

TUGAS AKHIR

**ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI
TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES**

**Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan Pendidikan
Program Sarjana (S1) Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Islam Sultan Agung**



Disusun oleh:

Muhammad Mujiburrahman

NIM 3.02.019.00252

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021**



LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBRES

Oleh:



Muhammad Mujiburrahman

NIM 3.02.019.00252

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, 4 Agustus 2021

Tim Pengaji

Ari Sentani, S.T., M.Sc.

Ir. Moh Faiqun Ni'am, M.T., Ph.D.

Prof. Dr. Ir. S. Imam Wahyudi, D.E.A.

Tanda Tangan

Universitas Islam Sultan Agung

Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik

Ketua,

M. Rusli Ahyar, S.T., M.Eng.



BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No:.....

Pada hari ini tanggal 28-07-2021 berdasarkan Surat Keputusan Rektor Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) Semarang perihal penunjukan dosen pembimbing dan asisten dosen pembimbing:

1. Nama : Ari Sentani, S.T., M.Sc.
Jabatan Akademik : Asisten Ahli
Jabatan : Dosen Pembimbing I
2. Nama : Ir. Moh Faiqun Ni'am, M.T., Pd.D.
Jabatan Akademik : Lektor
Jabatan : Dosen Pembimbing II

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut di bawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir/Skripsi:

Nama : Muhammad Mujiburrahman
NIM : 3.02.019.00252

Judul: Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes

Dengan tahapan sebagai berikut:

No.	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing	11-04-2021	
2	Proposal	14-04-2021	ACC
3	Pengumpulan Data	25-09 s.d. 02-11-2020	
4	Analisis data	03-11 s.d. 22-2-2021	
5	Penyusunan laporan	03 s.d. 27-07-2021	
6	Selesai laporan	28-07-2021	ACC

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir/Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan.

Pembimbing I

Ari Sentani, S.T., M.Sc.

Pembimbing II

Ir. Moh Faiqun Ni'am, M.T., Ph.D.

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

M. Rusli Alayyar, S.T. M.Eng.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Mujiburrakman

NIM : 3.02.019.00252

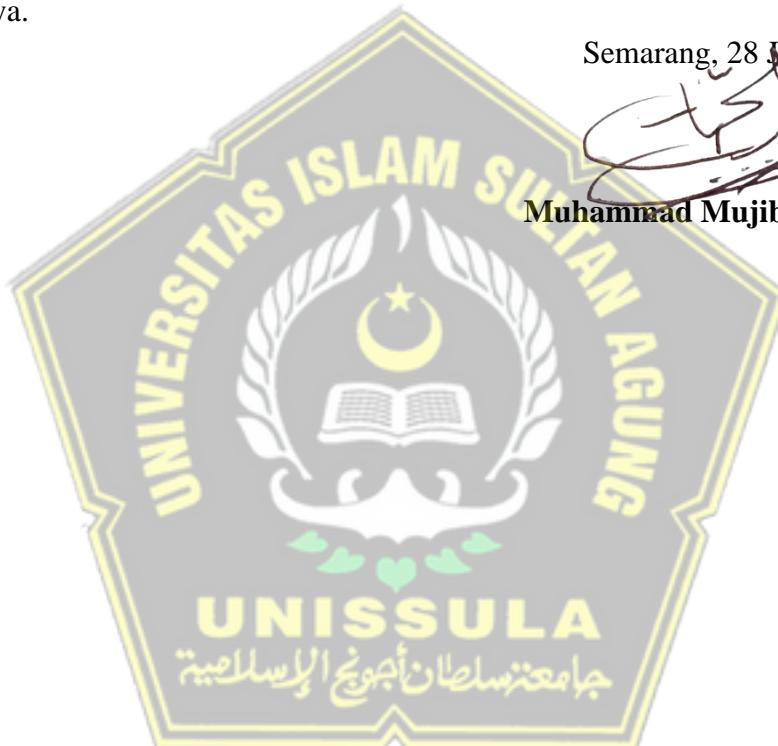
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes” benar bebas dari plagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Semarang, 28 Juli 2021



Muhammad Mujiburrakhman



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Mujiburrahman

NIM : 3.02.019.00252

Judul Tugas Akhir : Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran, dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah di Universitas Islam Sultan Agung atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Semarang, 28 Juli 2021


Muhammad Mujiburrahman

MOTTO

- “*Believing is good, but checking is better*”
“Maykini itu baik, tetapi memeriksa lebih baik” (B. J. Habibie, 2006)
- “Jangan kita hanya melihat pohon dari hutan yang sedang menagalami kebakaran, dan melupakan bahkan tidak memerhatikan hutan, yang seharusnya diselamatkan dari kebakaran” (B. J. Habibie, 2006: 295, Detik-Detik yang Menentukan)
- “*The problem we face in the world are the problem of values, and the root of the values is to synergize of Your culture, Your religion (or belief), and Your ability to think scientifically*”
“Masalah yang kita hadapi di dunia adalah masalah nilai-nilai, dan akar dari nilai-nilai tersebut adalah menyinergikan budayamu, agama (atau keyakinanmu), dan kemampuanmu untuk berpikir secara ilmiah” (B. J. Habibie, 2016: President Habibie on Indonesian Democracy, Carnegie Endowment International Peace)
- “Anak lelaki tak perlu dihiraukan panjang, hidupnya ialah untuk berjuang. Kalau perahunya telah dikayuhnya ke tengah, dia tak boleh surut meski bagaimana besar gelombang. Biarkan kemudi patah, biarkan layar robek, itu lebih mulia dari pada membalik haluan pulang” (Buya Hamka)

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadirat Allah Yang Maha Kuasa, atas berkat rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada:

1. Bapak Hendroyono dan Ibu Ngabidah Sri Hartini tercinta sebagai bukti terimakasih atas seluruh pengorbanan yang dilakukan dalam menjaga dan mendidik saya dengan penuh kasih sayang dan ikhlas.
2. Mas Muhammad Habiburrahman terhormat sebagai bukti terimakasih atas usaha yang selama ini dilakukan untuk menjaga saya dari segala keburukan.
3. Negara dan Bangsa Republik Indonesia sebagai wujud pengabdian kecil saya dalam memenuhi tanggung jawab sebagai sebagi generasi muda bangsa.



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah Yang Maha Kuasa, atas berkat rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analaisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes” sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjan Teknik Program Studi Teknik Sipil di Univesitas Islam Sultan Agung. Penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak, dan dalam kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Bapak Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung yang telah memberikan kelancaran pelayanan dalam urusan akademik.
2. Bapak Ari Sentani, S.T., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing I yang selalu memberikan waktu dan arahan bimbingan selama penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Moh Faiqun Ni'am, M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang selalu memberikan waktu dan arahan bimbingan selama penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil Univeristas Islam Sultan Agung yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
5. Seluruh Staf Pabrik Teh Hitam Kaligua yang telah dengan sangat baik membantu penulis dalam pengumpulan data di lapangan.

Semoga segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan dari Allah Yang Maha Pengasih. Penulis menyadari bahwa pada Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca.

Semarang, Juli 2021



Muhammad Mujiburrakhman

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
MOTTO	v
PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR PERSAMAAN	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xix
DAFTAR NOTASI.....	xx
DAFTAR SINGKATAN	xxvi
ABSTRAK	xxviii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Keaslian Gagasan	2
1.5. Tujuan	3
1.6. Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Air	5
2.1.1. Keunggulan PLTA	5
2.1.2. Kekurangan PLTA	6
2.2. Konfigurasi Bangunan PLTA	6
2.2.1. PLTA <i>Run-of-River</i>	6

2.2.2. PLTA <i>Storage</i>	7
2.2.3. PLTA <i>Pumped Storage</i>	8
2.2.4. PLTA <i>in-Stream</i>	9
 2.3. Prinsip Dasar PLTA.....	10
2.3.1. Daya Listrik.....	10
2.3.2. Debit Andalan	11
2.3.3. Tinggi Energi Bersih	12
2.3.4. Efisiensi PLTA.....	14
2.3.5. Skala Daya PLTA	15
 2.4. Simulasi Debit Rerata Mock.....	16
2.4.1. Uji Konsistensi Data Hujan	17
2.4.2. Evapotranspirasi.....	19
2.4.3. Surplus Air	20
2.4.4. Aliran Dasar dan Limpasan Langusng.....	21
2.4.5. Debit Rerata Sungai	22
2.4.6. Validasi Debit Sumulasi.....	22
 2.5. Karakteristik Daerah Pengaliran Sungai.....	23
2.5.1. Lahan Terbuka	24
2.5.2. Kapaistas Kelembaban Tanah	24
2.5.3. Faktor Infiltrasi.....	24
2.5.4. Koefisien Resesi Aliran.....	25
 2.6. Evapotranspirasi Acuan Penman-Monteith	25
2.6.1. Data Analisis	25
2.6.2. Langkah Analisis.....	26
 2.7. Kehilangan Tinggi Energi	31
2.7.1. Kehilangan Mayor.....	33
2.7.2. Kehilangan Minor	35
 2.8. Perencanaan Pipa Pesat	36
2.8.1. Diameter Luar	36

2.8.2. Tebal Dinding.....	37
2.8.3. Jarak Tumpuan	40
2.8.4. Lokasi Sambungan	42
2.9. Perencanaan Awal Turbin	43
2.9.1. Kecapatan Spesifik.....	43
2.9.2. Kecepatan Rotasional.....	44

BAB III METODELOGI

3.1. Jenis Tugas Akhir	46
3.2. Subjek dan Objek Analisis	46
3.3. Variabel Analisis	47
3.4. Data Analisis.....	47
3.4.1. Data Klimatologi.....	47
3.4.2. Data Geografi	47
3.4.3. Data Curah Hujan.....	47
3.4.4. Model Elevasi Digital	48
3.5. Prosedur Analisis	48
3.5.1. Analisis Evapotranspirasi Acuan	48
3.5.2. Pengujian Konsistensi Data Debit.....	49
3.5.3. Semulasi Debit Rerata Sungai.....	50
3.5.4. Validasi Data Debit Simulasi	51
3.5.5. Pembuatan Kurva Aliran-Durasi.....	52
3.5.6. Perencanaan Penampang Pipa Pesat	53
3.5.7. Perencanaan Jarak Tumpuan Pipa Pesat	55
3.5.8. Penentuan Kehilangan Tinggi Energi	56
3.5.9. Penentuan Daya PLTA.....	57
3.5.10. Perencanaan Awal Turbin	58

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Rencana Tata Letak Bangunan	60
4.2. Daerah Pengaliran Sungai	61
4.3. Evapotranspirasi Acuan	62

4.3.1. Data Kliamtologi.....	62
4.3.2. Data Geografi	65
4.3.3. Hasil Analisis Evapotranspirasi	65
4.4. Debit Rerata Simulasi.....	68
4.4.1. Uji Konsistensi Data Hujan.....	68
4.4.2. Karakteristik Daerah Pengaliran Sungai	70
4.4.3. Hasil Simulasi Debit	71
4.4.4. Validasi Data Debit Simulasi	74
4.5. Debit Andalan.....	75
4.6. Rencana Pipa Pesat.....	78
4.6.1. Diameter Luar	78
4.6.2. Tebal Dinding.....	80
4.6.3. Jarak Tumpuan dan Sambungan	85
4.7. Potensi PLTA	88
4.7.1. Kehilangan Tinggi Energi Mayor	88
4.7.2. Kehilangan Tinggi Energi Minor	89
4.7.3. Daya Listrik.....	90
4.8. Rencana Turbin Pelton	92
4.8.1. Kecapatan Spesifik dan Rotasional.....	92
4.8.2. Lingkaran <i>Pitch</i> dan Jumlah Sudu	93
4.8.3. Jumlah dan Dimensi Sudu.....	95
4.8.4. Dimensi <i>Nozzle</i>	98
4.9. Rekapitulasi Hasil Analisis.....	100
BAB V PENUTUP	
5.1. Kesimpulan.....	102
5.2. Saran	102
DAFTAR PUSTAKA	103
LAMPIRAN	107

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Efisiensi Turbin PLTA.....	14
Tabel 2.2. Efisiensi Generator PLTA.....	15
Tabel 2.3. Klasifikasi Daya Terpasang PLTA	16
Tabel 2.4. Penyimpangan Homogenitas Data Curah Hujan Kritis	19
Tabel 2.5. Massa Jenis dan Viskositas Kinemtik Air.....	33
Tabel 2.6. Koefisien Kehilangan Energi Minor Aksesoris Pipa Pesat	35
Tabel 2.7. Rentang Kecepatan Spesifik Nirdimensi Turbin	44
Tabel 2.8. Kecepatan Rotasional Sinkron Generator.....	45
Tabel 4.1. Data Temperatur Udara Rerata	62
Tabel 4.2. Data Kelembaban Udara Relatif	63
Tabel 4.3. Data Kecapatan Angin Rerata.....	63
Tabel 4.4. Data Durasi Penyinaran Matahari	64
Tabel 4.5. Rekapitulasi Hasil Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening.....	65
Tabel 4.6. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2009.....	66
Tabel 4.7. Data Curah Hujan Bulanan Kebun Kaligua.....	68
Tabel 4.8. Data Jumlah Hari Hujan Kebun Kaligua	68
Tabel 4.9. Parameter Statistik Curah Hujan Tahunan dalam Pengujian Konsistensi.....	69
Tabel 4.10. Rekapitulasi Hasil Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening.....	71
Tabel 4.11. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2009	72
Tabel 4.12. Parameter Statistik dalam Penentuan Koefisien Korelasi antara Data Curah Hujan dan Debit Rerata Simulasi	74
Tabel 4.13. Rekapitulasi Hasil Analisis Kekuatan Hubungan antara Data Curah Hujan dan Debit Rerata Simulasi.....	75
Tabel 4.14. Pengurutan Data Debit Rerata.....	76
Tabel 4.15. Parameter Sumbu Kurva Aliran-Durasi	77
Tabel 4.16. Data Dimensi Umum Rencana Pipa Pesat	79
Tabel 4.17. Rekapitulasi Hasil Analisis Tebal Dinding Minimum Pipa Pesat berdasarkan Tekanan Hidrostatik	82

Tabel 4.18. Rekapitulasi Hasil Analisis Tebal Dinding Minimum Pipa Pesat berdasarkan Tekanan Hidrostatik dan <i>Water Hammer</i>	84
Tabel 4.19. Rekapitulasi Hasil Analisis Jarak Tumpuan Maksimum Pipa Pesat .	87
Tabel 4.20. Rekapitulasi Hasil Analisis Kehilangan Tinggi Energi Minor dalam Pipa Pesat	90
Tabel 4.21. Parameter Penentuan Dimensi Bagian Utama Sudu Roda Pelton	97
Tabel 4.22. Hasil Penentuan Dimensi Bagian Utama Sudu Roda Pelton	97
Tabel 4.23. Hasil Penentuan Dimensi Bagian Utama <i>Nozzle</i> Turbin Pelton	100
Tabel 4.24. Data Rencana PLTA Kaligua.....	101



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Ilustrasi Konfigurasi Bangunan PLTA secara Umum	6
Gambar 2.2. Ilustrasi PLTA <i>Run-of-River</i>	7
Gambar 2.3. Ilustrasi PLTA <i>Storage</i>	8
Gambar 2.4. Ilustrasi PLTA <i>Pumped Storage</i>	8
Gambar 2.5. Ilustrasi PLTA <i>in-Stream</i>	9
Gambar 2.6. Contoh Kurva Aliran-Durasi Sungai.....	12
Gambar 2.7. Ilustrasi Tinggi Energi pada PLTA	13
Gambar 2.8. Diagram Penentuan Turbin	15
Gambar 2.9. Skema Keseimbangan Air dalam Siklus Hidrologi.....	17
Gambar 2.10. Skema Simulasi Debit Rerata Sungai Mock	17
Gambar 2.11. Ilustrasi Daerah Pengaliran Sungai	23
Gambar 2.12. Gradien Energi dan Hidrolik Aliran Tertutup Penampang Konstan.....	32
Gambar 2.13. Diagram Moody	34
Gambar 2. 14. Ilustrasi Penampang Pipa Pesat dan Tekanan Air	37
Gambar 2. 15. Ilustrasi Struktur Tumpuan Pipa Pesat yang Sering Digunakan ...	40
Gambar 2.16. Model Struktur, Diagram Momen Lentur, dan Diagram Defleksi Pipa Pesat antara Dua Tumpuan Angkur.....	41
Gambar 2.17. Ilustrasi Sambungan Ekspansi Jenis Lengan.....	42
Gambar 3.1. Lokasi Sungai dan Mata Air Tuk Bening	46
Gambar 3.2. Prosedur Analisis Potensi PLTA Sungai Tuk Bening.....	48
Gambar 3.3. Diagram Alir Pengujian Konsistensi Data Debit Metode RAPS	49
Gambar 3.4. Diagram Alir Simulasi Debit Rerata Sungai Bulanan Metode Mock	50
Gambar 3.5. Diagram Alir Validasi Data Debit Simulasi berdasarkan Koefisien Korelasi	52
Gambar 3.6. Diagram Alir Pembuatan Kurva Aliran-Durasi	53
Gambar 3.7. Diagram Alir Perencanaan Penampang Pipa Pesat	54
Gambar 3.8. Diagram Alir Perencanaan Jarak Tumpuan Pipa Pesat.....	55
Gambar 3.9. Diagram Alir Penentuan Kehilangan Tinggi Energi	56

Gambar 3.10. Diagram Alir Penentuan Daya PLTA	58
Gambar 3.11. Diagram Alir Perencanaan Awal Turbin.....	59
Gambar 4.1. Rencana Tata Letak Bangunan PLTA Kaligua	60
Gambar 4.2. Daerah Pengaliran Sungai Tuk Bening	61
Gambar 4.3. Kurva Aliran-Durasi Sungai Tuk Bening	77
Gambar 4.4. Potongan Medan Memanjang Rencana Pipa Pesat	79
Gambar 4.5. Rencana Penampang Pipa Pesat PLTA Kaligua	85
Gambar 4.6. Penempatan Tumpuan dan Sambungan Pipa Pesat PL2.4	88
Gambar 4.7. Ilustrasi Turbin Pelton.....	92
Gambar 4.8. Ilustrasi Lingkaran Pitch Roda Pelton.....	94
Gambar 4.9. Rencana Roda Turbin Pelton.....	96
Gambar 4.10. Dimensi Bagian Utama Sudu Roda Pelton	97
Gambar 4.11. Detail Rencana Sudu Roda Turbin Pelton	98
Gambar 4.12. Bagian Utama Nozzle Turbin Pelton	99
Gambar 4.13. Dimensi Rencana Nozzle Turbin Pelton.....	100



DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1	10
Persamaan 2.2	11
Persamaan 2.3	12
Persamaan 2.4	13
Persamaan 2.5	14
Persamaan 2.6	14
Persamaan 2.7	18
Persamaan 2.8	18
Persamaan 2.9	18
Persamaan 2.10	18
Persamaan 2.11	18
Persamaan 2.12	19
Persamaan 2.13	19
Persamaan 2.14	20
Persamaan 2.15	20
Persamaan 2.16	20
Persamaan 2.17	21
Persamaan 2.18	21
Persamaan 2.19	21
Persamaan 2.20	21
Persamaan 2.21	21
Persamaan 2.22	22
Persamaan 2.23	22
Persamaan 2.24	23
Persamaan 2.25	26
Persamaan 2.26	26
Persamaan 2.27	27
Persamaan 2.28	27
Persamaan 2.29	27
Persamaan 2.30	28
Persamaan 2.31	28

Persamaan 2.32	28
Persamaan 2.33	28
Persamaan 2.34	29
Persamaan 2.35	29
Persamaan 2.36	29
Persamaan 2.37	29
Persamaan 2.38	30
Persamaan 2.39	30
Persamaan 2.40	30
Persamaan 2.41	30
Persamaan 2.42	31
Persamaan 2.43	31
Persamaan 2.44	31
Persamaan 2.45	32
Persamaan 2.46	33
Persamaan 2.47	33
Persamaan 2.48	33
Persamaan 2.49	34
Persamaan 2.50	34
Persamaan 2.51	35
Persamaan 2.52	37
Persamaan 2.53	37
Persamaan 2.54	38
Persamaan 2.55	38
Persamaan 2.56	38
Persamaan 2.57	39
Persamaan 2.58	39
Persamaan 2.59	39
Persamaan 2.60	39
Persamaan 2.61	41
Persamaan 2.62	41
Persamaan 2.63	42

Persamaan 2.64	42
Persamaan 2.65	43
Persamaan 2.66	44
Persamaan 2.67	44
Persamaan 4.1	94
Persamaan 4.2	94
Persamaan 4.3	94
Persamaan 4.4	95
Persamaan 4.5	95
Persamaan 4.6	98



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2010 ...	108
Lampiran 2. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2011 ...	110
Lampiran 3. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2012 ...	112
Lampiran 4. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2013 ...	114
Lampiran 5. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2014 ...	116
Lampiran 6. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2015 ...	118
Lampiran 7. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2016 ...	120
Lampiran 8. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2017 ...	122
Lampiran 9. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2018 ...	124
Lampiran 10. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2019 .	126
Lampiran 11. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2010	128
Lampiran 12. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2011	130
Lampiran 13. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2012	132
Lampiran 14. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2013	134
Lampiran 15. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2014	136
Lampiran 16. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2015	138
Lampiran 17. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2016	140
Lampiran 18. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2017	142
Lampiran 19. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2018	144
Lampiran 20. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2019	146
Lampiran 21. Gambar Rencana PLTA Kaligua.....	148

DAFTAR NOTASI

A	$[L^2]$: Luas penampang basah
a	$[L \cdot T^{-1}]$: Kecapatan rambat gelombang kejut
BF	$[L]$: Aliran dasar
DR	$[L]$: Limpasan langsung
e	$[-]$: Efisiensi sambungan pipa pesat
ER	$[L]$: Selisih curah hujan terhadap evapotranspirasi aktual
F	$[L^2]$: Luas DPS
f	$[-]$: Faktor penutupan awan
f	$[-]$: Faktor gesekan Darcy-Weisbach
g	$[L \cdot T^{-2}]$: Percepatan gravitasi bumi = $9,81 \text{ m/s}^2$
G	$[-]$: Koefisien kemencengan data debit historis bulanan
h	$[L]$: Tinggi pusat massa benda terhadap bidang referensi
H	$[L]$: Tinggi energi hirdolik
I	$[L]$: Infiltrasi
I	$[L^4]$: Momen inersia kedua penampang pipa pesat
IF	$[L]$: Faktor infiltrasi DPS
$ISMS$	$[L]$: Kelembaban tanah permukaan pada bulan sebelumnya
J	$[-]$: Nomor urut hari Julian di suatu tahun
k	$[-]$: Koefisien kehilangan energi minor
m	$[M]$: Massa benda
m	$[-]$: Persentase lahan DPS yang tidak tertutupi oleh vegetasi
M	$[-]$: Nomor urut bulan
n	$[-]$: Jumlah data
N	$[T]$: Lama waktu selama satu hari

n	[T]	: Durasi penyinaran matahari
n	[-]	: Koefisien kekasaran Manning
N	$[T^{-1}]$: Kecapatan rotasional turbin
P	$[M \cdot L^2 \cdot T^{-3}]$: Daya listrik PLTA
p	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$: Tekanan fluida atau tekanan rencana dalam pipa pesat
Q	$[L^3 \cdot T^{-1}]$: Debit air
R	[L]	: Curah hujan
r	[-]	: Koefisien korelasi antara data curah hujan dan data debit simulasi
R	$[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [M^{-1}] \cdot [\theta^{-1}]$: Konstanta gas sepsifik
RC	[L]	: Koefisiem resesi aliran DPS
Re	[-]	: Bilangan Reynolds
S	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$: Tegangan bahan pipa pesat yang diizinkan
SMC	[L]	: Kapasitas kelembaban tanah permukaan
SMS	[L]	: Kelembaban tanah permukaan
T	[T]	: Durasi pengaliran air
T	$[\theta]$: Temperatur udara rerata
t	[L]	: Tebal dinding pipa pesat
V	$[L^3]$: Volume air
v	$[L \cdot T^{-1}]$: Kecepatan aliran rerata
w	$[M \cdot L \cdot T^{-2}] \cdot [L^{-1}]$: Beban rencana
WS	[L]	: Surplus air
y	[-]	: Koefisien sifat bahan pipa pesat
z	[L]	: Elevasi DPS
c_p	$[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [M^{-1}] \cdot [\theta^{-1}]$: Panas spesifik udara lembab
D_{in}	[L]	: Diameter dalam pipa pesat
D_{out}	[L]	: Diameter luar pipa pesat
D_{pit}	[L]	: Diameter lingkaran <i>pitch</i> roda Pelton
d_{out}	[L]	: Diemeter pemasukan <i>nozzle</i> turbin Pelton

d_{jet}	[L]	: Diameter aliran jet <i>nozzle</i> turbin Pelton
d_{out}	[L]	: Diameter pengeluaran <i>nozzle</i> turbin Pelton
d_p	[L]	: Kedalaman tekanan hidrostatik
d_r	[-]	: Jarak relatif bumi terhadap matahari
e_a	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}]$: Tekanan uap aktual
E_e	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}]$: Modulus elastisitas pipa pesat
E_P	$[\text{M} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{T}^{-2}]$: Energi potensial gravitasi suatu benda di atas bumi
e_s	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}]$: Tekanan uap jenuh air
E_S	$[\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-2}]$: Energi potensial spesifik
Et_a	[L]	: Evapotranspirasi aktual
Et_o	[L]	: Evapotranspirasi acuan
GS_i	[L]	: Tampungan air tanah
GS_{i-1}	[L]	: Tampungan air tanah pada bulan sebelumnya
H_{gro}	[L]	: Tinggi energi kotor
H_k	[L]	: Tinggi energi kinetik
h_{los}	[L]	: Kehilangan tinggi energi
h_{maj}	[L]	: Kehilangan tinggi energi mayor
h_{min}	[L]	: Kehilangan tinggi energi minor
H_{net}	[L]	: Tinggi energi bersih
H_p	[L]	: Tinggi energi tekanan
H_z	[L]	: Tinggi energi elevasi
J_{ad}	[-]	: Tambahan nomor urut hari
K_w	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}]$: Modulus bulk air
n_d	[-]	: Jumlah hari kalender selama satu bulan
n_Q	[-]	: Jumlah data debit yang lebih dari atau sama skala debit Q
N_{QE}	[-]	: Kecapatan spesifik nirdimensi turbin
n_{buc}	[-]	: Jumlah sudu roda Pelton
n_{noz}	[-]	: Jumlah <i>nozzle</i> turbin Pelton

n_R	[$-$]	: Jumlah hari hujan selama satu bulan
N_S	[T^{-1}]	: Kecapatan spesifik berdimensi turbin
p_{A0}	[$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]	: Tekanan atmosfer pada elevasi permukaan laut
p_{Az}	[$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]	: Tekanan atmosfer pada elevasi DPS
p_{ham}	[$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]	: Tekanan <i>water hammer</i>
Pr_Q	[$-$]	: Probabilitas waktu terpenuhi skala debit ke Q
p_{sta}	[$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]	: Tekanan hidrostatik
P_t	[$M \cdot L^2 \cdot T^{-3}$]	: Daya listrik teoritis PLTA
\bar{Q}	[$L^3 \cdot T^{-1}$]	: Rerata debit simulasi
Q_{ave}	[$L^3 \cdot T^{-1}$]	: Debit rerata sungai simulasi Mock
Q_i	[$L^3 \cdot T^{-1}$]	: Debit simulasi pada tahun atau bulan ke- i
\bar{R}	[L]	: Rerata curah hujan
R_a	[$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [L^{-2}$]	: Radiasi matahari ekstraterrestrial
R_i	[L]	: Curah hujan pada tahun atau bulan ke- i
R_{ld}	[$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [L^{-2}$]	: Radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh vegetasi dan tanah ke atmosfer
R_{ld}	[$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [L^{-2}$]	: Radiasi gelombang panjang yang dipancarkan dari atmosfer dan awan ke permukaan bumi
R_{nl}	[$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [L^{-2}$]	: Radiasi gelombang panjang
R_s	[$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [L^{-2}$]	: Radiasi gelombang pendek
S_e	[$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]	: Tegangan pipa pesat yang diizinkan
S_k^{**}	[$-$]	: RAPS curah hujan tahun ke- i
S_k^*	[L]	: Penyimpangan kumulatif curah hujan tahun ke- i terhadap rerata curah hujan
s_{max}	[L]	: Jarak tumpuan maksimum
T_0	[θ]	: Temperatur udara pada elevasi permukaan laut
t_{cor}	[L]	: Tebal korosi pipa pesat
t_{min}	[L]	: Tebal dinding pipa pesat minimum
T_r	[T]	: Waktu refleksi gelombang kejut

U_2	$[L \cdot T^{-1}]$: Kecepatan angin pada ketinggian 2 m dari permukaan tanah
U_h	$[L \cdot T^{-1}]$: Kecapatan angin pada ketinggian anemometer
v_{jet}	$[L \cdot T^{-1}]$: Kecepatan aliran jet <i>nozzle</i> turbin Pelton
w_s	$[M \cdot L^{-1}]$: Beban pipa pesat
w_w	$[M \cdot L^{-1}]$: Beban air
y_{max}	[L]	: Defleksi maksimum pipa pesat (m)
z_0	[-]	: Elevasi permukaan laut = 0
ΔS_i	[L]	: Perubahan tampungan air di dalam tanah
ΔE_t	[L]	: Selisih evapotranspirasi
R/\sqrt{n}_{cal}	[-]	: Penyimpangan homogenitas data curah hujan
R/\sqrt{n}_{cri}	[-]	: Penyimpangan homogenitas data curah hujan kritis
α	[-]	: Koefisien pantulan radiasi tajuk = 0.23
β	[°]	: Sudut kemiringan pipa pesat terhadap garis horizontal
γ	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}] \cdot [\theta^{-1}]$: Konstanta psikometrik
Δ	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}] \cdot [\theta^{-1}]$: Kemiringan kurva tekanan udara jenuh air terhadap temperatur udara
δ	[rad]	: Deklinasi matahari
ϵ	[-]	: Perbandingan berat molekul uap air terhadap udara kering
ε	[L]	: Tinggi kekasaran dinding pipa pesat
ε'	[-]	: Emisivitas atmosfer
η	[-]	: Efisiensi PLTA
λ	$[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [M^{-1}]$: Panas laten untuk penguapan
μ	$[L^2 \cdot T^{-1}]$: Viskositas kinematik air
ρ	$[M \cdot L^{-3}]$: Massa jenis air
σ	$[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \cdot [M^{-2}] \cdot [\theta^{-4}]$: Konstanta Stefan-Boltzmann
σ	$[L^3 \cdot T^{-1}]$: Deviasi standar debit historis

τ	$[\theta \cdot L^{-1}]$: Kontanta <i>lapse rate</i> udara jenuh
φ	[rad]	: Koordinat lintang DPS
ϕ	[-]	: Kelembaban udara relatif
ε_a	[-]	: Emisivitas efektif atmosfer
ε_{vs}	[-]	: Emisivitas oleh vegetasi dan tanah
η_g	[-]	: Efisiensi generator
η_t	[-]	: Efisiensi turbin
ω_s	[rad]	: Sudut matahari terbenam



DAFTAR SINGKATAN

- ASME : *American Society of Mechanical Engineers*
ASTM : *American Society for Testing and Materials*
BT : Bujur Timur
CV : *Commanditaire Vennootschap* (Perseroan Komanditer)
DEM : *Digital Elevation Model*
DPS : Daerah Pengaliran Sungai
ESDM : Energi dan Sumber Daya Mineral
ESHA : *European Small Hydropower Association*
IESR : *Institute for Essential Services Reform*
GIS : *Geographic Information System*
IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*
LS : Lintang selatan
PLN : Perusahaan Listrik Negara
PLTA : Pembangkit Listrik Tenaga Air
PLTD : Pembangkit Listrik Tenaga Diesel
PLTU : Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PT : Persoran Terbatas
PTH : Pabrik Teh Hitam
PTPN 9 : PT Perkebunan Nusantara IX
RAPS : *Rescaled Adjusted Partial Sums*
RoR : *Run-of-river*
s.d. : Sampai dengan
SNI : Standar Nasional Indonesia
USBR : *United States Bureau of Reclamation*
cm : Centimeter
GPa : Gigapascal
GW : Gigawatt
h : *Hour* (jam)
Hz : Hertz
J : Joule

K	: Kelvin
kg	: Kilogram
kJ	: Kilojoule
km	: Kilometer
kPa	: Kilopascal
kW	: Kilowatt
l	: Liter
m	: Meter
mdpl	: Meter dari permukaan laut
MJ	: Megajoule
mm	: Milimeter
MPa	: Megapascal
MW	: Megawatt
N	: Newton
Pa	: Pascal
rad	: Radian
rpm	: Rotasi per-menit
rps	: Rotasi per-sekon
s	: Sekon
W	: Watt
°C	: Derajat Celsius



ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

Oleh:

Muhammad Mujiburrahman¹⁾, Ari Sentani²⁾, Moh Faiqun Ni'am²⁾

Abstrak

Pabrik Teh Hitam (PTH) Kaligua memiliki masalah dalam memenuhi kebutuhan listriknya. Sungai dan mata air Tuk Bening yang berlokasi di Kebun Kaligua berpotensi dijadikan sebagai sumber Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) untuk PTH Kaligua. Dalam tugas akhir ini, penulis menganalisis potensi PLTA Kaligua dengan melakukan analisis debit andalan, perencanaan pipa pesat, tinggi energi bersih, daya PLTA, dan perencanaan turbin.

