< Keuntungan > • Lebih murah bila dibandingkan dengan saluran dari beton. • Susunannya fleksible jika terjadi deformasi tanah kecil.</p> <p>< Permasalahan > • Penggunaan yang terbatas jika menggunakan fondasi tanah (earth) • Kurang cocok untuk cross - section yang cukup besar. • Sulit untuk memastikan</p> |

Lanjutan Tabel 2.14 Struktur Dasar Saluran untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil

| | | |
|---------------------|--|--|
| | | <p>kerapatan air (water-tightness) yang sempurna.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mudah rusak |
| Saluran Box Culvert |  <p>n=0.015</p> | <p>< Keuntungan > •</p> <p>Konstruksi yang mudah bila dibandingkan dengan pipa hume pada lereng curam dengan kemiringan potongan melintang •</p> <p>Periode konstruksi yang relatif singkat dapat diterapkan pada potongan melintang yang kecil, jika produk siap pakainya digunakan •</p> <p>Kaya dengan berbagai jenis variasi produk siap pakai..</p> <p>< Permasalahan > •</p> <p>Beban yang berat •</p> <p>Biaya transportasi yang cukup tinggi, jika menggunakan produk siap pakai. •</p> <p>Periode konstruksi yang cukup lama, jika dibuat langsung di daerah yang bersangkutan.</p> |
| Saluran pipa hume |  <p>n=0.015</p> | <p>< Keuntungan > •</p> <p>Mudah dikonstruksi di daerah tidak terlalu curam •</p> <p>Periode konstruksinya relatif singkat •</p> <p>Ketahanan yang tinggi •</p> <p>Dapat</p> |

Lanjutan Tabel 2.14 Struktur Dasar Saluran untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil

| | | |
|--|--|---|
| | | <p>diterapkan pada potongan melintang yang kecil •</p> <p>Memungkinkan untuk konstruksi yang tinggi dengan bentangan yang pendek</p> <p>< Permasalahan > • Biaya transportasi yang cukup tinggi dan beban yang berat.</p> |
|--|--|---|

Sumber: JICA (2009:6-15)

Penampang melintang dan kemiringan dapat ditentukan dengan menyesuaikan karakteristik lokasi sehingga dapat ditentukan turbin yang digunakan. Pada umumnya ukuran dari penampang melintang sangat bersangkutan dengan kemiringan saluran. Kemiringan dari saluran pembawa harus direncanakan sedemikian rupa sehingga didapatkan headloss seminimal mungkin. (Perbedaan antara muka air di intake dan bak penenang). Tetapi hal ini akan menyebabkan kecepatan yang lebih rendah dan potongan melintang yang lebih besar. Berikut merupakan persamaan yang digunakan (JICA, 2009:6-16):

$$Qd = \frac{A \times R^{\frac{2}{3}} \times S_L^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (2-62)$$

dengan:

Qd = Debit Rencana (m³/detik)

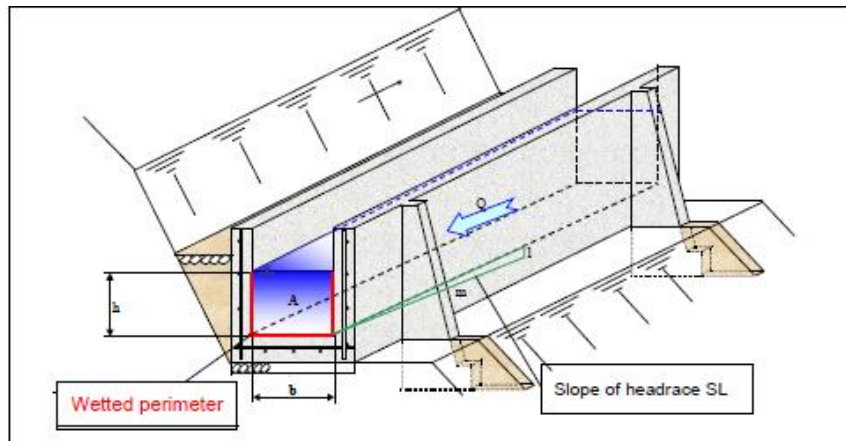
A = Luasan Dimensi (m²)

R = A/P (meter)

P = Keliling Basah (m)

SL = Kemiringan Saluran

n = Koefisien Kekasaran



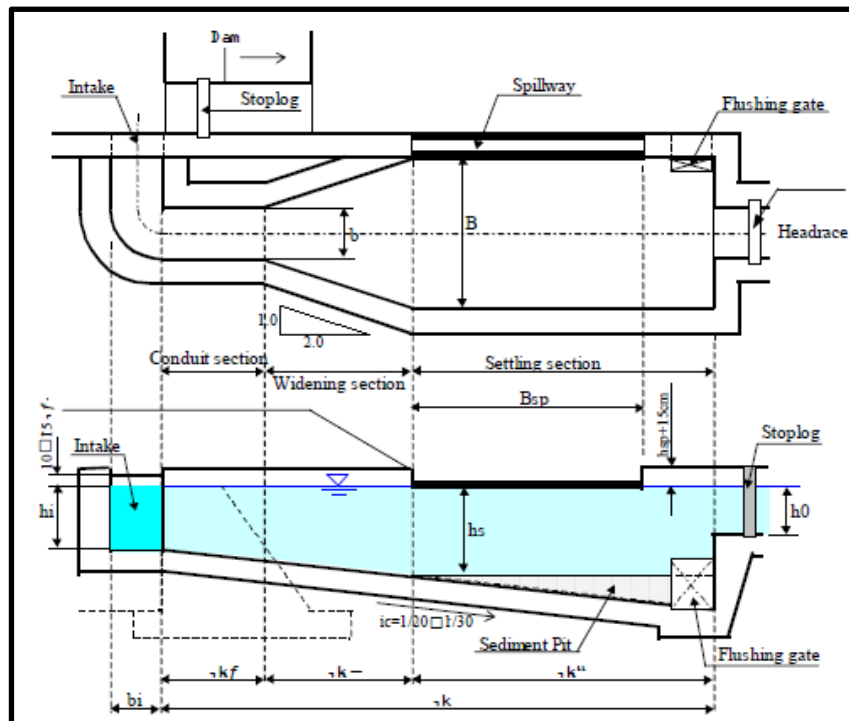
Gambar 2.38 Skema Penampang Melintang Saluran Pembawa
Sumber: JICA (2009:6-17)

2.6.4. Bak Pengendap (*Settling Basi*)

Bangunan Bak pengendap merupakan bangunan yang digunakan untuk memindahkan partikel-partikel pasir dari air. Fungsi dari bak pengendap adalah sangat penting untuk melindungi komponen-komponen berikutnya dari dampak pasir. Bak pengendap dibuat dengan memperdalam dan memperlebar sebagian saluran pembawa dan menambahnya dengan beberapa komponen, seperti saluran pelimpah, saluran penguras dan sekaligus pintu pengurasnya.



Gambar 2.39 Bak Pengendap (*Settling Basi*)
Sumber: JICA (2009:2-2)



Gambar 2.40 Skema Bak Pengendap
Sumber: JICA (2009:6-11)

Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam perhitungan Bak Pengendap (JICA, 2009):

$$H_{o1} = H^* \times 0,1 (SLs)^{0,5} \quad (2-63)$$

dengan:

H^* = (Gambar 2.41)

SLs = Kemiringan Pada Ujung Akhir Head Race

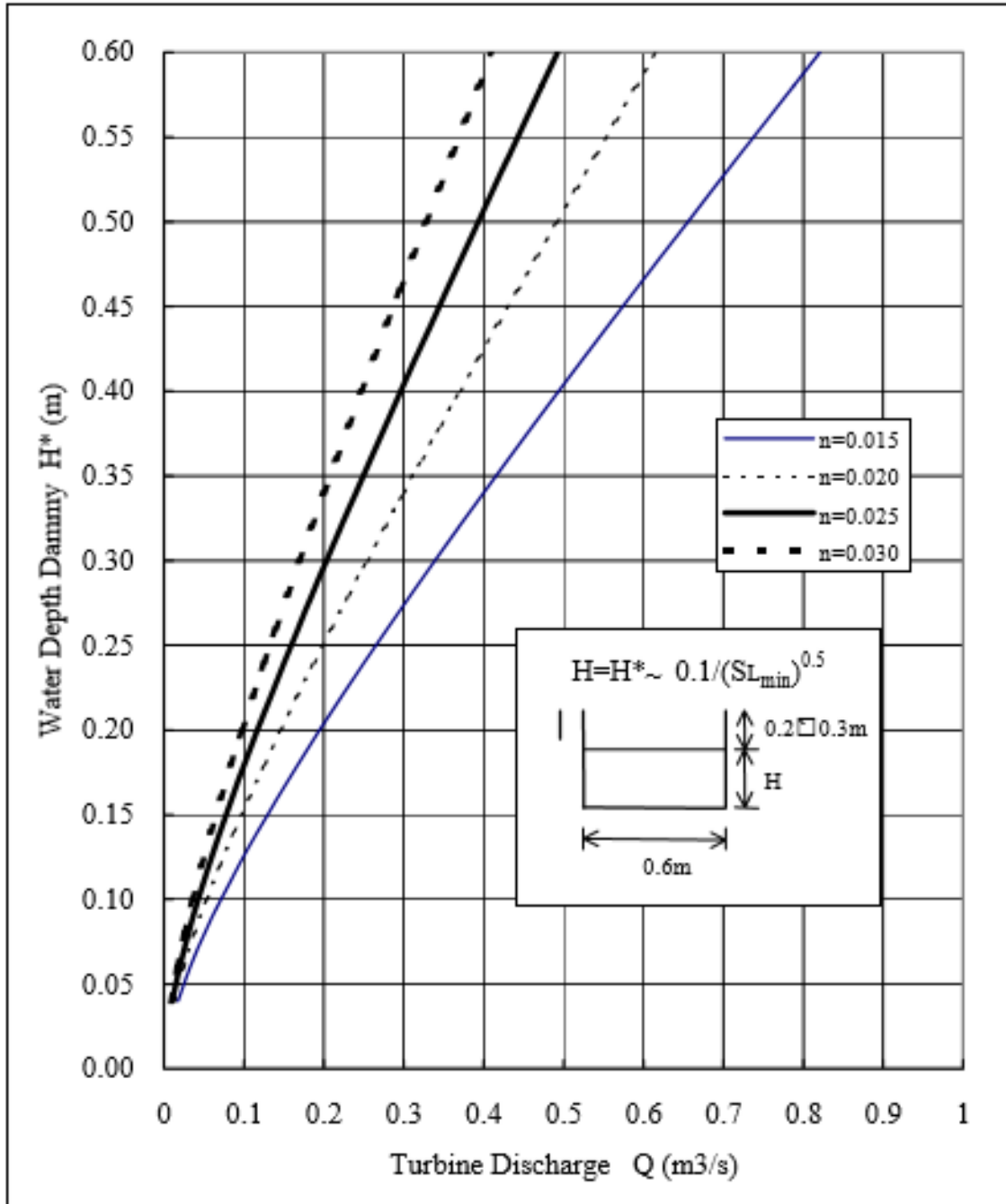
$$H_{o2} = \{(\alpha \times Qd^2)/(g \times B^2)\}^{1/3} \quad (2-64)$$

α = 1,1

Qd = Debit Rencana ($m^3/detik$)

g = 9,81 $m/detik^2$

B = Lebar Headrace (meter)



Gambar 2.41 Menentukan Bagian Melintang
Sumber: JICA (2009:6-31)

$$\text{Jika } h_{o1} < h_{o2}, h_{o1} = h_{o2} \quad (2-65)$$

$$\text{Jika } h_{o1} \leq h_{o2}, h_o = h_{o2} \quad (2-66)$$

Setiap bagian dari bak pengendap memiliki fungsi sebagai berikut (JICA, 2009:6-12):

1. Bagian Penyalur

Bagian penyalur menghubungkan antara intake dengan bak pengendap. Bagian penyalur harus diperkirakan panjangnya sesuai dengan kebutuhan.

2. Bagian Melebar

Bagian melebar akan mengatur aliran air dan dapat mencegah terjadinya pusaran dan aliran turbulen, serta mengurangi kecepatan aliran masuk ke bak pengendap untuk menentukan kecepatan sebelumnya.

3. Bagian Pengendap

Fungsi dari bagian pengendap adalah untuk mengalirkan air dan mengendapkan sedimen yang di atas dari ukuran dan panjang dari sedimen yang disepakati. Kemudian dihitung dengan menggunakan formula yang didasarkan pada hubungan antara kecepatan pengendapan, kecepatan aliran dalam bak pengendap dan kedalaman air. Panjang dari bak pengendap (L_s) biasanya ditentukan berdasarkan sebuah margin untuk menghitung dua kali panjang dengan menggunakan formula

$$l \geq \frac{V}{U} \times h_s \quad (2-67)$$

$$L_s = 2 \times l \quad (2-68)$$

dengan:

l = Panjang minimum bak pengendap (m)

h_s = kedalaman air bak pengendap (m)

U = kecepatan marginal pengendapan untuk endapan yang akan diendapkan (m/s), umumnya sekitar 0,1 m/detik untuk target ukuran butiran sekitar 0,5 – 1 mm.

V = rata-rata kecepatan aliran di bak pengendap (m/detik)

Pada umumnya sekitar 0,3 meter/detik tetapi dapat ditoleransi sampai dengan 0,6 meter/detik pada kasus dimana lebar bak pengendap dibatasi.

$$V = Q_d / (B \times h_s) \quad (2-69)$$

dengan:

Q_d = desain debit ($m^3/detik$)

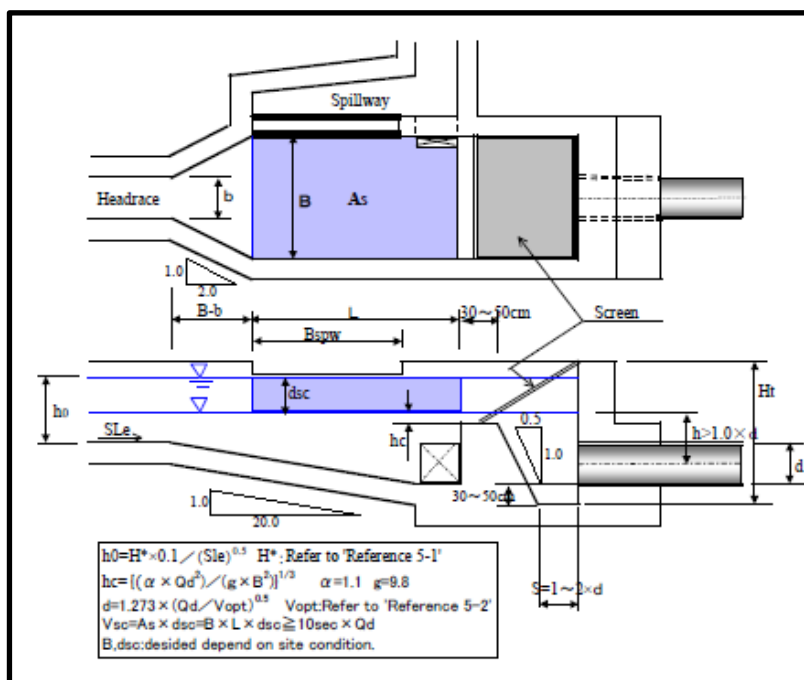
B = lebar bak pengendap (meter)

2.6.5. Bak Penenang (*Forebay*)

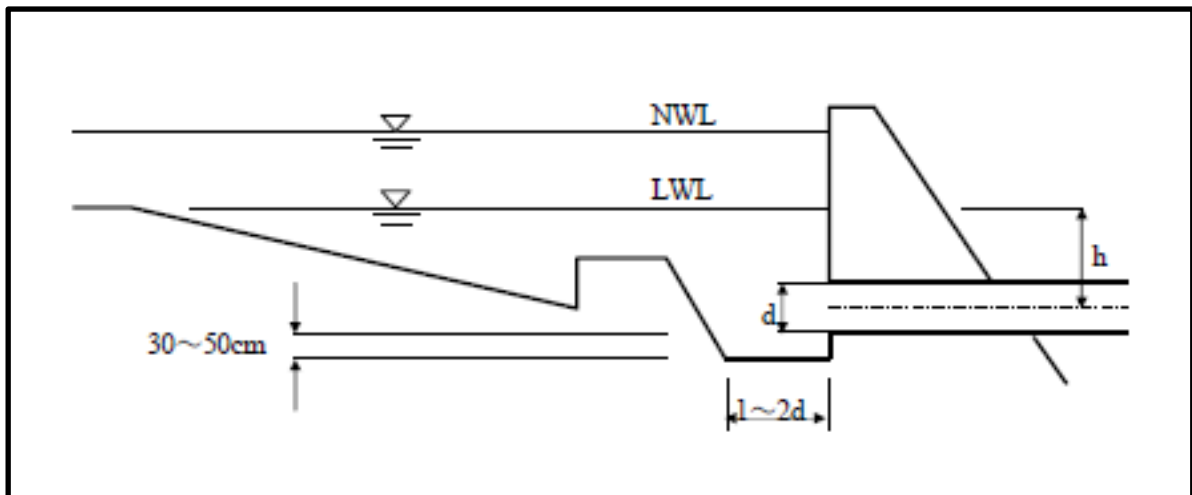
Bak penenang berfungsi untuk mengontrol perbedaan debit dalam pipa pesat (penstock) dan saluran pembawa karena fluktuasi beban, disamping itu juga sebagai pemindah sampah terakhir (tanah, pasir, kayu yang mengapung) dalam air yang mengalir.



Gambar 2.42 Bak Penenang (*Head Tank*)
Sumber: JICA (2009:2-4)



Gambar 2.43 Skema Bak Penenang
Sumber: JICA (2009:6-19)



Gambar 2.44 Skema Penampang Melintang Bak Penenang
Sumber: JICA (2009:6-22)

Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam perhitungan Bak Penenang (JICA, 2009):

$$V_{sc} = A_s \times d_{sc} = B \times L \times d_{sc} \quad (2-70)$$

dengan:

V_{sc} = Kapasitas Bak Penenang (m^3)

A_s = Luas bak penenang (m^2)

B = Lebar bak penenang (m)

L = Panjang bak penenang (m)

d_{sc} = kedalaman air dari kedalaman aliran yang sama dari sebuah saluran ketika menggunakan debit maksimum (h_0) menuju kedalaman kritis dari ujung tanggul untuk menjebak pasir dalam sebuah bak penenang (h_c)

- Sebuah bak penenang biasanya diperlukan pada saat transisi antara saluran pembawa dengan pipa pesat. Untuk menangani arus balik pada pipa pesat saat pengoperasian pada rumah pembangkit, maka dapat dipergitungkan volume bak penenang dengan persamaan berikut: (Indian, 2008:10)

$$V = Q_p \times t$$

dengan:

V = kapasitas bak penenang (m^3)

Q_p = debit pembangkit ($m^3/detik$)

t = waktu proses pemberhentian turbin (detik)

Untuk memenuhi fungsi dan operasinya, kapasitas minimum pada bak penenang disimpang sesuai dengan penyimpanan 2 sampai 3 menit dari debit desain dengan kedalaman operasi 2 sampai 3 meter. Dimensi bak penenang sangat disesuaikan untuk memenuhi volume penyimpanan yang dibutuhkan dan mengakomodasi aplikasinya. Dengan demikian, parameter desain hidrolik bak penenang ditentukan sebagai berikut: (Indian, 2008:92)

- a. Lebar bak penenang ditentukan sesuai dengan kondisi topografi. Dalam kasus medan yang curam bak penenang bias memiliki lebar kurang dan lebih panjang dan harus sejajar sepanjang kontur. Untuk pipa pesat juga bias dipasang tegak lurus dengan panjang bak penenang tergantung pada logai power house.
 - b. Kedalaman aliran air maksimum di bak menenang umumnya 2 m sampai 3 m dibawah LWL dengan kecepatan aliran rata-rata kurang dari 0,5 m/detik atau bahkan lebih sedikit sehingga diharapkan dapat mengendapkan sedimen.
 - c. Setelah memperbaiki lebar dan kedalaman bak penenang, panjangnya bias ditentukan harus sejajar dengan kontur yang ada.
 - d. Untuk mencapai penggenangan yang dibutuhkan, bagian bawah lantai bak penenang biasanya tertekan di bawah lokasi pipa pesat. Lantai bak penenang dapat di desain dengan kedalaman sekitar 0,5 sampai 0,75 meter.
 - e. Untuk desain pelimpah pada bak penenang dapat ditentukan tinggi pelimpah sekitar 0,3 sampai 0,5 meter di atas NWL untuk membuang debit yang balik dari pipa pesat secara tiba-tiba saat pengoperasian rumah pembangkit dihentikan.
- Menentukan kedalaman air pada inlet penstock harus diatas nilai berikut untuk mencegah terjadinya aliran turbulen (JICA, 2009):

$$d \leq 1,0 \text{ m} \rightarrow h \geq 1,0 d \quad (2-71)$$

$$d < 1,0 \text{ m} \rightarrow h \geq d^2 \quad (2-72)$$

dengan:

h = kedalaman air dari pusat inlet ke level air terendah dari bak penenang = seluruh kedalaman air (m)

d = diameter dalam dari penstock (m)

- Menentukan Instalasi pipa lubang angin di belakang pintu bak penenang untuk mencegah rusaknya saluran pensstock. Dalam kasus ini, formula empiris dibawah ini digunakan untuk menentukan dimensi pipa lubang angin.

$$d = 0,0068 \left(\frac{P^2 L}{H^2} \right)^{0,273} \quad (2-73)$$

dengan:

d = diameter dalam dari pipa lubang angin (meter)

P = nilai output dari turbin (kW)

L = panjang total pipa lubang angin (meter)

H = head (meter)

- Menentukan Spillway (pelimpah) akan dipasang pada bak penenang agar kelebihan kuantitas air dialirkan ke sungai dengan aman ketika turbin dihentikan. Ukuran dari spillway dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Qd = C \times B_{spw} \times h_{spw}^{1,5} \rightarrow h_{spw} = \left\{ \frac{Qd}{C \times B_{spw}} \right\}^{1/1,5} \quad (2-74)$$

dengan:

Qd = debit desain (m³/detik)

C = koefisien, biasanya C = 1,8

B_{spw} = Lebar spillway (m)

h_{spw} = kedalaman spillway (m)

2.6.6. Penyaring (*Trashrack*)

Guna mencegah masuknya benda-beda hanyut, puncak bukaan maka perlu direncanakan penyaring. Penyaring direncanakan dengan persamaan kehilangan tinggi (Hf) sebagai berikut: (Sumber: KP-02 (2013:115))

$$Hf = K \times \left(\frac{b}{(n+1)b \times \frac{h}{\sin \infty}} \right)^{\frac{4}{3}} \times \frac{(v^2)}{2g} \times \sin \infty \quad (2-75)$$

dengan:

K = factor bentuk (2,4)

b = jarak antara batang (b > 50 mm)

n = jumlah batang

s = ketebalan batang saringan (0,8" – 1,0")

h = tinggi bukaan pintu maksimum (m)

∞ = kemiringan saringan (30° – 60°)

Menentukan nilai kecepatan aliran dengan kecepatan (V) maksimal yang diizinkan 1 meter/detik dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{Q}{(n+1)b x \frac{h}{\sin \alpha}} \quad (2-76)$$

dimana:

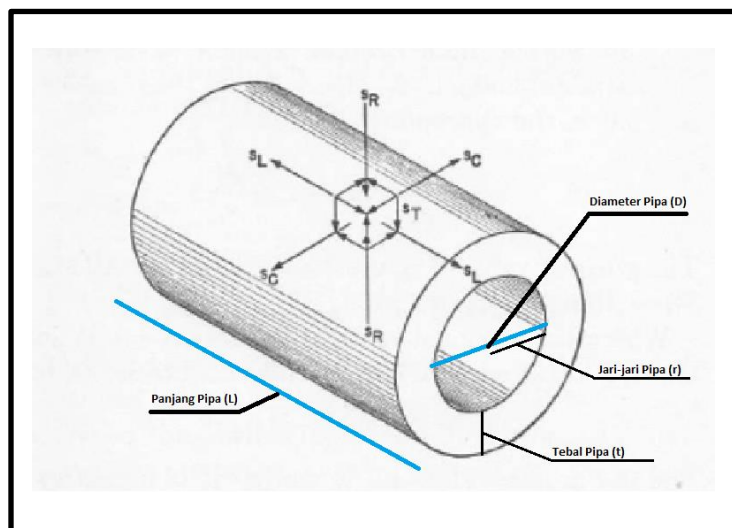
Q = debit rencana ($m^3/detik$)

2.6.7. Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat (*penstock*) merupakan pipa yang direncanakan untuk dapat menahan tekanan tinggi yang berfungsi untuk mengalirkan air dari kolam penampungan menuju turbin.



Gambar 2.45 Pipa Pesat (*Penstock*)
Sumber: JICA (2009:2-4)



Gambar 2.46 Skema Pipa
Sumber: Penulis, 2017

2.6.7.1. Diameter Pipa Pesat

Untuk mendapatkan diameter pipa pesat dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$d = 2,69 \times \left(\frac{n^2 \times Q^2 \times L}{H} \right)^{0,1875} \quad (2-77)$$

dengan:

d = diameter pipa pesat (mm)

n = nilai kekasaran Manning

Q = debit pembangkit (m³/dt)

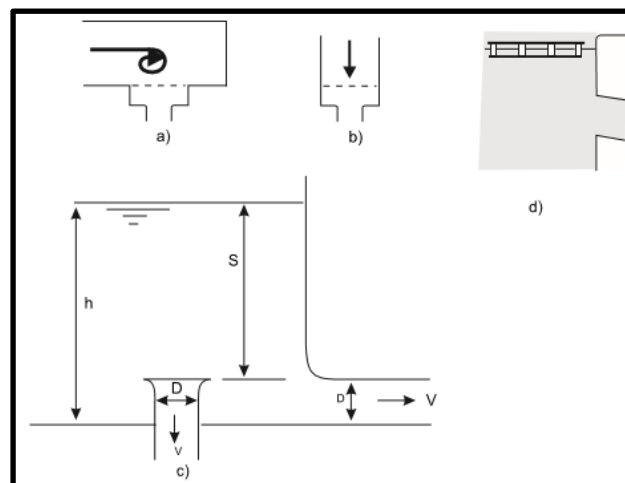
L = panjang pipa pesat (m)

H = tinggi jatuh total/kotor (m)

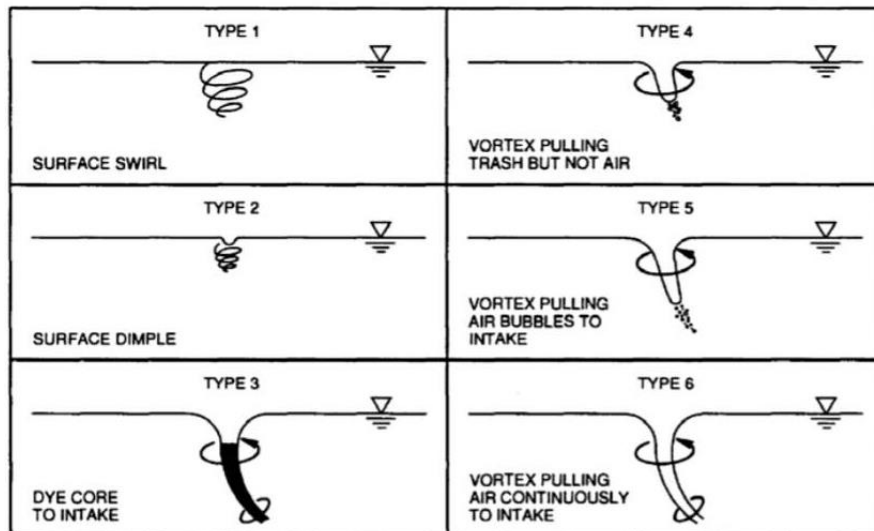
Untuk fenomena vortex dianalisa berdasarkan perencanaan inlet pipa pesat terkait dengan kedalaman minimum operasi (LWL). Kedalaman tenggelam harus lebih besar dari nilai “s” ($H_t > s$) maka aman terhadap bahaya *vorticity* yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$H_t = E.LWL - E.Dasar Pipa - Diameter Pipa (D) \quad (2-78)$$

$$s = c. v. D^{0.5} \quad (2-79)$$



Gambar 2.48 Sketsa Vortisitas
Sumber : ESHA (1998:119)



Gambar 2.49 Tipe Vortisitas
Sumber : ESHA (1988:120)

- Metode Gordon

$$Ht \geq c V\sqrt{D} \quad (2-80)$$

- Metode Knauss

$$Ht \geq D \left(1 + 2,3 \frac{V}{\sqrt{gD}}\right) \quad (2-81)$$

- Metode Rohan

$$Ht \geq 1,474 V^{0,48} D^{0,76} \quad (2-82)$$

dengan:

$c = 0,7245$ (inlet asimetris) dan $0,5434$ (inlet simetris)

v = kecepatan air dalam bak (m/dt)

D = diameter pipa pesat (m)

2.6.7.2. Jarak Tumpuan Pipa Pesat

Sedangkan untuk menentukan tebal pipa pesat digunakan persamaan *Cylinder formulae* (Varshney, 1977:411):

$$P = \rho \times g \times h \quad (2-83)$$

$$t = \frac{P \times r \times 1000}{q} \quad (2-84)$$

dengan:

t = tebal pipa pesat (m)

P = gaya (ton/m^2)

r = jari-jari pipa pesat (m)

q = tegangan material pipa pesat yang digunakan (ton/m²)

ρ = massa jenis air (ton/m³)

Untuk menentukan kedalaman minimum pipa dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$t_0 \geq \frac{P \times d}{2 \times \theta n \times \eta} + \delta t \quad (2-85)$$

$$t_0 \geq 0,4 \text{ cm atau} \quad (2-86)$$

$$t_0 \geq ((d + 80)/40 \text{ cm}) \quad (2-87)$$

dengan:

t_0 = ketebalan minimum pipa

P = desain tekanan air + water hammer (kgf/cm²)

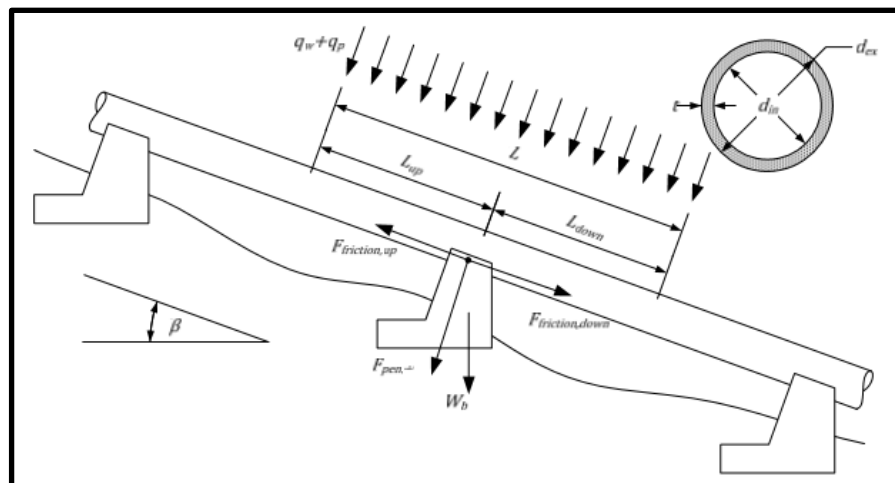
d = diameter dalam (cm)

θn = tegangan yang dapat diterima (kgf/cm²)

η = efisiensi pengelasan (0,85-0,9)

δt = margin (pada umumnya (0,15 cm)

2.6.7.3. Jarak Tumpuan Pipa Pesat



Gambar 2.50 Tumpuan Pipa Pesat

Sumber : Arduser (2009:111)

Untuk enentukan jarak antar tumpuan pada bangunan pipa pesat dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$L = 182,61 \times \sqrt[3]{\frac{(D+0,0147)^4 - D^4}{P}} \quad (2-88)$$

$$P = 0,25 \pi \cdot d^2 \times \rho_{\text{air}} \quad (2-89)$$

2.6.8. Saluran Pembuang (*Tail Race*)

Saluran pembuang (*tail race*) adalah sebuah saluran yang dilalui oleh air yang keluar dari turbin air, kemudian kembali kesungai. Tinggi TWL tergantung dari debit air yang keluar dari turbin, jenis penampang serta dimensi penampang saluran pembuang. Saluran ini bersatu dengan pembangkit dan aliran sungai.

Jenis penampang saluran ada tiga yaitu saluran segi empat, trapesium, dan segitiga. Namun penampang saluran yang paling baik adalah penampang trapesium dan kemiringan talud dinding saluran (m) dapat diambil sebesar (patty, 1995:47):

- a. Saluran tanah (1:1,5 hingga 1:2)
- b. Saluran pasangan batu/peton (1:1 hingga 1:2)

Debit air yang keluar dari turbin yang berfluktuasi mengakibatkan perubahan tinggi air dalam saluran. Perubahan tinggi air tersebut dihitung dengan menggunakan rumus Manneing-Strickler (Patty, 1995:46):

Debit yang melalui suatu saluran tenaga dihitung sebagai berikut:

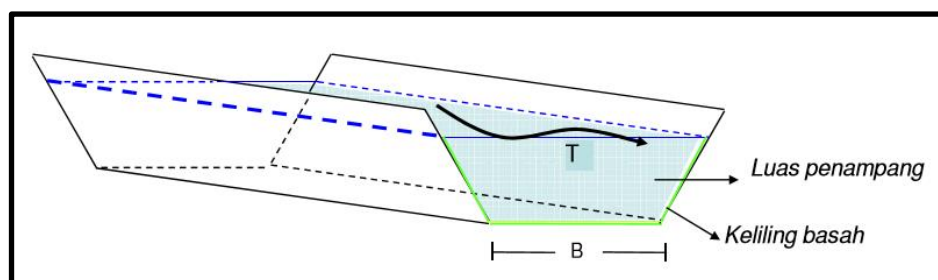
$$Q = V X A \quad (2-90)$$

Kecepatan diperoleh dengan formula Manning-Strickler:

$$V = \frac{1}{n} x - 3\sqrt{d^2} x \sqrt{S} \quad (2-91)$$

dengan:

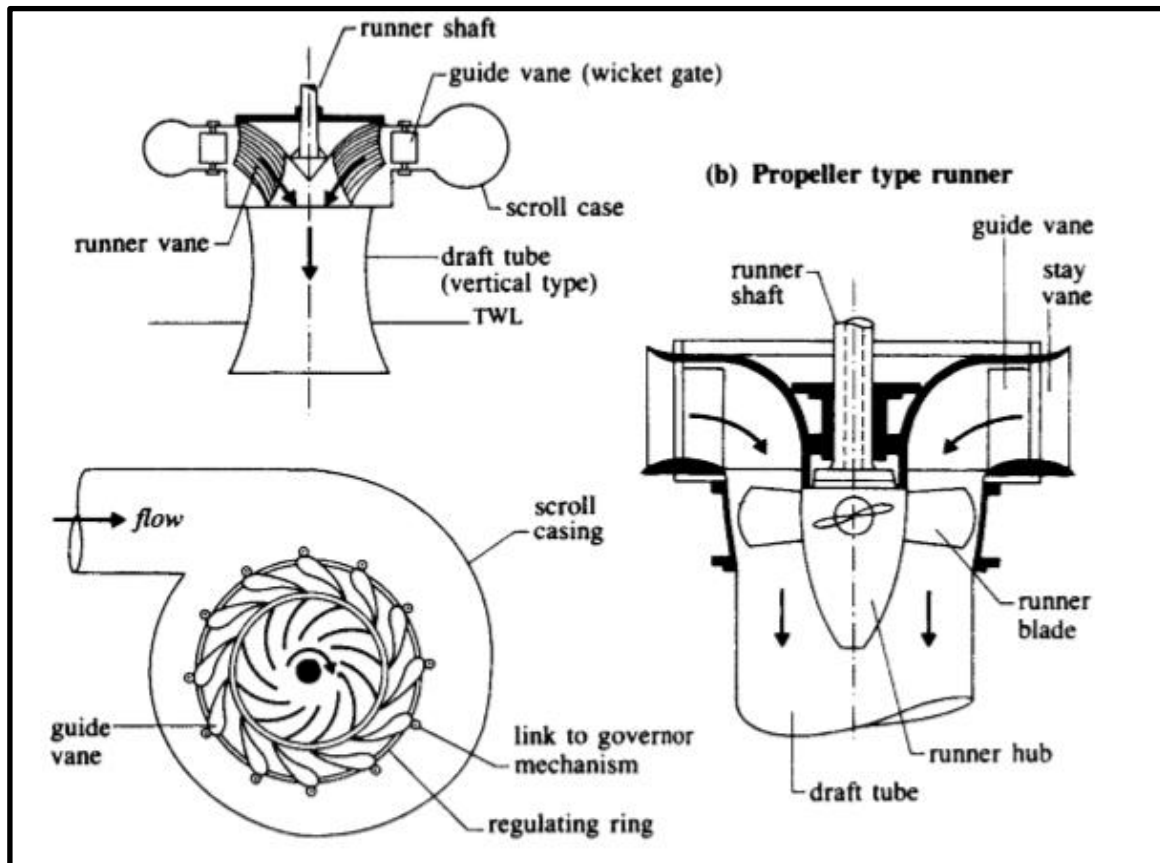
- Q = debit (m^3/dt)
- V = kecepatan rata-rata (m/dt)
- P = keliling basah saluran (m)
- A = luas penampang saluran (m^2)
- R = jari-jari hidrolis (m) = A/P
- S = kemiringan dasar saluran
- N = koefisien kekasaran maning



Gambar 2.51 Skema Saluran
Sumber: Penulis, 2017

2.6.9. Turbin dan Generator

Menurut M.M Dandekar (1991:391) turbin-turbin hidrolis, berhubungan erat dengan generato, fungsi utamanya adalah mengubah energi air menjadi energi listrik. Air dengan generator, fungsi utamanya adalah mengubah energi air menjadi listrik. Air mengalir melalui turbin, memberi tenaga pada *runner* (penggerak) dari turbin dan membuatnya beputar (energi mekanis). Energi mekanis diubah dengan generator listrik menjadi tenaga listrik.

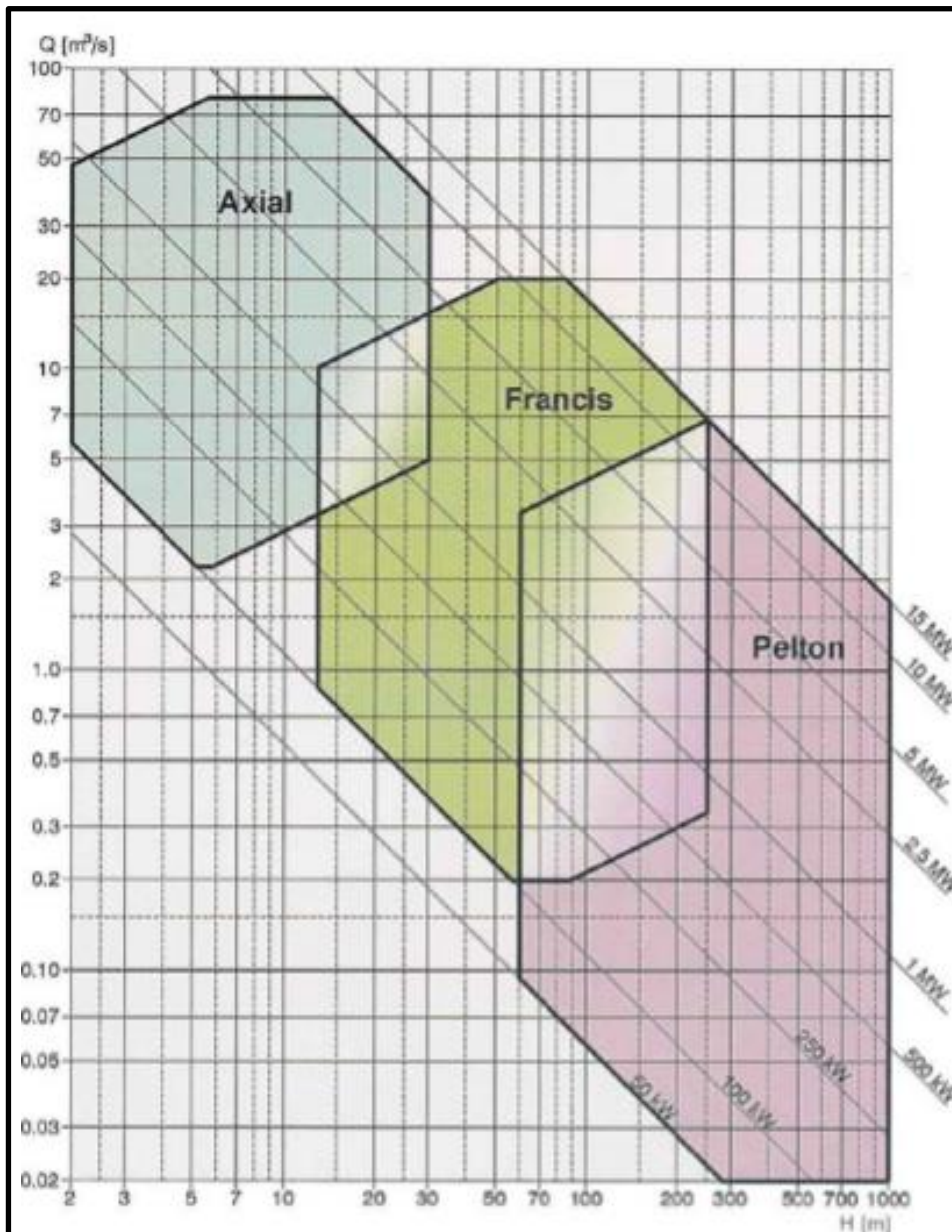


Gambar 2.52 Bagian-bagian Turbin
Sumber: Novak (2007:509)

2.6.10. Pemilihan Turbin

Turbin air sebagai fluida kerja mempunyai beberapa kalisifikasi berdasarkan pengubah momentum kerja, berdasarkan tinggi jatuh, dan berdasarkan kecepatan jenis dari turbin tersebut. Maka klasifikasi turbin yang digunakan dapat ditambahkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan momentum kerjanya, dibagi menjadi turbin impuls dan turbin reaksi.
2. Klarifikasi turbin berdasarkan tinggi jatuh disajikan pada gambar barikut:



Gambar 2.53 Grafik Penentuan Tipe Turbin Berdasarkan Tinggi Jatuh dan Daya
Sumber: ESHA (2004:162)

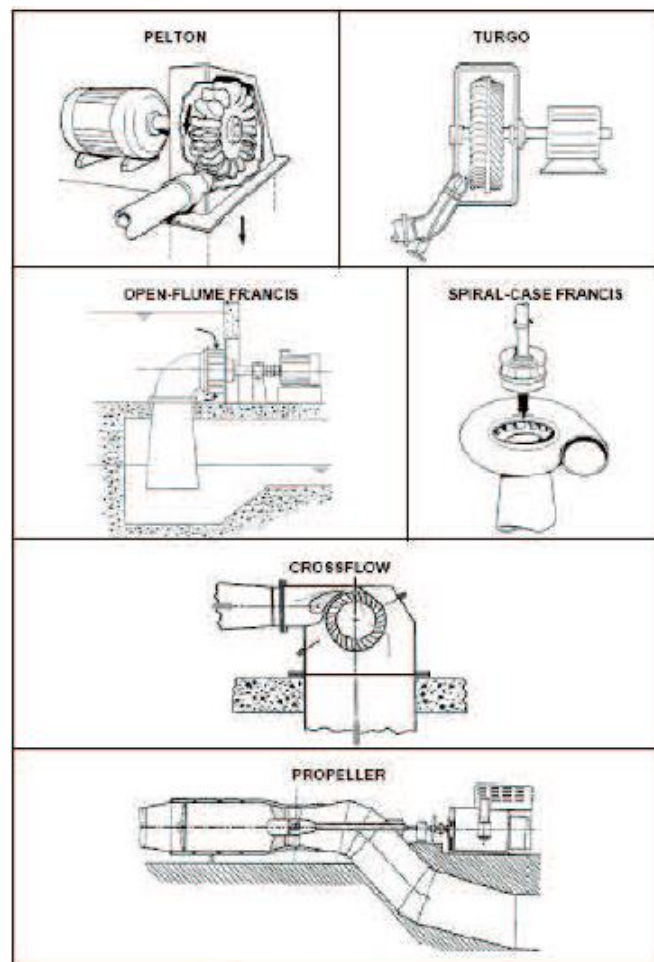
Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis, turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin implus dan turbin reaksi, perbedaan pokok kedua golongan tersebut adalah:

1. *Runner* turbin implus berputar di udara karena mendapat pancaran air. Dengan demikian maka seluruh (atau hampir seluruhnya) diubah menjadi energi kinetik untuk memutar *runner*.
2. *Runner* turbin bereaksi berputar didalam air oleh energi dalam bentuk tekanan dan kinetik.

Tabel 2.15 Jenis Turbin

| Turbine Runner | Head Pressure | | |
|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| | High | Medium | Low |
| Impluse | - Pelton - Turgo - Multi-jet | - Crossflow - Turgo - Multi-jet | Crossflow |
| Reaction | | - Francis - Punp as Turbine | - Propeller - Kaplan |

Sumber: IMIDAP (2009:8)



Gambar 2.54 Bentuk Jenis Turbin
Sumber: IMIDAP (2009:9)

2.6.11. Kecepatan Spesifik Turbin

Kecepatan Spesifik adalah besarnya putaran turbin yang geometris serupa sehingga pada $H = 1$ menghasilkan daya 1 kW (Patty, 1994:94). Kecepatan spesifikasi turbin diberikan oleh perusahaan (dengan penilaian yang lainnya) dan selalu dapat diartikan sebagai titik efisiensi maksimum. Perhitungan tepat ini menghasilkan performa turbin dalam jangkauan head dan debit tertentu. Metode yang digunakan untuk menentukan kecepatan karakteristik turbin menggunakan metode ESHA (*European Small Hydropower Association*).

Dalam perhitungan kecepatan spesifik turbin nilai putaran dasar turbin harus dicoba-coba terlebih dahulu untuk memperkirakan besarnya putaran dasar turbin maka digunakan persamaan empiris untuk mengetahui nilai kecepatan spesifik turbin ($N_{QE'}$) dengan persamaan berikut (ESHA, 2004:169):

$$\text{Turbin Pelton} \quad N_{QE'} = \frac{0,0859}{H^{0,243}} \quad (2-92)$$

$$\text{Turbin Francis} \quad N_{QE'} = \frac{1,924}{H^{0,512}} \quad (2-93)$$

$$\text{Turbin Kaplan} \quad N_{QE'} = \frac{2,294}{H^{0,486}} \quad (2-94)$$

$$\text{Turbin Propeller} \quad N_{QE'} = \frac{2,716}{H^{0,5}} \quad (2-95)$$

$$\text{Turbin Buld} \quad N_{QE'} = \frac{1,528}{H^{0,2837}} \quad (2-96)$$

Persamaan kecepatan putar turbin (n)

$$n = N_{QE'} \frac{(g \times H_{eff})^{0,75}}{Q^{0,5}} \quad (2-97)$$

dengan:

n = kecepatan putar turbin (t/s)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/detik²)

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

Q = debit yang mengalir pada turbin (m³/detik)

Tabel 2.16 Rang of D Values, Spesific Speeds and Head

| Type of runner | D | Ns | H (m) | Efficiency (%) |
|----------------|-----------|---------|--------|----------------|
| Impulse | 0,43-0,48 | 8-17 | | 85-90 |
| | | 17 | >250 | 90 |
| | | 17-30 | | 90-82 |
| Francis | 0,60-0,90 | 40-130 | | 90 |
| | | 130-350 | 25-450 | 94 |
| | | 350-452 | | 94-85 |

Lanjutan Tabel 2.16 Rang of D Values, Spesific Speeds and Head

| <i>Type of runner</i> | <i>D</i> | <i>N_s</i> | <i>H (m)</i> | <i>Efficiency (%)</i> |
|-----------------------|----------|----------------------|--------------|-----------------------|
| Propeller | 1,4-2,0 | 380-600 | <60 | 94 |
| | | 600-902 | | 94-85 |

Sumber: Novak (2007:507)

Tabel 2.17 Runway Speed and Acceptable Head Variations

| <i>Type of runner</i> | Runaway Speed (% of normal speed) | Acceptable Head Variation (% of design head) | |
|-----------------------|--------------------------------------|---|---------|
| | | Minimum | Maximum |
| Impulse | 170-190 | 50 | 125 |
| Francis | 200-220 | 50 | 150 |
| Propeller | 250-300 | 50 | 150 |

Sumber: Novak (2007:510)

2.6.12. Kavitas dan Titik Pusat Turbin

Kavitas adalah suatu kejadian yang timbul dalam aliran dengan kecepatan yang besar sehingga tekanan air menjadi lebih kecil daripada tekanan uap air maksimum ditemperatur itu. Proses ini menimbulkan gelembung-gelembung uap air yang dapat menimbulkan erosi pada turbin (Patty, 1995:99). Untuk menghindari terjadinya gejala kavitas tersebut maka perlu:

1. Memilih sudu rotor yang tepat bentuknya,
2. Memasang rotor pada posisi rendah terhadap permukaan air sebelah bawah (*tail water*),
3. Memilih kecepatan jenis yang kecil,
4. Memberi udara dalam jumlah yang tepat pada bagian atas dari pipa lepas, dan
5. Melapisi sudu rotor dengan bahan yang tahan terhadap kavitas.

Untuk menghindari terjadinya kavitas maka perlu diperhatikan dalam hal penempatan posisis turbin yaitu titik dari tinggi hisap (H_s) sampai titik pusat turbin.

Penentuan titik berat turbin atau elevasi pusat turbin dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (ESHA, 2004:169):

$$Z = TWL + (H_s) - \frac{D_3}{2} \quad (2-98)$$

dengan:

Z = titik pusat turbin (m)

TWL = elevasi *tail water level* (m)

H_s = tinggi hisap turbin (m)

D₃ = diameter runier (m)

Untuk menghitung tinggi hisap (H_s) dapat dihitung dengan persamaan berikut (ESHA, 2004:169):

$$H_s = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \sigma \times H_{eff} \quad (2-99)$$

dengan:

H_s = tinggi hisap (m)

P_{atm} = tekanan atmosfer (Pa)

P_v = tekanan uap air (Pa)

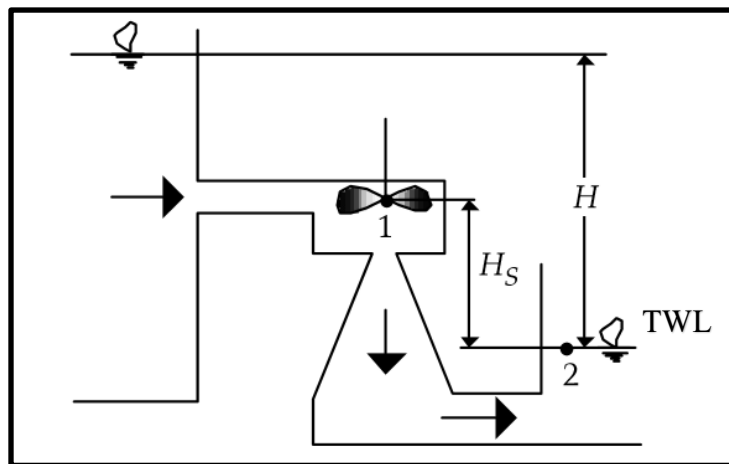
H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

σ = koef thoma

ρ = berat jenis air (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

V = kecepatan aliran (m/dt) (Celso, 2004: 178) meyarankan 2 m/dt sebagai pendekatan awal)



Gambar 2.55 Skema Turbin
Sumber: ESHA (1998:156)

Untuk mengontrol kavitasi digunakan koefisien thoma kritis (σ_c) dihitung dengan menggunakan fungsi kecepatan spesifik dengan persamaan berikut:

$$\text{Turbin Kaplan } \sigma_c = 1,5241 \cdot N_{QE}^{1,46} + \frac{V^2}{2gH} \quad (2-100)$$

$$\text{Turbin Francis } \sigma_c = 1,2715 \cdot N_{QE}^{1,41} + \frac{v^2}{2gH} \quad (2-101)$$

dengan:

σ_c = koefisien kritis thoma

N_{QE} = koefisien spesifik

H = tinggi jatuh (m)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/detik²)

Kavitasi akan terjadi pada $\sigma = \sigma_{crit}$. Besarnya kavitaso aktual dapat dihitung dengan persamaan berikut (Patty, 1995:100):

$$\sigma = \frac{H_a - H_w - H_s}{H_{eff}} \quad (2-102)$$

dengan:

σ = kavitasi

H_a = tekanan atmosfer (m)

H_w = tekanan uap iar disebelah bawah sudu rotor atau pada bagian atas pipa lepas (m)

H_s = tinggi hisap atau *draft head* (m)

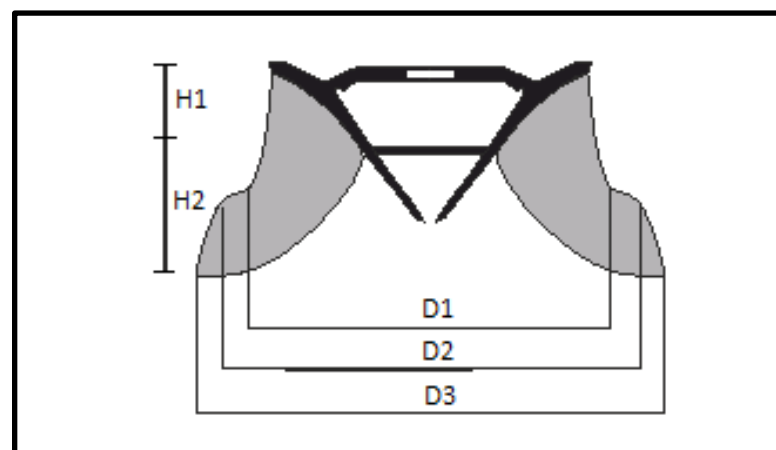
H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

2.6.13. Dimensi Turbin

Dimensi turbin yang direncanakan meliputi dimensi runner turbin, dimensi blade turbin, dimensi *spiral case* dan dimensi *draft tube*. Berikut merupakan perencanaan demensi turbin:

- Dimensi *Runner* Turbin

Dimensi *Runner* turbin Francis terdiri dari 3 bagian yaitu runner bagina luar (D_3), runner bagina tengah (D_2) dan runner bagian dalam (D_1).



Gambar 2.56 Dimensi *Runner* turbin Francis
Sumber: Ramos (2000:97)

$$K_u = 0,31 + 2,5 \times 10^{-3} \times N_s \quad (2-103)$$

$$D_3 = 84,5 \times K_u \times \frac{\sqrt{Heff}}{N'} \quad (2-104)$$

$$D_2 = D_3 \times \left(0,4 + \frac{0,095}{N_s}\right) \quad (2-105)$$

$$D_1 = \frac{D_3}{0,96 + 0,00038 \times N_s} \quad (2-106)$$

$$H_1 = D_3 \times (0,094 + 0,00025 \times N_s) \quad (2-107)$$

$$H_2 = D_3 - 0,05 + \frac{42}{N_s} \quad (2-108)$$

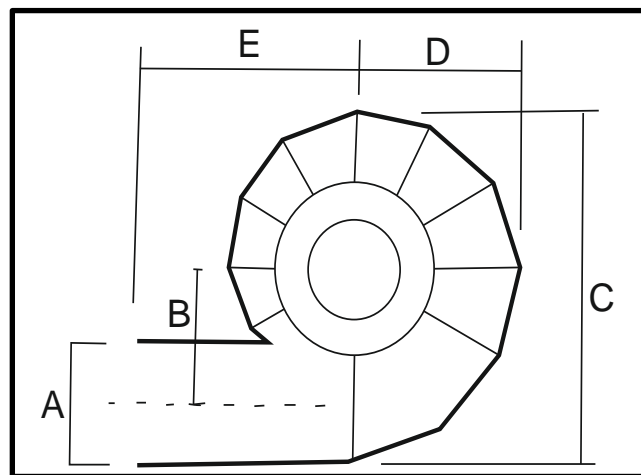
- Dimensi *Spiral Case*

Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam perhitungan dimensi *spiral case* (rumah siput) turbin Francis, ditebelkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.18 Persamaan Dimensi *Spiral Case*

| Section | Persamaan |
|---------|-----------------------|
| A | 1,15 x D ₃ |
| B | 1,50 x D ₃ |
| C | 3,80 x D ₃ |
| D | 1,90 x D ₃ |
| E | 2,0 x D ₃ |

Sumber: Sumber: Ramos (2000:99)



Gambar 2.57 Sketsa *Spiral Case* Turbin Francis
Sumber: Ramos (2000:99)

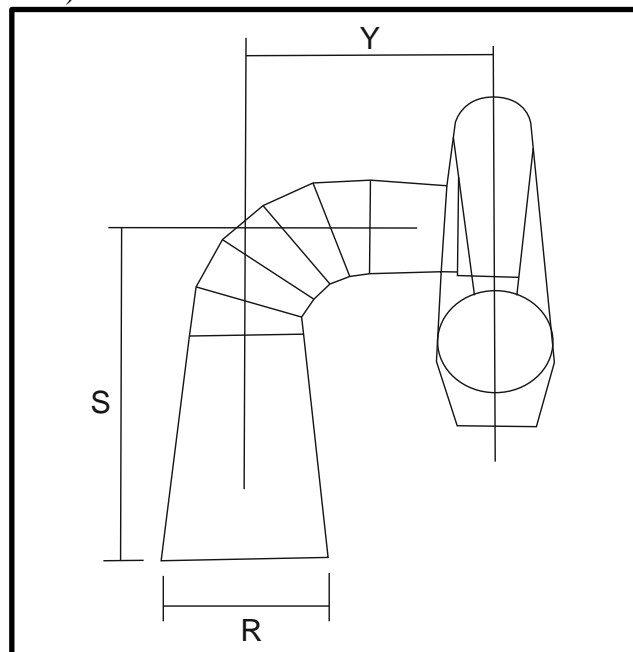
- Dimensi *Draft Tube*

Beriku merupakan tabel perhitungan dimensi *draft tube* turbin Francis horisontal:

Tabel 2.19 Perhitungan Dimensi *Draft Tube*

| Section | Persamaan |
|----------|------------------|
| R | $2,0 \times D_3$ |
| S | $5,2 \times D_3$ |
| Y | $2,6 \times D_3$ |

Sumber: Ramos (2000:99)



Gambar 2.58 Sketsa *Draft Tube* Turbin Francis
Sumber: Sumber: Ramos (2000:99)

2.6.14. Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanikal, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Generator memiliki dua bagian yaitu rotot dan stator.

Menurut Penche, generator yang digunakan untuk PLTM adalah generator dengan 3 fasa dan jenis generator dibedakan menjadi 2 yakni:

1. Generator Sinkron

Generato sinkron dilengkapi dengan listrik DC atau permanen megnet eksitasi sistem (berputar atau statis) terkait dengan regulator tegangan untuk mengontrol tegangan output sebelu, generator oleh kekuatan sistem saat generatar terhubung ke grid. Generator sinkron

dapat menjalankan sistem terisolasi dari grid dan menghasilkan listrik karena eksitasi tidak tergantung-grid.

2. Generator Tak Sinkron

Generator ini adalah motor induksi sederhana tanpa kemungkinan regulasi tegangan dan berjalan pada kecepatan berkaitan langsung dengan frekuensi sistem. Mereka menarik eksitasi dari grid, menyerap energi reaktif terputus dari grid karena tidak diserap. Mereka tidak bisa menghasilkan ketika terputus dari grid karena tidak mampu menyediakan eksitasi saat ini mereka sendiri.

Tabel 2.20 Nilai Kecepatan Generator untuk Generator Sinkron

| Jumlah Pole | | Frekuensi | | Jumlah Pole | | Frekuensi | |
|-------------|--------|-----------|----|-------------|-------|-----------|--|
| | 50v Hz | 60 hZ | | 50 Hz | 60 Hz | | |
| 2 | 3.000 | 3.600 | 16 | 375 | 450 | | |
| 4 | 1.500 | 1.800 | 18 | 333 | 400 | | |
| 6 | 1.000 | 1.200 | 20 | 300 | 360 | | |
| 8 | 750 | 900 | 22 | 272 | 327 | | |
| 10 | 600 | 720 | 24 | 250 | 300 | | |
| 12 | 500 | 600 | 26 | 231 | 277 | | |
| 14 | 428 | 540 | 28 | 214 | 257 | | |

Sumber: ESHA (2004:180)

Tabel 2.21 Hubungan Antara Daya Generator dengan Efisiensi

| <i>Rated Power (kW)</i> | <i>Best Efficiency</i> |
|-------------------------|------------------------|
| 10 | 0,910 |
| 50 | 0,940 |
| 100 | 0,950 |
| 250 | 0,955 |
| 500 | 0,960 |
| 1000 | 0,970 |

Sumber: ESHA (2004:187)

2.7. Daya dan Energi

2.7.1. Daya

Keuntungan suatu proyek Pembangkit Tenaga Listrik Minihidro ditentukan dari besar daya yang dibangkitkan dan jumlah energi yang dibangkitkan tiap tahun. Jika tinggi jatuh efektif maksimum adalah H_{eff} (m), debit maksimum turbin adalah Q (m^3/dt), efisiensi dari turbin dan generator masing-masing adalah η_t dan η_g maka daya atau tenaga yang dibangkitkan oleh suatu Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro dapat ditentukan dengan

persamaan sebagai berikut:

$$\text{Daya Teoritis} = 9,81 \times Q \times \text{Heff} \quad (2-109)$$

$$\text{Daya Turbin} = 9,81 \times \eta_t \times Q \times \text{Heff} \quad (2-110)$$

$$\text{Daya Generator} = 9,81 \times \eta_g \times \eta_t \times Q \times \text{Heff} \quad (2-111)$$

dengan:

η_t = efisiensi turbin

η_g = efisiensi generator

Q = debit pembangkit (m^3/dt)

Heff = tinggi jatuh efektif (m)

2.7.2. Energi

Perhitungan banyaknya energi yang dihasilkan pembangkit dalam satu tahun menggunakan persamaan berikut:

$$E = P \times 24 \times n \quad (2-112)$$

dengan:

E = Energi (kWh)

P = Daya sesuai dengan debit pembangkit (kW)

n = Jumlah hari operasi

2.8. Analisa Ekonomi

Analisa ekonomi dilakukan untuk mengetahui kelayakan suatu proyek dari segi ekonomi. Dalam melakukan analisa ekonomi dibutuhkan dua komponen utama yaitu: *cost* (komponen biaya) dan *benefit* (komponen manfaat).