Debit andalan ditentukan berdasarkan kurva aliran-durasi sungai Tuk Bening yang dibuat dari data debit rerata simulasi Mock. Dimensi penampang pipa pesat dipilih dari ASME B36.10M, di mana tebal dinding ditentukan berdasarkan tekanan rencana dengan mengacu pada ASME B31.1. Tinggi energi bersih ditentukan dengan mempertimbangkan kehilangan tinggi energi mayor dan minor dalam pipa pesat rencana. Daya PLTA ditentukan dengan mempertimbangkan perkiraan efisiensi dan turbin direncanakan berdasarkan debit rencana dan tinggi energi bersih.

Debit rencana dengan keandalan 80% adalah $0,174 \text{ m}^3/\text{s}$. Pipa pesat direncanakan dengan tinggi energi kotor $88,23 \text{ m}$, panjang 513 m , diameter dalam $388,92 \text{ mm}$, dan tebal dinding $8,74 \text{ mm}$. Total kehilangan tinggi energi dalam pipa pesat rencana adalah $3,39 \text{ m}$ sehingga tinggi energi bersih adalah $84,84 \text{ m}$. PLTA Kaligua dapat membangkitkan daya $122,23 \text{ kW}$ dengan perkiraan efisiensi $0,846$. Turbin direncanakan sebagai turbin Pelton dengan kecepatan sepesifik $0,022$, kecepatan rotasional 500 rpm , dan diameter lingkaran pitch $0,71 \text{ m}$.

Kata Kunci: *Daya PLTA; debit andalan; pipa pesat; tinggi energi bersih, turbin Pelton*

¹⁾Mahasiswa Fakultas Teknik UNISSULA Jurusan Teknik Sipil

²⁾Dosen Fakultas Teknik UNISSULA Jurusan Teknik Sipil

ANALYSIS OF THE HYDROELECTRIC POTENTIAL OF TUK BENING STREAM, KEBUN KALIGUA, BREBES REGENCY

Authors:

Muhammad Mujiburrahman¹⁾, Ari Sentani²⁾, Moh Faiqun Ni'am²⁾

Abstract

The Kaligua Black Tea Factory (Pabrik Teh Hitam Kaligua/PTH Kaligua) is having problems in meeting its electrical demand. Tuk Bening spring and stream located in the Kaligua Plantation (Kebun Kaligua) potentially can be utilized as hydroelectric source for PTH Kaligua. In this final project, the authors analyzed the potential of Kaligua hydroelectric by conducting the analysis of dependable discharge, penstock design, hydraulic net head, hydroelectric power, and turbine design.

The dependable discharge was determined based on the flow-duration curve of Tuk Bening stream which was created from the average discharge data of Mock simulation. Cross section dimension of penstock was chosen from ASME B36.10M, which the wall thickness was determined based on the design pressure by referring to ASME B31.1. Hydraulic net head was determined by considering the major and minor head losses in the design penstock. Hydroelectric power was determined by considering the estimated efficiency and the turbine was designed based on the design discharge and hydraulic net head.

The design discharge with 80% time exceeded is $0.174 \text{ m}^3/\text{s}$. Penstock was designed with 88.23 m hydraulic gross head, 513 m length, 388.92 mm inner diameter, and 8.74 mm wall thickness. The total head loss in the design penstock is 3.39 m so that the hydraulic net head is 84.84 m. Kaligua hydroelectric is able to generate 122.23 kW power with 0.846 estimated efficiency. The turbine was designed as Pelton turbine with 0.022 specific speed, 500 rpm rotational speed, and 0.71 m pitch circle diameter.

Keywords: Dependable discharge; hydraulic net head; hydroelectric power; penstock; Pelton turbine

¹⁾Student of UNISSULA Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering

²⁾Lecturer of UNISSULA Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pabrik Teh Hitam (PTH) Kaligua milik PT Perkebunan Nusantara IX (PTPN 9) adalah pabrik yang memproduksi berbagai produk teh dengan lingkup pemasaran hingga ke Eropa. Bersamaan dengan memenuhi kebutuhan produk untuk pasar, PTH Kaligua memiliki masalah dalam memenuhi kebutuhan listriknya. Diketahui bahwa PTPN 9 di setiap bulan harus membayar biaya listrik PTH Kaligua senilai 70 s.d. 75 juta rupiah kepada PLN akibat penggunaan berbagai mesin produksi berdaya listrik besar. PTH Kaligua juga cukup sering mengalami pemadaman listrik dan harus menggunakan alternatif diesel sebagai pembangkit listrik.

PTH Kaligua sebenarnya memiliki Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) peninggalan kolonial Belanda, tetapi daya listrik yang sekarang dihasilkan kurang dari 50 kW. Daya terpasang PLTA tersebut jauh lebih kecil dari kebutuhan daya puncak pabrik sebesar 215 kW dan daya yang sering digunakan sebesar 115 s.d. 125 kW. Hal utama yang diidentifikasi sebagai penyebab PLTA tersebut tidak dapat memenuhi kebutuhan listrik PTH Kaligua adalah perubahan iklim dan eksploitasi oleh berbagai pihak lain terhadap mata air Tuk Bening sebagai sumber air utama. Meskipun demikian, mata air Tuk Bening masih berpotensi untuk tetap dimanfaatkan sepenuhnya sebagai sumber energi untuk PLTA Kaligua baru.

Potensi daya PLTA Kaligua baru bergantung pada debit air sungai Tuk Bening yang akan diandalkan dan tinggi energi bersih aliran yang mungkin untuk didapatkan. Debit andalan sungai Tuk Bening dapat ditentukan berdasarkan analisis hidrologi, sedangkan tinggi energi bersih aliran dapat ditentukan berdasarkan rencana pipa pesat. Penentuan kedua variabel tersebut secara umum harus mempertimbangkan data klimatologi dan geografi lahan rencana PLTA Kaligua baru. Selain itu, biaya pembangunan PLTA Kaligua baru juga perlu dipertimbangkan karena PLTA merupakan investasi besar yang bersifat jangka panjang.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan maka rumusan masalah tugas akhir ini adalah:

1. Seberapa besar debit air sungai Tuk Bening yang dapat diandalkan untuk PLTA Kaligua?
2. Seberapa tinggi energi bersih aliran dalam pipa pesat yang direncanakan untuk PLTA Kaligua?
3. Seberapa besar daya yang dapat dibangkitkan oleh PLTA Kaligua berdasarkan debit andalan sungai Tuk Bening dan tinggi energi bersih aliran?

1.3. Batasan Masalah

Penulis menganalisis potensi PLTA Kaligua dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Analisis-analisis yang dilakukan adalah analisis debit andalan, perencanaan pipa pesat, analisis tinggi energi bersih aliran, analisis daya listrik, dan perencanaan turbin.
2. Analisis dilakukan secara teoritis dengan mengacu pada literatur yang berupa buku pedoman, standar baku, naskah tugas akhir, dan jurnal ilmiah.
3. Seluruh data analisis didapatkan dari lembaga pemerintahan dan PTPN 9.

1.4. Keaslian Gagasan

Tugas akhir Analisis Potensi PLTA Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes adalah karya asli dari penyusun. Tugas akhir ini juga merupakan pekerjaan yang ditugaskan oleh PTPN 9 ketika penulis mengikuti Program Magang Mahasiswa Bersertifikat (PMMB) *Batch 4* yang diselenggarakan oleh Forum *Human Capital* Badan Usaha Milik Pemerintah (FHCI BUMN) pada tahun 2020. Sepengetahuan penyusun, CV Mitra Muda Rekayasa pada (2012) telah melakukan studi kelayakan PLTA baru untuk PTH Kaligua. Perbedaan antara tugas akhir ini dengan studi kelayakan oleh CV Mitra Muda Rekayasa (2012) adalah lokasi rencana bangunan pengambilan dan metode analisis yang dijabarkan sebagai berikut:

1. Debit rencana yang ditentukan oleh CV Mitra Muda Rekayasa (2012) adalah hasil pengukuran langsung di sungai Kalipagak pada suatu saat. Penulis

menentukan debit rencana dalam tugas akhir ini berdasarkan kurva aliran-durasi yang dibuat dari data debit rerata simulasi selama 11 tahun.

2. Tinggi energi bersih yang ditentukan oleh CV Mitra Muda Rekayasa (2012) merupakan perkiraan tanpa ada perencanaan pipa pesat. Penulis menentukan tinggi energi bersih aliran dalam tugas akhir ini berdasarkan hasil analisis kehilangan tinggi energi di sepanjang pipa pesat yang direncanakan.
3. Perencanaan turbin tidak dilakukan oleh CV Mitra Muda Rekayasa (2012). Penulis melakukan perencanaan turbin dalam tugas akhir ini.

1.5. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijabarkan maka tujuan tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui besar debit air sungai Tuk Bening yang dapat diandalkan untuk PLTA Kaligua.
2. Mengetahui tinggi energi bersih aliran dalam pipa pesat yang direncanakan untuk PLTA Kaligua.
3. Mengetahui besar daya yang dapat dibangkitkan oleh PLTA Kaligua berdasarkan debit andalan sungai Tuk Bening dan tinggi energi bersih aliran.

1.6. Manfaat

Manfaat teoritis dan praktis yang diharapkan oleh penulis dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Secara Teoritis
 - a. Menjadi referensi pembelajaran tentang analisis potensi PLTA bagi mahasiswa dan masyarakat.
 - b. Menjadi kajian ilmiah di dalam bidang PLTA sebagai pembangkit listrik alternatif yang bersifat terbarukan.
2. Secara Praktis
 - a. Menjadi bahan pertimbangan bagi PTPN 9 untuk menentukan keputusan pembangunan PLTA Kaligua baru guna mengatasi masalah pemenuhan kebutuhan listrik PTH Kaligua.
 - b. Menjadi rencana awal pembangunan PLTA Kaligua baru untuk dilanjutkan ke tahap-tahap selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Air

PLTA (*hydroelectric*) adalah sebuah hasil rekayasa yang dapat membangkitkan listrik dengan memanfaatkan energi kinetik aliran air dari ketinggian tertentu untuk memutar turbin. PLTA tertua dan hingga sekarang masih berfungsi di Indonesia berlokasi di Kecamatan Lubuk Kilangan, Padang, Sumatera Barat, yaitu PLTA Rasak Bungo yang memiliki daya terpasang sebesar 1 MW. Indonesia memiliki potensi PLTA yang sangat besar karena terdapat banyak sumber air yang berada di perbukitan. IESR (2019) menjelaskan bahwa Indonesia dengan teknologi saat ini memiliki potensi PLTA sebesar 95 GW. Dari total potensi tersebut, daya sebesar 5 GW telah terpasang hingga tahun 2019 dan daya sebesar 17 GW direncanakan terpasang selama kurun tahun 2019 s.d. 2028.

PLTA merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan karena hanya menghasilkan gas emisi yang sangat sedikit jika dibandingkan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) atau Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). PLTA juga memiliki banyak keunggulan jika dibandingkan dengan jenis pembangkit listrik lainnya, namun PLTA juga memiliki kekurangan.

2.1.1. Keunggulan PLTA

Keunggulan PLTA jika dibandingkan dengan jenis pembangkit listrik lainnya adalah sebagai berikut:

1. PLTA merupakan pembangkit listrik yang bersifat terbarukan karena adanya siklus hidrologi.
2. PLTA membangkitkan daya listrik yang lebih besar ketimbang pembangkit listrik alternatif lainnya.
3. PLTA dapat memiliki umur layan selama 50 s.d. 100 tahun.
4. Bendungan yang dibangun untuk suatu PLTA berpotensi menjadi objek wisata sehingga dapat berdampak positif terhadap ekonomi masyarakat sekitar.
5. PLTA dapat dijadikan sebagai salah satu fungsi dari sebuah infrastruktur yang multi fungsi, seperti irigasi dan tumpungan air.

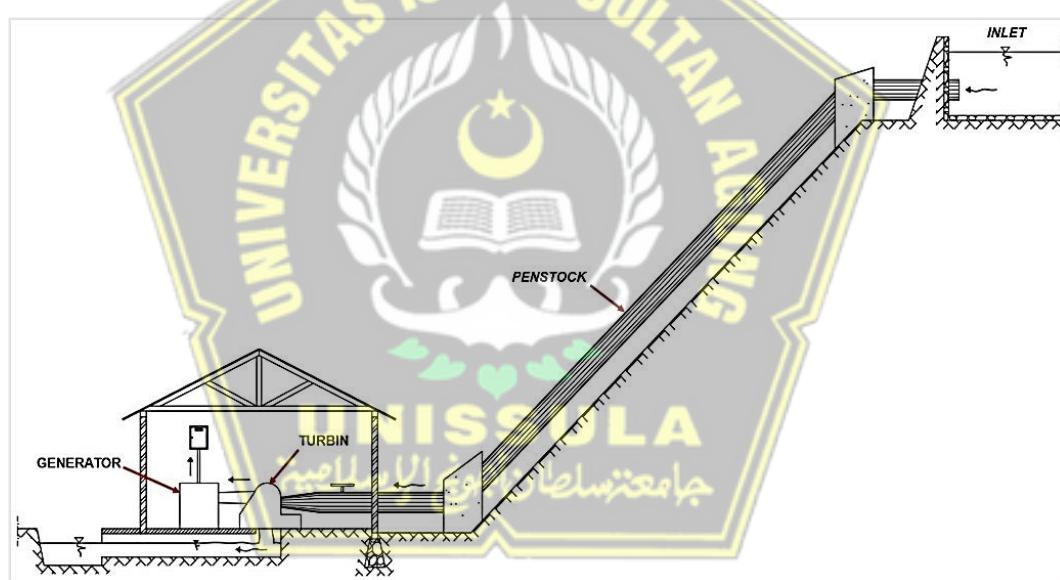
2.1.2. Kekurangan PLTA

Kekurangan PLTA dibandingkan dengan jenis pembangkit listrik lainnya adalah sebagai berikut

1. Pembangunan PLTA membutuhkan biaya yang besar.
2. PLTA berkapasitas besar membutuhkan lahan yang luas.
3. Bangunan PLTA dapat mengganggu ekosistem dan ekologi di sekitarnya.

2.2. Konfigurasi Bangunan PLTA

PLTA pada umumnya memiliki tiga bagian bangunan utama, yaitu bangunan pemasukan (*inlet*), pipa pesat (*penstock*), dan rumah turbin (*power house*) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1. PLTA berdasarkan konfigurasi bangunannya dapat diklasifikasikan menjadi empat, yaitu PLTA *run-of-river*, PLTA *storage*, PLTA *pumped storage*, dan PLTA *in-stream* (Kumar dkk, 2011).

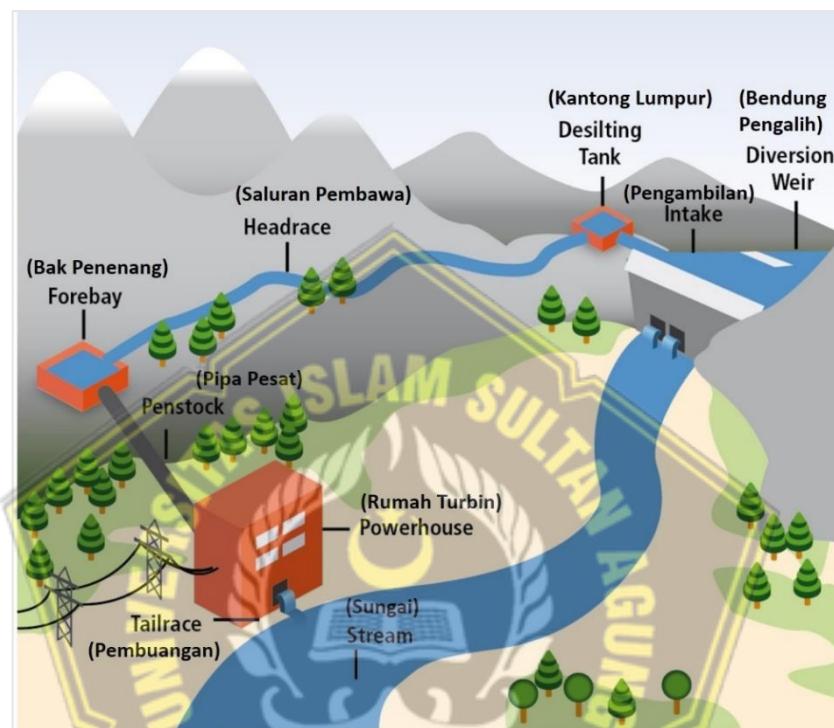


Gambar 2.1. Ilustrasi Konfigurasi Bangunan PLTA secara Umum

2.2.1. PLTA *Run-of-River*

PLTA *run-of-river* (RoR) adalah PLTA yang hanya mengandalkan debit yang tersedia di suatu sungai dan ketinggian energi aliran yang disesuaikan terhadap topografi lahan. PLTA RoR sangat cocok untuk diimplementasikan pada sungai yang berada di perbukitan dengan keandalan debit tinggi. PLTA RoR hanya membutuhkan bendung (*weir*) sebagai bangunan peninggi muka air di bagian pengambilan (*intake*) sehingga dampak yang diberikan kepada lingkungan hilir

bendung relatif kecil. Seperti diperlihatkan pada Gambar 2.2, air yang diambil dari sungai akan dialirkan melalui saluran terbuka (*headrace*) ke bak penenang (*forebay*) sebagai bangunan pemasukan, kemudian air tersebut dialirkan melalui pipa pesat menuju turbin. PLTA RoR di Indonesia banyak dibangun di daerah pelosok yang sulit terjangkau oleh transmisi pusat listrik daerah urban.

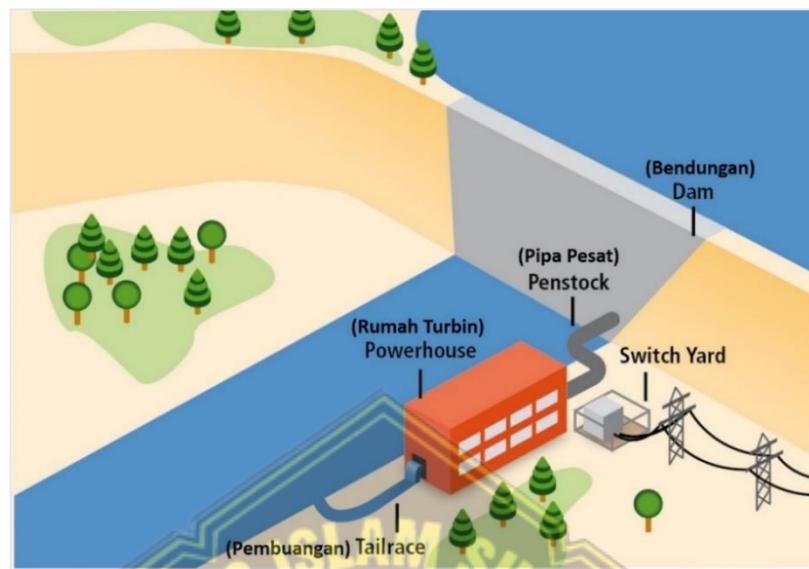


Gambar 2.2. Ilustrasi PLTA Run-of-River (IPCC, 2011)

2.2.2. PLTA Storage

PLTA *storage* adalah PLTA yang memanfaatkan air yang telah tertampung di dalam sebuah waduk (*reservoir*). PLTA *storage* dapat berfungsi dengan tidak sepenuhnya bergantung pada keandalan debit sungai karena memiliki waduk tersebut, namun biaya pembangunan yang dibutuhkan untuk membangun PLTA *storage* sangat besar karena PLTA *storage* membutuhkan bendungan (*dam*) sebagai penahan aliran air agar dapat terkumpul dan tertampung di dalam waduk. Bendungan juga hanya dapat dibangun di lahan yang diapit oleh dua bukit dan dapat memberikan dampak negatif kepada ekosistem dan ekologi hilir bendungan. Seperti diperlihatkan pada Gambar 2.3, PLTA *storage* tidak membutuhkan saluran pembawa dan bak penampung karena pipa pesat dapat langsung ditempatkan di

dalam bendungan. Salah satu PLTA *storage* di Indonesia adalah PLTA Cirata dengan daya terpasang sebesar 1008 MW.



Gambar 2.3. Ilustrasi PLTA Storage (IPCC, 2011)

2.2.3. PLTA *Pumped Storage*

PLTA *Pumped Storage* memiliki dua tampungan air yang masing-masing terlatak di atas dan bawah rumah turbin seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Ilustrasi PLTA Pumped Storage (IPCC, 2011)

Tampungan atas (*upper reservoir*) memiliki prinsip kerja seperti baterai yang digunakan saat jam kebutuhan daya puncak dan diisi ulang saat jam kebutuhan daya non-puncak. Dengan skema fungsi yang terlihat pada Gambar 2.4, air yang telah dialirkan untuk memutar turbin dan tertampung di tampungan bawah dapat dipompa ke tampungan atas dan digunakan kembali untuk memutar turbin. Untuk dapat berfungsi sedemikian, peralatan elektromekanik PLTA *pumped storage* memiliki dua fungsi, yaitu sebagai pembangkit listrik saat jam kebutuhan daya puncak dan sebagai pompa saat jam kebutuhan daya non-puncak.

PLTA *pumped storage* belum terdapat di Indonesia karena pembangunannya membutuhkan biaya awal yang besar dan topografi lahan tertentu untuk kedua tampungan tersebut dapat dibangun. Salah satu contoh PLTA *pumped storage* adalah *Cruachan Power Station* yang terletak di Skotlandia, Kerajaan Bersatu Inggris Raya dan Irlandia Utara dengan daya terpasang sebesar 440 MW dan energi sebesar 7,1 GW.h.

2.2.4. PLTA *in-Stream*

PLTA *in-stream* merupakan PLTA yang diimplementasikan di saluran dan bangunan terjun yang terdapat pada sistem irigasi atau sistem bangunan air lainnya untuk mengoptimalkan potensi bangunan tersebut.



Gambar 2.5. Ilustrasi PLTA in-Stream (IPCC, 2011)

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.5, konfigurasi bangunan PLTA *in-stream* di suatu saluran mirip dengan konfigurasi PLTA RoR. Perbedaan antara PLTA *in-stream* dan PLTA RoR adalah PLTA *in-stream* menggunakan saluran

pengalih sebagai media pengaliran air menuju turbin sehingga biaya pembangunan PLTA *in-stream* jauh lebih kecil dari biaya pembangunan PLTA RoR. Namun, daya yang dibangkitkan oleh PLTA *in-stream* lebih kecil dari daya yang dibangkitkan oleh PLTA RoR karena PLTA *in-stream* tidak dapat memiliki energi yang lebih tinggi ketimbang PLTA RoR.

2.3. Prinsip Dasar PLTA

PLTA berfungsi dengan prinsip dasar berupa konversi energi potensial gravitasi (*gravitational potential energy*) air menjadi energi listrik (*electrical energy*). Energi potensial gravitasi air tersebut merupakan energi yang dimiliki oleh massa air di dalam bangunan pemasukan karena selalu diberikan gaya tarik (gravitasi) oleh bumi. Ketika massa air tersebut dialirkan, energi potensial gravitasi akan dikonversikan menjadi energi kinetik (*kinetic energy*) yang dapat mendorong suku turbin. Dorongan air terhadap suku turbin akan membuat turbin berotasi dan menghasilkan energi mekanis (*mechanical energy*). Batang turbin (*shaft*) yang terhubung dengan rotor dalam generator kemudian mengantarkan energi mekanis tersebut sehingga rotor ikut berotasi dalam medan magnetik (*magnetic field*). Dengan demikian, induksi elektromagnetik (*electromagnetic induction*) dapat terjadi di dalam generator dan PLTA dapat mengonversikan energi potensial gravitasi air menjadi energi listrik.

2.3.1. Daya Listrik

Besarnya energi potensial suatu benda yang berada di atas permukaan bumi menurut Hukum Gravitasi Universal Newton (*Newton's Law of Universal Gravitation*) dapat dituliskan sebagai Persamaan 2.1 (Nave, 2017).

$$E_P = m \times g \times h \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

di mana

E_P : Energi potensial gravitasi suatu benda (W.s)

m : Massa benda (kg)

g : Percepatan gravitasi bumi $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$

h : Tinggi pusat massa benda terhadap bidang referensi (m)

2.3.4. Efisiensi PLTA

PLTA pada kenyataannya tidak dapat mengonversikan seluruh energi potensial gravitasi air menjadi energi listrik dikarenakan oleh ketidaksempurnaan fungsi bangunan dan peralatan elektromagnetik. Besarnya daya listrik yang sebenarnya dibangkitkan oleh suatu PLTA dapat dituliskan sebagai Persamaan 2.5 (ESHA, 2004).

$$P = P_t \times \eta \quad \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

di mana

P : Daya listrik PLTA (W)

η : Efisiensi PLTA

Efisiensi PLTA merupakan persentase energi potensial gravitasi air yang dapat dikoversikan menjadi energi listrik oleh PLTA. Efisiensi PLTA (η) dalam perencanaan suatu PLTA dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.6.

$$\eta = \eta_t \times \eta_g \quad \dots \dots \dots \quad (2.6)$$

di mana

η_t : Efisiensi turbin

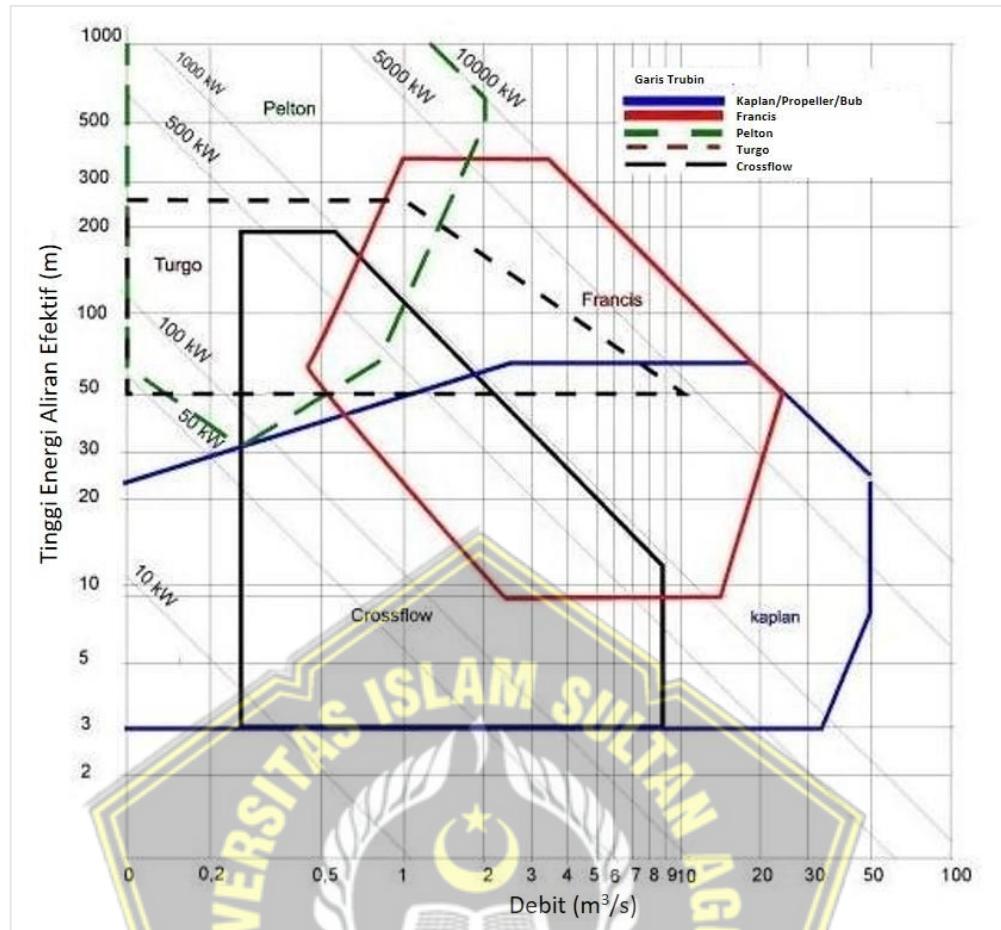
η_g : Efisiensi generator

Efisiensi turbin (η_t) bergantung pada jenis turbin, yakni diperlihatkan pada Tabel 2.1, di mana jenis turbin yang dapat digunakan untuk suatu PLTA ditentukan berdasarkan diagram yang diperlihatkan pada Gambar 2.8.

Tabel 2.1. Efisiensi Turbin PLTA

Jenis Turbin	Efisiensi	Jenis Turbin	Efisiensi
Kaplan <i>single regulated</i>	0,91	Pelton <i>n nozzles</i>	0,90
Kaplan <i>double regulated</i>	0,93	Pelton <i>1 nozzle</i>	0,89
Francis	0,94	Turgo	0,85

(ESHA, 2004)



Gambar 2.8. Diagram Penentuan Turbin (Penche, 1998)

Efisiensi generator (η_g) bergantung pada besarnya daya listrik yang dibangkitkan, yakni diperlihatkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Efisiensi Generator PLTA

Daya Listrik (kW)	Efisiensi Generator	Daya Listrik (kW)	Efisiensi Generator
10	0,910	250	0,955
50	0,940	500	0,960
100	0,950	1000	0,970

(ESHA, 2004)

2.3.5. Skala Daya PLTA

Kementerian ESDM mengategorikan PLTA berdasarkan daya terpasang menjadi tiga klasifikasi, yaitu PLTA mikro dengan daya terpasang lebih kecil dari

1 MW, PLTA mini dengan daya terpasang berkisar dari 1 s.d. 10 MW, dan PLTA besar dengan daya terpasang lebih besar dari 10 MW (Isnugroho, 2015). Namun, PLTA berdasarkan daya terpasang secara universal dapat dikategorikan menjadi enam klasifikasi, yakni diperlihatkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Klasifikasi Daya Terpasang PLTA

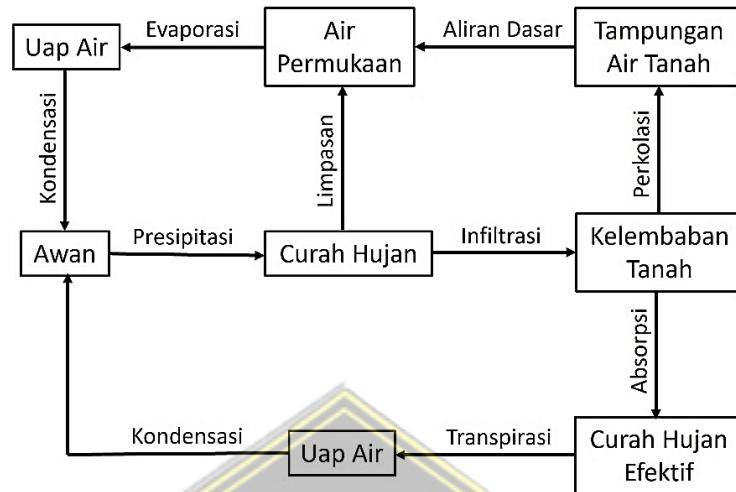
Skala	Daya Terpasang	Keterangan
<i>Large-hydro</i>	$P > 100 \text{ MW}$	Beroperasi sebagai pusat listrik (<i>grid</i>) untuk wilayah urban
<i>Medium-hydro</i>	$15 < P \leq 100 \text{ MW}$	Beroperasi sebagai unit pembangkit di pusat listrik untuk wilayah urban atau sebagai pusat listrik untuk wilayah rural
<i>Small-hydro</i>	$1 < P \leq 15 \text{ MW}$	Beroperasi sebagai pusat listrik untuk wilayah rural
<i>Mini-hydro</i>	$100 \text{ kW} < P \leq 1 \text{ MW}$	Beroperasi sebagai pusat listrik untuk wilayah rural pelosok
<i>Micro-hydro</i>	$5 < P \leq 100 \text{ kW}$	Beroperasi sebagai penyedia listrik untuk industri atau sebagai pusat listrik untuk komunitas kecil terpencil
<i>Pico-hydro</i>	$P \leq 5 \text{ kW}$	Beroperasi sebagai penyedia listrik untuk beberapa rumah

(Singh, 2009)

2.4. Simulasi Debit Rerata Mock

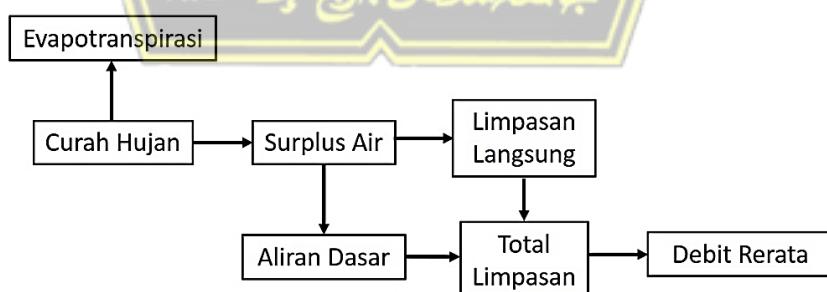
Debit rerata sungai sebenarnya perlu ditentukan berdasarkan data debit yang didapatkan dari pengukuran langsung menggunakan metode pengukuran baku. Namun, fasilitas pengukur debit tersebut sering kali tidak tersedia di kabanyakan sungai di Indonesia atau tidak memungkinkannya dilakukan pengukuran debit dikarenakan oleh keterbatasan tertentu. Jika kondisi tersebut memang benar adanya, debit rerata sungai masih dapat dianalisis menggunakan metode simulasi tertentu berdasarkan data hujan. Metode simulasi debit rerata sungai yang lazim digunakan

di Indonesia adalah metode Mock (Limantara dan Putra, 2016; Bukori, 2017; Najamuddin, 2017).



Gambar 2.9. Skema Keseimbangan Air dalam Siklus Hidrologi

Metode Mock merupakan metode simulasi debit rerata sungai yang dikembangkan oleh Mock (1973) berdasarkan penelitian langsung terhadap berbagai Daerah Pengaliran Sungai (DPS) di Indonesia. Metode Mock berprinsip pada keseimbangan air (*water balance*), yakni volume air di bumi pada setiap waktu adalah konstan dengan distribusi yang bervariasi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.9. Siklus keseimbangan air tersebut diasumsikan berlangsung dalam periode analisis tertentu dengan skema simulasi Mock yang diperlihatkan pada Gambar 2.10 (Bukori, 2017).



Gambar 2.10. Skema Simulasi Debit Rerata Sungai Mock

2.4.1. Uji Konsistensi Data Hujan

Uji konsistensi data curah hujan perlu dilakukan untuk memenuhi asumsi bahwa data tersebut tidak mengalami perubahan karakteristik pada saat pengukuran

dan pengembangannya sehingga memang dapat menggambarkan fenomena hidrologi di DPS (Hatmoko dan Kananto, 2004). Uji konsistensi data curah hujan dapat dilakukan berdasarkan analisis penyimpangan homogenitas berdasarkan metode *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS) dengan hipotesis sebagai berikut:

1. H_0 : Data curah hujan konsisten
2. H_1 : Data curah hujan tidak konsisten

H_0 akan diterima jika penyimpangan homogenitas data yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.7 lebih kecil dari atau sama dengan penyimpangan homogenitas kritis yang ditentukan berdasarkan Tabel 2.4 (Litsaniyah, 2018).

$$R/\sqrt{n_{cal}} = \frac{\max S_k^{**} - \min S_k^{**}}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{\sigma} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$S_k^* = \sum_{i=1}^k (R_i - \bar{R}) \mid S_0^* = 0 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n}} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \dots\dots\dots (2.11)$$

di mana

$R/\sqrt{n_{cal}}$: Penyimpangan homogenitas data curah hujan

S_k^{**} : RAPS curah hujan tahun ke-*i*

S_k^* : Penyimpangan kumulatif curah hujan tahun ke-*i* terhadap rerata curah hujan (mm)

σ : Deviasi standar curah hujan (mm)

R_i : Curah hujan tahun ke-*i* (mm)

\bar{R} : Rerata curah hujan (mm)

Tabel 2.4. Penyimpangan Homogenitas Data Curah Hujan Kritis

Jumlah Data	Penyimpangan Homogenitas Data Curah Hujan		
	90% ^[1]	95%	99%
10	1,21	1,28	1,38
20	1,34	1,43	1,60
30	1,40	1,50	1,70
40	1,42	1,53	2,74
50	1,44	1,55	1,78
100	1,50	1,62	1,85
∞	1,62	1,75	2,00

Keterangan

(Harto, 1993)

[1]: Tingkat keyakinan

2.4.2. Evapotranspirasi

Evapotranspirasi adalah gabungan dari dua fenomena dalam siklus hidrologi, yaitu penguapan air permukaan (evaporasi) dan penguapan air dari stomata daun tumbuhan (transpirasi). Evapotranspirasi dalam simulasi debit Mock terbagi menjadi dua macam, yaitu evapotranspirasi acuan dan evapotranspirasi aktual. Hubungan antara evapotranspirasi acuan dan evapotranspirasi aktual dapat dituliskan sebagai Persamaan 2.12.

$$\Delta Et = Et_o \times \frac{m}{20} \times (18 - n_R) \quad \dots \dots \dots \quad (2.13)$$

di mana

Et_a : Evapotranspirasi aktual (mm)

E_t_o : Evapotranspirasi acuan (mm)

ΔEt : Selisih antara evapotranspirasi aktual dan evapotranspirasi acuan (mm)

m : Persentase lahan DPS yang tidak tertutupi oleh vegetasi

n_R : Jumlah hari hujan selama satu bulan

2.4.3. Surplus Air

Metode Mock mengasumsikan bahwa curah hujan akan terlebih dahulu mengalami evapotranspirasi sebelum mengisi kapasitas kelembaban tanah permukaan (*soil moisture capacity*), di mana curah hujan yang tersisa dari evapotranspirasi disebut sebagai surplus air (*water surplus*). Hubungan antara evapotranspirasi aktual (E_t_a) dari Persamaan 2.12, kelambaban tanah permukaan, dan surplus air dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Jika Et_a lebih besar dari atau sama dengan curah hujan maka selisih curah hujan terhadap Et_a (*excess rain*) menjadi sebesar atau lebih kecil dari 0. Hal itu berarti bahwa tidak terdapat surplus air dan kelembaban tanah permukaan pada bulan sebelumnya berkurang sebanyak selisih tersebut hingga tidak tersisa.
 2. Jika Et_a lebih kecil dari curah hujan maka selisih curah hujan terhadap Et_a menjadi lebih besar dari 0. Hal itu berarti bahwa terdapat surplus air sebesar selisih tersebut dan kelembaban tanah pada bulan sebelumnya bertambah sebanyak surplus air hingga memenuhi kapasitas.

Penjabaran tersebut dapat dituliskan secara lebih sederhana sebagai Persamaan 2.14 s.d. Persamaan 2.16.

$$ER \geq 0 \rightarrow WS = ER \vee ER < 0 \rightarrow WS = 0 \quad \dots \quad (2.16)$$

di mana

ER : Selisih curah hujan terhadap evapotranspirasi aktual (mm)

R : Curah hujan bulanan (mm)

SMS : Kelembaban tanah permukaan (mm)

ISMS: Kelembaban tanah permukaan pada bulan sebelumnya (mm)

SMC: Kapasitas kelembaban tanah permukaan (mm)

WS : Surplus air (mm)

2.4.4. Aliran Dasar dan Limpasan Langusng

Aliran dasar (*base flow*) adalah tampungan air di dalam tanah (*groundwater storage*) yang mengalir pada suatu bulan, di mana aliran tersebut berasal dari tampungan pada bulan yang sama dan sisa tampungan dari bulan sebelumnya. Limpasan langsung (*direct run-off*) adalah surplus air yang tidak mengalami infiltrasi dan langsung melimpas ke sungai. Aliran dasar dan limpasan langsung secara berurutan dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.17 dan Persamaan 2.18.

$$DR = WS - I \quad \dots \dots \dots \quad (2.18)$$

di mana

BF : Aliran dasar (mm)

I : Infiltrasi (mm)

ΔS_i : Perubahan tampungan air di dalam tanah (mm)

DR : Limpasan langsung (mm)

GS : Tampungan air tanah (mm)

GS_{t+1} : Tampungan air tanah pada bulan sebelumnya (mm)

RC : Koefisiem resesi aliran DPS

IF : Faktor infiltrasi DP

seperti yang dijelaskan sebelumnya, metode Moek mengasumsikan bahwa siklus keseimbangan air berlangsung dalam periode analisis tertentu. Dengan demikian, GS_{i-1} pada Persamaan 2.19 untuk bulan Januari (GS_{1-1}) tahun pertama adalah tampungan air di dalam tanah pada bulan Desember (GS_{12}) tahun terakhir. Dengan demikian, total perubahan tampungan air di dalam tanah (ΔS_i) selama

periode analisis tertentu harus sama dengan nol seperti dituliskan sebagai Persamaan 2.22.

2.4.5. Debit Rerata Sungai

Debit (*discharge* atau *flow rate*) adalah volume air yang melewati suatu penampang di setiap 1 s. Dengan demikian, debit rerata sungai berdasarkan simulasi Mock dapat ditentukan dengan cara membagi hasil perkalian antara total limpasan dan luas DPS dengan jumlah sekon selama satu bulan seperti dituliskan sebagai Persamaan 2.23.

$$Q_{ave} = \frac{V}{T} = \frac{(BF + DRO) \times 10^{-3} \times F}{3600 \times 24 \times n_d} \dots \dots \dots \quad (2.23)$$

di mana

Q_{ave} : Debit rerata sungai (m^3/s)

V : Volume air (m^3)

T : Durasi pengaliran air (s)

F : Luas DPS (m²)

n_d : Jumlah hari kalender selama satu bulan

2.4.6. Validasi Debit Sumulasi

Validasi debit simulasi dilakukan untuk menentukan kemiripan kecenderungan (*trend*) data debit simulasi terhadap data curah hujan dan seberapa kuat hubungan antara kedua data tersebut. Penentuan kemiripan kecenderungan dapat dilakukan dengan cara membandingkan grafik curah hujan dan debit simulasi. Jika grafik debit simulasi memiliki kecenderungan yang mirip dengan grafik curah hujan maka debit simulasi tersebut dapat dikatakan valid. Kekuatan hubungan antara data curah hujan dan data debit simulasi ditentukan berdasarkan koefisien korelasi yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.24. (Najamuddin, 2017)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}) \times (Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}} \dots \dots \dots (2.24)$$

di mana

r : Koefisien korelasi antara data curah hujan dan data debit simulasi;

$r = 1 \rightarrow$ Hubungan antara kedua data sempurna,

$0,6 \leq r < 1 \rightarrow$ Hubungan antara kedua variabel kuat,

$0 < r < 0,6 \rightarrow$ Hubungan antara kedua variabel lemah,

$r = 0 \rightarrow$ Tidak terdapat hubungan antara kedua variabel

R_i : Curah hujan pada tahun atau bulan ke- i (mm)

\bar{R} : Rerata curah hujan (mm)

Q_i : Debit simulasi pada tahun atau bulan ke- i (m^3/s)

\bar{Q} : Rerata debit simulasi (m^3/s)

2.5. Karakteristik Daerah Pengaliran Sungai

DPS (*catchment area*) adalah suatu daerah yang dikelilingi oleh dataran tinggi di mana curah hujan (*rainfall*) akan jatuh, terkumpul, dan membentuk aliran sungai seperti diperlihatkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Ilustrasi Daerah Pengaliran Sungai (Connors, 2008)

Suatu DPS dapat ditentukan berdasarkan peta topografi yang memberikan informasi kontur lahan di sekitar sungai. Penentuan tersebut dilakukan dengan menghubungkan titik-titik tertinggi yang mengelilingi sungai. Selain menggunakan cara manual tersebut, DPS dewasa ini juga dapat ditentukan menggunakan program komputer Sistem Informasi Geografi (*Geographical Information System/GIS*) berdasarkan Model Elevasi Digital (*Digital Elevation Model/DEM*). Karakteristik DPS merupakan hal yang selalu dipertimbangkan dalam analisis hidrologi. Dalam simulasi debit Mock, karakteristik DPS yang dipertimbangkan adalah luas lahan terbuka, kapasitas kelembaban tanah, faktor infiltrasi, dan koefisien resesi aliran (Bukori, 2017).

2.5.1. Lahan Terbuka

Persentase luas lahan terbuka (m) dipertimbangkan dalam penentuan selisih antara evapotranspirasi aktual dan evapotranspirasi acuan (ΔEt) menggunakan Persamaan 2.13. Nilai m untuk daerah rural secara sederhana dapat ditentukan berdasarkan tata guna lahan, yaitu berkisar 0% s.d. 10% untuk lahan berupa hutan, 10% s.d. 30% untuk lahan tererosi, dan 30% s.d. 50% untuk lahan pertanian.

2.5.2. Kapaistas Kelembaban Tanah

Kapasitas kelembaban tanah (*soil moisture capacity*) adalah volume ruang pada lapisan tanah permukaan yang dapat diisi oleh air. Besarnya *SMC* pada Persamaan 2.15 berkisar dari 50 s.d. 200 mm yang bergantung pada porositas tanah, di mana semakin poros tanah maka semakin tinggi kapasitas kelembabannya. Nilai *SMC* yang disarankan oleh Mock adalah 200 mm.

2.5.3. Faktor Infiltrasi

Infiltrasi adalah masuknya air ke dalam lapisan permukaan tanah sehingga lapisan tanah tersebut menjadi jenuh air. Karakteristik DPS yang menentukan besarnya infiltrasi adalah faktor infiltrasi (*IF*) seperti yang tertulis pada Persamaan 2.21, di mana *IF* dapat berkisar dari 0,20 s.d. 0,50 yang bergantung pada kondisi DPS. Jika DPS memiliki lapisan tanah permukaan padat, kemiringan terjal, dan permukaan terbuka maka *IF* akan bernilai kecil. Jika DPS memiliki lapisan tanah permukaan gembur, kemiringan relatif datar, dan permukaan lahan tertutupi oleh vegetasi maka *IF* akan bernilai besar. *IF* yang disarankan adalah 0,40.

2.5.4. Koefisien Resesi Aliran

Aliran resesi (*recession flow*) adalah aliran dasar pada suatu bulan yang berasal dari tumpungan air di dalam tanah pada bulan sebelumnya. Koefisien resesi aliran (RC) adalah koefisien yang dipertimbangkan dalam penentuan tumpungan air di dalam tanah pada suatu bulan (GS_i) seperti yang tertulis sebagai Persamaan 2.20. RC dapat berkisar dari 0,40 s.d. 0,70 yang bergantung pada jenis batuan dari lapisan bawah tanah DPS, di mana RC yang disarankan adalah 0,60.

2.6. Evapotranspirasi Acuan Penman-Monteith

Evapotranspirasi acuan (*reference evapotranspiration*) adalah evapotranspirasi yang terjadi dengan asumsi DPS tertutupi secara merata oleh rerumputan setinggi 12 cm dari permukaan tanah yang kebutuhan airnya tercukupi dengan baik. Evapotranspirasi acuan (Et_o) pada Persamaan 2.12 dan Persamaan 2.13 sebenarnya perlu ditentukan berdasarkan pengukuran langsung terhadap DPS menggunakan metode pengukuran baku. Namun, *lysimeter* sebagai instrumen pengukur baku evapotranspirasi acuan sering tidak terdapat di DPS sehingga pengukuran tidak dapat dilakukan. Jika data evapotranspirasi acuan memang tidak tersedia maka evapotranspirasi acuan dapat dianalisis menggunakan metode pendekatan tertentu. Metode analisis evapotranspirasi acuan yang disarankan oleh SNI 7745:2012 adalah metode Penman-Monteith, yaitu metode dikembangkan oleh Penman (1947) dan Monteith (1965).

2.6.1. Data Analisis

Variabel yang dipertimbangkan dalam analisis evapotranspirasi acuan Penman-Monteith adalah data geografi dan klimatologi. Data geografi yang dipertimbangkan adalah elevasi dan koordinat lintang DPS, sedangkan data klimatologi yang dipertimbangkan adalah data temperatur udara rerata, kelembaban udara relatif, kecepatan angin rerata, dan durasi penyinaran matahari. Data klimatologi tersebut merupakan data standar yang diperoleh dari BMKG dengan penjabaran sebagai berikut:

1. Temperatur udara standar (*standard temperature*) adalah temperatur udara yang tidak terkena hujan atau radiasi matahari. Alat yang digunakan untuk mengukur temperatur udara tersebut adalah termometer bola kering yang ditempatkan di

dalam sangkar morfologi (BMKG Kotawaringin Timur, 2021). Temperatur udara rerata adalah hasil penjumlahan dari hasil perkalian temperatur udara pada pukul 07:00, 13:00, dan 18:00 dengan koefisien bobot yang pada umumnya secara berurutan sebesar 1/2, 1/4, dan 1/4 (Arsali dkk, 2015).

2. Kelembaban udara relatif (*relative humidity*) adalah perbandingan kandungan uap air pada suatu temperatur terhadap kapasitas kandungan uap air di udara. Kelembaban udara relatif dapat ditentukan berdasarkan selisih antara hasil pengukuran temperatur udara dari termometer bola kering dan titik embun dari termometer bola basah yang ditempatkan di dalam sangkar morfologi (BMKG Kotawaringin Timur, 2021).
 3. Kecapatan angin baku adalah kecapatan angin yang diukur menggunakan anemometer pada ketinggian 10 m dari permukaan tanah (BMKG Kotawaringin Timur, 2021).
 4. Durasi penyinaran matahari (*sunshine duration/sunshine hours*) adalah lamanya matahari bersinar dengan fluks radiasi panas yang lebih besar dari 120 W/m².s dan dapat diukur menggunakan pengukur Campbell-Stokes (Hamdi, 2014).

2.6.2. Langkah Analisis

Analisis evapotranspirasi acuan Penman-Monteith menurut SNI 7745:2012 dapat dilakukan dengan 20 langkah sebagai berikut:

1. Menentukan tekanan uap jenuh menggunakan Persamaan 2.25.

$$e_s = 0,611 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (2.25)$$

di mana

e_s : Tekanan uap jenuh air (kPa)

T : Temperatur udara rerata ($^{\circ}\text{C}$)

2. Menentukan tekanan uap aktual menggunakan Persamaan 2.26.

di mana

e_a : Tekanan uap aktual (kPa)

ϕ : Kelembaban udara relatif

3. Menentukan kemiringan kurva tekanan udara jenuh-temperatur udara menggunakan Persamaan 2.27.

$$\Delta = \frac{4098 \times e_s}{(T + 237,3)^2} \dots \quad (2.27)$$

di mana

Δ : Kemiringan kurva tekanan udara jenuh air terhadap temperatur udara (kPa/ °C)

4. Menentukan panas laten untuk penguapan menggunakan Persamaan 2.28.

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} \times T \quad \dots \dots \dots \quad (2.28)$$

di mana

λ : Panas latent untuk penguapan (MJ/kg)

5. Menentukan tekanan atmosfer pada elevasi DPS menggunakan Persamaan 2.29.

$$p_{Az} = p_{A0} \times \left(\frac{T_0 - \tau \times (z - z_0)}{T_0} \right)^{\frac{g}{\tau \times R}} \dots \dots \dots \quad (2.29)$$

di mana

p_{4-} : Tekanan atmosfer pada elevasi DPS (kPa)

p_{10} : Tekanan atmosfer pada elevasi permukaan laut $\approx 101,3$ kPa

T_0 : Temperatur pada elevasi permukaan laut (K)

τ : Kontanta *lapse rate* udara jenuh = 0,0065 K/m

z : Elevasi DPS (mdpl)

z_0 : Elevasi permukaan laut = 0

R : Konstanta gas sepsifikasi $\equiv 287 \text{ J/kg/K}$

6. Menentukan konstanta psikometrik menggunakan Persamaan 2.30.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

di mana

γ : Konstanta psikometrik (kPa/ °C)

c_p : Panas spesifik udara lembab = 1,013 kJ/kg°C

ϵ : Perbandingan berat molekul uap air terhadap udara kering = 0,662

7. Menentukan kecapatan angin pada ketinggian 2 m dari permukaan tanah menggunakan Persamaan 2.31.

dj mana

U_2 : Kecepatan angin pada ketinggian 2 m dari permukaan tanah (m/s)

U_h : Kecapatan angin pada ketinggian anemometer (m/s)

h : Tinggi anemometer (m)

8. Menentukan emisivitas atmosfer menggunakan Persamaan 2.32.

di mana

ϵ' : Emisivitas atmosfer

ε : Emisivitas efektif atmosfer

ε : Emisivitas oleh vegetasi dan tanah ≈ 0.98

$$0.34 \leq a_{\parallel} \leq 0.44$$

$$-0.25 \leq h_u \leq -0.14$$

9. Menentukan nomor urut hari Julian di suatu tahun menggunakan Persamaan 2.33

$$J = \text{int}(30.42 \times M - 15.23) + J_{ad} \quad \dots \quad (2.33)$$

di mana

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

J : Nomor urut hari Julian di suatu tahun

M : Nomor urut bulan

J_{ad} : Tambahan nomor urut;

$M < 3 \rightarrow J_{ad} = 2 \wedge M \geq 3 \rightarrow J_{ad} = 0$ | untuk tahun normal,

$M > 2 \rightarrow J_{ad} = 1 \wedge M \leq 2 \rightarrow J_{ad} = 0$ | untuk tahun kabisat

10. Menentukan deklinasi matahari menggunakan Persamaan 2.34.

$$\delta = 0,409 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi}{365} \times J - 1,39\right) = 0,409 \times \sin(0,0172 \times J - 1,39) \dots \dots \dots \quad (2.34)$$

di mana

δ : Deklinasi matahari (rad)

11. Menentukan sudut matahari terbenam menggunakan Persamaan 2.35.

di mana

ω_s : Sudut matahari terbenam (rad)

ϕ : Koordinat lintang DPS, bernilai positif untuk lintang utara dan negatif untuk lintang selatan (rad)

12. Menentukan lama waktu dalam satu hari menggunakan Persamaan 2.36.

di mana

N: Lama waktu sealam satu hari (jam)

13. Menentukan faktor penutupan awan menggunakan Persamaan 2.37.

$$f = 0,9 \times \frac{n}{N} + 0,1 \quad \dots \dots \dots \quad (2.37)$$

dj mana

f : Faktor penutupan awan

n : Durasi peninjaman matahari (jam)

14. Menentukan radiasi gelombang panjang menggunakan Persamaan 2.38.

$$R_{nl} = -R_{ld} + R_{ld} = f \times \varepsilon' \times \sigma \times (T + 273,15)^4 \quad \dots \dots \dots \quad (2.38)$$

di mana

R_{nl} : Radiasi gelombang panjang ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hari}$)

R_{ld} : Radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh vegetasi dan tanah ke atmosfer ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hari}$)

R_{ld} : Radiasi gelombang panjang yang dipancarkan dari atmosfer dan awan ke permukaan bumi ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hari}$)

σ : Konstanta Stefan-Boltzmann = $4,90 \times 10^{-9} \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{K}^4/\text{hari}$

15. Menentukan jarak relatif bumi terhadap matahari menggunakan Persamaan 2.39.

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi}{365} \times J\right) = 1 + 0,033 \times \cos(0,0172 \times J) \quad \dots \dots \dots \quad (2.39)$$

di mana

d_r : Jarak relatif bumi terhadap matahari

16. Menentukan radiasi matahari ekstraterestrial menggunakan Persamaan 2.40.

$$R_a = 37,6 \times d_r \times (\omega_s \times \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \sin \omega_s) \quad \dots \dots \dots \quad (2.40)$$

di mana

R_a : Radiasi matahari ekstraterestrial ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hari}$)

17. Menentukan radiasi matahari menggunakan Persamaan 2.41.

$$R_s = \left(0,25 + 0,5 \times \frac{n}{N}\right) \times R_a \quad \dots \dots \dots \quad (2.41)$$

di mana

R_s : Radiasi matahari ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hari}$)

18. Menentukan radiasi gelombang pendek menggunakan Persamaan 2.42.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \times R_s \quad \dots \dots \dots \quad (2.42)$$

di mana

R_s : Radiasi gelombang pendek ($\text{MJ/m}^2/\text{hari}$)

α : Koefisien pantulan radiasi tajuk = 0.23

19. Menentukan radiasi neto menggunakan Persamaan 2.43.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \dots \dots \dots \quad (2.43)$$

di mana

R_n : Radiasi gelombang neto ($\text{MJ/m}^2/\text{hari}$)

20. Menentukan evapotranspirasi acuan (Et_o , mm/hari) menggunakan Persamaan 2.44.

$$Et_o = \frac{0,408 \times \Delta \times R_n + \gamma \times \frac{900}{(T + 273,15)} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)} \quad \dots \dots \dots \quad (2.44)$$

2.7. Kehilangan Tinggi Energi

Tinggi energi (*head*) dalam dinamika fluida adalah suatu konsep yang menghubungkan energi fluida tak termampatkan (*incompressible fluid*) dengan tinggi suatu kolom statis dari fluida tersebut. Persamaan Bernoulli menyatakan tinggi energi dengan satuan jarak yang merupakan total dari tinggi energi elevasi, tinggi energi tekanan, dan tinggi energi kinetik yang dijabarkan sebagai berikut (Connor, 2019):

1. Tinggi energi elevasi merupakan ukuran representatif dari energi potensial yang dimiliki oleh fluida karena elevasinya terhadap suatu garis referensi (energi potensial gravitasi).
2. Tinggi energi tekanan merupakan ukuran representatif dari energi aliran pada suatu kolom fluida yang beratnya sama dengan tekanan air.
3. Tinggi energi kinetik merupakan tinggi kenaikan aliran fluida jika seluruh energi kinetiknya dikoversikan menjadi energi potensial.

2.7.1. Kehilangan Mayor

Kehilangan tinggi energi mayor (*major head loss*) disebabkan oleh gesekan antara air dan dinding pipa pesat. Kehilangan tinggi energi mayor (h_{maj}) pada Persamaan 2.4 bergantung pada faktor gesekan Darcy-Weisbach, panjang, dan diameter dalam (*inside diameter*) pipa pesat seperti dituliskan sebagai Persamaan 2.46 (ESHA, 2004).

$$h_{maj} = f \times \frac{l}{D_{in}} \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad \dots \dots \dots \quad (2.46)$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{0,25 \times \pi \times D_{in}^2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.47)$$

di mana

f : Faktor gesekan Darcy-Weisbach

A : Luas penampang basah (m^2)

D_{in} : Diameter dalam pipa pesat (m)

Faktor gesekan (f) pada Persamaan 2.46 ditentukan berdasarkan bilangan Reynolds (Re) yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.48.

$$Re = \frac{D_{in} \times v}{\mu} \quad \dots \dots \dots \quad (2.48)$$

di mana

μ : Viskositas kinematik air (m^2/s)

Tabel 2.5. Massa Jenis dan Viskositas Kinemtik Air

Temperatur Air (°C)	Massa Jenis (kg/m^3)	Viskositas Kinematik ($E-06 m^2/s$)
5	1000,0	1,519
10	999,7	1,306
15	999,1	1,139
20	998,2	1,003
25	997,0	0,893
30	995,7	0,800

(Crittenden dkk, 2012)

Jika Re dari Persamaan 2.48 lebih kecil dari 2300 maka f dapat ditentukan berdasarkan Re menggunakan persamaan Hagen-Poiseuille yang dituliskan sebagai Persamaan 2.49. Jika Re lebih besar dari 2300 maka f dapat ditentukan menggunakan persamaan Colebrook-White yang dituliskan sebagai Persamaan 2.50.

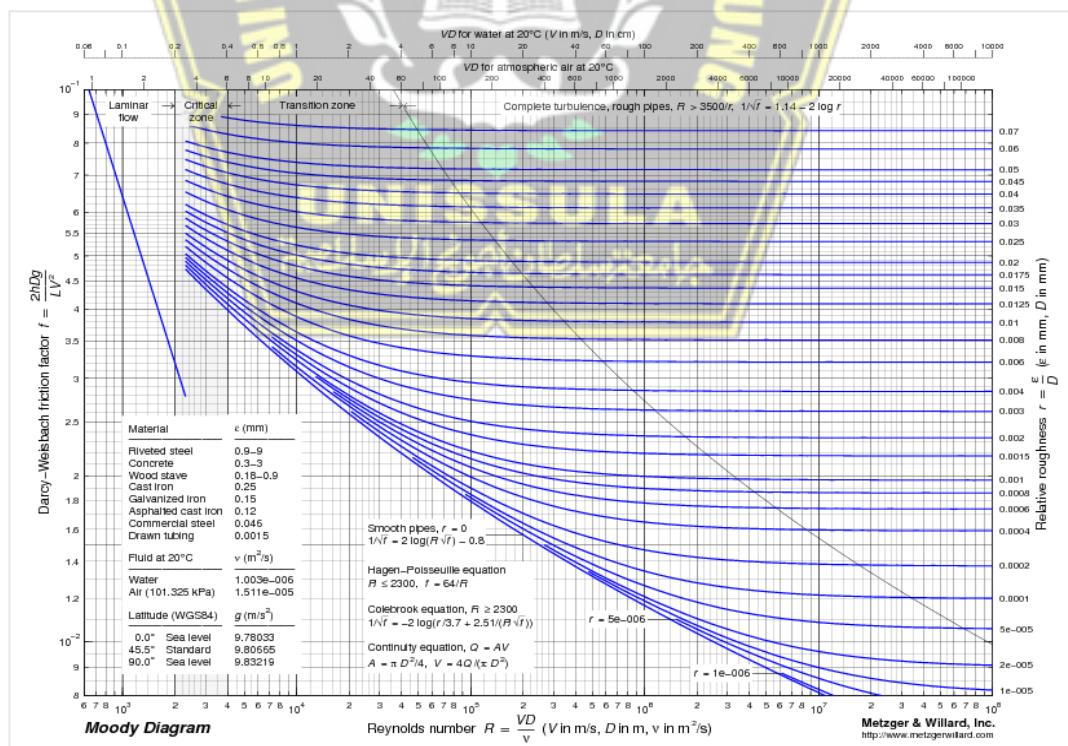
$$Re \leq 2300 \rightarrow f = \frac{65}{Re} \quad \dots \dots \dots \quad (2.49)$$

$$Re > 2300 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log \left(\frac{\epsilon/D_{in}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right) \dots \dots \dots \quad (2.50)$$

di mana

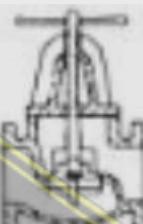
ϵ : Tinggi kekasaran dinding pipa pesat (m)

Selain menggunakan Persamaan 2.49 dan Persamaan 2.50, f juga dapat ditentukan berdasarkan kekasaran bahan relatif (ϵ/D_{in}) dan Re menggunakan diagram Moody yang dipertahankan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Diagram Moody (Darmadi, 2012)

Tabel 2.10. Koefisien Kehilangan Energi Minor (Lanjutan)

Aksesoris Pipa	Gambar	Koefisien Kehilangan Energi Minor
Katup gerbang		0,20
Katup globe		10,0
Katup butterfly		0,20
Katup bola		0,10

(Darmadi, 2012; Arisyadi, 2016)

2.8. Perencanaan Pipa Pesat

Pipa pesat adalah bagian PLTA yang mahal karena sering terbuat dari baja (*steel*) yang memiliki kekuatan dan daya tahan lebih tinggi ketimbang bahan lainnya, sehingga pipa pesat perlu direncanakan secara efisien. Selain itu, ketersediaan bahan di pasar juga perlu dipertimbangkan dalam perencanaan pipa pesat. Bagian pipa pesat yang perlu direncanakan adalah diameter dalam, tebal dinding, jarak tumpuan, dan lokasi sambungan.

2.8.1. Diameter Luar

Diameter pipa pesat perlu ditentukan dengan mempertimbangkan kehilangan energi aliran yang akan terjadi dan biaya pengadaannya. Semakin lebar diameter pipa pesat maka semakin besar kehilangan tinggi energi aliran mayor

(h_{maj}), namun biaya pengadaannya akan semakin besar. Sedangkan jika sebaliknya, semakin kecil diameter pipa pesat maka semakin kecil biaya pengadaannya, namun h_{maj} akan semakin besar. Dengan asumsi h_{maj} sebesar 4% dari tinggi energi kotor (H_{gro}), diameter dalam perkiraan dari suatu pipa pesat dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.52 (ESHA, 2004).

$$D_{est} = 2,69 \times \left(\frac{n^2 \times Q^2 \times l}{H_{gro}} \right)^{0,1875} \quad \dots \dots \dots \quad (2.52)$$

di mana

D_{est} : Diameter dalam pipa pesat perkiraan (m)

n : Koefisien kekasaran Manning

Diameter dalam pipa pesat dapat dipilih dari ASME B36.10M (2018), yaitu dengan memilih diameter luar (*outside diameter*) yang lebih besar dari diameter perkiraan (D_{est}) dari Persamaan 2.52, kemudian menentukan tebal dinding berdasarkan tekanan rencana.