2.8.1. Benefit (Komponen Manfaat)

Manfaat Pusat Listrik Tenaga Minihidro didasarkan pada tenaga listrik yang dihasilkan tiap tahun dan tarif dasar listrik yang berlaku.

2.8.2. Cost (Komponen Biaya)

Pada pelaksanaan pemagnunan, mulai dari ide, studi kelayakan, perencanaan, pelaksanaan, sampai pada operasi dan pemeliharaan membutuhkan bermacam-macam biaya. Pada analisa kelayakan ekonomi baya-biaya tersebut dikelompokkan menjadi dua yaitu biaya modal dan biaya tahunan.

2.8.3. Indikator Kelayakan Ekonomi

Suatu proyek dikatakan layak secara ekonomi apabila memenuhi indikator-indikator kelayakan ekonomi. Dalam studi ini, berikut merupakan indikator kelayakan yang akan dibahas:

- Perbandingan manfaat dan biaya (BCR)
- Selisih manfaat dan biaya (*Net Present Value*)
- Tingkat pengembalian internal (*Internal Rate of Return*)
- Analisa Sensitivitas
- *Payback Periode*

2.8.3.1. BCR (*Benefit Cost Ratio*)

BCR adalah perbandingan antara nilai sekarang (*present value*) dari manfaat (*benefit*) dengan nilai sekarang (*present value*) dari biaya (*cost*). Secara umum rumus untuk perhitungan BCR ini adalah sebagai berikut:

$$\text{BCR} = \frac{\text{PV dari manfaat}}{\text{PV dari biaya}} \quad (2-113)$$

dengan:

PV = *Present Value*

BCR = *Benefit Cost Ratio*

Sebagai ukuran dari penelitian kelayakan proyek dengan metode BCR ini adalah BCR > 1 maka proyek dikatakan layak untuk dikerjakan dan sebaliknya jika BCR < 1 proyek tersebut secara ekonomi tidak layak untuk dibangun.

2.8.3.2. NPV (*Net Present Value*)

Komponen cost dan benefit dihitung *present valuenya* berdasarkan *discont rate/interest rate* yang telah ditentukan. Harga *net present value* diperoleh dari pengurangan present value komponen benefit dengan *present value* komponen *cost*.

$$\text{NPV} = \text{PV komponen Benefit} - \text{PV komponen Cost} \quad (2-114)$$

dengan:

PV = *Present Value*

NPV = *Net Present Value*

2.8.3.3. IRR

Internal Rate of Return merupakan nilai suku bunga yang diperoleh jika BCR bernilai sama dengan 1, atau nilai suku bunga jika NPV bernilai sama dengan 0. IRR dihitung atas dasar penerimaan bersih dan total nilai untuk keperluan investasi. Nilai IRR sangat penting diketahui untuk melihat sejauh mana kemampuan proyek ini dapat dibiayai dengan melihat nilai suku bunga pinjaman yang berlaku. Perhitungan IRR ini dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut:

$$IRR = I' + \frac{NPV'}{NPV' - NPV''} (I'' - I') \quad (2-115)$$

dengan:

I' = suku bunga memberikan nilai NPV positif

I'' = suku bunga memberikan NPV negatif

VPV = selisih antara present value dari manfaat dari present value dari biaya

NPV' = NPV positif

NPV'' = NPV negatif

2.8.3.4. Analisa Sensivitas

Analisa sensitivitas bertujuan untuk mengetahui apa yang terjadi dengan hasil proyek apabila terjadi kemungkinan perubahan dalam penentuan nilai-nilai untuk biaya dan manfaat masih merupakan suatu estimasi (perkiraan), sehingga bila terjadi asumsi-asumsi yang tidak sama dengan keadaan sebenarnya. Analisa sensitivitas dapat dilakukan dengan mengubah salah satu elemen proyek (misalnya harga, biaya) dan menghitung nilai IRR-nya dengan harga tersebut.

2.8.3.5. *Payback Periode*

Payback Periode merupakan jangka waktu periode yang diperlukan untuk membayar kembali (mengembalikan) semua biaya-biaya yang telah dikeluarkan dalam investasi suatu proyek. *Payback Periode* ini akan dipilih yang paling cepat dapat mengembalikan biaya investasi, makin cepat pengembaliannya makin baik dan kemungkinan besar akan dipilih. Berikut merupakan persamaan *payback periode*:

$$Payback\ Periode = \frac{I}{A_b} \quad (2-116)$$

dengan:

I = besarnya biaya investasi yang diperlukan

A_b = *Benefit* bersih yang dapat diperoleh pada setiap bulan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

3.1.1. Batas Administrasi

Kabupaten Humbang Hasundutan dengan beribukotakan di Dolok Sanggul dengan batas-batas wilayah sebagai berikut:

- ❖ Sebelah Utara : Kabupaten Pakpak
- ❖ Sebelah Timur : Kabupaten Aceh Singkil
- ❖ Sebelah Selatan : Kabupaten Tapanuli
- ❖ Sebelah Barat : Kota Sibolga

3.1.2. Aksesibilitas Lokasi PLTM Sion

Berikut adalah aksesibilitas menuju ke Desa Sion dari Universitas Brawijaya, Malang yang dapat dilihat pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Aksesibilitas Menuju Lokasi PLTM Sion

| Dari | Ke | Jarak | Kendaraan | Waktu |
|---------------|---------------|------------|------------|----------------|
| Malang | Surabaya | ± 96 km | Roda Empat | 3 Jam |
| Surabaya | Kualanamu | ± 2.718 km | Pesawat | 3 Jam |
| Kualanamu | Dolok Sanggul | ± 190 km | Roda Empat | 8 Jam |
| Dolok Sanggul | Desa Sion | ± 40 km | Roda Empat | 1 Jam 30 Menit |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

3.1.3. Kondisi Geoteknik

Lokasi terletak pada batuan yang sangat keras. Apabila dimasukkan dalam tabel tersebut bisa termasuk dalam batuan malihan dan beku kristal massif dengan daya dukung izinnya sebesar 78 kg/cm³.

3.2. Data-data yang Digunakan

Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan data-data yang mendukung guna memudahkan dalam menganalisa permasalahan yang ada, maka perlu disajikan beberapa data sebagai berikut:

3.2.1. Data Daerah Aliran Sungai (DAS)

Data DAS akan digunakan sebagai perhitungan Debit Banjir Rancangan. DAS dalam lokasi studi perencanaan ini adalah DAS Aek Simonggo dengan luas 279,2 km².

3.2.2. Data Curah Hujan

Data curah hujan dipakai untuk analisa hujan rancangan yang nantinya digunakan dalam keperluan mendesain bangunan. Dalam DAS Aek Simonggo tidak terdapat stasiun hujan, sehingga memakai tiga stasiun hujan, yaitu Stasiun Parapat, Sibolga, dan Balige,

yang berada di sekitar DAS Aek Simonggo untuk digunakan sebagai pendekatan dari tahun 2004 sampai dengan 2013.

3.2.3. Data Klimatologi

Data Klimatologi untuk mengetahui kondisi iklim (Evapotranspirasi) di lokasi serta sebagai data pendukung dalam perhitungan debit andalan, karena data yang dipakai adalah data curah hujan. Data Klimatologi dalam studi perencanaan ini didapatkan dari Stasiun Parapat yang berada di sekitar DAS Aek Simonggo.

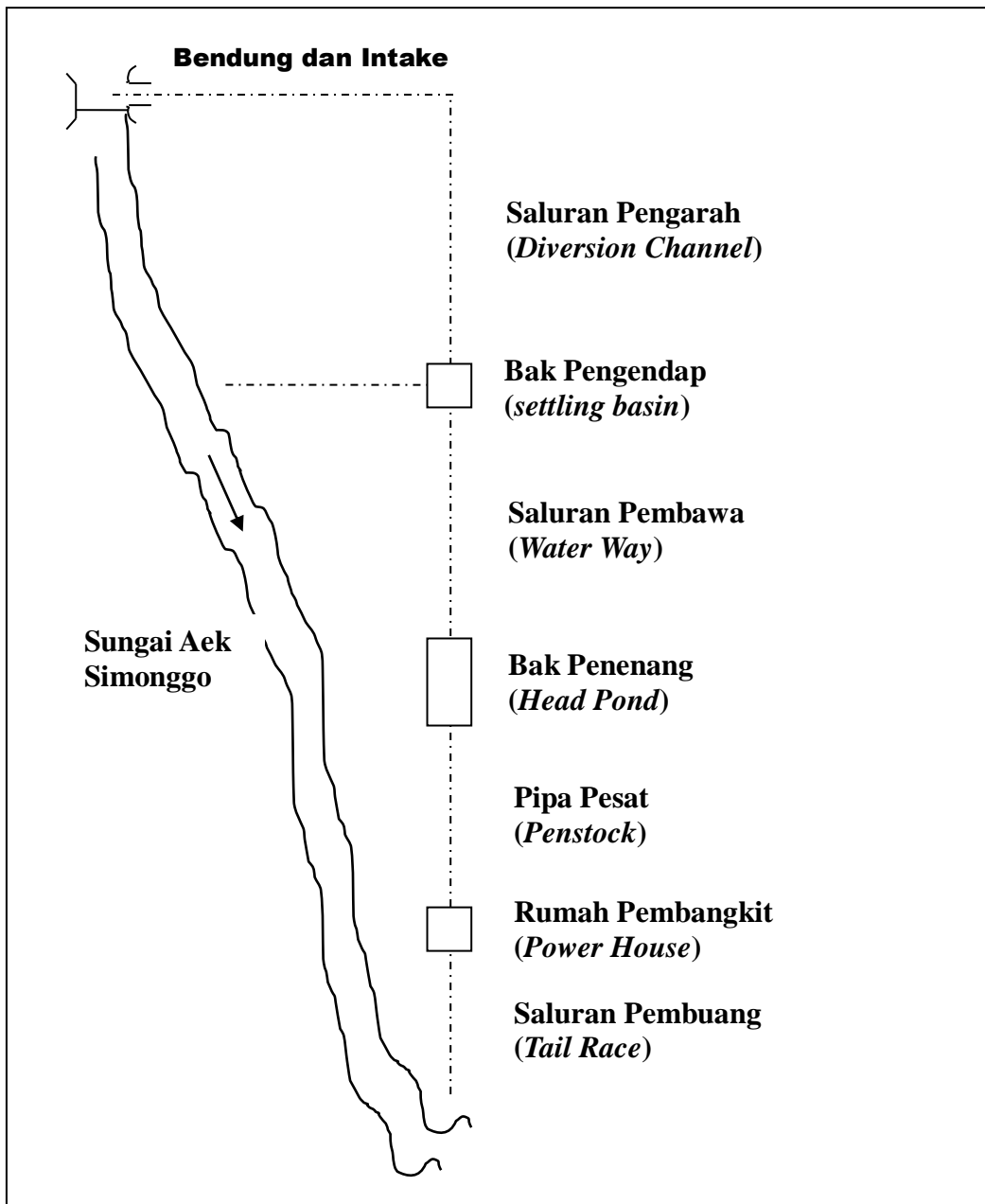
3.2.4. Peta Topografi Lokasi Studi

Data ini berisi mengenai kondisi topografi atau peta kontur. Data tersebut yang nantinya akan digunakan untuk menentukan letak hingga dimensi bangunan dan untuk menganalisa elevasi agar nantinya didapat *Head Efektif*.

3.3. Tahapan Penyelesaian Studi

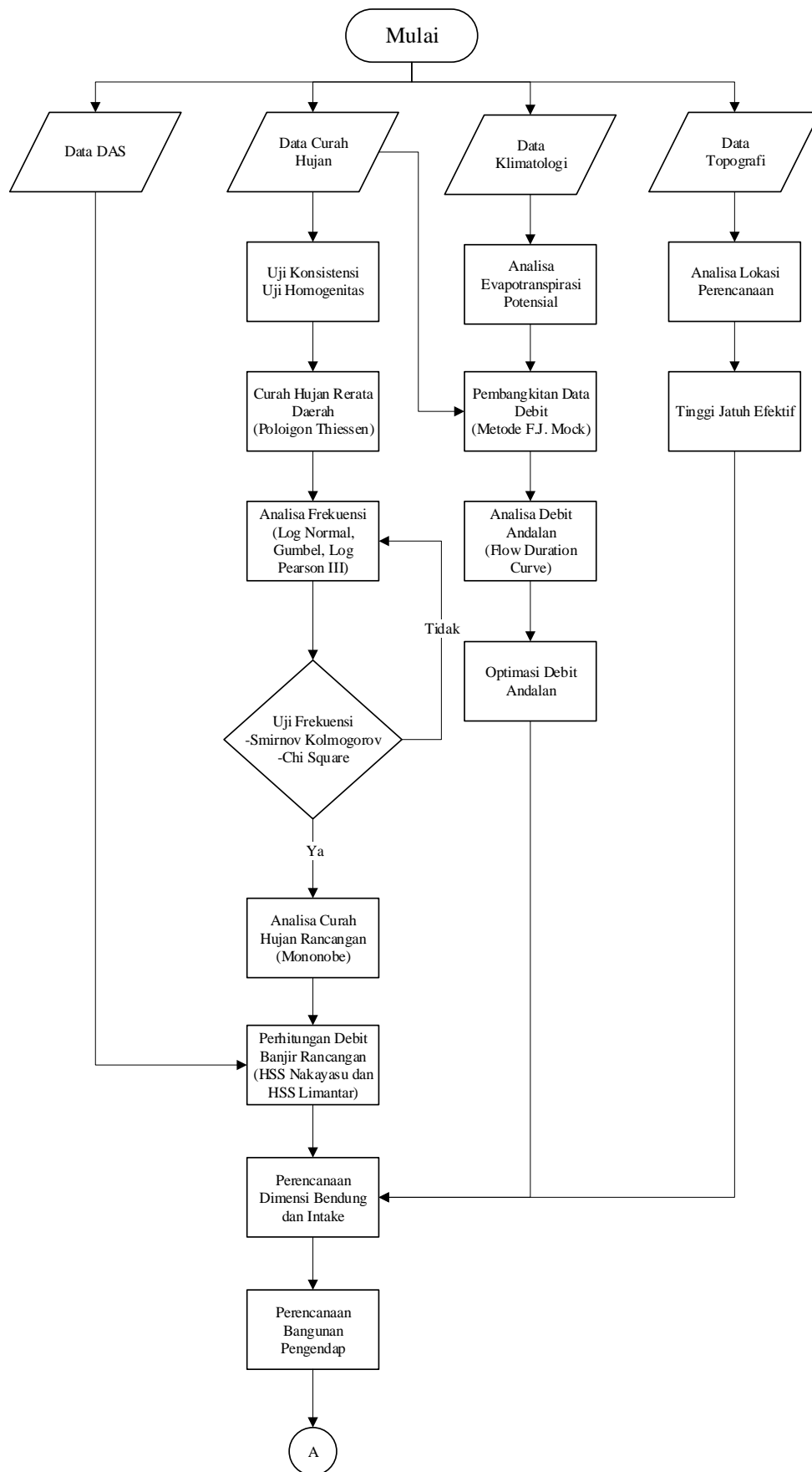
Untuk menyelesaikan studi perencanaan PLTM Sion sehingga mencapai dari maksud dan tujuan yang diharapkan, maka tahapan perhitungan dan analisa yang dilakukan dalam studi ini dengan merujuk data-data yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

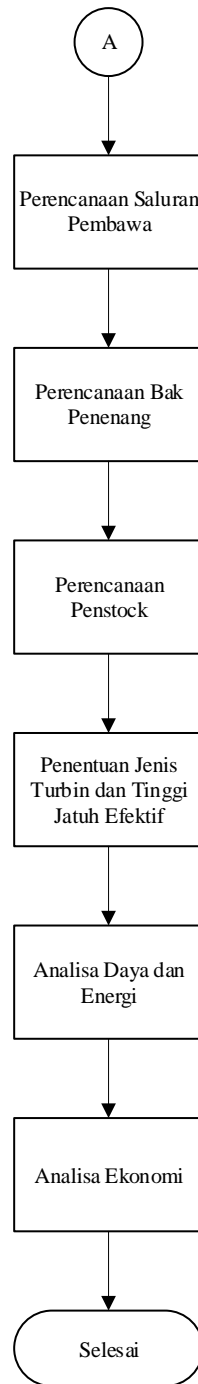
1. Melakukan Analisa Hidrologi
 - a. Menghitung Uji Kurva Massa Ganda,
 - b. Menghitung Uji *Outlier*,
 - c. Menghitung Curah Hujan Rerata Daerah (*Poligon Thiessen*)
 - d. Menghitung Analisa Frekuensi (*Log Normal*, *Gumbel*, dan *Log Pearson III*),
 - e. Menghitung Uji Kesesuaian Distribusi (*Smirnov Kolmogorov* dan *Chi Square*),
 - f. Menghitung Analisa Curah Hujan Rancangan (*Mononobe*),
 - g. Menghitung Debit Banjir Rancangan (HSS Nakayasu dan HSS Limantara),
 - h. Menghitung Evapotranspirasi (*Penman*),
 - i. Menghitung Pembangkitan Data Debit (*F.J. Mock*),
 - j. Analisa Debit Andalan (*Flow Duration Curve*),
 - k. Optimasi Debit Andalan
2. Melakukan perhitungan dimensi bangunan.
3. Melakukan perhitungan kehilangan energi.
4. Melakukan perhitungan tinggi jatuk efektif.
5. Menentukan jenis turbin yang digunakan.
6. Melakukan perhitungan daya dan energi.
7. Melakukan analisa kelayakan ekonomi.



Gambar 3.2 Skema Rencana PLTM Sion
Sumber: Hasil Penulis, 2017

3.4. Diagram Alir





Gambar 3.3 Diagram Alir Perencanaan PLTM Sion
Sumber: Hasil Penulis, 2017

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan pada bab ini akan menjelaskan proses perhitungan dari data sampai dengan hasil dari studi perencanaan PLTM Sion. Dalam pembahasannya dijabarkan dari analisa hidrologi, analisa perencanaan bangunan sipil, dan penentuan turbin PLTM Sion.

Analisa hidrologi dapat dijelaskan mulai dari pengujian data hidrologi untuk menentukan layak atau tidak data hidrologi yang digunakan dalam perencanaan, menganalisa debit banjir dan debit andalan. Hasil dari analisa tersebut akan digunakan dalam analisa perencanaan bangunan sipil. Untuk debit banjir akan digunakan untuk memperhitungkan dimensi bendung hingga peredam energi, sedangkan hasil dari debit andalan akan digunakan untuk memperhitungkan dimensi intake sampai dengan saluran pembuang termasuk penentuan turbin.

4.1. Analisa Data Hidrologi

Dalam Analisa Data Hidrologi akan memperhitungkan data curah hujan yang di uji kelayakan datanya menggunakan Uji konsistensi dengan Kurva Massa Ganda dan Uji Outlier hingga menghitung pendekatan curah hujan rerata daerah menggunakan metode Poligon Thiessen. Hasil dari metode Poligon Thiessen akan mendapatkan koefisien yang digunakan untuk memperhitungkan curah hujan maksimum dan curah hujan rerata dari 3 (tiga) stasiun. Untuk data curah hujan bulanan dari 3 (tiga) stasiun dapat dilihat pada Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.1 Data Curah Hujan Bulanan dan Jumlah Hari Hujan Stasiun Parapat

| TAHUN | Curah Hujan Bulanan (mm/bulan) | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC |
| 2004 | 162 | 266 | 130 | 259 | 199 | 11 | 163 | 57 | 257 | 368 | 407 | 200 |
| | 23 | 18 | 18 | 20 | 15 | 4 | 17 | 12 | 26 | 25 | 25 | 21 |
| 2005 | 158 | 125 | 215 | 228 | 106 | 38 | 124 | 231 | 109 | 339 | 250 | 117 |
| | 19 | 9 | 17 | 17 | 14 | 9 | 13 | 13 | 16 | 24 | 25 | 24 |
| 2006 | 197 | 119 | 63 | 138 | 217 | 164 | 19 | 115 | 256 | 280 | 282 | 248 |
| | 17 | 17 | 10 | 21 | 18 | 19 | 11 | 17 | 23 | 25 | 27 | 22 |
| 2007 | 235 | 82 | 148 | 269 | 368 | 129 | 294 | 189 | 207 | 375 | 180 | 356 |
| | 22 | 12 | 19 | 23 | 21 | 14 | 14 | 16 | 17 | 21 | 21 | 19 |
| 2008 | 167 | 99 | 416 | 261 | 63 | 95 | 138 | 265 | 219 | 342 | 296 | 192 |
| | 18 | 10 | 27 | 20 | 14 | 16 | 18 | 17 | 19 | 23 | 19 | 20 |
| 2009 | 223 | 177 | 341 | 162 | 15 | 116 | 96 | 133 | 126 | 345 | 254 | 261 |
| | 17 | 8 | 27 | 22 | 7 | 7 | 13 | 14 | 15 | 22 | 24 | 22 |
| 2010 | 211 | 184 | 213 | 269 | 368 | 129 | 294 | 189 | 207 | 375 | 180 | 356 |
| | 14 | 9 | 21 | 23 | 21 | 14 | 14 | 16 | 17 | 21 | 21 | 19 |
| 2011 | 87 | 133 | 177 | 281 | 220 | 43 | 6 | 189 | 149 | 176 | 259 | 150 |
| | 17 | 13 | 16 | 15 | 15 | 6 | 2 | 20 | 14 | 15 | 16 | 15 |
| 2012 | 37 | 158 | 56 | 79 | 34 | 50 | 83 | 63 | 81 | 49 | 218 | 226 |
| | 6 | 10 | 2 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 11 | 12 |
| 2013 | 312 | 211 | 68 | 142 | 120 | 67 | 44 | 118 | 282 | 281 | 263 | 330 |
| | 16 | 22 | 2 | 15 | 11 | 10 | 4 | 10 | 12 | 17 | 22 | 16 |

Sumber: Data Perencanaan, 2017

Tabel 4.2 Data Curah Hujan Bulanan dan Jumlah Hari Hujan Stasiun Sibolga

| TAHUN | Curah Hujan Bulanan (mm/bulan) | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC |
| 2004 | 383 | 191 | 458 | 373 | 284 | 129 | 209 | 286 | 408 | 191 | 458 | 280 |
| | 15 | 10 | 16 | 22 | 14 | 16 | 18 | 16 | 24 | 21 | 26 | 23 |
| 2005 | 220 | 193 | 145 | 91 | 62 | 94 | 174 | 407 | 165 | 268 | 612 | 492 |
| | 15 | 12 | 10 | 8 | 6 | 7 | 8 | 11 | 11 | 15 | 24 | 21 |
| 2006 | 463 | 427 | 196 | 250 | 101 | 99 | 118 | 194 | 265 | 316 | 438 | 535 |
| | 15 | 17 | 9 | 8 | 7 | 6 | 8 | 7 | 13 | 13 | 27 | 23 |
| 2007 | 409 | 390 | 182 | 146 | 157 | 132 | 274 | 120 | 272 | 501 | 548 | 294 |
| | 19 | 14 | 9 | 12 | 10 | 9 | 11 | 10 | 10 | 11 | 18 | 19 |
| 2008 | 310 | 330 | 55 | 91 | 151 | 122 | 247 | 202 | 312 | 319 | 397 | 677 |
| | 16 | 9 | 12 | 10 | 8 | 10 | 11 | 8 | 10 | 10 | 23 | 24 |
| 2009 | 387 | 241 | 273 | 182 | 117 | 111 | 135 | 253 | 280 | 217 | 467 | 314 |
| | 18 | 13 | 12 | 9 | 11 | 6 | 7 | 13 | 10 | 11 | 25 | 18 |
| 2010 | 298 | 429 | 365 | 188 | 219 | 225 | 192 | 219 | 263 | 189 | 809 | 331 |
| | 14 | 21 | 11 | 10 | 7 | 9 | 9 | 7 | 9 | 10 | 27 | 22 |
| 2011 | 334 | 276 | 220 | 260 | 110 | 83 | 123 | 219 | 171 | 405 | 852 | 958 |
| | 14 | 11 | 10 | 11 | 7 | 9 | 4 | 7 | 10 | 13 | 23 | 21 |
| 2012 | 113 | 480 | 171 | 239 | 104 | 152 | 252 | 191 | 244 | 149 | 660 | 684 |
| | 15 | 23 | 5 | 13 | 8 | 10 | 8 | 9 | 10 | 11 | 26 | 27 |
| 2013 | 210 | 190 | 203 | 375 | 310 | 146 | 134 | 423 | 286 | 525 | 603 | 273 |
| | 11 | 15 | 13 | 18 | 15 | 13 | 13 | 18 | 15 | 24 | 24 | 16 |

Sumber: Data Perencanaan, 2017

Tabel 4.3 Data Curah Hujan Bulanan dan Jumlah Hari Hujan Stasiun Balige

| TAHUN | Curah Hujan Bulanan (mm/bulan) | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC |
| 2004 | 126 | 63 | 151 | 123 | 82 | 37 | 69 | 94 | 135 | 63 | 151 | 92 |
| | 8 | 5 | 8 | 12 | 7 | 8 | 10 | 8 | 13 | 11 | 14 | 12 |
| 2005 | 117 | 64 | 90 | 57 | 39 | 58 | 108 | 253 | 103 | 167 | 202 | 162 |
| | 8 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 13 | 11 |
| 2006 | 245 | 141 | 122 | 155 | 63 | 62 | 74 | 121 | 165 | 197 | 145 | 177 |
| | 8 | 9 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 7 | 7 | 14 | 12 |
| 2007 | 217 | 129 | 113 | 91 | 98 | 82 | 171 | 75 | 170 | 312 | 181 | 97 |
| | 10 | 7 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 10 | 10 |
| 2008 | 164 | 109 | 34 | 56 | 94 | 76 | 154 | 126 | 194 | 199 | 131 | 223 |
| | 8 | 5 | 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 | 12 | 13 |
| 2009 | 205 | 80 | 170 | 114 | 73 | 69 | 84 | 157 | 174 | 135 | 154 | 104 |
| | 10 | 7 | 6 | 5 | 6 | 3 | 4 | 7 | 5 | 6 | 13 | 10 |
| 2010 | 158 | 142 | 227 | 117 | 136 | 140 | 120 | 137 | 164 | 118 | 267 | 109 |
| | 7 | 11 | 6 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 14 | 12 |
| 2011 | 177 | 91 | 137 | 162 | 68 | 51 | 77 | 137 | 107 | 252 | 281 | 316 |
| | 7 | 6 | 5 | 6 | 4 | 5 | 2 | 4 | 5 | 7 | 12 | 11 |
| 2012 | 60 | 158 | 106 | 149 | 65 | 94 | 157 | 119 | 152 | 93 | 218 | 226 |
| | 8 | 12 | 3 | 7 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 6 | 14 | 14 |
| 2013 | 111 | 63 | 67 | 124 | 90 | 42 | 44 | 140 | 94 | 173 | 199 | 90 |
| | 6 | 8 | 7 | 10 | 8 | 7 | 7 | 10 | 8 | 13 | 13 | 8 |

Sumber: Data Perencanaan, 2017

4.1.1. Uji Konsistensi Data Hujan

Uji konsistensi adalah uji data untuk menentukan suatu data berasal dari daerah yang sama. Jika terdapat data curah hujan tahunan dengan jangka waktu pengamatan yang panjang dan menggunakan data lebih dari 1 (satu) stasiun, maka menggunakan uji konsistensi dengan metode Kurva Massa Ganda. Fungsi dari metode ini dapat memperbaiki kesalahan atau membandingkan pengamatan yang terjadi jika terdapat kesalahan saat pencatatan data atau gangguan teknis pada bagian stasiun.

Metode Kurva Massa Ganda akan memperhitungkan data pada setiap stasiun yang digunakan. Sistem dari metode ini adalah membandingkan satu stasiun dengan stasiun lainnya dengan data yang diperlukan, yaitu Jumlah Curah Hujan Tahunan.

Contoh perhitungan pada Stasiun Parapat 2004:

- a. Menentukan nilai Curah Hujan Tahunan dengan cara menjumlahkan Curah Hujan pada setiap stasiun dan setiap tahunnya. Untuk Curah Hujan Tahunan di setiap stasiun dapat dilihat pada Tabel 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4.4 Data Curah Hujan Tahunan

| Tahun | Data Curah Hujan (mm/tahun) | | |
|-------|--------------------------------|---------|---------|
| | Stasiun | Stasiun | Stasiun |
| | Parapat | Sibolga | Balige |
| 2004 | 2.316 | 3.267 | 1.062 |
| 2005 | 1.883 | 2.702 | 1.303 |
| 2006 | 1.900 | 2.940 | 1.421 |
| 2007 | 2.597 | 3.016 | 1.517 |
| 2008 | 2.385 | 2.902 | 1.396 |
| 2009 | 2.025 | 2.590 | 1.314 |
| 2010 | 2.765 | 3.430 | 1.676 |
| 2011 | 1.783 | 3.678 | 1.680 |
| 2012 | 1.098 | 3.326 | 1.537 |
| 2013 | 1.925 | 3.468 | 1.126 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

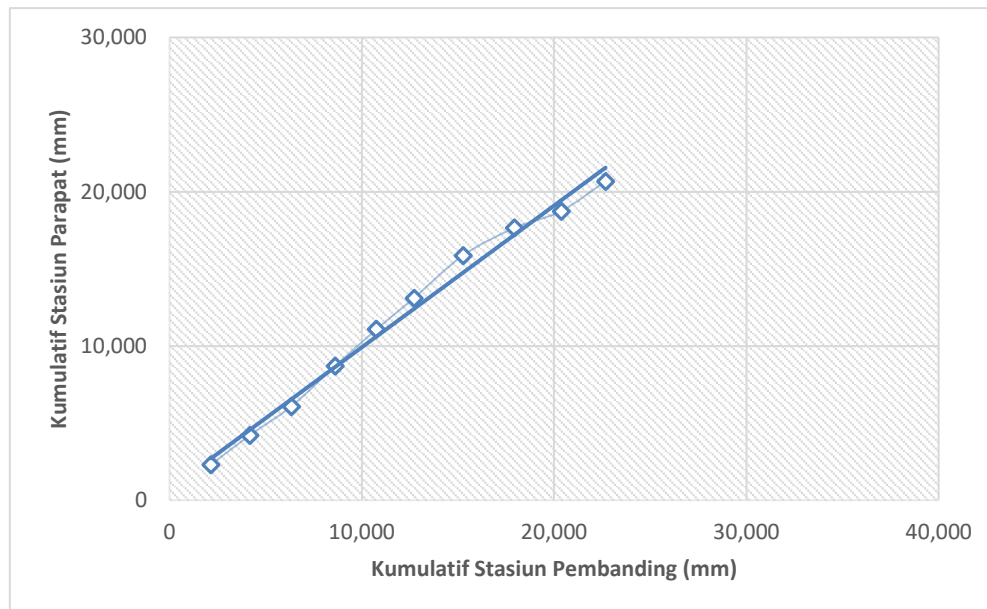
- b. Menentukan pengelompokan antara data stasiun yang di uji dengan rerata stasiun pembanding. Stasiun Parapat sebagai stasiun yang diuji bernilai 2.316 mm. Rerata Stasiun Pembanding, yaitu Stasiun Sibolda dan Stasiun Balige adalah $\frac{3267,00 \text{ mm} + 1061,59 \text{ mm}}{2} = 2.164$ untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.6 sebagai berikut:

Tabel 4.5 Uji Konsistensi Stasiun Parapat (mm/tahun)

| No | Tahun | Curah Hujan | Kumulatif Curah Hujan | Rerata Sta. Pembanding | Kumulatif Sta. Pembanding |
|----|-------|-------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | 2004 | 2.316 | 2.316 | 2.164 | 2.164 |
| 2 | 2005 | 1.883 | 4.199 | 2.002 | 4.167 |
| 3 | 2006 | 1.900 | 6.099 | 2.180 | 6.347 |
| 4 | 2007 | 2.597 | 8.696 | 2.267 | 8.614 |
| 5 | 2008 | 2.385 | 11.081 | 2.149 | 10.762 |
| 6 | 2009 | 2.025 | 13.106 | 1.952 | 12.714 |
| 7 | 2010 | 2.765 | 15.871 | 2.553 | 15.267 |
| 8 | 2011 | 1.783 | 17.653 | 2.679 | 17.946 |
| 9 | 2012 | 1.098 | 18.751 | 2.432 | 20.378 |
| 10 | 2013 | 1.925 | 20.676 | 2.297 | 22.675 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- c. Menentukan nilai korelasi (R^2) dengan cara pembuatan Kurva Massa Ganda hubungan antara kumulatif curah hujan yang diuji dengan kumulatif stasiun pembanding. Berikut adalah gambar Kurva Massa Ganda Stasiun Parapat:



Gambar 4.1 Kurva Massa Ganda Stasiun Parapat (Sebelum Dikoreksi)
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

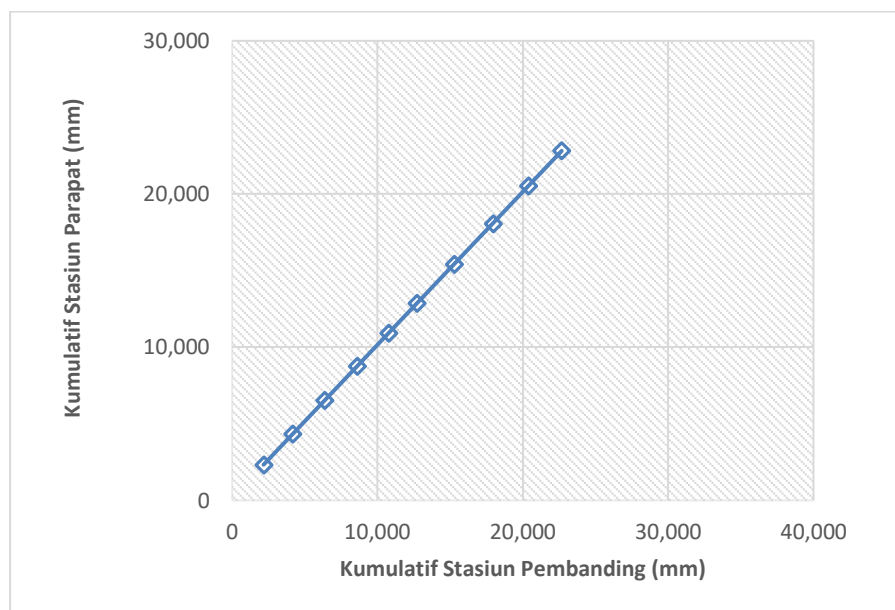
- d. Dari hasil Gambar 4.1 Kurva Massa Ganda stasiun Parapat didapat nilai R^2 tidak sama dengan 1. Oleh sebab itu perlu dilakukan pengecekan berdasarkan RSNI T-02-2004 sebagai berikut:
- Pos dapat diterima jika Kurva Massa Ganda yang terbentuk berupa garis lurus atau terjadi penyimpangan kurang dari 5° ,
 - Pos ditolak atau perlu perbaikan data jika Kurva Massa Ganda yang terbentuk menyimpang lebih dari 5° dari garis lurus,
- e. Menentukan nilai sudut penyimpangan ($Tan \alpha$), nilai ini didapat dari pengecekan sudut pada *AutoCad*, didapat garis lurusnya sebesar 27° dan sudut data 27°
- f. Menentukan nilai faktor koreksi, $(Fk) = \frac{Tan \alpha}{Tan \alpha c} = \frac{45}{45} = 1$
- g. Menentukan Nilai Sekarang = $Fk \times \text{Curah Hujan} = 2.315,80 \text{ mm/tahun}$

Untuk hasil Uji Konsistensi pada stasiun parapat dengan metode Kurva Massa Ganda dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.6 Uji Konsistensi Stasiun Parapat Setelah Perbaikan (mm/tahun)

| No | Tahun | Curah Hujan | Tan α | Tan αc | Faktor Koreksi | Nilai Sekarang | Kumulatif Nilai Sekarang |
|----|-------|-------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|
| 1 | 2004 | 2.316 | 45 | 45 | 1,00 | 2.316 | 2.316 |
| 2 | 2005 | 1.883 | 45 | 42 | 1,07 | 2.018 | 4.333 |
| 3 | 2006 | 1.900 | 45 | 39 | 1,15 | 2.192 | 6.525 |
| 4 | 2007 | 2.597 | 45 | 52 | 0,86 | 2.247 | 8.773 |
| 5 | 2008 | 2.385 | 45 | 50 | 0,90 | 2.147 | 10.919 |
| 6 | 2009 | 2.025 | 45 | 47 | 0,95 | 1.939 | 12.858 |
| 7 | 2010 | 2.765 | 45 | 49 | 0,91 | 2.539 | 15.398 |
| 8 | 2011 | 1.783 | 45 | 30 | 1,50 | 2.674 | 18.071 |
| 9 | 2012 | 1.098 | 45 | 20 | 2,25 | 2.470 | 20.541 |
| 10 | 2013 | 1.925 | 45 | 38 | 1,18 | 2.280 | 22.821 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.2 Kurva Massa Ganda stasiun Parapat (Setelah Dikoreksi)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil Uji Konsistensi Stasiun Parapat Setelah Perbaikan, didapatkan nilai Faktor Koreksi. Faktor Koreksi tersebut akan dikalikan pada setiap data Curah Hujan Stasiun Parapat sehingga dianggap dapat membuat data lebih sesuai dengan kondisi studi. Berikut adalah data Curah Hujan Bulanan dan Curah Hujan Maksimum Tahunan Stasiun Parapat setelah perbaikan:

Tabel 4.7 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Bulanan Stasiun Parapat Setelah Perbaikan

| TAHUN | Curah Hujan Bulanan (mm/bulan) | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC |
| 2004 | 162 | 266 | 130 | 259 | 199 | 11 | 163 | 57 | 257 | 368 | 407 | 200 |
| | 23 | 18 | 18 | 20 | 15 | 4 | 17 | 12 | 26 | 25 | 25 | 21 |
| 2005 | 169 | 134 | 230 | 244 | 114 | 41 | 132 | 248 | 117 | 364 | 267 | 126 |
| | 19 | 9 | 17 | 17 | 14 | 9 | 13 | 13 | 16 | 24 | 25 | 24 |
| 2006 | 227 | 137 | 72 | 159 | 250 | 190 | 22 | 133 | 296 | 323 | 326 | 286 |
| | 17 | 17 | 10 | 21 | 18 | 19 | 11 | 17 | 23 | 25 | 27 | 22 |
| 2007 | 203 | 71 | 128 | 233 | 319 | 111 | 254 | 164 | 179 | 325 | 156 | 308 |
| | 22 | 12 | 19 | 23 | 21 | 14 | 14 | 16 | 17 | 21 | 21 | 19 |
| 2008 | 150 | 89 | 374 | 234 | 57 | 86 | 124 | 238 | 197 | 308 | 267 | 173 |
| | 18 | 10 | 27 | 20 | 14 | 16 | 18 | 17 | 19 | 23 | 19 | 20 |
| 2009 | 214 | 169 | 326 | 155 | 15 | 111 | 91 | 128 | 121 | 330 | 243 | 250 |
| | 17 | 8 | 27 | 22 | 7 | 7 | 13 | 14 | 15 | 22 | 24 | 22 |
| 2010 | 194 | 169 | 196 | 247 | 338 | 118 | 270 | 174 | 190 | 344 | 165 | 327 |
| | 14 | 9 | 21 | 23 | 21 | 14 | 14 | 16 | 17 | 21 | 21 | 19 |
| 2011 | 130 | 199 | 265 | 421 | 331 | 64 | 8 | 283 | 224 | 264 | 389 | 225 |
| | 17 | 13 | 16 | 15 | 15 | 6 | 2 | 20 | 14 | 15 | 16 | 15 |
| 2012 | 84 | 356 | 127 | 177 | 77 | 113 | 187 | 142 | 181 | 111 | 490 | 508 |
| | 6 | 10 | 2 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 11 | 12 |
| 2013 | 369 | 249 | 81 | 168 | 142 | 80 | 52 | 140 | 334 | 333 | 312 | 391 |
| | 16 | 22 | 2 | 15 | 11 | 10 | 4 | 10 | 12 | 17 | 22 | 16 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.8 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Maksimum Tahunan Stasiun Parapat Setelah Perbaikan

| No | Tahun | Curah Hujan (mm/tahun) |
|----|-------|---------------------------|
| 1 | 2004 | 65,00 |
| 2 | 2005 | 84,00 |
| 3 | 2006 | 37,10 |
| 4 | 2007 | 105,00 |
| 5 | 2008 | 101,60 |
| 6 | 2009 | 72,50 |
| 7 | 2010 | 155,00 |
| 8 | 2011 | 161,10 |
| 9 | 2012 | 86,00 |
| 10 | 2013 | 54,00 |

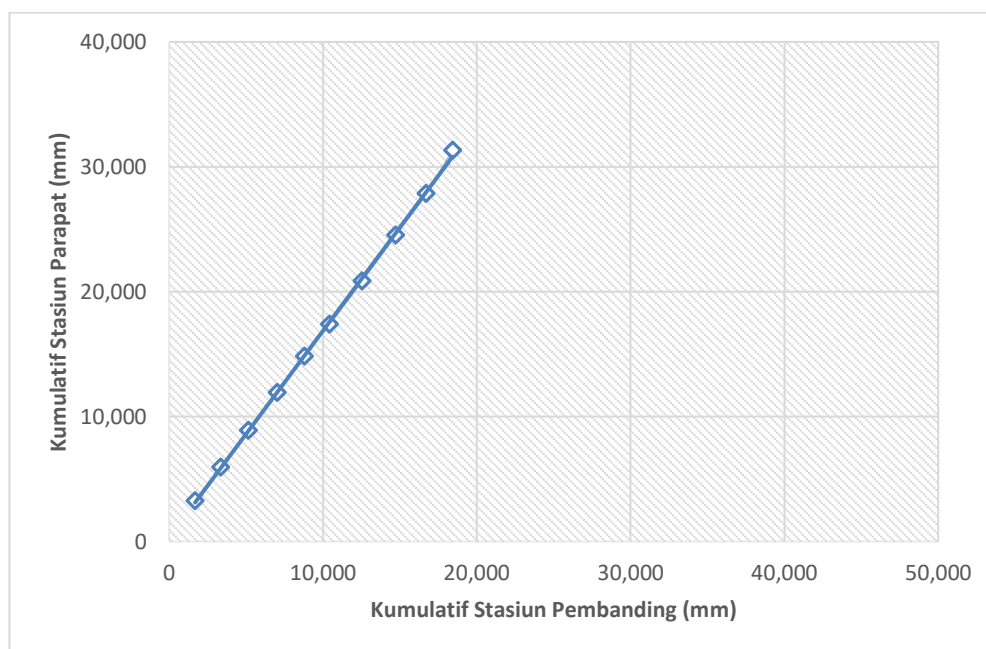
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Untuk perhitungan dan hasil Uji Konsistensi pada Stasiun Sibolga dan Stasiun Balige dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.9 Uji Konsistensi Stasiun Sibolga (mm/tahun)

| No | Tahun | Curah Hujan | Kumulatif Curah Hujan | Rerata Sta. Pemandangan | Kumulatif Sta. Pemandangan |
|----|-------|-------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 2004 | 3.267 | 3.267 | 1.689 | 1.689 |
| 2 | 2005 | 2.702 | 5.969 | 1.660 | 3.349 |
| 3 | 2006 | 2.940 | 8.909 | 1.806 | 5.155 |
| 4 | 2007 | 3.016 | 11.925 | 1.882 | 7.038 |
| 5 | 2008 | 2.902 | 14.826 | 1.771 | 8.809 |
| 6 | 2009 | 2.590 | 17.417 | 1.626 | 10.435 |
| 7 | 2010 | 3.430 | 20.847 | 2.108 | 12.543 |
| 8 | 2011 | 3.678 | 24.525 | 2.177 | 14.720 |
| 9 | 2012 | 3.326 | 27.851 | 2.003 | 16.723 |
| 10 | 2013 | 3.468 | 31.319 | 1.703 | 18.426 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



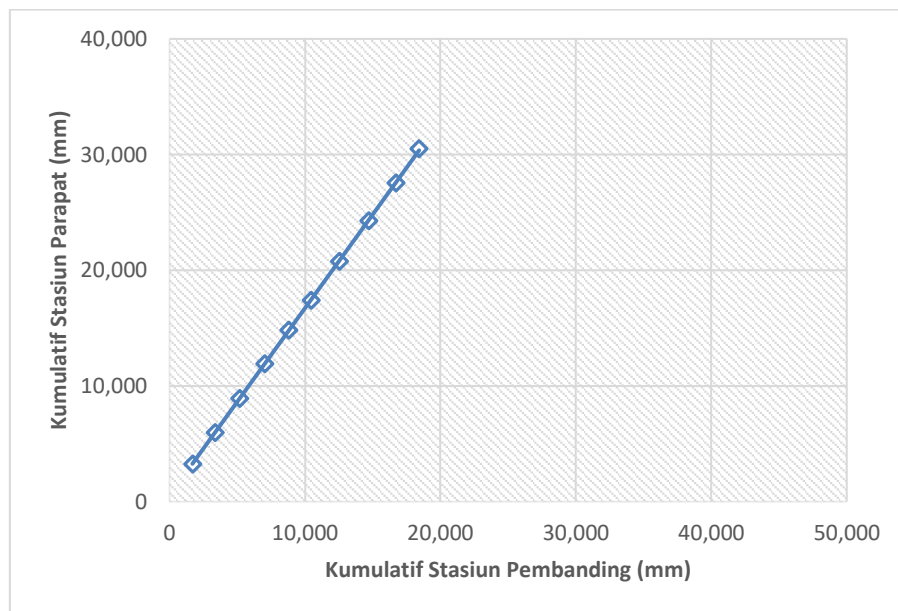
Gambar 4.3 Kurva Massa Ganda stasiun Sibolga (Sebelum Dikoreksi)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.10 Uji Konsistensi Stasiun Sibolga Setelah Perbaikan (mm/tahun)

| No | Tahun | Curah Hujan | $Tan \alpha$ | $Tan \alpha c$ | Faktor Koreksi | Nilai Sekarang | Kumulatif Nilai Sekarang |
|----|-------|-------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|
| 1 | 2004 | 3.267 | 45 | 45 | 1.00 | 3.267 | 3.267 |
| 2 | 2005 | 2.702 | 45 | 45 | 1.00 | 2.702 | 5.969 |
| 3 | 2006 | 2.940 | 45 | 45 | 1.00 | 2.940 | 8.909 |
| 4 | 2007 | 3.016 | 45 | 45 | 1.00 | 3.016 | 11.925 |
| 5 | 2008 | 2.902 | 45 | 45 | 1.00 | 2.902 | 14.826 |
| 6 | 2009 | 2.590 | 45 | 45 | 1.00 | 2.590 | 17.417 |
| 7 | 2010 | 3.430 | 45 | 46 | 0.98 | 3.355 | 20.772 |
| 8 | 2011 | 3.678 | 45 | 47 | 0.96 | 3.522 | 24.294 |
| 9 | 2012 | 3.326 | 45 | 46 | 0.98 | 3.254 | 27.547 |
| 10 | 2013 | 3.468 | 45 | 53 | 0.85 | 2.945 | 30.492 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.4 Kurva Massa Ganda stasiun Sibolga (Setelah Dikoreksi)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.11 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Bulanan Stasiun Sibolga Setelah Perbaikan

| TAHUN | Curah Hujan Bulanan (mm/bulan) | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC |
| 2004 | 383 | 191 | 458 | 373 | 284 | 129 | 209 | 286 | 408 | 191 | 458 | 280 |
| | 15 | 10 | 16 | 22 | 14 | 16 | 18 | 16 | 24 | 21 | 26 | 23 |
| 2005 | 220 | 193 | 145 | 91 | 62 | 94 | 174 | 407 | 165 | 268 | 612 | 492 |
| | 15 | 12 | 10 | 8 | 6 | 7 | 8 | 11 | 11 | 15 | 24 | 21 |
| 2006 | 463 | 427 | 196 | 250 | 101 | 99 | 118 | 194 | 265 | 316 | 438 | 535 |
| | 15 | 17 | 9 | 8 | 7 | 6 | 8 | 7 | 13 | 13 | 27 | 23 |
| 2007 | 409 | 390 | 182 | 146 | 157 | 132 | 274 | 120 | 272 | 501 | 548 | 294 |
| | 19 | 14 | 9 | 12 | 10 | 9 | 11 | 10 | 10 | 11 | 18 | 19 |
| 2008 | 310 | 330 | 55 | 91 | 151 | 122 | 247 | 202 | 312 | 319 | 397 | 677 |
| | 16 | 9 | 12 | 10 | 8 | 10 | 11 | 8 | 10 | 10 | 23 | 24 |
| 2009 | 387 | 241 | 273 | 182 | 117 | 111 | 135 | 253 | 280 | 217 | 467 | 314 |
| | 18 | 13 | 12 | 9 | 11 | 6 | 7 | 13 | 10 | 11 | 25 | 18 |
| 2010 | 292 | 420 | 357 | 184 | 214 | 220 | 188 | 215 | 258 | 185 | 791 | 324 |
| | 14 | 21 | 11 | 10 | 7 | 9 | 9 | 7 | 9 | 10 | 27 | 22 |
| 2011 | 320 | 264 | 211 | 249 | 105 | 79 | 118 | 210 | 164 | 388 | 816 | 917 |
| | 14 | 11 | 10 | 11 | 7 | 9 | 4 | 7 | 10 | 13 | 23 | 21 |
| 2012 | 111 | 470 | 167 | 233 | 102 | 148 | 247 | 187 | 239 | 146 | 646 | 669 |
| | 15 | 23 | 5 | 13 | 8 | 10 | 8 | 9 | 10 | 11 | 26 | 27 |
| 2013 | 178 | 161 | 172 | 318 | 263 | 124 | 114 | 359 | 243 | 446 | 512 | 232 |
| | 11 | 15 | 13 | 18 | 15 | 13 | 13 | 18 | 15 | 24 | 24 | 16 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.12 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Maksimum Tahunan Stasiun Sibolga Setelah Perbaikan

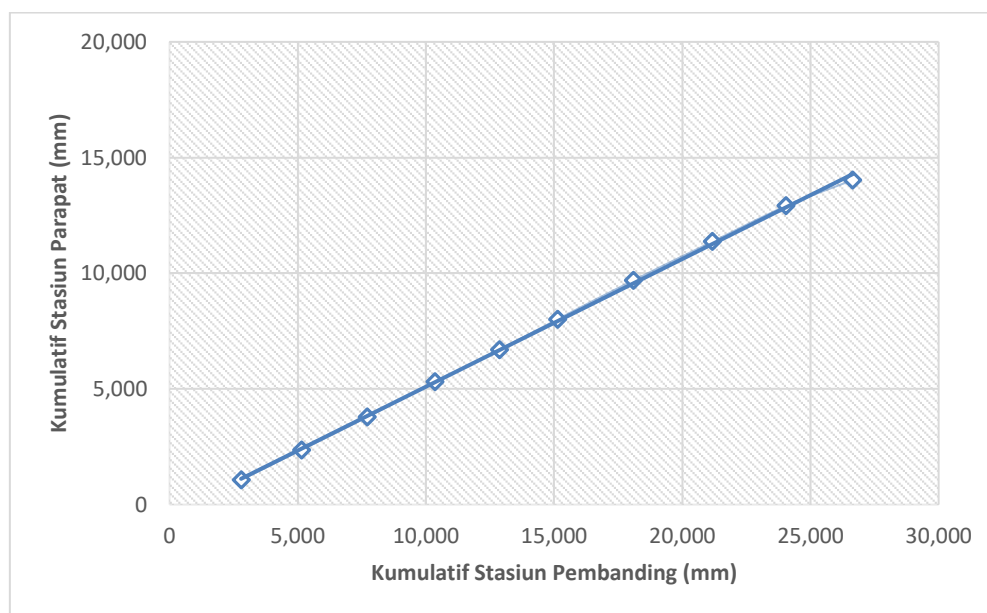
| No | Tahun | Curah Hujan (mm/tahun) |
|----|-------|------------------------|
| 1 | 2004 | 126,00 |
| 2 | 2005 | 111,00 |
| 3 | 2006 | 136,00 |
| 4 | 2007 | 159,00 |
| 5 | 2008 | 162,00 |
| 6 | 2009 | 103,00 |
| 7 | 2010 | 170,00 |
| 8 | 2011 | 169,00 |
| 9 | 2012 | 188,00 |
| 10 | 2013 | 148,20 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.13 Uji Konsistensi Stasiun Belige (mm/tahun)

| No | Tahun | Curah Hujan | Kumulatif Curah Hujan | Rerata Sta. Pemandangan | Kumulatif Sta. Pemandangan |
|----|-------|-------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 2004 | 1.062 | 1.062 | 2.791 | 2.791 |
| 2 | 2005 | 1.303 | 2.364 | 2.360 | 5.151 |
| 3 | 2006 | 1.421 | 3.785 | 2.566 | 7.717 |
| 4 | 2007 | 1.517 | 5.302 | 2.632 | 10.349 |
| 5 | 2008 | 1.396 | 6.698 | 2.524 | 12.873 |
| 6 | 2009 | 1.314 | 8.012 | 2.265 | 15.138 |
| 7 | 2010 | 1.676 | 9.688 | 2.947 | 18.085 |
| 8 | 2011 | 1.680 | 11.368 | 3.098 | 21.182 |
| 9 | 2012 | 1.537 | 12.905 | 2.862 | 24.044 |
| 10 | 2013 | 1.126 | 14.031 | 2.612 | 26.656 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



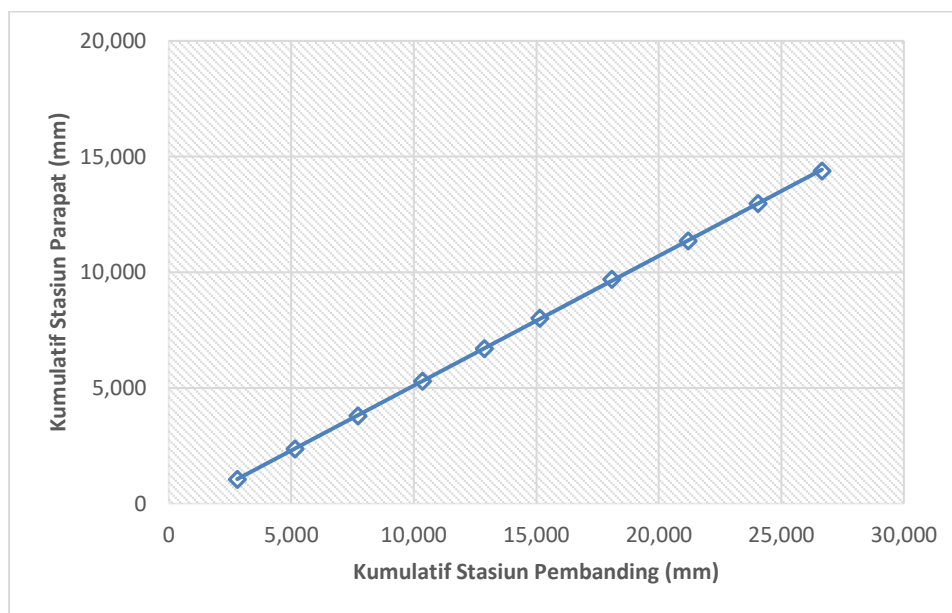
Gambar 4.5 Kurva Massa Ganda stasiun Belige (Sebelum Dikoreksi)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.14 Uji Konsistensi Stasiun Belige Setelah Perbaikan (mm/tahun)

| Tahun | Curah Hujan | $Tan \alpha$ | $Tan \alpha_c$ | Faktor Koreksi | Nilai Sekarang | Kumulatif Nilai Sekarang |
|-------|-------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|
| 2004 | 1.062 | 45 | 45 | 1,00 | 1.062 | 1.062 |
| 2005 | 1.303 | 45 | 45 | 1,00 | 1.303 | 2.364 |
| 2006 | 1.421 | 45 | 45 | 1,00 | 1.421 | 3.785 |
| 2007 | 1.517 | 45 | 45 | 1,00 | 1.517 | 5.302 |
| 2008 | 1.396 | 45 | 45 | 1,00 | 1.396 | 6.698 |
| 2009 | 1.314 | 45 | 45 | 1,00 | 1.314 | 8.012 |
| 2010 | 1.676 | 45 | 45 | 1,00 | 1.676 | 9.688 |
| 2011 | 1.680 | 45 | 45 | 1,00 | 1.680 | 11.368 |
| 2012 | 1.537 | 45 | 43 | 1,05 | 1.609 | 12.977 |
| 2013 | 1.126 | 45 | 36 | 1,25 | 1.408 | 14.385 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.6 Kurva Massa Ganda stasiun Belige (Setelah Dikoreksi)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.15 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Bulanan Stasiun Belige Setelah Perbaikan

| TAHUN | Curah Hujan Bulanan (mm/bulan) | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC |
| 2004 | 126 | 63 | 151 | 123 | 82 | 37 | 69 | 94 | 135 | 63 | 151 | 92 |
| | 8 | 5 | 8 | 12 | 7 | 8 | 10 | 8 | 13 | 11 | 14 | 12 |
| 2005 | 117 | 64 | 90 | 57 | 39 | 58 | 108 | 253 | 103 | 167 | 202 | 162 |
| | 8 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 13 | 11 |
| 2006 | 245 | 141 | 122 | 155 | 63 | 62 | 74 | 121 | 165 | 197 | 145 | 177 |
| | 8 | 9 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 7 | 7 | 14 | 12 |
| 2007 | 217 | 129 | 113 | 91 | 98 | 82 | 171 | 75 | 170 | 312 | 181 | 97 |
| | 10 | 7 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 10 | 10 |
| 2008 | 164 | 109 | 34 | 56 | 94 | 76 | 154 | 126 | 194 | 199 | 131 | 223 |
| | 8 | 5 | 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 | 12 | 13 |
| 2009 | 205 | 80 | 170 | 114 | 73 | 69 | 84 | 157 | 174 | 135 | 154 | 104 |
| | 10 | 7 | 6 | 5 | 6 | 3 | 4 | 7 | 5 | 6 | 13 | 10 |
| 2010 | 158 | 142 | 227 | 117 | 136 | 140 | 120 | 137 | 164 | 118 | 267 | 109 |
| | 7 | 11 | 6 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 14 | 12 |
| 2011 | 177 | 91 | 137 | 162 | 68 | 51 | 77 | 137 | 107 | 252 | 281 | 316 |
| | 7 | 6 | 5 | 6 | 4 | 5 | 2 | 4 | 5 | 7 | 12 | 11 |
| 2012 | 63 | 166 | 111 | 155 | 68 | 99 | 164 | 125 | 159 | 97 | 228 | 236 |
| | 8 | 12 | 3 | 7 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 6 | 14 | 14 |
| 2013 | 139 | 78 | 84 | 155 | 112 | 53 | 55 | 174 | 118 | 217 | 249 | 113 |
| | 6 | 8 | 7 | 10 | 8 | 7 | 7 | 10 | 8 | 13 | 13 | 8 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.16 Hasil Uji Konsistensi Curah Hujan Maksimum Tahunan Stasiun Belige Setelah Perbaikan

| No | Tahun | Curah Hujan (mm/tahun) |
|----|-------|------------------------|
| 1 | 2004 | 74.90 |
| 2 | 2005 | 127.00 |
| 3 | 2006 | 120.90 |
| 4 | 2007 | 252.00 |
| 5 | 2008 | 215.90 |
| 6 | 2009 | 95.00 |
| 7 | 2010 | 195.10 |
| 8 | 2011 | 119.10 |
| 9 | 2012 | 63.00 |
| 10 | 2013 | 90.00 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.1.2. Uji Outlier

Uji Outlier digunakan untuk mengetahui data curah hujan yang digunakan tidak menyimpang dari batas. Batas yang dimaksud adalah data curah hujan maksimum setiap tahun dalam satu stasiun tidak terlalu rendah dari batas minimum dan tidak terlalu besar dari batas maksimum. Jika, terdapat data curah hujan pada tahun tertentu tidak lolos uji outlier maka data pada tahun tersebut tidak dapat digunakan. Pengujian ini akan menguji data curah hujan dari setiap stasiun.

Contoh perhitungan pada Stasiun Parapat tahun 2004:

- a. Data curah hujan terlebih dahulu di urutkan dari yang terbesar sampai dengan terkecil. Untuk data curah hujan maksimum terurut dapat dilihat pada tabel 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4.17 Data Curah Hujan Maksimum Terurut pada Stasiun Parapat

| No | Tahun | Curah Hujan (mm/tahun) |
|----|-------|---------------------------|
| 1 | 2011 | 161.10 |
| 2 | 2010 | 155.00 |
| 3 | 2007 | 105.00 |
| 4 | 2008 | 101.60 |
| 5 | 2012 | 86.00 |
| 6 | 2005 | 84.00 |
| 7 | 2009 | 72.50 |
| 8 | 2004 | 65.00 |
| 9 | 2013 | 54.00 |
| 10 | 2006 | 37.10 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

b. Menentukan nilai Probabilitas, $(P) = \frac{No.Urut\ Data}{Jumlah\ Data + 1} \times 100\% = \frac{1}{10+1} \times 100\% = 9,09\%$

c. Menentukan nilai log, $\text{Log } X = \text{Log}(161,10) = 2,207$

d. Menentukan nilai rerata log, $\text{log}(\bar{x}) = \frac{2,207+2,190+2,021+2,007+1,934+1,924+1,860+1,813+1,732+1,569}{10} = 1,926$

e. Menentukan nilai Standar Deviasi, $(xi - \bar{x})^2 = 0,34633$

$$\text{Standar Deviasi (Sd)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,34633}{10-1}} = 0,196$$

- f. Menentukan nilai kepeencengan (Skewness), $C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)s^3} = \frac{-0,012}{(10-1)(10-2)10,982^3} = -0,223$
- g. Menentukan nilai K_n , dengan melihat Tabel 2.1 berdasarkan jumlah data bernilai 10 maka didapat nilai $K_n = 2,034$
- h. Menentukan nilai Batas Atas, $10^{\bar{x} + (K_n \cdot Sd)} = 10^{1,926 + (2,034 \times 0,196)} = 211,51$ mm/tahun
- i. Menentukan nilai Batas Bawah, $10^{\bar{x} - (K_n \cdot Sd)} = 10^{1,926 - (2,034 \times 0,196)} = 33,62$ mm/tahun
- j. Jika terdapat data Curah Hujan Maksimum yang melewati Batas Bawah dan Batas Atas maka data tersebut tidak diterima. Untuk Data Curah Hujan Maksimum Terurut pada Stasiun Parapat dapat dinyatakan data diterima.