Gambar 2. 14. Ilustrasi Penampang Pipa Pesat dan Tekanan Air

2.8.2. Tebal Dinding

Penentuan tebal dinding pipa pesat dari ASME B36.10M (2018) dapat dilakukan dengan mengacu pada ASME B31.1 (2016), di mana tebal dinding minimum harus dapat menahan tekanan rencana pada temperatur fungsional tertentu seperti dituliskan sebagai Persamaan 2.53.

$$t_{min} = \frac{p \times D_{out}}{2 \times (S_e + p \times y)} + t_{cor} \quad \dots \dots \dots \quad (2.53)$$

Tekanan *water hammer* (p_{ham}) adalah tekanan tambahan yang diberikan kepada dinding pipa pesat ketika terjadi penutupan katup hilir. Besarnya p_{ham} bergantung pada waktu refleksi yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.57.

$$T_r = \frac{2 \times l}{a} \quad \dots \dots \dots \quad (2.57)$$

$$a = \sqrt{\frac{K_w/\rho}{1 + \frac{K_w}{E_e} \times \frac{D_{in}}{t}}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.58)$$

di mana

T_r : Waktu refleksi gelombang kejut (s)

a : Kecapatan rambat gelombang kejut (m/s)

K_w : Modulus bulk air = $2,1 \times 10^9$ Pa

E_e : Modulus elastisitas pipa pesat (Pa)

t : Tebal dinding pipa pesat (m)

Waktu refleksi adalah lama waktu yang dibutuhkan oleh gelombang untuk merambat dari katup hilir ke bangunan pemasukan dan kembali ke katup hilir. Jika waktu refleksi (T_r) pada Persamaan 2.57 lebih besar dari durasi penutupan katup maka penutupan terjadi secara tiba-tiba dan p_{ham} ditentukan menggunakan Persamaan 2.59. Jika T_r lebih kecil dari durasi penutupan katup maka penutupan terjadi secara bertahap dan p_{ham} ditentukan menggunakan Persamaan 2.60.

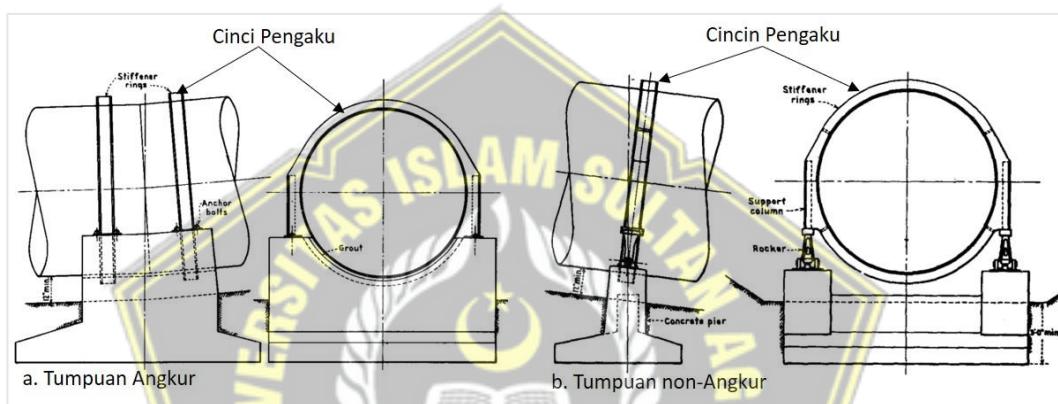
$$p_{ham} = a \times v \times \rho \quad \dots \dots \dots \quad (2.59)$$

$$p_{ham} = \frac{l \times v \times \rho}{T_r} \quad \dots \dots \dots \quad (2.60)$$

Modulus elastisitas bahan (E_e) pada Persamaan 2.58 merupakan modulus elastisitas bahan (E) yang telah dikalikan dengan e , seperti tegangan maksimum yang diizinkan (S_e) pada Persamaan 2.54, di mana E ditentukan berdasarkan jenis bahan pipa pesat dengan dapat mengacu pada ASME B31.1 (2016).

2.8.3. Jarak Tumpuan

Tumpuan pipa pesat terbagi menjadi dua, yaitu tumpuan angkur (*anchor block*) yang ditempatkan di setiap belokan pipa pesat dan tumpuan non-angkur (*support block*) yang ditempatkan di antara tumpuan angkur. Tumpuan pipa pesat pada umumnya perlu dilengkapi dengan cincin pengaku (*stiffener ring*) yang mengelilingi pipa pesat dan terhubung ke tumpuan melalui batang vertikal seperti diperlihatkan pada Gambar 2.15. Cincin pengaku tersebut berfungsi untuk mencegah deformasi dinding pipa pesat akibat tekanan yang diberikan oleh beban gravitasi dan gaya reaksi dari tumpuan (USBR, 1977).

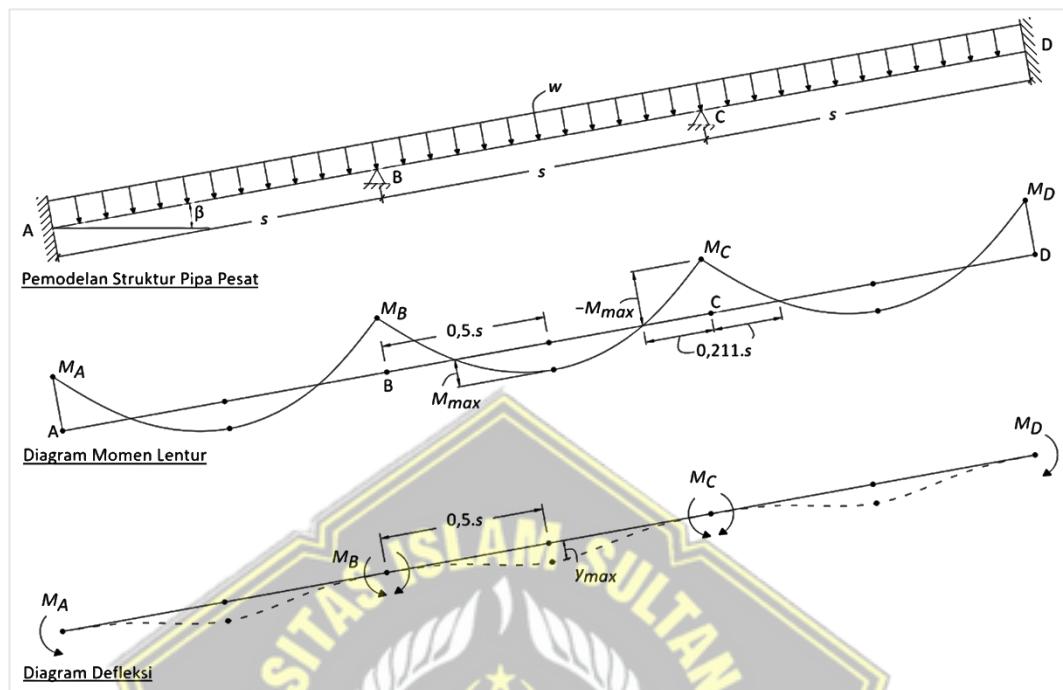


Gambar 2. 15. Ilustrasi Struktur Tumpuan Pipa Pesat yang Sering Digunakan (USBR, 1977)

Dengan struktur yang terlihat pada Gambar 2.15, tumpuan angkur dapat menahan perpindahan (*displacement*) titik belokan pipa pesat ke segala arah. Karena itu, tumpuan angkur dapat diasumsikan sebagai tumpuan jepit (*fixed support*) yang dapat menahan gaya horizontal, gaya vertikal, dan momen. Tumpuan non-angkur dapat diasumsikan sebagai tumpuan sendi (*pinned support*) karena dapat menahan perpindahan vertikal dan horizontal titik tumpuan pipa pesat, tetapi tidak dapat menahan rotasi pipa pesat di titik tumpuan. Dengan demikian, pipa pesat di antara dua tumpuan angkur dapat dimodelkan sebagai struktur balok menerus (*continuous beam*) seperti diperlihatkan yang pada Gambar 2.16.

Jarak tumpuan perlu ditentukan berdasarkan defleksi maksimum pipa pesat (ESHA, 2004). Defleksi adalah derajat perpindahan suatu titik pipa pesat akibat momen lentur (*bending moment*), di mana defleksi dapat berupa berupa jarak atau sudut. Dengan model struktur pipa pesat yang sedemikian, defleksi maksimum pipa

pesat terjadi di tengah bentang pipa pesat seperti yang terlihat pada Gambar 2.16 dan dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.61 (Ghavami, 2015).



Gambar 2.16. Model Struktur, Diagram Momen Lentur, dan Diagram Defleksi Pipa Pesat antara Dua Tumpuan Angkur

$$y_{max} = \frac{w \times s^4}{384 \times E_e \times I} \quad (2.61)$$

$$\frac{s}{65000} = \frac{w \times s^4}{384 \times E_e \times I} \rightarrow s_{max} = \sqrt[3]{\frac{384 \times E_e \times I}{w \times 65000}} \quad (2.62)$$

di mana

y_{max} : Defleksi maksimum pipa pesat (m)

w : Beban lateral terbagi merata (N/m)

s : Jarak tumpuan (m)

I : Momen inersia penampang pipa pesat (m^4)

s_{max} : Jarak tumpuan maksimum (m)

Seperti yang tertulis pada Persamaan 2.61, semakin jauh jarak tumpuan pipa pesat (s) maka semakin besar defleksi maksimum (y_{max}) yang akan terjadi. Menurut

ESHA (2004), y_{max} yang akan terjadi dapat ditentukan sebesar $1/65000 \times s$, sehingga jarak tumpuan maksimum pipa pesat dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.62. Beban lateral (w) dapat ditentukan sebesar 1,10 kali total beban yang terdiri dari beban air dan pipa pesat seperti dituliskan sebagai Persamaan 2.63. Momen inersia penampang pipa pesat (I) dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.64 (Arisyadi, 2019).

$$w = 1,10 \times (w_w + w_s) \times g \times \cos \alpha = 1,10 \times (A \times \rho + w_s) \times g \times \cos \beta \quad \dots \dots \dots \quad (2.63)$$

di mana

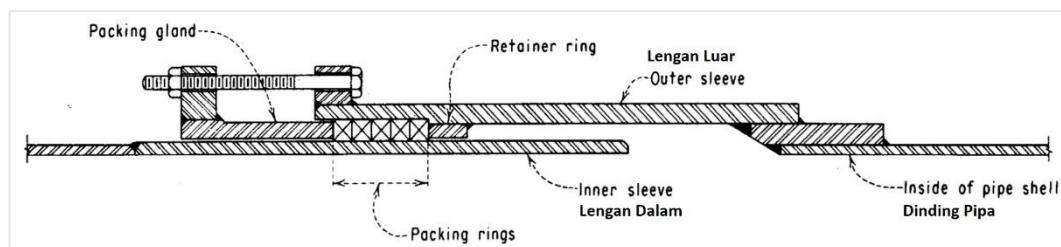
w_w : Beban air (kg/m)

w_s : Beban pipa pesat (kg/m)

β : Sudut kemiringan pipa pesat terhadap garis horizontal ($^{\circ}$)

2.8.4. Lokasi Sambungan

Pipa pesat tentunya diproduksi dengan panjang tertentu sehingga pada instalasinya perlu saling dihubungkan menggunakan sambungan. Jenis sambungan yang sering digunakan untuk menghubungkan pipa pesat adalah sambungan bergelang (*flanged joint*). Selain sambungan tersebut, pipa pesat juga perlu dihubungkan dengan sambungan ekspansi (*expansion joint*) agar dapat dengan bebas memanjang dan memendek ketika terjadi perubahan temperatur fungsional. Jenis sambungan ekspansi yang sering digunakan pada pipa pesat adalah sambungan lengan (*sleeve*) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17. Ilustrasi Sambungan Ekspansi Jenis Lengan (USBR, 1977)

Sambungan pipa pesat pada umumnya tidak direncanakan untuk dapat menahan momen lentur sehingga perlu ditempatkan di titik momen lentur mendekati 0. Menurut Ghavami (2015), titik pipa pesat di mana momen lentur mendekati 0 berada di $0,211 \times s$ dari titik tumpuan seperti yang terlihat pada Gambar 2.16.

2.9. Perencanaan Awal Turbin

Turbin adalah seperangkat alat hidromekanik yang berfungsi untuk mengonversikan energi kinetik aliran air menjadi energi mekanis yang dibutuhkan oleh rotor untuk berotasi. Perencanaan dimensi untuk setiap turbin berbeda dengan satu sama lain, di mana jenis turbin yang digunakan pada suatu PLTA ditentukan berdasarkan tinggi energi bersih dan debit rencana menggunakan diagram yang terlihat pada Gambar 2.8 (Penche, 1998). Langkah awal yang perlu dilakukan dalam perencanaan turbin adalah menentukan kecepatan spesifik dan kecapatan rotasional, kemudian dimensi dari setiap bagian turbin dapat ditentukan.

2.9.1. Kecapatan Spesifik

Kecepatan spesifik berdasarkan terminologi yang berkembang di bidang teknik mesin dapat dibagi menjadi dua, yaitu kecepatan spesifik berdimensi dan kecepatan spesifik nirdimensi (*dimensionless*). Kecapatan spesifik berdimensi adalah kecepatan rotasional yang secara geometri sama dengan pergerakan suatu turbin dengan tinggi energi besih (H_{net}) 1 m dan debit tertentu (Q) yang dapat membangkitkan daya listrik (P) 1 kW. Kecepatan spesifik berdimensi dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.65 (Penche, 1998).

$$N_S = N \times \frac{\sqrt{P}}{H_{\text{ref}}^{5/4}} \dots \quad (2.65)$$

di mana

N_s : Kecapatan spesifik berdimensi turbin (rpm)

N : Kecapatan rotasional (rpm)

Berbeda dengan bangunan atau peralatan hidromekanik lainnya, turbin dan generator pada umumnya direncanakan oleh industri manufaktur berdasarkan

percobaan terhadap model skalatis di laboratorium, di mana percobaan tersebut secara internasional diatur oleh IEC 60193. Kecepatan spesifik nirdimensi merupakan kecepatan spesifik yang ditentukan oleh IEC 60193 untuk dipertimbangkan dalam percobaan turbin tersebut. Kecepatan spesifik nirdimensi ditentukan menggunakan Persamaan 2.66, di mana rentang kecepatan spesifik nirdimensi untuk berbagai jenis turbin diperlihatkan pada Tabel 2.7 (ESHA, 2004).

di mana

N_{OE} : Kecapatan spesifik nirdimensi turbin

E_S : Energi potensial spesifik (m^2/s^2)

Tabel 2.7. Rentang Kecepatan Spesifik Nirdimensi Turbin

Turbin	Kecepatan Spesifik Nirdimensi
Pelton 1 nozzle	$0,005 \leq N_{QE} \leq 0,025$
Pelton n nozzles ^[1]	$0,005.n \leq N_{QE} \leq 0,025.n$
Francis	$0,05 \leq N_{QE} \leq 0,33$
Kaplan, propeller, dan bulb	$0,19 \leq N_{QE} \leq 1,55$
<u>Keterangan</u>	(ESHA, 2004)
[1]: $1 < n \leq 4$	

2.9.2. Kecepatan Rotasional

Kecepatan rotasional adalah jumlah rotasi turbin selama waktu tertentu yang dijadikan sebagai parameter untuk perencanaan turbin selanjutnya. Kecepatan rotasional secara internasional digolongkan sebagai frekuensi dengan satuan standar Hertz (Hz), di mana 1 Hz sama dengan 1 pengulangan kejadian per-sekon ($1/s$ atau s^{-1}). Namun, 1 rotasi per-menit (rpm) yang merupakan satuan non-standar juga sering digunakan oleh insinyur mesin sebagai representatif dari 1/60 Hz, di mana 60 rpm sama dengan 1 Hz atau 1 rotasi per-sekon (rps). Kecepatan rotasional

turbin (N) dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.66 berdasarkan N_{QE} pada Tabel 2.7, di mana N harus disesuaikan menjadi kecepatan rotasional sinkron generator yang diperlihatkan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8. Kecepatan Rotasional Sinkron Generator

Jumlah Kutub Generator	Kecepatan Rotasional Sinkron (rpm)		Jumlah Kutub Generator	Kecepatan Rotasional Sinkron (rpm)	
	50 Hz ^[1]	60 Hz		50 Hz	60 Hz
2	3000	3600	16	375	450
4	1500	1800	18	333	400
6	1000	1200	20	300	360
8	750	900	22	272	327
10	600	720	24	250	300
12	500	600	26	231	377
14	428	540	28	214	257

Keterangan

[1]: Frekuensi generator

(ESHA, 2004)

BAB III

METODELOGI

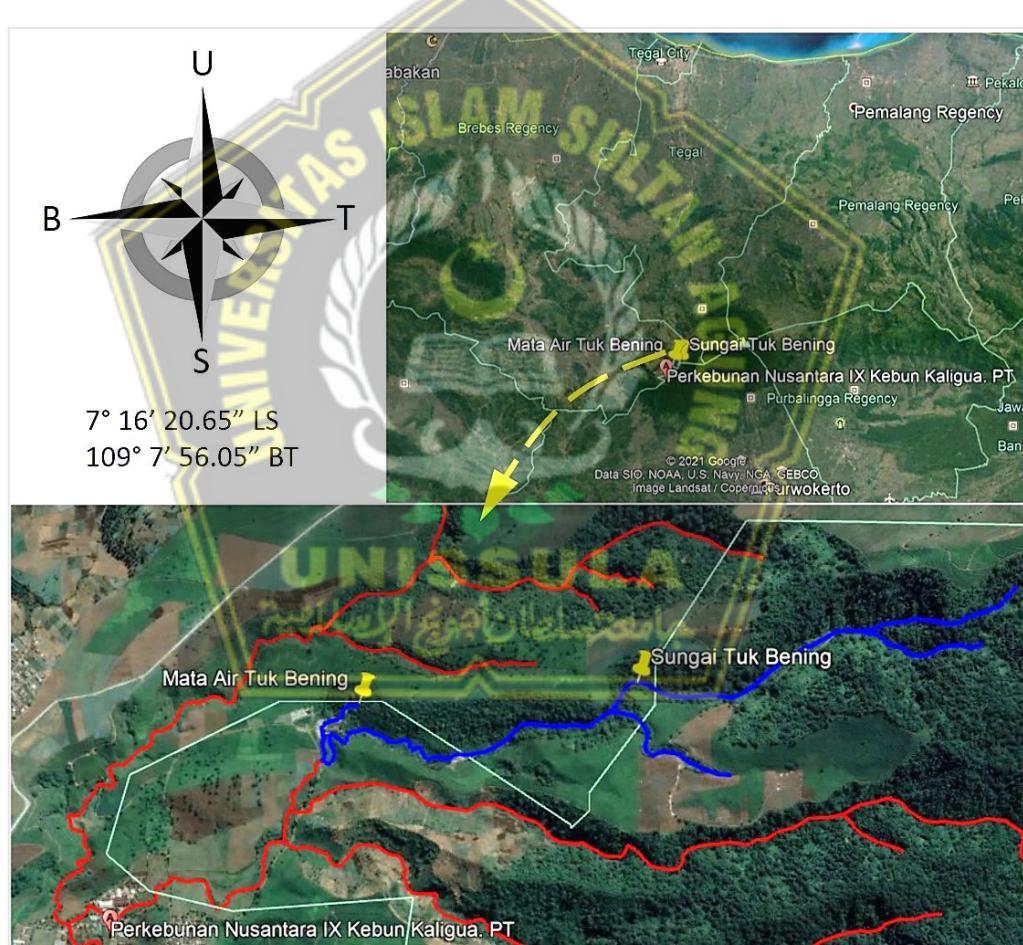
3.1. Jenis Tugas Akhir

Tugas akhir ini termasuk ke dalam jenis analisis yang mengacu pada teori-teori dari berbagai literatur yang berhubungan dengan rekayasa PLTA.

3.2. Subjek dan Objek Analisis

3.2.1. Subjek

Subjek analisis di dalam tugas akhir ini adalah sungai Tuk Bening di Kebun Kaligua PTPN 9, Ragatunjung, Paguyungan, Brebes, Jawa Tengah.



Gambar 3.1. Lokasi Sungai dan Mata Air Tuk Bening

3.2.1. Objek

Objek analisis di dalam tugas akhir ini adalah potensi PLTA yang dimiliki oleh sungai Tuk Bening.

3.3. Variabel Analisis

3.3.1. Bebas

Variabel bebas dalam analisis potensi PLTA sungai Tuk Bening adalah evapotranspirasi, curah hujan, karakteristik DPS, dan kontur lahan.

3.3.2. Terikat

Variabel terikat dalam analisis potensi PLTA sungai Tuk Bening adalah debit andalan, tinggi energi efektif, daya listrik, dan rencana awal turbin.

3.4. Data Analisis

Data yang dipertimbangkan dalam analisis potensi PLTA sungai Tuk Bening dibagi menjadi empat, yaitu data klimatologi, data geografi, data curah hujan, dan DEM.

3.4.1. Data Klimatologi

Data klimatologi yang dipertimbangkan dalam analisis evapotranspirasi acuan DPS Tuk Bening adalah data temperatur udara rerata, kelembaban udara relatif, kecepatan angin, dan durasi penyinaran matahari selama kurun tahun 2009 s.d. 2019. Data klimatologi tersebut berasal dari BMKG Klas III Kabupaten Tegal yang diunduh dari laman dataonline.bmkg.go.id.

3.4.2. Data Geografi

Data geografi di dalam tugas akhir ini didefinisikan sebagai data yang memuat informasi tentang koordinat serta tata guna lahan DPS, koordinat bangunan pengambilan, koordinat pemasukan, dan koordinat rumah turbin. Data geografi tersebut didapatkan dari program Google Earth Pro dengan pengamatan langsung di lapangan.

3.4.3. Data Curah Hujan

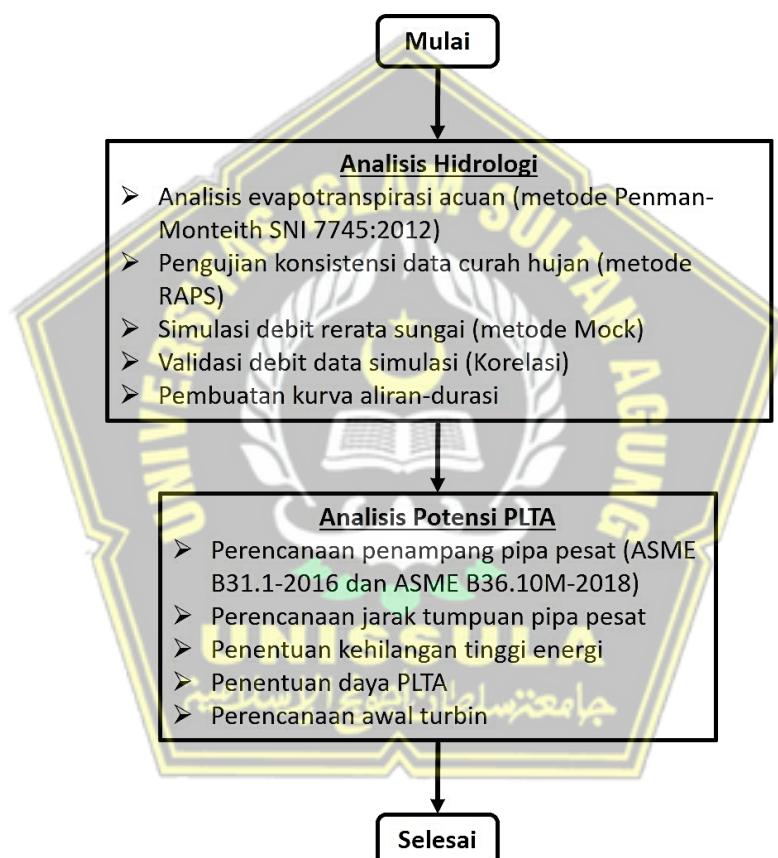
Data curah hujan yang dipertimbangkan dalam simulasi debit rerata sungai bulanan adalah data selama kurun tahun 2009 s.d. 2019. Data curah hujan tersebut didapatkan dari stasiun penakar hujan milik PTPN 9 yang berlokasi di Kebun Kaligua.

3.4.4. Model Elevasi Digital

Data DEM diolah menggunakan program ArcGIS Desktop 10.3 untuk menentukan luas DPS Tuk Bening dan peta topografi lahan rencana pipa pesat. Data DEM diunduh dari laman tanahair.indonesia.go.id/demnas pada tahun 2020.

3.5. Prosedur Analisis

Analisis potensi PLTA sungai Tuk Bening dilakukan dengan dua tahap, yaitu analisis hidrologi dan analisis potensi PLTA, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.2.



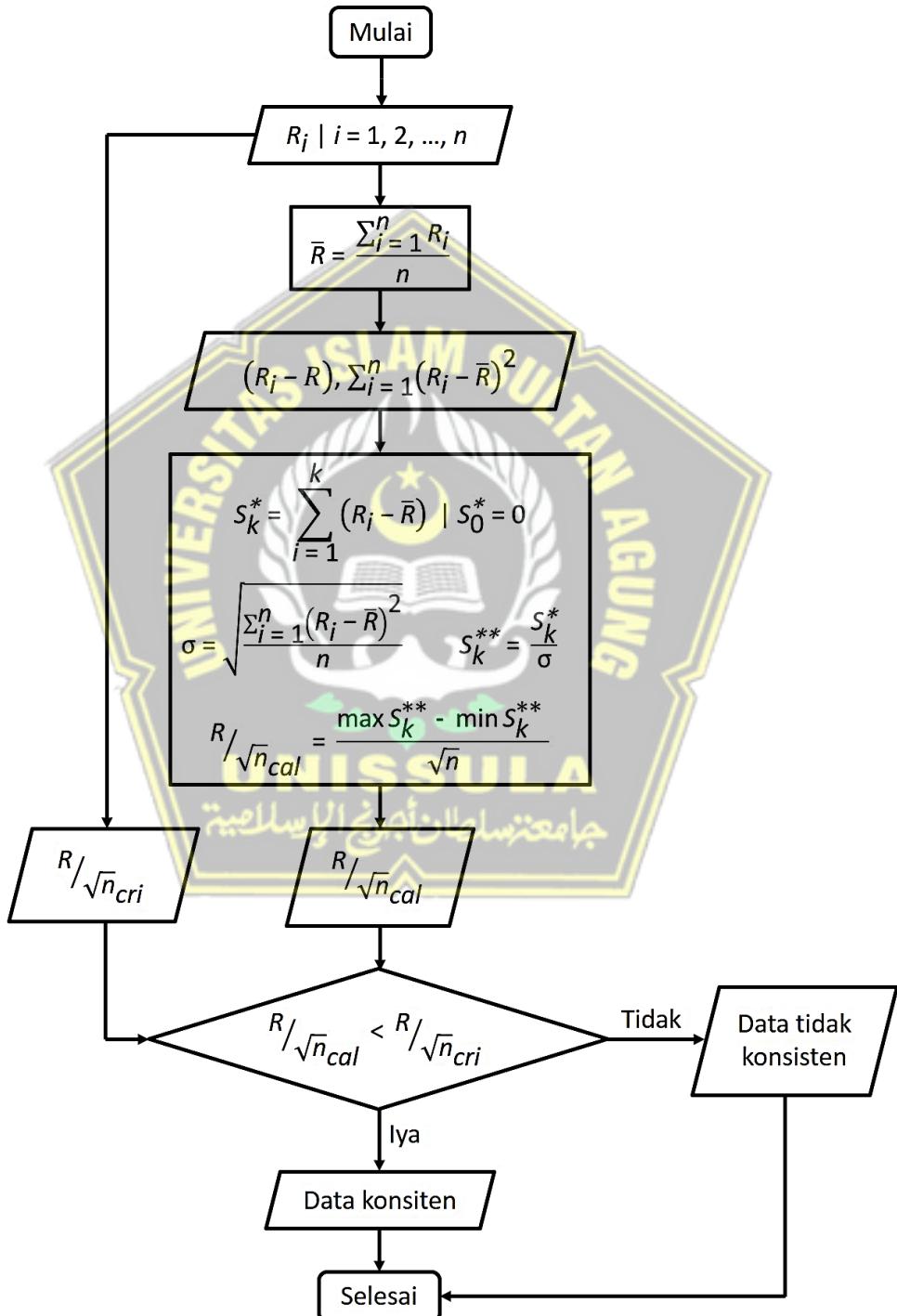
Gambar 3.2. Prosedur Analisis Potensi PLTA Sungai Tuk Bening

3.5.1. Analisis Evapotranspirasi Acuan

Evapotranspirasi acuan DPS Tuk Bening dilakukan menggunakan metode Penman-Monteith berdasarkan data klimatologi dan data geografi yang terdiri dari koordinat dan elevasi titik acuan. Analisis evapotranspirasi acuan tersebut dilakukan untuk setiap bulan selama kurun tahun 2009 s.d. 2019 dengan mengacu pada SNI 7745:2012.

3.5.2. Pengujian Konsistensi Data Debit

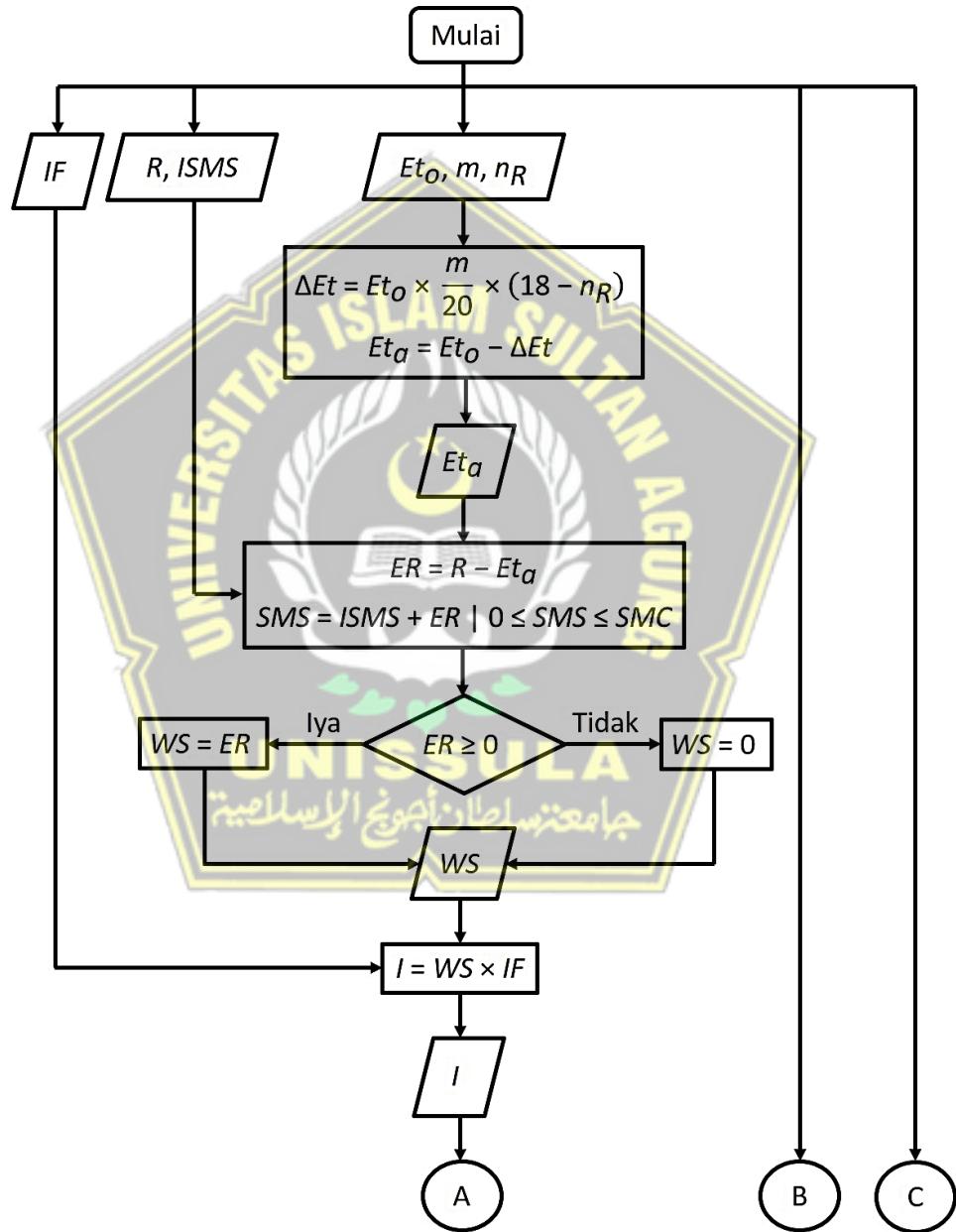
Pengujian konsistensi data curah hujan (R_i) dilakukan untuk data hujan tahunan 2009 s.d. 2019 ($n = 11$). Pengujian konsistensi data curah hujan dilakukan menggunakan metode RAPS dengan langkah-langkah yang diperlihatkan pada Gambar 3.3.



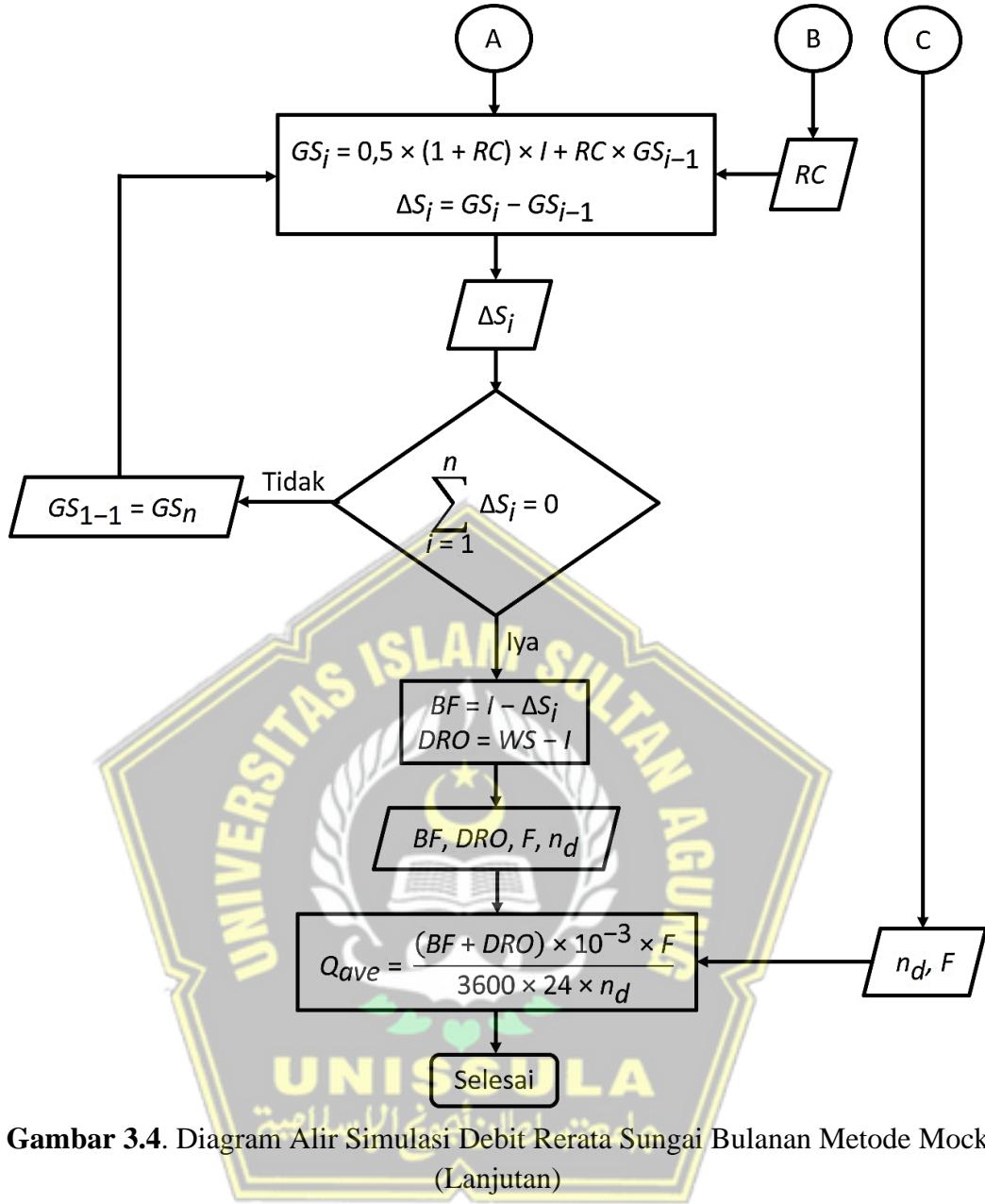
Gambar 3.3. Diagram Alir Pengujian Konsistensi Data Debit Metode RAPS

3.5.3. Semulasi Debit Rerata Sungai

Simulasi debit rerata sungai (Q_{ave}) dilakukan menggunakan metode Mock berdasarkan data evapotranspirasi acuan (Et_O), data curah hujan (R dan n_R), dan karakteristik DPS Tuk Bening (IF , m , SMC , RC dan F). Simulasi Q_{ave} dilakukan untuk setiap urutan bulan (i) selama kurun tahun 2009 s.d. 2019 ($n = 144$) dengan langkah-langkah yang diperlihatkan pada Gambar 3.4.



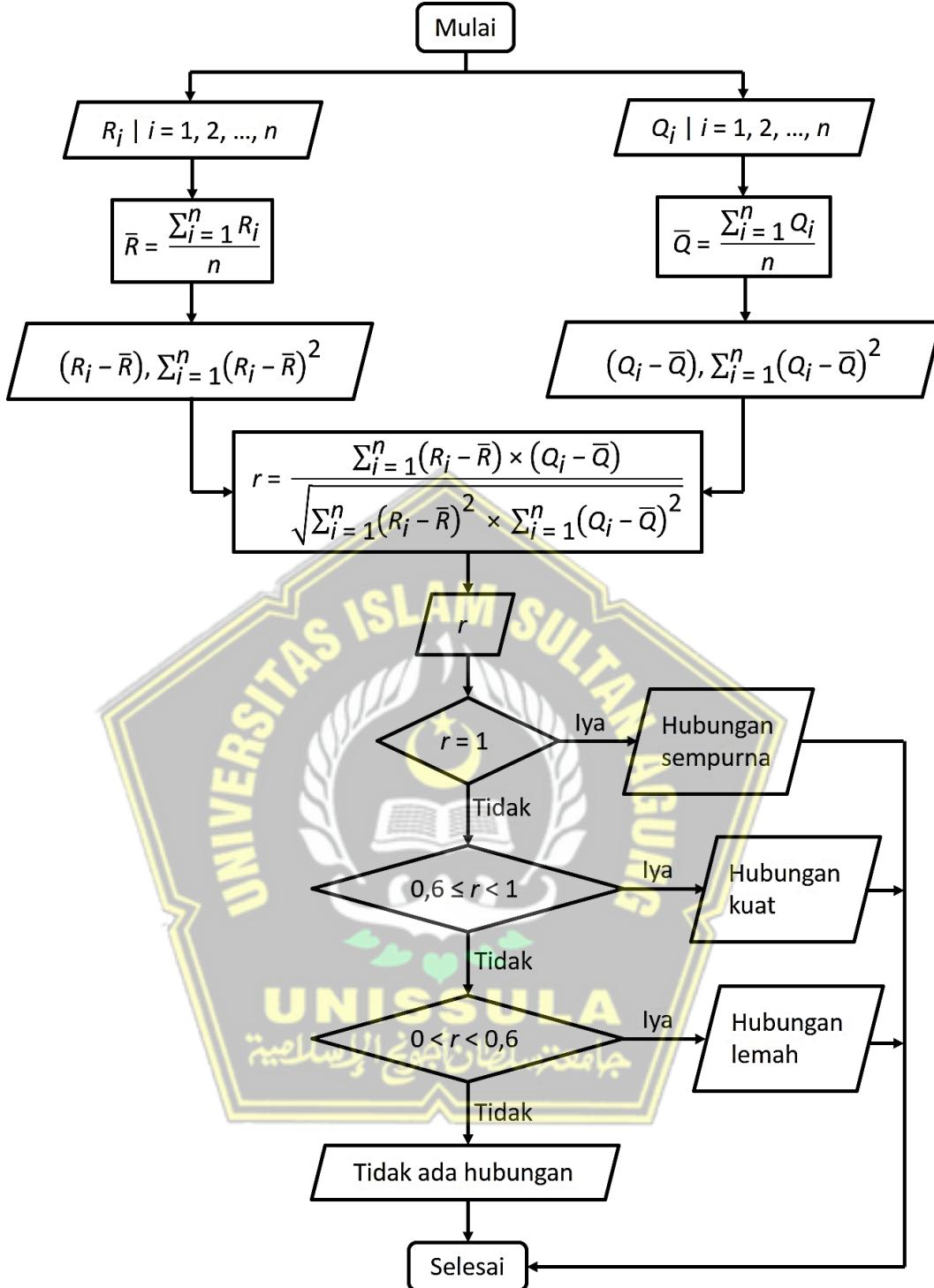
Gambar 3.4. Diagram Alir Simulasi Debit Rerata Sungai Bulanan Metode Mock



Gambar 3.4. Diagram Alir Simulasi Debit Rerata Sungai Bulanan Metode Mock (Lanjutan)

3.5.4. Validasi Data Debit Simulasi

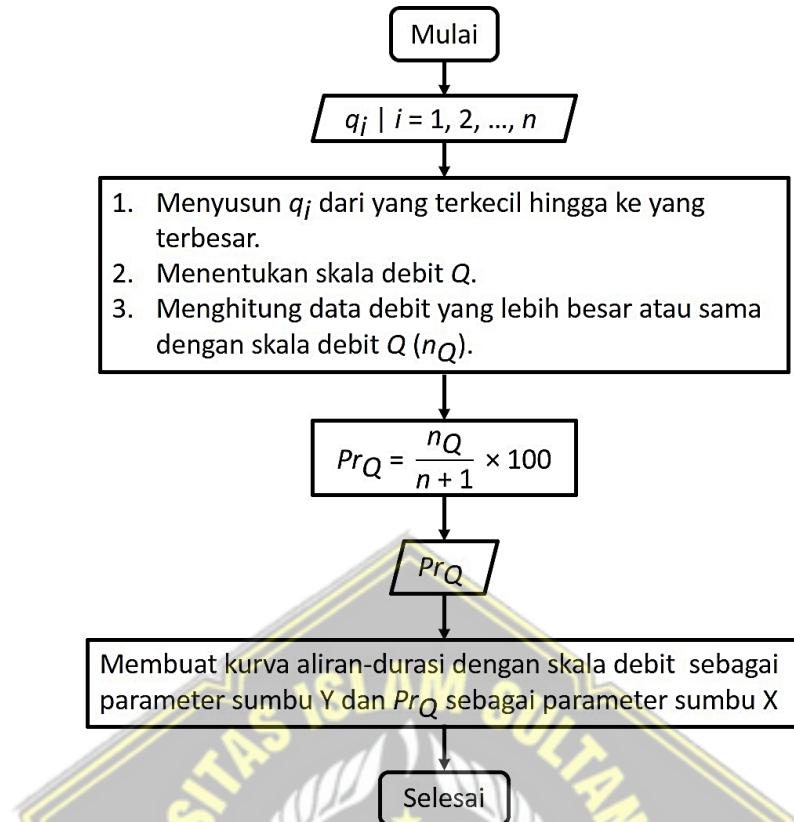
Validasi data debit simulasi dilakukan dengan cara menentukan kekuatan hubungan antara data debit simulasi dan curah hujan. Penentuan kekuatan hubungan antara data debit simulasi (Q_i) dan curah hujan (R_i) dilakukan untuk setiap tahun ($n = 12$) dan bulan ($n = 11$). Kekuatan hubungan antara kedua data tersebut ditentukan berdasarkan koefisien korelasi (r) dengan langkah-langkah yang diperlihatkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Diagram Alir Validasi Data Debit Simulasi berdasarkan Koefisien Korelasi

3.5.5. Pembuatan Kurva Aliran-Durasi

Kurva aliran-durasi dibuat berdasarkan data debit rerata simulasi ($q_i | n = 144$) dengan langkah-langkah yang diperlihatkan pada Gambar 3.6.

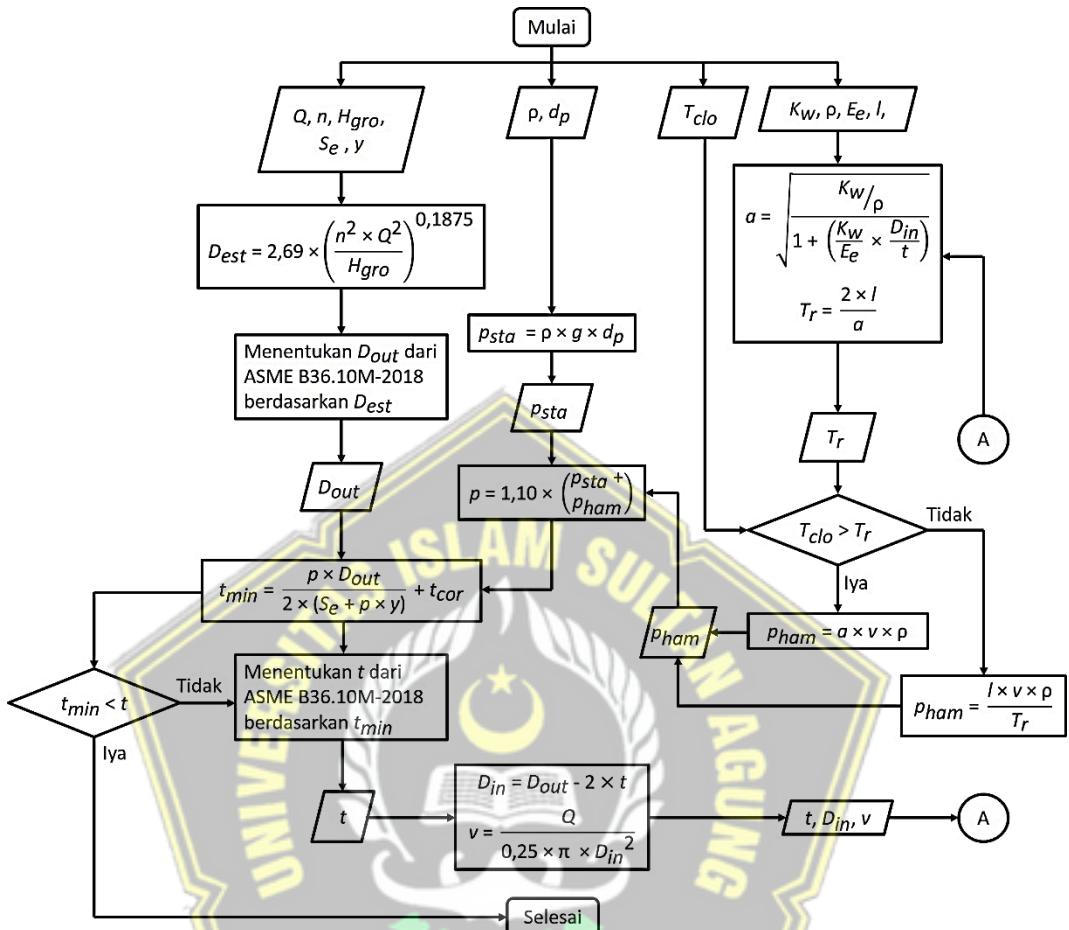


Gambar 3.6. Diagram Alir Pembuatan Kurva Aliran-Durasi

3.5.6. Perencanaan Penampang Pipa Pesat

Perencanaan penampang pipa pesat terdiri dari dua tahap, yaitu tahap penentuan diameter dalam perkiraan (D_{est}) dan tahap penentuan diameter sebenarnya berdasarkan tekanan rencana (p). Variabel yang dipertimbangkan dalam penentuan D_{est} adalah debit andalan (Q), koefisien kekasaran Manning (n), dan tinggi energi kotor (H_{gro}). Penentuan Q dilakukan berdasarkan kurva aliran-durasi, n ditentukan berdasarkan jenis bahan pipa pesat, dan H_{gro} ditentukan berdasarkan perbedaan elevasi permukaan air di pemasukan terhadap elevasi pengeluaran pipa pesat. Variabel yang dipertimbangkan dalam penentuan p adalah massa jenis air (ρ), modulus bulk air (K_w), kedalaman tekananan hidrostatik (d_p), modulus elastisitas pipa pesat (E_e), panjang pipa pesat (l), dan durasi penutupan katup hilir (T_{clo}). Penentuan ρ dilakukan berdasarkan Tabel 2.5, K_w ditentukan sebesar $2,1 \times 10^9$ Pa, d_p ditentukan berdasarkan perbedaan elevasi permukaan air di pemasukan terhadap titik tinjauan, E_e ditentukan berdasarkan jenis bahan dengan

mengacu pada ASME B31.1 (2016), l ditentukan berdasarkan rencana pipa pesat, dan T_{clo} ditentukan berdasarkan asumsi.



Gambar 3.7. Diagram Alir Perencanaan Penampang Pipa Pesat

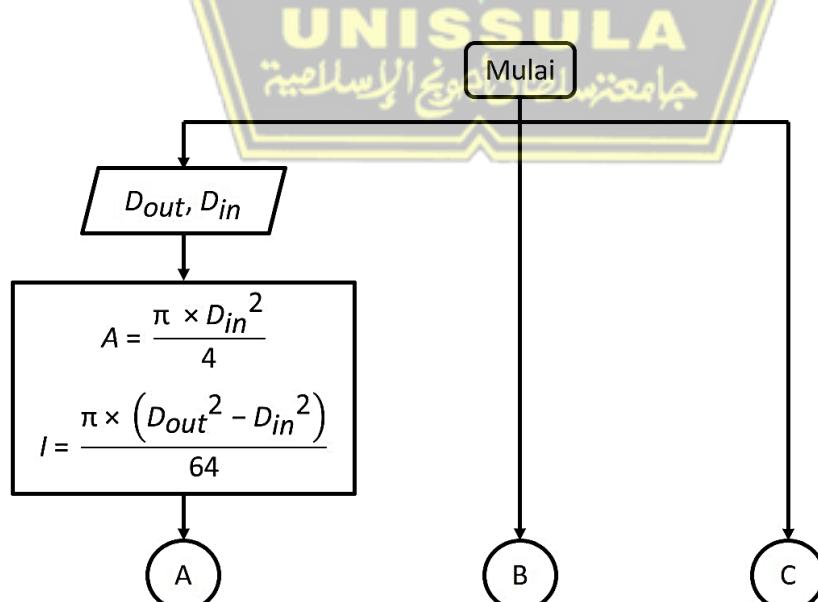
Seperti yang terlihat pada Gambar 3.7, Diameter luar pipa pesat (D_{out}) dari ASME B36.10M (2018) ditentukan berdasarkan D_{est} , kemudian tebal dinding pipa pesat minimum (t_{min}) ditentukan berdasarkan p , D_{out} , tegangan izin maksimum (S_e) dan koefisien sifat bahan (y), di mana S_e dan y ditentukan berdasarkan jenis bahan pipa pesat dengan mengacu pada ASME B31.1 (2016). Tebal dinding pipa pesat (t) dari ASME B36.10M (2018) ditentukan berdasarkan t_{min} dan harus mampu menahan p yang terdiri dari tekanan hidrostatis (p_{sta}) dan tekanan water hammer (p_{ham}). Penentuan p_{ham} sendiri dilakukan dengan mempertimbangkan t , diameter dalam pipa pesat (D_{in}) yang merupakan pengurangan D_{out} dengan $2 \times t$, dan kecepatan aliran rerata (v) yang ditentukan berdasarkan D_{in} . Dengan demikian,

perencanaan penampang pipa pesat hanya dapat dilakukan dengan cara iterasi hingga t yang mampu menahan p telah didapatkan. Iterasi t dalam perencanaan penampang pipa pesat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

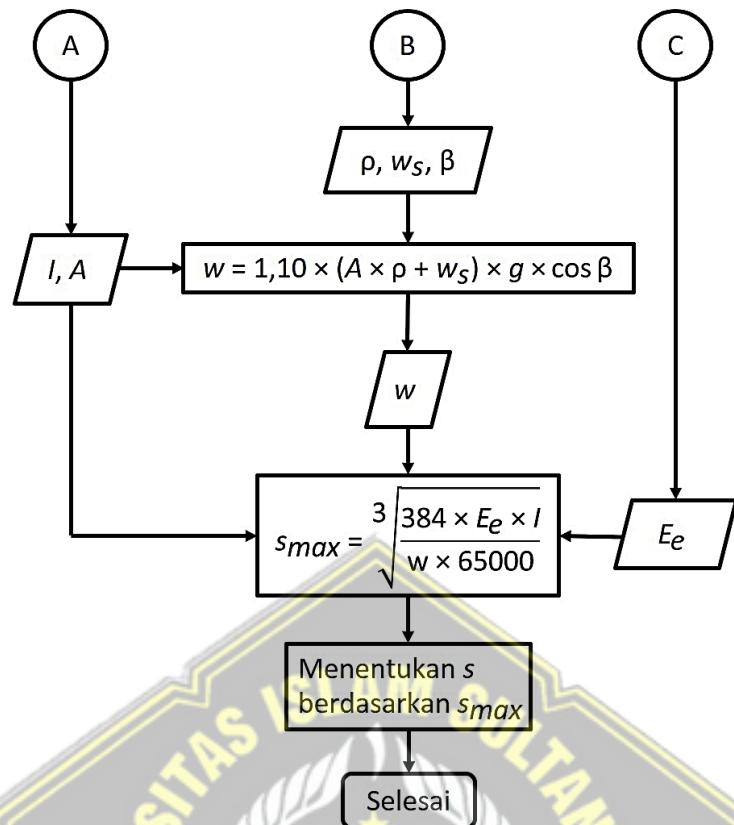
1. Menentukan t_{min} dengan hanya mempertimbangkan p_{sta} dalam penentuan p , kemudian menentukan t dari ASME B36.10M (2018) berdasarkan t_{min} dengan penaksiran t dapat menahan p_{ham} .
2. Menentukan D_{in} dan v dengan mempertimbangkan t yang sebelumnya ditentukan, kemudian menentukan p_{ham} berdasarkan D_{in} dan v .
3. Menentukan t_{min} yang baru berdasarkan p dengan mempertimbangkan p_{sta} dan p_{ham} .
4. Jika t yang sebelumnya ditentukan lebih besar dari t_{min} yang baru maka iterasi telah selesai. Jika t yang sebelumnya ditentukan lebih kecil dari t_{min} yang baru maka iterasi tetap dilanjutkan dengan memilih t yang baru dari ASME B36.10M (2018) dan mengulangi langkah ke-2 s.d. langkah ke-4.

3.5.7. Perencanaan Jarak Tumpuan Pipa Pesat

Jarak tumpuan pipa pesat (s) ditentukan berdasarkan momen lentur maksimum akibat beban rencana (w) yang dapat ditahan oleh penampang pipa pesat, di mana w terdiri dari beban air dan beban pipa pesat (w_s). Penentuan s dilakukan dengan langkah-langkah yang diperlihatkan pada Gambar 3.8.



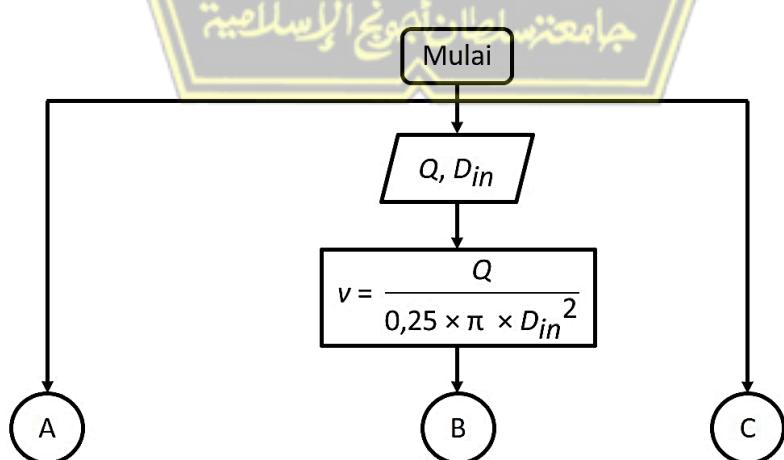
Gambar 3.8. Diagram Alir Perencanaan Jarak Tumpuan Pipa Pesat



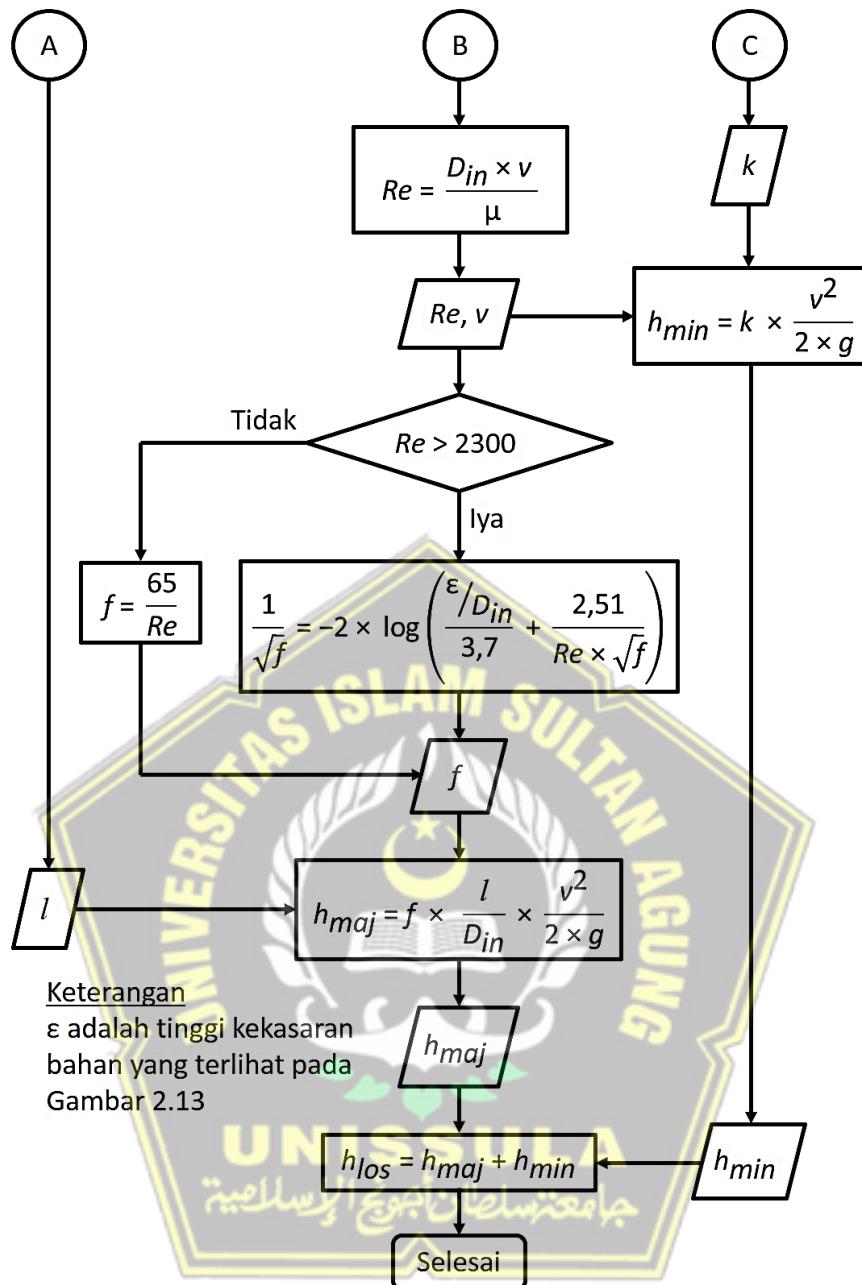
Gambar 3.12. Diagram Alir Perencanaan Jarak Tumpuan Pipa Pesat (Lanjutan)

3.5.8. Penentuan Kehilangan Tinggi Energi

Kehilangan tinggi energi (h_{los}) yang terdiri dari kehilangan mayor (h_{maj}) dan kehilangan minor (h_{min}) ditentukan berdasarkan Q dan D_{in} dengan langkah-langkah yang diperlihatkan pada Gambar 3.9.



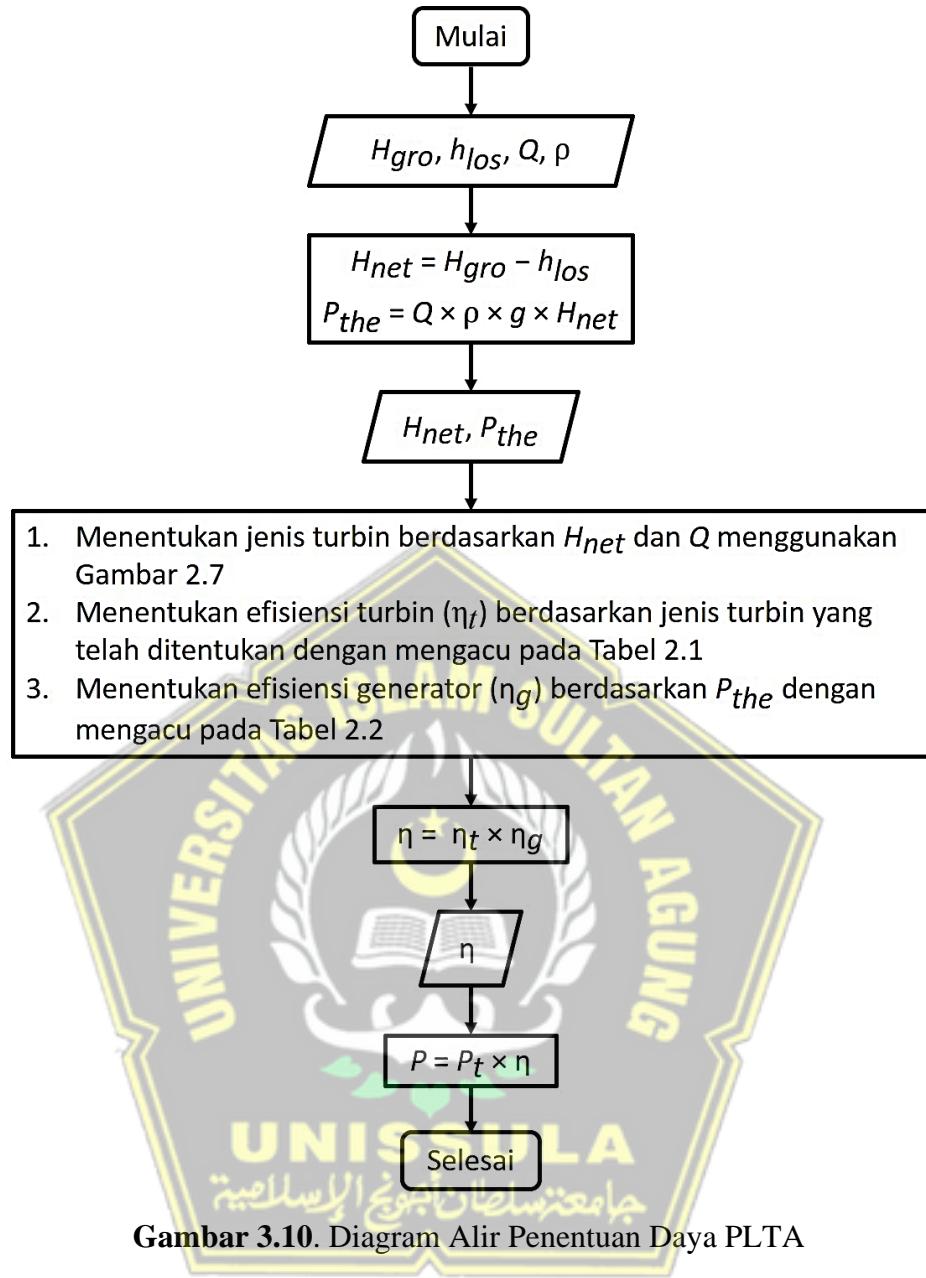
Gambar 3.9. Diagram Alir Penentuan Kehilangan Tinggi Energi



Gambar 3.13. Diagram Alir Penentuan Kehilangan Tinggi Energi (Lanjutan)

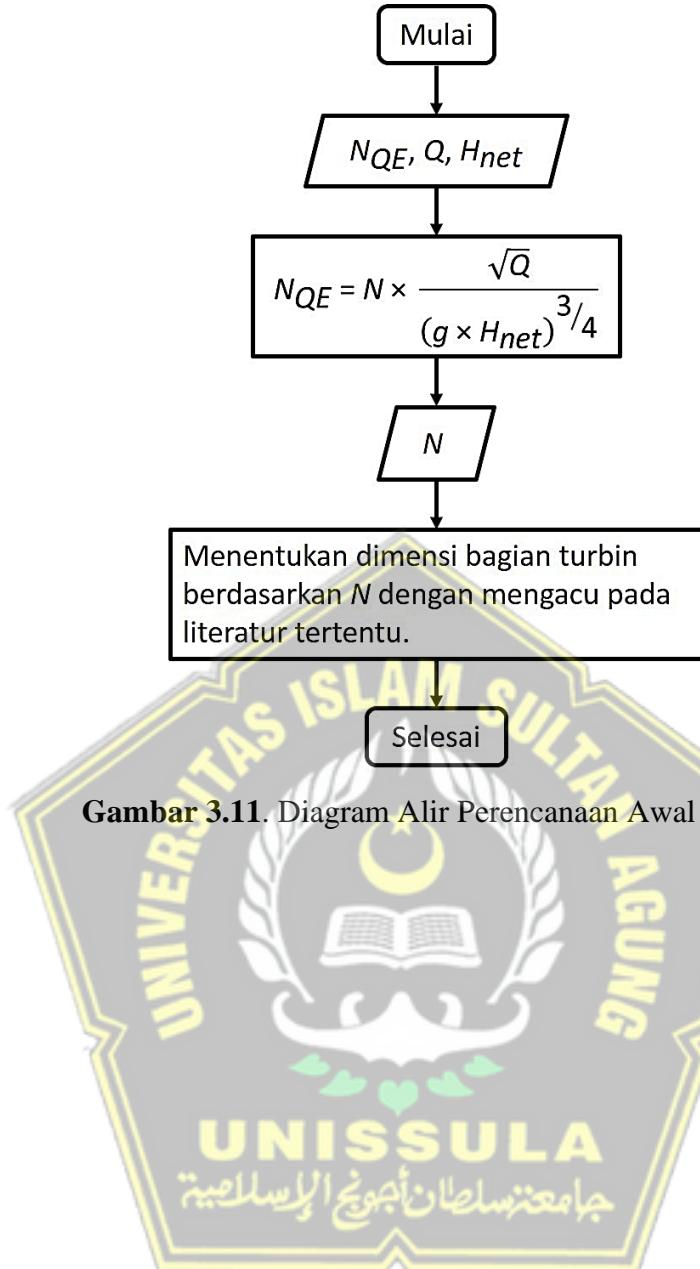
3.5.9. Penentuan Daya PLTA

Daya PLTA (P) ditentukan berdasarkan daya teoritis (P_t) dan efisiensi PLTA (η) dengan mempertimbangkan Q , H_{gro} , dan h_{los} dengan langkah-langkah yang dipertlihatkan pada Gambar 3.10.