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.6 sampai dengan Tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4.18 Perhitungan Uji Outlier Stasiun Parapat

| No | Tahun | X | P | Log X | LogX-logXr | (LogX-logXr)2 | (LogX-logXr)3 |
|-----------------------------|-------|--------|-------|--------|-----------------|---------------|------------------------|
| 1 | 2011 | 161 | 9,09 | 2,207 | 0,281 | 0,0791 | 0,0222 |
| 2 | 2010 | 155 | 18,18 | 2,190 | 0,264 | 0,0699 | 0,0185 |
| 3 | 2007 | 105 | 27,27 | 2,021 | 0,095 | 0,0091 | 0,0009 |
| 4 | 2008 | 102 | 36,36 | 2,007 | 0,081 | 0,0066 | 0,0005 |
| 5 | 2012 | 86 | 45,45 | 1,934 | 0,009 | 0,0001 | 0,0000 |
| 6 | 2005 | 84 | 54,55 | 1,924 | -0,002 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 2009 | 73 | 63,64 | 1,860 | -0,066 | 0,0043 | -0,0003 |
| 8 | 2004 | 65 | 72,73 | 1,813 | -0,113 | 0,0128 | -0,0014 |
| 9 | 2013 | 54 | 81,82 | 1,732 | -0,194 | 0,0375 | -0,0072 |
| 10 | 2006 | 37 | 90,91 | 1,569 | -0,357 | 0,1271 | -0,0453 |
| Jumlah | | 921,30 | | 19,259 | 0,000 | 0,34633 | -0,012 |
| Momen Sentral | | | | | 0,000 | 0,03463 | -0.001220 |
| Rerata | | | | | | 1,926 | |
| Standar Deviasi (Sd) | | | | | | 0,196166458 | |
| Skewness (Cs) | | | | | | -0,224439294 | |
| Jumlah data (n) | | | | | | 10 | |
| Kn | | | | | | 2,036 | |
| Batas Atas | | | | | 211,51 mm/tahun | | <u>Diterima</u> |
| Batas Bawah | | | | | 33,62 mm/tahun | | <u>Diterima</u> |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.19 Perhitungan Uji Outlier Stasiun Sibolga

| No | Tahun | X | P | Log X | LogX-logXr | (LogX-logXr) ² | (LogX-logXr) ³ |
|--------|-------|--------------------------------|-------|--------|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 2012 | 188 | 9,09 | 2,274 | 0,348 | 0,1213 | 0.0422 |
| 2 | 2010 | 170 | 18,18 | 2,230 | 0,305 | 0,0927 | 0.0282 |
| 3 | 2011 | 169 | 27,27 | 2,228 | 0,302 | 0,0912 | 0.0275 |
| 4 | 2008 | 162 | 36,36 | 2,210 | 0,284 | 0,0804 | 0.0228 |
| 5 | 2007 | 159 | 45,45 | 2,201 | 0,275 | 0,0759 | 0.0209 |
| 6 | 2013 | 148 | 54,55 | 2,171 | 0,245 | 0,0600 | 0.0147 |
| 7 | 2006 | 136 | 63,64 | 2,134 | 0,208 | 0,0431 | 0.0089 |
| 8 | 2004 | 126 | 72,73 | 2,100 | 0,174 | 0,0304 | 0.0053 |
| 9 | 2005 | 111 | 81,82 | 2,045 | 0,119 | 0,0143 | 0.0017 |
| 10 | 2009 | 103 | 90,91 | 2,013 | 0,087 | 0,0076 | 0.0007 |
| Jumlah | | 1472.20 | | 21,606 | 2,347 | 0,61680 | 0,173 |
| | | Momen Sentral | | | 0,235 | 0,06168 | 0.017301 |
| | | Rerata | | | | 2,161 | |
| | | Standar Deviasi (Stdev) | | | | 0,085600088 | |
| | | Skewness (Cs) | | | | -0,599425039 | |
| | | Jumlah data (n) | | | | 10 | |
| | | Kn | | | | 2,036 | |
| | | Batas Atas | | | 216,23 mm/tahun | | <u>Diterima</u> |
| | | Batas Bawah | | | 96,91 mm/tahun | | <u>Diterima</u> |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.20 Perhitungan Uji Outlier Stasiun Balige

| No | Tahun | X | P | Log X | LogX-logXr | (LogX-logXr) ² | (LogX-logXr) ³ |
|--------|-------|--------------------------------|-------|--------|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 2007 | 252 | 9,09 | 2,401 | 0,475 | 0,2261 | 0.1075 |
| 2 | 2008 | 216 | 18,18 | 2,334 | 0,408 | 0,1667 | 0.0681 |
| 3 | 2010 | 195 | 27,27 | 2,290 | 0,364 | 0,1327 | 0.0484 |
| 4 | 2005 | 127 | 36,36 | 2,104 | 0,178 | 0,0316 | 0.0056 |
| 5 | 2006 | 121 | 45,45 | 2,082 | 0,156 | 0,0245 | 0.0038 |
| 6 | 2011 | 119 | 54,55 | 2,076 | 0,150 | 0,0225 | 0.0034 |
| 7 | 2009 | 95 | 63,64 | 1,978 | 0,052 | 0,0027 | 0.0001 |
| 8 | 2013 | 90 | 72,73 | 1,954 | 0,028 | 0,0008 | 0.0000 |
| 9 | 2004 | 75 | 81,82 | 1,874 | -0,051 | 0,0026 | -0.0001 |
| 10 | 2012 | 63 | 90,91 | 1,799 | -0,127 | 0,0160 | -0.0020 |
| Jumlah | | 1352.90 | | 20,894 | 1,635 | 0,62631 | 0,235 |
| | | Momen Sentral | | | 0,163 | 0,06263 | 0,023476 |
| | | Rerata | | | | 2,089 | |
| | | Standar Deviasi (Stdev) | | | | 0,199761608 | |
| | | Skewness (Cs) | | | | 0,260983266 | |
| | | Jumlah data (n) | | | | 10 | |
| | | Kn | | | | 2,036 | |
| | | Batas Atas | | | 313,40 mm/tahun | | <u>Diterima</u> |
| | | Batas Bawah | | | 48,16 mm/tahun | | <u>Diterima</u> |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

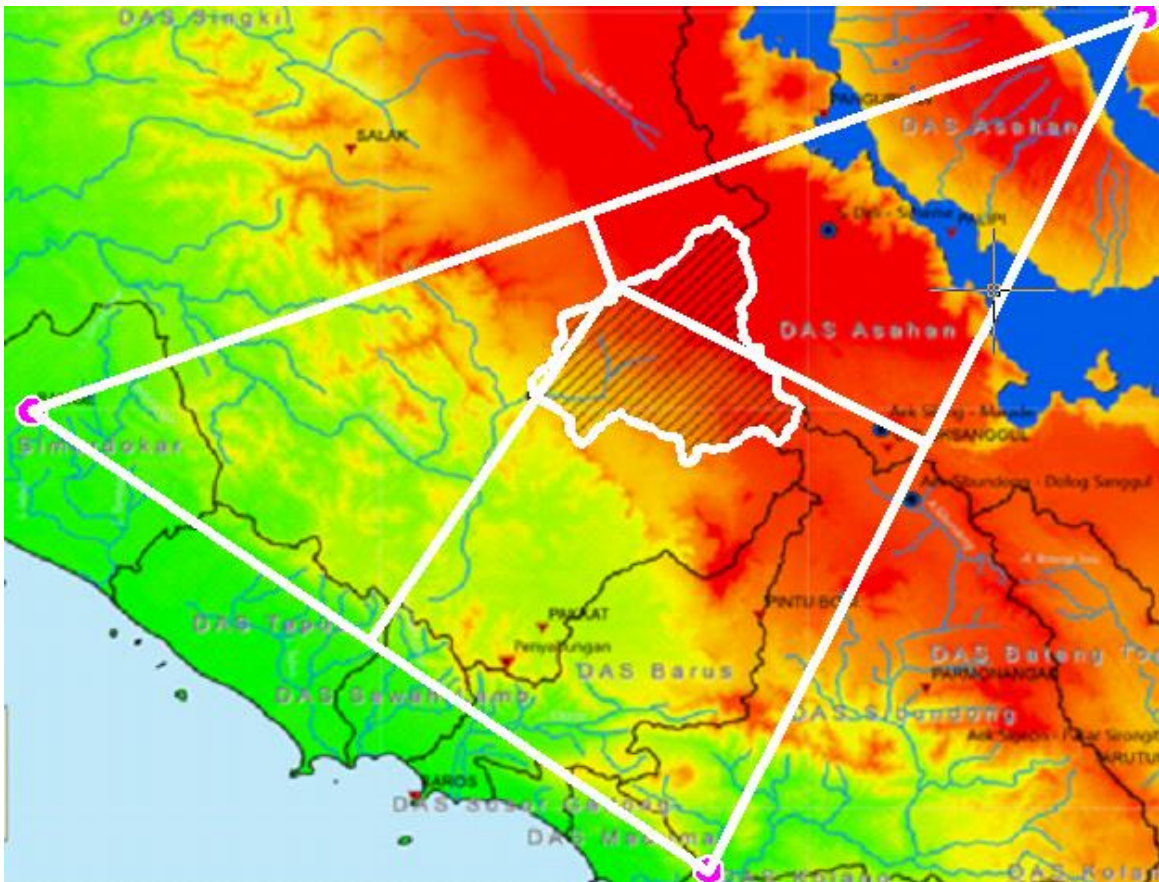
Dari perhitungan Uji Outlier di setiap data stasiun menunjukkan bahwa data Diterima. Jika data telah diterima pada Uji Outlier maka tidak perlu melakukan pergantian data atau pembuangan data.

4.1.3. Poligon Thiessen

Data curah hujan pada studi PLTM Sion terdapat dari 3 (tiga) stasiun hujan. Maka sebelum masuk dalam perhitungan selanjutnya, dilakukan terlebih dahulu perhitungan curah hujan bulanan rerata daerah dengan metode Poligon Thiessen. Metode ini dimaksudkan untuk menggabungkan data 3 (tiga) stasiun menjadi satu sebagai pendekatan pada lokasi studi.

Contoh perhitungan pada bulan januari tahun 2004:

- a. Menentukan penggambaran Poligon Thiessen pada peta Das lokasi studi. Penggambaran tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai berikut:



Gambar 4.7 Poligon Thiessen pada PLTM Sion
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- b. Menentukan nilai koefisien setiap stasiun, koefisien tersebut didapat dari perbandingan antara luasan DAS yang diwakili oleh satu stasiun dengan total luas DAS, untuk hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.21 sebagai berikut:

Tabel 4.21 Hasil Koefisien dari Poligon Tiessen

| No | Stasiun | Koefisien |
|---------------|---------|-----------|
| 1 | Parapat | 0,713 |
| 2 | Sibolga | 0,248 |
| 3 | Balige | 0,038 |
| Jumlah | | 1 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- c. Menentukan nilai Curah Hujan Bulanan Rerata Daerah, dengan cara data pada Tabel 4.7, Tabel 4.11, dan Tabel 4.15 dan hasil koefisien Poligon Tiessen pada Tabel 2.21 dikalikan sesuai dengan koefisien setiap stasiun,
$$\frac{(CH\ S.Parapat \times Koef.\ S.Parapat) + (CH\ S.Sibolga \times Koef.\ S.Sibolga) + (CH\ S.Balige \times Koef.\ S.Balige)}{3}$$
 = 223,9 mm/bulan.

Untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.22 sebagai berikut:

Tabel 4.22 Curah Hujan Bulanan Rerata Daerah Hasil Perhitungan dari Poligon Tiessen

| TAHUN | BULAN (mm/bulan) | | | | | | | | | | | |
|-------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC |
| 2004 | 224 | 173 | 246 | 252 | 188 | 59 | 147 | 146 | 266 | 207 | 339 | 191 |
| | 16 | 12 | 15 | 18 | 13 | 10 | 15 | 13 | 21 | 19 | 22 | 19 |
| 2005 | 165 | 127 | 150 | 125 | 69 | 63 | 135 | 297 | 126 | 258 | 355 | 257 |
| | 14 | 10 | 11 | 10 | 8 | 7 | 9 | 10 | 11 | 16 | 21 | 19 |
| 2006 | 302 | 229 | 127 | 181 | 127 | 108 | 70 | 143 | 229 | 264 | 288 | 320 |
| | 14 | 15 | 8 | 11 | 10 | 10 | 8 | 10 | 15 | 15 | 23 | 19 |
| 2007 | 287 | 200 | 148 | 169 | 208 | 114 | 246 | 128 | 216 | 396 | 303 | 249 |
| | 17 | 12 | 11 | 14 | 12 | 10 | 10 | 11 | 11 | 13 | 17 | 16 |
| 2008 | 214 | 179 | 168 | 136 | 102 | 98 | 180 | 198 | 242 | 287 | 275 | 364 |
| | 15 | 8 | 16 | 12 | 9 | 11 | 12 | 10 | 12 | 13 | 18 | 19 |
| 2009 | 272 | 166 | 262 | 153 | 68 | 99 | 105 | 181 | 193 | 233 | 292 | 226 |
| | 15 | 10 | 15 | 12 | 8 | 6 | 9 | 12 | 11 | 13 | 21 | 17 |
| 2010 | 222 | 252 | 268 | 191 | 241 | 165 | 202 | 182 | 212 | 227 | 419 | 265 |
| | 12 | 14 | 13 | 13 | 11 | 10 | 10 | 9 | 11 | 13 | 21 | 18 |
| 2011 | 199 | 167 | 178 | 234 | 133 | 59 | 68 | 182 | 142 | 278 | 464 | 475 |
| | 13 | 10 | 11 | 11 | 9 | 7 | 3 | 11 | 10 | 12 | 17 | 16 |
| 2012 | 70 | 266 | 111 | 155 | 68 | 99 | 164 | 125 | 159 | 97 | 365 | 378 |
| | 10 | 15 | 4 | 9 | 6 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 17 | 18 |
| 2013 | 211 | 154 | 113 | 213 | 173 | 85 | 74 | 227 | 221 | 326 | 355 | 231 |
| | 11 | 15 | 8 | 15 | 12 | 10 | 8 | 13 | 12 | 18 | 20 | 14 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- d. Menentukan nilai Curah Hujan Maksimum Rerata Daerah, dengan cara data pada Tabel 4.8, Tabel 4.12, dan Tabel 4.16 dan hasil koefisien Poligon Tiessen pada Tabel 2.21 dikalikan sesuai dengan koefisien setiap stasiun,
- $$\frac{(CH\ S.Parapat \times Koef.\ S.Parapat) + (CH\ S.Sibolga \times Koef.\ S.Sibolga) + (CH\ S.Balige \times Koef.\ S.Balige)}{3}$$
- = 80,54 mm/hari

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.23 sebagai berikut:

Tabel 4.23 Curah Hujan Maksimum Rerata Daerah Hasil Perhitungan dari Poligon Tiessen

| No | Tahun | Curah Hujan (mm/hari) |
|----|-------|--------------------------|
| 1 | 2004 | 80,54 |
| 2 | 2005 | 92,36 |
| 3 | 2006 | 64,89 |
| 4 | 2007 | 124,05 |
| 5 | 2008 | 120,98 |
| 6 | 2009 | 80,94 |
| 7 | 2010 | 160,26 |
| 8 | 2011 | 161,46 |
| 9 | 2012 | 110,47 |
| 10 | 2013 | 78,79 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2. Analisa Debit Banjir

Dalam analisa debit banjir terdapat beberapa tahapan perhitungan dimulai dari analisa frekuensi. Studi perencanaan PLTM Sion memperhitungkan beberapa metode distribusi dalam analisa frekuensi, yaitu Distribusi Log Normal, Distribusi Gumbel, dan Distribusi Log Pearson III. Setelah perhitungan analisa frekuensi, akan dilakukan pengujian setiap distribusi yang perhitungkan.

Hasil dari uji distribusi akan ditentukan distribusi yang digunakan dalam perhitungan Hidrograf Satuan Sintesi (HSS). Untuk perhitungan HSS akan memperhitungkan 2 (dua) metode, yaitu HSS Nakayasu dan HSS Limantara. Penentuan hasil HSS yang digunakan akan dipilih yang sesuai dengan kondisi studi).

4.2.1. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Log Normal

Dalam perhitungan hujan rancangan distribusi memerlukan data curah hujan maksimum tahunan sesuai pada Tabel 4.23. Data tersebut akan diurutkan terlebih dahulu

dari nilai yang lebih besar ke data yang lebih kecil. Perbedaan distribusi log normal dengan distribusi yang lain dapat dilihat pada nilai skewness yang dianggap 0 pada penentuan nilai G. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungannya sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Log X Rerata, Standar Deviasi (Sd), dan Skewness (Cs) sesuai distribusi dan rumus parameter statistik pada Tabel 2.2, untuk hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.24,

Tabel 4.24 Parameter Statistik Distribusi Log Normal

| No | Tahun | Xt (mm/hari) | P (%) | Log X | Log X- LogXr | (Log X- LogXr) ² | (Log X- LogXr) ³ |
|-------------------------|-------|-----------------|----------|----------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 2011 | 161 | 9,09 | 2,21 | 0,195984 | 0,038410 | 0,007528 |
| 2 | 2010 | 160 | 18,18 | 2,20 | 0,192760 | 0,037156 | 0,007162 |
| 3 | 2007 | 124 | 27,27 | 2,09 | 0,081509 | 0,006644 | 0,000542 |
| 4 | 2008 | 121 | 36,36 | 2,08 | 0,070660 | 0,004993 | 0,000353 |
| 5 | 2012 | 110 | 45,45 | 2,04 | 0,031176 | 0,000972 | 0,000030 |
| 6 | 2005 | 92 | 54,55 | 1,97 | -0,046608 | 0,002172 | -0,000101 |
| 7 | 2009 | 81 | 63,64 | 1,91 | -0,103901 | 0,010796 | -0,001122 |
| 8 | 2004 | 81 | 72,73 | 1,91 | -0,106062 | 0,011249 | -0,001193 |
| 9 | 2013 | 79 | 81,82 | 1,90 | -0,115602 | 0,013364 | -0,001545 |
| 10 | 2006 | 65 | 90,91 | 1,81 | -0,199916 | 0,039966 | -0,007990 |
| Log X rerata | | | = | 2,012 | | | |
| St. Deviasi (Sd) | | | = | 0,136 | | | |
| Skewness (Cs) | | | = | 0,204 | | | |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- b. Untuk perhitungan selanjutnya akan memperhitungkan hujan rancangan dengan periode ulang (Tr) 1,01 tahun; 2,5 tahun; 25 tahun; 50 tahun; dan 100 tahun,
- c. Menentukan nilai Probabilitaas (P), untuk Periode Ulang (Tr) 1,01 tahun = $100/Tr = 99\%$,
- d. Menentukan nilai G, dapat melihat Tabel Faktor Frekuensi untuk Distribusi Log Pearson Type III dengan pertimbangan nilai Skewness (Cs) = 0 maka didapat nilai G = -2,236,
- e. Menentukan nilai G.Sd = $G \times Sd = -2,236 \times 0,136 = -0,316$,
- f. Menentukan nilai Log X = $\text{Log X rerata} + G.Sd = 2,012 + -0,316 = 1,696$,
- g. Menentukan nilai Curah Hujan Rancangan, (Xt) = $10^{\text{Log X}} = 10^{1,696} = 49,710 \text{ mm/hari}$.

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.25:

Tabel 4.25 Hasil Hujan Rancangan Distribusi Log Normal

| Tr | Pr (%) | Cs | S | G | G.S | Log X | Xt (mm/hari) |
|------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------------|
| 1.01 | 99 | 0,204 | 0,136 | -2,326 | -0,316 | 1,696 | 49,710 |
| 2 | 50 | 0,204 | 0,136 | 0,000 | 0,000 | 2,012 | 102,819 |
| 5 | 20 | 0,204 | 0,136 | 0,842 | 0,114 | 2,126 | 133,761 |
| 10 | 10 | 0,204 | 0,136 | 1,282 | 0,174 | 2,186 | 153,474 |
| 25 | 4 | 0,204 | 0,136 | 1,751 | 0,238 | 2,250 | 177,695 |
| 50 | 2 | 0,204 | 0,136 | 2,054 | 0,279 | 2,291 | 195,340 |
| 100 | 1 | 0,204 | 0,136 | 2,326 | 0,316 | 2,328 | 212,668 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2.2. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Gumbel

Dalam perhitungan hujan rancangan distribusi gumbel terdapat perbedaan dari distribusi lainnya. Distribusi ini menggunakan tabel dengan nilai Y_n dan S_n berdasarkan jumlah data. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungannya sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai X_t Rerata dan Standar Deviasi (Sd), sesuai distribusi dan rumus parameter statistik pada Tabel 2.2, untuk hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.26,

Tabel 4.26 Parameter Statistik Distribusi Gumbel

| No. | Tahun | Xt (mm/hari) |
|-----------|-------|-----------------|
| 1 | 2011 | 161 |
| 2 | 2010 | 160 |
| 3 | 2007 | 124 |
| 4 | 2008 | 121 |
| 5 | 2012 | 110 |
| 6 | 2005 | 92 |
| 7 | 2009 | 81 |
| 8 | 2004 | 81 |
| 9 | 2013 | 79 |
| 10 | 2006 | 65 |
| Xt rerata | = | 107,473 |
| Sd | = | 34,094 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- b. Untuk perhitungan selanjutnya akan memperhitungkan hujan rancangan dengan periode ulang (T_r) 1,01 tahun; 2,5 tahun; 25 tahun; 50 tahun; dan 100 tahun,
- c. Menentukan nilai Probabilitaas (P), untuk Periode Ulang (T_r) 1,01 tahun = $100/T_r = 99\%$,

- d. Menentukan nilai $Y_t = (-\ln(-\ln(\text{Tr}-1)))/\text{Tr}$, untuk $\text{Tr} = 1,01$, maka $Y_t = (-\ln(-\ln(1,01-1)))/0,01 = -1,529$,
- e. Menentukan nilai Y_n dan S_n , berdasarkan jumlah data adalah 10, maka didapat nilai $Y_n = 0,4952$ dan $S_n = 0,9496$ sesuai Tabel 2.3 dan Tabel 2.4,
- f. Menentukan nilai $K = (Y_t - Y_n)/S_n$, untuk $\text{Tr} = 1,01$ maka $K = (-1,529 - 0,4952)/0,9496 = -2,132$,
- g. Menentukan nilai Curah Hujan Rancangan, $(X_t) = X_{\text{rerata}} + K \times S_d = 107,473 + (-2,132) \times 34,094 = 34,786$ mm/hari.

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.27:

Tabel 4.27 Hasil Hujan Rancangan Distribusi Gumbel

| Tr | Pr | Yt | Sd | Yn | Sn | K | Xt (mm/hari) |
|------|----|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| 1.01 | 99 | -1,529 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | -2,132 | 34,786 |
| 2 | 50 | 0,367 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | -0,136 | 102,853 |
| 5 | 20 | 1,500 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | 1,058 | 143,547 |
| 10 | 10 | 2,250 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | 1,848 | 170,489 |
| 20 | 5 | 2,970 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | 2,606 | 196,333 |
| 25 | 4 | 3,199 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | 2,847 | 204,531 |
| 50 | 2 | 3,902 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | 3,588 | 229,786 |
| 100 | 1 | 4,600 | 34,094 | 0,4952 | 0,9496 | 4,323 | 254,854 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2.3. Perhitungan Hujan Rancangan Distribusi Log Pearson III

Dalam perhitungan hujan rancangan distribusi log pearson III teradpat perbedaan dari beberapa distribusi lainnya. Distribusi ini mengangap nilai skewness sesuai dengan perhitungan dalam menentukan nilai G. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungna sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Rerata, Maksimum, Minimum, Standar Deviasi (Sd), Skewness (Cs), dan Koefisien Kurtosis (Ck) sesuai distribusi dan rumus parameter statistik pada Tabel 2.2, untuk hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.28,

Tabel 4.28 Parameter Statistik Distribusi Log Pearson III

| No. | Tahun | Curah Hujan (Xi) (mm/hari) | Log Xi | Log Xi - Log X _{ri} | (Log Xi - Log X _{ri}) ² | (Log Xi - Log X _{ri}) ³ | Probability (%) |
|--------------------------------|-------|-------------------------------|--------|------------------------------|--|--|-----------------|
| 1 | 2011 | 161,46 | 2,208 | 0,20 | 0,0384 | 0,0075 | 10 |
| 2 | 2010 | 160,26 | 2,205 | 0,19 | 0,0372 | 0,0072 | 20 |
| 3 | 2007 | 124,05 | 2,094 | 0,08 | 0,0066 | 0,0005 | 30 |
| 4 | 2008 | 120,98 | 2,083 | 0,07 | 0,0050 | 0,0004 | 40 |
| 5 | 2012 | 110,47 | 2,043 | 0,03 | 0,0010 | 0,0000 | 50 |
| 6 | 2005 | 92,36 | 1,965 | -0,05 | 0,0022 | -0,0001 | 60 |
| 7 | 2009 | 80,94 | 1,908 | -0,10 | 0,0108 | -0,0011 | 70 |
| 8 | 2004 | 80,54 | 1,906 | -0,11 | 0,0112 | -0,0012 | 80 |
| 9 | 2013 | 78,79 | 1,896 | -0,12 | 0,0134 | -0,0015 | 90 |
| 10 | 2006 | 64,89 | 1,812 | -0,20 | 0,0400 | -0,0080 | 100 |
| Jumlah | | | 20,121 | 0,000 | 0,166 | 0,004 | |
| Rerata Log Xi | | | 2,012 | | | | |
| Maksimum | | | 2,208 | | | | |
| Minimum | | | 1,812 | | | | |
| Standar Deviasi (Sd) | | | 0,136 | | | | |
| Skewness (Cs) | | | 0,204 | | | | |
| Koefisien Kurtosis (Ck) | | | -1,153 | | | | |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- b. Untuk perhitungan selanjutnya akan memperhitungkan hujan rancangan dengan periode ulang (Tr) 1,01 tahun; 2,5 tahun; 25 tahun; 50 tahun; dan 100 tahun,
- c. Menentukan nilai Probabilitaas (P), untuk Periode Ulang (Tr) 1,01 tahun = $100/Tr = 99\%$,
- d. Menentukan nilai G, untuk Tr = 1,01 dan Cs = 0,204, maka didapat pada tabel Log Pearson III bahwa $G = -2,172$,
- e. Menentukan nilai Log X = Rerata Log Xi + (G x Sd) = $2,012 + (-2,172 \times 0,136) = 1,717$,
- f. Menentukan nilai Curah Hujan Rancangan, $(X_t) = 10^{\text{Log X}} = 10^{1,717} = 53,15 \text{ mm/hari}$.

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.29:

Tabel 4.29 Hasil Hujan Rancangan Distribusi Log Pearson III

| No. | Periode Ulang | Probabilitas (%) | G | Log X | Xt (mm/hari) |
|-----|---------------|------------------|--------|-------|-----------------|
| 1 | 1.01 | 99,01 | -2,172 | 1,717 | 52,15 |
| 2 | 2 | 50,00 | -0,034 | 2,008 | 101,74 |
| 3 | 5 | 20,00 | 0,830 | 2,125 | 133,25 |
| 4 | 10 | 10,00 | 1,301 | 2,189 | 154,40 |
| 5 | 20 | 5,00 | 1,647 | 2,235 | 171,99 |
| 6 | 25 | 4,00 | 1,819 | 2,259 | 181,52 |
| 7 | 50 | 2,00 | 2,161 | 2,305 | 201,97 |
| 8 | 100 | 1,00 | 2,475 | 2,348 | 222,78 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2.4. Perhitungan Uji Chi Kuadrat

Dalam perhitungan uji chi kuadrat merupakan pengujian hipotesa setiap distribusi yang dapat menentukan hipotesa setiap distribusi itu diterima atau tidak. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungna sebagai berikut:

- Menentukan nilai jumlah kelas (k), berdasarkan jumlah data (n) adalah 10 maka jumlah kelas = $1 + 3,22 \times \text{Log}(n) = 1 + 3,22 \times \text{Log}(10) = 4,2$ dibulatkan menjadi 4 kelas,
- Menentukan nilai batas – batas kelas berdasarkan probabilitas 25%, 50%, dan 70%,
- Menentukan nilai G berdasarkan Tabel Uji Chi Kuadrat dengan nilai skewiness sesuai perhitungan setiap distribusi, untuk hasil perhitungannya dapat dilihat ada Tabel 4.30,

Tabel 4.30 Hasil Perhitungan Kelas Log Normal (Uji Chi Kuadrat)

| Pr (%) | G | Sd | log X | Anti Log |
|--------|-------|-------|-------|----------|
| 25 | 1,595 | 0,136 | 2,228 | 169,224 |
| 50 | 2,054 | 0,136 | 2,291 | 195,340 |
| 75 | 2,190 | 0,136 | 2,309 | 203,820 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- Dari Tabel 4.30 didapatkan nilai-nilai batas kelas (Anti Log). Untuk batas kelas 1 = 0 mm s/d 169,224 mm/hari,
- Menentukan nilai *Expected Frequency*, (E_f) = 2,5 (merupakan nilai yang akan dikurangi dari jumlah data yang masuk setaip kelasnya),

- f. Menentukan nilai *Observed Frequency*, (*Of*) = 10 (jumlah data yang masuk pada kelas tersebut),
- g. Menentukan nilai $Ef - Of = 10 - 2,5 = 7,5$
- h. Menentukan nilai $(Ef - Of)^2 = 7,5^2 = 56,250$,
- i. Menentukan diterima atau tidak hipotesa distribusi, penentuan tersebut berdasarkan jumlah $(Ef - Of)^2 < 5,99$ maka diterima, $(Ef - Of)^2 > 5,99$ maka tidak diterima. Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.31,

Tabel 4.31 Hasil Uji Kuadrat Distribusi Log Normal

| No. | Batas Kelas (mm/hari) | Expected Frequency (Ef) | Observed Frequency (Of) | Ef - Of | (Ef - Of) ² |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|--------------------------|
| 1 | 0 - 169,224 | 2,50 | 10 | 7,50 | 56,25 |
| 2 | 169,224 - 195,340 | 2,50 | 0 | 2,50 | 6,25 |
| 3 | 195,340 - 203,820 | 2,50 | 0 | 2,50 | 6,25 |
| 4 | 203,820 - ~ | 2,50 | 0 | 2,50 | 6,25 |
| Jumlah | | 10,00 | 10 | | 75,00 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil Uji Kuadrat Distribusi Log Normal = $(Ef - Of)^2 > 5,99 =$ **Hipotesa Log Normal Tidak Diterima.**

Untuk hasil perhitungan Uji Chi Kuadrat pada distribusi selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.32 sampai dengan 4.35 sebagai berikut:

Tabel 4.32 Hasil Perhitungan Kelas Gumbel (Uji Chi Kuadrat)

| Pr (%) | Tr | Yt | Yn | Sn | K | Xt |
|--------|------|--------|--------|--------|-------|---------|
| 25 | 4,00 | 1,246 | 0,4952 | 0,9496 | 0,79 | 134,426 |
| 50 | 2,00 | 0,367 | 0,4952 | 0,9496 | -0,14 | 102,853 |
| 75 | 1,33 | -0,327 | 0,4952 | 0,9496 | -0,87 | 77,967 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.33 Hasil Uji Kuadrat Distribusi Gumbel

| No. | Batas Kelas (mm/hari) | Expected Frequency (Ef) | Observed Frequency (Of) | Ef - Of | (Ef - Of) ² |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|--------------------------|
| 1 | 0 - 77,967 | 2,50 | 1 | 1,50 | 2,25 |
| 2 | 77,967 - 102,853 | 2,50 | 4 | 1,50 | 2,25 |
| 3 | 102,853 - 134,426 | 2,50 | 3 | 0,50 | 0,25 |
| 4 | 134,426 - ~ | 2,50 | 2 | 0,50 | 0,25 |
| Jumlah | | 10,00 | 10 | | 5,00 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil Uji Kuadrat Distribusi Gumbel = $(E_f - O_f)^2 < 5,99 = \text{Hipotesa Gumbel Diterima.}$

Tabel 4.34 Hasil Perhitungan Kelas Log Pearson III (Uji Chi Kuadrat)

| Pr (%) | G | S | log X | Anti Log |
|--------|--------|-------|-------|----------|
| 25 | 0,542 | 0,136 | 2,086 | 121,791 |
| 50 | -0,034 | 0,136 | 2,008 | 101,745 |
| 75 | -0,759 | 0,136 | 1,909 | 81,101 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.35 Hasil Uji Kuadrat Distribusi Log Pearson III

| No. | Batas Kelas (mm/hari) | Expected Frequency (Ef) | Observed Frequency (Of) | Ef - Of | (Ef - Of) ² |
|--------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|------------------------|
| 1 | 0 - 81,101 | 2,50 | 4 | 1,50 | 2,25 |
| 2 | 81,101 - 101,745 | 2,50 | 1 | 1,50 | 2,25 |
| 3 | 101,745 - 121,791 | 2,50 | 2 | 0,50 | 0,25 |
| 4 | 121,79 - ~ | 2,50 | 3 | 0,50 | 0,25 |
| Jumlah | | 10,00 | 10 | | 5,00 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil Uji Kuadrat Distribusi Log Pearson III = $(E_f - O_f)^2 < 5,99 = \text{Hipotesa Log Pearson III Diterima.}$

4.2.5. Perhitungan Uji Smirnov Kolmogrof

Dalam perhitunga Uji Smirnov Kolmogrof akan menentukan diterima atau tidaknya setiap distribusi. Parameter yang digunakan adalah data curah hujan maksimum tahunan terurut. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan sebagai berikut:

- Menentukan nilai Probabilitas dangan jumlah data $(n) = 10$, $(P(X_i)) = 1/n + 1 \times 100\% = 9,09\%$,
- Menentukan nilai Log Xi = Log (Xi) = Log (161,46) = 2,208
- Menentukan nila G berdasarkan Tabel Uji Kolmogrof dengan nilai skewiness sesuai perhitungan setiap distribusi, $G = 1,444$
- Menentukan nilai probabilitas empiris $(P(X_m))$ berdasarkan Tabel Uji Kolmogrof dengan parameter G, dan Cs (Cs = 0 untuk distribusi Log Normal), $P(X_m) = 7,405$
- Menentukan nilai probabilitas teoritis dan empiris, $[P(X_i) - P(X_m)] = 1,444 - 7,405 = 1,686$,
- Menentukan diterima atau tidaknya distribusi, berdasarkan nilai D maks dan D kritis, jika $D \text{ maks} < D \text{ kritis}$ maka distribusi diterima, jika $D \text{ maks} > D \text{ kritis}$ maka

distribusi tidak diterima. Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.36 sebagai berikut:

Tabel 4.36 Hasil Uji Smirnov Kolomogrof Distribusi Log Normal

| No | Tahun | X_i (mm/hari) | $P(X_i)$ | $\log X_i$ | G | $P(X_m)$ | $[P(X_i) - P(X_m)]$ |
|----------|-------|-----------------|----------|------------|--------|----------|---------------------|
| 1 | 2011 | 161,46 | 9,09 | 2,208 | 1,444 | 7,405 | 1,686 |
| 2 | 2010 | 160,26 | 18,18 | 2,205 | 1,421 | 7,785 | 10,397 |
| 3 | 2007 | 124,05 | 27,27 | 2,094 | 0,601 | 28,598 | 1,326 |
| 4 | 2008 | 120,98 | 36,36 | 2,083 | 0,521 | 31,447 | 4,917 |
| 5 | 2012 | 110,47 | 45,45 | 2,043 | 0,230 | 41,814 | 3,640 |
| 6 | 2005 | 92,36 | 54,55 | 1,965 | -0,343 | 62,238 | 7,692 |
| 7 | 2009 | 80,94 | 63,64 | 1,908 | -0,766 | 77,281 | 13,645 |
| 8 | 2004 | 80,54 | 72,73 | 1,906 | -0,782 | 77,848 | 5,121 |
| 9 | 2013 | 78,79 | 81,82 | 1,896 | -0,852 | 80,225 | 1,593 |
| 10 | 2006 | 64,89 | 90,91 | 1,812 | -1,473 | 92,634 | 1,725 |
| D maks | | | | | | | 0,136 |
| D kritis | | | | | | | 0,410 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil Uji Smirnov Kolmogrof Distribusi Log Normal = D maks < D kritis = **Distribusi Log Normal Diterima.**

Untuk hasil perhitungan Uji Smirnov Kolmogrof pada distribusi selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.37 sampai dengan 4.38 sebagai berikut:

Tabel 4.37 Hasil Uji Smirnov Kolomogrof Distribusi Gumbel

| No | Tahun | X_i (mm/hari) | $P(X_i)$ | k | Yt | Pt | $[P(X_i) - P(X_m)]$ |
|----------|-------|-----------------|----------|--------|--------|---------|---------------------|
| 1 | 2011 | 161,46 | 9,09 | 1,583 | 1,999 | 227,892 | 218,801 |
| 2 | 2010 | 160,26 | 18,18 | 1,548 | 1,966 | 208,106 | 189,924 |
| 3 | 2007 | 124,05 | 27,27 | 0,486 | 0,957 | 12,474 | 14,798 |
| 4 | 2008 | 120,98 | 36,36 | 0,396 | 0,872 | 9,688 | 26,676 |
| 5 | 2012 | 110,47 | 45,45 | 0,088 | 0,579 | 3,821 | 41,633 |
| 6 | 2005 | 92,36 | 54,55 | -0,443 | 0,074 | 0,223 | 54,322 |
| 7 | 2009 | 80,94 | 63,64 | -0,778 | -0,244 | 0,485 | 63,152 |
| 8 | 2004 | 80,54 | 72,73 | -0,790 | -0,255 | 0,500 | 72,227 |
| 9 | 2013 | 78,79 | 81,82 | -0,841 | -0,304 | 0,562 | 81,256 |
| 10 | 2006 | 64,89 | 90,91 | -1,249 | -0,691 | 0,847 | 90,062 |
| D maks | | | | | | | 2,188 |
| D kritis | | | | | | | 0,410 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil Uji Smirnov Kolmogrof Distribusi Gumbel = D maks > D kritis = **Distribusi Gumbel Tidak Diterima.**

Tabel 4.38 Hasil Uji Smirnov Kolmogrof Distribusi Log Pearson III

| No | Tahun | X _i (mm/hari) | P (X _i) | Log X _i | G | P (X _m) | [P(X _i) - P(X _m)] | |
|----|-------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------|---------------------|---|-------|
| 1 | 2011 | 161,46 | 9,09 | 2,208 | 1,444 | 7,929 | 1,162 | |
| 2 | 2010 | 160,26 | 18,18 | 2,205 | 1,421 | 8,273 | 9,909 | |
| 3 | 2007 | 124,05 | 27,27 | 2,094 | 0,601 | 27,960 | 0,687 | |
| 4 | 2008 | 120,98 | 36,36 | 2,083 | 0,521 | 30,738 | 5,625 | |
| 5 | 2012 | 110,47 | 45,45 | 2,043 | 0,230 | 40,849 | 4,606 | |
| 6 | 2005 | 92,36 | 54,55 | 1,965 | -0,343 | 61,385 | 6,840 | |
| 7 | 2009 | 80,94 | 63,64 | 1,908 | -0,766 | 76,899 | 13,262 | |
| 8 | 2004 | 80,54 | 72,73 | 1,906 | -0,782 | 77,484 | 4,757 | |
| 9 | 2013 | 78,79 | 81,82 | 1,896 | -0,852 | 80,045 | 1,773 | |
| 10 | 2006 | 64,89 | 90,91 | 1,812 | -1,473 | 93,295 | 2,386 | |
| | | | | | | | D Maks | 0,133 |
| | | | | | | | D Kritis | 0,410 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil Uji Smirnov Kolmogrof Distribusi Log Pearson III = D maks < D kritis = **Distribusi Log Pearson III Diterima.**

4.2.6. Perhitungan Jam-jaman

Dalam perhitungan jam-jaman dalam studi ini menggunakan metode mononobe dengan asumsi hujan yang terjadi adalah selama 6 jam. Penentuan tersebut menentukan bahwa presentase hujan akan dibagi menjadi 1 jam selama 6 jam. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan sebagai berikut:

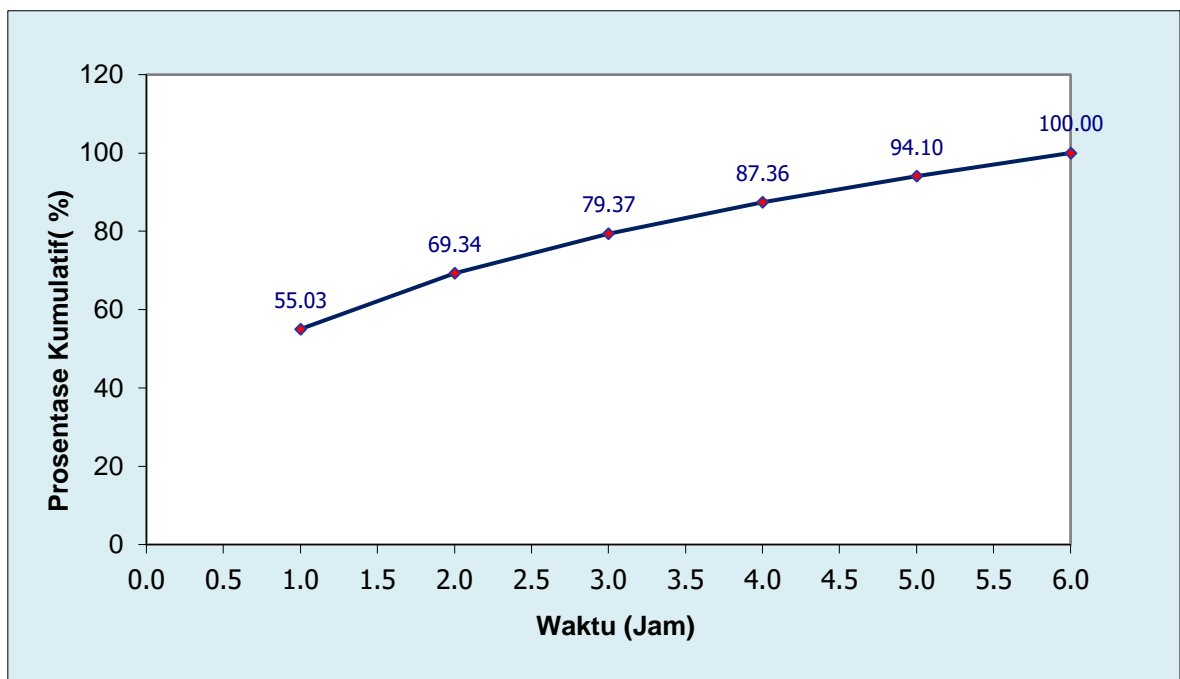
- Menentukan nilai Distribusi Hujan dengan $R_{24} = 1$ dan $t = 1$ maka, $R_t = R_{24}/6 \times (6/t)^{2/3} = 1/6 \times (6 \times 1)^{2/3} = 0,55$,
- Menentukan nilai curah hujan jam ke-(t) = $t \times R_t - (t - 1) \times R_{(t-1)} = 1 \times 0,55 - (1-1) \times 0 = 0,55$,
- Menentukan nilai Rasio = curah hujan jam ke-(t) $\times 100\% = 0,55 \times 100\% = 55,03 \%$,

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.38

Tabel 4.39 Perhitungan Distribusi Jam-jaman

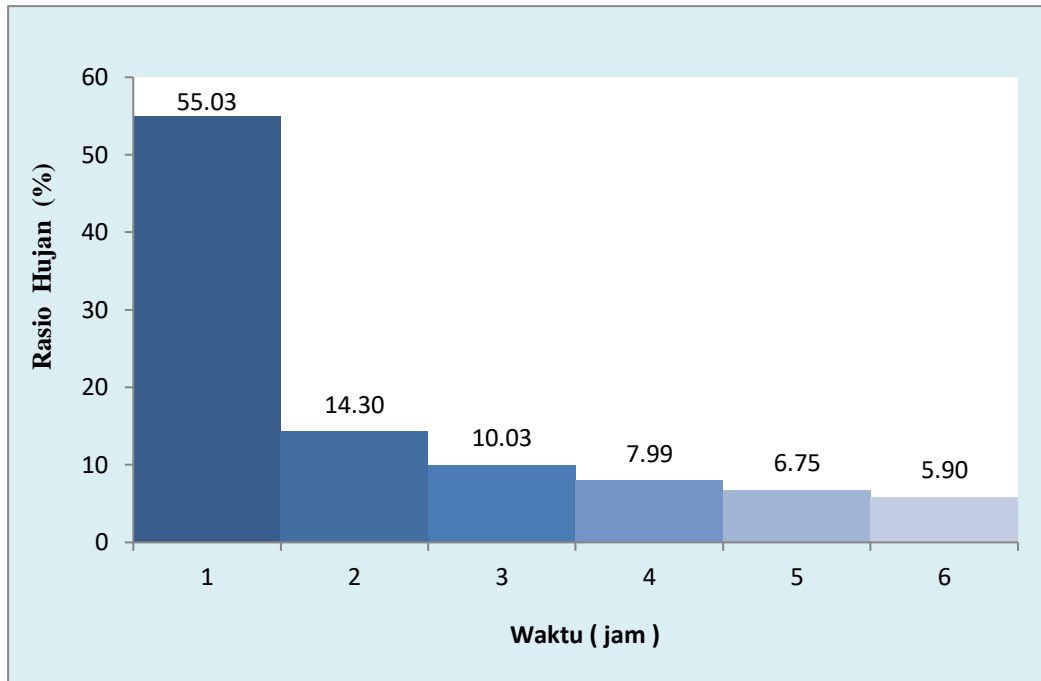
| Jam ke- (t) | Distribusi hujan | | Rasio (%) | Kumulatif [%] |
|---------------|------------------|------------------------|-----------|---------------|
| | (Rt) 1 jam-an | Curah hujan jam ke- | | |
| 1 | 0,55 | 0,55 | 55,03 | 55,03 |
| 2 | 0,35 | 0,14 | 14,30 | 69,34 |
| 3 | 0,26 | 0,10 | 10,03 | 79,37 |
| 4 | 0,22 | 0,08 | 7,99 | 87,36 |
| 5 | 0,19 | 0,07 | 6,75 | 94,10 |
| 6 | 0,17 | 0,06 | 5,90 | 100,00 |
| Jumlah | | 1,00 | 100 | |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.8 Pola Distribusi Hujan

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.9 Rasio Distribusi Hujan
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2.7. Perhitungan Hujan Netto Jam-jaman

Dalam perhitungan hujan netto jam-jaman akan digunakan untuk perhitungan hidrograf satuan sintetis. Parameter yang digunakan dalam perhitungan hujan netto jam-jaman, yaitu curah hujan rancangan (Log Pearson III), koefisien, dan presentase hujan jam-jaman. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan sebagai berikut:

- Menentukan nilai Koef. Pengaliran dipengaruhi curah hujan, $(C) = 1 - 15,7/R_t^{3/4} = 1 - (15,7/101,745^{0,75}) = 0,510$, untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.39,

Tabel 4.40 Koefisien Pengaliran Dipengaruhi Oleh Curah Hujan

| Rumus | Koef. pengaliran (C) dipengaruhi curah hujan | | | | | | Rata-rata |
|----------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | |
| Hujan Rancangan (mm) | 101,745 | 133,249 | 154,402 | 181,519 | 201,973 | 222,776 | |
| $1-15,7/R_t^{3/4}$ | 0,510 | 0,600 | 0,642 | 0,683 | 0,707 | 0,728 | 0,645 |
| $1-5,65/R_t^{1/2}$ | 0,440 | 0,511 | 0,545 | 0,581 | 0,602 | 0,621 | 0,550 |
| $1-7,20/R_t^{1/2}$ | 0,286 | 0,376 | 0,421 | 0,466 | 0,493 | 0,518 | 0,427 |
| $1-3,14/R_t^{1/3}$ | 0,327 | 0,385 | 0,415 | 0,445 | 0,465 | 0,482 | 0,420 |
| $1-6,60/R_t^{1/2}$ | 0,346 | 0,428 | 0,469 | 0,510 | 0,536 | 0,558 | 0,474 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- Menentukan nilai tataguna lahan = 0,610 sesuai data DAS Aek Simonggo,

- c. Menentukan nilai hujan dapat dilihat pada Tabel 4.39 pada bagian $1-6.60/R_t^{1/2}$,
- d. Menentukan nilai Rerata Koefisien Pengaliran, $(C) = (\text{Hujan} + \text{Tata Guna Lahan})/2 = (0,346 + 0,610)/2 = 0,478$, untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.40,

Tabel 4.41 Koefisien Pengaliran (C)

| Kala Ulang | Koefisien Pengaliran (C) | | | | | |
|-----------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| Hujan | 0,346 | 0,428 | 0,469 | 0,510 | 0,536 | 0,558 |
| Tata Guna Lahan | 0,610 | 0,610 | 0,610 | 0,610 | 0,610 | 0,610 |
| Rerata | 0,478 | 0,519 | 0,539 | 0,560 | 0,573 | 0,584 |

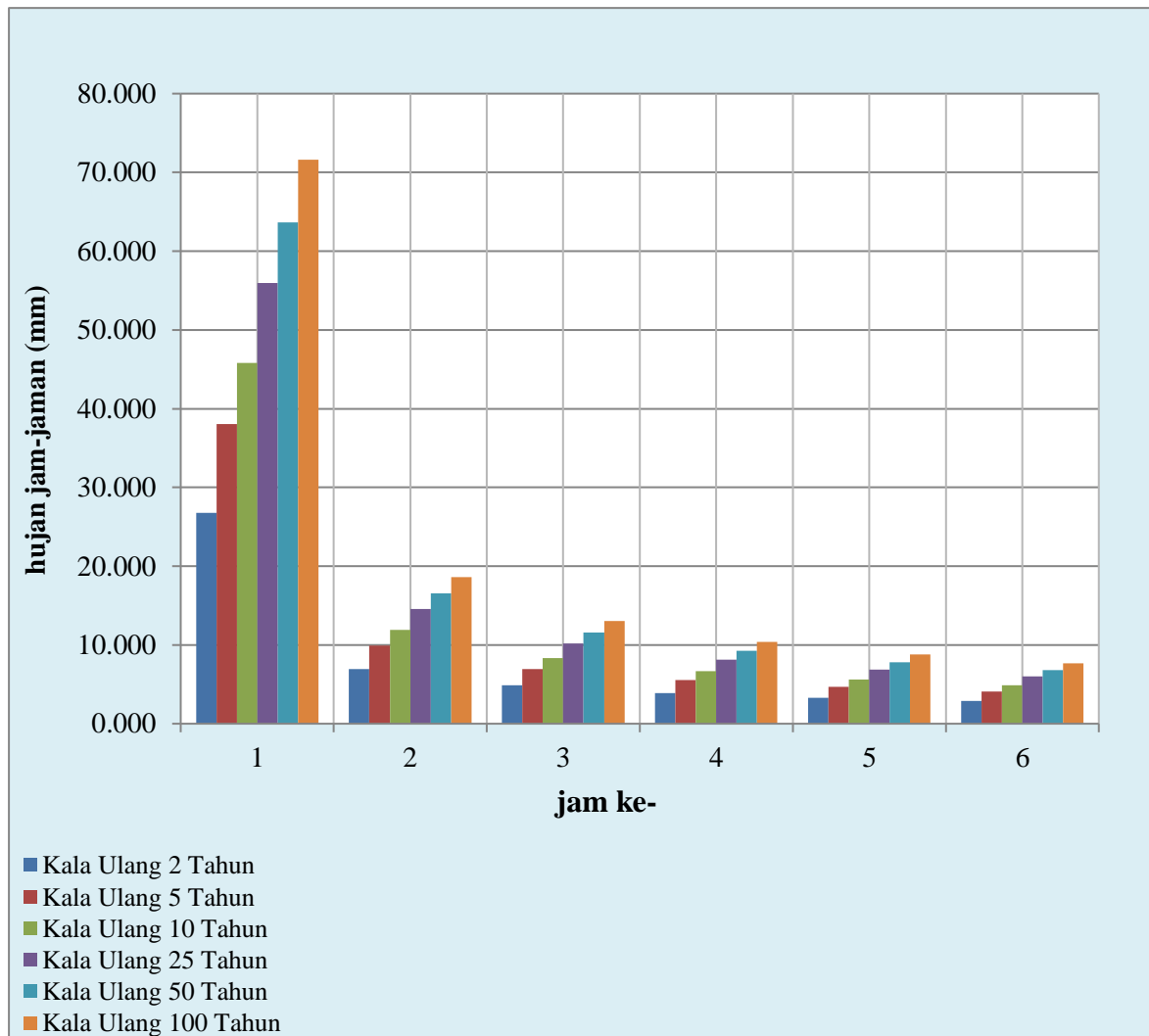
Sumber : Hasil Perhitungan, 2017

- e. Menentukan nilai hujan efektif = Hujan Rancangan x Koef. Pengaliran = $101,745 \times 0,478 = 48,618$,
- f. Menentukan nilai hujan jam-jaman = Hujan Efektif x Rasio = $48,618 \times 0,550 = 26,755$ mm, untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.41.

Tabel 4.42 Hasil Hujan Netto Jam-jaman

| No | Jam ke | Rasio | Hujan Jam-jaman (mm) | | | | | |
|-----------------------------|--------|-------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| Hujan Rancangan (mm) | | | 101,745 | 133,249 | 154,402 | 181,519 | 201,973 | 222,776 |
| Koefisien Pengaliran | | | 0,478 | 0,519 | 0,539 | 0,560 | 0,573 | 0,584 |
| Hujan Efektif (mm) | | | 48,618 | 69,173 | 83,288 | 101,662 | 115,689 | 130,080 |
| 1 | 1,0 | 0,550 | 26,755 | 38,067 | 45,835 | 55,947 | 63,666 | 71,586 |
| 2 | 2,0 | 0,143 | 6,954 | 9,894 | 11,914 | 14,542 | 16,548 | 18,607 |
| 3 | 3,0 | 0,100 | 4,878 | 6,941 | 8,357 | 10,201 | 11,608 | 13,052 |
| 4 | 4,0 | 0,080 | 3,884 | 5,526 | 6,653 | 8,121 | 9,241 | 10,391 |
| 5 | 5,0 | 0,067 | 3,280 | 4,666 | 5,618 | 6,858 | 7,804 | 8,775 |
| 6 | 6,0 | 0,059 | 2,867 | 4,079 | 4,911 | 5,994 | 6,822 | 7,670 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.10 Distribusi Netto Hujan Jam-jaman
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2.8. Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu

Dalam perhitungan hidrograf satuan sintetis (HSS) Nakayasu akan menghasilkan debit banjir sesuai kala ulang pada perhitungan hujan netto jam-jaman. HSS Nakayasu memerlukan parameter dalam perhitungannya, yaitu:

Luas DAS : 279,20 km²

Panjang Sungai Utama : 25,8 km

Parameter α : 2

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan sebagai berikut:

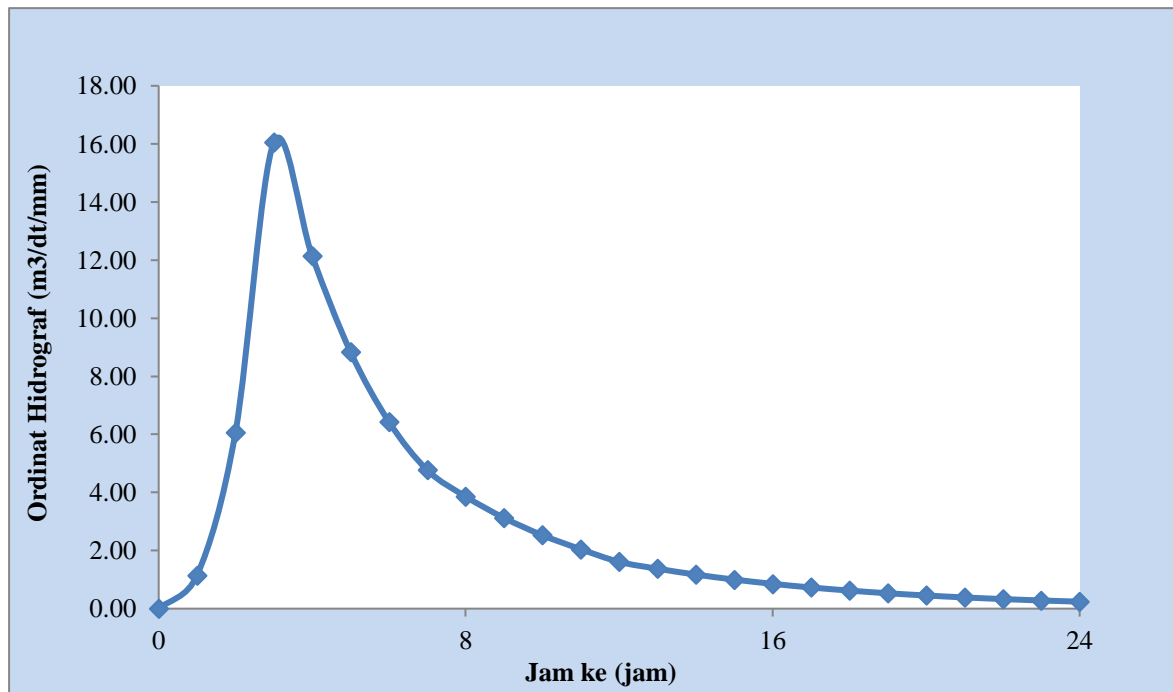
- Menentukan nilai waktu konsentrasi hujan, $(T_g) = 0,4 + 0,058 \times L = 0,4 + 0,058 \times 25,8 = 1,9$ Jam,
- Menentukan nilai $t_r = 0,73 \times T_g = 0,73 \times 1,9 = 1,42$ Jam,
- Menentukan nilai $T_p = t_g + 0,8 \times t_r = 1,9 + 0,8 \times 1,42 = 3$ Jam,

- d. Menentukan nilai $T_{0,3} = \alpha \times t_g = 2 \times 1,9 = 3,8$ Jam,
- e. Menentukan nilai debit puncak banjir, $(Q_p) = \frac{\text{Luas DAS} \times R_o}{3,6 (0,3 \times T_p + T_{0,3})} = \frac{279,20 \times 1}{36 (0,3 \times 3,03 + 3,02)} = 16,5 \text{ m}^3/\text{detik}$,
- f. Menentukan rumus pada waktu kurva naik, $(0 < t < t_p = 3 \text{ Jam})$ menggunakan rumus $\left(\frac{1}{T_p}\right)^{2,4} \times Q_p$,
- g. Menentukan rumus pada waktu kurva turun pertama $(3 \text{ Jam} < t < (T_p + T_{0,3}) = 6,83 \text{ Jam})$ menggunakan rumus $Q_p \times 0,3^{\left(\frac{t-t_p}{t_{0,3}}\right)}$,
- h. Menentukan rumus pada waktu kurva turun kedua $((T_p + T_{0,3}) < t < (T_p + T_{0,3} + 1,5T_{0,3}) = (6,83 \text{ Jam} < t < 12,52 \text{ Jam})$ menggunakan rumus $Q_p \times 0,3^{\left(\frac{p^{(t-t)} + 0,5 \times t_{0,3}}{1,5 \times t_{0,3}}\right)}$,
- i. Menentukan rumus pada waktu kurva turun ketiga $t > (T_p + T_{0,3} + 1,5 T_{0,3}) = 12,52 \text{ Jam}$ menggunakan rumus $Q_p \times 0,3^{\left(\frac{p^{(t-t)} + 0,5 \times t_{0,3}}{2 \times t_{0,3}}\right)}$, untuk hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.43 dan Gambar 4.10,

Tabel 4.43 Ordinat Hidrograf Nakayasu

| t (jam) | HSO | t (jam) | HSO | t (jam) | HSO | t (jam) | HSO | t (jam) | HSO |
|---------|-------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| 0,00 | 0,06 | 5,00 | 7,21 | 10,00 | 2,49 | 15,00 | 0,57 | 20,00 | 0,16 |
| 1,00 | 2,70 | 6,00 | 3,42 | 11,00 | 1,64 | 16,00 | 0,45 | 21,00 | 0,10 |
| 2,00 | 8,69 | 7,00 | 2,94 | 12,00 | 0,83 | 17,00 | 0,40 | 22,00 | 0,08 |
| 3,00 | 12,86 | 8,00 | 2,44 | 13,00 | 0,63 | 18,00 | 0,37 | 23,00 | 0,06 |
| 4,00 | 7,39 | 9,00 | 2,44 | 14,00 | 0,42 | 19,00 | 0,31 | 24,00 | 0,06 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gamabr 4.11 Grafik Hidrograf Nakayasu
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- j. Menentukan nilai Baseflow = $0,475 \times (\text{luas DAS})^{0,6444} \times (\text{Panjang Sungai/Luas DAS})^{0,9435} = 2,40 \text{ m}^3/\text{detik}$,
- k. Menentukan nilai Q akibat hujan netto, mengalikan distribusi hujan netto jam-jaman dengan t dan U ,
- l. Menentukan nilai Q_{banjir} , menjumlahkan Q akibat hujan netto dengan baseflow, untuk hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.44 s/d Tabel 4.49 dan Gambar 4.11.