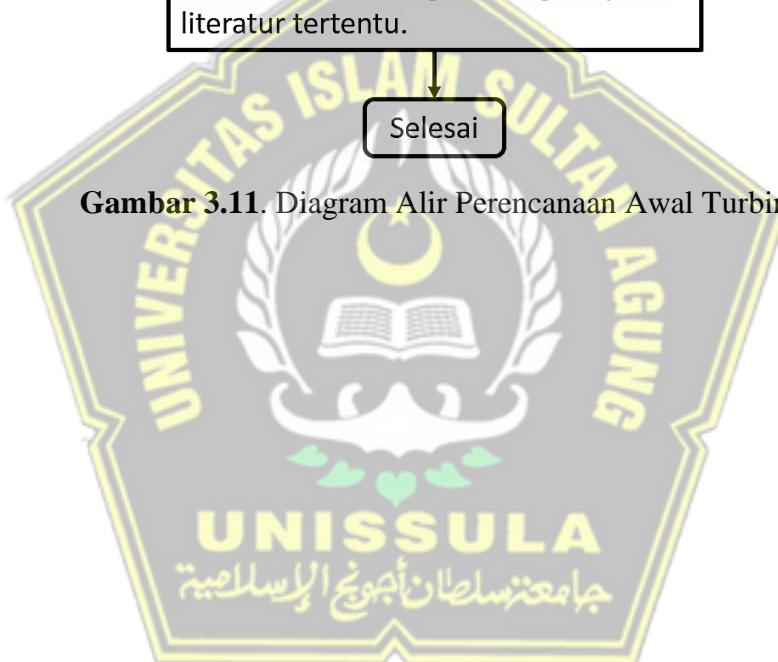


3.5.10. Perencanaan Awal Turbin

Dimensi bagian turbin direncanakan berdasarkan kecepatan rotasional (N) yang ditentukan berdasarkan kecepatan spesifik nirdimensi (N_{QE}), di mana N_{QE} ditentukan berdasarkan jenis turbin yang digunakan dengan mengacu pada Tabel 2.7. Penentuan N dilakukan dengan mempertimbangkan Q dan tinggi energi bersih (H_{net}) dengan langkah-langkah yang diperlihatkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Diagram Alir Perencanaan Awal Turbin

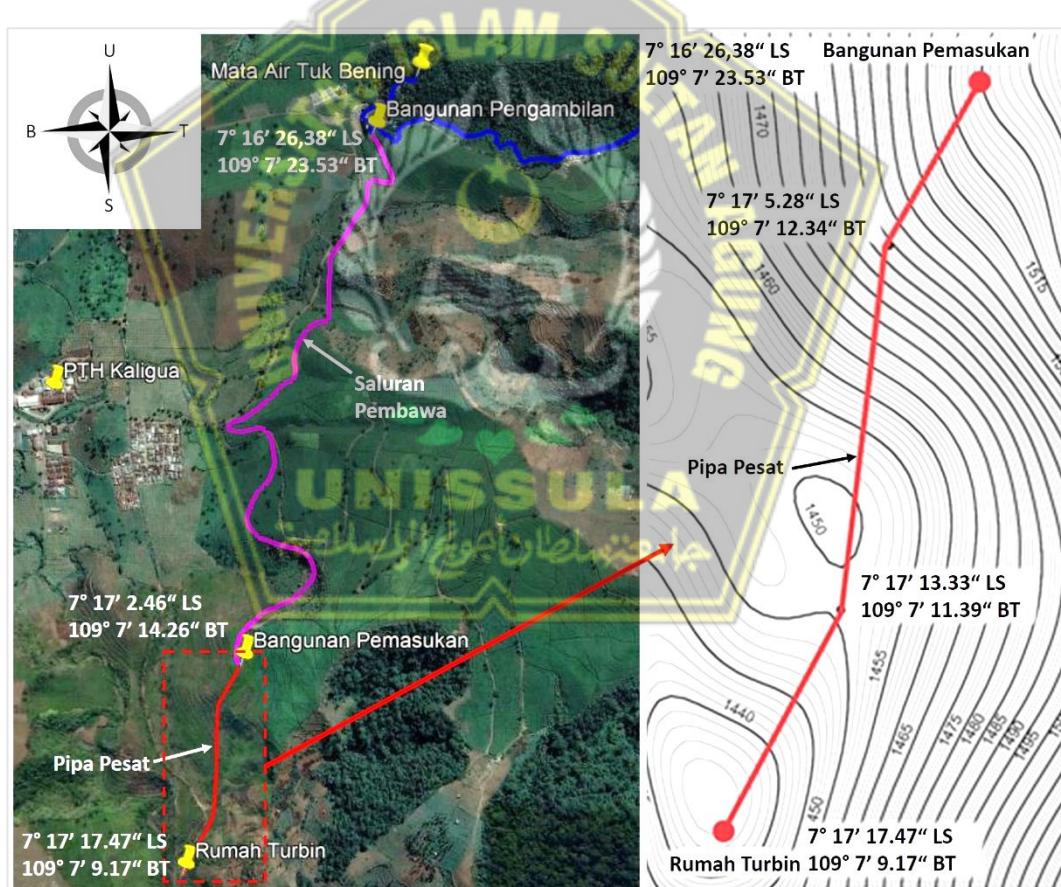


BAB IV

ANALISIS DAN PEMAHASAN

4.1. Rencana Tata Letak Bangunan

Sungai Tuk Bening adalah sungai kecil yang mengalir di samping kolam wisata mata air Tuk Bening yang berlokasi di Kebun Kaligua milik PTPN 9. Menurut Kepala Teknisi PTH Kaligua (2020), sungai Tuk Bening tidak memiliki aliran pada saat musim kemarau, sedangkan mata air Tuk Bening tetap mengeluarkan air sebanyak 170 l/s. Dengan keterbatasan debit air tersebut, tata letak bangunan PLTA Kaligua direncanakan dengan tinggi energi aliran sebagai pertimbangan utama. Tata letak bangunan PLTA Kaligua direncanakan dengan konfigurasi RoR seperti diperlihatkan pada Gambar 4.1.



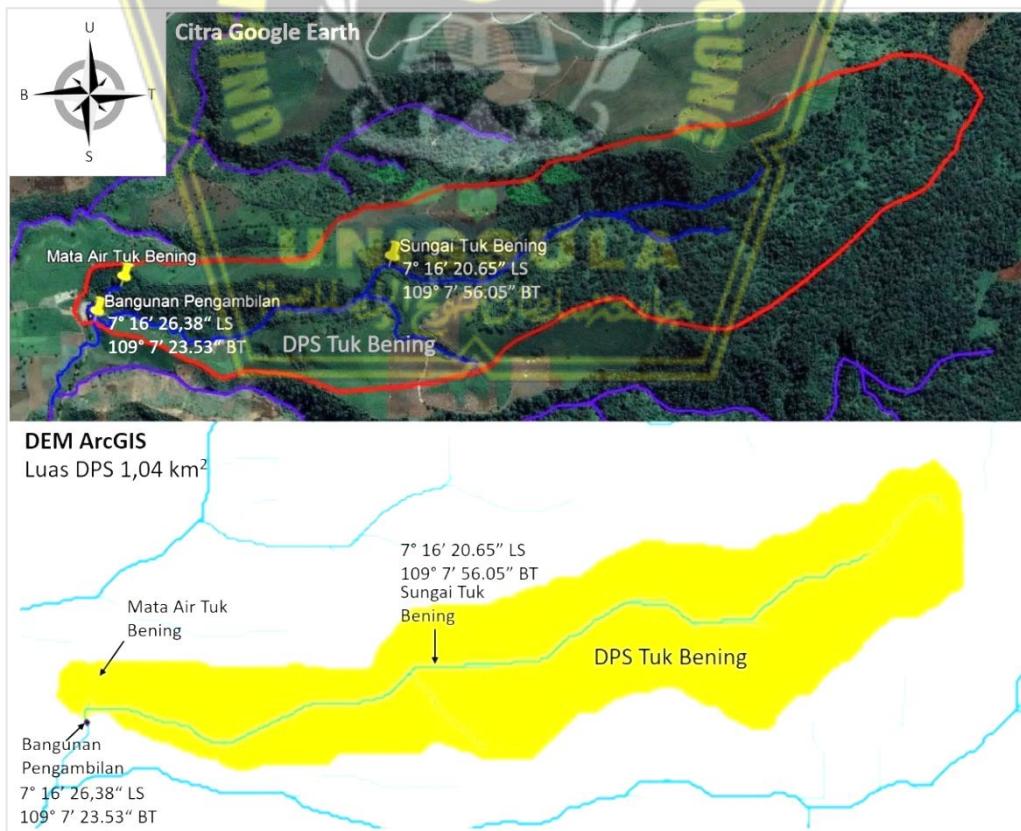
Gambar 4.1. Rencana Tata Letak Bangunan PLTA Kaligua

Tata letak bangunan PLTA Kaligua direncanakan sedemikian karena perbedaan elevasi antara bangunan pemasukan dan rumah turbin adalah yang paling

tinggi dibandingkan dengan sekiar lokasi yang ditinjau. Menurut topografi lahan yang terlihat pada Gambar 4.1, bangunan pemasukan berada di elevasi +1525 mdpl dan rumah turbin berada di elevasi +1436 mdpl, sehingga perbedaan elevasi antara kedua bangunan tersebut adalah 89 m. Air dari bangunan pengambilan dapat dialirkan menuju bangunan pemasukan secara gravitasi karena bangunan pengambilan berada di elevasi +1542 mdpl yang 17 m lebih tinggi dari elevasi bangunan pemasukan. Namun, saluran pembawa sebagai media pengaliran air menuju bangunan pemasukan perlu dibangun sepanjang ±1,62 km yang dinilai sebagai kekurangan untuk dianalisis lebih lanjut.

4.2. Daerah Pengaliran Sungai

DPS Tuk Bening dibuat berdasarkan DEM yang diolah menggunakan program ArcGIS Dekstop 10.3. DPS Tuk Bening dengan bangunan pengambilan yang berada di koordinat $7^{\circ} 16' 26,38''$ LS - $109^{\circ} 7' 23,53''$ BT memiliki luas 1,04 km^2 seperti diperlihatkan pada Gambar 4.2. Luas DPS Tuk Bening tersebut selanjutnya akan dipertimbangkan dalam simulasi debit rerata sungai Tuk Bening.



Gambar 4.2. Daerah Pengaliran Sungai Tuk Bening

4.3. Evapotranspirasi Acuan

Evapotranspirasi acuan DPS Tuk Bening dianalisis menggunakan metode Penman-Monteith dengan mengacu pada SNI 7455:2012. Data yang dipertimbangkan dalam analisis evapotranspirasi acuan adalah data klimatologi dan data geografi.

4.3.1. Data Klimatologi

Kebun Kaligua tidak memiliki data klimatologi standar untuk analisis evapotranspirasi acuan Penman-Monteith, sedangkan laman *dataonline.bmkg.go.id* tidak menyediakan data klimatologi dari Kabupaten Brebes. Karena itu, data klimatologi yang dipertimbangkan dalam analisis evapotranspirasi acuan DPS Tuk Bening adalah data yang berasal dari Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal (2020). Data klimatologi selama kurun tahun 2009 s.d. 2019 yang berupa data temperatur udara rerata, kelembaban udara relatif, kecepatan angin rerata, dan durasi penyinaran matahari secara berurutan diperlihatkan pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, Tabel 4.3, dan Tabel 4.4.

Tabel 4.1. Data Temperatur Udara Rerata

Tahun	Temperatur Udara Rerata (°C)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	20,9	20,5	21,5	22,0	21,7	21,6	21,2	21,2	22,2	22,5	22,3	22,1
2010	21,2	21,8	22,0	22,4	22,3	21,8	21,7	21,8	21,9	21,9	22,0	21,1
2011	21,1	21,0	21,2	21,7	21,8	21,5	21,0	21,0	21,6	22,1	21,9	21,8
2012	21,1	21,3	21,3	21,9	22,1	21,6	21,1	21,0	21,7	22,4	22,4	21,7
2013	21,1	21,7	22,0	22,1	22,1	21,8	21,3	21,4	21,3	20,7	21,8	21,5
2014	20,9	21,0	21,6	22,0	22,4	22,2	21,4	21,1	22,2	21,4	22,2	21,8
2015	21,2	20,7	21,6	21,7	21,9	21,5	21,1	20,9	21,5	22,2	22,6	22,1
2016	22,2	21,3	22,2	22,5	22,6	22,1	21,9	21,8	21,9	21,9	22,0	21,8
2017	21,2	21,3	21,7	21,9	22,0	21,8	21,3	21,3	21,8	22,4	22,0	21,8
2018	21,8	20,8	21,6	22,1	22,1	21,6	20,9	20,9	21,8	22,3	22,5	22,2
2019	22,5	22,4	22,5	23,1	23,0	22,1	21,6	21,7	22,1	23,1	23,6	23,1

(Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal, 2020)

Data temperatur udara rerata pada Tabel 4.1 merupakan hasil penyesuaian data asli dari Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal (2020) terhadap temperatur nyata di Kebun Kaligua. Penyesuaian tersebut dilakukan karena Kebun Kaligua yang berada di lereng barat Gunung Slamet memiliki temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan pusat Kabupaten Tegal. Menurut Laporan Audit Energi PT Perkebunan Nusantara IX Pabrik Teh Kaligua (2013), Kebun Kaligua memiliki temperatur rerata maksimum 23 °C dengan perbandingan 73% terhadap temperatur udara rerata maksimum asli dari Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal (2020). Dengan demikian, penyesuaian dilakukan dengan cara mengalikan data temperatur dari Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal (2020) dengan angka 0,73.

Tabel 4.2. Data Kelembaban Udara Relatif

Tahun	Kelembaban Udara Relatif (%)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	86,0	87,9	80,8	79,1	80,6	78,2	72,0	71,7	67,9	70,4	74,6	77,8
2010	84,6	83,3	81,8	78,8	81,2	81,2	78,6	77,6	79,6	77,6	79,3	84,1
2011	85,1	85,9	83,4	81,7	80,1	74,4	76,7	72,1	70,0	72,9	78,5	81,0
2012	85,1	83,1	82,5	79,0	75,3	75,2	71,7	69,8	69,7	72,1	76,0	80,9
2013	85,7	81,5	81,0	80,6	80,7	81,9	79,6	73,9	71,5	73,6	77,1	82,4
2014	85,8	86,3	84,0	80,6	80,5	78,9	77,6	79,3	79,3	71,8	76,0	81,1
2015	84,7	86,9	82,8	83,0	77,3	74,7	74,8	74,2	70,2	70,0	74,9	81,9
2016	82,4	86,9	83,7	81,8	80,6	79,1	80,6	77,3	80,4	80,5	80,3	81,2
2017	85,9	85,0	82,5	81,3	79,3	80,0	75,8	72,0	72,8	75,4	78,7	80,4
2018	80,1	87,4	82,2	80,6	77,5	76,8	72,5	69,3	70,4	71,4	75,1	75,7
2019	82,9	82,3	81,6	80,3	77,3	72,6	71,2	69,1	69,5	69,5	71,4	78,6

(Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal, 2020)

Tabel 4.3. Data Kecepatan Angin Rerata

Tahun	Kecepatan Angin Rerata (m/s)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	2,77	2,25	1,65	1,77	1,32	4,57	1,90	2,16	2,43	2,13	1,90	2,00
2010	2,45	1,86	1,61	1,73	1,68	1,53	1,87	2,06	1,97	2,16	2,10	2,35

Tabel 4.3. Data Kecapatan Angin Rerata (Lanjutan)

Tahun	Kecepatan Angin Rerata (m/s)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2011	3,10	2,79	2,19	2,10	2,00	2,53	2,29	2,84	3,07	2,77	2,20	2,74
2012	3,10	2,21	2,58	2,20	2,32	2,60	2,74	3,03	2,97	2,71	2,27	2,06
2013	2,39	2,39	2,03	1,97	1,84	1,97	1,97	2,29	2,50	2,40	2,12	2,70
2014	2,84	2,25	2,03	2,00	2,06	1,97	2,06	2,60	2,79	2,40	2,08	2,23
2015	2,21	2,20	2,11	1,90	2,00	2,10	2,29	2,47	2,70	2,39	2,03	2,10
2016	1,94	2,17	1,84	2,03	2,16	2,10	2,03	2,06	1,90	2,06	1,87	2,21
2017	1,87	2,36	1,81	1,97	1,97	2,03	2,31	2,65	2,53	2,42	1,85	2,18
2018	2,58	1,84	1,81	1,63	1,97	2,17	2,42	2,52	2,60	2,75	2,12	2,21
2019	1,95	1,85	2,16	1,81	1,97	2,37	2,48	2,42	2,50	2,68	2,50	1,79

(Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal, 2020)

Tabel 4.4. Data Durasi Penyinaran Matahari

Tahun	Durasi Penyinaran Matahari (jam)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	2,83	5,95	5,36	5,07	7,10	7,22	7,71	7,41	6,16	4,28	4,85	2,83
2010	5,12	4,98	5,59	5,48	4,76	5,14	6,10	7,99	5,00	4,49	3,34	5,12
2011	3,67	4,11	5,35	5,56	6,90	7,29	7,76	7,35	5,76	4,21	4,22	3,67
2012	4,85	3,80	6,11	7,04	4,77	7,19	7,19	7,42	6,78	4,40	3,55	4,85
2013	4,77	5,55	5,23	5,65	5,14	5,99	7,15	7,12	6,21	4,50	3,93	4,77
2014	3,75	6,47	6,54	7,30	7,05	6,29	6,30	5,45	7,65	6,10	4,33	3,75
2015	4,66	6,35	5,41	7,65	8,12	8,39	8,68	9,43	9,08	7,70	4,93	4,66
2016	4,12	5,35	5,72	6,71	6,84	7,35	7,17	7,57	5,12	5,03	4,38	4,12
2017	4,60	5,63	6,58	6,65	6,82	6,68	8,41	8,13	7,02	4,35	4,35	4,60
2018	4,13	5,82	6,89	7,39	7,33	8,42	8,41	8,27	8,62	5,30	4,58	4,13
2019	6,24	4,13	6,97	7,30	7,72	8,29	8,50	8,98	9,09	7,47	5,94	6,24

(Stasiun Meteorologi Klas III Kabupaten Tegal, 2020)

Selain data temperatur udara rerata DPS, temperatur pada elevasi permukaan laut juga dipertimbangkan dalam analisis evapotranspirasi acuan Penman-Monteith. Menurut Syaifullah (2015), temperatur pada elevasi permukaan

laut Indonesia berkisar dari 26 s.d. 31,5 °C. Dalam analisis evapotranspirasi acuan DPS Tuk Bening, temperatur pada elevasi permukaan laut yang ditentukan adalah 29,3 °C (302,45 K).

4.3.2. Data Geografi

Data geografi yang dipertimbangkan dalam analisis evapotranspirasi acuan Penman-Moteith adalah koordinat lintang dan elevasi titik acuan. Titik acuan DPS Tuk Bening ditentukan berada di koordinat 7° 16' 20,65" LS (-0,1269 rad) dan elevasi +1732 mpdl seperti yang terlihat pada Gambar 4.2.

4.3.3. Hasil Analisis Evapotranspirasi

Analisis evapotranspirasi acuan DPS Tuk Bening dilakukan secara tabulasi untuk setiap bulan selama kurun tahun 2009 s.d. 2019 menggunakan Persamaan 2.25 s.d. Persamaan 2.44. Analisis evapotranspirasi acuan tahun 2009 yang dijadikan sebagai contoh diperlihatkan pada Tabel 4.6 dan analaisis untuk tahun-tahun setelahnya dilampirkan pada Lampiran 1 s.d. Lampiran 10. Rekapitulasi hasil analisis evapotranspirasi acuan DPS Tuk Bening diperlihatkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Rekapitulasi Hasil Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening

Tahun	Evapotranspirasi Acuan (mm/hari)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	3,05	2,78	3,62	3,32	2,88	3,39	3,31	3,73	4,21	4,04	3,49	3,53
2010	3,07	3,50	3,42	3,41	3,02	2,68	2,88	3,37	4,01	3,57	3,43	2,99
2011	2,93	3,06	3,16	3,26	3,05	3,25	3,27	3,81	4,20	3,95	3,39	3,34
2012	3,06	3,42	3,13	3,50	3,46	2,93	3,44	3,82	4,22	4,22	3,54	3,15
2013	3,02	3,47	3,59	3,29	3,06	2,77	2,99	3,63	3,99	3,84	3,48	3,21
2014	2,80	3,06	3,70	3,55	3,41	3,18	3,09	3,35	3,57	4,26	3,88	3,33
2015	3,30	3,23	3,69	3,24	3,48	3,38	3,48	3,86	4,52	4,68	4,30	3,46
2016	3,68	3,16	3,50	3,39	3,32	3,14	3,26	3,58	3,92	3,54	3,52	3,34
2017	3,06	3,31	3,54	3,54	3,28	3,09	3,21	3,94	4,21	4,14	3,39	3,35
2018	3,30	3,11	3,58	3,61	3,45	3,23	3,54	3,94	4,31	4,62	3,76	3,55
2019	3,40	3,84	3,31	3,74	3,52	3,46	3,63	4,02	4,49	4,85	4,48	3,83

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.6. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2009

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	20,86	20,48	21,52	22,03	21,68	21,59	21,22	21,15	22,15	22,54	22,25	22,12
e_s	kPa	Per. 2.25	2,47	2,41	2,57	2,65	2,59	2,58	2,52	2,51	2,67	2,73	2,69	2,66
ϕ	%	Tab. 4.2	85,97	87,93	80,81	79,13	80,55	78,20	72,00	71,74	67,93	70,39	74,63	77,77
e_a	kPa	Per. 2.26	2,12	2,12	2,08	2,10	2,09	2,02	1,82	1,80	1,81	1,92	2,00	2,07
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30	29,30
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	2,77	2,25	1,65	1,77	1,32	4,57	1,90	2,16	2,43	2,13	1,90	2,00
U_2	m/s	Per. 2.31	2,03	1,65	1,21	1,30	0,97	3,35	1,39	1,59	1,78	1,56	1,39	1,47
ε'	-	Per. 2.32	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.6. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2009 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	3,79	2,83	5,95	5,36	5,07	7,10	7,22	7,71	7,41	6,16	4,28	4,85
f	-	Per. 2.37	0,38	0,31	0,55	0,51	0,49	0,65	0,66	0,69	0,66	0,56	0,41	0,45
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,87	1,53	2,78	2,59	2,50	3,40	3,67	3,86	3,71	3,04	2,18	2,33
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	15,62	14,23	18,82	16,77	15,00	16,89	17,41	19,49	20,52	19,29	16,34	17,12
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	12,03	10,96	14,49	12,91	11,55	13,00	13,40	15,01	15,80	14,85	12,58	13,18
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	10,15	9,43	11,71	10,32	9,05	9,60	9,73	11,15	12,09	11,82	10,40	10,85
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,05	2,78	3,62	3,32	2,88	3,39	3,31	3,73	4,21	4,04	3,49	3,53

4.4. Debit Rerata Simulasi

Simulasi debit rerata sungai Tuk Bening dilakukan menggunakan metode Mock dengan mempertimbangkan data hujan bulanan, evapotranspirasi acuan bulanan, dan karakteristik DPS.

4.4.1. Uji Konsistensi Data Hujan

Data curah hujan dan jumlah hari hujan selama kurun tahun 2009 s.d. 2019 secara berurutan diperlihatkan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. Kedua data hujan tersebut didapatkan dari stasiun penakar hujan milik PTPN 9 (2020) yang berlokasi di Kebun Kaligua.

Tabel 4.7. Data Curah Hujan Bulanan Kebun Kaligua

Tahun	Curah Hujan Bulanan (mm)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	798	844	269	547	293	167	84	0	31	269	724	365
2010	876	491	637	340	414	219	198	213	401	280	369	887
2011	479	731	509	405	347	33	31	0	13	197	696	555
2012	519	460	526	339	235	8	6	7	0	162	262	452
2013	452	270	167	277	136	177	147	27	27	122	145	252
2014	165	160	142	81	88	63	101	54	3	116	269	268
2015	274	271	246	237	56	44	0	0	0	6	275	145
2016	124	293	222	166	204	146	51	72	207	113	298	374
2017	275	260	136	175	110	46	60	57	52	322	198	236
2018	231	348	204	203	73	53	0	0	77	74	468	578
2019	310	275	262	128	72	0	0	0	0	16	107	254

(PTPN 9, 2020)

Tabel 4.8. Data Jumlah Hari Hujan Kebun Kaligua

Tahun	Jumlah Hari Hujan											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	25	25	19	23	13	6	3	0	4	18	23	25
2010	29	23	24	23	22	18	18	18	23	25	26	29
2011	26	23	24	24	18	5	6	0	5	17	30	26

Tabel 2.8. Data Jumlah Hari Hujan Kebun Kaligua (Lanjutan)

Tahun	Jumlah Hari Hujan											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2012	27	20	26	22	17	3	3	2	0	14	21	27
2013	27	23	23	25	18	15	14	2	1	13	22	27
2014	21	18	16	10	11	7	11	7	1	9	24	21
2015	25	25	23	19	6	3	0	0	0	1	23	25
2016	23	28	23	28	25	15	13	13	25	16	30	23
2017	27	23	17	20	13	6	7	6	5	30	21	27
2018	17	26	24	22	12	6	0	0	11	5	19	17
2019	26	26	28	17	19	0	0	0	0	4	16	26

(PTPN 9, 2020)

Pengujian konsistensi data curah hujan dilakukan untuk menentukan apakah data pada Tabel 4.7 memenuhi asumsi konsisten sebagai syarat dalam simulasi debit rerata Mock. Pengujian konsistensi tersebut dilakukan menggunakan metode RAPS berdasarkan data tahunan. Data curah hujan dapat dinyatakan konsisten jika penyimpangan homogenitas data curah hujan (R/\sqrt{n}_{cal}) yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.7 lebih kecil dari penyimpangan homogenitas kritis (R/\sqrt{n}_{cri}) yang ditentukan berdasarkan Tabel 2.4. Parameter statistik data curah hujan tahunan berupa rerata (\bar{R}), deviasi standar (σ), penyimpangan kumulatif (S_k^*), dan RAPS (S_k^{**}) yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.8 s.d. Persamaan 2.11 diperlihatkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Parameter Statistik Curah Hujan Tahunan dalam Pengujian Konsistensi

Tahun	R_i (mm)	$R_i - \bar{R}$	$(R_i - \bar{R})^2$	S_k^*	S_k^{**}
2009	4391	1674,55	2804102,48	1674,55	1,35
2010	5325	2608,55	6804509,39	4283,09	3,44
2011	3996	1279,55	1637236,57	5562,64	4,47
2012	2976	259,55	67363,84	5822,18	4,68
2013	2199	-517,45	267759,21	5304,73	4,26

Tabel 4.9. Parameter Statistik Curah Hujan Tahunan dalam Pengujian Konsistensi (Lanjutan)

Tahun	R_i (mm)	$R_i - \bar{R}$	$(R_i - \bar{R})^2$	S_k^*	S_k^{**}
2014	1510	-1206,45	1455532,57	4098,27	3,29
2015	1554	-1162,45	1351300,57	2935,82	2,36
2016	2270	-446,45	199321,66	2489,36	2,00
2017	1927	-789,45	623238,48	1699,91	1,37
2018	2309	-407,45	166019,21	1292,45	1,04
2019	1424	-1292,45	1670438,75	0	0
Total	29881	0	17046822,73		
\bar{R}	2716,45				
σ	1244,87				
				Maksimum	4,68
				Minimum	1,35

Dengan S_k^{**} maksimum 4,68 dan S_k^{**} minimum 1,35 maka $R/\sqrt{n_{cal}}$ yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.7 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 R/\sqrt{n_{cal}} &= \frac{\max S_k^{**} - \min S_k^{**}}{\sqrt{n}} \\
 &= \frac{4,68 - 1,35}{\sqrt{11}} \\
 &= \frac{3,33}{3,32} = 0,96
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Tabel 2.4, jika tingkat keyakinan ditentukan sebesar 95% maka $R/\sqrt{n_{cri}}$ untuk data curah hujan selama 11 tahun adalah 1,30. Dengan $R/\sqrt{n_{cal}}$ yang lebih kecil dari $R/\sqrt{n_{cri}}$ maka data curah hujan pada Tabel 4.7 dinyatakan konsisten dan dapat digunakan dalam simulasi debit rerata sungai Tuk Bening.

4.4.2. Karakteristik Daerah Pengaliran Sungai

Karakteristik DPS yang dipertimbangkan dalam simulasi debit rerata Mock adalah persentase lahan terbuka (m), kapasitas kelembaban tanah (SMC), faktor

infiltrasi (*IF*), koefisien resesi aliran (*RC*), luas DPS (*F*). Seperti yang terlihat pada Gambar 4.2, lahan DPS Tuk Bening dengan *F* seluas $1,04 \text{ km}^2$ tertutupi oleh hutan dan perkebunan teh, sehingga *m* ditentukan sebesar 10%. Kemudian, *SMC*, *IF*, dan *RC* secara berutuan diasumsikan sebesar 200 mm, 0,40, dan 0,60.

4.4.3. Hasil Simulasi Debit

Simulasi debit rerata sungai Tuk Bening dilakukan secara tabulasi untuk setiap bulan selama kurun tahun 2009 - 2019 menggunakan Persamaan 2.12 s.d. Persamaan 2.23 dengan langkah-langkah yang terlihat pada Gambar 3.4. Simulasi debit rerata tahun 2009 yang dijadikan sebagai contoh diperlihatkan pada Tabel 4.11 dan simulasi tahun-tahun setelahnya dilampirkan pada Lampiran 11 s.d. Lampiran 20. Rekapitulasi hasil simulasi debit rerata sungai Tuk Bening diperlihatkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10. Rekapitulasi Hasil Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening

Tahun	Debit Rerata Simulasi (E-03 m ³ /s)											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
2009	192	266	103	167	103	60	27	17	10	46	173	108
2010	240	180	194	125	131	83	62	57	93	73	92	244
2011	157	246	171	143	117	44	26	16	9	27	162	158
2012	153	151	158	113	75	32	18	11	7	14	44	107
2013	117	85	42	68	31	41	28	11	6	7	12	45
2014	30	32	17	7	4	3	4	1	1	0	39	53
2015	57	70	52	56	17	11	6	4	2	1	37	18
2016	8	60	42	29	36	26	9	6	25	8	52	86
2017	67	71	28	33	15	8	5	3	2	53	34	47
2018	47	91	45	43	15	9	5	3	2	1	93	147
2019	87	81	67	29	15	9	5	3	2	1	1	37

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.11. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2009

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R	-	Tab. 4.7	798	844	269	547	293	167	84	0	31	269	724	365
n_R	-	Tab. 4.8	25	25	19	23	13	6	3	0	4	18	23	25
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	94,56	77,87	112,26	99,64	89,22	101,75	102,48	111,84	130,59	121,26	108,05	105,86
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-3,31	-2,73	-0,56	-2,49	2,23	6,11	7,69	10,07	9,14	0,00	-2,70	-3,71
Eta	mm	Per. 2.12	97,87	80,60	112,82	102,13	86,99	95,65	94,79	101,77	121,45	121,26	110,75	109,57
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	700,1	763,4	156,2	444,9	206,0	71,4	-10,8	-101,8	-90,4	147,7	613,2	255,4
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	200	189,21	87,43	0	147,74	200	200	200
WS	mm	Per. 2.16	763,40	156,18	444,87	206,01	71,36	0	0	0	147,74	613,25	255,43	763,40
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.11. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2009 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	280,05	305,36	62,47	177,95	82,40	28,54	0	0	0	59,10	245,30	102,17
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	224,04	244,29	49,98	142,36	65,92	22,83	0	0	0	47,28	196,24	81,74
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	26,88	150,56	236,91	172,13	188,69	152,77	105,36	63,22	37,93	22,76	42,02	142,96
GS_i	mm	Per. 2.20	250,93	394,84	286,88	314,49	254,62	175,60	105,36	63,22	37,93	70,04	238,26	224,70
ΔS_i	mm	Per. 2.19	206,1	143,9	-108,0	27,6	-59,9	-79,0	-70,2	-42,1	-25,3	32,1	168,2	-13,6
BF	mm	Per. 2.17	73,93	161,44	170,43	150,34	142,28	107,55	70,24	42,14	25,29	26,99	77,07	115,74
DR	mm	Per. 2.18	420,08	458,04	93,71	266,92	123,61	42,81	0	0	0	88,64	367,95	153,26
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	494,01	619,49	264,14	417,26	265,88	150,37	70,24	42,14	25,29	115,64	445,02	269,00
F	km^2	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m^3/s	Per. 2.23	0,192	0,266	0,103	0,167	0,103	0,060	0,027	0,017	0,010	0,046	0,173	0,108

4.4.4. Validasi Data Debit Simulasi

Validasi data debit rerata simulasi sungai Tuk Bening dilakukan dengan cara menentukan kekuatan hubungan antara data pada Tabel 4.10 dan data curah hujan pada Tabel 4.7. Penentuan kekuatan tersebut dilakukan berdasarkan koefisien korelasi antara kedua data pada setiap tahun dan bulan. Penentuan kekuatan hubungan antara data curah hujan (R_i) dan data debit (Q_i) pada bulan Januari dijadikan sebagai contoh dengan parameter statistik yang diperlihatkan pada Tabel 4.12

Tabel 4.12. Parameter Statistik dalam Penentuan Koefisien Korelasi antara Data Curah Hujan dan Debit Rerata Simulasi Bulan Januari

Tahun	R_i (mm)	$R_i - \bar{R}$	$(R_i - \bar{R})^2$	Q_i (m^3/s)	$Q_i - \bar{Q}$	$(Q_i - \bar{Q})^2$	$\frac{(R_i - \bar{R}) \times (Q_i - \bar{Q})}{(Q_i - \bar{Q})}$
2009	798	388,64	151038,22	0,192	0,09	0,00757	33,81
2010	876	466,64	217749,50	0,240	0,14	0,01823	63,00
2011	479	69,64	4849,22	0,157	0,05	0,00270	3,62
2012	519	109,64	12020,13	0,153	0,05	0,00230	5,26
2013	452	42,64	1817,86	0,117	0,01	0,00014	0,51
2014	165	-244,36	59713,59	0,030	-0,08	0,00563	18,33
2015	274	-135,36	18323,31	0,057	-0,05	0,00230	6,50
2016	124	-285,36	81432,40	0,008	-0,10	0,00941	27,68
2017	275	-134,36	18053,59	0,067	-0,04	0,00144	5,11
2018	231	-178,36	31813,59	0,047	-0,06	0,00336	10,35
2019	310	-99,36	9873,13	0,087	-0,02	0,00032	1,79
Total	4503	0	606684,55	1,16	0	0,05342	175,95
Rerata	409,36			0,11			

Dengan paramater statistik yang terlihat pada Tabel 4.12, koefisien korelasi antara R_i dan Q_i pada bulan Januari (r) yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.24 adalah sebagai berikut:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}) \times (Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}}$$

$$r = \frac{175,95}{\sqrt{606684,55 \times 0,05342}}$$

$$= \frac{175,95}{180,02} = 0,98$$

Karena r berada di antara 0,6 dan 1 ($0,6 < r < 1$) maka R_i dan Q_i pada bulan Januari memiliki hubungan yang kuat sehingga data debit rerata simulasi dapat dinyatakan valid. Kemudian berdasarkan analisis telah dilakukan, data debit rerata simulasi pada Tabel 4.10 dapat dinyatakan valid karena memiliki hubungan yang kuat dengan data curah hujan pada Tabel 4.7. Rekapitulasi hasil analisis kekuatan hubungan tersebut diperlihatkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13. Rekapitulasi Hasil Analisis Kekuatan Hubungan antara Data Curah Hujan dan Debit Rerata Simulasi

Bulan	Koefisien Korelasi	Keterangan Hubungan	Tahun	Koefisien Korelasi	Keterangan Hubungan
Januari	0,98	Kuat	2009	0,96	Kuat
Februari	0,99	Kuat	2010	0,96	Kuat
Maret	0,98	Kuat	2011	0,96	Kuat
April	0,97	Kuat	2012	0,94	Kuat
Mei	0,97	Kuat	2013	0,94	Kuat
Juni	0,73	Kuat	2014	0,91	Kuat
Juli	0,75	Kuat	2015	0,94	Kuat
Agustus	0,79	Kuat	2016	0,96	Kuat
September	0,94	Kuat	2017	0,95	Kuat
Oktober	0,90	Kuat	2018	0,98	Kuat
November	0,99	Kuat	2019	0,92	Kuat
Desember	0,99	Kuat			

4.5. Debit Andalan

Debit andalan sungai Tuk Bening untuk PLTA Kaligua ditentukan berdasarkan kurva aliran-durasi yang dibuat dari data debit rerata simulasi pada Tabel 4.10 dengan langkah-langkah yang terlihat pada Gambar 3.6. Skala debit sebagai parameter sumbu Y ditentukan sebesar 0,001, 0,002, 0,004, 0,008, 0,016,

0,064, 0,128, dan 0,256 m³/s. Untuk memudahkan perhitungan jumlah data debit yang lebih besar dari atau sama dengan skala debit $Q(n_Q)$, data debit diurutkan dari yang terkecil ke yang terbesar seperti diperlihatkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14. Pengurutan Data Debit Rerata

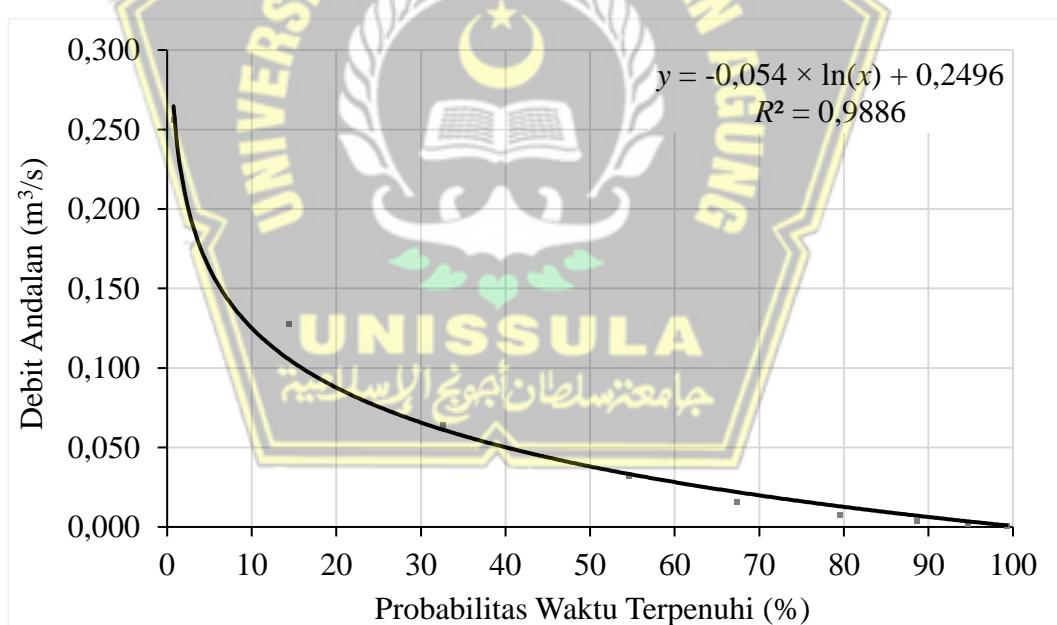
No.	Q (m ³ /s)										
1	0,000	24	0,006	47	0,017	70	0,042	93	0,070	116	0,147
2	0,001	25	0,007	48	0,018	71	0,042	94	0,071	117	0,151
3	0,001	26	0,007	49	0,018	72	0,043	95	0,073	118	0,153
4	0,001	27	0,007	50	0,025	73	0,044	96	0,075	119	0,157
5	0,001	28	0,008	51	0,026	74	0,044	97	0,081	120	0,158
6	0,001	29	0,008	52	0,026	75	0,045	98	0,083	121	0,158
7	0,001	30	0,008	53	0,027	76	0,045	99	0,085	122	0,162
8	0,002	31	0,009	54	0,027	77	0,046	100	0,086	123	0,167
9	0,002	32	0,009	55	0,028	78	0,047	101	0,087	124	0,171
10	0,002	33	0,009	56	0,028	79	0,047	102	0,091	125	0,173
11	0,002	34	0,009	57	0,029	80	0,052	103	0,092	126	0,18
12	0,003	35	0,010	58	0,029	81	0,052	104	0,093	127	0,192
13	0,003	36	0,011	59	0,030	82	0,053	105	0,093	128	0,194
14	0,003	37	0,011	60	0,031	83	0,053	106	0,103	129	0,24
15	0,003	38	0,011	61	0,032	84	0,056	107	0,103	130	0,244
16	0,004	39	0,012	62	0,032	85	0,057	108	0,107	131	0,246
17	0,004	40	0,014	63	0,033	86	0,057	109	0,108	132	0,266
18	0,004	41	0,015	64	0,034	87	0,060	110	0,113		
19	0,005	42	0,015	65	0,036	88	0,060	111	0,117		
20	0,005	43	0,015	66	0,037	89	0,062	112	0,117		
21	0,005	44	0,016	67	0,037	90	0,067	113	0,125		
22	0,006	45	0,017	68	0,039	91	0,067	114	0,131		
23	0,006	46	0,017	69	0,041	92	0,068	115	0,143		

Probabilitas waktu terpenuhi (Pr_Q) sebagai parameter sumbu X ditentukan menggunakan Persamaan 2.3 dengan memperitmbangkan n_Q . Rekapitulasi hasil

analisis parameter sumbu kurva aliran-durasi sungai Tuk Bening diperlihatkan pada Tabel 4.15 dan kurva aliran-durasi diperlihatkan pada Gambar 4.3.

Tabel 4.15. Parameter Sumbu Kurva Aliran-Durasi

Skala Debit (m^3/s)	Jumlah Data Debit (n_Q)	Probabilitas Waktu Terpenuhi (%)
0,001	131	99,24
0,002	125	94,70
0,004	117	88,64
0,008	105	79,55
0,016	89	67,42
0,032	72	54,55
0,064	43	32,58
0,128	19	14,39
0,256	1	0,76

**Gambar 4.3.** Kurva Aliran-Durasi Sungai Tuk Bening

Keandalan debit sungai Tuk Bening untuk PLTA Kaligua ditentukan sebesar 80%. Dengan demikian, jika pada Gambar 4.3 digambar garis vertikal dari probabilitas waktu terpenuhi 80% sampai berpotongan dengan kurva maka garis horizontal dari titik perpotongan tersebut akan mengarah ke debit andalan 0,013

m^3/s . Debit andalan tersebut juga dapat ditentukan menggunakan persamaan yang tertulis pada Gambar 4.3, yakni sebagai berikut:

$$\begin{aligned}y &= -0,054 \times \ln(x) + 0,2496 \\&= -0,054 \times \ln 80 + 0,2496 \\&= 0,013 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, mata air Tuk Bening yang berlokasi di hulu bangunan pengambilan (Gambar 4.2) pada musim kemarau tetap mengeluarkan air sebesar $0,170 \text{ m}^3/\text{s}$. Dengan demikian maka total debit andalan untuk PLTA Kaligua dapat ditentukan sebesar $0,183 \text{ m}^3/\text{s}$. Kemudian, dengan asumsi kehilangan air di sepanjang saluran pembawa sebesar 5% dari debit andalan maka debit rencana (Q) dalam analisis potensi PLTA ditentukan sebesar $0,174 \text{ m}^3/\text{s}$.

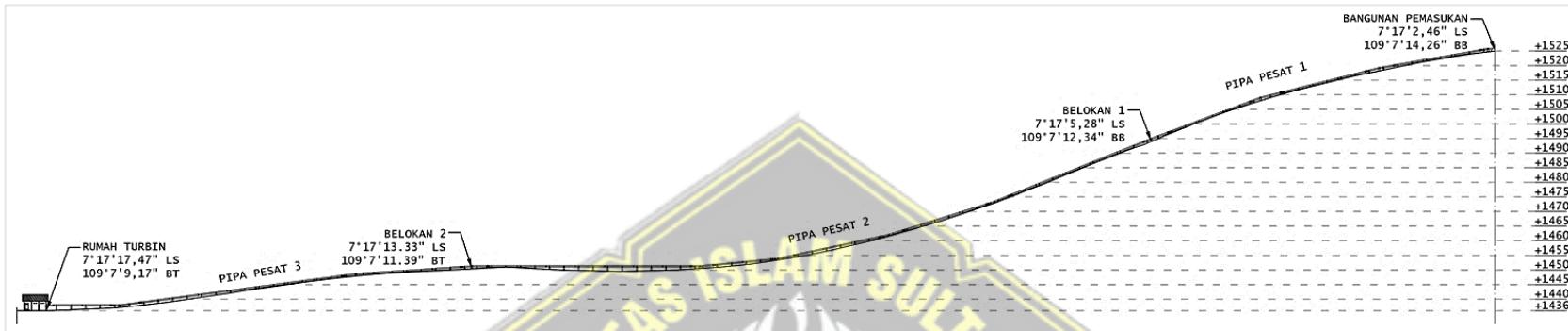
4.6. Rencana Pipa Pesat

Pipa pesat PLTA Kaligua direncanakan berjenis las spiral (*spiral welded pipe*) yang dibuat dari pelat baja melalui proses penggulungan dan pengelesaan spiral ke arah longitudinal. Pipa las spiral dipilih karena harganya yang lebih murah dibandingkan dengan jenis pipa baja lainnya. Selain itu, pipa las spiral juga tersedia dan diproduksi di Indonesia (Arisiyadi, 2019). Gambar potongan medan memanjang dan data dimensi umum rencana pipa pesat secara berurutan diperlihatkan pada Gambar 4.4 dan Tabel 4.16. Bagian pipa pesat yang direncanakan adalah diameter luar, tebal dinding, jarak tumpuan, dan jarak sambungan.

4.6.1. Diameter Luar

Diameter luar pipa pesat ditentukan berdasarkan diameter dalam perkiraan (D_{est}) dengan kehilangan energi mayor setinggi 4% dari tinggi energi kotor aliran (H_{gro}). Penentuan D_{est} tersebut dilakukan menggunakan Persamaan 2.52 dengan mempertimbangkan koefisien kekasaran Manning (n), Q , panjang pipa pesat (l), dan H_{gro} . Seperti yang terlihat pada Tabel 4.16, l dan H_{gro} yang direncanakan secara berurutan adalah 513 m dan 88,73 m. Kemudian menurut ESHA (2004), n untuk pipa las spiral dapat ditentukan sebesar 0,012.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.4. Potongan Medan Memanjang Rencana Pipa Pesat

Tabel 4.16. Data Dimensi Umum Rencana Pipa Pesat

Segmen Pipa Pesat	Panjang (m)	Sudut Kemiringan ($^{\circ}$)	Tinggi Energi di Hilir (m)	Sudut Belokan Hilir ($^{\circ}$)
PL0	3,0	0,0	0,40	Vertikal 10
PL1.1	38,0	10,0	7,00	Vertikal 4
PL1.2	42,0	14,0	17,16	Vertikal 6,5
PL1.3	40,1	20,5	31,21	Vertikal 1,3 dan horizontal 23
PL2.1	58,0	21,8	52,75	Vertikal 4,4
PL2.2	38,0	17,4	64,11	Vertikal 5,3
PL2.3	39,0	12,1	72,29	Vertikal 6,6
PL2.4	27,0	5,5	74,88	Vertikal 5,5
PL2.5	78,3	0,0	74,88	Vertikal 3,8 dan horizontal 20,8
PL3.1	40,0	3,8	77,53	Vertikal 3,7 deg
PL3.2	82,0	7,5	88,23	Vertikal 7,5 deg
PL3.3	27,6	0,0	88,23	-

Dengan Q sama dengan $0,174 \text{ m}^3/\text{s}$ maka D_{est} yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.52 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} D_{est} &= 2,69 \times \left(\frac{n^2 \times Q^2 \times l}{H_{gro}} \right)^{0,1875} \\ &= 2,69 \times \left(\frac{0,012^2 \times 0,174^2 \times 513}{88,23} \right)^{0,1875} \\ &= 2,69 \times 0,1374 = 0,3697 \text{ m} = 369,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

Standar yang digunakan dalam perencanaan pipa pesat PLTA Kaligua adalah ASME B36.10M (2018) karena sering dijadikan sebagai standar penampang pipa pesat yang tersedia di Indonesia (Arisiyadi, 2019). Dimensi penampang pipa pesat pada ASME B36.10M (2018) dikelompokkan berdasarkan diameter nominal yang terdiri dari beberapa pilihan tebal dinding. Dengan D_{est} selebar 369,7 mm maka diameter nominal yang dipilih dari ASME B36.10M (2018) adalah DN 400 dengan diamter luar (D_{out}) selebar 406,4 mm.

4.6.2. Tebal Dinding

Tebal dinding pipa pesat ditentukan berdasarkan tekanan rencana yang terdiri dari tekanan hidrostatik dan tekanan *water hammer*. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.7, penentuan tebal dinding pipa pesat hanya dapat dilakukan dengan cara iterasi hingga tebal dinding yang mampu menahan tekanan rencana telah didapatkan. Iterasi tersebut dilakukan dengan langkah awal menentukan tebal dinding berdasarkan tekanan hidrostatik dengan panaksiran tebal dinding dapat menahan tekanan *water hammer*. Tebal dinding yang telah ditentukan tersebut selanjutnya diperiksa apakah memang dapat menahan tekanan *water hammer* atau tidak. Namun, dinding pipa pesat sebaiknya tidak ditentukan terlalu tebal karena semakin tebal dinding maka semakin tinggi kehilangan tinggi energi aliran.

4.6.2.1. Penentuan berdasarkan Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik (p_{sta}) dalam pipa pesat ditentukan menggunakan Persamaan 2.56 dengan mempertimbangkan massa jenis air (ρ), percepatan gravitasi (g), dan kedalaman tekanan (d_p), di mana d_p sama dengan tinggi energi

pada Tabel 4.16. Temperatur air di Kebun Kaligua diasumsikan setinggi 15 °C sehingga ρ yang ditentukan dari Tabel 2.5 adalah 999,1 kg/m³. Tekanan rencana (p) selanjutnya ditentukan menggunakan Persamaan 2.55 dengan mempertimbangkan p_{sta} . Sebagai contoh, d_p di hilir pipa pesat PL1.1 pada Tabel 4.16 adalah 7 m, sehingga p_{sta} dan p yang secara berurutan ditentukan menggunakan Persamaan 2.55 dan Persamaan 2.56 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} p_{sta} &= \rho \times g \times d_p \\ &= 999,1 \times 9,81 \times 7 \\ &= 68608,20 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p &= 1,10 \times p_{sta} \\ &= 1,10 \times 68608,20 \\ &= 75469,02 \text{ Pa} = 0,0755 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tebal dinding pipa pesat minimum (t_{min}) ditentukan menggunakan Persamaan 2.53 yang mempertimbangkan p , D_{out} , tegangan yang diizinkan (S_e), koefisien sifat bahan (y), dan tebal korosi (t_{cor}). Jenis bahan yang dapat digunakan untuk pembuatan pipa pesat dan tersedia di Indonesia adalah pelat baja karbon (*carbon steel plate*) A 285B (Arisyandi, 2019). Menurut ASME B31.1 (2016), pipa pesat spiral yang terbuat dari pelat baja karbon A 285B dapat direncanakan dengan S_e dan y secara berurutan sebesar 78,88 MPa dan 0,40 pada temperatur fungsional 37,8 °C. Kemudian, t_{cor} untuk 25 tahun umur layan pipa pesat diasumsikan setebal 2,5 mm. Dengan demikian, t_{min} untuk pipa pesat PL1.1 yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.53 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{min} &= \frac{p \times D_{out}}{2 \times (S_e + p \times y)} + t_{cor} \\ &= \frac{0,0755 \times 406,40}{2 \times (78,88 + 0,0755 \times 0,40)} + 2,5 \\ &= \frac{30,67}{157,82} + 2,5 = 2,694 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil analisis tebal dinding minimum seluruh segmen pipa pesat berdasarkan tekanan hidrostatik diperlihatkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17. Rekapitulasi Hasil Analisis Tebal Dinding Minimum Pipa Pesat berdasarkan Tekanan Hidrostatik

Titik Tekanan	Kedalaman Tekanan (m)	Tekanan Hidrostatik (Pa)	Tekanan Rencana (Pa)	Tebal Dinding Minimum (mm)
Hilir PL0	0,40	3920,47	4312,52	2,511
Hilir PL1.1	7,00	68608,20	75469,02	2,694
Hilir PL1.2	17,16	168188,09	185006,90	2,976
Hilir PL1.3	31,21	305894,55	336484,00	3,365
Hilir PL2.1	52,75	517011,77	568712,95	3,961
Hilir PL2.2	64,11	628353,07	691188,38	4,274
Hilir PL2.3	72,29	708526,65	779379,32	4,500
Hilir PL2.4	74,88	733911,68	807302,85	4,571
Hilir PL2.5	74,88	733911,68	807302,85	4,571
Hilir PL3.1	77,53	759884,79	835873,27	4,644
Hilir PL3.2	88,23	864757,32	951233,05	4,939
Hilir PL3.3	88,23	864757,32	951233,05	4,939

Berdasarkan iterasi yang telah dilakukan, tebal dinding (t) untuk seluruh segmen pipa pesat PLTA Kaligua yang dipilih dari ASME B36.10M (2018) adalah 8,74 mm.

4.6.2.2. Pemeriksaan terhadap Tekanan Water Hammer

Tekanan *water hammer* dalam pipa pesat ditentukan berdasarkan waktu refleksi (T_r) yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.57 dengan mempertimbangkan l dan kecepatan rambat gelombang kejut (a). Penentuan a dilakukan menggunakan Persamaan 2.58 dengan mempertimbangkan modulus bulk air (K_w), ρ , modulus elastisitas pipa pesat (E_e), diameter dalam pipa pesat (D_{in}), dan t . Menurut ASTM A 285/A 285M (2007), pelat baja karbon A 285B memiliki kadar karbon sebesar 0,22% yang lebih kecil dari 0,30%, sehingga E_e menurut ASME B31.1 (2016) dapat ditentukan sebesar $1,62 \times 10^{11}$ Pa. Kemudian

dengan D_{out} dan t yang telah ditentukan secara berurutan adalah 406,4 mm dan 8,74 mm (0,00874 m) maka D_{in} sama dengan 388,92 mm (0,38892 m). Dengan demikian maka a dan T_r yang secara berurutan ditentukan menggunakan Persamaan 2.58 dan Persamaan 2.57 adalah sebagai berikut:

$$a = \sqrt{\frac{K_w/\rho}{1 + \frac{K_w}{E_e} \times \frac{D_{in}}{t}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2,10 \times 10^9 / 999,1}{1 + \frac{2,10 \times 10^9}{1,62 \times 10^{11}} \times \frac{0,38892}{0,00874}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2,102 \times 10^6}{1,578}} = 1154,03 \text{ m/s}$$

$$T_r = \frac{2 \times l}{a}$$

$$= \frac{2 \times 513}{1154,03}$$

$$= 0,89 \text{ s}$$

Durasi penutupan katup hilir diasumsikan berlangsung selama 5 s yang lebih lama dari T_r sehingga penutupan katup terjadi secara bertahap. Dengan demikian maka tekanan *water hammer* (p_{ham}) yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.60 dengan mempertimbangkan l , kecepatan aliran rerata (v), ρ , dan T_r adalah sebagai berikut:

$$v = \frac{Q}{0,25 \times \pi \times D_{in}^2}$$

$$= \frac{0,174}{0,25 \times \pi \times 0,38892^2}$$

$$= \frac{0,174}{0,119} = 1,46 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned}
 p_{ham} &= \frac{l \times v \times \rho}{T_r} \\
 &= \frac{513 \times 1,46 \times 999,1}{1154,03} \\
 &= \frac{746980,25}{1154,03} = 840188,99 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Penentuan t_{min} kembali dilakukan mennggunakan Persamaan 2.53 dengan mempertimbangkan p_{sta} dan p_{ham} . Sebagai contoh, p_{sta} di hilir pipa pesat PL1.1 adalah 68608,20 Pa, sehingga p dan t_{min} yang secara berurutan ditentukan menggunakan Perasamaan 2.55 dan Persamaan 2.53 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 p &= 1,10 \times (p_{sta} + p_{ham}) \\
 &= 1,10 \times (68608,20 + 840188,99) \\
 &= 1,10 \times 908797,19 = 999676,91 \text{ Pa} = 0,9997 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{min} &= \frac{p \times D_{out}}{2 \times (S_e + p \times y)} + t_{cor} \\
 &= \frac{0,9997 \times 406,40}{2 \times (78,88 + 0,9997 \times 0,40)} + 2,5 \\
 &= \frac{406,27}{158,56} + 2,5 = 5,062 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil analisis tebal dinding minimum seluruh segmen pipa pesat berdasarkan tekanan hidrostatik dan tekanan *watrehammer* diperlihatkan pada Tabel 4.18.

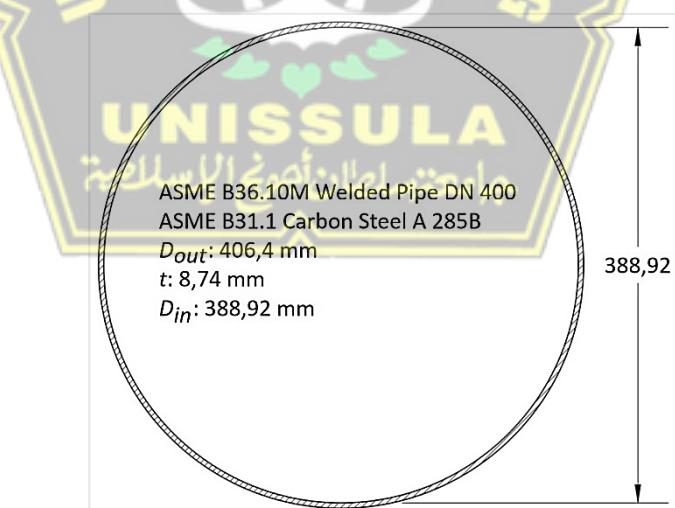
Tabel 4.18. Rekapitulasi Hasil Analisis Tebal Dinding Minimum Pipa Pesat berdasarkan Tekanan Hidrostatik dan Tekanan Water Hammer

Titik Tekanan	Tekanan Hidrostatik (Pa)	Tekanan Water Hammer (Pa)	Tekanan Rencana (Pa)	Tebal Dinding Minimum (mm)
Hilir PL0	3920,47	840188,99	928520,41	4,881
Hilir PL1.1	68608,20	840188,99	999676,91	5,062
Hilir PL1.2	168188,09	840188,99	1109214,80	5,341
Hilir PL1.3	305894,55	840188,99	1260691,89	5,727

Tabel 2.18. Rekapitulasi Hasil Analisis Tebal Dinding Minimum Pipa Pesat berdasarkan Tekanan Hidrostatik dan Tekanan Water Hammer (Lanjutan)

Titik Tekanan	Tekanan Hidrostatik (Pa)	Tekanan Water Hammer (Pa)	Tekanan Rencana (Pa)	Tebal Dinding Minimum (mm)
Hilir PL2.1	517011,77	840188,99	1492920,84	6,317
Hilir PL2.2	628353,07	840188,99	1615396,27	6,628
Hilir PL2.3	708526,65	840188,99	1703587,21	6,851
Hilir PL2.4	733911,68	840188,99	1731510,75	6,922
Hilir PL2.5	733911,68	840188,99	1731510,75	6,922
Hilir PL3.1	759884,79	840188,99	1760081,16	6,994
Hilir PL3.2	864757,32	840188,99	1875440,94	7,286
Hilir PL3.3	864757,32	840188,99	1875440,94	7,286

Seperti yang terlihat pada Tabel 4.18, seluruh tebal dinding minimum berdasarkan tekanan rencana tidak lebih besar dari 8,74 mm. Dengan demikian, tebal dinding 8,74 mm dapat menahan tekanan hidrostatik dan *water hammer* sehingga ditentukan untuk pipa pesat PLTA Kaligua. Rencana penampang pipa pesat PLTA Kaligua diperlihatkan pada Gambar 4.5.

**Gambar 4.5.** Rencana Penampang Pipa Pesat PLTA Kaligua

4.6.3. Jarak Tumpuan dan Sambungan

Jarak tumpuan maksimum (s_{max}) pipa pesat ditentukan berdasarkan defleksi maksimum sebesar $1/65000 \times s$ menggunakan Persamaan 2.62 yang

mempertimbangkan E_e , momen inersia penampang pipa pesat (I), dan beban rencana (w). Penentuan I dilakukan menggunakan Persamaan 2.64 yang mempertimbangkan D_{out} dan D_{in} , yakni sebagai berikut:

$$I = \frac{\pi \times (D_{out}^2 - D_{in}^2)}{64}$$

$$= \frac{\pi \times (0,4064^2 - 0,38892^2)}{64}$$

$$= \frac{0,04368}{64} = 6,28 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Penentuan w dilakukan menggunakan Persamaan 2.63 yang mempertimbangkan luas penampang basah pipa pesat (A), ρ , beban pipa pesat (w_s), dan sudut kemiringan pipa pesat (β). Berdasarkan ASME B36.10M (2018), w_s untuk pipa pesat yang telah direncanakan (Gambar 4.5) dapat ditentukan sebesar 85,71 kg/m. Dengan demikian, w yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.63 adalah sebagai berikut:

$$A = \frac{\pi \times D_{in}^2}{4}$$

$$= \frac{\pi \times 0,38892^2}{4}$$

$$= \frac{0,47519}{4} = 0,1188 \text{ m}^2$$

$$w = 1,10 \times (A \times \rho + w_s) \times g \times \cos \beta$$

$$= 1,10 \times (0,1188 \times 999,1 + 85,71) \times 9,81 \times \cos \beta$$

$$= 2005,18 \times \cos \beta \text{ N/m}$$

Sebagai contoh analisis s_{max} , β pipa pesat PL1.2 pada Tabel 4.16 adalah 14° , sehingga s_{max} yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.62 adalah sebagai berikut:

$$s_{max} = \sqrt[3]{\frac{384 \times E_e \times I}{w \times 65000}}$$

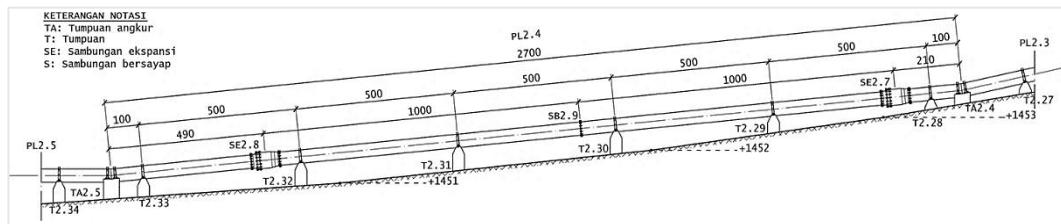
$$\begin{aligned}
 s_{max} &= \sqrt[3]{\frac{384 \times 1,62 \times 10^{11} \times 6,28 \times 10^{-4}}{(2005,18 \times \cos 45^\circ) \times 65000}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{4,2347 \times 10^{10}}{1,2647 \times 10^8}} = \sqrt[3]{334,85} = 6,94 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil analisis jarak tumpuan maksimum seluruh segmen pipa pesat diperlihatkan pada Tabel 4.19. Berdasarkan hasil analisis tersebut, jarak tumpuan pipa pesat PLTA Kaligua (t) ditentukan sejauh 5 m.

Tabel 4.19. Rekapitulasi Hasil Analisis Jarak Tumpuan Maksimum Pipa Pesa

Segmen Pipa Pesat	Sudut Kemiringan (°)	Beban Rencana (N/m)	Jarak Tumpuan Maksimum (m)
PL1.1	10,0	1974,71	6,91
PL1.2	14,0	1945,62	6,94
PL1.3	20,5	1878,19	7,03
PL2.1	21,8	1861,78	7,05
PL2.2	17,4	1913,42	6,98
PL2.3	12,1	1960,63	6,93
PL2.4	5,5	1995,95	6,89
PL2.5	0,0	2005,18	6,87
PL3.1	3,8	2000,77	6,88
PL3.2	7,5	1988,02	6,89
PL3.3	0,0	2005,18	6,87

Sambungan pipa pesat pada umumnya tidak direncanakan untuk menahan momen lentur sehingga perlu ditempatkan di titik momen lentur mendekati 0. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.16, titik momen lentur mendekati 0 berada di $0,211 \times s$ (Ghavami, 2015). Dengan demikian maka sambungan pipa pesat PLTA Kaligua ditentukan berada di 1,10 m dari tumpuan dengan jarak sambungan sejauh 10 m. Contoh penempatan tumpuan dan sambungan pipa pesat diperlihatkan pada Gambar 4.6 dan seluruh gambar rencana pipa pesat PLTA Kaligua dilampirkan pada Lampiran 21.