Tabel 4.44 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 2 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 26,76 | 6,95 | 4,88 | 3,88 | 3,28 | 2,87 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 1,18 | 31,66 | 0,00 | | | | | 2,40 | 34,06 |
| 2,00 | 6,25 | 167,10 | 8,23 | 0,00 | | | | 2,40 | 177,73 |
| 3,00 | 16,53 | 442,17 | 43,43 | 5,77 | 0,00 | | | 2,40 | 493,78 |
| 4,00 | 12,03 | 321,91 | 114,93 | 30,47 | 4,60 | 0,00 | | 2,40 | 474,30 |
| 5,00 | 8,76 | 234,35 | 83,67 | 80,62 | 24,25 | 3,88 | 0,00 | 2,40 | 429,18 |
| 6,00 | 6,38 | 170,61 | 60,91 | 58,69 | 64,18 | 20,48 | 3,39 | 2,40 | 380,68 |
| 7,00 | 4,75 | 126,96 | 44,35 | 42,73 | 46,73 | 54,20 | 17,90 | 2,40 | 335,26 |
| 8,00 | 3,84 | 102,75 | 33,00 | 31,11 | 34,02 | 39,46 | 47,38 | 2,40 | 290,10 |
| 9,00 | 3,11 | 83,15 | 26,71 | 23,15 | 24,76 | 28,73 | 34,49 | 2,40 | 223,38 |
| 10,00 | 2,51 | 67,29 | 21,61 | 18,73 | 18,43 | 20,91 | 25,11 | 2,40 | 174,49 |
| 11,00 | 2,04 | 54,46 | 17,49 | 15,16 | 14,91 | 15,56 | 18,28 | 2,40 | 138,26 |
| 12,00 | 1,61 | 42,96 | 14,15 | 12,27 | 12,07 | 12,59 | 13,60 | 2,40 | 110,05 |
| 13,00 | 1,37 | 36,65 | 11,17 | 9,93 | 9,77 | 10,19 | 11,01 | 2,40 | 91,12 |
| 14,00 | 1,17 | 31,28 | 9,53 | 7,83 | 7,90 | 8,25 | 8,91 | 2,40 | 76,10 |
| 15,00 | 1,00 | 26,69 | 8,13 | 6,68 | 6,24 | 6,67 | 7,21 | 2,40 | 64,02 |
| 16,00 | 0,85 | 22,77 | 6,94 | 5,70 | 5,32 | 5,27 | 5,83 | 2,40 | 54,23 |
| 17,00 | 0,73 | 19,43 | 5,92 | 4,87 | 4,54 | 4,49 | 4,60 | 2,40 | 46,25 |
| 18,00 | 0,62 | 16,58 | 5,05 | 4,15 | 3,87 | 3,83 | 3,93 | 2,40 | 39,81 |
| 19,00 | 0,53 | 14,14 | 4,31 | 3,54 | 3,30 | 3,27 | 3,35 | 2,40 | 34,32 |
| 20,00 | 0,45 | 12,07 | 3,68 | 3,02 | 2,82 | 2,79 | 2,86 | 2,40 | 29,64 |
| 21,00 | 0,38 | 10,30 | 3,14 | 2,58 | 2,41 | 2,38 | 2,44 | 2,40 | 25,64 |
| 22,00 | 0,33 | 8,79 | 2,68 | 2,20 | 2,05 | 2,03 | 2,08 | 2,40 | 22,23 |
| 23,00 | 0,28 | 7,50 | 2,28 | 1,88 | 1,75 | 1,73 | 1,78 | 2,40 | 19,32 |
| 24,00 | 0,24 | 6,40 | 1,95 | 1,60 | 1,49 | 1,48 | 1,52 | 2,40 | 16,84 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.45 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 5 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 38,07 | 9,89 | 6,94 | 5,53 | 4,67 | 4,08 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 1,18 | 45,04 | 0,00 | | | | | 2,40 | 47,44 |
| 2,00 | 6,25 | 237,75 | 11,71 | 0,00 | | | | 2,40 | 251,85 |
| 3,00 | 16,53 | 629,12 | 61,80 | 8,21 | 0,00 | | | 2,40 | 701,52 |
| 4,00 | 12,03 | 458,00 | 163,52 | 43,35 | 6,54 | 0,00 | | 2,40 | 673,81 |
| 5,00 | 8,76 | 333,43 | 119,05 | 114,71 | 34,51 | 5,52 | 0,00 | 2,40 | 609,61 |
| 6,00 | 6,38 | 242,74 | 86,67 | 83,51 | 91,32 | 29,14 | 4,83 | 2,40 | 540,60 |
| 7,00 | 4,75 | 180,64 | 63,09 | 60,79 | 66,48 | 77,11 | 25,47 | 2,40 | 475,99 |
| 8,00 | 3,84 | 146,18 | 46,95 | 44,26 | 48,40 | 56,14 | 67,41 | 2,40 | 411,74 |
| 9,00 | 3,11 | 118,30 | 38,00 | 32,94 | 35,23 | 40,87 | 49,07 | 2,40 | 316,81 |
| 10,00 | 2,51 | 95,74 | 30,75 | 26,65 | 26,22 | 29,75 | 35,73 | 2,40 | 247,24 |
| 11,00 | 2,04 | 77,48 | 24,88 | 21,57 | 21,22 | 22,14 | 26,01 | 2,40 | 195,70 |
| 12,00 | 1,61 | 61,12 | 20,14 | 17,46 | 17,17 | 17,92 | 19,35 | 2,40 | 155,56 |
| 13,00 | 1,37 | 52,15 | 15,89 | 14,13 | 13,90 | 14,50 | 15,66 | 2,40 | 128,63 |
| 14,00 | 1,17 | 44,50 | 13,56 | 11,14 | 11,25 | 11,74 | 12,68 | 2,40 | 107,25 |
| 15,00 | 1,00 | 37,97 | 11,57 | 9,51 | 8,87 | 9,50 | 10,26 | 2,40 | 90,07 |
| 16,00 | 0,85 | 32,39 | 9,87 | 8,11 | 7,57 | 7,49 | 8,30 | 2,40 | 76,14 |
| 17,00 | 0,73 | 27,64 | 8,42 | 6,92 | 6,46 | 6,39 | 6,55 | 2,40 | 64,78 |
| 18,00 | 0,62 | 23,58 | 7,18 | 5,91 | 5,51 | 5,45 | 5,59 | 2,40 | 55,63 |
| 19,00 | 0,53 | 20,12 | 6,13 | 5,04 | 4,70 | 4,65 | 4,77 | 2,40 | 47,82 |
| 20,00 | 0,45 | 17,17 | 5,23 | 4,30 | 4,01 | 3,97 | 4,07 | 2,40 | 41,15 |
| 21,00 | 0,38 | 14,65 | 4,46 | 3,67 | 3,42 | 3,39 | 3,47 | 2,40 | 35,46 |
| 22,00 | 0,33 | 12,50 | 3,81 | 3,13 | 2,92 | 2,89 | 2,96 | 2,40 | 30,61 |
| 23,00 | 0,28 | 10,67 | 3,25 | 2,67 | 2,49 | 2,47 | 2,53 | 2,40 | 26,47 |
| 24,00 | 0,24 | 9,10 | 2,77 | 2,28 | 2,13 | 2,10 | 2,16 | 2,40 | 22,94 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.46 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 10 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 55,95 | 14,54 | 10,20 | 8,12 | 6,86 | 5,99 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 1,18 | 66,20 | 0,00 | | | | | 2,40 | 68,60 |
| 2,00 | 6,25 | 349,41 | 17,21 | 0,00 | | | | 2,40 | 369,02 |
| 3,00 | 16,53 | 924,60 | 90,82 | 12,07 | 0,00 | | | 2,40 | 1029,89 |
| 4,00 | 12,03 | 673,12 | 240,32 | 63,71 | 9,61 | 0,00 | | 2,40 | 989,16 |
| 5,00 | 8,76 | 490,04 | 174,96 | 168,58 | 50,72 | 8,11 | 0,00 | 2,40 | 894,82 |
| 6,00 | 6,38 | 356,76 | 127,37 | 122,73 | 134,21 | 42,83 | 7,09 | 2,40 | 793,39 |
| 7,00 | 4,75 | 265,48 | 92,73 | 89,35 | 97,70 | 113,33 | 37,44 | 2,40 | 698,43 |
| 8,00 | 3,84 | 214,85 | 69,00 | 65,05 | 71,13 | 82,51 | 99,07 | 2,40 | 604,00 |
| 9,00 | 3,11 | 173,87 | 55,84 | 48,40 | 51,78 | 60,07 | 72,12 | 2,40 | 464,49 |
| 10,00 | 2,51 | 140,71 | 45,19 | 39,17 | 38,53 | 43,73 | 52,51 | 2,40 | 362,24 |
| 11,00 | 2,04 | 113,87 | 36,57 | 31,70 | 31,19 | 32,54 | 38,22 | 2,40 | 286,49 |
| 12,00 | 1,61 | 89,83 | 29,60 | 25,65 | 25,24 | 26,33 | 28,44 | 2,40 | 227,50 |
| 13,00 | 1,37 | 76,65 | 23,35 | 20,76 | 20,42 | 21,31 | 23,02 | 2,40 | 187,91 |
| 14,00 | 1,17 | 65,40 | 19,92 | 16,38 | 16,53 | 17,25 | 18,63 | 2,40 | 156,50 |
| 15,00 | 1,00 | 55,80 | 17,00 | 13,97 | 13,04 | 13,96 | 15,08 | 2,40 | 131,25 |
| 16,00 | 0,85 | 47,61 | 14,50 | 11,92 | 11,13 | 11,01 | 12,20 | 2,40 | 110,77 |
| 17,00 | 0,73 | 40,62 | 12,37 | 10,17 | 9,49 | 9,39 | 9,62 | 2,40 | 94,08 |
| 18,00 | 0,62 | 34,66 | 10,56 | 8,68 | 8,10 | 8,02 | 8,21 | 2,40 | 80,63 |
| 19,00 | 0,53 | 29,57 | 9,01 | 7,41 | 6,91 | 6,84 | 7,01 | 2,40 | 69,15 |
| 20,00 | 0,45 | 25,23 | 7,69 | 6,32 | 5,90 | 5,84 | 5,98 | 2,40 | 59,35 |
| 21,00 | 0,38 | 21,53 | 6,56 | 5,39 | 5,03 | 4,98 | 5,10 | 2,40 | 50,99 |
| 22,00 | 0,33 | 18,37 | 5,60 | 4,60 | 4,29 | 4,25 | 4,35 | 2,40 | 43,86 |
| 23,00 | 0,28 | 15,67 | 4,77 | 3,93 | 3,66 | 3,63 | 3,71 | 2,40 | 37,78 |
| 24,00 | 0,24 | 13,37 | 4,07 | 3,35 | 3,13 | 3,09 | 3,17 | 2,40 | 32,58 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.47 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 25 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 63,67 | 16,55 | 11,61 | 9,24 | 7,80 | 6,82 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 1,18 | 66,20 | 0,00 | | | | | 2,40 | 68,60 |
| 2,00 | 6,25 | 349,41 | 17,21 | 0,00 | | | | 2,40 | 369,02 |
| 3,00 | 16,53 | 924,60 | 90,82 | 12,07 | 0,00 | | | 2,40 | 1029,89 |
| 4,00 | 12,03 | 673,12 | 240,32 | 63,71 | 9,61 | 0,00 | | 2,40 | 989,16 |
| 5,00 | 8,76 | 490,04 | 174,96 | 168,58 | 50,72 | 8,11 | 0,00 | 2,40 | 894,82 |
| 6,00 | 6,38 | 356,76 | 127,37 | 122,73 | 134,21 | 42,83 | 7,09 | 2,40 | 793,39 |
| 7,00 | 4,75 | 265,48 | 92,73 | 89,35 | 97,70 | 113,33 | 37,44 | 2,40 | 698,43 |
| 8,00 | 3,84 | 214,85 | 69,00 | 65,05 | 71,13 | 82,51 | 99,07 | 2,40 | 604,00 |
| 9,00 | 3,11 | 173,87 | 55,84 | 48,40 | 51,78 | 60,07 | 72,12 | 2,40 | 464,49 |
| 10,00 | 2,51 | 140,71 | 45,19 | 39,17 | 38,53 | 43,73 | 52,51 | 2,40 | 362,24 |
| 11,00 | 2,04 | 113,87 | 36,57 | 31,70 | 31,19 | 32,54 | 38,22 | 2,40 | 286,49 |
| 12,00 | 1,61 | 89,83 | 29,60 | 25,65 | 25,24 | 26,33 | 28,44 | 2,40 | 227,50 |
| 13,00 | 1,37 | 76,65 | 23,35 | 20,76 | 20,42 | 21,31 | 23,02 | 2,40 | 187,91 |
| 14,00 | 1,17 | 65,40 | 19,92 | 16,38 | 16,53 | 17,25 | 18,63 | 2,40 | 156,50 |
| 15,00 | 1,00 | 55,80 | 17,00 | 13,97 | 13,04 | 13,96 | 15,08 | 2,40 | 131,25 |
| 16,00 | 0,85 | 47,61 | 14,50 | 11,92 | 11,13 | 11,01 | 12,20 | 2,40 | 110,77 |
| 17,00 | 0,73 | 40,62 | 12,37 | 10,17 | 9,49 | 9,39 | 9,62 | 2,40 | 94,08 |
| 18,00 | 0,62 | 34,66 | 10,56 | 8,68 | 8,10 | 8,02 | 8,21 | 2,40 | 80,63 |
| 19,00 | 0,53 | 29,57 | 9,01 | 7,41 | 6,91 | 6,84 | 7,01 | 2,40 | 69,15 |
| 20,00 | 0,45 | 25,23 | 7,69 | 6,32 | 5,90 | 5,84 | 5,98 | 2,40 | 59,35 |
| 21,00 | 0,38 | 21,53 | 6,56 | 5,39 | 5,03 | 4,98 | 5,10 | 2,40 | 50,99 |
| 22,00 | 0,33 | 18,37 | 5,60 | 4,60 | 4,29 | 4,25 | 4,35 | 2,40 | 43,86 |
| 23,00 | 0,28 | 15,67 | 4,77 | 3,93 | 3,66 | 3,63 | 3,71 | 2,40 | 37,78 |
| 24,00 | 0,24 | 13,37 | 4,07 | 3,35 | 3,13 | 3,09 | 3,17 | 2,40 | 32,58 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.48 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 50 Tahun

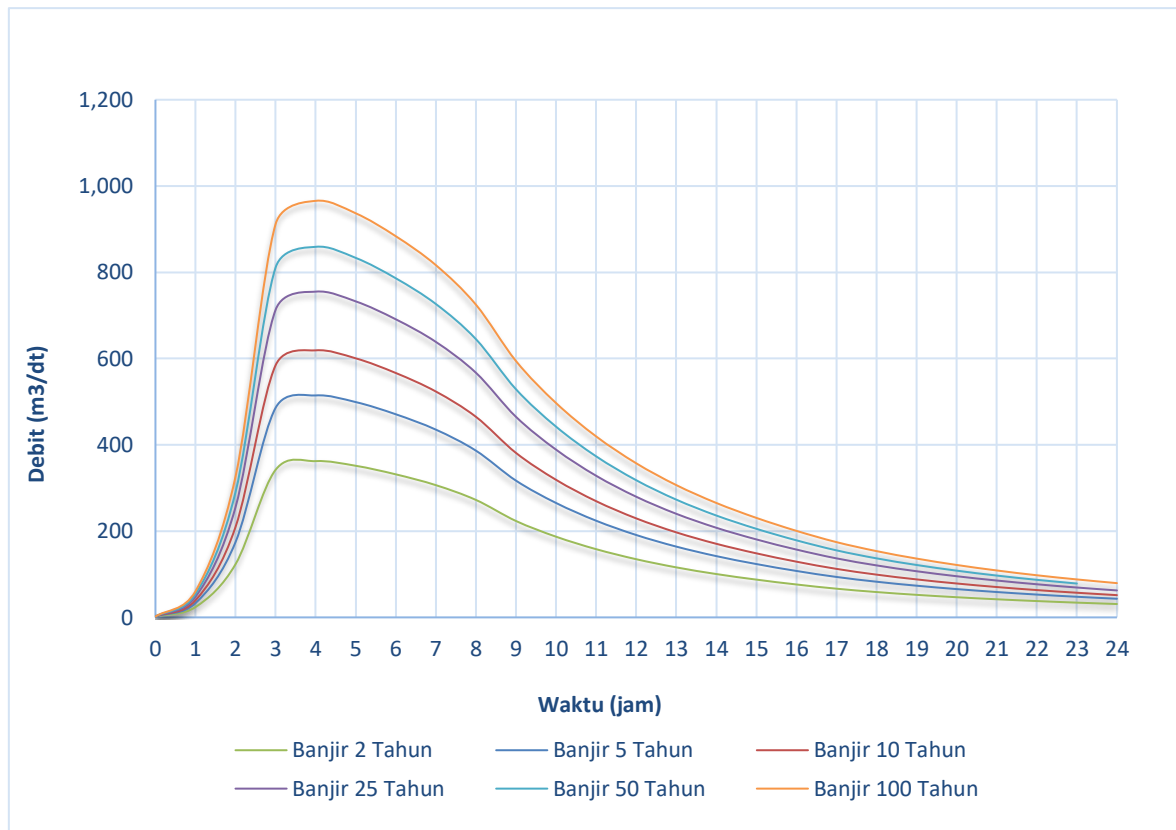
| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 63,67 | 16,55 | 11,61 | 9,24 | 7,80 | 6,82 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 1,18 | 75,34 | 0,00 | | | | | 2,40 | 77,74 |
| 2,00 | 6,25 | 397,62 | 19,58 | 0,00 | | | | 2,40 | 419,60 |
| 3,00 | 16,53 | 1052,18 | 103,35 | 13,74 | 0,00 | | | 2,40 | 1171,67 |
| 4,00 | 12,03 | 766,00 | 273,48 | 72,50 | 10,94 | 0,00 | | 2,40 | 1125,32 |
| 5,00 | 8,76 | 557,66 | 199,10 | 191,84 | 57,72 | 9,23 | 0,00 | 2,40 | 1017,95 |
| 6,00 | 6,38 | 405,98 | 144,95 | 139,66 | 152,73 | 48,74 | 8,07 | 2,40 | 902,53 |
| 7,00 | 4,75 | 302,11 | 105,52 | 101,68 | 111,19 | 128,97 | 42,60 | 2,40 | 794,47 |
| 8,00 | 3,84 | 244,49 | 78,53 | 74,02 | 80,95 | 93,89 | 112,74 | 2,40 | 687,01 |
| 9,00 | 3,11 | 197,86 | 63,55 | 55,08 | 58,93 | 68,36 | 82,07 | 2,40 | 528,25 |
| 10,00 | 2,51 | 160,12 | 51,43 | 44,58 | 43,85 | 49,76 | 59,75 | 2,40 | 411,89 |
| 11,00 | 2,04 | 129,58 | 41,62 | 36,08 | 35,49 | 37,03 | 43,50 | 2,40 | 325,69 |
| 12,00 | 1,61 | 102,23 | 33,68 | 29,19 | 28,72 | 29,97 | 32,37 | 2,40 | 258,56 |
| 13,00 | 1,37 | 87,22 | 26,57 | 23,63 | 23,24 | 24,25 | 26,20 | 2,40 | 213,51 |
| 14,00 | 1,17 | 74,42 | 22,67 | 18,64 | 18,81 | 19,63 | 21,20 | 2,40 | 177,77 |
| 15,00 | 1,00 | 63,50 | 19,34 | 15,90 | 14,84 | 15,88 | 17,16 | 2,40 | 149,02 |
| 16,00 | 0,85 | 54,18 | 16,50 | 13,57 | 12,66 | 12,53 | 13,88 | 2,40 | 125,73 |
| 17,00 | 0,73 | 46,23 | 14,08 | 11,58 | 10,80 | 10,69 | 10,95 | 2,40 | 106,73 |
| 18,00 | 0,62 | 39,44 | 12,02 | 9,88 | 9,22 | 9,12 | 9,35 | 2,40 | 91,42 |
| 19,00 | 0,53 | 33,65 | 10,25 | 8,43 | 7,86 | 7,78 | 7,97 | 2,40 | 78,36 |
| 20,00 | 0,45 | 28,72 | 8,75 | 7,19 | 6,71 | 6,64 | 6,80 | 2,40 | 67,21 |
| 21,00 | 0,38 | 24,50 | 7,46 | 6,14 | 5,73 | 5,67 | 5,81 | 2,40 | 57,70 |
| 22,00 | 0,33 | 20,91 | 6,37 | 5,24 | 4,89 | 4,83 | 4,95 | 2,40 | 49,58 |
| 23,00 | 0,28 | 17,84 | 5,43 | 4,47 | 4,17 | 4,13 | 4,23 | 2,40 | 42,66 |
| 24,00 | 0,24 | 15,22 | 4,64 | 3,81 | 3,56 | 3,52 | 3,61 | 2,40 | 36,75 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.49 Debit Banjir Nakayasu Kala Ulang 100 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 71,59 | 18,61 | 13,05 | 10,39 | 8,77 | 7,67 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 1,15 | 82,25 | 0,00 | | | | | 2,40 | 84,65 |
| 2,00 | 6,06 | 434,12 | 21,38 | 0,00 | | | | 2,40 | 457,90 |
| 3,00 | 16,05 | 1148,76 | 112,84 | 15,00 | 0,00 | | | 2,40 | 1278,99 |
| 4,00 | 12,14 | 868,79 | 298,59 | 79,15 | 11,94 | 0,00 | | 2,40 | 1260,87 |
| 5,00 | 8,84 | 632,49 | 225,82 | 209,45 | 63,01 | 10,08 | 0,00 | 2,40 | 1143,26 |
| 6,00 | 6,43 | 460,46 | 164,40 | 158,41 | 166,74 | 53,21 | 8,81 | 2,40 | 1014,43 |
| 7,00 | 4,77 | 341,41 | 119,68 | 115,32 | 126,11 | 140,81 | 46,51 | 2,40 | 892,25 |
| 8,00 | 3,86 | 276,30 | 88,74 | 83,96 | 91,81 | 106,49 | 123,08 | 2,40 | 772,77 |
| 9,00 | 3,12 | 223,60 | 71,82 | 62,25 | 66,84 | 77,53 | 93,09 | 2,40 | 597,51 |
| 10,00 | 2,53 | 180,95 | 58,12 | 50,38 | 49,56 | 56,44 | 67,77 | 2,40 | 465,61 |
| 11,00 | 2,05 | 146,44 | 47,03 | 40,77 | 40,10 | 41,85 | 49,34 | 2,40 | 367,93 |
| 12,00 | 1,61 | 115,31 | 38,06 | 32,99 | 32,46 | 33,87 | 36,58 | 2,40 | 291,67 |
| 13,00 | 1,37 | 98,39 | 29,97 | 26,70 | 26,27 | 27,41 | 29,60 | 2,40 | 240,74 |
| 14,00 | 1,17 | 83,95 | 25,57 | 21,03 | 21,26 | 22,18 | 23,96 | 2,40 | 200,34 |
| 15,00 | 1,00 | 71,63 | 21,82 | 17,94 | 16,74 | 17,95 | 19,39 | 2,40 | 167,87 |
| 16,00 | 0,85 | 61,12 | 18,62 | 15,31 | 14,28 | 14,13 | 15,69 | 2,40 | 141,55 |
| 17,00 | 0,73 | 52,15 | 15,89 | 13,06 | 12,19 | 12,06 | 12,36 | 2,40 | 120,09 |
| 18,00 | 0,62 | 44,49 | 13,55 | 11,14 | 10,40 | 10,29 | 10,54 | 2,40 | 102,82 |
| 19,00 | 0,53 | 37,96 | 11,56 | 9,51 | 8,87 | 8,78 | 8,99 | 2,40 | 88,08 |
| 20,00 | 0,45 | 32,39 | 9,87 | 8,11 | 7,57 | 7,49 | 7,67 | 2,40 | 75,51 |
| 21,00 | 0,39 | 27,64 | 8,42 | 6,92 | 6,46 | 6,39 | 6,55 | 2,40 | 64,78 |
| 22,00 | 0,33 | 23,58 | 7,18 | 5,91 | 5,51 | 5,45 | 5,59 | 2,40 | 55,62 |
| 23,00 | 0,28 | 20,12 | 6,13 | 5,04 | 4,70 | 4,65 | 4,77 | 2,40 | 47,81 |
| 24,00 | 0,24 | 17,17 | 5,23 | 4,30 | 4,01 | 3,97 | 4,07 | 2,40 | 41,15 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gamabr 4.11 Graafik Satuan Sintetis Nakayasu
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2.9. Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis Limantara

Dalam perhitungan HSS Limantara terdapat perbedaan pada bagian parameter perhitungan yang dibutuhkan. Parameter dalam perhitungan HSS Limantara, yaitu:

Luas DAS (A) : 279,20 km²

Panjang Sungai Utama (L) : 25,8 km

Kemiringan Sungai (S) : 0,010

Kekasaran DAS (n) : 0,07 (hutan)

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan sebagai berikut:

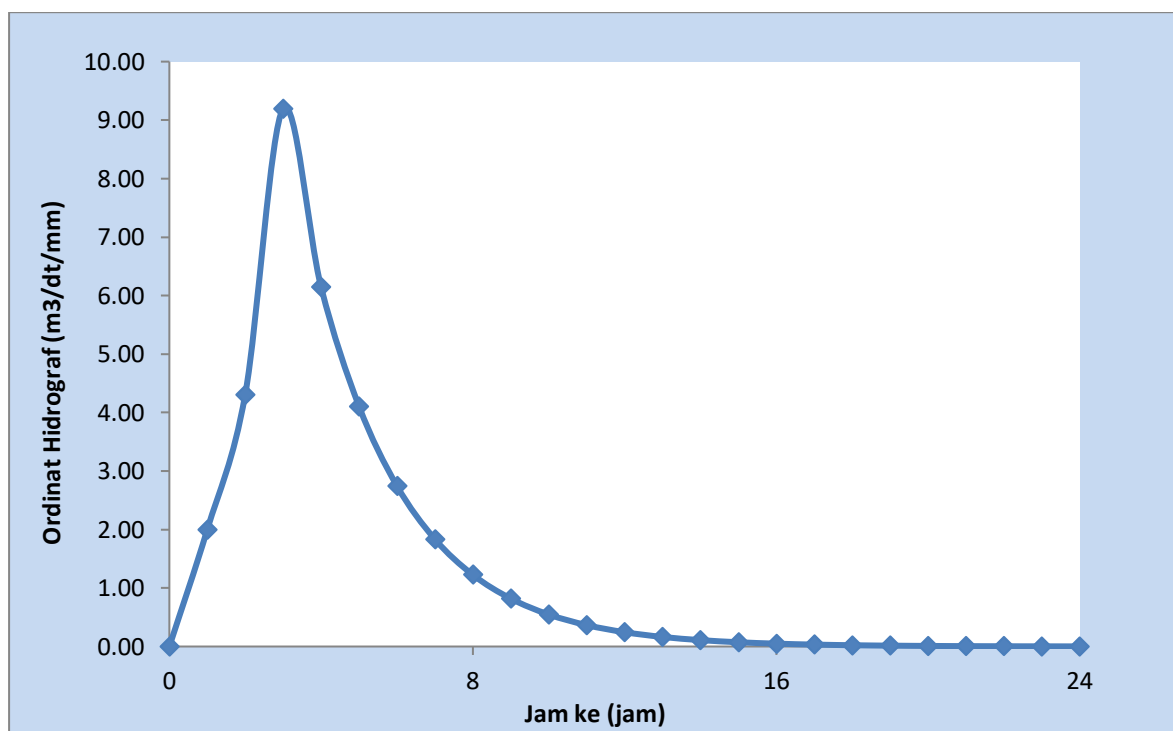
- Menentukan nilai waktu konsentrasi hujan, $(T_g) = 0,4 + 0,058 \times L = 0,4 + 0,058 \times 25,8 = 1,9$ Jam,
- Menentukan nilai $t_r = 0,73 \times T_g = 0,73 \times 1,9 = 1,38$ Jam,
- Menentukan nilai $T_p = t_g + 0,8 \times t_r = 1,9 + 0,8 \times 1,38 = 3$ Jam,
- Menentukan nilai debit puncak banjir, $(Q_p) = 0,042 \times A^{0,451} \times L^{0,497} \times Lc^{0,356} \times S^{-0,131} \times n^{0,168} = 0,042 \times 279,20^{0,451} \times 25,8^{0,497} \times (25,8/2)^{0,356} \times 0,01^{-0,131} \times 0,07^{0,168} = 7,8$ m³/detik,

- e. Menentukan rumus pada waktu kurva naik ($0 < t < T_p = 3,42$ Jam) maka menggunakan rumus $Q_p (t/T_p)^{1.107}$,
- f. Menentukan rumus pada waktu kurva turun ($t > T_p = 3,42$ Jam) maka menggunakan rumus $Q_p \cdot 10^{(0,175(T_p-t))}$, untuk hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.50 dan Gambar 4.12,

Tabel 4.50 Ordinart Hidrograf Limantara

| t (jam) | Ordinat | t (jam) | Ordinat | t (jam) | Ordinat | t (jam) | Ordinat | t (jam) | Ordinat |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,00 | 0,000 | 5,00 | 4,108 | 10,00 | 0,548 | 15,00 | 0,073 | 20,00 | 0,010 |
| 1,00 | 2,000 | 6,00 | 2,746 | 11,00 | 0,366 | 16,00 | 0,049 | 21,00 | 0,007 |
| 2,00 | 4,308 | 7,00 | 1,835 | 12,00 | 0,245 | 17,00 | 0,033 | 22,00 | 0,004 |
| 3,00 | 9,197 | 8,00 | 1,226 | 13,00 | 0,164 | 18,00 | 0,022 | 23,00 | 0,003 |
| 4,00 | 6,147 | 9,00 | 0,820 | 14,00 | 0,109 | 19,00 | 0,015 | 24,00 | 0,002 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.12 Grafik Hidrograf Limantara

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- g. Untuk perhitungan selanjutnya sama dengan pada contoh perhitungan HSS Nakayasu. Untuk hasil dari perhitungan HSS Limantara selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.45.

Tabel 4.51 Debit Banjir HSS Limantara Kala Ulang 2 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 26,76 | 6,95 | 4,88 | 3,88 | 3,28 | 2,87 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 2,31 | 61,73 | 0,00 | | | | | 2,40 | 64,13 |
| 2,00 | 4,97 | 132,97 | 16,05 | 0,00 | | | | 2,40 | 151,42 |
| 3,00 | 7,79 | 208,30 | 34,56 | 11,26 | 0,00 | | | 2,40 | 256,52 |
| 4,00 | 5,20 | 139,22 | 54,14 | 24,24 | 8,96 | 0,00 | | 2,40 | 228,96 |
| 5,00 | 3,48 | 93,04 | 36,19 | 37,98 | 19,30 | 7,57 | 0,00 | 2,40 | 196,48 |
| 6,00 | 2,32 | 62,19 | 24,18 | 25,38 | 30,24 | 16,30 | 6,61 | 2,40 | 167,30 |
| 7,00 | 1,55 | 41,56 | 16,16 | 16,96 | 20,21 | 25,53 | 14,25 | 2,40 | 137,08 |
| 8,00 | 1,04 | 27,78 | 10,80 | 11,34 | 13,51 | 17,06 | 22,32 | 2,40 | 105,21 |
| 9,00 | 0,69 | 18,56 | 7,22 | 7,58 | 9,03 | 11,40 | 14,92 | 2,40 | 71,11 |
| 10,00 | 0,46 | 12,41 | 4,83 | 5,06 | 6,03 | 7,62 | 9,97 | 2,40 | 48,32 |
| 11,00 | 0,31 | 8,29 | 3,23 | 3,38 | 4,03 | 5,09 | 6,66 | 2,40 | 33,09 |
| 12,00 | 0,21 | 5,54 | 2,16 | 2,26 | 2,69 | 3,40 | 4,45 | 2,40 | 22,91 |
| 13,00 | 0,14 | 3,70 | 1,44 | 1,51 | 1,80 | 2,28 | 2,98 | 2,40 | 16,11 |
| 14,00 | 0,09 | 2,48 | 0,96 | 1,01 | 1,20 | 1,52 | 1,99 | 2,40 | 11,56 |
| 15,00 | 0,06 | 1,65 | 0,64 | 0,68 | 0,80 | 1,02 | 1,33 | 2,40 | 8,52 |
| 16,00 | 0,04 | 1,11 | 0,43 | 0,45 | 0,54 | 0,68 | 0,89 | 2,40 | 6,49 |
| 17,00 | 0,03 | 0,74 | 0,29 | 0,30 | 0,36 | 0,45 | 0,59 | 2,40 | 5,14 |
| 18,00 | 0,02 | 0,49 | 0,19 | 0,20 | 0,24 | 0,30 | 0,40 | 2,40 | 4,23 |
| 19,00 | 0,01 | 0,33 | 0,13 | 0,13 | 0,16 | 0,20 | 0,27 | 2,40 | 3,62 |
| 20,00 | 0,01 | 0,22 | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,14 | 0,18 | 2,40 | 3,22 |
| 21,00 | 0,01 | 0,15 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,12 | 2,40 | 2,95 |
| 22,00 | 0,00 | 0,10 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 2,40 | 2,76 |
| 23,00 | 0,00 | 0,07 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 2,40 | 2,64 |
| 24,00 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 2,40 | 2,56 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.52 Debit Banjir HSS Limantara Kala Ulang 5 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 38,07 | 9,89 | 6,94 | 5,53 | 4,67 | 4,08 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 2,31 | 87,83 | 0,00 | | | | | 2,40 | 90,23 |
| 2,00 | 4,97 | 189,19 | 22,83 | 0,00 | | | | 2,40 | 214,42 |
| 3,00 | 7,79 | 296,37 | 49,17 | 16,01 | 0,00 | | | 2,40 | 363,95 |
| 4,00 | 5,20 | 198,07 | 77,03 | 34,49 | 12,75 | 0,00 | | 2,40 | 324,75 |
| 5,00 | 3,48 | 132,38 | 51,48 | 54,04 | 27,46 | 10,77 | 0,00 | 2,40 | 278,53 |
| 6,00 | 2,32 | 88,48 | 34,41 | 36,11 | 43,02 | 23,19 | 9,41 | 2,40 | 237,02 |
| 7,00 | 1,55 | 59,13 | 23,00 | 24,14 | 28,75 | 36,33 | 20,27 | 2,40 | 194,02 |
| 8,00 | 1,04 | 39,52 | 15,37 | 16,13 | 19,22 | 24,28 | 31,75 | 2,40 | 148,67 |
| 9,00 | 0,69 | 26,41 | 10,27 | 10,78 | 12,84 | 16,23 | 21,22 | 2,40 | 100,16 |
| 10,00 | 0,46 | 17,65 | 6,87 | 7,21 | 8,58 | 10,85 | 14,18 | 2,40 | 67,74 |
| 11,00 | 0,31 | 11,80 | 4,59 | 4,82 | 5,74 | 7,25 | 9,48 | 2,40 | 46,07 |
| 12,00 | 0,21 | 7,89 | 3,07 | 3,22 | 3,83 | 4,84 | 6,34 | 2,40 | 31,58 |
| 13,00 | 0,14 | 5,27 | 2,05 | 2,15 | 2,56 | 3,24 | 4,23 | 2,40 | 21,91 |
| 14,00 | 0,09 | 3,52 | 1,37 | 1,44 | 1,71 | 2,16 | 2,83 | 2,40 | 15,44 |
| 15,00 | 0,06 | 2,35 | 0,92 | 0,96 | 1,14 | 1,45 | 1,89 | 2,40 | 11,11 |
| 16,00 | 0,04 | 1,57 | 0,61 | 0,64 | 0,76 | 0,97 | 1,26 | 2,40 | 8,22 |
| 17,00 | 0,03 | 1,05 | 0,41 | 0,43 | 0,51 | 0,65 | 0,84 | 2,40 | 6,29 |
| 18,00 | 0,02 | 0,70 | 0,27 | 0,29 | 0,34 | 0,43 | 0,56 | 2,40 | 5,00 |
| 19,00 | 0,01 | 0,47 | 0,18 | 0,19 | 0,23 | 0,29 | 0,38 | 2,40 | 4,14 |
| 20,00 | 0,01 | 0,31 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,19 | 0,25 | 2,40 | 3,56 |
| 21,00 | 0,01 | 0,21 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,13 | 0,17 | 2,40 | 3,18 |
| 22,00 | 0,00 | 0,14 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 2,40 | 2,92 |
| 23,00 | 0,00 | 0,09 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 2,40 | 2,75 |
| 24,00 | 0,00 | 0,06 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 2,40 | 2,63 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.53 Debit Banjir HSS Limantara Kala Ulang 10 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 45,84 | 11,91 | 8,36 | 6,65 | 5,62 | 4,91 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 2,31 | 105,76 | 0,00 | | | | | 2,40 | 108,16 |
| 2,00 | 4,97 | 227,80 | 27,49 | 0,00 | | | | 2,40 | 257,68 |
| 3,00 | 7,79 | 356,84 | 59,21 | 19,28 | 0,00 | | | 2,40 | 437,73 |
| 4,00 | 5,20 | 238,49 | 92,75 | 41,53 | 15,35 | 0,00 | | 2,40 | 390,53 |
| 5,00 | 3,48 | 159,40 | 61,99 | 65,06 | 33,06 | 12,96 | 0,00 | 2,40 | 334,88 |
| 6,00 | 2,32 | 106,53 | 41,43 | 43,48 | 51,80 | 27,92 | 11,33 | 2,40 | 284,90 |
| 7,00 | 1,55 | 71,20 | 27,69 | 29,06 | 34,62 | 43,74 | 24,41 | 2,40 | 233,12 |
| 8,00 | 1,04 | 47,59 | 18,51 | 19,42 | 23,14 | 29,23 | 38,23 | 2,40 | 178,52 |
| 9,00 | 0,69 | 31,80 | 12,37 | 12,98 | 15,46 | 19,54 | 25,55 | 2,40 | 120,11 |
| 10,00 | 0,46 | 21,26 | 8,27 | 8,68 | 10,33 | 13,06 | 17,08 | 2,40 | 81,07 |
| 11,00 | 0,31 | 14,21 | 5,52 | 5,80 | 6,91 | 8,73 | 11,41 | 2,40 | 54,98 |
| 12,00 | 0,21 | 9,49 | 3,69 | 3,88 | 4,62 | 5,83 | 7,63 | 2,40 | 37,54 |
| 13,00 | 0,14 | 6,35 | 2,47 | 2,59 | 3,09 | 3,90 | 5,10 | 2,40 | 25,89 |
| 14,00 | 0,09 | 4,24 | 1,65 | 1,73 | 2,06 | 2,61 | 3,41 | 2,40 | 18,10 |
| 15,00 | 0,06 | 2,83 | 1,10 | 1,16 | 1,38 | 1,74 | 2,28 | 2,40 | 12,89 |
| 16,00 | 0,04 | 1,89 | 0,74 | 0,77 | 0,92 | 1,16 | 1,52 | 2,40 | 9,41 |
| 17,00 | 0,03 | 1,27 | 0,49 | 0,52 | 0,62 | 0,78 | 1,02 | 2,40 | 7,09 |
| 18,00 | 0,02 | 0,85 | 0,33 | 0,35 | 0,41 | 0,52 | 0,68 | 2,40 | 5,53 |
| 19,00 | 0,01 | 0,57 | 0,22 | 0,23 | 0,27 | 0,35 | 0,45 | 2,40 | 4,49 |
| 20,00 | 0,01 | 0,38 | 0,15 | 0,15 | 0,18 | 0,23 | 0,30 | 2,40 | 3,80 |
| 21,00 | 0,01 | 0,25 | 0,10 | 0,10 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 2,40 | 3,33 |
| 22,00 | 0,00 | 0,17 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,14 | 2,40 | 3,02 |
| 23,00 | 0,00 | 0,11 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 2,40 | 2,82 |
| 24,00 | 0,00 | 0,08 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 2,40 | 2,68 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.54 Debit Banjir HSS Limantara Kala Ulang 25 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 55,95 | 14,54 | 10,20 | 8,12 | 6,86 | 5,99 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 2,31 | 129,09 | 0,00 | | | | | 2,40 | 131,49 |
| 2,00 | 4,97 | 278,05 | 33,55 | 0,00 | | | | 2,40 | 314,00 |
| 3,00 | 7,79 | 435,57 | 72,27 | 23,54 | 0,00 | | | 2,40 | 533,77 |
| 4,00 | 5,20 | 291,11 | 113,21 | 50,70 | 18,74 | 0,00 | | 2,40 | 476,15 |
| 5,00 | 3,48 | 194,56 | 75,66 | 79,42 | 40,36 | 15,82 | 0,00 | 2,40 | 408,22 |
| 6,00 | 2,32 | 130,03 | 50,57 | 53,08 | 63,22 | 34,08 | 13,83 | 2,40 | 347,22 |
| 7,00 | 1,55 | 86,91 | 33,80 | 35,47 | 42,25 | 53,39 | 29,79 | 2,40 | 284,01 |
| 8,00 | 1,04 | 58,08 | 22,59 | 23,71 | 28,24 | 35,68 | 46,67 | 2,40 | 217,37 |
| 9,00 | 0,69 | 38,82 | 15,10 | 15,85 | 18,87 | 23,85 | 31,19 | 2,40 | 146,08 |
| 10,00 | 0,46 | 25,94 | 10,09 | 10,59 | 12,61 | 15,94 | 20,85 | 2,40 | 98,42 |
| 11,00 | 0,31 | 17,34 | 6,74 | 7,08 | 8,43 | 10,65 | 13,93 | 2,40 | 66,58 |
| 12,00 | 0,21 | 11,59 | 4,51 | 4,73 | 5,63 | 7,12 | 9,31 | 2,40 | 45,29 |
| 13,00 | 0,14 | 7,75 | 3,01 | 3,16 | 3,77 | 4,76 | 6,22 | 2,40 | 31,07 |
| 14,00 | 0,09 | 5,18 | 2,01 | 2,11 | 2,52 | 3,18 | 4,16 | 2,40 | 21,56 |
| 15,00 | 0,06 | 3,46 | 1,35 | 1,41 | 1,68 | 2,13 | 2,78 | 2,40 | 15,21 |
| 16,00 | 0,04 | 2,31 | 0,90 | 0,94 | 1,12 | 1,42 | 1,86 | 2,40 | 10,96 |
| 17,00 | 0,03 | 1,55 | 0,60 | 0,63 | 0,75 | 0,95 | 1,24 | 2,40 | 8,12 |
| 18,00 | 0,02 | 1,03 | 0,40 | 0,42 | 0,50 | 0,63 | 0,83 | 2,40 | 6,22 |
| 19,00 | 0,01 | 0,69 | 0,27 | 0,28 | 0,34 | 0,42 | 0,55 | 2,40 | 4,95 |
| 20,00 | 0,01 | 0,46 | 0,18 | 0,19 | 0,22 | 0,28 | 0,37 | 2,40 | 4,11 |
| 21,00 | 0,01 | 0,31 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,19 | 0,25 | 2,40 | 3,54 |
| 22,00 | 0,00 | 0,21 | 0,08 | 0,08 | 0,10 | 0,13 | 0,17 | 2,40 | 3,16 |
| 23,00 | 0,00 | 0,14 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,11 | 2,40 | 2,91 |
| 24,00 | 0,00 | 0,09 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 2,40 | 2,74 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.55 Debit Banjir HSS Limantara Kala Ulang 50 Tahun

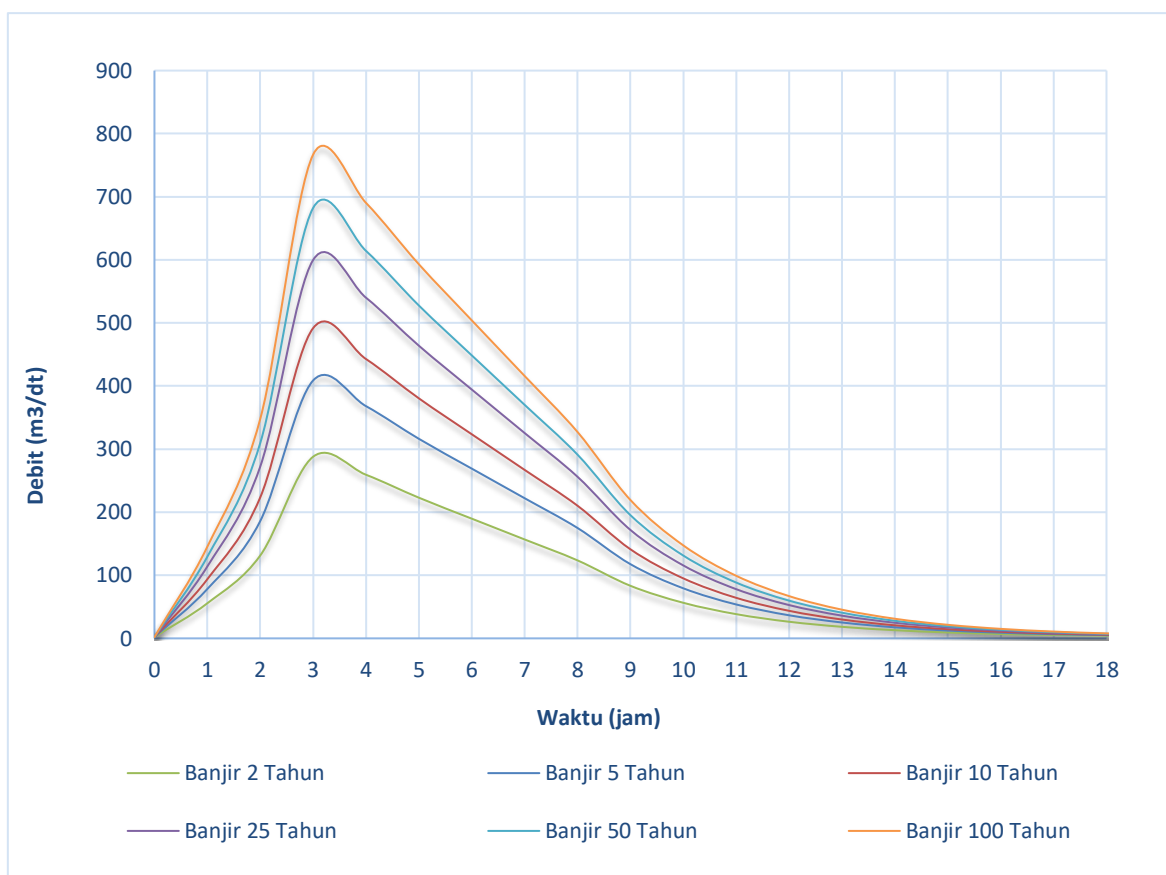
| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 63,67 | 16,55 | 11,61 | 9,24 | 7,80 | 6,82 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 2,31 | 146,90 | 0,00 | | | | | 2,40 | 149,30 |
| 2,00 | 4,97 | 316,41 | 38,18 | 0,00 | | | | 2,40 | 357,00 |
| 3,00 | 7,79 | 495,67 | 82,24 | 26,78 | 0,00 | | | 2,40 | 607,09 |
| 4,00 | 5,20 | 331,27 | 128,83 | 57,69 | 21,32 | 0,00 | | 2,40 | 541,52 |
| 5,00 | 3,48 | 221,41 | 86,11 | 90,37 | 45,93 | 18,01 | 0,00 | 2,40 | 464,22 |
| 6,00 | 2,32 | 147,98 | 57,55 | 60,40 | 71,95 | 38,78 | 15,74 | 2,40 | 394,79 |
| 7,00 | 1,55 | 98,90 | 38,46 | 40,37 | 48,09 | 60,76 | 33,90 | 2,40 | 322,87 |
| 8,00 | 1,04 | 66,10 | 25,71 | 26,98 | 32,14 | 40,61 | 53,11 | 2,40 | 247,04 |
| 9,00 | 0,69 | 44,18 | 17,18 | 18,03 | 21,48 | 27,14 | 35,49 | 2,40 | 165,90 |
| 10,00 | 0,46 | 29,52 | 11,48 | 12,05 | 14,36 | 18,14 | 23,72 | 2,40 | 111,67 |
| 11,00 | 0,31 | 19,73 | 7,67 | 8,05 | 9,59 | 12,12 | 15,85 | 2,40 | 75,43 |
| 12,00 | 0,21 | 13,19 | 5,13 | 5,38 | 6,41 | 8,10 | 10,60 | 2,40 | 51,21 |
| 13,00 | 0,14 | 8,81 | 3,43 | 3,60 | 4,29 | 5,41 | 7,08 | 2,40 | 35,02 |
| 14,00 | 0,09 | 5,89 | 2,29 | 2,40 | 2,86 | 3,62 | 4,73 | 2,40 | 24,20 |
| 15,00 | 0,06 | 3,94 | 1,53 | 1,61 | 1,91 | 2,42 | 3,16 | 2,40 | 16,97 |
| 16,00 | 0,04 | 2,63 | 1,02 | 1,07 | 1,28 | 1,62 | 2,11 | 2,40 | 12,14 |
| 17,00 | 0,03 | 1,76 | 0,68 | 0,72 | 0,86 | 1,08 | 1,41 | 2,40 | 8,91 |
| 18,00 | 0,02 | 1,18 | 0,46 | 0,48 | 0,57 | 0,72 | 0,94 | 2,40 | 6,75 |
| 19,00 | 0,01 | 0,79 | 0,31 | 0,32 | 0,38 | 0,48 | 0,63 | 2,40 | 5,31 |
| 20,00 | 0,01 | 0,53 | 0,20 | 0,21 | 0,26 | 0,32 | 0,42 | 2,40 | 4,34 |
| 21,00 | 0,01 | 0,35 | 0,14 | 0,14 | 0,17 | 0,22 | 0,28 | 2,40 | 3,70 |
| 22,00 | 0,00 | 0,23 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,14 | 0,19 | 2,40 | 3,27 |
| 23,00 | 0,00 | 0,16 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,13 | 2,40 | 2,98 |
| 24,00 | 0,00 | 0,10 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 2,40 | 2,79 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.56 Debit Banjir HSS Limantara Kala Ulang 100 Tahun

| t | U (t,1) | Q akibat hujan netto (m ³ /dt) | | | | | | Baseflow | Q banjir |
|-------|--------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | 71,59 | 18,61 | 13,05 | 10,39 | 8,77 | 7,67 | | |
| (jam) | (m ³ /det/mm) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (mm/jam) | (m ³ /det) | (m ³ /det) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | 2,40 | 2,40 |
| 1,00 | 2,00 | 143,17 | 0,00 | | | | | 2,40 | 145,57 |
| 2,00 | 4,31 | 308,38 | 37,21 | 0,00 | | | | 2,40 | 347,99 |
| 3,00 | 9,20 | 658,37 | 80,15 | 26,10 | 0,00 | | | 2,40 | 767,03 |
| 4,00 | 6,15 | 440,02 | 171,12 | 56,23 | 20,78 | 0,00 | | 2,40 | 690,55 |
| 5,00 | 4,11 | 294,08 | 114,37 | 120,04 | 44,76 | 17,55 | 0,00 | 2,40 | 593,20 |
| 6,00 | 2,75 | 196,55 | 76,44 | 80,23 | 95,56 | 37,80 | 15,34 | 2,40 | 504,32 |
| 7,00 | 1,84 | 131,36 | 51,09 | 53,62 | 63,87 | 80,70 | 33,04 | 2,40 | 416,08 |
| 8,00 | 1,23 | 87,80 | 34,14 | 35,84 | 42,69 | 53,94 | 70,54 | 2,40 | 327,34 |
| 9,00 | 0,82 | 58,68 | 22,82 | 23,95 | 28,53 | 36,05 | 47,15 | 2,40 | 219,57 |
| 10,00 | 0,55 | 39,22 | 15,25 | 16,01 | 19,07 | 24,09 | 31,51 | 2,40 | 147,54 |
| 11,00 | 0,37 | 26,21 | 10,19 | 10,70 | 12,74 | 16,10 | 21,06 | 2,40 | 99,41 |
| 12,00 | 0,24 | 17,52 | 6,81 | 7,15 | 8,52 | 10,76 | 14,07 | 2,40 | 67,23 |
| 13,00 | 0,16 | 11,71 | 4,55 | 4,78 | 5,69 | 7,19 | 9,41 | 2,40 | 45,73 |
| 14,00 | 0,11 | 7,82 | 3,04 | 3,19 | 3,80 | 4,81 | 6,29 | 2,40 | 31,36 |
| 15,00 | 0,07 | 5,23 | 2,03 | 2,13 | 2,54 | 3,21 | 4,20 | 2,40 | 21,76 |
| 16,00 | 0,05 | 3,50 | 1,36 | 1,43 | 1,70 | 2,15 | 2,81 | 2,40 | 15,34 |
| 17,00 | 0,03 | 2,34 | 0,91 | 0,95 | 1,14 | 1,44 | 1,88 | 2,40 | 11,05 |
| 18,00 | 0,02 | 1,56 | 0,61 | 0,64 | 0,76 | 0,96 | 1,25 | 2,40 | 8,18 |
| 19,00 | 0,01 | 1,04 | 0,41 | 0,43 | 0,51 | 0,64 | 0,84 | 2,40 | 6,26 |
| 20,00 | 0,01 | 0,70 | 0,27 | 0,28 | 0,34 | 0,43 | 0,56 | 2,40 | 4,98 |
| 21,00 | 0,01 | 0,47 | 0,18 | 0,19 | 0,23 | 0,29 | 0,37 | 2,40 | 4,13 |
| 22,00 | 0,00 | 0,31 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,19 | 0,25 | 2,40 | 3,55 |
| 23,00 | 0,00 | 0,21 | 0,08 | 0,08 | 0,10 | 0,13 | 0,17 | 2,40 | 3,17 |
| 24,00 | 0,00 | 0,14 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 2,40 | 2,91 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gamabr 4.13 Grafik Satuan Sintetis Limantara
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.2.10. Perhitungan Tinggi Muka Air Banjir

Dalam perhitungan tinggi muka air banjir digunakan untuk menentukan hasil debit banjir yang sesuai dengan lokasi melalui jenis alirannya. Perhitunggan ini juga menentukan lokasi yang tepat dalam perencanaan bendung dan saluran pembuang. Oleh karena itu perhitungan tinggi muka air banjir di hitung pada bagian lokasi bendung dan *power house*.

Tabel 4.57 Rekapitulasi Hasil Analisa Debit Banjir

| Kala Ulang (tahun) | HSS Nakayasu m ³ /detik | HSS Limantara m ³ /detik | Studi Terdahulu m ³ /detik |
|-----------------------|--|---|---|
| 2 | 479,531 | 256,518 | |
| 5 | 681,253 | 363,955 | |
| 10 | 819,782 | 437,735 | |
| 25 | 1000,102 | 533,772 | |
| 50 | 1137,766 | 607,092 | |
| 100 | 1278,990 | 682,307 | 806,370 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- Lokasi Bendung

Dari penampang sungai dapat ditentukan tinggi muka air berdasarkan debit yang dilalui dan menentukan jenis aliran setiap piasnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan pada lokasi bendung sebagai berikut:

- Menentukan nilai elevasi dasar sungai, yaitu didapat dari topografi sebesar +769,
- Menentukan nilai tinggi pias, yaitu (H) = 1 meter dari dasar sungai,
- Menentukan nilai luas penampang setiap pias, yaitu berdasarkan perhitungan luasan pada aplikasi AutoCad didapat (A) = 31,21 m²,
- Menentukan nilai keliling basah, yaitu berdasarkan perhitungan pada aplikasi AutoCad didapat (P) = 30,46 meter,
- Menentukan jari-jari hidrolisnya, $(R) = \frac{A}{P} = \frac{31,21}{30,46} = 1,02$ meter,
- Menentukan nilai koefisien kekasaran, sesuai kondisi lapangan (n) = 0,032
- Menentukan nilai slope, berdasarkan beda tinggi hulu dan hilir sungai dibagi dengan panjang sungai maka didapat (S) = 0,01,
- Menentukan nilai kecepatan, $(V) = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0,032} \times 1,02^{\frac{2}{3}} \times 0,01^{\frac{1}{2}} = 3,18$ meter/detik,
- Menentukan nilai debit, $(Q) = V \times A = 3,18 \times 31,21 = 99,13$ meter³/detik,
- Menentukan nilai bilangan *froude* dan jenis aliran, $(Fr) = \frac{v}{\sqrt{gH}} = \frac{3,18}{\sqrt{9,81 \times 1}} = 1,01$,
- Menentukan jenis aliran, jika $Fr < 1$ maka "Sub Kritis", jika $Fr > 1$ maka "Super Kritis".

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.58 Perhitungan Jenis Aliran Sungai Bagian Hulu (Bendung)

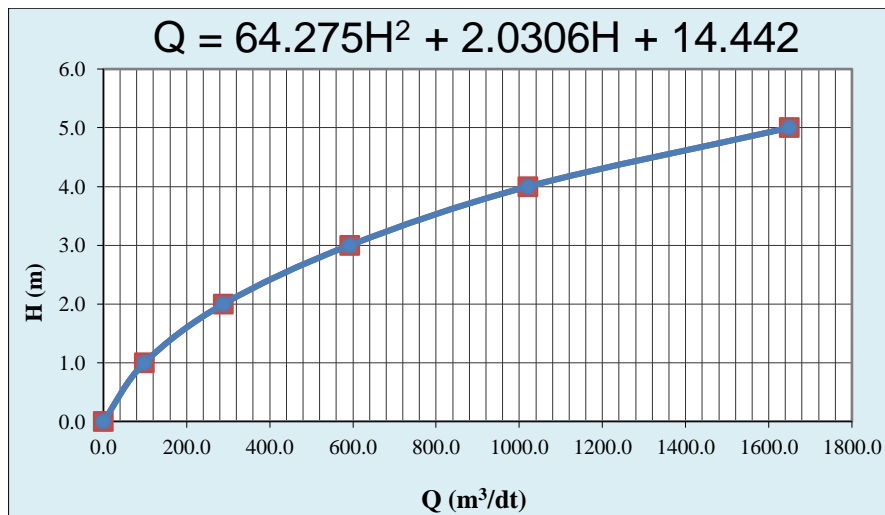
| Pias | Elevasi | Ketinggian (meter) | Luas (A) (meter ²)* | Keliling Basah (P) (meter)* | R (meter) | Kecepatan (V) (meter) | Debit (Q) (meter ³) | Froude | Keterangan Aliran |
|------|---------|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------------------|------------------------------------|--------|-------------------|
| I | 769,00 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | Super Kritis |
| II | 770,00 | 1,00 | 31,21 | 30,46 | 1,02 | 3,18 | 99,13 | 1,01 | Super Kritis |
| III | 771,00 | 2,00 | 67,13 | 41,51 | 1,62 | 4,31 | 289,03 | 0,97 | Sub Kritis |
| IV | 772,00 | 3,00 | 113,08 | 52,04 | 2,17 | 5,24 | 592,86 | 0,97 | Sub Kritis |
| V | 773,00 | 4,00 | 167,31 | 61,25 | 2,73 | 6,11 | 1021,66 | 0,97 | Sub Kritis |
| VI | 774,00 | 5,00 | 230,31 | 66,38 | 3,47 | 7,16 | 1649,55 | 1,02 | Super Kritis |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.59 Perhitungan Tinggi Muka Air Sungai Bagian Hulu (Bendung)

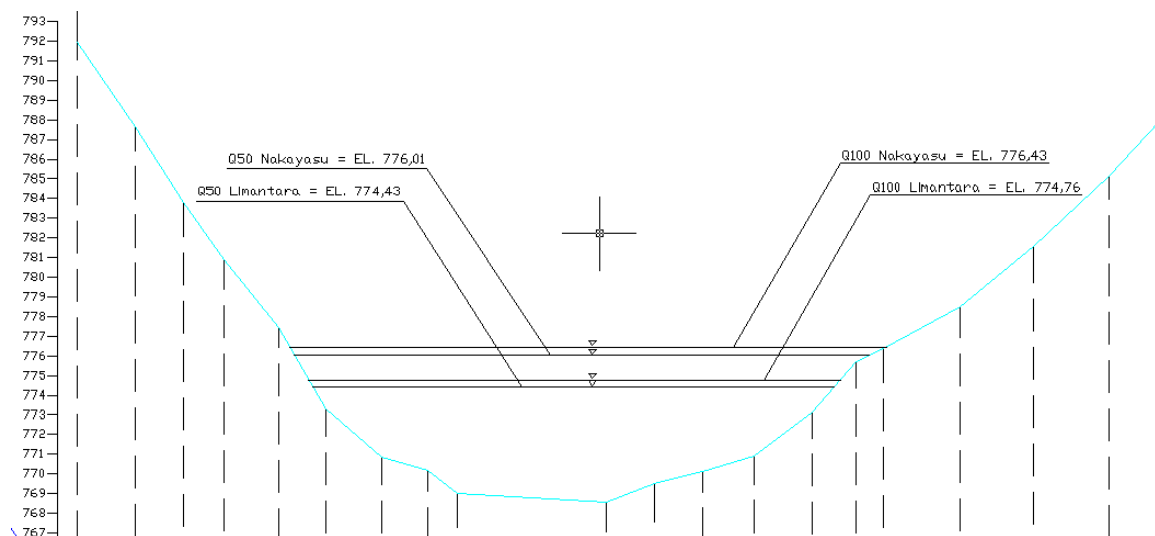
| Kala Ulang | HSS | | | HSS | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|
| | Nakayasu m ³ /detik | Tinggi meter | Elevasi | Limantara m ³ /detik | Tinggi meter | Elevasi |
| 2 | 493,779 | 2,67 | 771,67 | 256,518 | 1,83 | 770,83 |
| 5 | 701,524 | 3,25 | 772,25 | 363,955 | 2,25 | 771,25 |
| 10 | 844,190 | 3,59 | 772,59 | 437,735 | 2,49 | 771,49 |
| 25 | 1029,894 | 4,01 | 773,01 | 533,772 | 2,81 | 771,81 |
| 50 | 1171,669 | 4,24 | 773,24 | 607,092 | 3,03 | 772,03 |
| 100 | 1317,109 | 4,47 | 773,47 | 682,307 | 3,21 | 772,21 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.14 Hubungan Debit dengan Tinggi Muka Air (H) Bagian Hulu (Bendung)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.15 Penampang Sungai Bagian Hulu (Bendung)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- Lokasi *Power House*

Tabel 4.60 Perhitungan Jenis Aliran Sungai Bagian Hilir (*Power House*)

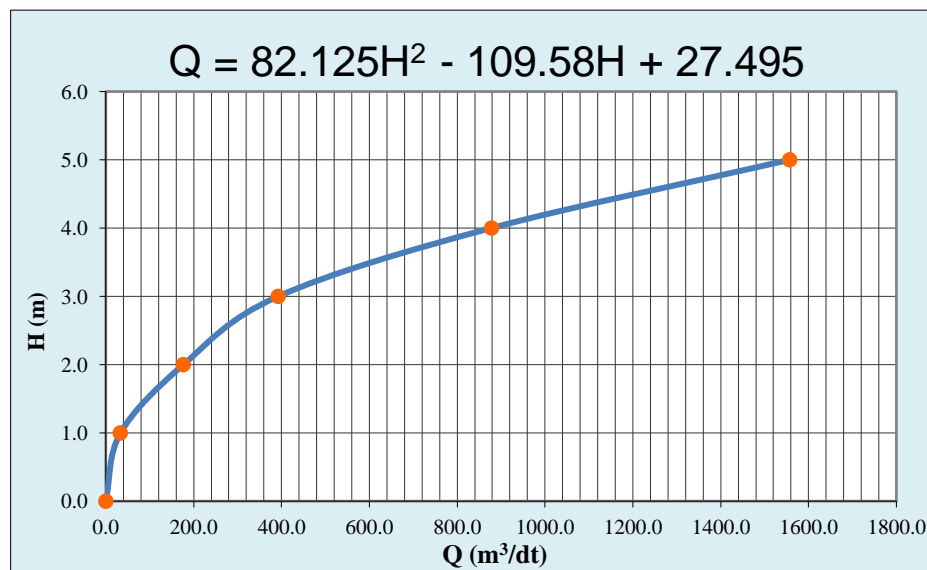
| Pias | Elevasi | Ketinggian Luas (A) | | Keliling Basah (P) | R | Kecepatan (V) | Debit (Q) | Froude | Keterangan Aliran |
|------|---------|---------------------|----------|--------------------|---------|---------------|-----------|--------|-------------------|
| | | (meter) | (meter)* | (meter)* | (meter) | (meter/detik) | (meter) | | |
| I | 686,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | Super Kritis |
| II | 687,00 | 1,00 | 15,45 | 26,77 | 0,58 | 2,17 | 33,47 | 0,69 | Sub Kritis |
| III | 688,00 | 2,00 | 48,91 | 39,36 | 1,24 | 3,61 | 176,68 | 0,82 | Sub Kritis |
| IV | 689,00 | 3,00 | 95,46 | 63,21 | 1,51 | 4,11 | 392,69 | 0,76 | Sub Kritis |
| V | 690,00 | 4,00 | 164,61 | 73,85 | 2,23 | 5,33 | 877,73 | 0,85 | Sub Kritis |
| VI | 691,00 | 5,00 | 241,25 | 81,24 | 2,97 | 6,46 | 1557,54 | 0,92 | Sub Kritis |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

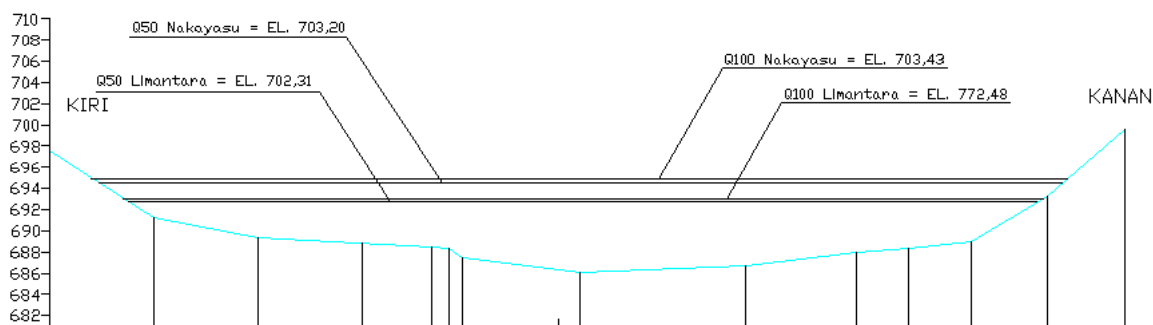
Tabel 4.61 Perhitungan Tinggi Muka Air Sungai Bagian Hilir (*Power House*)

| Kala Ulang | HSS | | | HSS | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|
| | Nakayasu m ³ /detik | Tinggi meter | Elevasi | Limantara m ³ /detik | Tinggi meter | Elevasi |
| 2 | 493,779 | 3,21 | 689,21 | 256,518 | 2,37 | 688,37 |
| 5 | 701,524 | 3,64 | 689,64 | 363,955 | 2,87 | 688,87 |
| 10 | 844,190 | 3,93 | 689,93 | 437,735 | 3,09 | 689,09 |
| 25 | 1029,894 | 4,22 | 690,22 | 533,772 | 3,29 | 689,29 |
| 50 | 1171,669 | 4,43 | 690,43 | 607,092 | 3,44 | 689,44 |
| 100 | 1317,109 | 4,65 | 690,65 | 682,307 | 3,60 | 689,60 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Gambar 4.16 Hubungan Debit dengan Tinggi Muka Air (H) Bagian Hilir (*Power House*)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.17 Penampang Sungai Bagian Hilir (*Power House*)
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil perhitungan debit banjir dapat ditentukan metode yang tepat dari setiap hasil debit banjir. Untuk menentukan debit banjir yang digunakan dapat ditentukan berdasarkan hasil studi terdahulu dan pengukuran tinggi muka air. Penentuan berdasarkan studi terdahulu dapat ditentukan hasil debit banjir yang mendekati adalah metode HSS Limantara yang dapat dilihat pada Tabel 4.57. Sedangkan penentuan berdasarkan pengukuran tinggi muka air dibagian bendung dan rumah pembangkit yang sesuai adalah metode HSS Limantara. Karena hasil pengukuran tinggi muka air pernah terjadi berdasarkan HSS Limantara. Oleh karena itu dapat ditentukan debit banjir yang digunakan adalah Q_{100} sebesar $682,31 \text{ m}^3/\text{detik}$.

4.3. Analisa Debit Andalan

Dalam studi perencanaan pembangkit listrik diperlukan perhitungan debit andalan sesuai dengan Metodologi. Hasil dari analisa debit andalan akan digunakan untuk menentukan perencanaan bangunan-bangunan pembangkit listrik. Untuk data yang diperlukan, yaitu data klimatologi, luas das, dan data rerata hujan daerah.

Dalam analisa debit andalan diperlukan perhitungan evapotranspirasi dengan memakai data klimatologi sebagai penunjang untuk perhitungan debit, perhitungan debit dengan metode F.J Mock, dan perhitungan *Flow Duration Curve* (FDC) dari hasil perhitungan metode F.J Mock.

4.3.1. Perhitungan Evapotranspirasi

Dalam perhitungan evapotranspirasi ini menggunakan metode Penman. Untuk metode Penman menggunakan beberapa parameter yang diperlukan, yaitu suhu, kelembaban udara, lama penyinaran dan kecepatan angin sebagai penentu terjadinya evapotranspirasi pada daerah lokasi perencanaan. Untuk data parameter yang digunakan dalam perhitungan Evapotranspirasi dapat dilihat pada Tabel 4.45 sebagai berikut:

Tabel 4.62 Data Klimatologi Rerata Stasiun Parapat Tahun 2004 - 2013

| No | Parameter | Notasi | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Agu | Sep | Okt | Nov | Des |
|----|------------------|--------|---------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | Suhu | T | °C | 29 | 29,7 | 30 | 30,3 | 30,8 | 31,5 | 30,5 | 30,9 | 29,8 | 29,5 | 28,9 | 28,8 |
| 2 | Kelembaban Udara | RH | % | 90 | 91 | 89,7 | 88,7 | 89,7 | 89,3 | 89,3 | 90 | 89,7 | 90,3 | 89,7 | 90 |
| 3 | Lama Penyinaran | n | jam | 6 | 6 | 5,8 | 5,6 | 6,6 | 7,4 | 7,3 | 7,3 | 6,7 | 6,4 | 5,6 | 5,9 |
| 4 | Kecepatan Angin | u | m/detik | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 1,6 | 1,5 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,8 |

Sumber: Data Perencanaan, 2017

Contoh perhitungan pada bulan januari sebagai berikut:

- Suhu udara (T) rerata sesuai Tabel 4.1 adalah 29°C,
- Tekanan Uap Jenuh (ϵY) dapat ditentukan dengan melihat Tabel 4.5 dengan menyesuaikan data suhu udara pada Tabel 4.1.

Tabel 4.63 Hubungan Suhu dengan Tekanan Uap Jenuh (ϵY)

| | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Suhu Udara (T) | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 |
| Tekanan uap jenuh (ϵY) | 37,8 | 40,1 | 42,4 | 44,9 | 47,6 | 50,3 |

Sumber: Irigasi dan Bangunan Air I

Dengan suhu 29°C didapat tekanan uap jenuh dengan nilai 40,1 mbar. Jika terdapat suhu diantara dari Tabel 4.5 dapat dilakukan perhitungan interpolasi,

- Menentukan nilai faktor penimbang (w), sesuai dengan elevasi stasiun pengamatan (Stasiun Parapat) yang berada pada ketinggian +1.258 mdpl dengan suhu 29°C maka dapat ditentukan nilai w sesuai dengan Tabel 4.6 adalah 0,8,

Tabel 4.64 Hubungan Suhu, ketinggian dan faktor penimbang (w)

| Ketinggian | Suhu Udara Rata-Rata | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 |
| 0 - 500 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 |
| 500 – 1.000 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 |
| > 1.000 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |

Sumber: Irigasi dan Bangunan Air I

- Menentukan nilai f(t), dengan suhu 29°C didapatkan nilai f(t) dengan interpolasi sesuai Tabel 4.7 adalah $\frac{29-28}{30-28} \times (16,7 - 16,3) + 16,3 = 16,50$,

Tabel 4.65 Hubungan Suhu dengan Nilai f(t)

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|----|------|------|------|------|------|------|
| T° C | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| f(T) = YTk⁴ | 14,6 | 15 | 15,4 | 15,9 | 16,3 | 16,7 | 17,2 | 17,7 |

Sumber: Irigasi dan Bangunan Air I

- e. Nilai Kelembaban Udara (RH) didapat berdasarkan data sesuai Tabel 4.1 pada bulan januari adalah 90%,
- f. Menentukan nilai (ϵd), $\epsilon d = \epsilon Y \times RH = 40,1 \times 90\%$, = 36,090 mbar,
- g. Menentukan nilai $f(\epsilon d) = 0,34 - 0,44 \times \sqrt{\epsilon d} = 0,34 - 0,44 \times \sqrt{36,090} = 0,0757$,
- h. Menentukan nilai R_Y , tergantung pada letak stasiun pengamatan. Letak lintang pada daerah lokasi studi adalah $2^\circ 20' 24.74''$ LS. Untuk memudahkan perhitungan selanjutnya dapat dibulatkan menjadi 3° LS. Sesuai dengan letak lintangnya dan melihat pada Tabel 2.9 didapat nilai R_Y dengan cara interpolasi adalah $\frac{3-2}{4-2} \times (14,7 - 14,3) + 14,3 = 14,50$ mm/hari,
- i. Menentukan nilai n/N berdasarkan lamanya penyinaran, sesuai data Tabel 4.1 $n = 6$ jam dan N adalah 24 jam, maka dapat diperhitungkan $n/N = 6/24 = 0,25$,
- j. Menentukan nilai $R_s = 0,25 + 0,54 \times (n/N) \times R_Y = 0,25 + 0,54 \times (n/N) \times 14,50 = 5,5825$ mm/hari,
- k. Menentukan nilai $f(n/N) = 0,10 + 0,90 \times (n/N) = 0,10 + 0,90 \times 0,25 = 0,3250$,
- l. Kecepatan Angin (u) dapat disesuaikan dengan data Tabel 4.1, yaitu 1,4,
- m. Menentukan nilai $f(u) = 0,27 \times (1 + 0,864 \times u) = 0,27 \times (1 + 0,864 \times 1,4) = 0,59659$,
- n. Menentukan $R_{n1} = f(t) \times f(\epsilon d) \times f(n/N) = 16,50 \times 0,0757 \times 0,3250 = 0,4058$
- o. Menentukan $ET_o^* = w (0,75R_s - R_{n1}) + (1-w) \cdot f(u) \cdot (\epsilon Y - \epsilon d) = 0,788 (0,75 \cdot 5,5825 - 0,4058) + (1 - 0,788) \cdot 0,59659 \cdot (40,100 - 36,090) = 3,3780$,
- p. Untuk nilai C dapat disesuaikan pada setiap bulannya sesuai Tabel 2.10, yaitu 1,1,
- q. Menentukan nilai $ET_o = ET_o^* \cdot C = 3,3780 \cdot 1,1 = 3,7157$ mm/hari

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.49 sebagai berikut:

Tabel 4.66 Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman

| No. | Bulan | Letak Lintang | t (°C) | ϵY | w | f(t) | RH | ϵd | f(ϵd) | RY mm/Hr | n/N | Rs | f(n/N) | u | f(u) | Rn1 | ETo* | C | ETo (mm/hari) |
|-----|-----------|---------------|--------|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------------------|----------|--------|--------|--------|-----|---------|--------|--------|------|---------------|
| 1 | Januari | 3° LU | 29 | 40,10 | 0,788 | 16,50 | 0,900 | 36,090 | 0,0757 | 14,50 | 0,2500 | 5,5825 | 0,3250 | 1,4 | 0,59659 | 0,4058 | 3,3780 | 1,10 | 3,7157 |
| 2 | Februari | 3° LU | 30 | 41,71 | 0,796 | 16,64 | 0,910 | 37,956 | 0,0689 | 15,15 | 0,2500 | 5,8328 | 0,3250 | 1,3 | 0,57326 | 0,3727 | 3,5356 | 1,10 | 3,8891 |
| 3 | Maret | 3° LU | 30 | 42,40 | 0,800 | 16,70 | 0,897 | 38,033 | 0,0686 | 15,55 | 0,2417 | 5,9168 | 0,3175 | 1,1 | 0,52661 | 0,3640 | 3,6268 | 1,00 | 3,6268 |
| 4 | April | 3° LU | 30 | 44,40 | 0,810 | 16,90 | 0,887 | 39,383 | 0,0639 | 15,40 | 0,2333 | 5,7904 | 0,3100 | 1,8 | 0,6899 | 0,3346 | 3,7793 | 0,90 | 3,4014 |
| 5 | Mei | 3° LU | 31 | 44,40 | 0,800 | 16,90 | 0,897 | 39,827 | 0,0623 | 14,75 | 0,2333 | 5,5460 | 0,3100 | 1,6 | 0,64325 | 0,3265 | 3,5371 | 0,90 | 3,1834 |
| 6 | Juni | 3° LU | 32 | 46,25 | 0,819 | 17,08 | 0,893 | 41,301 | 0,0572 | 14,30 | 0,2750 | 5,6986 | 0,3475 | 1,5 | 0,61992 | 0,3396 | 3,6765 | 0,90 | 3,3089 |
| 7 | Juli | 3° LU | 31 | 43,65 | 0,806 | 16,83 | 0,893 | 38,979 | 0,0653 | 14,45 | 0,3083 | 6,0184 | 0,3775 | 1,6 | 0,64325 | 0,4147 | 3,7742 | 0,90 | 3,3968 |
| 8 | Agustus | 3° LU | 31 | 44,65 | 0,811 | 16,83 | 0,900 | 40,185 | 0,0611 | 15,00 | 0,3042 | 6,2138 | 0,3738 | 1,5 | 0,61992 | 0,3841 | 3,8929 | 1,00 | 3,8929 |
| 9 | September | 3° LU | 30 | 41,94 | 0,798 | 16,66 | 0,897 | 37,620 | 0,0701 | 15,30 | 0,2792 | 6,1315 | 0,3513 | 1,6 | 0,64325 | 0,4104 | 3,7889 | 1,10 | 4,1678 |
| 10 | Oktober | 3° LU | 30 | 41,25 | 0,794 | 16,60 | 0,903 | 37,249 | 0,0715 | 15,20 | 0,2667 | 5,9888 | 0,3400 | 1,5 | 0,61992 | 0,4033 | 3,6510 | 1,10 | 4,0161 |
| 11 | November | 3° LU | 29 | 39,87 | 0,786 | 16,48 | 0,897 | 35,763 | 0,0769 | 14,65 | 0,2333 | 5,5084 | 0,3100 | 1,5 | 0,61992 | 0,3927 | 3,3673 | 1,10 | 3,7040 |
| 12 | Desember | 3° LU | 29 | 39,64 | 0,785 | 16,46 | 0,900 | 35,676 | 0,0772 | 14,25 | 0,2458 | 5,4542 | 0,3213 | 1,8 | 0,6899 | 0,4082 | 3,3523 | 1,10 | 3,6875 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil perhitungan evapotranspirasi (ET_o) yang telah dilakukan diatas terlihat bahwa nilai ET_o berkisar antara 3 sampai dengan 5 mm/hari. Hasil perhitungan tersebut akan digunakan dalam perhitungan pembangkitan debit dengan Metode F.J Mock.

4.3.2. Perhitungan Pembangkitan Debit dengan Metode F.J Mock

Dalam analisa debit andalan dengan perhitungan pembangkitan debit menggunakan Metode F.J Mock merupakan perhitungan pembangkitan data dari curah hujan menjadi debit dengan pertimbangan evapotranspirasi sebagai pendekatan nilai debit yang terjadi pada lokasi studi.

Setelah dilakukan perhitungan curah hujan daerah dengan hasil pada Tabel 4.8, maka perhitungan selanjutnya adalah pembangkitan curah hujan menjadi debit dengan metode F.J Mock. Perhitungan metode F.J Mock akan dilakukan dengan periode per bulan setiap tahunnya.

Contoh perhitungan pada bulan januari tahun 2004 sebagai berikut:

- a. Curah hujan sesuai dengan Tabel 4.8 adalah 223,9 mm/hari,
- b. Jumlah hari hujan sesuai dengan Tabel 4.8 adalah 16 hari,
- c. Evapotranspirasi potensial dengan memakai hasil perhitungan pada bulan januari sesuai dengan Tabel 4.7 adalah 3,7857 mm/hari. Nilai tersebut dikali dengan jumlah hari pada setiap bulan (januari = 31 hari). Sehingga didapatkan nilai ET_o untuk metode F.J Mock $3,7857 \times 31 = 115,2$ mm,
- d. Presentase Lahan Terbuka ditentukan sesuai dengan keadaan lokasi studi, yaitu 20%,
- e. Menentukan nilai $ET_o/E_a = (\text{Permukaan Lahan Terbuka}/20) \times (18 - \text{Jumlah Hari Hujan}) = (0,2 / 20) \times (18 - 16) = 0,02$, apabila nilai $ET_o/E_a > 0$ maka nilainya 0,
- f. Menentukan nilai $E = ET_o \times (ET_o/E_a) = 115,2 \times 0,02 = 2,6$ mm,
- g. Menentukan nilai $E_t = ET_o - E = 115,2 - 2,6 = 112,6$ mm,
- h. Perhitungan Keseimbangan Air terlebih dahulu menentukna nilai $D_s = \text{Curah Hujan (P)} - E_t = 223,9 \text{ mm} - 112,6 \text{ mm} = 111,3 \text{ mm}$,
- i. Menentukan nilai Kandungan Air Tanah, apabila nilai $D_s > 0$ maka nilainya 0, apabila nilai $D_s < 0$ maka nilainya tetap,
- j. Menentukan nilai Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) $= 100 + 0,2 \times \text{Curah Hujan Rerata} = 100 + 0,2 \times 201,5 = 140,29$ mm,

- k. Menentukan nilai Kelebihan Air, $(WS) = | D_s - \text{Kandungan Air Tanah} | = 111,3 - 0 = 111,3 \text{ mm/hari}$,
- l. Menentukan nilai infiltrasi, $(I) = WS \times \text{Kofidien Infiltrasi} = 111,3 \times 0,4 = 44,5 \text{ mm}$, penentuan koefisien infiltrasi dapat dilihat sesuai dengan kondisi studi yang terjal,
- m. Menentukan nilai $0,5 \times (1 + k) I = 0,5 \times (1 + 0,5) \times 44,5 = 33,4 \text{ mm}$, nilai k dianggap 0,5,
- n. Menentukan nilai $k \cdot V(n-1) = 0,5 \times 40 = 20 \text{ mm}$, nilai awal $V(n-1)$ diasumsi 40 mm dan untuk perhitungan bulan selanjutnya memakai nilai pada bulan sebelumnya,
- o. Menentukan nilai Volume Penyimpanan $= [0,5 \times (1 + k) I] + [k \cdot V(n-1)] = 33,4 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 53,4 \text{ mm}$,
- p. Menentukan nilai Perubahan Volume Air, $(D_{vn}) = \text{Volume Penyimpanan Bulan Sekarang} - \text{Volume Penyimpanan Bulan Sebelumnya} = 53,4 \text{ mm} - 40 = 13,4 \text{ mm}$,
- q. Menentukan nilai Aliran Dasar, $(BF) = I - D_{vn} = 44,5 \text{ mm} - 13,4 \text{ mm} = 31,1 \text{ mm}$,
- r. Menentukan nilai Aliran Langsung, $(DR) = WS - I = 111,3 \text{ mm} - 44,5 \text{ mm} = 66,8 \text{ mm}$,
- s. Menentukan nilai Aliran, $(R) = BF + DR = 31,1 \text{ mm} + 88,8 \text{ mm} = 97,9 \text{ mm}$
- t. Menentukan nilai Debit Aliran Sungai $= \frac{\text{Luas DAS} \times R \times 1000}{86.400 \times \text{Jumlah Hari}} = \frac{279,2 \times 97,9 \times 1000}{86.400 \times 31} = 10,2 \text{ m}^3/\text{detik} = 10.206,7 \text{ liter/detik}$
- u. Menentukan nilai Debit Aliran = Debit Aliran Sungai x Jumlah Hari x 86.400 = $10,2 \times 31 \times 86.400 = 27,3 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.67 sebagai berikut:

Tabel 4.67 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2004

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|---|-------------------|---------------------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm/hari | 223,9 | 173,2 | 246,3 | 251,8 | 188,3 | 59,3 | 147,1 | 145,7 | 266,4 | 207,2 | 338,6 | 190,8 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 16 | 12 | 15 | 18 | 13 | 10 | 15 | 13 | 21 | 19 | 22 | 19 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm/hari | 115,2 | 108,9 | 112,4 | 102,0 | 98,7 | 99,3 | 105,3 | 120,7 | 125,0 | 124,5 | 111,1 | 114,3 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_o/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_o) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm/hari | 2,6 | 7,1 | 3,9 | 0,0 | 5,4 | 8,0 | 2,9 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_o) - (E)$ | (3) - (6) | mm/hari | 112,6 | 101,8 | 108,6 | 102,0 | 93,3 | 91,2 | 102,4 | 114,1 | 125,0 | 124,5 | 111,1 | 114,3 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm/hari | 111,3 | 71,4 | 137,8 | 149,8 | 95,0 | -31,9 | 44,7 | 31,6 | 141,4 | 82,7 | 227,5 | 76,5 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm/hari | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -31,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm/hari | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 108,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm/hari | 111,3 | 71,4 | 137,8 | 149,8 | 95,0 | 0,0 | 44,7 | 31,6 | 141,4 | 82,7 | 227,5 | 76,5 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm/hari | 44,5 | 28,6 | 55,1 | 59,9 | 38,0 | 0,0 | 17,9 | 12,6 | 56,6 | 33,1 | 91,0 | 30,6 |
| 13 | $0.5 (1 + k) In$ | Hitungan | - | 33,4 | 21,4 | 41,3 | 44,9 | 28,5 | 0,0 | 13,4 | 9,5 | 42,4 | 24,8 | 68,2 | 22,9 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 26,7 | 24,1 | 32,7 | 38,8 | 33,7 | 16,8 | 15,1 | 12,3 | 27,4 | 26,1 | 47,2 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) | mm/hari 40 | 53,4 | 48,1 | 65,4 | 77,6 | 67,3 | 33,7 | 30,2 | 24,6 | 54,7 | 52,2 | 94,3 | 70,1 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | $V_n - V_{(n-1)}$ | mm/hari | 13,4 | -5,3 | 17,3 | 12,2 | -10,3 | -33,7 | -3,4 | -5,6 | 30,1 | -2,6 | 42,2 | -24,2 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm/hari | 31,1 | 33,8 | 37,8 | 47,7 | 48,3 | 33,7 | 21,3 | 18,3 | 26,4 | 35,6 | 48,8 | 54,8 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm/hari | 66,8 | 42,8 | 82,7 | 89,9 | 57,0 | 0,0 | 26,8 | 19,0 | 84,8 | 49,6 | 136,5 | 45,9 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm/hari | 97,9 | 76,7 | 120,5 | 137,5 | 105,3 | 33,7 | 48,1 | 37,3 | 111,3 | 85,2 | 185,3 | 100,7 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 10,2 | 8,8 | 12,6 | 14,8 | 11,0 | 3,6 | 5,0 | 3,9 | 12,0 | 8,9 | 20,0 | 10,5 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 10206,7 | 8848,5 | 12561,5 | 14813,6 | 10979,5 | 3625,6 | 5017,6 | 3883,0 | 11988,0 | 8885,3 | 19962,8 | 10495,3 |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E ⁶) | | m ³ | 27,3 | 21,4 | 33,6 | 38,4 | 29,4 | 9,4 | 13,4 | 10,4 | 31,1 | 23,8 | 51,7 | 28,1 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.68 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2005

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|---|-------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 164,8 | 127,3 | 150,1 | 125,3 | 69,0 | 63,5 | 135,2 | 297,0 | 125,6 | 257,9 | 354,5 | 257,3 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 14,4 | 9,5 | 11,2 | 10,1 | 8,3 | 7,2 | 9,1 | 10,1 | 11,1 | 16,2 | 21,0 | 19,1 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | Eto/Ea = (m/20) * (18 - h) | Hitungan | - | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | E = (ETo) * (m/20) * (18 - h) | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | Et = (ETo) - (E) | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Ds = P - Et | (1) - (7) | mm | 164,8 | 127,3 | 150,1 | 125,3 | 69,0 | 63,5 | 135,2 | 297,0 | 125,6 | 257,9 | 354,5 | 257,3 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 164,8 | 127,3 | 150,1 | 125,3 | 69,0 | 63,5 | 135,2 | 297,0 | 125,6 | 257,9 | 354,5 | 257,3 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 65,9 | 50,9 | 60,0 | 50,1 | 27,6 | 25,4 | 54,1 | 118,8 | 50,2 | 103,1 | 141,8 | 102,9 |
| 13 | 0.5 (1 + k) In | Hitungan | - | 49,4 | 38,2 | 45,0 | 37,6 | 20,7 | 19,0 | 40,6 | 89,1 | 37,7 | 77,4 | 106,4 | 77,2 |
| 14 | k * V (n - 1) | Hitungan | - | 20,0 | 34,7 | 36,5 | 40,7 | 39,2 | 29,9 | 24,5 | 32,5 | 60,8 | 49,2 | 63,3 | 84,8 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) | mm 40 | 69,4 | 72,9 | 81,5 | 78,3 | 59,9 | 49,0 | 65,1 | 121,6 | 98,5 | 126,6 | 169,7 | 162,0 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | Vn - V(n-1) | mm | 29,4 | 3,5 | 8,6 | -3,1 | -18,5 | -10,9 | 16,1 | 56,6 | -23,1 | 28,1 | 43,1 | -7,7 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 36,5 | 47,4 | 51,5 | 53,3 | 46,1 | 36,3 | 38,0 | 62,2 | 73,4 | 75,0 | 98,8 | 110,6 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 98,9 | 76,4 | 90,1 | 75,2 | 41,4 | 38,1 | 81,1 | 178,2 | 75,3 | 154,7 | 212,7 | 154,4 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 135,3 | 123,8 | 141,5 | 128,5 | 87,5 | 74,4 | 119,1 | 240,4 | 148,7 | 229,7 | 311,5 | 264,9 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 14,1 | 14,3 | 14,8 | 13,8 | 9,1 | 8,0 | 12,4 | 25,1 | 16,0 | 23,9 | 33,5 | 27,6 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 14107,7 | 14290,4 | 14753,4 | 13839,5 | 9118,7 | 8010,7 | 12420,2 | 25063,1 | 16017,7 | 23949,2 | 33549,7 | 27614,1 |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E ⁶) | | m ³ | 37,8 | 34,6 | 39,5 | 35,9 | 24,4 | 20,8 | 33,3 | 67,1 | 41,5 | 64,1 | 87,0 | 74,0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.69 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2006

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|---|-------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 301,8 | 228,9 | 126,9 | 180,9 | 127,0 | 108,4 | 70,2 | 143,4 | 228,7 | 264,3 | 288,2 | 319,7 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 13,7 | 14,7 | 8,3 | 11,5 | 10,2 | 10,0 | 8,1 | 9,9 | 14,6 | 15,5 | 23,2 | 19,5 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_o/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_o) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_o) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm | 301,8 | 228,9 | 126,9 | 180,9 | 127,0 | 108,4 | 70,2 | 143,4 | 228,7 | 264,3 | 288,2 | 319,7 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 301,8 | 228,9 | 126,9 | 180,9 | 127,0 | 108,4 | 70,2 | 143,4 | 228,7 | 264,3 | 288,2 | 319,7 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 120,7 | 91,6 | 50,8 | 72,3 | 50,8 | 43,3 | 28,1 | 57,3 | 91,5 | 105,7 | 115,3 | 127,9 |
| 13 | $0.5 (1 + k) I_n$ | Hitungan | - | 90,5 | 68,7 | 38,1 | 54,3 | 38,1 | 32,5 | 21,1 | 43,0 | 68,6 | 79,3 | 86,5 | 95,9 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 55,3 | 62,0 | 50,0 | 52,1 | 45,1 | 38,8 | 29,9 | 36,5 | 52,5 | 65,9 | 76,2 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) | mm 40 | 110,5 | 124,0 | 100,0 | 104,3 | 90,2 | 77,6 | 59,9 | 72,9 | 105,1 | 131,8 | 152,4 | 172,1 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | $V_n - V_{(n-1)}$ | mm | 70,5 | 13,4 | -23,9 | 4,2 | -14,0 | -12,6 | -17,7 | 13,1 | 32,1 | 26,7 | 20,6 | 19,7 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 50,2 | 78,2 | 74,7 | 68,1 | 64,8 | 56,0 | 45,8 | 44,3 | 59,3 | 79,0 | 94,7 | 108,2 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 181,1 | 137,4 | 76,1 | 108,5 | 76,2 | 65,0 | 42,1 | 86,0 | 137,2 | 158,6 | 172,9 | 191,8 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 231,3 | 215,5 | 150,8 | 176,6 | 141,0 | 121,0 | 88,0 | 130,3 | 196,6 | 237,6 | 267,7 | 300,0 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 24,1 | 24,9 | 15,7 | 19,0 | 14,7 | 13,0 | 9,2 | 13,6 | 21,2 | 24,8 | 28,8 | 31,3 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 24106,6 | 24873,8 | 15720,1 | 19024,8 | 14701,2 | 13031,4 | 9170,5 | 13581,5 | 21175,6 | 24763,7 | 28834,7 | 31272,2 |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E ⁶) | | m ³ | 64,6 | 60,2 | 42,1 | 49,3 | 39,4 | 33,8 | 24,6 | 36,4 | 54,9 | 66,3 | 74,7 | 83,8 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.70 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2007

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|----------------------------------|----------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 287,0 | 200,2 | 147,5 | 168,5 | 207,6 | 114,3 | 246,2 | 128,2 | 216,4 | 395,9 | 303,0 | 248,9 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 17,4 | 11,5 | 11,3 | 14,3 | 12,3 | 9,7 | 10,5 | 10,6 | 10,9 | 12,8 | 16,6 | 16,4 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_o/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_o) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_o) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm | 287,0 | 200,2 | 147,5 | 168,5 | 207,6 | 114,3 | 246,2 | 128,2 | 216,4 | 395,9 | 303,0 | 248,9 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 287,0 | 200,2 | 147,5 | 168,5 | 207,6 | 114,3 | 246,2 | 128,2 | 216,4 | 395,9 | 303,0 | 248,9 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 114,8 | 80,1 | 59,0 | 67,4 | 83,0 | 45,7 | 98,5 | 51,3 | 86,6 | 158,4 | 121,2 | 99,6 |
| 13 | $0.5 (1 + k) I_n$ | Hitungan | - | 86,1 | 60,1 | 44,3 | 50,6 | 62,3 | 34,3 | 73,9 | 38,5 | 64,9 | 118,8 | 90,9 | 74,7 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 53,0 | 56,6 | 50,4 | 50,5 | 56,4 | 45,3 | 59,6 | 49,0 | 57,0 | 87,9 | 89,4 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) Vn - V(n-1) | mm | 106,1 | 113,1 | 100,8 | 101,0 | 112,7 | 90,7 | 119,2 | 98,1 | 113,9 | 175,7 | 178,8 | 164,1 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | | mm | 66,1 | 7,0 | -12,3 | 0,2 | 11,8 | -22,1 | 28,5 | -21,1 | 15,9 | 61,8 | 3,0 | -14,7 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 48,7 | 73,1 | 71,3 | 67,3 | 71,2 | 67,8 | 70,0 | 72,4 | 70,7 | 96,6 | 118,2 | 114,3 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 172,2 | 120,1 | 88,5 | 101,1 | 124,5 | 68,6 | 147,7 | 76,9 | 129,8 | 237,5 | 181,8 | 149,3 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 220,9 | 193,2 | 159,8 | 168,4 | 195,8 | 136,4 | 217,7 | 149,3 | 200,5 | 334,1 | 300,0 | 263,6 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 23,0 | 22,3 | 16,7 | 18,1 | 20,4 | 14,7 | 22,7 | 15,6 | 21,6 | 34,8 | 32,3 | 27,5 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 23023, | 22298, | 16660, | 18137, | 20407, | 14691, | 22691, | 15567, | 21596, | 34827, | 32312, | 27480, |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 7 | 0 | 4 | 3 | 4 | 8 | 2 | 7 | 6 | 2 | 7 | 3 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E^6) | | m ³ | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.71 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2008

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|------------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 213,8 | 179,2 | 168,0 | 135,9 | 102,4 | 97,7 | 179,6 | 197,7 | 241,6 | 286,6 | 274,8 | 364,1 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 14,6 | 8,3 | 15,6 | 11,9 | 9,4 | 10,6 | 11,8 | 10,1 | 11,9 | 13,2 | 18,5 | 19,3 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_{to}/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_{to}) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_{to}) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm | 213,8 | 179,2 | 168,0 | 135,9 | 102,4 | 97,7 | 179,6 | 197,7 | 241,6 | 286,6 | 274,8 | 364,1 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 213,8 | 179,2 | 168,0 | 135,9 | 102,4 | 97,7 | 179,6 | 197,7 | 241,6 | 286,6 | 274,8 | 364,1 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 85,5 | 71,7 | 67,2 | 54,3 | 41,0 | 39,1 | 71,8 | 79,1 | 96,6 | 114,7 | 109,9 | 145,6 |
| 13 | $0.5 (1 + k) I_n$ | Hitungan | - | 64,2 | 53,8 | 50,4 | 40,8 | 30,7 | 29,3 | 53,9 | 59,3 | 72,5 | 86,0 | 82,4 | 109,2 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 42,1 | 47,9 | 49,2 | 45,0 | 37,8 | 33,6 | 43,7 | 51,5 | 62,0 | 74,0 | 78,2 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) $V_n - V_{(n-1)}$ | mm | 84,2 | 95,8 | 98,3 | 89,9 | 75,7 | 67,2 | 87,5 | 103,0 | 124,0 | 148,0 | 156,4 | 187,4 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | | mm | 44,2 | 11,7 | 2,5 | -8,4 | -14,2 | -8,5 | 20,3 | 15,6 | 20,9 | 24,0 | 8,4 | 31,0 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 41,4 | 60,0 | 64,7 | 62,8 | 55,2 | 47,6 | 51,5 | 63,5 | 75,7 | 90,7 | 101,5 | 114,6 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 128,3 | 107,5 | 100,8 | 81,5 | 61,4 | 58,6 | 107,8 | 118,6 | 144,9 | 172,0 | 164,9 | 218,5 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 169,7 | 167,5 | 165,5 | 144,3 | 116,6 | 106,3 | 159,3 | 182,1 | 220,6 | 262,6 | 266,4 | 333,1 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 17,7 | 19,3 | 17,3 | 15,5 | 12,2 | 11,4 | 16,6 | 19,0 | 23,8 | 27,4 | 28,7 | 34,7 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 17688, | 19335, | 17256, | 15539, | 12157, | 11444, | 16604, | 18984, | 23763, | 27378, | 28690, | 34721, |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 0 | 6 | 2 | 4 | 3 | 9 | 5 | 6 | 4 | 1 | 7 | 7 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E^6) | | m ³ | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |
| | | | | 47,4 | 46,8 | 46,2 | 40,3 | 32,6 | 29,7 | 44,5 | 50,8 | 61,6 | 73,3 | 74,4 | 93,0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.72 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2009

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|------------------------------------|----------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 271,8 | 165,7 | 261,5 | 152,6 | 68,2 | 98,8 | 104,6 | 181,2 | 193,4 | 232,6 | 291,7 | 226,1 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 15,2 | 9,7 | 15,3 | 12,3 | 8,1 | 5,7 | 8,5 | 11,8 | 10,5 | 13,4 | 21,2 | 16,9 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_{to}/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_{to}) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_{to}) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm | 271,8 | 165,7 | 261,5 | 152,6 | 68,2 | 98,8 | 104,6 | 181,2 | 193,4 | 232,6 | 291,7 | 226,1 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 271,8 | 165,7 | 261,5 | 152,6 | 68,2 | 98,8 | 104,6 | 181,2 | 193,4 | 232,6 | 291,7 | 226,1 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 108,7 | 66,3 | 104,6 | 61,1 | 27,3 | 39,5 | 41,9 | 72,5 | 77,3 | 93,0 | 116,7 | 90,4 |
| 13 | $0.5 (1 + k) I_n$ | Hitungan | - | 81,6 | 49,7 | 78,5 | 45,8 | 20,5 | 29,6 | 31,4 | 54,4 | 58,0 | 69,8 | 87,5 | 67,8 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 50,8 | 50,2 | 64,4 | 55,1 | 37,8 | 33,7 | 32,5 | 43,4 | 50,7 | 60,2 | 73,9 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) Vn - V(n-1) | mm | 0 | 101,6 | 100,5 | 128,7 | 110,1 | 75,5 | 67,4 | 65,1 | 86,9 | 101,5 | 147,8 | 141,7 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | | mm | 61,6 | -1,1 | 28,2 | -18,6 | -34,6 | -8,1 | -2,3 | 21,8 | 14,6 | 19,0 | 27,3 | -6,1 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 47,2 | 67,3 | 76,4 | 79,6 | 61,9 | 47,6 | 44,2 | 50,7 | 62,8 | 74,0 | 89,4 | 96,5 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 163,1 | 99,4 | 156,9 | 91,6 | 40,9 | 59,3 | 62,8 | 108,7 | 116,0 | 139,5 | 175,0 | 135,7 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 210,3 | 166,8 | 233,3 | 171,2 | 102,8 | 106,9 | 107,0 | 159,4 | 178,8 | 213,5 | 264,5 | 232,2 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 21,9 | 19,2 | 24,3 | 18,4 | 10,7 | 11,5 | 11,1 | 16,6 | 19,3 | 22,3 | 28,5 | 24,2 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 21920, | 19247, | 24320, | 18441, | 10714, | 11517, | 11148, | 16612, | 19259, | 22258, | 28487, | 24200, |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 5 | 2 | 4 | 3 | 8 | 1 | 9 | 8 | 8 | 2 | 1 | 7 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E^6) | | m ³ | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.73 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2010

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des | |
|--|---|-------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 222,4 | 251,7 | 268,2 | 191,2 | 241,1 | 164,8 | 202,1 | 181,8 | 211,5 | 227,3 | 418,7 | 265,3 | |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 12,2 | 14,1 | 13,1 | 13,2 | 11,2 | 9,7 | 9,7 | 9,2 | 10,7 | 12,5 | 21,2 | 18,0 | |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | |
| 5 | $E_o/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | |
| 6 | $E = (ETo) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 7 | $Et = (ETo) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - Et$ | (1) - (7) | mm | 222,4 | 251,7 | 268,2 | 191,2 | 241,1 | 164,8 | 202,1 | 181,8 | 211,5 | 227,3 | 418,7 | 265,3 | |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 222,4 | 251,7 | 268,2 | 191,2 | 241,1 | 164,8 | 202,1 | 181,8 | 211,5 | 227,3 | 418,7 | 265,3 | |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 89,0 | 100,7 | 107,3 | 76,5 | 96,4 | 65,9 | 80,8 | 72,7 | 84,6 | 90,9 | 167,5 | 106,1 | |
| 13 | $0.5 (1 + k) In$ | Hitungan | - | 66,7 | 75,5 | 80,5 | 57,4 | 72,3 | 49,4 | 60,6 | 54,5 | 63,5 | 68,2 | 125,6 | 79,6 | |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 43,4 | 59,4 | 69,9 | 63,7 | 68,0 | 58,7 | 59,7 | 57,1 | 60,3 | 64,2 | 94,9 | |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) $V_n - V(n-1)$ | mm | 4 0 | 86,7 | 118,9 | 139,9 | 127,3 | 136,0 | 117,4 | 119,3 | 114,2 | 120,6 | 128,5 | 189,9 | 174,5 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | | mm | 46,7 | 32,1 | 21,0 | -12,6 | 8,7 | -18,6 | 1,9 | -5,1 | 6,3 | 7,9 | 61,4 | -15,3 | |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 42,2 | 68,5 | 86,3 | 89,1 | 87,8 | 84,5 | 78,9 | 77,8 | 78,3 | 83,0 | 106,1 | 121,5 | |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 133,4 | 151,0 | 160,9 | 114,7 | 144,7 | 98,9 | 121,2 | 109,1 | 126,9 | 136,4 | 251,2 | 159,2 | |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 175,7 | 219,5 | 247,2 | 203,8 | 232,4 | 183,3 | 200,2 | 186,9 | 205,2 | 219,4 | 357,3 | 280,6 | |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 18,3 | 25,3 | 25,8 | 21,9 | 24,2 | 19,7 | 20,9 | 19,5 | 22,1 | 22,9 | 38,5 | 29,3 | |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 18311,7 | 25336,3 | 25767,3 | 21949,9 | 24227,5 | 19747,2 | 20864,1 | 19486,2 | 22098,9 | 22872,2 | 38491,9 | 29254,9 | |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E ⁶) | | m ³ | 49,0 | 61,3 | 69,0 | 56,9 | 64,9 | 51,2 | 55,9 | 52,2 | 57,3 | 61,3 | 99,8 | 78,4 | |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.74 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2011

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|------------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 199,2 | 166,6 | 178,2 | 234,4 | 132,8 | 59,0 | 68,3 | 181,6 | 142,4 | 278,0 | 464,2 | 474,7 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 13,2 | 10,3 | 10,6 | 11,1 | 8,9 | 7,0 | 3,2 | 10,6 | 9,9 | 11,9 | 17,5 | 16,1 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_{to}/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_{to}) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_{to}) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm | 199,2 | 166,6 | 178,2 | 234,4 | 132,8 | 59,0 | 68,3 | 181,6 | 142,4 | 278,0 | 464,2 | 474,7 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 199,2 | 166,6 | 178,2 | 234,4 | 132,8 | 59,0 | 68,3 | 181,6 | 142,4 | 278,0 | 464,2 | 474,7 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 79,7 | 66,6 | 71,3 | 93,8 | 53,1 | 23,6 | 27,3 | 72,7 | 56,9 | 111,2 | 185,7 | 189,9 |
| 13 | $0.5 (1 + k) I_n$ | Hitungan | - | 59,8 | 50,0 | 53,5 | 70,3 | 39,8 | 17,7 | 20,5 | 54,5 | 42,7 | 83,4 | 139,3 | 142,4 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 39,9 | 44,9 | 49,2 | 59,8 | 49,8 | 33,7 | 27,1 | 40,8 | 41,8 | 62,6 | 100,9 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) $V_n - V_{(n-1)}$ | mm | 79,8 | 89,9 | 98,4 | 119,5 | 99,6 | 67,5 | 54,2 | 81,6 | 83,5 | 125,1 | 201,8 | 243,3 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | | mm | 39,8 | 10,1 | 8,5 | 21,1 | -19,9 | -32,1 | -13,2 | 27,4 | 1,9 | 41,6 | 76,7 | 41,5 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 39,9 | 56,5 | 62,7 | 72,6 | 73,0 | 55,7 | 40,6 | 45,3 | 55,0 | 69,6 | 109,0 | 148,4 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 119,5 | 99,9 | 106,9 | 140,6 | 79,7 | 35,4 | 41,0 | 109,0 | 85,4 | 166,8 | 278,5 | 284,8 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 159,5 | 156,5 | 169,7 | 213,3 | 152,7 | 91,1 | 81,6 | 154,3 | 140,5 | 236,3 | 387,5 | 433,2 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 16,6 | 18,1 | 17,7 | 23,0 | 15,9 | 9,8 | 8,5 | 16,1 | 15,1 | 24,6 | 41,7 | 45,2 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 16623, | 18059, | 17685, | 22971, | 15919, | 9809, | 8504, | 16081, | 15129, | 24635, | 41740, | 45158, |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 2 | 1 | 3 | 8 | 6 | 2 | 0 | 8 | 8 | 8 | 5 | 8 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E^6) | | m ³ | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.75 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2012

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|------------------------------------|----------------------------|---------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 70,1 | 265,6 | 111,1 | 155,2 | 67,6 | 98,7 | 164,2 | 124,5 | 159,0 | 97,3 | 365,2 | 378,5 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 10,2 | 15,4 | 3,9 | 8,7 | 5,6 | 7,0 | 5,9 | 6,3 | 7,0 | 7,3 | 17,4 | 18,0 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_{to}/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_{to}) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_{to}) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm | 70,1 | 265,6 | 111,1 | 155,2 | 67,6 | 98,7 | 164,2 | 124,5 | 159,0 | 97,3 | 365,2 | 378,5 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8)- (9) | mm | 70,1 | 265,6 | 111,1 | 155,2 | 67,6 | 98,7 | 164,2 | 124,5 | 159,0 | 97,3 | 365,2 | 378,5 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 28,0 | 106,2 | 44,4 | 62,1 | 27,0 | 39,5 | 65,7 | 49,8 | 63,6 | 38,9 | 146,1 | 151,4 |
| 13 | $0.5 (1 + k) I_n$ | Hitungan | - | 21,0 | 79,7 | 33,3 | 46,6 | 20,3 | 29,6 | 49,3 | 37,4 | 47,7 | 29,2 | 109,6 | 113,5 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 20,5 | 50,1 | 41,7 | 44,1 | 32,2 | 30,9 | 40,1 | 38,7 | 43,2 | 36,2 | 72,9 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) Vn - V(n-1) | mm | 41,0 | 100,2 | 83,4 | 88,3 | 64,4 | 61,8 | 80,2 | 77,4 | 86,4 | 72,4 | 145,8 | 186,4 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | | mm | 1,0 | 59,2 | -16,8 | 4,9 | -23,9 | -2,6 | 18,4 | -2,7 | 9,0 | -14,0 | 73,4 | 40,7 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 27,0 | 47,1 | 61,2 | 57,2 | 50,9 | 42,1 | 47,3 | 52,5 | 54,6 | 52,9 | 72,7 | 110,7 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 42,0 | 159,4 | 66,6 | 93,1 | 40,6 | 59,2 | 98,5 | 74,7 | 95,4 | 58,4 | 219,1 | 227,1 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 69,0 | 206,4 | 127,8 | 150,4 | 91,5 | 101,3 | 145,8 | 127,3 | 150,0 | 111,3 | 291,8 | 337,8 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 7,2 | 23,8 | 13,3 | 16,2 | 9,5 | 10,9 | 15,2 | 13,3 | 16,2 | 11,6 | 31,4 | 35,2 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 7197, | 23824, | 13327, | 16197, | 9534, | 10908, | 15203, | 13265, | 16162, | 11603, | 31435, | 35214, |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 0 | 0 | 3 | 7 | 9 | 9 | 4 | 4 | 0 | 3 | 8 | 4 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E^6) | | m ³ | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.76 Perhitungan Debit Metode F.J Mock tahun 2013

| No | Uraian | Hitungan | Satuan | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Jul | Agst | Sept | Okt | Nov | Des |
|--|------------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| I DATA HUJAN | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Curah Hujan (P) | Data | mm | 211,1 | 154,4 | 112,7 | 213,5 | 173,3 | 85,2 | 73,9 | 226,9 | 220,8 | 326,5 | 355,0 | 231,0 |
| 2 | Hari Hujan (h) | Data | hari | 11,3 | 15,4 | 7,7 | 14,6 | 11,7 | 10,4 | 8,4 | 12,9 | 12,1 | 18,3 | 20,0 | 13,9 |
| II EVAPOTRANSPIRASI TERBATAS (Et) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Evapotranspirasi Potensial (ETo) | ETo | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | Permukaan Lahan Terbuka (m) | Tentukan | % | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| 5 | $E_{to}/E_a = (m/20) * (18 - h)$ | Hitungan | - | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | $E = (E_{to}) * (m/20) * (18 - h)$ | (3) * (5) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | $E_t = (E_{to}) - (E)$ | (3) - (6) | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| III KESEIMBANGAN AIR | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | $D_s = P - E_t$ | (1) - (7) | mm | 211,1 | 154,4 | 112,7 | 213,5 | 173,3 | 85,2 | 73,9 | 226,9 | 220,8 | 326,5 | 355,0 | 231,0 |
| 9 | Kandungan Air Tanah | | mm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) | SMC | mm | 150,0 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 | 140,3 |
| 11 | Kelebihan Air (WS) | (8) - (9) | mm | 211,1 | 154,4 | 112,7 | 213,5 | 173,3 | 85,2 | 73,9 | 226,9 | 220,8 | 326,5 | 355,0 | 231,0 |
| IV ALIRAN DAN PENYIMPANAN AIR TANAH | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Infiltrasi (I) | (11) * (i) | mm | 84,4 | 61,8 | 45,1 | 85,4 | 69,3 | 34,1 | 29,6 | 90,7 | 88,3 | 130,6 | 142,0 | 92,4 |
| 13 | $0.5 (1 + k) I_n$ | Hitungan | - | 63,3 | 46,3 | 33,8 | 64,0 | 52,0 | 25,6 | 22,2 | 68,1 | 66,2 | 97,9 | 106,5 | 69,3 |
| 14 | $k * V (n - 1)$ | Hitungan | - | 20,0 | 41,7 | 44,0 | 38,9 | 51,5 | 51,7 | 38,6 | 30,4 | 49,2 | 57,7 | 77,8 | 92,2 |
| 15 | Volume Penyimpanan (Vn) | (13) + (14) $V_n - V_{(n-1)}$ | mm | 83,3 | 88,0 | 77,8 | 102,9 | 103,5 | 77,3 | 60,8 | 98,5 | 115,5 | 155,7 | 184,3 | 161,5 |
| 16 | Perubahan Volume Air (DVn) | | mm | 43,3 | 4,7 | -10,2 | 25,1 | 0,5 | -26,2 | -16,5 | 37,6 | 17,0 | 40,2 | 28,7 | -22,9 |
| 17 | Aliran Dasar (BF) | (12) - (16) | mm | 41,1 | 57,1 | 55,3 | 60,3 | 68,8 | 60,2 | 46,0 | 53,1 | 71,3 | 90,4 | 113,3 | 115,3 |
| 18 | Aliran Langsung (DR) | (11) - (12) | mm | 126,7 | 92,6 | 67,6 | 128,1 | 104,0 | 51,1 | 44,4 | 136,1 | 132,5 | 195,9 | 213,0 | 138,6 |
| 19 | Aliran (R) | (17) + (18) | mm | 167,8 | 149,7 | 122,9 | 188,3 | 172,8 | 111,4 | 90,4 | 189,2 | 203,8 | 286,3 | 326,4 | 253,8 |
| V DEBIT ALIRAN SUNGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Debit Aliran Sungai | A * (19) | m ³ /dtk | 17,5 | 17,3 | 12,8 | 20,3 | 18,0 | 12,0 | 9,4 | 19,7 | 21,9 | 29,8 | 35,2 | 26,5 |
| 22 | Debit Aliran Sungai | | lt/det | 17488,6 | 17282,1 | 12811,6 | 20285,2 | 18008,4 | 11999,3 | 9424,2 | 19724,6 | 21949,2 | 29841,3 | 35154,2 | 26461,5 |
| 23 | Jumlah hari | | hari | 31,0 | 28,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 31,0 |
| 24 | Debit Aliran (dibaca : 10E^6) | | m ³ | 46,8 | 41,8 | 34,3 | 52,6 | 48,2 | 31,1 | 25,2 | 52,8 | 56,9 | 79,9 | 91,1 | 70,9 |

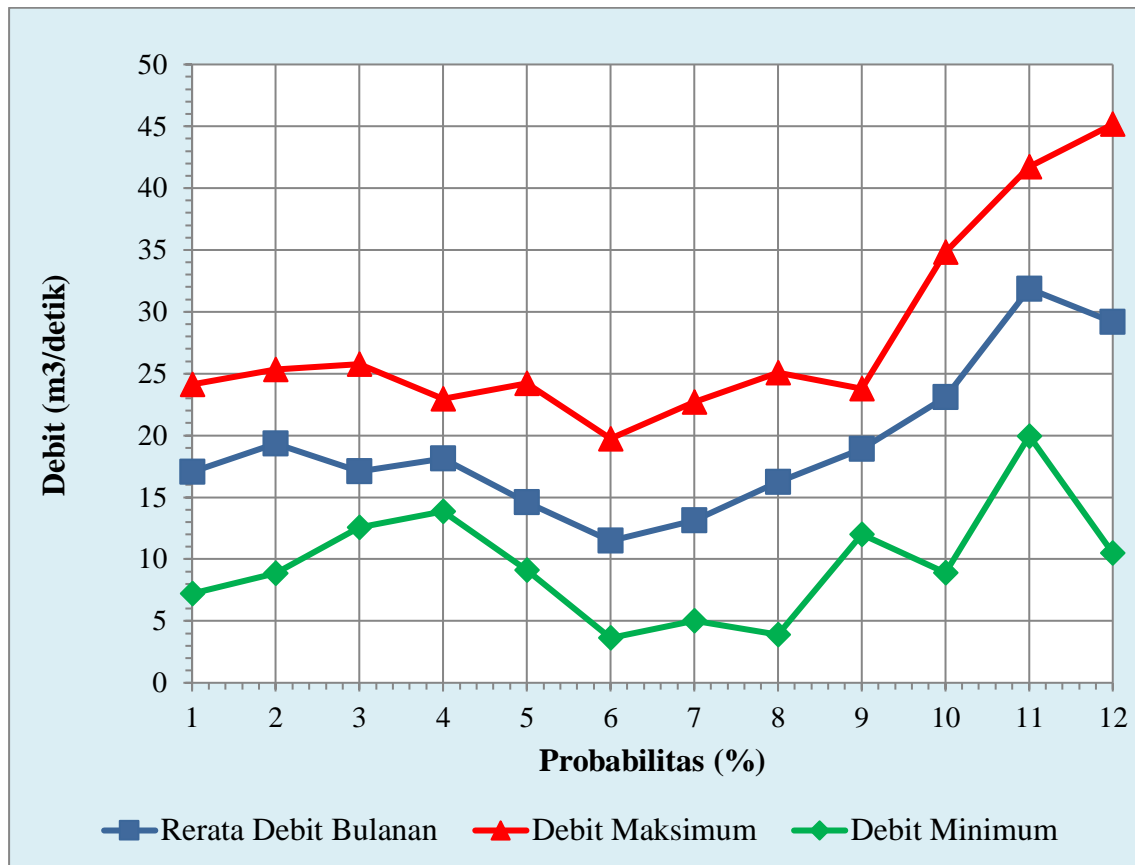
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.77 Rekapitulasi Debit Sungai

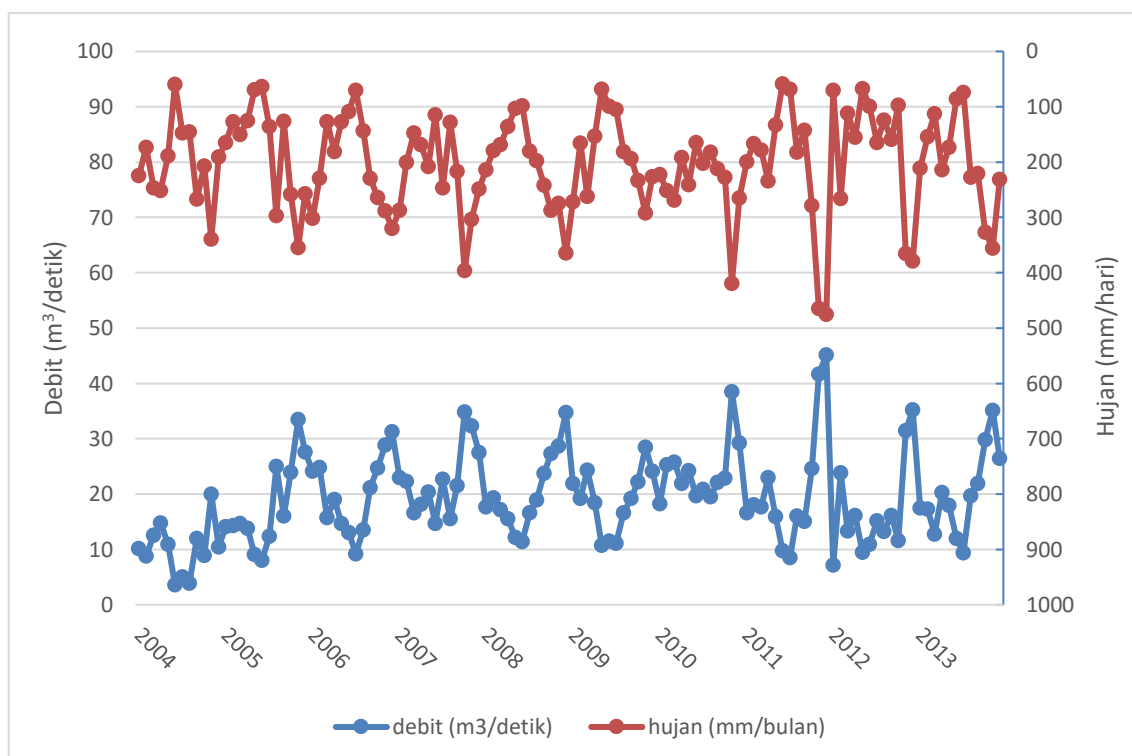
| No | Tahun | Debit (m ³ /dt) | | | | | | | | | | | | Jumlah | Rerata | Max | Min |
|----|----------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| | | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | | | | |
| 1 | 2004 | 10,21 | 8,85 | 12,56 | 14,81 | 10,98 | 3,63 | 5,02 | 3,88 | 11,99 | 8,89 | 19,96 | 10,50 | 121,27 | 10,11 | 19,96 | 3,63 |
| 2 | 2005 | 14,11 | 14,29 | 14,75 | 13,84 | 9,12 | 8,01 | 12,42 | 25,06 | 16,02 | 23,95 | 33,55 | 27,61 | 212,73 | 17,73 | 33,55 | 8,01 |
| 3 | 2006 | 24,11 | 24,87 | 15,72 | 19,02 | 14,70 | 13,03 | 9,17 | 13,58 | 21,18 | 24,76 | 28,83 | 31,27 | 240,26 | 20,02 | 31,27 | 9,17 |
| 4 | 2007 | 23,02 | 22,30 | 16,66 | 18,14 | 20,41 | 14,69 | 22,69 | 15,57 | 21,60 | 34,83 | 32,31 | 27,48 | 269,69 | 22,47 | 34,83 | 14,69 |
| 5 | 2008 | 17,69 | 19,34 | 17,26 | 15,54 | 12,16 | 11,44 | 16,60 | 18,98 | 23,76 | 27,38 | 28,69 | 34,72 | 243,56 | 20,30 | 34,72 | 11,44 |
| 6 | 2009 | 21,92 | 19,25 | 24,32 | 18,44 | 10,71 | 11,52 | 11,15 | 16,61 | 19,26 | 22,26 | 28,49 | 24,20 | 228,13 | 19,01 | 28,49 | 10,71 |
| 7 | 2010 | 18,31 | 25,34 | 25,77 | 21,95 | 24,23 | 19,75 | 20,86 | 19,49 | 22,10 | 22,87 | 38,49 | 29,25 | 288,41 | 24,03 | 38,49 | 18,31 |
| 8 | 2011 | 16,62 | 18,06 | 17,69 | 22,97 | 15,92 | 9,81 | 8,50 | 16,08 | 15,13 | 24,64 | 41,74 | 45,16 | 252,32 | 21,03 | 45,16 | 8,50 |
| 9 | 2012 | 7,20 | 23,82 | 13,33 | 16,20 | 9,53 | 10,91 | 15,20 | 13,27 | 16,16 | 11,60 | 31,44 | 35,21 | 203,87 | 16,99 | 35,21 | 7,20 |
| 10 | 2013 | 17,49 | 17,28 | 12,81 | 20,29 | 18,01 | 12,00 | 9,42 | 19,72 | 21,95 | 29,84 | 35,15 | 26,46 | 240,43 | 20,04 | 35,15 | 9,42 |
| | Rerata | 17,07 | 19,34 | 17,09 | 18,12 | 14,58 | 11,48 | 13,10 | 16,23 | 18,91 | 23,10 | 31,87 | 29,19 | 230,07 | 19,17 | 33,68 | 10,11 |
| | Maksimum | 24,11 | 25,34 | 25,77 | 22,97 | 24,23 | 19,75 | 22,69 | 25,06 | 23,76 | 34,83 | 41,74 | 45,16 | 288,41 | 24,03 | 45,16 | 18,31 |
| | Minimum | 7,20 | 8,85 | 12,56 | 13,84 | 9,12 | 3,63 | 5,02 | 3,88 | 11,99 | 8,89 | 19,96 | 10,50 | 121,27 | 10,11 | 19,96 | 3,63 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Untuk melihat fluktuasi sungai dari hasil pembangkitan data curah hujan menjadi debit dengan metode FJ Mock dapat dilihat pada Gambar 4.18 yang menunjukkan hubungan debit dengan bulan sebagai berikut:



Gambar 4.18 Grafik hubungan debit FJ Mock dengan Bulan
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.19 Grafik hubungan Debit F.J Mock dengan Curah Hujan Bulanan
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.3.3. Perhitungan *Flow Duration Curve* (FDC)

Flow Duration Curve (FDC) atau Kurva Durasi Aliran merupakan perhitungan yang menunjukkan kumulatif debit dalam probabilitas kejadian 0 – 100 %. Dari hasil perhitungan pembangkitan debit dengan metode F.J Mock dapat dilakukan pembuatan kurva durasi aliran dengan 10 data setiap bulannya dan setiap bulan dalam setiap tahun sehingga didapat data sebanyak 120 data lalu diurutkan dari besar menuju terkecil untuk mendapatkan nilai probabilitas. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.78 Probabilitas Debit Setiap Bulan (m^3/detik)

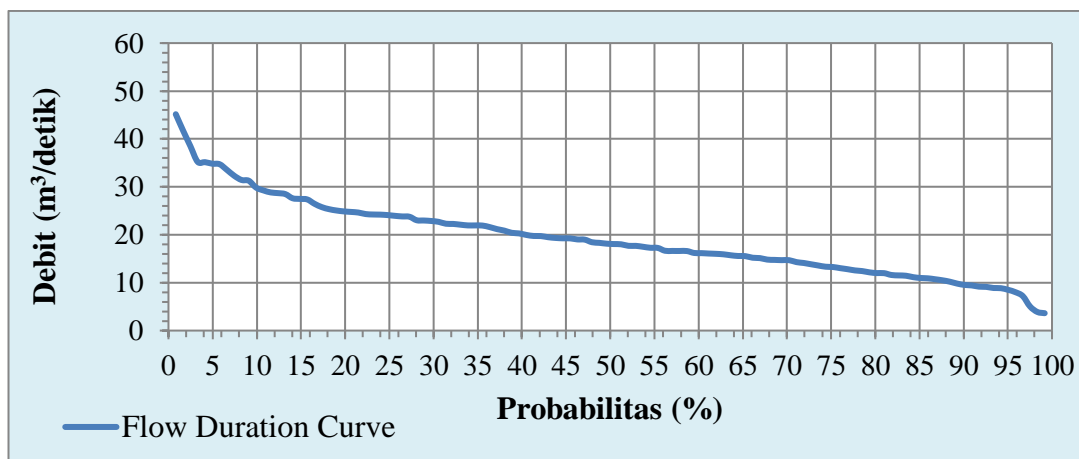
| No. | Prob. (%) | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|-----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 9,09 | 24,11 | 25,34 | 25,77 | 22,97 | 24,23 | 19,75 | 22,69 | 25,06 | 23,76 | 34,83 | 41,74 | 45,16 |
| 2 | 18,18 | 23,02 | 24,87 | 24,32 | 21,95 | 20,41 | 14,69 | 20,86 | 19,72 | 22,10 | 29,84 | 38,49 | 35,21 |
| 3 | 27,27 | 21,92 | 23,82 | 17,69 | 20,29 | 18,01 | 13,03 | 16,60 | 19,49 | 21,95 | 27,38 | 35,15 | 34,72 |
| 4 | 36,36 | 20,51 | 22,30 | 17,26 | 19,02 | 15,92 | 12,00 | 14,20 | 18,98 | 21,60 | 24,76 | 33,55 | 31,27 |
| 5 | 45,45 | 18,89 | 19,34 | 16,66 | 18,44 | 14,70 | 11,32 | 12,42 | 16,61 | 21,18 | 24,64 | 32,31 | 29,25 |
| 6 | 54,54 | 17,49 | 19,25 | 15,72 | 18,14 | 12,16 | 11,14 | 11,15 | 16,08 | 19,26 | 23,95 | 31,44 | 27,61 |
| 7 | 63,63 | 16,62 | 18,06 | 14,75 | 16,20 | 10,98 | 10,91 | 9,42 | 15,57 | 16,16 | 22,87 | 28,83 | 27,48 |
| 8 | 72,72 | 14,11 | 17,28 | 13,33 | 15,54 | 10,71 | 9,81 | 9,17 | 13,58 | 16,02 | 22,26 | 28,69 | 26,46 |
| 9 | 81,81 | 10,21 | 14,29 | 12,81 | 14,81 | 9,53 | 8,01 | 8,50 | 13,27 | 15,13 | 11,60 | 28,49 | 24,20 |
| 10 | 90,90 | 7,20 | 8,85 | 12,56 | 13,84 | 9,12 | 3,63 | 5,02 | 3,88 | 11,99 | 8,89 | 19,96 | 10,50 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.79 Probabilitas Debit (m³/detik)

| No Urut | Q | Prob (%) | No Urut | Q | Prob (%) | No Urut | Q | Prob (%) | No Urut | Q | Prob (%) |
|---------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|-------|----------|
| 1 | 45,16 | 0,83 | 31 | 23,95 | 25,62 | 61 | 18,06 | 50,41 | 91 | 13,27 | 75,21 |
| 2 | 41,74 | 1,65 | 32 | 23,82 | 26,45 | 62 | 18,01 | 51,24 | 92 | 13,03 | 76,03 |
| 3 | 38,49 | 2,48 | 33 | 23,76 | 27,27 | 63 | 17,69 | 52,07 | 93 | 12,81 | 76,86 |
| 4 | 35,21 | 3,31 | 34 | 23,02 | 28,10 | 64 | 17,69 | 52,89 | 94 | 12,56 | 77,69 |
| 5 | 35,15 | 4,13 | 35 | 22,97 | 28,93 | 65 | 17,49 | 53,72 | 95 | 12,42 | 78,51 |
| 6 | 34,83 | 4,96 | 36 | 22,87 | 29,75 | 66 | 17,28 | 54,55 | 96 | 12,16 | 79,34 |
| 7 | 34,72 | 5,79 | 37 | 22,69 | 30,58 | 67 | 17,26 | 55,37 | 97 | 12,00 | 80,17 |
| 8 | 33,55 | 6,61 | 38 | 22,30 | 31,40 | 68 | 16,66 | 56,20 | 98 | 11,99 | 80,99 |
| 9 | 32,31 | 7,44 | 39 | 22,26 | 32,23 | 69 | 16,62 | 57,02 | 99 | 11,60 | 81,82 |
| 10 | 31,44 | 8,26 | 40 | 22,10 | 33,06 | 70 | 16,61 | 57,85 | 100 | 11,52 | 82,64 |
| 11 | 31,27 | 9,09 | 41 | 21,95 | 33,88 | 71 | 16,60 | 58,68 | 101 | 11,44 | 83,47 |
| 12 | 29,84 | 9,92 | 42 | 21,95 | 34,71 | 72 | 16,20 | 59,50 | 102 | 11,15 | 84,30 |
| 13 | 29,25 | 10,74 | 43 | 21,92 | 35,54 | 73 | 16,16 | 60,33 | 103 | 10,98 | 85,12 |
| 14 | 28,83 | 11,57 | 44 | 21,60 | 36,36 | 74 | 16,08 | 61,16 | 104 | 10,91 | 85,95 |
| 15 | 28,69 | 12,40 | 45 | 21,18 | 37,19 | 75 | 16,02 | 61,98 | 105 | 10,71 | 86,78 |
| 16 | 28,49 | 13,22 | 46 | 20,86 | 38,02 | 76 | 15,92 | 62,81 | 106 | 10,50 | 87,60 |
| 17 | 27,61 | 14,05 | 47 | 20,41 | 38,84 | 77 | 15,72 | 63,64 | 107 | 10,21 | 88,43 |
| 18 | 27,48 | 14,88 | 48 | 20,29 | 39,67 | 78 | 15,57 | 64,46 | 108 | 9,81 | 89,26 |
| 19 | 27,38 | 15,70 | 49 | 19,96 | 40,50 | 79 | 15,54 | 65,29 | 109 | 9,53 | 90,08 |
| 20 | 26,46 | 16,53 | 50 | 19,75 | 41,32 | 80 | 15,20 | 66,12 | 110 | 8,42 | 90,91 |
| 21 | 25,77 | 17,36 | 51 | 19,72 | 42,15 | 81 | 15,13 | 66,94 | 111 | 8,17 | 91,74 |
| 22 | 25,34 | 18,18 | 52 | 19,49 | 42,98 | 82 | 14,81 | 67,77 | 112 | 7,12 | 92,56 |
| 23 | 25,06 | 19,01 | 53 | 19,34 | 43,80 | 83 | 14,75 | 68,60 | 113 | 6,89 | 93,39 |
| 24 | 24,87 | 19,83 | 54 | 19,26 | 44,63 | 84 | 14,70 | 69,42 | 114 | 5,85 | 94,21 |
| 25 | 24,76 | 20,66 | 55 | 19,25 | 45,45 | 85 | 14,69 | 70,25 | 115 | 4,27 | 95,04 |
| 26 | 24,64 | 21,49 | 56 | 19,02 | 46,28 | 86 | 14,29 | 71,07 | 116 | 3,78 | 95,87 |
| 27 | 24,32 | 22,31 | 57 | 18,98 | 47,11 | 87 | 14,11 | 71,90 | 117 | 3,17 | 96,69 |
| 28 | 24,23 | 23,14 | 58 | 18,44 | 47,93 | 88 | 13,84 | 72,73 | 118 | 2,79 | 97,52 |
| 29 | 24,20 | 23,97 | 59 | 18,31 | 48,76 | 89 | 13,58 | 73,55 | 119 | 1,65 | 98,35 |
| 30 | 24,11 | 24,79 | 60 | 18,14 | 49,59 | 90 | 13,33 | 74,38 | 120 | 1,40 | 99,17 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.20 Kurva Durasi Aliran Asli
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil dari perhitungan FDC akan digunakan untuk mengestimasi debit yang akan digunakan dalam perencanaan PLTM Sion. Penentuan debit tersebut akan dilakukan dengan cara optimasi, yaitu Penentuan Debit Pembangkit yang optimal.

4.4. Penentuan Debit Pembangkit

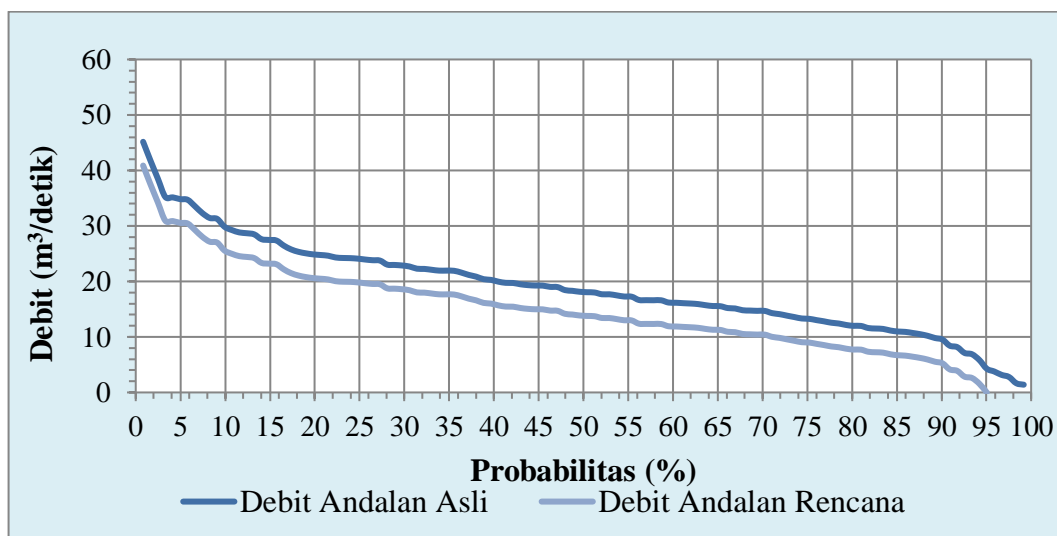
Dalam perhitungan penentuan debit pembangkit dimaksudkan untuk menentukan debit andalan yang tidak menyalahi ketentuan dan mendukung operasi pembangkit listrik secara maksimal.

Hasil dari penentuan debit pembangkit (andalan) akan secara penuh sebagai dasar untuk mendesain dimensi bangunan-bangunan PLTM Sion dari bangunan pengambilan (*intake*), bak pengendap, saluran penghantar, bak penenang, pipa pesat (*penstock*), pemilihan turbin, sampai dengan saluran pembuang.

Penentuan debit pembangkit dalam studi ini terbagi menjadi 2 (dua) bagian, yaitu berdasarkan energi produksi tahunan dan berdasarkan biaya dan BCR. Berikut merupakan perhitungan penentuan debit pembangkit:

4.4.1. Penentuan Berdasarkan Energi Produksi Tahunan

Perhitungan untuk menentukan debit pembangkit akan dilakukan simulasi perhitungan dengan menggunakan beberapa hal, yaitu debit andalan yang dihasilkan oleh FDC hingga menghitung faktor kapasitas. Untuk debit andalan yang akan disimulasikan berdasarkan probabilitas 5 % – 95 % (Sesuai Tabel 4.79) yang telah dikurangi kebutuhan *Maintenance Flow* dengan probabilitas 95% yang dapat dilihat pada Gambar 4.21 dan Tabel 4.80 sebagai berikut:



Gambar 4.21 Kurva Durasi Aliran Rencana
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.80 Debit Andalan Rencana Probabilitas Tertentu

| % | Debit | % | Debit |
|----|-------|----|-------|
| 5 | 30,55 | 50 | 13,82 |
| 10 | 25,51 | 55 | 12,99 |
| 15 | 23,19 | 60 | 11,90 |
| 20 | 20,58 | 65 | 11,28 |
| 25 | 19,79 | 70 | 10,42 |
| 30 | 18,54 | 75 | 9,01 |
| 35 | 17,67 | 80 | 7,76 |
| 40 | 15,88 | 85 | 6,73 |
| 45 | 14,98 | 90 | 5,29 |
| | | 95 | 0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Debit pembangkit yang biasa digunakan di Indonesia adalah dengan probabilitas 45% - 65% atau debit rencana ($Q_{rencana}$) dibagi debit rerata (Q_{rerata}) tidak lebih dari 1,5. Dalam perhitungan penentuan debit pembangkit di studi PLTM Sion ini akan menghitung probabilitas 40% - 70% agar mendapatkan perhitungan lebih detail dan dapat menentukan hasil energi yang optimal. Perhitungan energi yang dihasilkan akan di hitung berdasarkan setiap probabilitas. Parameter yang digunakan untuk perhitungan energi adalah sebagai berikut:

$Q_{rencana}$: $Q_{40\%} = 15,88 \text{ m}^3/\text{detik}$, $Q_{50\%} = 13,82 \text{ m}^3/\text{detik}$, $Q_{60\%} = 11,90 \text{ m}^3/\text{detik}$,
 $Q_{70\%} = 10,42 \text{ m}^3/\text{detik}$.

Q_{rerata} : $15,51 \text{ m}^3/\text{detik}$.

Tinggi Jatuh : El.Intike – El. Turbin = $766 - 690 = 76$ meter (dengan memperkirakan topografi studi)

Efisiensi : 0,8 (Efisiensi ini berdasarkan belum dilakukan perhitungan kehilangan tinggi)

Contoh perhitungan $Q_{40\%} = 15,88 \text{ m}^3/\text{detik}$ dengan Keandalan Debit 40% sebagai berikut:

- Menentukan nilai Debit Digunakan, yaitu untuk Keandalan Debit 40% menggunakan $15,88 \text{ m}^3/\text{detik}$. Jika menggunakan perhitungan $Q_{40\%}$ maka untuk Keandalan Debit dibawah 40% menggunakan $Q_{40\%}$. Hal tersebut terjadi karena

desain bangunan dianggap menggunakan $Q_{40\%}$ dan jika terjadi debit diatasnya maka dianggap melimpah. Untuk mengoptimalkan debit yang ada maka direncanakan 2 turbin dengan satu turbin $7,98 \text{ m}^3/\text{detik}$ (Debit 40% dibagi jumlah turbin). Jika debit andalan rencana kurang dari Debit 40%, maka menggunakan satu turbin. Jika debit andalan rencana kurang dari Debit satu turbin maka turbin tidak dapat beroperasi.

- b. Menentukan nilai Jumlah Hari = Interval 5% x 365 hari = 18,25 dimaksudkan untuk menerangkan terjadinya energi yang dihasilkan sesuai Keandalan Debit dalam setahun,
- c. Menentukan nilai Daya = $Q \times \text{Tinggi Jatuh} \times \text{Efisiensi} \times \text{Gravitasi (g)}$ = $15,88 \times 76 \times 0,8 \times 9,81 = 9.471,60 \text{ kW}$,
- d. Menentukan nilai Energi = Daya x 24 Jam x Jumlah Hari Berproduksi = $12.002,13 \times 24 \times 18,25 = 5.265.693,81 \text{ kWh}$.

Jadi ketika terjadi debit yang berada di bawah debit pembangkit satu turbin maka turbin tidak akan dioperasikan. Untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.80 sampai dengan Tabel 4.83 sebagai berikut:

Tabel 4.80 Perhitungan Energi Q40%

| No | Keandalan Debit % | Debit Andalan Rencana m3/detik | Hari Operasi | Debit Pembangkit m3/detik | Daya kW | Energi kWh | Kumulatif Energi kWh |
|----|-------------------------|---|-----------------|---------------------------------|------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 5 | 30,55 | 18 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 5.265.693,81 |
| 2 | 10 | 25,51 | 37 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 10.531.387,62 |
| 3 | 15 | 23,19 | 55 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 15.797.081,44 |
| 4 | 20 | 20,58 | 73 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 21.062.775,25 |
| 5 | 25 | 19,79 | 91 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 26.328.469,06 |
| 6 | 30 | 18,54 | 110 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 31.594.162,87 |
| 7 | 35 | 17,67 | 128 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 36.859.856,69 |
| 8 | 40 | 15,88 | 146 | 15,88 | 12.022,13 | 5.265.693,81 | 42.125.550,50 |
| 9 | 45 | 14,98 | 164 | 14,98 | 11.484,10 | 5.030.033,69 | 47.155.584,19 |
| 10 | 50 | 13,82 | 183 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 51.883.639,49 |
| 11 | 55 | 12,99 | 201 | 12,99 | 10.299,38 | 4.511.129,54 | 56.394.769,03 |
| 12 | 60 | 11,90 | 219 | 11,90 | 9.648,28 | 4.225.948,55 | 60.620.717,59 |
| 13 | 65 | 11,28 | 237 | 11,28 | 9.274,35 | 4.062.165,49 | 64.682.883,08 |
| 14 | 70 | 10,42 | 256 | 10,42 | 8.7645,86 | 3.838.888,64 | 68.521.771,72 |
| 15 | 75 | 9,01 | 274 | 9,01 | 7.9213,26 | 3.469.540,64 | 71.991.312,35 |
| 16 | 80 | 7,76 | 292 | 7,76 | 7.1758,26 | 3.143.011,62 | 75.134.323,98 |
| 17 | 85 | 6,73 | 310 | 6,73 | 6.5638,73 | 2.874.976,57 | 82.733.519,80 |
| 18 | 90 | 5,29 | 329 | 0 | 0 | 0 | 82.733.519,80 |
| 19 | 95 | 0,00 | 347 | 0 | 0 | 0 | 82.733.519,80 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTM dioperasikan selama 310 hari. Untuk 55 hari selebihnya merupakan kondisi dimana sistem mengalami off atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dari perhitungan energi Q40% didapatkan daya maksimum sebesar 12.022,13 kW dengan energi selama satu tahun sebesar 82,73 GWh.

Tabel 4.81 Perhitungan Energi Q50%

| Keandalan | Debit | Jumlah | Debit | Daya | Energi | Kumulatif |
|-----------|-----------------------|--------|-----------------------|-----------|--------------|---------------|
| Debit | Andalan | Hari | Pembangkit | | | Energi |
| % | m ³ /detik | | m ³ /detik | kW | kWh | kWh |
| 5 | 30,55 | 18 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 4.728.055,30 |
| 10 | 25,51 | 37 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 9.456.110,61 |
| 15 | 23,19 | 55 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 14.184.165,91 |
| 20 | 20,58 | 73 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 18.912.221,21 |
| 25 | 19,79 | 91 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 23.640.276,51 |
| 30 | 18,54 | 110 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 28.368.331,82 |
| 35 | 17,67 | 128 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 33.096.387,12 |
| 40 | 15,88 | 146 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 37.824.442,42 |
| 45 | 14,98 | 164 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 42.552.497,73 |
| 50 | 13,82 | 183 | 13,82 | 10.794,65 | 4.728.055,30 | 47.280.553,03 |
| 55 | 12,99 | 201 | 12,99 | 10.299,38 | 4.511.129,54 | 51.791.682,57 |
| 60 | 11,90 | 219 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 56.017.631,12 |
| 65 | 11,28 | 237 | 11,28 | 9.274,35 | 4.062.165,49 | 60.079.796,61 |
| 70 | 10,42 | 256 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 63.918.685,25 |
| 75 | 9,01 | 274 | 9,01 | 7.921,326 | 3.469.540,64 | 67.388.225,89 |
| 80 | 7,76 | 292 | 7,76 | 7.175,826 | 3.143.011,62 | 70.531.237,52 |
| 85 | 6,73 | 310 | 6,73 | 6.563,873 | 2.874.976,57 | 78.130.433,33 |
| 90 | 5,29 | 329 | 0 | 0 | 0 | 78.130.433,33 |
| 95 | 0 | 347 | 0 | 0 | 0 | 78.130.433,33 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTM dioperasikan selama 310 hari. Untuk 55 hari selebihnya merupakan kondisi dimana sistem mengalami off atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dari perhitungan energi Q50% didapatkan daya maksimum sebesar 10.794,65 kW dengan energi selama satu tahun sebesar 78,131 GWh.

Tabel 4.82 Perhitungan Energi Q60%

| Keandalan | Debit | Jumlah | Debit | Daya | Energi | Kumulatif |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-------------|---------------|------------------|
| Debit | Andalan | Hari | Pembangkit | | | Energi |
| % | m ³ /detik | | m ³ /detik | kW | kWh | kWh |
| 5 | 30,55 | 18 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 4.225.948,55 |
| 10 | 25,51 | 37 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 8.451.897,11 |
| 15 | 23,19 | 55 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 12.677.845,66 |
| 20 | 20,58 | 73 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 16.903.794,22 |
| 25 | 19,79 | 91 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 21.129.742,77 |
| 30 | 18,54 | 110 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 25.355.691,33 |
| 35 | 17,67 | 128 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 29.581.639,88 |
| 40 | 15,88 | 146 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 33.807.588,44 |
| 45 | 14,98 | 164 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 38.033.536,99 |
| 50 | 13,82 | 183 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 42.259.485,55 |
| 55 | 12,99 | 201 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 46.485.434,10 |
| 60 | 11,90 | 219 | 11,90 | 9.648,284 | 4.225.948,55 | 50.711.382,66 |
| 65 | 11,28 | 237 | 11,28 | 9.274,35 | 4.062.165,49 | 54.773.548,15 |
| 70 | 10,42 | 256 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 58.612.436,79 |
| 75 | 9,01 | 274 | 9,01 | 7.921,326 | 3.469.540,64 | 62.081.977,42 |
| 80 | 7,76 | 292 | 7,76 | 7.175,826 | 3.143.011,62 | 65.224.989,05 |
| 85 | 6,73 | 310 | 6,73 | 6.563,873 | 2.874.976,57 | 72.824.184,87 |
| 90 | 5,29 | 329 | 0 | 0 | 0 | 72.824.184,87 |
| 95 | 0 | 347 | 0 | 0 | 0 | 72.824.184,87 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

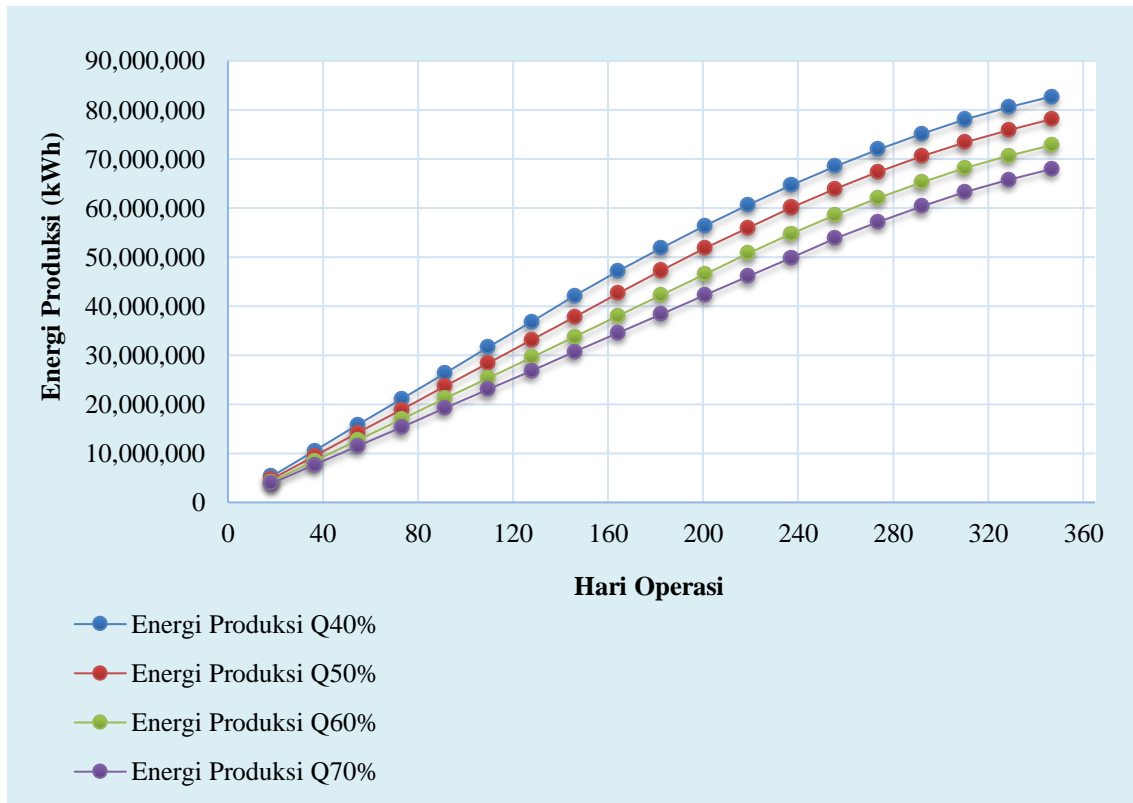
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTM dioperasikan selama 310 hari. Untuk 55 hari selebihnya merupakan kondisi dimana sistem mengalami off atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dari perhitungan energi Q60% didapatkan daya maksimum sebesar 9.648,284 kW dengan energi selama satu tahun sebesar 72.824 GWh.

Tabel 4.83 Perhitungan Energi Q70%

| Keandalan | Debit | Jumlah | Debit | Daya | Energi | Kumulatif |
|-----------|----------|--------|------------|-----------|---------------|---------------|
| Debit | Andalan | Hari | Pembangkit | | | Energi |
| % | m3/detik | | m3/detik | kW | kWh | kWh |
| 5 | 30,55 | 18 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 3.838.888,64 |
| 10 | 25,51 | 37 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 7.677.777,28 |
| 15 | 23,19 | 55 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 11.516.665,92 |
| 20 | 20,58 | 73 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 15.355.554,55 |
| 25 | 19,79 | 91 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 19.194.443,19 |
| 30 | 18,54 | 110 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 23.033.331,83 |
| 35 | 17,67 | 128 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 26.872.220,47 |
| 40 | 15,88 | 146 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 30.711.109,11 |
| 45 | 14,98 | 164 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 34.549.997,75 |
| 50 | 13,82 | 183 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 38.388.886,38 |
| 55 | 12,99 | 201 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 42.227.775,02 |
| 60 | 11,90 | 219 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 46.066.663,66 |
| 65 | 11,28 | 237 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 49.905.552,30 |
| 70 | 10,42 | 256 | 10,42 | 8.764,586 | 3.838.888,64 | 53.744.440,94 |
| 75 | 9,01 | 274 | 9,01 | 7.921,326 | 3.469.540,64 | 57.213.981,58 |
| 80 | 7,76 | 292 | 7,76 | 7.175,826 | 3.143.011,62 | 60.356.993,20 |
| 85 | 6,73 | 310 | 6,73 | 6.563,873 | 2.874.976,57 | 66.317.835,77 |
| 90 | 5,29 | 329 | 5,29 | 4.674.532 | 1.638.353,234 | 67.956.189,02 |
| 95 | 0 | 347 | 0 | 0 | 0 | 67.956.189,02 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTM dioperasikan selama 310 hari. Untuk 55 hari selebihnya merupakan kondisi dimana sistem mengalami off atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dari perhitungan energi Q70% didapatkan daya maksimum sebesar 8.764,586 kW dengan energi selama satu tahun sebesar 67,956 GWh.



Gambar 4.22 Hubungan Energi Produksi dengan Hari Operasi
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Setelah dilakukan perhitungan energi dalam penentuan debit pembangkit, maka akan dilakukan perhitungan kapasitas faktor dari setiap keandalan debit. Perhitungan tersebut dilakukan dengan membandingkan nilai energi secara teoritis dengan nilai energi produksi tahunan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan sebagai berikut (Keandalan Debit 40%):

$$\begin{aligned}
 \text{Capacity Factor (CF)} &= \frac{\text{Energi Produksi Tahunan}}{\text{Daya} \times 24 \times 365} \times 100 \\
 &= \frac{82.733.519,80}{12.022,13 \times 24 \times 365} \times 100 \\
 &= 78,56 \%
 \end{aligned}$$

Tabel 4.84 Perhitungan Daya, Energi dan Faktor Kapasitas

| No | Keandalan Debit | Debit Rencana | Daya | Energi Produksi Tahunan | Qrencana Qrerata | Capacity Factor |
|----|-----------------|-----------------------|-----------|-------------------------|------------------|-----------------|
| | % | m ³ /detik | kW | kWh/tahun | | % |
| 1 | 40 | 15,88 | 12.022,13 | 82.733.519,80 | 1,02 | 78,56 |
| 2 | 50 | 13,82 | 10.299,38 | 78.130.433,33 | 0,87 | 86,60 |
| 3 | 60 | 11,90 | 9.648,28 | 72.824.184,87 | 0,78 | 86,16 |
| 4 | 70 | 10,42 | 8.764,59 | 67.956.189,02 | 0,67 | 88,51 |

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari hasil perhitungan penentuan debit pembangkit berdasarkan energi produksi tahunan dapat disimpulkan bahwa energi produksi tahunan terbesar adalah keandalan debit 40% dengan debit 15,88 m³/detik. Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 10 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk penyediaan listrik minimal nilai *Capacity Factor* sebesar 65%. Maka penentuan berdasarkan energi produksi tahunan dapat ditentukan yang paling efektif adalah debit pembangkit 40% dengan debit 15,88 m³/detik.

4.4.2. Penentuan Berdasarkan Biaya

Penentuan berdasarkan biaya akan disimulasikan biaya pembangunan yang diperlukan setiap debit andalan 40%, 50%, 60%, dan 70%. Untuk menentukan parameter dalam perhitungan penentuan berdasarkan biaya dengan cara estimasi. Parameter penentuan dimensi penstock dilakukan estimasi berdasarkan debit pembangkit (Rumus 2.76). Estimasi yang dilakukan dapat dilihat pada parameter perhitungannya sesuai Tabel 4.85 sebagai berikut:

Tabel 4.85 Parameter Perhitungan setiap Debit Andalan

| Parameter | Satuan | Q40% | Q50% | Q60% | Q70% |
|--------------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Debit Pembangkit | m ³ /detik | 15,88 | 13,82 | 11,90 | 11,42 |
| Daya | kW | 12.022,13 | 10.299,38 | 9.648,28 | 8.764,59 |
| Jumlah Turbin | - | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Tinggi Jatuh | meter | 76 | 76 | 76 | 76 |
| Diameter Penstock | meter | 2,6 | 2,5 | 2,3 | 2,2 |
| Panjang Penstock | meter | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Ketebalan Penstock | milimeter | 12 | 12 | 12 | 12 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Setelah diketahui hasil parameter, maka selanjutnya dapat dilakukan perhitungan biaya berdasarkan debit pembangkit dan parameter diatas. Estimasi biaya yang dilakukan berdasarkan koefisien proyek PLTM lalu dibandingkan sesuai dengan parameter diatas. Untuk hasil perhitungannya estimasi biaya dapat dilihat pada Tabel 4.86:

Tabel 4.86 Estimasi Biaya Pembangunan Berdasarkan Debit Pembangkit dan Parameter

| Keterangan | Biaya (Milyar Rupiah) | | | |
|------------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| | Q40% | Q50% | Q60% | Q70% |
| Teknis | 2,28 | 2,17 | 2,06 | 1,97 |
| Elektromekanikal | 59,00 | 53,00 | 47,00 | 42,00 |
| Instalasi Peralatan Hidromekanikal | 8,71 | 8,30 | 7,89 | 7,56 |
| Pembuatan Jalan Akses | 35,60 | 35,60 | 35,60 | 35,60 |
| Kabel Transmisi | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Instalasi Subtansi dan Transformer | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| Pekerjaan Sipil | 89,20 | 84,98 | 80,79 | 77,37 |
| Penstock | 6,36 | 6,10 | 5,70 | 5,40 |
| Instalasi Penstock | 1,17 | 1,17 | 1,17 | 1,17 |
| Waterway | 1,30 | 1,20 | 1,10 | 1,00 |
| Lain - lain | 9,80 | 9,34 | 8,88 | 8,50 |
| Total | 213,93 | 202,37 | 190,71 | 181,09 |
| PPN 10% | 21,39 | 20,23 | 19,07 | 18,11 |
| Capital Cost | 235,33 | 222,61 | 209,78 | 199,20 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil perhitungan penentuan debit pembangkit berdasarkan biaya, dapat disimpulkan dengan biaya termurah adalah debit pembangkit Q70% dengan biaya Rp 199.200.000.000,00. Sedangkan biaya termahal adalah debit pembangkit Q40% dengan biaya Rp 235.330.000.000,00. Untuk menentukan debit pembangkit yang paling efisien maka dilakukan perhitungan berdasarkan biaya dengan hasil keuntungan atau BCR terbesar.

4.4.3. Penentuan Berdasarkan *BCR*

Penentuan debit pembangkit berdasarkan *Benefit Cost Ratio (BCR)* maka ditentukan terlebih dahulu harga listrik dengan asumsi Rp 200/kWh dan pengambilan keuntungannya selama 20 tahun. Berikut hasil perhitungan penentuan debit pembangkit berdasarkan *BCR* yang dapat dilihat pada Tabel 4.87.

Tabel 4.87 *BCR* Setiap Debit Pembangkit

| Keterangan | Q40% | Q50% | Q60% | Q70% |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Produksi Energi/Tahun (kWh) | 82.733.519,80 | 78.130.433,33 | 72.824.184,87 | 67.956.189,02 |
| Keuntungan 1 Tahun | Rp 16.546.703.959,30 | Rp 15.626.086.666,74 | Rp 14.564.836.973,21 | Rp 13.591.237.803,73 |
| Keuntungan 20 Tahun | Rp 330.934.079.186,07 | Rp 312.521.733.334,79 | Rp 291.296.739.464,19 | Rp 271.824.756.074,55 |
| Total Biaya | Rp 235.325.665.401,69 | Rp 222.606.207.811,39 | Rp 209.777.875.755,17 | Rp 199.201.988.853,04 |
| BCR | 1,41 | 1,40 | 1,39 | 1,36 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil perhitungan penentuan debit pembangkit berdasarkan nilai *BCR* maka dicari nilai *BCR* tertinggi. Maka didapatkan nilai *BCR* tertinggi yaitu 1,41 dan energi

produksi tahunan tertinggi dengan faktor kapasitas terendah dengan debit pembangkit **Q40% dengan debit 15,88 m³/detik**. Selanjutnya hasil penentuan debit pembangkit tersebut akan digunakan untuk perhitungan dimensi bangunan PLTM Sion.

4.5. Perencanaan Komponen PLTM

Sesuai dengan dasaran teori dapat ditentukan bahwa PLTM Sion termasuk pada sisten *Run of River*. Dengan banyaknya komponen sesuai dengan skema PLTM Sion pada Dalam perhitungan perencanaan komponen PLTM Sion akan menentukan dimensi berdasarkan debit banjir dan debit pembangkit yang telah diperhitungkan pada bagian sub bab sebelumnya. Untuk perencanaan bendung akan menggunakan debit banjir rencana, sedangkan untuk perencanaan lainnya menggunakan debit pembangkit.

4.5.1. Bendung

Dalam perencanaan bangunan bendung akan memperhitungkan mulai dari lebar efektif bendung hingga dimensi dari peredam energi yang digunakan. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

4.5.1.1. Lebar Efektif

Perencanaan lebar efektif ditentukan berdasarkan lebar sungai yang ada dikurangi dengan lebar pintu dan pilar yang direncanakan. Parameter yang digunakan adalah lebar sungai asli. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Lebar Sungai Asli (B) = 54 meter,
- b. Menentukan nilai Lebar Sungai Rencana (b) = 1,2 x 54
= 64,8 meter
- c. Menentukan nilai Tebal Pilar + Lebar Pintu = $1/6b \sim 1/10b$
= $1/8b = 1/8 \times 64,8$
= 8,10 meter
- d. Menentukan nilai Tebal Pilar Utama = 1,2 meter (*)
- e. Menentukan nilai Tebal Pilar Pembagi = 1,2 meter x 2 Pilar (*)
- f. Menentukan nilai Jumlah Pilar (n) = Pilar utam + Pilar Pembagi
= 1 + 2
= 3 pilar
- g. Menentukan nilai Lebar Pintu Pembilas = 1.5 meter x 3 Pintu (*)
- h. Menentukan nilai Lebar Mercu Bendung = b – (Tebal Pilar Utama + (2xLebar
Pilar Pembagi) + (3xLebar Pintu Pembilas)) = 64,8 – (1,2 + (2x1,2) + (3x1.5))

- = 56,70 meter
- i. Menentukan nilai K_p = berujung bulat
= 0,01 (Tabel 2.10) (*)
- j. Menentukan nilai K_a = 90° ke arah aliran
= $0,5H_1 > r > 0,15H_1$
= 0,1 (Tabel 2.10) (*)
- k. Menentukan nilai Lebar Efektif Bendung = $b - 2 \times (n \times K_p + K_a) H_1$
= $64,8 - 2 \times (3 \times 0,01 + 0,1) H_1$
= $64,8 - 0,26 \times H_1$

(*) = direncanakan

Untuk mendapatkan nilai Lebar Efektif Bendung, terlebih dahulu dilakukan perhitungan H_1 dan H_d . Perhitungan tersebut dilakukan dengan perhitungan coba-coba setelah itu di sesuaikan dengan C_d berdasarkan C_o , C_1 , dan C_2 . Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

4.5.1.2. H_1 dan H_d

Perhitungan H_1 merupakan perhitungan untuk mengetahui tinggi energi di bendung sedangkan perhitungan H_d merupakan perhitungan untuk mengetahui tinggi muka air di atas mercu bendung. Dalam perhitungan ini akan berguna untuk mengetahui elevasi muka air banjir (MAB) jika terjadi debit banjir. Parameter yang digunakan adalah debit banjir rancangan (Q). Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai C_d = 1,2 (asumsi)
- b. Menentukan nilai H_1 = $Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g b H_1^{1,5}}$
= $607,09 = 1,2 \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} 9,81(64,8 - 0,26 \times H_1) H_1^{1,5}}$
= $607,09 = (169,52 - 1,30 \times H_1) H_1^{1,5}$
= 3 meter
- c. Menentukan nilai Lebar Efektif Bendung (Be) = $56,70 - 0,2 \times 3$
= 56,09 meter
- d. Menentukan nilai Luas Penampang (A) = $Be \times (P + H_1)$
= $56,09 \times (4 + 3)$
= $393,61 \text{ m}^2$

- e. Menentukan nilai Kecepatan (V) = Q/A
 $= 607,09 / 393,61$
 $= 1,54$ meter/detik
- f. Menentukan nilai Tinggi Muka Air (H_d) = $H_1 - \frac{V_1^2}{2g}$
 $= 3 - \frac{1,57}{2 \times 9,81}$
 $= 2,88$ meter

4.5.1.3. Profil Muka Air

Perhitungan profil muka air perlu diperhitungkan untuk mengetahui estimasi ketinggian, kecepatan, dan bilangan *froude* diatas bendung. Perhitungan muka air ini aka menghasilkan data yang akan digunakan dalam perencanaan peredam energi. Parameter yang diunakan dalam perhitungan adalah debit banjir rancangan = 682,31 m³/detik; lebar efektif bendung = 56 meter; tinggi energi = 3 meter; $Z = 0,5$ meter. Untuk perhitungan lebih jelasnnya sebagai berikut:

a. Menentukan nilai Tinggi Muka Air (Yz) = $2g(z + He - Yz)^{0,5} = \frac{Q}{Be \times Yz}$
 $= 2,9,81(0,5 + 3 - Yz)^{0,5} = \frac{682,31}{56 \times Yz}$

Dengan cara coba-coba didapatkan $Yz = 2,88$

b. Menentukan nilai Kecepatan Aliran (Vz) = $\frac{Q}{Be \cdot Yz}$
 $= \frac{682,31}{56 \cdot 2,88}$
 $= 3,866$ m/detik

c. Menentukan nilai El.Hilir Lereng Bendung = El. Mercu – El.Z
 $= +773 - 0,5$
 $= +772,5$

d. Menentukan nilai Elevasi Muka Air = El. Hilir + Yz
 $= +772,5 + 2,88$
 $= +775,38$

e. Menentukan nilai Bilangan *Froude* = $\frac{Vz}{\sqrt{g \cdot Yz}}$
 $= \frac{3,866}{\sqrt{9,81 \cdot 2,88}}$
 $= 1,728$

Tabel 4.88 Profil Muka Air pada Bendung

| z | Yz | Vz | El. Lereng Bendung | El. Muka Air | Froude |
|----------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------|---------------|
| meter | meter | m/detik | | | |
| 0,50 | 2,88 | 3,866 | 772,50 | 775,38 | 0,728 |
| 1,00 | 1,52 | 7,303 | 772,00 | 773,52 | 1,889 |
| 1,50 | 1,36 | 8,192 | 771,50 | 772,86 | 2,244 |
| 2,00 | 1,25 | 8,933 | 771,00 | 772,25 | 2,555 |
| 2,50 | 1,16 | 9,586 | 770,50 | 771,66 | 2,841 |
| 3,00 | 1,09 | 10,181 | 770,00 | 771,09 | 3,109 |
| 3,50 | 1,04 | 10,731 | 769,50 | 770,54 | 3,365 |
| 4,00 | 0,99 | 11,247 | 769,00 | 769,99 | 3,610 |
| 4,50 | 0,95 | 11,734 | 768,50 | 769,45 | 3,848 |
| 5,00 | 0,91 | 12,198 | 768,00 | 768,91 | 4,078 |
| 5,50 | 0,88 | 12,641 | 767,50 | 768,38 | 4,302 |
| 6,00 | 0,85 | 13,067 | 767,00 | 767,85 | 4,521 |
| 6,50 | 0,83 | 13,477 | 766,50 | 767,33 | 4,736 |
| 7,00 | 0,80 | 13,874 | 766,00 | 766,80 | 4,946 |
| 7,50 | 0,78 | 14,257 | 765,50 | 766,28 | 5,153 |
| 8,00 | 0,76 | 14,630 | 765,00 | 765,76 | 5,356 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.5.1.4. Peredam Energi

Dalam perencanaan peredam energi akan menentukan tipe peredam energi yang digunakan dan memperhitungkan dimensi peredam energi. Sesuai dengan kondisi lokasi yang terdapat batu-batu yang cukup besar dapat ditentukan tipe peredam energi yang sesuai, yaitu tipe bak tenggelam agar tidak rusak jika dilalui batu-batu. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

a. Data Perencanaan

- Elevasi Mercu Bendung = +773
- Elevasi Muka Air Banjir = +775,88
- Elevasi Dasar Sungai = +769
- Lebar Efektif Bendung = 56 meter
- Tinggi Energi (H_1) = 3 meter
- Tinggi Bendung = 4 meter

b. Menentukan nilai q

$$\begin{aligned}
 &= \frac{Q}{Be} \\
 &= \frac{682,31}{56} \\
 &= 12,18 \text{ m}^2/\text{detik}
 \end{aligned}$$

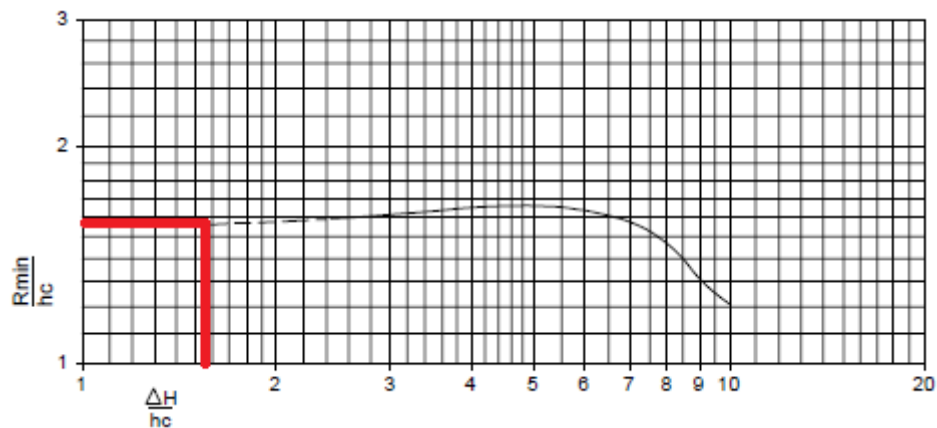
c. Menghitung nilai Kedalaman Kritis (h_c) $= 3\sqrt{\frac{q^2}{g}}$

$$= 3\sqrt{\frac{12,18^2}{9,81}}$$

$$= 2,47 \text{ meter}$$

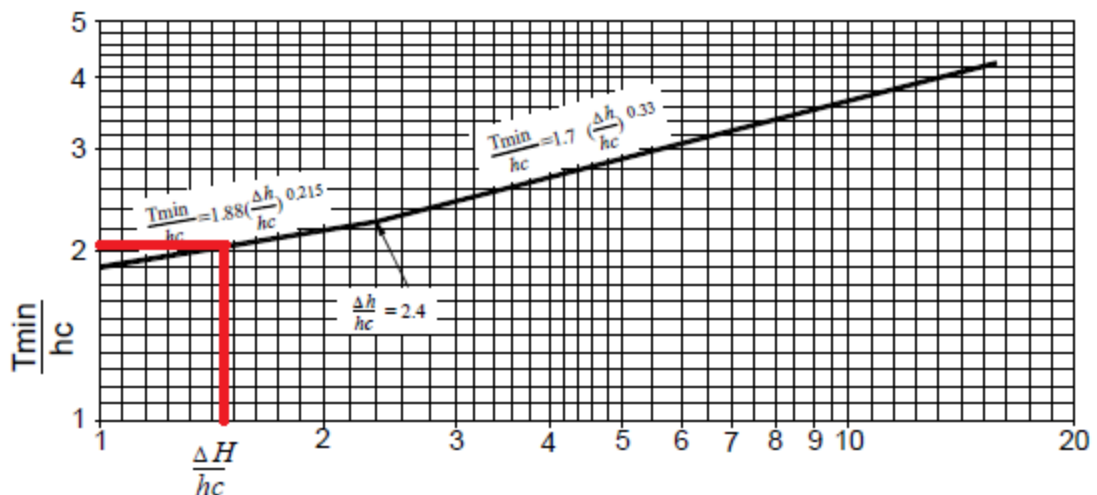
d. Menentukan nilai Jari-jari Bak Minimum (R_{min}) dan Tinggi Air Hilir (T_{min})

- Tinggi Jatuh (z) atau $\Delta H = \text{El.MA Bendung} - \text{El.MA Sungai}$
 $= +776,1 - 772,21$
 $= 3,89 \text{ meter}$



Gambar 4.23 Jari-Jari Minimum Bak (R_{min})
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- Dari Gambar 4.23 dengan $z/h_c = 3,89/2,47 = 1,57$
- Dari Gambar 4.23 dengan z/h_c didapat $R_{min}/h_c = 1,56$
- $R_{min} = 5,97 \sim 6 \text{ meter}$



Gambar 4.24 Batas Minimum Tinggi Hilir (T_{min})
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- Dari Gambar 4.24 dengan z/hc didapat $T_{min}/hc = 2,18$
 - $T_{min} = 5,38$ meter
- e. Menentukan nilai V_1
- $$= \sqrt{2 \times 9,81 \times \left(\frac{1}{2} \times H \times z\right)}$$
- $$= \sqrt{2 \times 9,81 \times \left(\frac{1}{2} \times 3 \times 3,89\right)}$$
- $$= 7,63 \text{ meter/detik}$$
- f. Menentukan nilai Y_1
- $$= \frac{q}{v_1}$$
- $$= \frac{12,18}{7,63}$$
- $$= 1,60 \text{ meter}$$
- g. Menentukan nilai Fr
- $$= \frac{v_1}{\sqrt{g \times y_1}}$$
- $$= \frac{7,63}{\sqrt{9,81 \times 1,60}}$$
- $$= 1,93 \text{ meter}$$
- h. Menentukan nilai Y_2
- $$= \frac{y_1}{2} \times (\sqrt{1 + 8 \times Fr^2} - 1)$$
- $$= \frac{1,60}{2} \times (\sqrt{1 + 8 \times 1,93^2} - 1)$$
- $$= 3,56 \text{ meter}$$
- i. Menentukan nilai Panjang Lantai (L_j)
- $$= 5 \times (1 + Y_2)$$
- $$= 5 \times (1 + 3,56)$$
- $$= 22,8 \text{ meter}$$

4.5.2. Intake

Dalam perencanaan bangunan *intake* atau bangunan pengambil akan memperhitungkan dimensi bangunan hingga operasi pintu pengambilan. Parameter yang digunakan adalah Debit Pembangkit (Q). Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Debit Desain = $120\% \times 15,88 \text{ m}^3/\text{detik}$
= $19,06 \text{ m}^3/\text{detik}$
- b. Menentukan nilai Tinggi Ambang Pengambilan = 2 meter (dari dasar sungai) (*)
- c. Menentukan nilai Koefisien Debit (μ) = 1 (*)
- d. Menentukan nilai Lebar Pengambilan (b) = 4,5 meter (*)
- e. Menentukan nilai Lebar Pintu = 1,5 meter (3 pintu) (*)

- f. Menentukan nilai kemiringan Penyaring Sampah = 60° (*)

Untuk perhitungan selanjutnya akan memperhitungkan debit yang akan dilalui berdasarkan tinggi bukaan pintu. Berikut contoh perhitungan untuk tinggi bukaan pintu (a) = 0,25 meter dengan tinggi air (h) = 0,2 meter. Jika tinggi bukaan pintu melebihi tinggi muka air maka disebut aliran bebas dan nilai a yang digunakan adalah nilai tinggi muka air. Jika tinggi bukaan pintu lebih kecil dari tinggi muka air maka disebut aliran tenggelam dan nilai a yang digunakan adalah nilai a yang sebenarnya. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{g. Menentukan nilai Debit (Q)} &= K \cdot \mu \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2gh} \\
 &= 1 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 4,5 \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,2} \\
 &= 1,43 \text{ m}^3/\text{detik}
 \end{aligned}$$

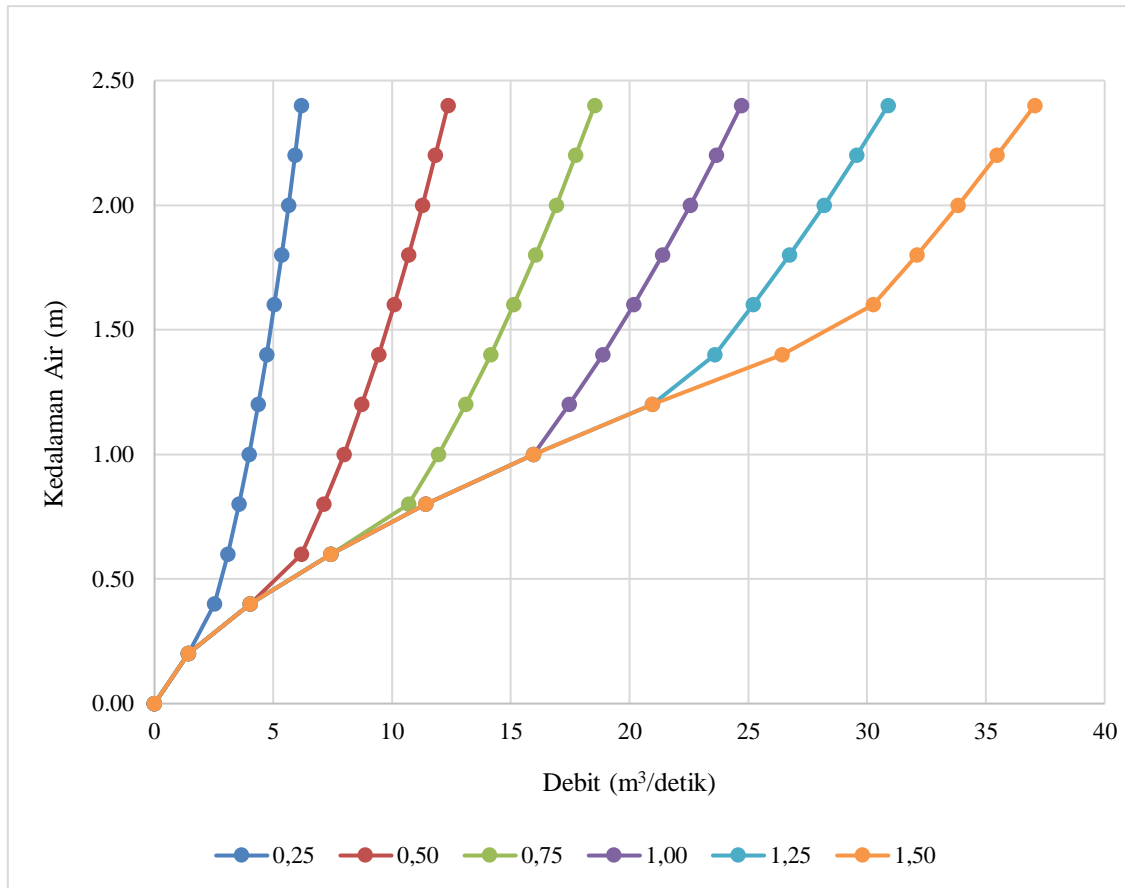
(*) = direncanakan

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.89 dan Gambar 4.25 sebagai berikut:

Tabel 4.89 Pola Operasi Pintu Pengambilan

| No | Kedalaman Air (h) (m) | Tinggi Bukaan Pintu | | | | | |
|----|--------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,0 | 1,25 | 1,50 |
| | | Debit (m ³ /detik) | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,2 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 |
| 3 | 0,4 | 2,52 | 4,03 | 4,03 | 4,03 | 4,03 | 4,03 |
| 4 | 0,6 | 3,09 | 6,18 | 7,41 | 7,41 | 7,41 | 7,41 |
| 5 | 0,8 | 3,57 | 7,13 | 10,70 | 11,41 | 11,41 | 11,41 |
| 6 | 1,0 | 3,99 | 7,97 | 11,96 | 15,95 | 15,95 | 15,95 |
| 7 | 1,2 | 4,37 | 8,73 | 13,10 | 17,47 | 20,96 | 20,96 |
| 8 | 1,4 | 4,72 | 9,43 | 14,15 | 18,87 | 23,58 | 26,41 |
| 9 | 1,6 | 5,04 | 10,09 | 15,13 | 20,17 | 25,21 | 30,26 |
| 10 | 1,8 | 5,35 | 10,70 | 16,05 | 21,39 | 26,74 | 32,09 |
| 11 | 2,0 | 5,64 | 11,28 | 16,91 | 22,55 | 28,19 | 33,83 |
| 12 | 2,2 | 5,91 | 11,83 | 17,74 | 23,65 | 29,56 | 35,48 |
| 13 | 2,4 | 6,18 | 12,35 | 18,53 | 24,70 | 30,88 | 37,06 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.25 *Rating Curve* Bukaan Pintu Pengambilan
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.5.3. Saluran Pengarah

Dalam perencanaan saluran pengarah akan memperhitungkan bentuk dan dimensi saluran. Parameter yang digunakan dalam perhitungan ini adalah debit pembangkit dan tinggi muka air pada saluran pengarah. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- Menentukan nilai Debit Rencana = $120\% \times 15,88 \text{ m}^3/\text{detik}$
= $19,06 \text{ m}^3/\text{detik}$
- Menentukan nilai Lebar Saluran (b) = Lebar Pilar + *Intake*
= $1,2 \text{ meter} + 4,5 \text{ meter}$
= $5,7 \text{ meter}$
- Menentukan nilai Koefisien Kekasaran (K) = Pasangan Beton
= 70
- Menentukan nilai Kemiringan Saluran (S) = $0,0015$ (*)
- Menentukan Bentuk Penampang = Segi Empat (*)
- Menentukan nilai Tinggi Muka Air = $Q = K \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$

$$= 19,06 = 70 \cdot (b \cdot h) \cdot \left(\frac{b \cdot h}{b+2h}\right)^{\frac{2}{3}} 0,0015^{\frac{1}{2}}$$

$$= h = 1,04 \text{ meter}$$

- g. Menentukan nilai Tinggi Jagaan
- $$= \frac{3}{4} \times \text{tinggi muka air}$$
- $$= \frac{3}{4} \times 1,04$$
- $$= 0,35 \text{ meter}$$

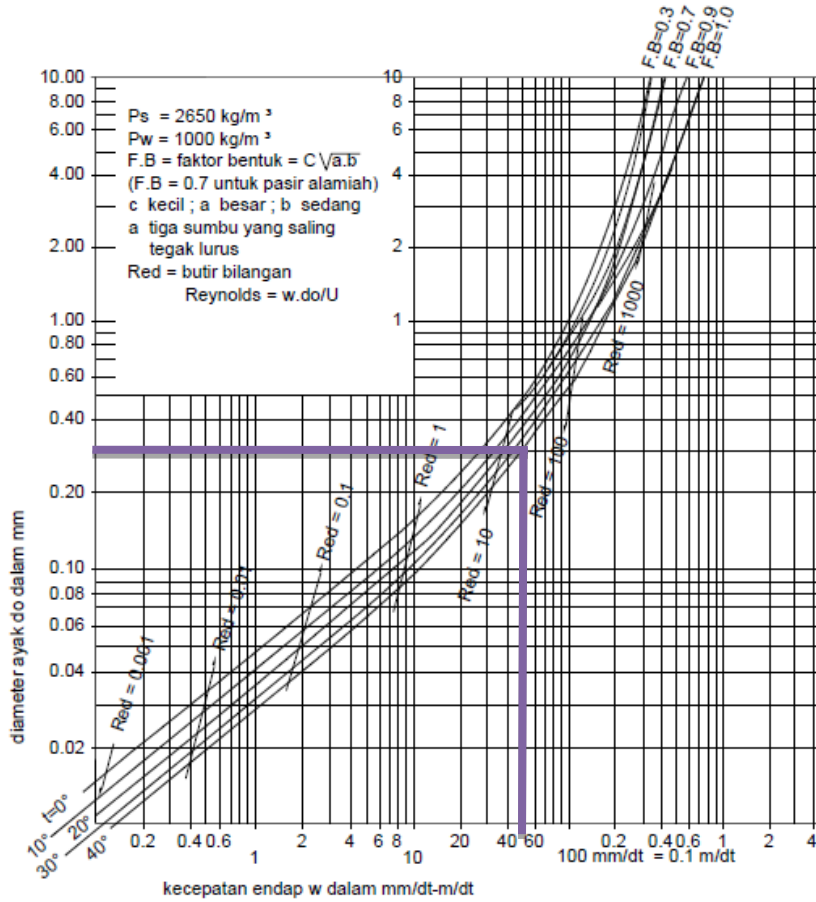
(*) = direncanakan

Dari perhitungan saluran pengarah direncanakan saluran berbentuk segi empat dengan kemiringan dasar saluran 0,0015 dan tinggi muka air banjir 0,6 meter. berdasarkan tinggi muka air didapatkan tinggi jagaan saluran sebesar 0,2 meter.

4.5.4. Bak Pengendap

Dalam perhitungan bangunan bak pengendap akan memperhitungkan volume yang diperlukan untuk menampung sedimen, dimensi bangunan, tinggi muka air pada bangunan, kemiringan dasar bangunan, dan jenis aliran pada bangunan. Parameter yang digunakan dalam perhitungan bangunan bak pengendap adalah debit pembangkit, periode pengurasan, dan suhu. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Debit Rencana (Q_n)
- $$= 120\% \times 15,88 \text{ m}^3/\text{detik}$$
- $$= 19,06 \text{ m}^3/\text{detik}$$
- b. Menentukan nilai Periode Pengurasan
- $$= 7 \text{ hari}$$
- c. Menentukan nilai Suhu
- $$= 20^\circ \text{C}$$
- d. Menentukan nilai Partikel Sedimen
- $$= 0,3 \text{ mm (*)}$$
- e. Menentukan nilai Kandungan Sedimen
- $$= 0,1 \text{ ‰}$$
- f. Menentukan nilai Kecepatan (V_n)
- $$= 0,70 \text{ (*)}$$
- g. Menentukan nilai Volume
- $$= \text{‰ sedimen} \cdot \text{Jumlah Hari} \cdot Q_n \cdot 24 \cdot 3600$$
- $$= 0,1 \text{ ‰} \times 7 \times 19,06 \times 24 \times 3600$$
- $$= 1219,05 \text{ m}^3$$
- h. Menentukan nilai Kecepatan Endap berdasarkan ukuran sedimen dan suhu sesuai dengan Gambar 4.26 sebagai berikut:



Gambar 4.26 Penentuan Kecepatan Endap Sedimen
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil Gambar 4.26 didapatkan kecepatan endap sedimen dengan diameter sedimen 0,3 mm dan suhu 20° C, maka didapatkan nilai $w = 0,45 \text{ mm/detik} \sim 0,045 \text{ m/detik}$.

- i. Menentukan nilai Luas Endapan (L.B)

$$= \frac{Qn}{w}$$

$$= \frac{19,06}{0,045}$$

$$= 604,69 \text{ m}^3$$
- j. Menentukan nilai Lebar Medan Endap (B)

$$= L/B > 8$$

$$= L > 8B$$

$$= L = 8B$$

$$= 8B \times B = 604,69$$

$$= 8B^2 = 604,69$$

$$= B < 8,69 \text{ meter} \sim 8,6 \text{ meter}$$
- k. Menentukan nilai Panjang Medan Endapan (L)

$$= L > 8B$$

$$= L > 8 (7,94)$$

$$= L > 69,55 \text{ meter}$$

- l. Menentukan nilai Luas Penampang (A_n) $= \frac{Q_n}{V_n}$
 $= \frac{19,06}{0,70}$
 $= 28,79 \text{ m}^2$
- m. Menentukan bentuk penampang $=$ Trapesium
- n. Menentukan nilai kemiringan penampang (m) $=$ 1:2
- o. Menentukan nilai Tinggi Muka Air (h_n) $= 28,79 = (B + m \times h_n) \times h_n$
 $= 28,79 = (8,6 + 2 \times h_n) \times h_n$
 $= 28,79 = 8,6h_n + 2h_n^2$
 $= h_n = 2,530 \text{ meter} \sim 2,6 \text{ meter}$
- p. Menentukan nilai Keliling Basah (P_n) $= B + 2h_n \times \sqrt{1 + m^2}$
 $= 8,6 + 2 \times 2,8 \times \sqrt{1 + 2^2}$
 $= 19,91 \text{ m}$
- q. Menentukan nilai Jari-jari Hidrolis (R) $= \frac{A_n}{P_n}$
 $= \frac{28,79}{19,91}$
 $= 1,735 \text{ meter}$
- r. Menentukan nilai K berdasarkan debit pembangkit $= 45$ (untuk debit $> 10 \text{ m}^3/\text{detik}$)
- s. Menentukan nilai Kemiringan Normal (S_n) $= \frac{(V_n^2)}{\left(\frac{2}{R^3 \times K}\right)^2}$
 $= \frac{(0,70^2)}{\left(1,579^{\frac{2}{3}} \times 45\right)^2}$
 $= 0,0002402$

(*) = direncanakan

Setelah didapatkan dimensi normal pada bangunan pengendap, maka selanjutnya akan memperhitungkan dimensi pembilasan. Untuk memperhitungkan dimensi pembilasan akan menggunakan kecepatan aliran pembilasan (V_s) = 1 m/detik (pasir kasar). Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Z Peralihan $= (B - b \text{ saluran pengarah}) / 2$

$$= (8,6 - 5,7) / 2$$

$$= 1,45 \text{ meter}$$

- b. Menentukan nilai Panjang Peralihan (L_p)
- $$= L_p < 10z \text{ (maksimum)}$$
- $$= L_p < 10 \cdot 1,45$$
- $$= L_p < 14,5$$
- $$= L_p > 8z \text{ (minimum)}$$
- $$= L_p > 8 \cdot 1,45$$
- $$= L_p > 11,6$$

Dari hasil perhitungan nilai Panjang Peralihan (L_p) maka dapat direncanakan nilai $L_p = 10$ meter.

- c. Menentukan nilai Luas Penampang (A_s)
- $$= \frac{Qn}{V_s}$$
- $$= \frac{19,06}{1}$$
- $$= 24,19 \text{ m}^2$$

- d. Menentukan nilai Kedalaman dibutuhkan (h_s)
- $$= \frac{A_s}{B}$$
- $$= \frac{24,19}{8}$$
- $$= 2,81 \text{ meter}$$

- e. Menentukan nilai Keliling Basah (P_s)
- $$= B + 2h_s$$
- $$= 8,6 + 2 \times 2,81$$
- $$= 14,22 \text{ meter}$$

- f. Menentukan nilai Jari-jari Hidrolis (R_s)
- $$= \frac{A_s}{P_s}$$
- $$= \frac{24,19}{14,22}$$
- $$= 1,70 \text{ meter}$$

- g. Menentukan nilai Kemiringan Pembilasan (S_s)
- $$= \frac{(V_s^2)}{\left(R_s^{\frac{2}{3}} \times K\right)^2}$$
- $$= \frac{(1^2)}{\left(1,70^{\frac{2}{3}} \times 45\right)^2}$$
- $$= 0,0015317$$

- h. Menentukan nilai Bilangan Froude
- $$= \frac{V_s}{\sqrt{g \cdot h_s}}$$
- $$= \frac{1}{\sqrt{9,81 \times 2,81}}$$
- $$= 0,19 \text{ (Sub Kritis)}$$

i. Menentukan nilai Panjang Bak Pengendap (L) : $Vol = (hs \times B \times L) + \frac{1}{2}(S_s - S_n)L^2$
 $= 1219,05 = (2,52 \times 8 \times L) + \frac{1}{2}(0,0015317 - 0,0005643)L^2$
 $= L = 60,29 \text{ meter} \sim 60,30 \text{ meter}$

(*) = direncanakan

Setelah didapat dimensi nilai panjang bak pengendap, maka akan direncanakan pelimpah. Parameter yang digunakan dalam perhitungan pelimpah pada bak pengendap adalah Tinggi Muka Air pada Bak Pengendap (h_n) = 2,6 meter dan $C = 1,8$. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

a. Menentukan nilai Lebar Pelimpah (B) = 20 meter (*)

b. Menentukan nilai Tinggi Muka Air (h_c) = $\left(\frac{Q^n}{C \times B_{pelimpah}}\right)^{1/1,5}$
 $= \left(\frac{19,06}{1,8 \times 20}\right)^{1/1,5}$
 $= 0,76 \text{ meter}$

c. Menentukan nilai Tinggi Jagaan (w) = $\frac{1}{3} \times h_n$
 $= \frac{1}{3} \times 2,6$
 $= 0,86 \text{ meter}$

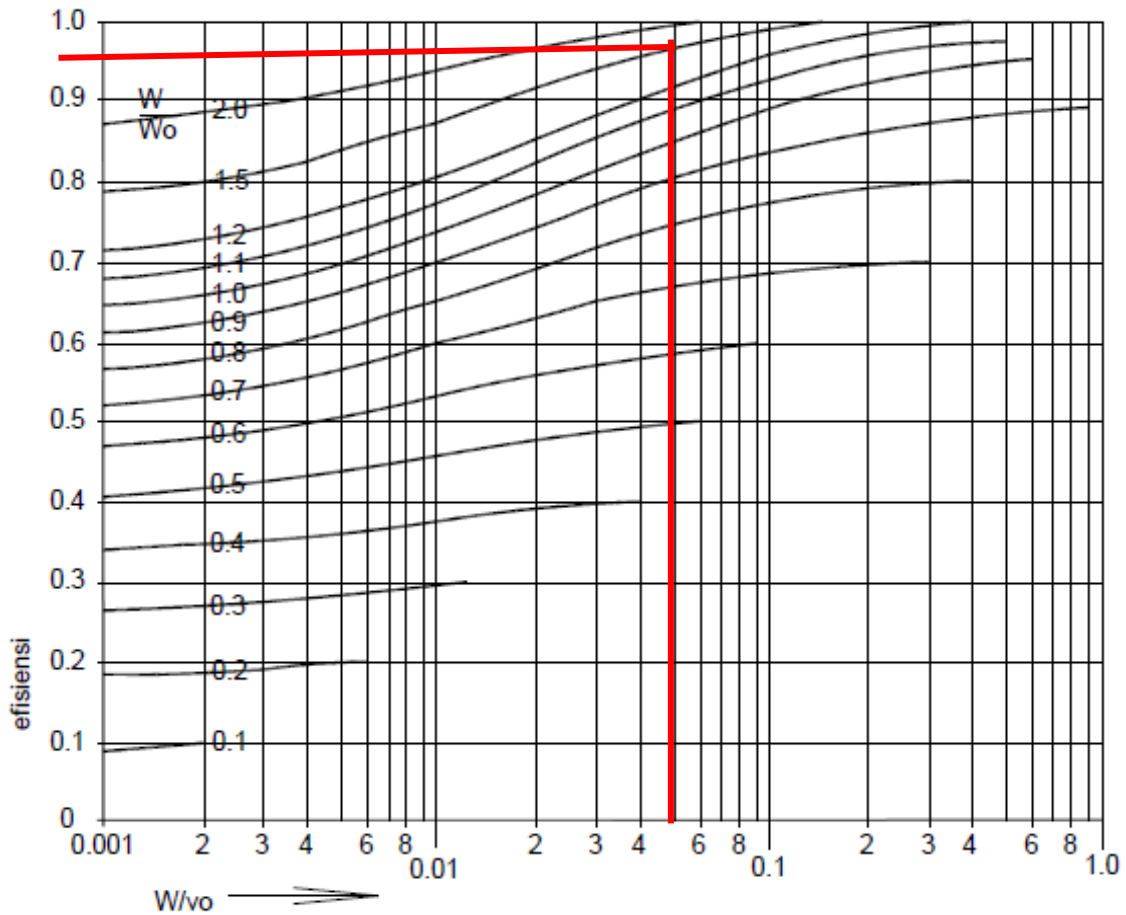
Maka dapat diketahui bahwa $h_c < w$ dan dapat dinyatakan bahwa pelimpah telah sesuai dengan perencanaan atau tinggi muka air banjir tidak melebihi tanggul.

Setelah didapat dimensi Bak Pengendap, maka hasil perhitungan dapat di uji efisiensinya melalui grafik *Camp*. Untuk parameter yang diperlukan adalah sebagai berikut:

a. Menentukan nilai W_o = $\frac{w \cdot h_n}{L}$
 $= \frac{0,04 \times 2,3}{60,3}$
 $= 0,027$

b. Menentukan nilai W/W_o = $\frac{0,04}{0,027}$
 $= 1,502$

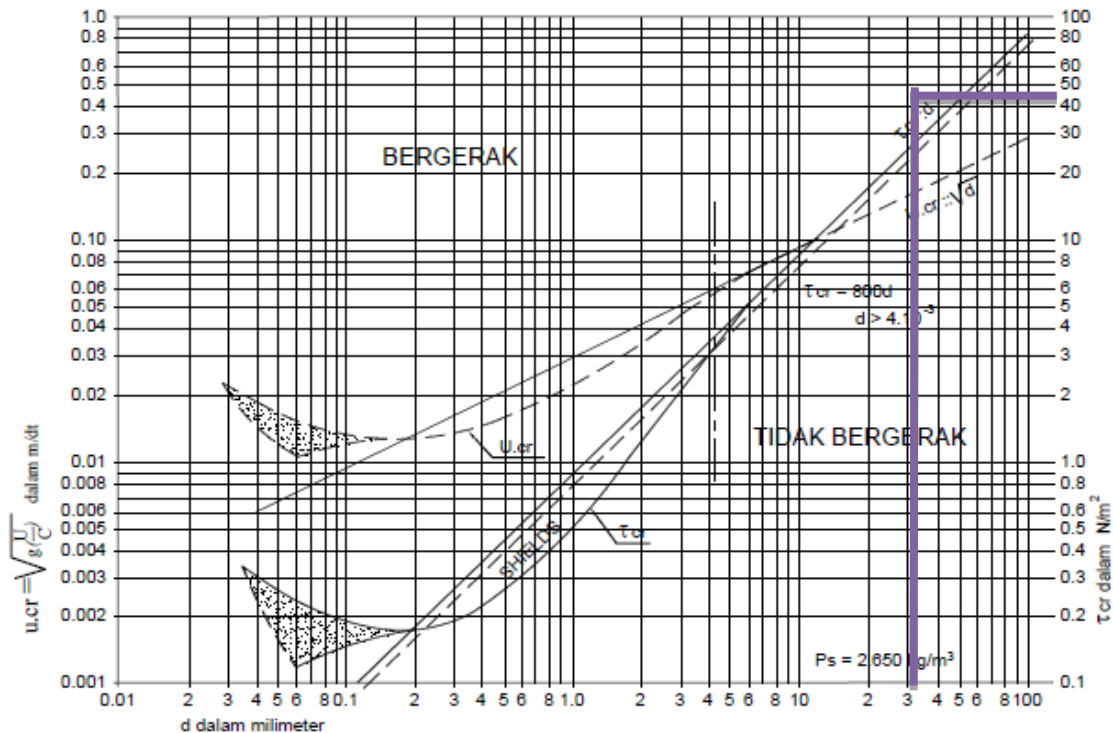
c. Menentukan nilai W/V_o = $\frac{0,04}{0,7}$
 $= 0,06$



Gambar 4.27 Pengecekan Efisiensi Bak Pengendap
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil Gambar 4.27 didapatkan nilai efisiensi perhitungan bangunan Bak Pengendap sebesar 96%. Setelah diketahui efisiensi bangunan bak pengendap, maka selanjutnya mengecek apakah sedimen yang direncanakan dapat bergerak atau tidak bergerak berdasarkan grafik *Shield*. Untuk parameter yang diperlukan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\tau &= \rho \cdot g \cdot h_s \cdot S_s \\ &= 1000 \times 9,81 \times 2,52 \times 0,0015317 \\ &= 42,26 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$



Gambar 4.28 Pengecekan Gerak Sedimen
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil Gambar 4.28 didapatkan hasil bahwa sedimen dengan ukuran dibawah 0,3 mm yang berarti BERGERAK atau dapat terbilas.

4.5.5. Saluran Pembawa

Dalam perhitungan bangunan saluran pembawa akan memperhitungkan dimensi bangunan sesuai dengan debit yang dialirkan. Parameter yang digunakan dalam perhitungan bangunan saluran pembawa adalah debit pembangkit. Saluran pembawa akan direncanakan sesuai topografi sepanjang 2346 meter. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- Menentukan nilai Debit Rencana = 120% x 15,88 m³/detik
= 19,06 m³/detik
- Menentukan nilai Tinggi Muka Air (h) = 1 meter (*)
- Menentukan nilai Kemiringan Saluran (S) = 0,1 %
- Menentukan nilai Sudut Kemiringan (S') = $\tan^{-1}(S) = \tan^{-1}(0,001) = 0,05729$
- Menentukan nilai Strickler (K) = 70 (pasangan beton)
- Menentukan nilai Lebar Saluran (b) = 5 meter (*)
- Menentukan nilai Kemiringan Talud (m) = 1 : 2 (*)
- Menentukan nilai Luas Penampang (A) = (b+m.h)h
= (5+0,5 x 1) 1

- $= 5,50 \text{ m}^2$
- i. Menentukan nilai Keliling Basah (P) $= b+2h((1+m^2)^{0,5})$
 $= 5 + 2.1.(1+0,5^2)^{0,5}$
 $= 7,2390 \text{ meter}$
- j. Menentukan nilai Jari-jari Hidrolis (R) $= A/P$
 $= 5,50/7,24$
 $= 0,760$
- k. Menentukan nilai Debit (Q) $= K.A.R^{2/3}.S^{1/2}$
 $= 70 . 5,50^{2/3}.0,001^{1/2}$
 $= 10,14 \text{ m}^3/\text{detik}$

(*) = direncanakan

Dari hasil perhitungan bangunan saluran pembawa dengan tinggi muka air 1 meter ternyata tidak memenuhi debit yang direncanakan. Untuk perhitungan menentukan tinggi muka air agar debit yang dialirkan sesuai dengan perencanaan dapat dilihat pada Tabel 4.90 sebagai berikut:

Tabel 4.90 Perhitungan Saluran Pembawa

| b meter | h meter | b/h | A m ² | P meter | R meter | S | K m ^{1/3} /dt | V m/detik | Q m ³ /detik | Fr | Ket |
|------------|------------|------|---------------------|------------|------------|--------|---------------------------|--------------|----------------------------|------|------------|
| 5,00 | 1,00 | 5,00 | 5,50 | 7,236 | 0,760 | 0,0010 | 70 | 1,84 | 10,14 | 0,59 | Sub Kritis |
| 5,00 | 1,10 | 4,55 | 6,1 | 7,460 | 0,818 | 0,0010 | 70 | 1,94 | 11,82 | 0,59 | Sub Kritis |
| 5,00 | 1,15 | 4,35 | 6,4 | 7,571 | 0,847 | 0,0010 | 70 | 1,98 | 12,70 | 0,59 | Sub Kritis |
| 5,00 | 1,20 | 4,17 | 6,7 | 7,683 | 0,875 | 0,0010 | 70 | 2,02 | 13,60 | 0,59 | Sub Kritis |
| 5,00 | 1,25 | 4,00 | 7,0 | 7,795 | 0,902 | 0,0010 | 70 | 2,07 | 14,53 | 0,59 | Sub Kritis |
| 5,00 | 1,32 | 3,79 | 7,5 | 7,952 | 0,940 | 0,0010 | 70 | 2,12 | 15,88 | 0,59 | Sub Kritis |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.90 didapatkan tinggi muka air (h) = 1,32 meter yang dapat melalui debit rencana. Maka dapat ditentukan tinggi jagaan sebesar $1/3 \times 1,32 = 0,5$ meter.

4.5.6. Pipa Pesat

Dalam perhitungan pipa pesat akan memperhitungkan mengenai diameter pipa dari berbagai rumus dan nantinya akan di rata-ratakan untuk menentuka diameter yang digunakan, memperhitungkan ketebalan pipa pesat dan jarak tumpuan pipa pesat. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

4.5.6.1. Diameter Pipa Pesat

Untuk menentukan nilai diameter pipa pesat akan memperhitungkan menggunakan beberapa persamaan. Parameter yang digunakan dalam perhitungan diameter pipa pesat adalah debit pembangkit (Q), panjang pipa peasa = 490 meter, dan tinggi jatuh kotor (H) = 76 meter. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

| | | |
|----|---------------------------|--|
| a. | Persamaan Warnick, 1984 | $= 0,72 \times Q^{0,5}$ $= 0,72 \times 15,88^{0,5}$ $= 3,23 \text{ meter}$ |
| b. | Persamaan USBR, 1986 | $= \frac{1,517 \times Q^{0,5}}{H^{0,25}}$ $= \frac{1,517 \times 15,88^{0,5}}{76^{0,25}}$ $= 2,31 \text{ meter}$ |
| c. | Persamaan Fahlbusch, 1987 | $= \frac{1,12 \times Q^{0,5}}{H^{0,25}}$ $= \frac{1,12 \times 15,88^{0,5}}{76^{0,25}}$ $= 2,57 \text{ meter}$ |
| d. | Persamaan Sarkaria, 1987 | $= 3,55 \times \left(\frac{Q^{0,5}}{2gH}\right)^{1/4}$ $= 3,55 \times \left(\frac{15,88^{0,5}}{2,9,81,76}\right)^{1/4}$ $= 2,56 \text{ meter}$ |
| e. | Persamaan ESHA,2004 | $= 2,69 \times \frac{n^{0,5} \cdot 15,88^2 \cdot \text{panjang}}{H}$ $= 2,69 \times \frac{0,012^{0,5} \cdot 15,88^2 \cdot 490}{76}$ $= 2,24 \text{ meter}$ |
| f. | Persamaan Canada, 2005 | $= \frac{\left(\frac{Q}{n}\right)^{0,5}}{H}$ $= \frac{\left(\frac{15,88}{0,012}\right)^{0,5}}{76}$ $= 2,24 \text{ meter}$ |

Dari hasil perhitungan diameter pipa pesat dengan berbagai persamaan dan hasil yang berbeda, maka dilakukan perhitungan rata-rata dari hasil setiap persamaan. Untuk hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.91 sebagai berikut:

Tabel 4.91 Hasil Diameter Pipa Pesat

| No | Persamaan | Diameter (meter) |
|-----------|-----------|---------------------|
| 1 | Warnick | 3,23 |
| 2 | USBR | 2,31 |
| 3 | Falhbusch | 2,57 |
| 4 | Sarkaria | 2,56 |
| 5 | ESHA | 2,24 |
| 6 | Canada | 1,98 |
| Rata-rata | | 2.48 |
| Digunakan | | 2,50 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil Tabel 4.91 didapatkan nilai diameter pipa pesat dari rata-rata setiap persamaan sebesar 2,46 meter dan dibulatkan diameter yang akan digunakan sebesar 2,5 meter.

4.5.6.2. Ketebalan Pipa Pesat

Unruk menentukan nilai ketebalan pipa pesat akan menggunakan persamaan ESHA. Parameter yang digunakan dalam perhitungan menentukan ketebalan pipa pesat adalah debit pembangkit (Q) 15,88 m³/detik, Diameter (D) = 2,5 meter, Tinggi Jatuh Kotor (H) = 76 meter, panjang pipa pesat (L) 490 meter, dan Waktu Penutupan Katup (t) = 5 detik. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Kecepatan Aliran Dalam Pipa (V) $= \frac{4.Q}{\pi.D}$
- $$= \frac{4.15,88}{\pi.2,5}$$
- $$= 10,261 \text{ meter/detik}$$
- b. Menentukan nilai N $= \left(\frac{v.L}{g.H.t} \right)^2$
- $$= \left(\frac{10,261.490}{9,81.76.5} \right)^2$$
- $$= 1,819$$
- c. Menentukan nilai Hidrostatik (Δp) $= H \left(\frac{N}{2} \right) \pm \sqrt{N + \left(\frac{N^2}{4} \right)}$
- $$= 76 \left(\frac{1,819}{2} \right) \pm \sqrt{1,819 + \left(\frac{1,819^2}{4} \right)}$$
- $$\Delta p (+) = 192,774$$
- $$\Delta p (-) = -54,510$$
- d. Menentukan nilai Tinggi Tekanan Hidrostatik (h) $= H + \Delta p (+)$
- $$= 76 + 192,774$$
- $$= 268,774$$

- e. Menentukan nilai Tekanan Hidrostatik (P_1) = $P_0 + \rho h g$
 $= 10^5 + 1000 \cdot 268,774 \cdot 9,81$
 $= 2736672,94 \text{ N/m}^2$
 $= 0,00273 \text{ kN/mm}^2$
- f. Menentukan nilai Tegangan Tarik Ijin (σf) = Pipa Baja = $0,137 \text{ kN/mm}^2$
- g. Menentukan nilai Efisiensi Pengelasan (K_f) = 1
- h. Menentukan nilai Tebal Pipa = $\frac{p_1 \cdot D}{2 \cdot \sigma_f \cdot K_f} + 1$
 $= \frac{0,00273 \cdot 2500}{2 \cdot 0,137 \cdot 1} + 1$
 $= 24,908 \text{ mm} \sim 25 \text{ mm} \sim 0,025 \text{ m}$
- i. Menentukan nilai Berat Pipa (W) = $24,7 \cdot \text{Diameter} \cdot \text{Panjang} \cdot \text{Tebal}$
 $= 24,7 \cdot 2,5 \cdot 490 \cdot 25 \cdot 25$
 $= 756.437,500 \text{ kg}$

4.5.6.3. Jarak Tumpuan Pipa Pesat

Untuk menentukan nilai jarak tumpuan pipa pesat maka terlebih dahulu memperhitungkan beban yang akan diterima oleh tumpuan pipa pesat. perhitungan ini untuk mendapatkan keamanan terhadap pipa pesat yang terdapat beban pipa itu sendiri dan juga beban air. Dalam perhitungan ini akan menganggap bahwa beban air berisi penuh. Parameter yang digunakan dalam perhitungan menentukan jarak tumpuan pipa pesat adalah Diameter (D) = 2,5 meter dan Tebal Pipa (t) = 0,025 meter. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai ρ_{baja} yaitu sebesar 7860 kg/m^3 ,
- b. Menentukan nilai berat pipa (W_{pipa}) = $\pi \cdot D \times t \text{ (tebal)} \times \rho_{baja}$
 $= 3,14 \times 2,5 \times 0,025 \times 7860$
 $= 1542,53 \text{ kg/m}$
- c. Menentukan nilai berat air (W_{air}) = $0,25 \pi \cdot d^2 \times \rho_{air}$
 $= 0,25 \times 3,14 \times 2,5^2 \times 1000$
 $= 4906,25 \text{ kg/m}$
- d. Menentukan nilai $W_{pipa} + W_{air}$ (p) = $1542,53 + 4906,25$
 $= 6448,78 \text{ kg/m}$
- e. Menentukan jarak antar tumpuan = $182,61 \times \sqrt[3]{\frac{(D+0,0147)^4 - D^4}{P}}$

$$= 182,61 \times \sqrt[3]{\frac{(2,5+0,0147)^4 - 2,5^4}{6448,78}}$$

$$= 9,57 \text{ meter}$$

Dari hasil perhitungan jarak tumpuan pipa pesat didapat nilai jarak tumpuan sebesar 9,57 mter. Untuk memudahkan pembangunan dan menambah nilai aman makan nilai yang dudapat di bulatkan dan diperkecil menjadi 9,5 meter.

4.5.7. Bak Penenang

Dalam perhitungan bangunan bak penenang akan memperhitungkan dimenasi bangunan bak penenang. Parameter yang digunakan pada perhitungan bak penenang adalah Debit Pembangkit (Q) = 15,88 m³/detik dan Diameter Pipa Peasat (D) = 2,5 meter, lebar saluran pembawa (b) = 5 meter, tinggi muka air saluran pembawa (h) = 1,72 meter, dan waktu penutupan (t). Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Debit Rencana (Qd) = 120% x 15,88 m³/detik
= 19,06 m³/detik
- b. Menentukan nilai Volume Bak Penenang = t x Q
= 90 detik x 19,06
= 2176,87 m³
- c. Menentukan Lebar Bak Penenang (B) = 3 x b
= 3 x 5 meter
= 15 meter
- d. Menentukan nilai Tinggi Kritis (hc) = $\left(\frac{\alpha \cdot Qd}{9,81 \cdot B}\right)^{\frac{1}{3}}$; $\alpha = 1,1$
= $\left(\frac{1,1 \cdot 19,06}{9,81 \cdot 15}\right)^{\frac{1}{3}}$
= 0,422 meter
- e. Menentukan nilai Tinggi Kritis (h0) = h_{saluran pembawa} = 1,32 meter
- f. Menentukan nilai h_{bak penenang} = h_{bak penenang} > D
= 5 meter > 2,5 meter (*)
- g. Menentukan nilai Kedalaman Medan Endap (d_{sc}) = h0 – hc
= 1,32 – 0,422
= 1,3 meter

$$\begin{aligned}
 \text{h. Menentukan nilai Panjang Bak Penenang (L)} &= \text{Vol.} = B \times L \times dsc \\
 &= 2176,87 = 15 \times L \times 1,3 \\
 &= L = 111,84 \text{ meter} \sim 112 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

(*) = direncanakan

Setelah perhitungan dimensi bangunan bak penenang diperhitungkan, maka selanjutnya memperhitungkan dimensi bangunan pelimpah pada bak penenang. Untuk parameter yang digunakan pada perhitungan pelimpah adalah debit pembangkit (Q), tinggi jagaan saluran pembawa (W) = 0,5, dan C = 1,8. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{i. Menentukan nilai Lebar Pelimpah} &= Qd = C \cdot B \cdot W^{1,5} \\
 &= 24,19 = 1,8 \cdot B \cdot 0,5^{1,5} \\
 &= B = 38 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

4.5.7.1. Vortisitas Pipa Pesat

Untuk menentukan vortisitas pipa pesat maka terlebih dahulu memperhitungkan kecepatan aliran. Perhitungan ini untuk menghindari dampak yang dapat mengurangi efisiensi pada pembangkit listrik. Parameter yang digunakan untuk memperhitungkan vortisitas pipa pesat adalah Debit Pembangkit (Q) = 19,06 m³/detik, Tebal *Trashrack* (t) = 12 mm, Jarak Antar Batang *Trashrack* (b) = 70 mm, Luas Penampang Basah Saluran Pembawa (A) = B x h = (3x5) x 1,72 = 25,8 m² dan Diameter Pipa Pesat (D) = 2,5 meter, Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{a. Menentukan nilai Kecepatan Aliran (v)} &= Q \times \frac{b+t}{A} \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{\sin 60} \\
 &= Q \times \frac{b+t}{A} \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{\sin 60} \\
 &= 15,88 \times \frac{70+12}{70} \times \frac{1}{25,8} \times \frac{1}{\sin 60} \\
 &= 1,06 \text{ m/detik} \\
 \text{b. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi (Ht)} &= h_{\text{bak penenang}} - D/2 \\
 &= 5 - 2,5/2 \\
 &= 3,75 \text{ meter} \\
 \text{c. Metode Gordon} & \quad \text{Ht} \geq c \sqrt{V} D \\
 & \geq 0,5434 \times 1,06 \times \sqrt{2,5} \\
 & \geq 0,91 \text{ meter (aman)}
 \end{aligned}$$

- d. Metode Knauss
- $$H_t \geq D \left(1 + 2,3 \frac{V}{\sqrt{gD}} \right)$$
- $$\geq 2,5 \times \left(1 + 2,3 \frac{1,06}{\sqrt{9,81 \times 2,5}} \right)$$
- $$\geq 3,73 \text{ meter (aman)}$$
- e. Metode Rohan
- $$H_t \geq 1,474 \times V^{0,48} \times D^{0,76}$$
- $$\geq 1,474 \times 1,06^{0,48} \times 2,5^{0,76}$$
- $$\geq 3,04 \text{ meter (aman)}$$

Dari hasil perhitungan vortisitas pipa pesat dengan tiga metode yang diperhitungkan dan hasilnya tidak melebihi nilai H_t yang ditentukan, maka dapat dinyatakan tidak terjadi vortisitas.

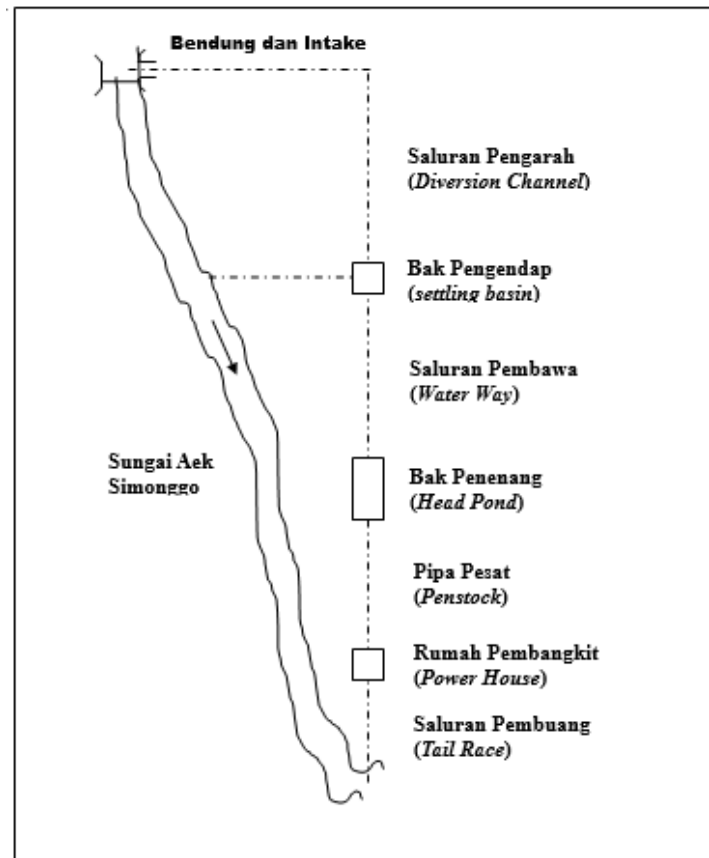
4.5.8. Saluran Pembuang

Dalam perhitungan saluran pembuang atau *Tail Race* akan memperhitungkan dan merencanakan dimensi hingga hidrolika dari saluran pembuang pembangkit listrik. Parameter yang digunakan pada perhitungan saluran pembawa adalah Debit Pembangkit (Q) = 15,88 m³/detik dan untuk perhitungan dimensi saluran pembuang disamakan dengan saluran pembawa. Dengan cara coba-coba didapat tinggi muka air (h) 1,5 meter. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan bentuk Saluran = Trapesium
- b. Menentukan nilai Lebar Saluran (b) = 5 meter
- c. Menentukan nilai Kemiringan Talud = 1:2
- d. Menentukan nilai Tinggi Tanggul = $1/3 \times h$
= $1/3 \times 1,5$
= 0,5 meter

4.6. Kehilangan Tinggi

Dalam perhitungan kehilangan tinggi akan memperhitungkan kehilangan tinggi pada setiap bangunan yang sekiranya dapat membuat kehilangan tinggi. Untuk perhitungan kehilangan tinggi dapat disesuaikan dengan skema pada Gambar 4.29 sebagai berikut:



Gambar: 4.29 Skema PLTM Sion
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.6.1. Pada Saluran Pengambilan

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Saluran Pengambilan adalah sebagai berikut:

| | |
|------------------------------|-------------------------------|
| Debit Rencana | = 19,06 m ³ /detik |
| Lebar Saluran | = 5,7 meter |
| Ketinggian Max. Bukaan Pintu | = 2 meter |
| Nilai f | = 0,1 |

- Menentukan nilai Kecepatan Aliran = Q/A
 $= 19,06 / (5,7 \times 2)$
 $= 2,122 \text{ meter/detik}$
- Menentukan nilai Kehilangan Tinggi = $f x \frac{v^2}{2g}$
 $= 0,1 x \frac{2,122^2}{2,9,81}$
 $= 0,023 \text{ meter}$

4.6.2. Pada Saringan Pengambilan

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Saringan Pengambilan adalah sebagai berikut:

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Debit Rencana | = 19,06 m ³ /detik |
| Ketebalan Batang Saringan (s) | = 1" = 25,4 mm (0,8" – 1,0") |
| Jarang Antara Batang (b) | = 2" = 50,8 mm (b > 50 mm) |
| Sudut Kemiringan Saringan | = 60° (30° – 60°) |
| Lebar Saluran | = 5,7 meter |
| Ketinggian Max. Bukaannya (h) | = 1,25 meter |

$$\begin{aligned}
 \text{a. Menentukan nilai Jumlah Batang (n)} &= L = ns + (n+1)b \\
 &570 = (n \times 2,54) + (n+1)5,08 \\
 n &= 75
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b. Menentukan nilai Kecepatan Aliran} &= \frac{Q}{(n+1)b \times \frac{h}{\sin \alpha}} \\
 &= \frac{19,06}{(75+1)0,05 \times \frac{1,25}{\sin 60}} \\
 &= 0,347 \text{ meter/detik}
 \end{aligned}$$

Jika, nilai kecepatan < 1 meter/detik maka dimensi saringan memenuhi syarat.

$$\text{c. Menentukan nilai K} = 2,4 \text{ (Faktor Bentuk)}$$

$$\begin{aligned}
 \text{d. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi} &= K \times \left(\frac{b}{(n+1)b \times \frac{h}{\sin \alpha}} \right)^{\frac{4}{3}} \times \frac{(V_0^2)}{2g} \times \sin \alpha \\
 &= 2,4 \times \left(\frac{0,05}{(75+1)0,05 \times \frac{1,25}{\sin 60}} \right)^{\frac{4}{3}} \times \frac{(0,347^2)}{2 \times 9,81} \times \sin 60 \\
 &= 0,0367 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

4.6.3. Pada Pintu Pengambilan

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Pintu Pengambilan adalah sebagai berikut:

$$\text{Kecepatan Ijin Maksimum} = 2 \text{ meter/detik}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Menentukan nilai Kehilangan Tinggi} &= \frac{v^2}{2g} \\
 &= \frac{2^2}{2 \times 9,81} \\
 &= 0,204 \text{ meter/detik}
 \end{aligned}$$

4.6.4. Pada Saluran Pengarah

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Saluran Pengarah adalah sebagai berikut:

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| Debit Rencana | = 19,06 m ³ /detik |
| Lebar Saluran (b) | = 5,7 meter |
| Tinggi Muka Air (h) | = 1,04 meter |
| Sudut Belokan | = 45° |
- a. Menentukan nilai Kecepatan Aliran $= \frac{Q}{b.h}$
- $$= \frac{19,06}{5,7 \cdot 1,04}$$
- $$= 4 \text{ meter/detik}$$
- b. Menentukan nilai Koefisien Belokan (Kb) = 0,30
- c. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi $= Kb \frac{v^2}{2g}$
- $$= 0,3 \frac{4^2}{2 \cdot 9,81}$$
- $$= 0,2446 \text{ meter}$$

4.6.5. Pada Pelebaran Menuju Bak Pengendap

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Pelebaran Menuju Bak Pengendap adalah sebagai berikut:

- | | |
|---|------------------------|
| Lebar Saluran Pengarah | = 5,7 meter |
| Tinggi Muka Air Normal Bak Pengendap | = 2,6 meter |
| Luas Penampang (A ₁) | = 34,55 m ² |
| Luas Penampang Saluran Pengarah (A ₂) | = 5,928 m ² |
| Kecepatan Aliran (v) | = 4 meter/detik |
- a. Menentukan nilai Koefisien (ϵ) $= \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$
- $$= \left(1 - \frac{5,928}{34,55}\right)^2$$
- $$= 0,6859$$
- b. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi $= \epsilon x \frac{v^2}{2g}$
- $$= 0,6859 x \frac{4^2}{2 \cdot 9,81}$$
- $$= 0,0559 \text{ meter}$$

4.6.6. Pada Penyempitan ke Saluran Pembawa

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Penyempitan ke Saluran Pembawa adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan Bak Pengendap} &= 3 \text{ meter/detik} \\ \text{Luas Penampang Bak Pengendap} &= 34,55 \text{ m}^2 \\ \text{Luas Penampang Saluran Pembawa} &= 5,928 \text{ m}^2 \\ \text{Koefisien } (\epsilon) &= 0,6859 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Menentukan nilai Kehilangan Tinggi} &= \epsilon \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,6859 \times \frac{3^2}{2 \cdot 9,81} \\ &= 0,0314 \text{ meter} \end{aligned}$$

4.6.7. Pada Pelebaran Menuju Bak Penenang

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Pelebaran Menuju Bak Penenang adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Luas Penampang Saluran Pembawa } (A_1) &= 5,928 \text{ m}^2 \\ \text{Kecepatan Saluran Pembawa } (V) &= 2,41 \text{ meter/detik} \\ \text{Ketinggian Air } (h) &= 1,32 \text{ meter} - hc (0,422 \text{ meter}) = 1,3 \text{ meter} \\ \text{Pelebaran Menuju Bak Penenang } (b) &= 10 \text{ meter} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{a. Menentukan nilai Luas Penampang Bak Penenang } (A_2) &= b \cdot h \\ &= 10 \cdot 1,3 \\ &= 13 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. Menentukan nilai Koefisien } (\epsilon) &= \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \\ &= \left(1 - \frac{5,928}{13}\right)^2 \\ &= 0,2959 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi} &= \epsilon \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,2959 \times \frac{2,41^2}{2 \cdot 9,81} \\ &= 0,0876 \text{ meter} \end{aligned}$$

4.6.8. Pada Saringan Bak Penenang

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Saringan Bak Penenang adalah sebagai berikut:

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Debit Rencana | = 19,06 m ³ /detik |
| Ketebalan Batang Saringan (s) | = 1" = 25,4 mm (0,8" – 1,0") |
| Jarang Antara Batang (b) | = 2" = 50,8 mm (b > 50 mm) |
| Sudut Kemiringan Saringan | = 60° (30° – 60°) |
| Lebar Saluran (L) | = 10 meter |
| Ketinggian Muka Air | = 1,32 meter |

$$\begin{aligned} \text{a. Menentukan nilai Jumlah Batang (n)} &= L = ns + (n+1)b \\ 1000 &= (n \times 2,54) + (n+1)5,08 \\ n &= 130 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. Menentukan nilai Kecepatan Aliran} &= \frac{Q}{(n+1)b \times \frac{h}{\sin \alpha}} \\ &= \frac{19,06}{(130+1)0,05 \times \frac{1,25}{\sin 60}} \\ &= 0,201 \text{ meter/detik} \end{aligned}$$

Jika, nilai kecepatan < 1 meter/detik maka dimensi saringan memenuhi syarat.

$$\begin{aligned} \text{c. Menentukan nilai K} &= 2,4 \text{ (Faktor Bentuk)} \\ \text{d. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi} &= K \times \left(\frac{b}{(n+1)b \times \frac{h}{\sin \alpha}} \right)^{\frac{4}{3}} \times \frac{(V_0^2)}{2g} \times \sin \alpha \\ &= 2,4 \times \left(\frac{0,05}{(130+1)0,05 \times \frac{1,25}{\sin 60}} \right)^{\frac{4}{3}} \times \frac{(0,201^2)}{2 \times 9,81} \times \sin 60 \\ &= 0,015 \text{ meter} \end{aligned}$$

4.6.9. Pada Pemasukan Pipa Pesat

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Saringan Bak Penenang adalah sebagai berikut:

| | |
|-------------------------|-------------------------------|
| Debit Rencana (Q) | = 15,88 m ³ /detik |
| Ke | = 0,5 |
| Diameter Pipa Pesat (D) | = 2,5 meter |

$$\begin{aligned} \text{a. Menentukan nilai Kecepatan Aliran} &= \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \\ &= \frac{4 \cdot 15,88}{\pi \cdot 2,5^2} \end{aligned}$$

$$= 4,1 \text{ meter/detik}$$

b. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi

$$= Ke \times \frac{v^2}{2g}$$

$$= 0,5 \times \frac{4,1^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$= 0,4285 \text{ meter}$$

4.6.10. Pada Belokan 1 & 2 Pipa Pesat

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Saringan Bak Penenang adalah sebagai berikut:

Jari-jari belokan (r) = 2,5 meter

Diameter Dalam Pipa (d) = 2,5 meter

Kekasaran Pipa (e) = 0,013

a. Menentukan nilai r/d = $2,5/2,5 = 1$

b. Menentukan nilai e/d = $0,013/2,5 = 0,0052$

c. Menentukan nilai Kb berdasarkan grafik = 0,4

d. Kecepatan Aliran (v) = 4,1 meter/detik

e. Menentukan nilai Kehilangan Tinggi

$$= Kb \times \frac{v^2}{2g}$$

$$= 0,4 \times \frac{4,1^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$= 0,4946 \text{ meter}$$

4.6.11. Pada Katup Pipa Pesat

Parameter yang digunakan untuk perhitungan Kehilangan Tinggi pada Saringan Bak Penenang adalah sebagai berikut:

Panjang Pipa Pesat (L) = 490 meter

Kecepatan Aliran = 4,1 meter/detik

Kekasaran Pipa (f) = 0,013

Diameter Pipa Pesat = 2,5 meter

Menentukan nilai Kehilangan Tinggi

$$= f \times \frac{L}{D} \times \frac{V}{2g}$$

$$= 0,013 \times \frac{490}{2,5} \times \frac{4,1}{2 \cdot 9,81}$$

$$= 0,5325 \text{ meter}$$

4.6.12. Rekapitulasi Kehilangan Tinggi

Dari hasil perhitungan kehilangan tinggi sesuai dengan letak kehilangannya, maka berikut adalah rekapitulasi beserta total kehilangan. Perhitungan total kehilangan tinggi

akan mengurangi tinggi jatuh kotor sehingga dapat menghasilkan tinggi jatuh efektif. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.92 sebagai berikut:

Tabel 4.92 Kehilangan Tinggi pada PLTM Sion (meter)

| No | Letak Kehilangan Tinggi | Nilai Kehilangan Tinggi |
|-------|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 | Pada Saluran Pengambil | 0,023 |
| 2 | Pada Saringan Pengambilan | 0,037 |
| 3 | Pada Pintu Pengambilan | 0,204 |
| 4 | Pada Saluran Pengarah | 0,245 |
| 5 | Pada Pelebaran Menuju Bak Pengendap | 0,056 |
| 6 | Pada Penyempitan Saluran Pembawa | 0,031 |
| 7 | Pada Pelebaran Menuju Bak Penenang | 0,088 |
| 8 | Pada Saringan Bak Penenang | 0,015 |
| 9 | Pada Pemasukan Pipa Pesat | 0,429 |
| 10 | Pada 2 Belokan Pipa Pesat | 0,989 |
| 11 | Pada Katup Pipa Pesat | 0,533 |
| Total | | 2,445 |

Sumber: Hasil Pehitungan, 2017

Sesuai hasil Tabel 4.92 didapat total kehilangan tinggi sebesar 2,554 meter. Sehingga tinggi jatuh efektif adalah tinggi jatuh kotor – total kehilangan tinggi = 76 meter – 2,45 meter = 73,55 meter.

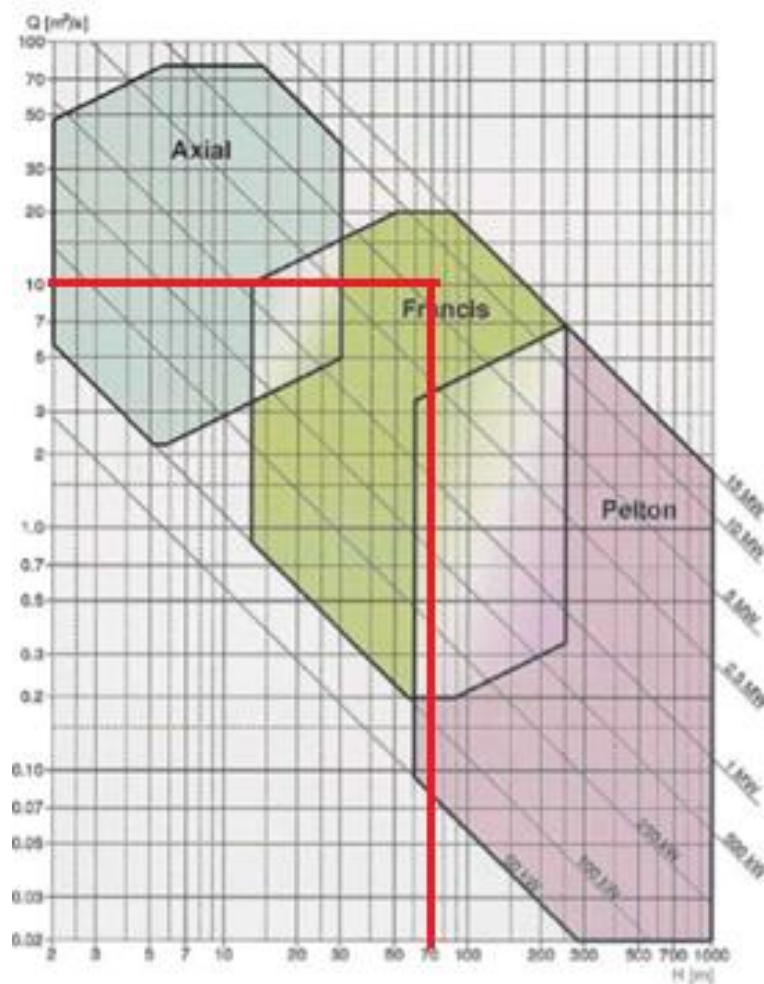
4.7. Turbin dan Generator

Dalam perhitungan turbin dan generator akan memperhitungkan mengenai dimensi turbin, generator, dan spesifikasi rumah pembangkit. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

4.7.1. Turbin

Perhitungan turbin akan memperhitungkan jenis, efisiensi, hingga dimensi dari turbin. Parameter yang digunakan dalam perhitungan turbin adalah Debit Pembangkit (Q) = 15,88 m³/detik, Debit 1 Unit Turbin = $Q/2 = 15,88/2 = 7,94$ m³/detik, dan Tinggi Jatuh Efektif (H_e) = 73,55 meter. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan Jenis Turbin berdasarkan Tinggi Jatuh dan Debit dalam 1 turbin berdasarkan Gambar 2.30 (ESHA, 2004:162) sebagai berikut:



Gambar 4.30 Grafik Penentuan Tipe Turbin Berdasarkan Tinggi Jatuh dan Daya
Sumber: ESHA, 2004:162

b. Menentukan nilai Dimensi *Runner* Turbin

- Kecepatan Spesifik (N_s)

$$= \frac{1,924}{H e^{0,512}}$$

$$= \frac{1,924}{73,55^{0,512}}$$

$$= 0,21$$
- Kecepatan Putar (N)

$$= \frac{N_s \cdot (9,81 \cdot H e)^{3/4}}{Q^{0,5}}$$

$$= \frac{0,21 \cdot (9,81 \cdot 73,55)^{3/4}}{7,94^{0,5}}$$

$$= 8,90 \text{ t/s}$$
- D_3

$$= 84,5 \times (0,31 + 2,5 \times 10^{-3} \times N_s) \times \frac{\sqrt{H e f f}}{N}$$

$$= 84,5 \times (0,31 + 2,5 \times 10^{-3} \times 0,21) \times \frac{\sqrt{73,55}}{8,90 \times 60}$$

$$= 0,42 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned}
 \bullet D_2 &= D_3 \times \left(0.4 + \frac{0,095}{N_s}\right) \\
 &= 0,42 \times \left(0.4 + \frac{0,095}{0,21}\right) \\
 &= 0,36 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bullet D_1 &= \frac{D_3}{0,96 + 0,00038 \times N_s} \\
 &= \frac{0,42}{0,096 + 0,00038 \times 0,21} \\
 &= 0,33 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

c. Menentukan nilai Rumah Turbin (*Spiral Case*)

$$\begin{aligned}
 \bullet A &= 1,15 \times D_3 = 1,15 \times 0,42 = 0,483 \text{ meter} \\
 \bullet B &= 1,50 \times D_3 = 1,5 \times 0,42 = 0,630 \text{ meter} \\
 \bullet C &= 3,80 \times D_3 = 3,80 \times 0,42 = 1,596 \text{ meter} \\
 \bullet D &= 1,90 \times D_3 = 1,90 \times 0,42 = 0,798 \text{ meter} \\
 \bullet E &= 2,00 \times D_3 = 2,00 \times 0,42 = 0,840 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

d. Menentukan nilai *Vertical Conical Draft Tube*

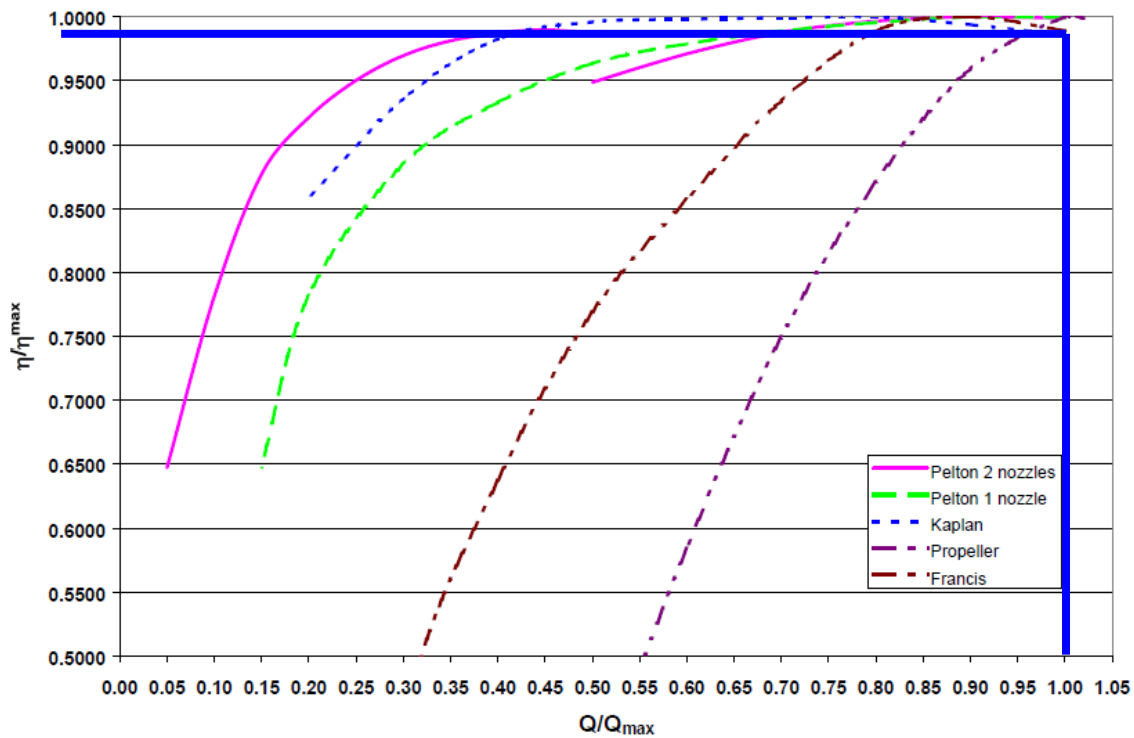
$$\begin{aligned}
 \bullet \text{Lebar Bagian Bawah} &= 2 \times D_3 = 2 \times 0,42 = 0,840 \text{ meter} \\
 \bullet \text{Panjang Draft Tube} &= 4 \times D_3 = 4 \times 0,42 = 1,680 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

4.7.2. Generator

Dalam perhitungan generator akan memperhitungkan kecepatan putaran hingga jumlah katub yang dibutuhkan. Parameter yang digunakan dalam perhitungan genretor adalah Tinggi Jatuh Efektif (H_e) = 73,55 meter, dan Debit Pembangkit 1 Unit = 10,8 m³/detik. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{a. Menentukan nilai Kecepatan Spesifikasi Maksimum } (N_s) &= \frac{23000}{(H_e + 30)} + 40 \\
 &= \frac{23000}{(73,55 + 30)} + 40 \\
 &= 262,115 \text{ m-kW}
 \end{aligned}$$

b. Menentukan nilai Efisiensi Turbin berdasarkan debit pembangkit dengan debit maksimum dengan melihat Gambar 4.8 sebagai berikut:



Gambar 4.31 Efisiensi Turbin
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil Gambar 4.31 dengan $Q/Q_{max} = 1$ maka didapatkan nilai Efisiensi Turbin sebesar 0,97.

c. Menentukan nilai Daya yang Dihasilkan (P) = $Q \times H_e \times 9,81 \times \text{Efisiensi}$
 $= 15,88 \times 73,55 \times 9,81 \times 0,98$
 $= 11.228 \text{ kWh}$

d. Menentukan nilai Kecepatan Putaran (n) = $\frac{(Ns - \max \times H_{net})^{\frac{5}{4}}}{p^{0.5}}$
 $= \frac{(262,115 \times 73,55^{\frac{5}{4}})}{7636,626^{0.5}}$
 $= 646,055 \text{ min}^{-1}$

e. Menentukan nilai Jumlah Kutub (p) dengan cara frekuensi 50 Hz

$$n = \frac{120 \times 50}{p}$$

$$646,055 = \frac{120 \times 50}{p}$$

$$p = 9,287 \sim 10$$

f. Menentukan Generator berdasarkan Tabel Pemilihan Generator sebagai berikut:

Tabel 4.93 Pemilihan Generator

| Kutup | 50 Hz rpm |
|-------|--------------|
| 4 | 1.500 |
| 6 | 1.000 |
| 8 | 750 |
| 10 | 600 |
| 12 | 500 |
| 14 | 429 |
| 16 | 375 |
| 18 | 333 |
| 20 | 300 |

Sumber: IEEJ Standard JEC-4001 Hydro Turbine and Pump Turbine

Dari hasil perhitungan generator dan Tabel 4.93 didapatkan jumlah kutub (p) = 10, Frekuensi yang digunakan = 50 Hz, dan Kecepatan Putar = 600 rpm.

4.7.3. Rumah Pembangkit

Dalam perhitungan rumah pembangkit akan memperhitungkan tinggi air kritis hingga perhitungan tekanan udara dan air. Parameter yang digunakan dalam perhitungan rumah pembangkit adalah sebagai berikut:

- Tinggi Jatuh Efektif (H_e) = 73,55 meter
- El. Dasar (*Power House*) = +691,90
- El. Muka Air Banjir (Q_{100}) = + 689,60
- D_3 = 0,42
- $2D_3$ = 0,84
- $1,5D_3$ = 0,63
- $1,15D_3$ = 0,48
- Kecepatan Spesifikasi (Francis) = 0,21

a. Menentukan nilai $B = 1,5D_3 + (2 \times 1,1 D_3) = 1,5 \times 0,42 + (2 \times 1,1 \times 0,42)$
 $= 1,55$ meter

b. Menentukan nilai Koefisien (*Sigma Thoma*) dengan nilai kecepatan (v) direncanakan 2 meter/detik.

$$\begin{aligned} \text{Sigma Thoma} &= \frac{1,2715 \cdot N_s^{1,41} + v^2}{2 \cdot 9,81 H_e} \\ &= \frac{1,2715 \cdot 0,21^{1,41} + 2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 73,55} \\ &= 0,00281 \end{aligned}$$

- c. Menentukan nilai Elevasi TWL = +691,90
- d. Menentukan nilai Tekanan Udara (P_{atm}) = $76 - \left(\frac{El.TWL}{100}\right)$
 = $76 - \left(\frac{691,90}{100}\right)$
 = 69,081 cmHg
 = 69,081 x 1333,2239
 = 92100,44 Pa
- e. Menentukan nilai Tekanan Uap Air (P_v) = 880 Pa
- f. Menentukan nilai H_s = $\frac{P_{atm}-P_v}{\rho \cdot g} + \left(\frac{2^2}{2 \cdot g}\right) - \sigma \times H_e$
 = $\frac{92100,44-880}{1000 \cdot 9,81} + \left(\frac{2^2}{2 \cdot 9,81}\right) - 0,111 \times 73,55$
 = 1,33 meter

Dari hasil perhitungan rumah pembangkit didapatkan nilai H_s atau nilai jarak *runner* turbin yang bereada 1,33 meter di bawah dari rencana *Tail Water Level*.

4.8. Daya dan Energi

Dalam perhitungan daya dan energi akan memperhitungkan jumlah daya maksimum yang di hasilkan oleh PLTM Sion dan energi yang dihasilkan dalam 1 (satu) tahun operasi dengan interval hari 5%. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai Efisiensi Generator = 0,93 (*)
- b. Menentukan nilai Efisiensi Total = E.Turbin x E.Generator
 = 0,97 x 0,93
 = 0,90
- c. Menentukan nilai Debit Andalan Asli = 32,59 meter³/detik
- d. Menentukan nilai Debit Andalan Rencana = Debit Andalan Asli - Debit *Maintenance Flow* (95%)
 = 32,59 - 2,04 = 30,55 meter³/detik
- e. Menentukan nilai Daya (P_{net}) = $Q \times (\eta_{turbin} \times \eta_{generator}) \times g \times H_{net}$
 = 15,88 x (0,90) x 9,81 x 73,55
 = 11.634,58 kW
- f. Menentukan nilai Energi = $P_{net} \times 24 \times \text{jumlah hari per periode}$
 = 13120,42 x 24 x 18,25
 = 5746744,1 kWh

- g. Menentukan nilai $Q_{\text{turbin}} = Q_n / 2$
 $= 15,88 / 2$
 $= 7,94 \text{ m}^3/\text{detik}$
- h. Menentukan Keterangan Musim, jika debit andalan lebih besar dari debit rerata yaitu sebesar $15,51 \text{ m}^3/\text{detik}$ maka dapat disebut sebagai musim basah dan jika lebih kecil maka dapat disebut musim kering.

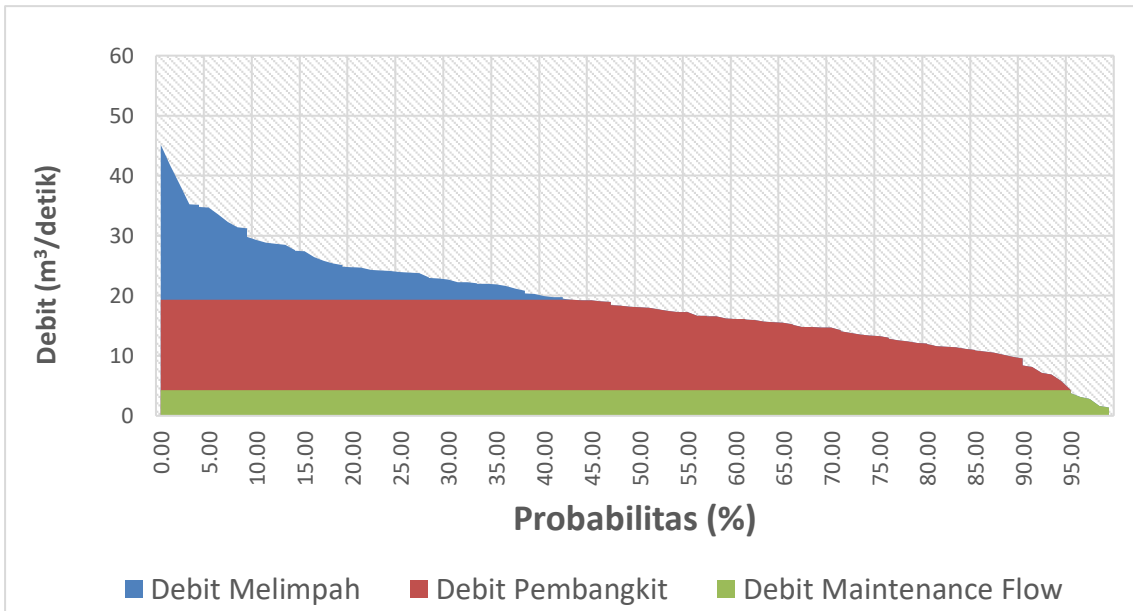
Jadi ketika terjadi debit yang berada di bawah debit minimum operasi maka turbin tidak akan dioperasikan. Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.94 sebagai berikut:

Tabel 4.94 Hasil Perhitungan Daya dan Energi

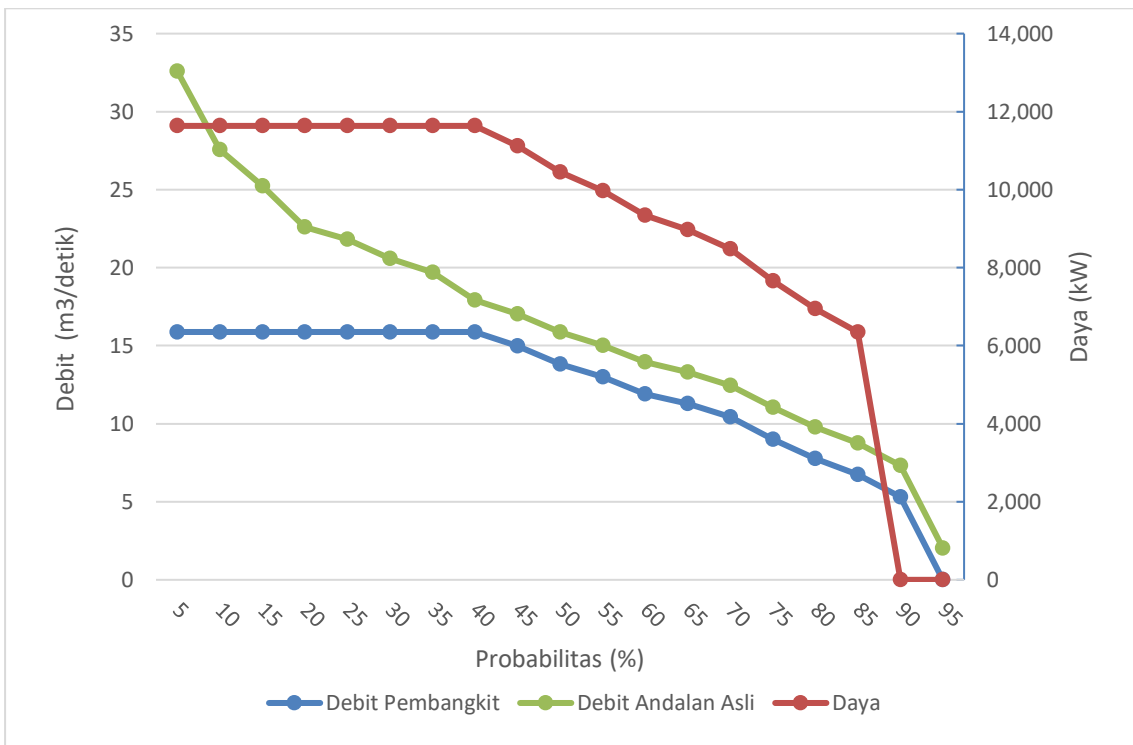
| No | Keandalan | Jumlah | Debit | Debit | Debit | Debit | | Daya | Energi | Kumulatif |
|----|-----------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|----------|-----------|--------------|---------------|
| | Debit | Hari | Andalan Asli | Andalan Rencana | Pembangkit | Pembangkit (m^3/detik) | | Kw | Kwh | Energi |
| | % | | m^3/detik | m^3/detik | m^3/detik | Turbin 1 | Turbin 2 | | | Kwh |
| 1 | 5 | 18 | 32,59 | 30,55 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 5.095.944,47 |
| 2 | 10 | 37 | 27,55 | 25,51 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 10.191.888,94 |
| 3 | 15 | 55 | 25,23 | 23,19 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 15.287.833,42 |
| 4 | 20 | 73 | 22,62 | 20,58 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 20.383.777,89 |
| 5 | 25 | 91 | 21,83 | 19,79 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 25.479.722,36 |
| 6 | 30 | 110 | 20,58 | 18,54 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 30.575.666,83 |
| 7 | 35 | 128 | 19,71 | 17,67 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 35.671.611,31 |
| 8 | 40 | 146 | 17,92 | 15,88 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,58 | 5.095.944,47 | 40.767.555,78 |
| 9 | 45 | 164 | 17,02 | 14,98 | 7,94 | 7,49 | 0 | 5.817,29 | 2.547.972,20 | 45.635.437,07 |
| 10 | 50 | 183 | 15,86 | 13,82 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,29 | 2.547.972,20 | 50.211.074,80 |
| 11 | 55 | 201 | 15,03 | 12,99 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,29 | 2.547.972,20 | 54.576.779,77 |
| 12 | 60 | 219 | 13,94 | 11,90 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,29 | 2.547.972,20 | 58.666.497,09 |
| 13 | 65 | 237 | 13,32 | 11,28 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,29 | 2.547.972,20 | 62.597.711,19 |
| 14 | 70 | 256 | 12,46 | 10,42 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,29 | 2.547.972,20 | 66.312.846,18 |
| 15 | 75 | 274 | 11,05 | 9,01 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,29 | 2.547.972,20 | 69.670.539,79 |
| 16 | 80 | 292 | 9,80 | 7,76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69.670.539,79 |
| 17 | 85 | 310 | 8,77 | 6,73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69.670.539,79 |
| 18 | 90 | 329 | 7,33 | 5,29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69.670.539,79 |
| 19 | 95 | 347 | 2,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69.670.539,79 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Berdasarkan hasil perhitungan daya dan energi yang dihasilkan PLTM Sion dapat menghasilkan daya sebesar 11.634,58 kW atau 11,63 MW dengan produksi energi tahunan sebesar 69.670.539,79 kWh atau sebesar 69,67 GWh dalam 1 tahun.



Gambar 4.32 Hasil Perhitungan Daya dan Energi
 Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.33 Hubungan Debit dengan Daya berdasarkan Probabilitas
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Selanjutnya untuk mengetahui daya dan energi dalam setiap bulan dapat dilakukan dengan memperhitungkan debit andalan yang dihasilkan sesuai pada Tabel 4.78. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat contoh perhitungan pada bulan januari sebagai berikut:

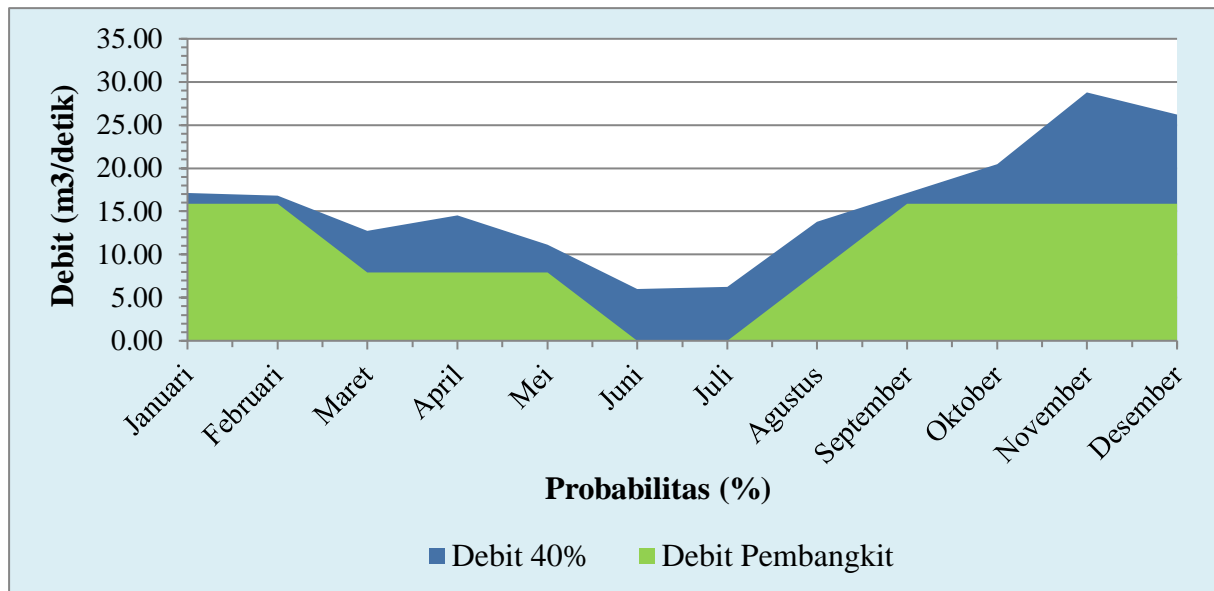
- a. Menentukan nilai Debit 40% (interpolasi pada Tabel 4.78 dikurangi *Maintenance Flow*) = $\frac{40\% - 36,4\%}{245,5\% - 36,4\%} \times (20,5 - 18,9) + 18,9 = 17,16 \text{ m}^3/\text{detik}$.
- b. Menentukan nilai Debit Pembangkit = Jika Debit 40% > 15,88 m³/detik maka Debit Pembangkit bernilai tetap 15,88 m³/detik. Jika Debit 40% < 15,88 m³/detik maka Debit Pembangkit yang digunakan 7,94 m³/detik (Debit operasi satu turbin).
- c. Menentukan nilai Turbin 1 & 2 = $\frac{\text{Debit Pembangkit}}{2} = \frac{15,88}{2} = 7,94 \text{ m}^3/\text{detik}$. Jika terdapat Debit yang berada dibawah Debit Pembangkit satu turbin maka turbin tidak beroperasi.
- d. Menentukan nilai Daya = Debit Pembangkit × Efisiensi × *g* × *H_{nett}*
 $= 15,88 \times (0,90) \times 9,81 \times 73,55$
 $= 11.634,56 \text{ kW}$
- e. Menentukan nilai Energi = Daya × 24 × Jumlah Hari
 $= 11.634,56 \times 24 \times 31$
 $= 8.656.112,64 \text{ kWh}$

Tabel 4.95 Hasil Perhitungan Daya dan Energi Bulanan

| No | Bulan | Jumlah Hari | Debit 40% | Debit Pembangkit | Debit Pembangkit | | Daya | Energi |
|-------|-----------|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|---------------|
| | | | | | Turbin 1 | Turbin 2 | | |
| | | | m ³ /detik | m ³ /detik | m ³ /detik | m ³ /detik | kW | kWh |
| 1 | Januari | 31 | 17,16 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,56 | 8.656.112,64 |
| 2 | Februari | 28 | 16,84 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,56 | 8.097.653,76 |
| 3 | Maret | 31 | 12,75 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,28 | 4.328.056,30 |
| 4 | April | 30 | 14,52 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,28 | 4.188.441,6 |
| 5 | Mei | 31 | 11,16 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,28 | 4.328.056,30 |
| 6 | Juni | 30 | 6,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Juli | 31 | 6,22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | Agustus | 31 | 13,77 | 7,94 | 7,94 | 0 | 5.817,28 | 4.328.056,30 |
| 9 | September | 30 | 17,16 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,56 | 8.376.883,20 |
| 10 | Oktober | 31 | 20,44 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,56 | 8.656.112,64 |
| 11 | November | 30 | 28,78 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,56 | 8.376.883,20 |
| 12 | Desember | 31 | 26,20 | 15,88 | 7,94 | 7,94 | 11.634,56 | 8.656.112,64 |
| Total | | | | | | | | 67.992.369,58 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- f. Menentukan nilai Kapasitas Faktor (FC) = $\frac{\text{Energi}}{\text{Daya} \times 24 \times 365} \times 100$
 $= \frac{67.992.369,58}{11.634,56 \times 24 \times 365} \times 100 = 76,7 \%$



Gambar 4.34 Hubungan Debit 40% Setiap Bulan dengan Debit Pembangkit
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil perhitungan Daya dan Energi Bulanan dapat diketahui dalam 6 bulan turbin dapat beroperasi secara maksimal (Januari, Februari, September, Oktober, November, Desember) dan pada bulan Juni dan Juli turbin tidak dapat beroperasi dikarenakan debit yang ada dibawah debit perencanaan pada satu turbin. Energi yang dihasilkan dalam perhitungan Daya dan Energi Bulanan 67 MWh selama satu tahun. Untuk perhitungan selanjutnya, yaitu Analisa Ekonomi maka Energi yang digunakan dalam perhitungan tersebut adalah nilai energi sebesar 67 GWh.

4.9. Analisa Ekonomi

Dalam perhitungan analisis ekonomi akan memperhitungkan mengenai komponen biaya hingga sensitivitas ekonomi berdasarkan bunga peminjaman dan perubahan energi yang dihasilkan. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

4.9.1. Komponen Biaya

Dalam perhitungan komponen biaya akan memperhitungkan biaya dari masing – masing komponen berdasarkan pendekatan rumus empiris dari *RETscreen Canada*. Parameter yang digunakan dalam perhitungan komponen biaya adalah sebagai berikut:

- Debit rencana (Q) = 15,88 m³/detik
- Tinggi jatuh efektif (H_g) = 73,55 meter
- Daya dibangkitkan (MW) = 11,63 MW

- Jumlah turbin (n) = 2 unit
- Berat Pipa Pesat (W) = 756.437,500 kg
- Diameter runner turbin (d) = 0,42 meter
- Panjang *crest* bendung (ld) = 56,09 meter
- Panjang saluran pembawa (lcr) = 2.346 meter
- Sudut kemiringan saluran pembawa (Sr) = 0,05729
- Panjang Jalan Akses (lt) = 2.400 meter (*)
- Kurs Kanada ke rupiah = Rp. 10.814,05 (13 Oktober 2017)

(*) Direncanakan

a. Menentukan harga Komponen Teknis

$$(A1) = 0,37 \cdot n^{0,1} \cdot E \cdot \left(\frac{MW}{Hg^{0,3}} \right)^{0,54} \cdot 10^6$$

(*) Faktor Bendung = 0,67

$$= 0,37 \cdot 2^{0,1} \cdot 0,67 \cdot \left(\frac{11,63}{73,55^{0,3}} \right)^{0,54} \cdot 10^6$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 498.202,817$$

$$= \text{Rp } 5.387.590.170,00$$

b. Menentukan harga Komponen Elektromekanikal

$$(A2) = 0,17n^{0,96} \cdot Jt \cdot Kt \cdot d^{1,47} \{ (13 + 0,01Hg)^{0,3} + 3 \} \cdot 10^6$$

(*) Faktor Tinggi Jatuh (Jt) = 1,10 (> 25 meter)

(*) Faktor Diameter Runner (Kt) = 0,41 (<1,8 meter)

$$= 0,17 \cdot 2^{0,96} \cdot 1,10 \cdot 0,41 \cdot 0,42^{1,47} \{ (13 + 0,01 \cdot 73,55)^{0,3} + 3 \} \cdot 10^6$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 2.164.421,214$$

$$= \text{Rp } 23.406.159.229,26$$

c. Menentukan harga Komponen Instalasi Peralatan Elektromekanikal

$$(A3) = 0,15 \cdot (A2)$$

$$= 0,15 \cdot 2.164.421,214$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 324,332$$

$$= \text{Rp } 3.510.923.884,39$$

d. Menentukan harga Komponen Kabel Transmisi

$$(A4) = 0,00011 \cdot D \cdot P \cdot lt^{0,95} \cdot V \cdot 10^6$$

(*)Faktor Kesulitan Pemasangan (D) = 1,5

(*)Voltase (V) = 20 kV maka P = 0,85 (V < 69)

$$= 0,00011 \cdot 2,5 \cdot 0,85 \cdot 2400^{0,95} \cdot 20 \cdot 10^6$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 45.617,685$$

$$= \text{Rp } 493.311.926,47$$

e. Menentukan harga Komponen Subtansi dan Transformer

$$(A5) = 0,0025 \cdot n^{0,95} + 0,002 \cdot (n + 1) \cdot \left(\frac{MW}{0,95}\right)^{0,9} \cdot V^{0,3} \cdot 10^6$$

$$= 0,0025 \cdot 2^{0,95} + 0,002 \cdot (2 + 1) \cdot \left(\frac{11,63}{0,95}\right)^{0,9} \cdot 20^{0,3} \cdot 10^6$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 14.045,917$$

$$= \text{Rp } 151.893.248,73$$

f. Menentukan harga Komponen Instalasi Subtansi dan Transformer

$$(A6) = 0,15 \cdot A6$$

$$= 0,15 \cdot 14.045,917$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 2.106,888$$

$$= \text{Rp } 22.783.987,31$$

g. Menentukan harga Komponen Pekerjaan Sipil

$$(A7) = 1,97 \cdot n^{-0,04} \cdot C \cdot R \cdot \left(\frac{MW}{Hg^{0,3}}\right)^{0,82} \cdot (1 + 0,01 \cdot lb) \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \frac{ld}{Hg}\right) \cdot 10^6$$

(*)Faktor Biaya (C) = 1

(*)Faktor Batuan (R) = 1

(*)Jarak *borrow area* (lb) = 1 km

$$= 1,97 \cdot 2^{-0,04} \cdot 1 \cdot 1 \cdot \left(\frac{11,63}{73,55^{0,3}}\right)^{0,82} \cdot (1 + 0,01 \cdot 1) \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \frac{56,09}{73,55}\right) \cdot 10^6$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 5.046.557,966$$

$$= \text{Rp } 54.573.732.172,22$$

h. Menentukan harga Komponen Pipa Pesat

$$(A8) = 20 \cdot nP^{0,95} \cdot W^{0,88}$$

$$= 20 \cdot 2 \cdot 1^{0,95} \cdot 756437,5^{0,88}$$

$$= 596.183,442$$

$$= \text{Rp } 6.447.157.550,96$$

i. Menentukan harga Komponen Instalasi Pipa Pesat

$$(A9) = 5 \cdot W^{0,88}$$

$$= 5 \cdot 756437,5^{0,88}$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 245.229,935$$

$$= \text{Rp } 2.651.928.724,52$$

j. Menentukan harga Komponen Saluran Pembawa

$$(A10) = 100 \cdot \{(1,5 + 0,016 \cdot Sr^2) \cdot Qd \cdot lcr\}^{0,9}$$

$$= 100 \cdot \{(1,5 + 0,016 \cdot 0,05729^2) \cdot 15,88 \cdot 2346\}^{0,9}$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 2.321.841,123$$

$$= \text{Rp } 25.108.505.996,18$$

k. Menentukan harga Biaya Lain-lain

$$(A11) = 0,25 \cdot i \cdot Qd^{0,35} \cdot (1,1 \cdot \Sigma(A1 + A2 + \dots A11) + 0,1 \cdot \Sigma(A1 + A2 + \dots A11))$$

(*)Suku Bunga = 10,50% (PT. Bank Rakyat Indonesia)

$$= 0,25 \cdot i \cdot 15,88^{0,35} \cdot (1,1 \cdot (498202,817 + 2164421,214 + 324,663 +$$

$$7602952,809 + 1140442,917 + 2106.888 + 5046557,966 + 596183,442 +$$

$$245229,935 + 2321841,123) + (0,1 \cdot ((498202,817 + 2164421,214 + 324,663$$

$$+ 7602952,809 + 1140442,917 + 2106.888 + 5046557,966 + 596183,442 +$$

$$245229,935 + 2321841,123)$$

$$= (\$ \text{ kanada}) 2.297.791,534$$

$$= \text{Rp } 24.848.432.538,76$$

Tabel 4.95 Rekapitulasi Harga Komponen PLTM Sion

| No | Komponen | Biaya |
|--------------|------------------------------------|------------------------------|
| A1 | Teknis | Rp 5.387.590.173,18 |
| A2 | Elektromekanikal | Rp 23.406.159.229,26 |
| A3 | Instalasi Peralatan Hidromekanikal | Rp 3.510.923.884,39 |
| A4 | Kabel Transmisi | Rp 82.218.711.824,17 |
| A5 | Substansi dan Transformer | Rp 12.332.806.773,63 |
| A6 | Instalasi Substansi dan Transforme | Rp 1.849.921.016,04 |
| A7 | Pekerjaan Sipil | Rp 54.573.730.172,22 |
| A8 | Pipa pesat | Rp 6.447.157.550,96 |
| A9 | Instalasi Penstock | Rp 2.651.928.724,52 |
| A10 | Saluran pembawa | Rp 25.108.505.996,18 |
| A11 | Biaya Lain,lain | Rp 24.848.432.538,76 |
| Total | | Rp 242.335.867.883,30 |

Terbilang

*Dua Ratus Empat Puluh
Dua Miliar Tiga Ratus
Tiga Puluh Lima Juta
Delapan Ratus Enam
Puluh Tujuh Ribu
Delapan Ratus Delapan
Puluh Tiga Rupiah*

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.9.2. Nilai Sekarang (*Present Value*)

Dalam perhitungan nilai sekarang akan memperhitungkan biaya investasi, biaya O&P hingga biaya bahan bakar. Perhitungan nilai sekarang berdasarkan tabel bunga 10,50 % dengan periode 1 tahun mulai pembangunan, 20 tahun untuk pembangkitan dan 7 tahun untuk peminjaman. Untuk parameter yang diperlukan dalam perhitungan nilai sekarang adalah sebagai berikut:

- Biaya investasi = Rp 242.335.867.883,30
- Pendanaan = 30% Modal Awal dan 70% Pinjaman
- Biaya modal (30% biaya) = Rp 72.700.760.760.364,99
- Biaya pinjaman (70% biaya) = Rp 169.635.107.518,31
- Biaya O&P (2% biaya) = Rp 4.846.717.357,67
- Biaya bahan bakar = Rp. 10,00/kWh
- Bunga bank = 10,50% (Bank BI *update* November 2016)
- Periode operasi pembangkit = 20 tahun
- Periode pinjaman = 7 tahun
- Produksi energi tahunan = 67.992.369,58 kWh

a. Menentukan harga Modal

$$\begin{aligned}
 &= \text{Biaya Modal} \times (F/P; 10,50; 1) \\
 &= \text{Rp } 72.700.760.760.364,99 \times 1,050 \\
 &= \text{Rp } 76.335.798.383,24
 \end{aligned}$$

b. Menentukan harga Cicilan Utang

$$\begin{aligned}
 &= \text{Biaya Pinjaman} \times (F/P; 10,50; 7) \\
 &= \text{Rp } 169.635.107.518,31 \times 2,01 \\
 &= \text{Rp } 340.966.566.111,80
 \end{aligned}$$

c. Menentukan harga Biaya Operasi dan Oemeliharaan (O&P)

$$\begin{aligned}
 &= \text{Biaya O\&P} \times (P/A; 10,50; 20) \\
 &= \text{Rp } 4.846.717.357,67 \times 8,238 \\
 &= \text{Rp } 39.927.257.592,45
 \end{aligned}$$

d. Menentukan harga Biaya Bahan Bakar

$$\begin{aligned}
 &= (\text{Harga Bahan Bakar} \times \text{Produksi Energi Tahunan}) \times (P/A; 10,50; 20) \\
 &= \text{Rp. } 10,00/\text{kWh} \times 67.992.369,58 \text{ kWh} \times 8,238 \\
 &= \text{Rp } 6.595.874.347,06
 \end{aligned}$$

Tabel 4.96 Rekapitulasi Biaya Keseluruhan PLTM Sion (Bunga 10,50%)

| Biaya | Harga | Faktor Konversi | Biaya Sekarang |
|-------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| Modal | Rp 72.700.760.364,99 | 1,050 | Rp 76.335.798.383,24 |
| Cicilan | Rp 169.635.107.518,31 | 2,010 | Rp 340.966.566.111,80 |
| O&P | Rp 4.846.717.35,67 | 8,238 | Rp 39.927.257.592,45 |
| Bahan Bakar | Rp 800.664.523,80 | 8,238 | Rp 6.595.874.347,06 |
| Total | Rp 247.983.249.764,76 | | Rp 463.825.496.434,55 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

e. Menentukan harga Jual Listrik

Untuk Pulau Sumatera $F = 1,15$

$$\begin{aligned}
 &= \text{Rp } 880,00 \times F \\
 &= \text{Rp } 880,00 \times 1,15 \\
 &= \text{Rp } 1.012,00 / \text{kWh}
 \end{aligned}$$

f. Menentukan harga Manfaat Tahunan

$$\begin{aligned}
 &= \text{Produksi Energi Tahunan} \times \text{Harga Jual Listrik} \\
 &= 67.992.369,58 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.012,00 \\
 &= \text{Rp } 81.027.249.808,56
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan setiap tahunnya dan total dalam jangka 20 tahun dapat dilihat pada Tabel 4.97 sebagai berikut:

Tabel 4.97 Manfaat Tahunan PLTM Sion

| No | Tahun | Produksi Energi | Harga Jual / kWh | | Manfaat |
|----|-------|-----------------|------------------|----|-------------------|
| | | kWh | Rupiah | | Tahunan |
| 1 | 2019 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 2 | 2020 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 3 | 2021 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 4 | 2022 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 5 | 2023 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 6 | 2024 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 7 | 2025 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 8 | 2026 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 9 | 2027 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 10 | 2028 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 11 | 2029 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 12 | 2030 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 13 | 2031 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 14 | 2032 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 15 | 2033 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |

Lanjutan Tabel 4.97 Manfaat Tahunan PLTM Sion

| | | | | | |
|--------------|------|----------------------|-------|----|--------------------------------|
| 16 | 2034 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 17 | 2035 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 18 | 2036 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 19 | 2037 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| 20 | 2038 | 67.992.369,58 | 1.012 | Rp | 81.027.249.808,56 |
| Total | | 1.601.329.048 | | | Rp 1.620.544.996.171,20 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.98 Manfaat 20 Tahun PLTM Sion (Bunga 10,50%)

| No | Tahun | Manfaat Tahunan | Faktor Konversi | Manfaat Tahunan |
|--------------|-------|--------------------------------|-----------------|------------------------------|
| 1 | 2019 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,9050 | Rp 73.329.661.076,75 |
| 2 | 2020 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,8190 | Rp 66.361.317.593,21 |
| 3 | 2021 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,7413 | Rp 60.065.500.283,09 |
| 4 | 2022 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,6709 | Rp 54.361.181.896,56 |
| 5 | 2023 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,6072 | Rp 49.199.746.083,76 |
| 6 | 2024 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,5496 | Rp 44.532.576.494,78 |
| 7 | 2025 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,5975 | Rp 48.413.781.760,61 |
| 8 | 2026 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,4502 | Rp 36.478.467.863,81 |
| 9 | 2027 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,4075 | Rp 33.018.604.296,99 |
| 10 | 2028 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,3689 | Rp 29.890.952.454,38 |
| 11 | 2029 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,3339 | Rp 27.054.998.711,08 |
| 12 | 2030 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,3022 | Rp 24.486.434.892,15 |
| 13 | 2031 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2736 | Rp 22.169.055.547,62 |
| 14 | 2032 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2477 | Rp 20.070.449.777,58 |
| 15 | 2033 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2242 | Rp 18.166.309.407,08 |
| 16 | 2034 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2030 | Rp 16.448.531.711,14 |
| 17 | 2035 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2837 | Rp 22.987.430.770,69 |
| 18 | 2036 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,1664 | Rp 13.482.934.368,14 |
| 19 | 2037 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,1506 | Rp 12.202.703.821,17 |
| 20 | 2038 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,1363 | Rp 11.044.014.148,91 |
| Total | | Rp 1.620.544.996.171,20 | | Rp 683.764.652.959,50 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari hasil perhitungan nilai sekarang didapat Biaya Keseluruhan sebesar Rp 463,825,496,434.55 dan Manfaat Selama 20 Tahun sebesar Rp 683,764,652,959.50. perhitungan selanjutnya akan memperhitungkan besarnya keuntungan bersih dalam proyek PLTM Sion.

4.9.3. Benefit Cost Ratio (BCR)

Dalam perhitungan BCR akan memperhitungkan perbandingan antara manfaat dan biaya. Hasil BCR akan menentukan layak atau tidaknya proyek yang akan dibangun secara ekonomi. Proyek dikatakan layak apabila nilai BCR > 1. Untuk lebih jelasnya

akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\text{BCR} = \frac{\text{Manfaat PLTM Sion}}{\text{Biaya}} = \frac{\text{Rp } 683,764,652,959.50}{\text{Rp } 463.825.496.434,55} = 1,47$$

4.9.4. Net Present Value (NPV)

Dalam perhitungan *Net Present Value* akan memperhitungkan selisih antara manfaat dengan biaya. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{NPV} &= \text{Manfaat PLTM Sion} - \text{Biaya} \\ &= \text{Rp } 683,764,652,959.50 - \text{Rp } 463.825.496.434,55 \\ &= \text{Rp } 219.939.156.524,94 \end{aligned}$$

4.9.5. Internal Rate of Return

Dalam perhitungan *Internal Rate of Return* akan memperhitungkan simulasi perubahan suku bunga dimana $\text{BCR} = 1$ dan $\text{NPV} = 0$. Untuk suku bunga yang akan disimulasikan dari 10,50%; 11 %; 12; dan 13% dengan faktor konversinnya sesuai tabel suku bunga. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.89, Tabel 4.90 dan diperhitungkan sebagai berikut:

Tabel 4.99 Manfaat PLTM Sion untuk Beberapa Suku Bunga

| No | Tahun | Manfaat | | 10.5 % | | 11% | | 12% | | 13% | |
|----|-------|----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--|
| | | PLTM Sion | F | Manfaat | F | Manfaat | F | Manfaat | F | Manfaat | |
| 1 | 2019 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,905 | Rp 73.329.661.076,75 | 0,9009 | Rp 72.997.449.352,53 | 0,8929 | Rp 72.349.231.354,06 | 0,885 | Rp 71.709.116.080,58 | |
| 2 | 2020 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,819 | Rp 66.361.317.593,21 | 0,8116 | Rp 65.761.715.944,63 | 0,7972 | Rp 64.594.923.547,38 | 0,7831 | Rp 63.452.439.325,08 | |
| 3 | 2021 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,7413 | Rp 60.065.500.283,09 | 0,7312 | Rp 59.247.125.060,02 | 0,7118 | Rp 57.675.196.413,73 | 0,6931 | Rp 56.159.986.842,31 | |
| 4 | 2022 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,6709 | Rp 54.361.181.896,56 | 0,6587 | Rp 53.372.649.448,90 | 0,6355 | Rp 51.492.817.253,34 | 0,6133 | Rp 49.694.012.307,59 | |
| 5 | 2023 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,6072 | Rp 49.199.746.083,76 | 0,5935 | Rp 48.089.672.761,38 | 0,5674 | Rp 45.974.861.541,38 | 0,5428 | Rp 43.981.591.196,09 | |
| 6 | 2024 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,5496 | Rp 44.532.576.494,78 | 0,5346 | Rp 43.317.167.747,66 | 0,5066 | Rp 41.048.404.753,02 | 0,4803 | Rp 38.917.388.083,05 | |
| 7 | 2025 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,5975 | Rp 48.413.781.760,61 | 0,4817 | Rp 39.030.826.232,78 | 0,4523 | Rp 36.648.625.088,41 | 0,4251 | Rp 34.444.683.893,62 | |
| 8 | 2026 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,4502 | Rp 36.478.467.863,81 | 0,4339 | Rp 35.157.723.691,93 | 0,4039 | Rp 32.726.906.197,68 | 0,3762 | Rp 30.482.451.377,98 | |
| 9 | 2027 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,4075 | Rp 33.018.604.296,99 | 0,3909 | Rp 31.673.551.950,17 | 0,3606 | Rp 29.218.426.280,97 | 0,3329 | Rp 26.973.971.461,27 | |
| 10 | 2028 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,3689 | Rp 29.890.952.454,38 | 0,3522 | Rp 28.537.797.382,57 | 0,3220 | Rp 26.090.774.438,36 | 0,2946 | Rp 23.870.627.793,60 | |
| 11 | 2029 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,3339 | Rp 27.054.998.711,08 | 0,3173 | Rp 25.709.946.364,26 | 0,2875 | Rp 23.295.334.319,96 | 0,2607 | Rp 21.123.804.025,09 | |
| 12 | 2030 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,3022 | Rp 24.486.434.892,15 | 0,2858 | Rp 23.157.587.995,29 | 0,2567 | Rp 20.799.695.025,86 | 0,2307 | Rp 18.692.986.530,83 | |
| 13 | 2031 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2736 | Rp 22.169.055.547,62 | 0,2575 | Rp 20.864.516.825,70 | 0,2292 | Rp 18.571.445.656,12 | 0,2042 | Rp 16.545.764.410,91 | |
| 14 | 2032 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2477 | Rp 20.070.449.777,58 | 0,232 | Rp 18.798.321.955,59 | 0,2046 | Rp 16.578.175.310,83 | 0,1807 | Rp 14.641.624.040,41 | |
| 15 | 2033 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2242 | Rp 18.166.309.407,08 | 0,209 | Rp 16.934.695.209,99 | 0,1827 | Rp 14.803.678.540,02 | 0,1599 | Rp 12.956.257.244,39 | |
| 16 | 2034 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,203 | Rp 16.448.531.711,14 | 0,1883 | Rp 15.257.431.138,95 | 0,1631 | Rp 13.215.544.443,78 | 0,1415 | Rp 11.465.355.847,91 | |
| 17 | 2035 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,2837 | Rp 22.987.430.770,69 | 0,1696 | Rp 13.742.221.567,53 | 0,1456 | Rp 11.797.567.572,13 | 0,1252 | Rp 10.144.611.676,03 | |
| 18 | 2036 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,1664 | Rp 13.482.934.368,14 | 0,1528 | Rp 12.380.963.770,75 | 0,1300 | Rp 10.533.542.475,11 | 0,1108 | Rp 8.977.819.278,79 | |
| 19 | 2037 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,1506 | Rp 12.202.703.821,17 | 0,1377 | Rp 11.157.452.298,64 | 0,1161 | Rp 9.407.263.702,77 | 0,0981 | Rp 7.948.773.206,22 | |
| 20 | 2038 | Rp 81.027.249.808,56 | 0,1363 | Rp 11.044.014.148,91 | 0,124 | Rp 10.047.378.976,26 | 0,1037 | Rp 8.402.525.805,15 | 0,0868 | Rp 7.033.165.283,38 | |
| | | Total | | Rp 683.764.652.959,50 | | Rp 645.236.195.675,53 | | Rp 605.224.939.720,06 | | Rp 569.216.429.905,13 | |
| | | Rata,Rata | | Rp 34.188.232.647,97 | | Rp 32.261.809.783,78 | | Rp 30.261.246.986,00 | | Rp 28.460.821.495,26 | |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.100 Nilai Biaya, Manfaat, BCR, NPV untuk Beberapa Suku Bunga

| Uraian | Biaya | 10.50% | | 11% | | 12% | | 13% | |
|--------------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|
| | | F | Biaya | F | Biaya | F | Biaya | F | Biaya |
| Modal | Rp 72.700.760.364,99 | 1,0500 | Rp 76.335.798.383,24 | 1,1400 | Rp 82.878.866.816,09 | 1,1500 | Rp 83.605.874.419,74 | 1,1600 | Rp 84.332.882.023,39 |
| Cicilan Investasi | Rp 169.635.107.518,31 | 2,0100 | Rp 340.966.566.111,80 | 2,5023 | Rp 424.477.929.543,06 | 2,6600 | Rp 451.229.385.998,70 | 2,8262 | Rp 479.422.740.868,24 |
| O&P | Rp 4.846.717.357,67 | 8,2380 | Rp 39.927.257.592,45 | 6,6231 | Rp 32.100.293.731,56 | 6,2593 | Rp 30.337.057.956,84 | 5,9288 | Rp 28.735.217.870,13 |
| Bahan Bakar | Rp 800.664.523,80 | 8,2380 | Rp 6.595.874.347,06 | 6,6231 | Rp 5.302.881.207,58 | 6,2593 | Rp 5.011.599.453,82 | 5,9288 | Rp 4.746.979.828,71 |
| Total Biaya | | | Rp 463.825.496.434,55 | | Rp 544.759.971.298,29 | | Rp 570.183.917.829,10 | | Rp 597.237.820.590,47 |
| Benefit | | | Rp 683.764.652.959,50 | | Rp 645.236.195.675,53 | | Rp 605.224.939.720,06 | | Rp 569.216.429.905,13 |
| Benefit Cost Rasio | | | 1,474 | | 1,184 | | 1,061 | | 0,953 |
| NPV | | | Rp 219.939.156.524,94 | | Rp 100.476.224.377,24 | | Rp 35.041.021.890,96 | | ,Rp 28.021.390.685,33 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

$$\begin{aligned}
 \text{IRR} &= \frac{NPV - NPV_{13\%}}{NPV_{12\%} - NPV_{13\%}} \times (12\% - 13\%) + 12\% \\
 &= \frac{0 - (-28.021.390.685.33)}{35.041.021.890.96 - (-28.021.390.685.33)} \times (12\% - 13\%) + 12\% \\
 &= 12,44\%
 \end{aligned}$$

Sehingga pada suku bunga 12,44% akan mengakibatkan BCR = 1 dan NPV = 0 atau tidak mendapatkan keuntungan.

4.9.6. Payback Period

Dalam perhitungan *Payback Period* akan memperhitungkan berapa lama jangka waktu yang diperlukan untuk menfembalikan biaya yang dikeluarkan untuk proyek PLTM Sion. Untuk lebih jelasnya dapat melihat perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Biaya}}{\text{Rerata Manfaat}} = \frac{\text{Rp } 463.825.496.434,55}{\text{Rp } 34.188.232.647,97} = 13,6 \text{ Tahun}$$

4.9.7. Sensitivitas

Dalam perhitungan sensitivitaas akan memeperhitungkan beberapa siimulai untuk mengetahui bata-batas ekonomi yang dapat di toleransi selama 20 tahun kedepan disaat PLTM Sion dapat di dimanfaatkan. Untuk lebih jelasnya dapat melihat perhitungan sebagai berikut:

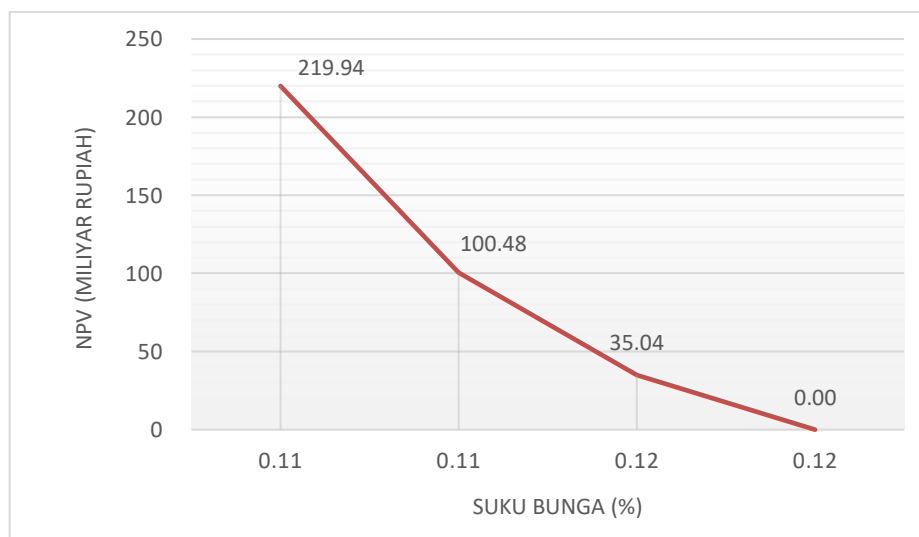
A. Kenaikan Suku Bunga

Dalam perhitungan sensitivitas bagian kenaikan suku bunga akan memperhitungkan berapa besar suku bunga yang ditoleransi agar proyek PLTM Sion tetap mendapatkan keuntungan ($BCR > 1$). Untuk lebih jelasnya dapat melihat perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.101 Hubungan Suku Bunga dengan NPV

| Suku Bunga | NPV |
|------------|-----------------------|
| 10,50% | Rp 219.939.156.524,94 |
| 11% | Rp 100.476.224.377,24 |
| 12% | Rp 35.041.021.890,96 |
| 12,44% | Rp 0 |

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.34 Hubungan Suku Bunga dengan NPV

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

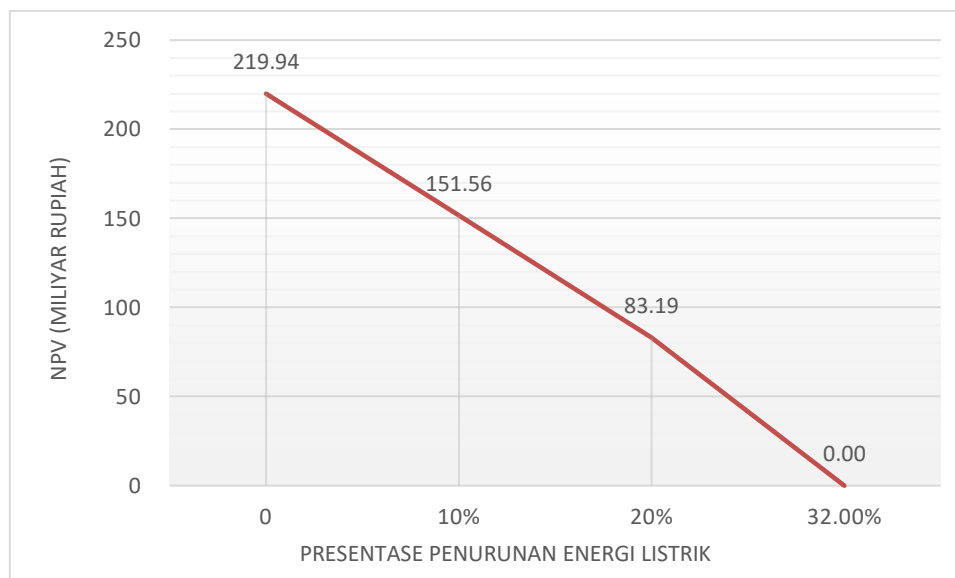
B. Produksi Energi Listrik Menurun dan Biaya Tetap

Dalam perhitungan sensitivitas bagian produksi energi listrik menurun dan biaya tetap akan memperhitungkan berapa besar energi yang ditoleransi agar proyek PLTM Sion tetap mendapatkan keuntungan ($BCR > 1$) dengan menganggap biaya yang dikeluarkan tetap (Suku Bunga = 10,50%). Untuk lebih jelasnya dapat melihat perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.102 Hubungan Energi dengan NPV

| Produksi Energi 20 Tahun | | Biaya | Manfaat | BCR | NPV |
|--------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|
| Persentase Turun | KWh (20 Tahun) | | | | |
| 0 | 1.601.329.047,60 | Rp 463.825.496.434,55 | Rp 683.764.652.959,50 | 1,47 | Rp 219.939.156.524,94 |
| 10% | 1.441.196.142,84 | Rp 463.825.496.434,55 | Rp 615.388.187.663,55 | 1,33 | Rp 151.562.691.228,99 |
| 20% | 1.281.063.238,08 | Rp 463.825.496.434,55 | Rp 547.011.722.367,60 | 1,18 | Rp 83.186.225.933,04 |
| 32.00% | 1.088.903.752,37 | Rp 463.825.496.434,55 | Rp 463.825.496.434,55 | 1,00 | Rp 0 |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.35 Hubungan Energi dengan NPV

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

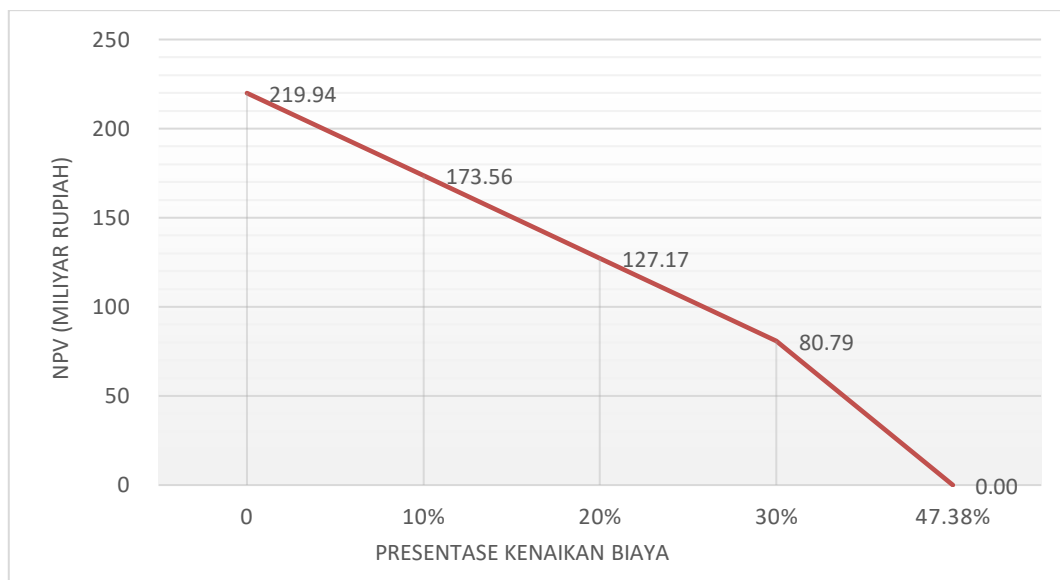
C. Produksi Energi Listrik Tetap dan Biaya Meningkat

Dalam perhitungan sensitivitas bagian produksi energi listrik tetap dan biaya meningkat akan memperhitungkan berapa besar biaya yang ditoleransi agar proyek PLTM Sion tetap mendapatkan keuntungan ($BCR > 1$) dengan menganggap energi yang dihasilkan tetap (Suku Bunga = 10,50%). Untuk lebih jelasnya dapat melihat perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.103 Hubungan Biaya dengan NPV

| Biaya | | Manfaat | BCR | NPV | |
|-----------------|--------------------|-----------------------|------|-----------------------|--|
| Persentase Naik | Rp | | | | |
| 0 | 463.825.496.434,55 | Rp 683.764.652.959,50 | 1,47 | Rp 219.939.156.524,94 | |
| 10% | 510.208.046.078,01 | Rp 683.764.652.959,50 | 1,34 | Rp 173.556.606.881,49 | |
| 20% | 556.590.595.721,47 | Rp 683.764.652.959,50 | 1,23 | Rp 127.174.057.238,03 | |
| 30% | 602.973.145.364,92 | Rp 683.764.652.959,50 | 1,13 | Rp 80.791.507.594,58 | |
| 47,38% | 683.764.652.959,50 | Rp 683.764.652.959,50 | 1,00 | Rp 0, | |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.36 Hubungan Biaya dengan NPV

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

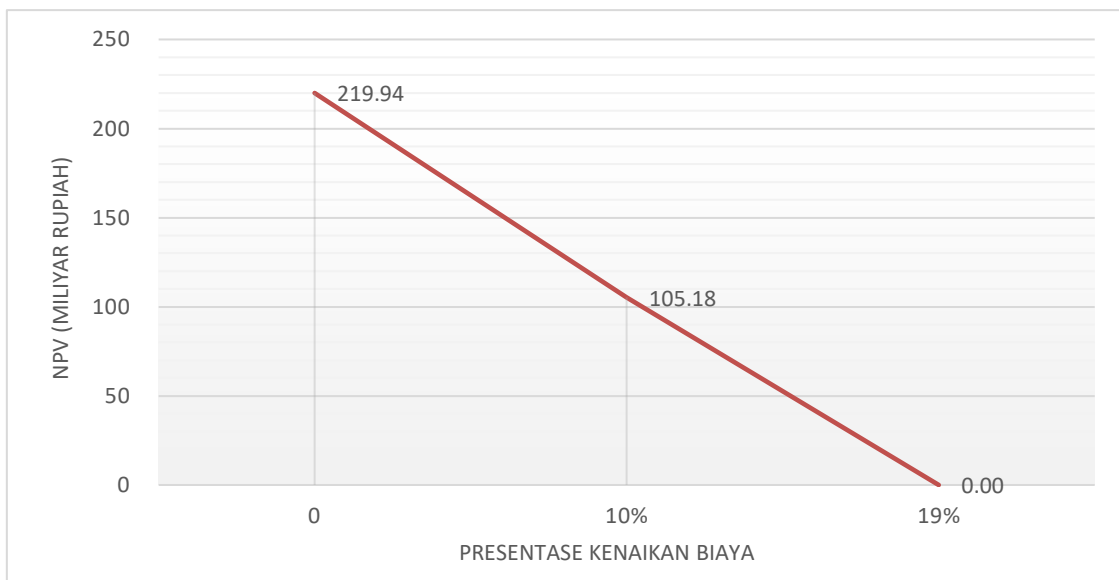
D. Produksi Energi Listrik Menurun dan Biaya Meningkat

Dalam perhitungan sensitivitas bagian produksi energi listrik menurun dan biaya meningkat akan memperhitungkan berapa besar biaya dan energi yang ditoleransi agar proyek PLTM Sion tetap mendapatkan keuntungan ($BCR > 1$) dengan menganggap energi yang dihasilkan meningkat dan biaya meningkat. Untuk lebih jelasnya dapat melihat perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.104 Hubungan Biaya dengan Manfaat

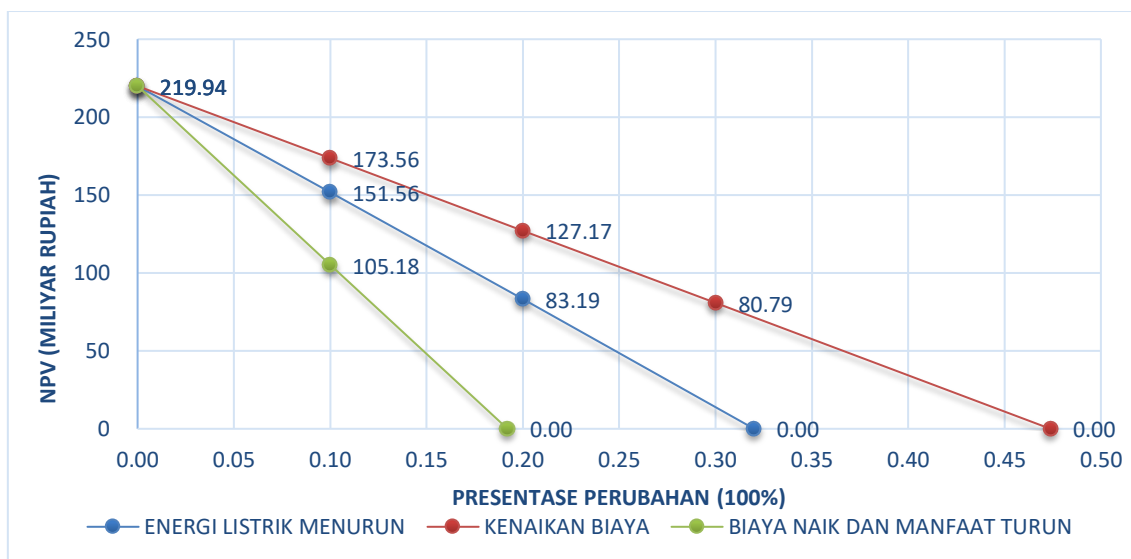
| Biaya | | Manfaat | | BCR | NPV |
|-----------------|--------------------|------------------|--------------------|------|-----------------------|
| Persentase Naik | Rp | Persentase Turun | Rp | | |
| 0 | 463.825.496.434,55 | 0 | 683.764.652.959,50 | 1,47 | Rp 219.939.156.524,94 |
| 10% | 510.208.046.078,01 | 10% | 615.388.187.663,55 | 1,21 | Rp 105.180.141.585,54 |
| 19,2% | 551.801.159.044,53 | 19,2% | 551.801.159.044,53 | 1,00 | Rp , |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

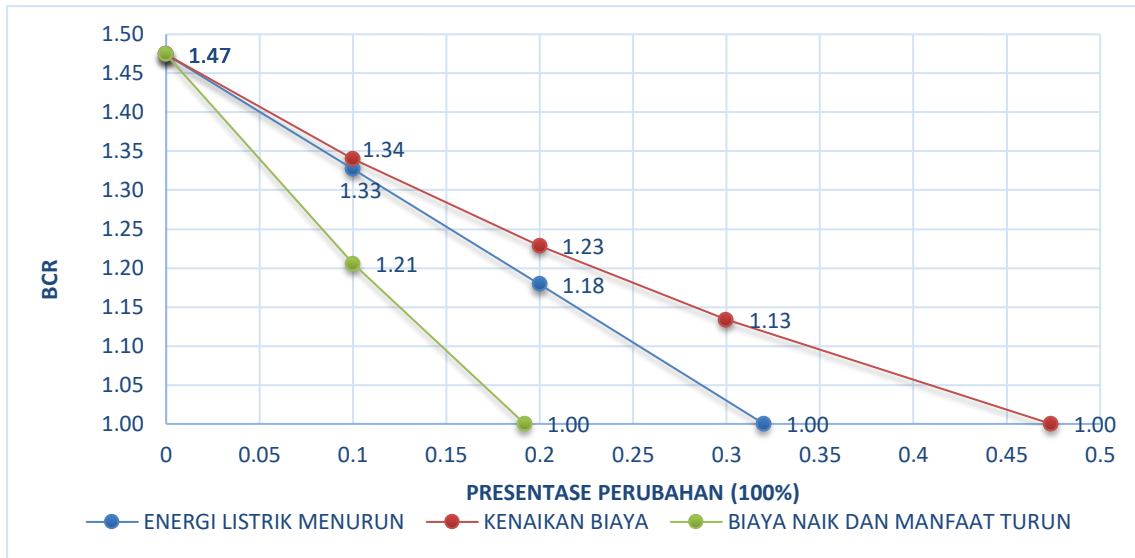


Gambar 4.37 Hubungan Biaya dan Energi dengan NPV
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

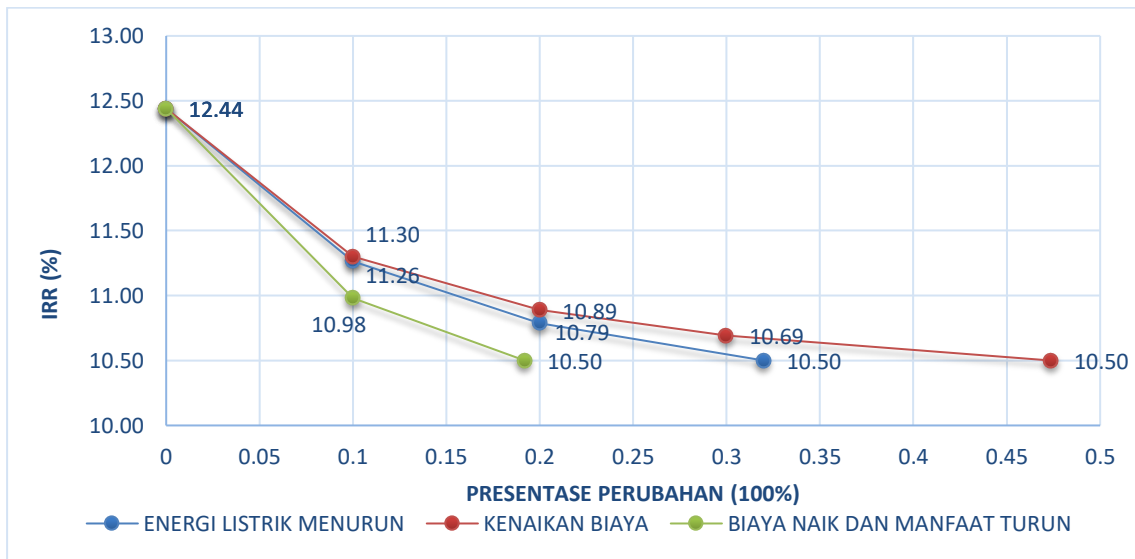
Setelah dilakukan berbagai sensitivitas dalam analisa ekonomi yang telah diperhitungkan di atas, maka untuk mempermudah informasi mengenai sensitivitas akan di tampilkan beberapa grafik hubungan terhadap setiap perubahan sebagai berikut:



Gambar 4.38 Hubungan Setiap Perubahan dengan NPV
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.39 Hubungan Setiap Perubahan dengan BCR
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.40 Hubungan Setiap Perubahan dengan IRR
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil Analisa dan perhitungan yang telah dilakukan dengan memperhatikan rumusan masalah pada bab sebelumnya, maka kesimpulan dalam studi ini sebagai berikut:

1. Dalam perhitungan Analisa Hidrologi didapatkan hasil Debit Banjir Rancangan yang digunakan dalam studi perencanaan PLTM Sion adalah 682,307 m³/detik dan untuk Debit Andalan yang digunakan sebagai debit pembangkit adalah debit dengan keandalan 40% sebesar 15,88 m³/detik.
2. Untuk hasil perhitungan dimensi bangunan dalam studi perencanaan PLTM Sioan adalah sebagai berikut:
 - Bendung direncanakan lebar 56 meter dengan 3 pintu pembilas yang masing-masing pintu direncanakan dengan lebar 1,5 meter. Untuk peredam energi yang digunakan adalah tipe bak tenggelam dengan jari-jari bak 6 meter.
 - Bangunan pemangmbilan atau intake direncanakan menggunakan 3 pintu dengan lebar masing-masing pintu 1,5 meter dan tinggi ambangnya 2 meter.
 - Saluran Pengarah direncanakan dengan lebar saluran 5,7 meter.
 - Bak Pengendap direncanakan dengan lebar endapan 8,6 meter dan panjang endapan 60,3 meter.
 - Saluran Pembawa direncanakan dengan lebar saluran 5 meter dan Panjang saluran 2.346 meter.
 - Pipa Pesat direncanakan dengan diameter pipa 2,5 meter dan ketebalan 25 mm.
 - Bak Penenang direncanakan dengan volume bak penenang sebesar 2.176,87 m³, Panjang 112 meter, dan lebar pelimpah 38 meter.
 - Saluran pembuang direncanakan dengan lebar 5 meter.
3. Dalam perhitungan Daya dan Energi dengan tinggi jatuh efektif sebesar 73,55 meter didapatkan Daya sebesar 11.630,58 kW dan Energi 67.992.369,58 kWh dalam satu tahun.

4. Untuk Hasil Analisa Ekonomi berdasarkan energi yang dihasilkan dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Bunga Bank = 10,50 %
- Biaya Total = Rp 463.825.496.434,55
- Keuntungan 20 Tahun = Rp 683.764.652.959,50
- *Benefit Cost Ratio* (BCR) = 1,47
- *Net Present Value* (NPV) = Rp 219.939.156.524,94
- *Internal Rate of Return* (IRR) = 12,44 %
- *Payback Period* = 13,6 Tahun

5.2. Saran

Dari studi perencanaan ini dapat diketahui bahwa pembangunan PLTM Sion yang terletak di Sungai Aek Simonggo, Desa Sion, Kabupaten Humbang Hasundutan, Provinsi Sumatera Utara secara Teknik maupun ekonomi dapat dilaksanakan. Agar PLTM Sion ini dapat direalisasikan dengan baik dan memberikan manfaat yang optimal maka penulis memberikan saran sebagai berikut:

- Sebaiknya ada keseriusan dari pihak pemerintah baik pemerintah daerah maupun pusat untuk mendukung pembangunan PLTM Sion sebagai pemanfaatan energi terbarukan sesuai Peraturan Presiden No.5 tahun 2006 meningkat sampai 15% di tahun 2025.
- Sebaiknya diadakan program atau konsep pembangunan berkelanjutan dalam pembangunan PLTM Sion, yaitu dengan upaya melibatkan pemerintah dan masyarakat untuk menjaga kelestarian DAS Aek Simonggo agar ketersediaan debit tetap terjaga.

DAFTAR PUSTAKA

- Arduser, C. (2009). *Civil works for micro hydro power units*. India: Institute of Civil Engineering, Grundestrasse 40.
- Badan Standarisasi Nasional. (2015). *Standar Nasional Indonesia (SNI) SNI 6738:2016 Perhitungan Debit Andalan Sungai..* Jakarta : Dewan Standarisasi Indonesia.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *Standar Nasional Indonesia (SNI) SNI 2415:2016 Metode Hitung Debit Banjir*. Jakarta : Dewan Standarisasi Indonesia.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. Mc Graw Hill.
- Dandekar, M., & Sharma, K. (1991). *Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Departemen ESDM. (2009). *Buku 2A Buku Pedoman Studi Kelayakan Hidrologi Pembangunan PLTMH*. Jakarta : IMIDAP
- Departemen ESDM. (2009). *Buku 2B Buku Pedoman Studi Kelayakan Sipil Pembangunan PLTMH*. Jakarta : IMIDAP
- Departemen ESDM. (2008). *Pedoman Teknis Standarisasi Peralatan dan Komponen Pemabngkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)*. Jakarta : IMIDAP
- European Small Hydropower Association. 2004. *Guide on How to Develop a Small Hydropower*. Belgium: ESHA
- Indarto. (2012). *Dasar Teori dan Contoh Aplikasi Model Hidrologi*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Indian Institute of Technology Roorke. (2013). *STANDARTS/MANUALS/GUIDELINES FOR SMALL HYDRO DEVELOPMENT*.
- International Finance Corporation. (2016). *Hydroelectric Power A Guide for Developers and Investors*. Stuttgart : FICHTNER
- JICA. (2011). *Guideline and Manual for Hydropower Development Vol. 1 Conventional Hydropower and Pumped Storage Hydropower* . JP Design Co., Ltd.
- JICA, IBEKA. (2003). *Manual Pembangunan PLTMH*. Jakarta.
- Kementrian Pekerjaan Umum. (2013). *Standar Perencanaan Irigasi-Kriteria Perencanaan 02 (KP-02)*. Jakarta: Badan Penerbit Departemen Pekerjaan Umum.
- Kumar A. dan Schei T. 2011. *Hydropower. In IPCC Special Report on Renewable Energy Resources and Climate Change Mitigation*. New York, UK : Cambridge University Press.
- Limantara, L. M. (2010). *Hidrologi Praktis*. Bandung: Lubuk Agung.

Novak, P. (2007). *Hydraulic Structures*. London: Taylor & Francis.

Patty, O. (1995). *Tenaga Air*. Surabaya: Erlangga.

Ramos, H. (2000). *Guideline Design of Small Hydropower Plants*. Ireland: WREAN & DED.

Retscreen International. (2004). *Small Hydro Project Analysis*. Canada: Minister of Natural Resources Canada.

Soemarto, C., D. (1987). *Hidrologi Teknik*. Malang: Universitas Malang.

Soetopo, W., & Limantara, L. (2011). *Statitika Hidrologi (Dasar)*. Malang: Citra Malang.

Suwarno, (1995). *Hidrologi Jilid 1*. Bandung: NOVA.

Tradmojo, B. (2008) *Hidrologi Terapan*. Bandung: Betta Offset.

Varshney, R. (1986). *Hydro Power Structures*. New Delhi: Nem Chand & Bros Roorkee.