Gambar 4.6. Penempatan Tumpuan dan Sambungan Pipa Pesat PL2.4

4.7. Potensi PLTA

Langkah awal yang dilakukan dalam analisis potensi daya PLTA Kaligua adalah menentukan kehilangan tinggi energi aliran dalam pipa pesat yang terdiri dari kehilangan mayor dan kehilangan minor. Kemudian, daya PLTA ditentukan dengan mempertimbangkan debit rencana, tinggi energi bersih aliran, dan efisiensi PLTA.

4.7.1. Kehilangan Tinggi Energi Mayor

Kehilangan tinggi energi mayor (h_{maj}) ditentukan menggunakan Persamaan 2.46 yang mempertimbangkan koefisien gesekan Darcy-Weisbach (f), l , D_{in} , v , dan μ . Penentuan f dilakukan berdasarkan bilangan Reynolds (Re) yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.48 yang mempertimbangkan D_{in} , v , dan viskositas kinematik air (μ). Seperti yang terlihat pada Tabel 2.5, μ untuk temperatur air setinggi 15 °C adalah $1,139 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, sehingga Re yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.48 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Re &= \frac{D_{in} \times v}{\mu} \\ &= \frac{0,38892 \times 1,46}{1,139 \times 10^{-6}} \\ &= \frac{0,569}{1,139 \times 10^{-6}} = 499690,18 \end{aligned}$$

Dengan Re lebih besar dari 2300 maka f ditentukan menggunakan Persamaan 2.50 yang mempertimbangkan tinggi kekasaran dinding pipa pesat (ϵ), D_{in} , dan Re . Menurut ESHA (2004), ϵ untuk pipa pesat las spiral dapat ditentukan sebesar $0,6 \times 10^{-3} \text{ m}$. Berdasarkan iterasi menggunakan Persamaan 2.50 hingga

nilai ruas kiri mendekati nilai ruas kanan, f yang ditentukan adalah 0,0223268241, yakni sebagai berikut:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log \left(\frac{\epsilon/D_{in}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right)$$

$$\therefore \frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{\sqrt{0,0223268241}}$$

$$= \frac{1}{0,14942163}$$

$$= 6,692471410\dots$$

$$\begin{aligned}\therefore -2 \times \log \left(\frac{\epsilon/D_{in}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right) &= -2 \times \log \left(\frac{0,0006/0,38892}{3,7} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right) \\ &= -2 \times \log \left(\frac{0,00154}{3,7} + \frac{2,51}{499690,18 \times \sqrt{0,02232\dots}} \right) \\ &= -2 \times \log 0,000451 = 6,692471412\dots\end{aligned}$$

$$\rightarrow 6,692471410\dots \approx 6,692471412\dots$$

Dengan l sama dengan 513 m maka h_{maj} yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.46 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}h_{maj} &= f \times \frac{l}{D_{in}} \times \frac{v^2}{2 \times g} \\ &= 0,0223268241 \times \frac{513}{0,38892} \times \frac{1,46^2}{2 \times 9,81} \\ &= 0,0223268241 \times 1319,037 \times 0,109 = 3,214 \text{ m}\end{aligned}$$

4.7.2. Kehilangan Tinggi Energi Minor

Kehilangan tinggi energi minor (h_{min}) ditentukan menggunakan Persamaan 2.51 yang mempertimbangkan koefisien kehilangan energi (k), v , dan g , di mana k ditentukan berdasarkan aksesoris pipa pesat yang terlihat pada Tabel 2.6. Sebagai contoh, aksesoris di hilir pipa pesat PL2.1 adalah belokan vertikal sudut 1,3° dan belokan horizontal sudut 23°. Berdasarkan interpolasi koefisien kehilangan tinggi

energi pada Tabel 2.6, k ditentukan sebesar 0,171, sehingga h_{min} yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.51 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} h_{min} &= k \times \frac{v^2}{2 \times g} \\ &= 0,171 \times \frac{1,46^2}{2 \times 9,81} \\ &= 0,171 \times 0,109 = 0,019 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, total kehilangan tinggi energi minor dalam pipa pesat adalah 0,174 m dan rekapitulasi hasil analisis untuk seluruh aksosori diperlihatkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20. Rekapitulasi Hasil Analisis Kehilangan Tinggi Energi Minor dalam Pipa Pesat

Titik Aksesori	Aksesori	k	h_{min} (m)
Pemasukan	<i>Re-entrant</i>	0,800	0,087
Hulu PL1.1	Belokan ver. 10°	0,044	0,005
Hilir PL1.1	Belokan ver. 4°	0,019	0,002
Hilir PL1.2	Belokan ver. $6,5^\circ$	0,043	0,005
Hilir PL1.3	Belokan ver. $1,3^\circ$ dan hor. 23°	0,171	0,019
Hilir PL2.1	Belokan ver. $4,4^\circ$	0,021	0,002
Hilir PL2.2	Belokan ver. $5,3^\circ$	0,044	0,005
Hilir PL2.3	Belokan ver. $6,6^\circ$	0,043	0,005
Hilir PL2.4	Belokan ver. $5,5^\circ$	0,044	0,005
Hilir PL2.5	Belokan ver. $3,8^\circ$ dan hor $20,8^\circ$	0,101	0,011
Hilir PL3.1	Belokan ver. $3,7^\circ$	0,018	0,002
Hilir PL3.2	Belokan ver. $7,5^\circ$	0,043	0,005
Sebelum turbin	Katup <i>butterfly</i>	0,200	0,022

4.7.3. Daya Listrik

Daya teoritis (P_t) PLTA Kaligua ditentukan menggunakan Persamaan 2.2 yang mempertimbangkan Q , ρ , g , dan tinggi energi bersih aliran (H_{net}), di mana

H_{net} ditentukan menggunakan Persamaan 2.4 yang mempertimbangkan H_{gro} , h_{maj} , dan h_{min} , yakni sebagai berikut:

$$\begin{aligned} H_{net} &= H_{gro} - (h_{maj} + h_{min}) \\ &= 88,23 - (3,214 + 0,174) \\ &= 88,23 - 3,388 = 84,84 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_t &= Q \times \rho \times g \times H_{net} \\ &= 0,174 \times 999,1 \times 9,81 \times 84,84 \\ &= 144564,84 \text{ W} = 144,56 \text{ kW} \end{aligned}$$

Potensi daya terpasang (P) ditentukan menggunakan Persamaan 2.5 yang mempertimbangkan P_t dan efisiensi PLTA (η), di mana η ditentukan menggunakan Persamaan 2.6 yang mempertimbangkan efisiensi turbin (η_t) dan efisiensi generator (η_g). Berdasarkan Gambar 2.8, dengan Q sebesar $0,174 \text{ m}^3/\text{s}$ dan H_{net} setinggi $84,84 \text{ m}$ maka jenis turbin yang dapat digunakan untuk PLTA Kaligua adalah turbin Pelton. Berdasarkan Tabel 2.1, jika turbin Pelton direncanakan memiliki 1 nozzle maka η_t dapat ditentukan sebesar 0,89. Kemudian berdasarkan Tabel 2.2, dengan P_t sebesar $144,56 \text{ kW}$ maka η_g dapat ditentukan sebesar 0,95. Dengan demikian, η dan P yang secara berurutan ditentukan menggunakan Persamaan 2.5 dan Persamaan 2.6 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_t \times \eta_g \\ &= 0,89 \times 0,95 \\ &= 0,846 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P &= P_t \times \eta \\ &= 144,56 \times 0,846 \\ &= 122,23 \text{ kW} \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, PLTA Kaligua dengan debit rencana $0,174 \text{ m}^3/\text{s}$, tinggi energi aliran bersih $84,84 \text{ m}$, dan perkiraan efisiensi 0,846 memiliki potensi daya terpasang sebesar $122,23 \text{ kW}$.

4.8. Rencana Turbin Pelton

Turbin Pelton adalah turbin impuls yang pertama kali dirancang oleh Lester Allan Pelton pada akhir tahun 1870 dan pertama kali digunakan di Maylflower Mine, Nevada, California pada tahun 1878 (Crawford, 2012). Turbin Pelton adalah jenis turbin yang digunakan pada PLTA dengan tinggi energi aliran 30 s.d. 1000 m dan debit paling besar $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Gambar 2.8). Seperti yang terlihat pada Gambar 4.7, turbin Pelton merupakan turbin impuls yang secara umum memiliki dua bagian utama, yaitu *nozzle* dan roda Pelton (*Pelton wheel*). *Nozzle* adalah bagian yang terhubung dengan pipa pesat dan berfungsi sebagai pengonversi seluruh energi hidrolik menjadi energi kinetik berupa aliran jet dengan diamater kecil dan kecepatan tinggi. Sudu (*bucket*) berfungsi sebagai penangkap aliran jet tersebut sehingga roda Pelton akan berputar dan energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanis yang dibutuhkan untuk memutar rotor generator.



Gambar 4.7. Ilustrasi Turbin Pelton

Dalam tugas akhir ini, perencanaan turbin Pelton yang dilakukan adalah penentuan kecepatan spesifik, kecepatan rotasional, lingkaran *pitch*, jumlah sudu, dimensi sudu, dan dimensi *nozzle*.

4.8.1. Kecapatan Spesifik dan Rotasional

Kecapatan speisfik nirdimensi (N_{QE}) dan kecepatan rotasional (N) ditentukan menggunakan Persamaan 2.66 yang mempertimbangkan Q , g , dan H_{net} .

Penentuan N awalnya ditentukan berdasarkan N_{QE} maksimum pada Tabel 2.7, kemudian N maksimum disesuaikan terhadap kecepatan rotasional sinkron generator pada Tabel 2.8. Turbin Pelton direncanakan dengan 1 nozzle sehingga N_{QE} maksimum berdasarkan Tabel 2.7 ditentukan sebesar 0,025. Dengan demikian, N maksimum yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.66 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_{max} &= \frac{N_{QE_{max}} \times (g \times H_{net})^{3/4}}{\sqrt{Q}} \\ &= \frac{0,025 \times (9,81 \times 84,84)^{3/4}}{\sqrt{0,174}} \\ &= \frac{0,025 \times 832,30^{3/4}}{0,417} = 9,29 \text{ rps} = 557,46 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Berdasarkan Tabel 2.8, jika frekuensi generator yang dipilih adalah 50 Hz maka kecepatan rotasional sinkron generator (N) yang ditentukan adalah 500 rpm (8,33 rps) dengan jumlah kutub generator sebanyak 12 buah. Dengan demikian, N_{QE} yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.66 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_{QE} &= N \times \frac{\sqrt{Q}}{(g \times H_{net})^{3/4}} \\ &= 8,33 \times \frac{\sqrt{0,174}}{(9,81 \times 84,84)^{3/4}} \\ &= 8,33 \times \frac{0,417}{832,30^{3/4}} = 0,022 \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka turbin Pelton PLTA Kaligua direncanakan dengan kecepatan spesifik nirdimensi 0,022 dan kecepatan rotasional 500 rpm.

4.8.2. Lingkaran *Pitch* dan Jumlah Sudu

Lingkaran *pitch* adalah sumbu lingkaran yang bersinggungan dengan sumbu longitudinal aliran jet di pusat penampang, di mana titik pusat lingkaran *pitch*

dijadikan sebagai titik pusat roda Pelton seperti diperlihatkan pada Gambar 4.8. Diameter lingkaran *pitch* (D_{pit}) dapat ditentukan menggunakan Persamaan 4.1 (Oo dkk, 2019).

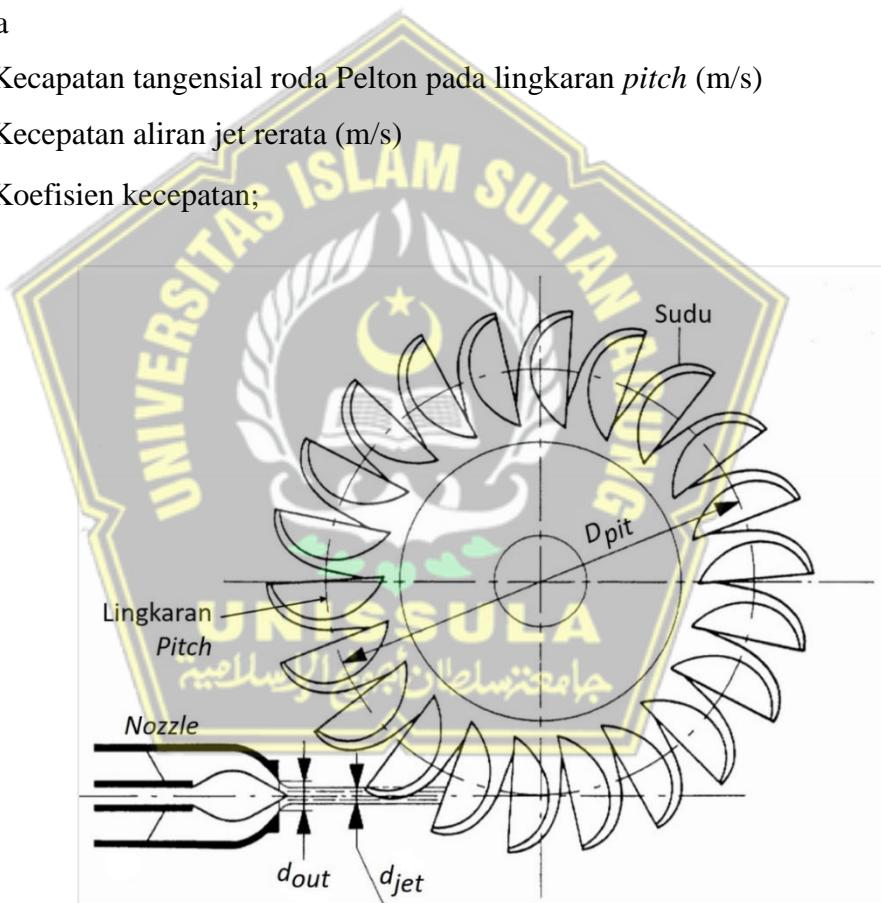
$$v_{jet} = C_v \times \sqrt{2 \times g \times H_{net}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

di mana

u : Kecapatan tangensial roda Pelton pada lingkaran *pitch* (m/s)

v_{jet} : Kecepatan aliran jet rerata (m/s)

C_v : Koefisien kecepatan;



Gambar 4.8. Ilustrasi Lingkaran *Pitch* Roda Pelton

Nilai C_v pada Persamaan 4.3 dapat berkisar dari 0,97 s.d. 0,99, di mana C_v dalam tugas akhir ini ditentukan sebesar 0,985. Dengan demikian, v_{jet} , u , dan D_{pit} yang secara berurutan ditentukan menggunakan Persamaan 4.3, Persamaan 4.2, dan Persamaan 4.1 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} v_{jet} &= C_v \times \sqrt{2 \times g \times H_{net}} \\ &= 0,985 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 84,84} \\ &= 0,985 \times 40,799 = 40,19 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$u = 0,50 \times v_{jet}$$

$$= 0,50 \times 40,19$$

$$= 18,49 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned}
 D_{pit} &= \frac{u \times 60}{\pi \times N} \\
 &= \frac{18,49 \times 60}{\pi \times 500} \\
 &= \frac{1109,17}{1570,80} = 0,71 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka roda Pelton PLTA Kaligua direncanakan dengan diameter lingkaran *pitch* 0,71 m.

4.8.3. Jumlah dan Dimensi Sudut

Jumlah sudu roda Pelton perlu ditentukan dengan mempertimbangkan aliran jet selalu tertangkap oleh sudu dengan jarak yang tidak terlalu dekat agar efisiensi maksimum didapatkan. Jumlah sudu roda Pelton (n_{buc}) paling sedikit adalah 15 buah dan dapat ditentukan berdasarkan rasio D_{pit} terhadap diameter aliran jet (d_{jet}) seperti dituliskan sebagai Persamaan 4.4 (Oo dkk, 2019).

di mana

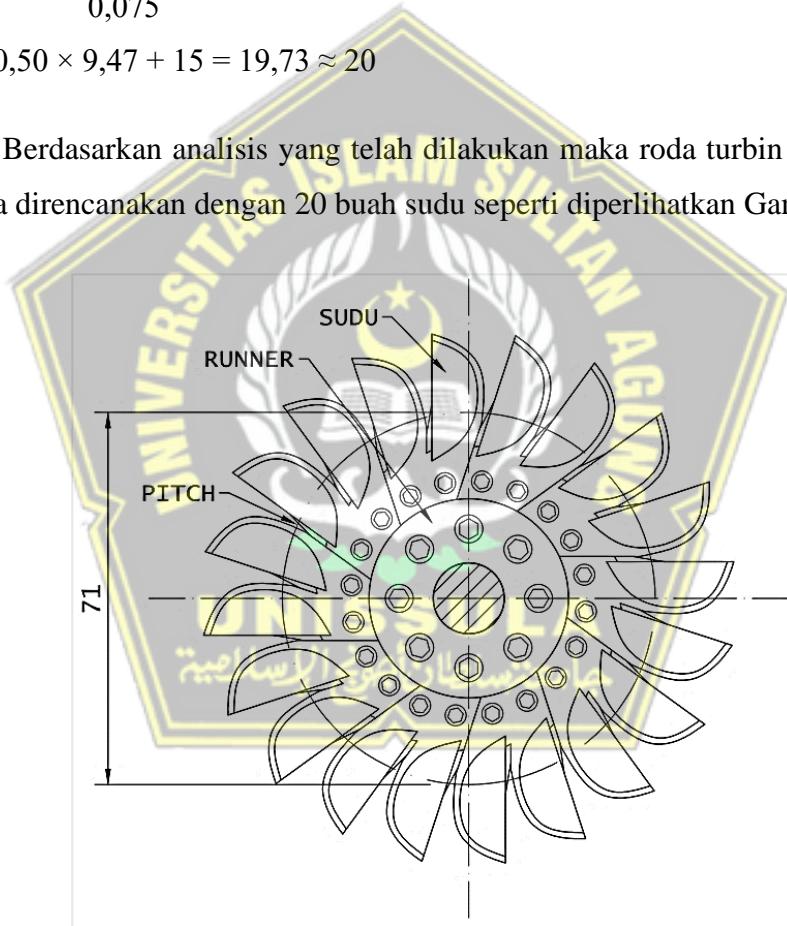
n_{noz} : Jumlah nozzle

Dengan n_{noz} sama dengan 1 maka d_{jet} dan n_{buc} yang secara berurutan ditentukan menggunakan Persamaan 4.5 dan Persamaan 4.4 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 d_{jet} &= 0,545 \times \sqrt{\frac{Q}{n_{noz} \times \sqrt{H_{net}}}} \\
 &= 0,545 \times \sqrt{\frac{0,174}{1 \times \sqrt{84,84}}} \\
 &= 0,545 \times \sqrt{0,019} = 0,075 \text{ m} = 75 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n_{buc} &= 0,50 \times \frac{D_{pit}}{d_{jet}} + 15 \\
 &= 0,50 \times \frac{0,71}{0,075} + 15 \\
 &= 0,50 \times 9,47 + 15 = 19,73 \approx 20
 \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka roda turbin Pelton PLTA Kaligua direncanakan dengan 20 buah sudu seperti diperlihatkan Gambar 4.9.



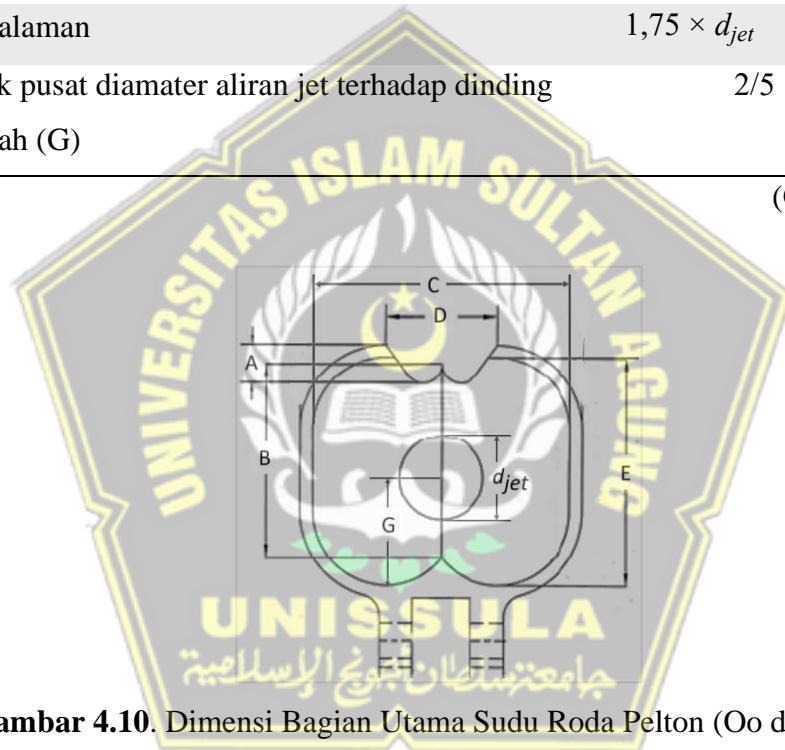
Gambar 4.9. Rencana Roda Turbin Pelton

Kemudian, dimensi bagian utama sudu yang diperlihatkan pada Gambar 4.10 ditentukan berdasarkan parameter yang diperlihatkan pada Tabel 4.21, di mana hasil penentuannya diperlihatkan pada Tabel 4.22 dan Gambar 4.11.

Tabel 4.21. Parameter Penentuan Dimensi Bagian Utama Sudu Roda Pelton

Bagian Sudu	Parameter Dimensi (mm)	
	Minimum	Maksimum
Panjang (E)	$2,28 \times d_{jet}$	$3,3 \times d_{jet}$
Lebar (C)	$2,8 \times d_{jet}$	$4 \times d_{jet}$
Kedalaman cekukan (A)	$0,44 \times d_{jet}$	$0,625 \times d_{jet}$
Lebar cekukan (D)	$1,12 \times d_{jet}$	$1,6 \times d_{jet}$
Jarak bagian terdalam cekukan terhadap puncak bawah (B)	$0,8 \times d_{jet}$	$1,2 \times d_{jet}$
Kedalaman	$1,75 \times d_{jet}$	$2,5 \times d_{jet}$
Jarak pusat diameter aliran jet terhadap dinding bawah (G)	$2/5 \times E$	

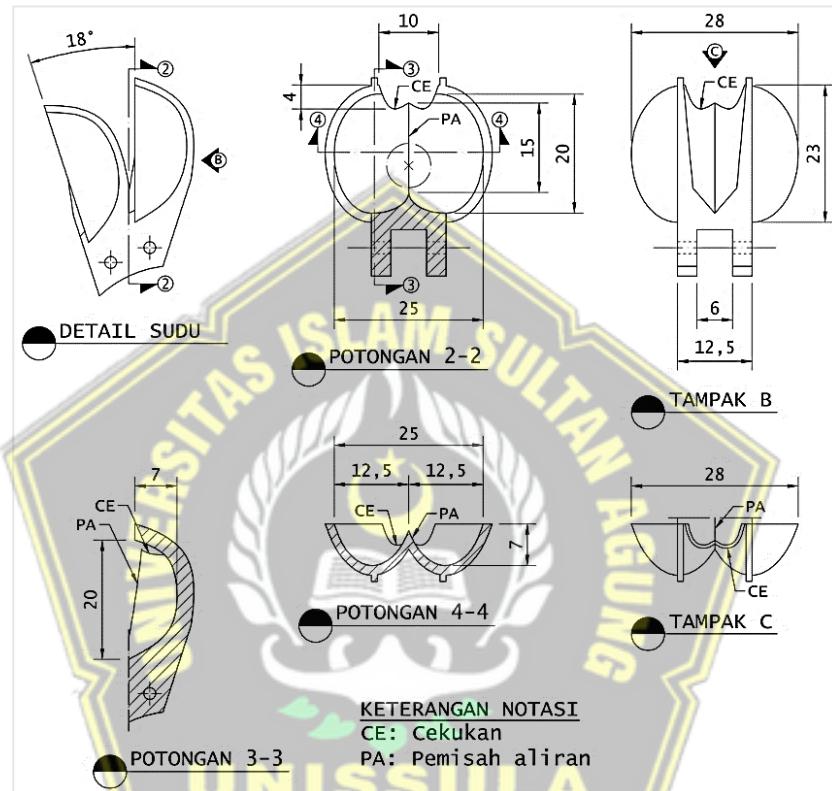
(Oo dkk, 2019)

**Gambar 4.10.** Dimensi Bagian Utama Sudu Roda Pelton (Oo dkk, 2019)**Tabel 4.22.** Hasil Penentuan Dimensi Bagian Utama Sudu Roda Pelton

Bagian Sudu	Batas Dimensi (mm)		Dimensi yang Ditentukan (mm)
	Minimum	Maksimum	
E	171	247,5	200
C	210	300	250
A	33	46,9	40
D	84	120	100
B	60	90	70

Tabel 4.22. Hasil Penentuan Dimensi Bagian Utama Sudu Roda Pelton (Lanjutan)

Bagian Sudu	Batas Dimensi (mm)		Dimensi yang Ditentukan (mm)
	Minimum	Maksimum	
Kedalaman	131,3	187,5	150
G		80	80



Gambar 4.11. Detail Rencana Sudu Roda Turbin Pelton

4.8.4. Dimensi Nozzle

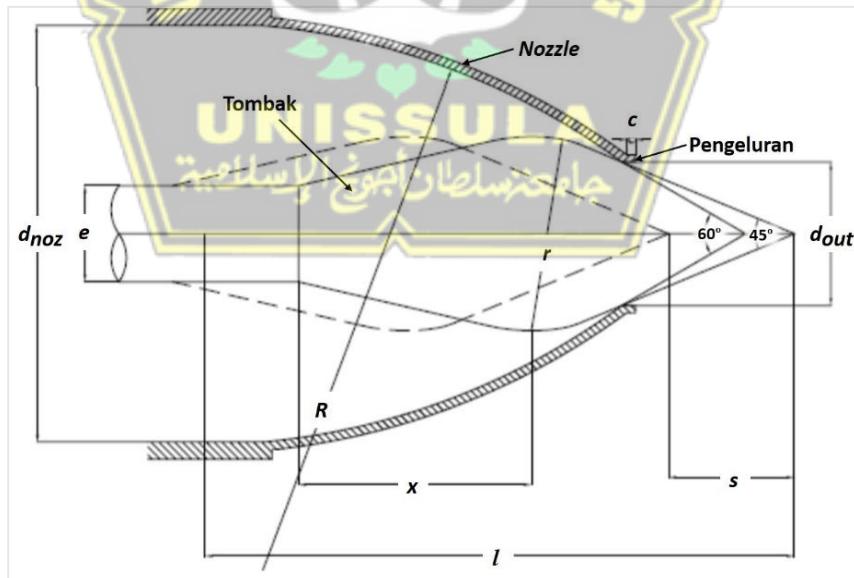
Parameter utama dalam perencanaan *nozzle* adalah diameter pengluaran (d_{out}) yang dapat ditentukan menggunakan Persamaan 4.6, di mana d_{out} harus selebar 1,2 s.d. 1,24 kali d_{jet} (Oo, 2019).

Nilai α dapat diasumsikan sebesar 80° dan μ berkisar dari 0,8 s.d. 0,88. Dalam tugas akhir ini, μ yang ditentukan adalah 0,84, sehingga d_{out} yang ditentukan menggunakan Persamaan 4.6 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} d_{out} &= \sqrt{\frac{Q \times \sin \alpha}{2,66 \times \mu \times C_v \times \sqrt{H_{net}}}} \\ &= \sqrt{\frac{0,174 \times \sin 80^\circ}{2,66 \times 0,84 \times 0,985 \times \sqrt{84,84}}} \\ &= \sqrt{\frac{0,171}{20,27}} = 0,092 \text{ m} = 92 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\frac{d_{out}}{d_{jet}} = \frac{92}{75} = 1,23 \text{ (OK)}$$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka diamater pengeluaran *nozzle* turbin Pelton PLTA Kaligua ditentukan selebar 92 mm. Kemudian, hasil penentuan dimensi bagian utama *nozzle* yang diperlihatkan pada Gambar 4.12 diperlihatkan pada Tabel 4.23 dan Gambar 4.13.

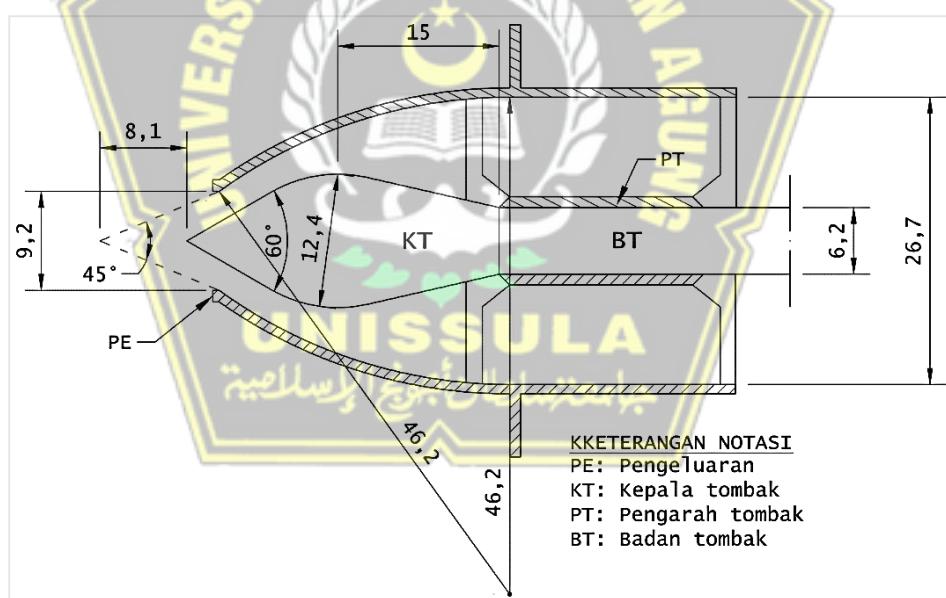


Gambar 4.12. Bagian Utama Nozzle Turbin Pelton (Oo dkk, 2019)

Tabel 4.23. Hasil Penentuan Dimensi Bagian Utama Nozzle Turbin Pelton

Bagian Nozzle	Parameter Dimensi (mm)	Hasil Perhitungan (mm)	Dimensi yang Ditentukan (mm)
Jarak penarikan tombak (s)	$0,88 \times d_{out}$	80,96	81
Jari-jari kepala tombak (r)	$1,35 \times d_{out}$	124,20	124
Jarak titik busur terjauh kepala terhadap batang tombak (x)	$1,63 \times d_{out}$	149,96	150
Jari-jari lengkungan nozzle, R	$5,02 \times d_{out}$	461,84	462
Diameter pemasukan d_{in}	$2,9 \times d_{out}$	266,80	267
Diameter batang tombak (e)	$0,67 \times d_{out}$	61,64	62
Panjang moncong tombak (c)	$0,06 \times d_{out}$	5,52	6
Jarak titik acuan penarikan tombak (l)	$4,12 \times d_{out}$	379,04	379

(Oo dkk, 2019)

**Gambar 4.13.** Dimensi Rencana Nozzle Turbin Pelton

4.9. Rekapitulasi Hasil Analisis

Berdasarkan seluruh analisis yang telah dilakukan, PLTA Kaligua direncanakan dengan data yang dipertahankan pada Tabel 4.24 dan gambar rencana yang dilampirkan pada Lampiran 21.

Tabel 4.24. Data Rencana PLTA Kaligua

Deskripsi	Nilai
Debit rencana (Q)	0,174 m ³ /s
Panjang pipa pesat (l)	513 m
Diameter luar pipa pesat (D_{out})	406,4 mm
Diameter dalam pipa pesat (D_{in})	388,92 mm
Tinggi energi bersih (H_{net})	84,84 m
Daya listrik teoritis (P_t)	144,56 kW
Perkiraan efisiensi (η)	0,846
Perkiraan daya listrik terpasang (P)	122,23 kW
Diometer pemasukan (d_{in})	267 mm
Diameter pengeluaran (d_{out})	92 mm
Kecepatan aliran jet (v_{jet})	40,19 m/s
Diameter aliran jet (d_{jet})	75 mm
Kecepatan spesifik turbin Pelton (N_{QE})	0,022
Kecepatan rotasional turbin Pelton (N)	500 rpm
Diameter lingkaran <i>pitch</i> roda turbin Pelton (D_{pit})	710 mm
Jumlah sudu roda turbin Pelton (n_{buc})	20
Frekuensi generator	50 Hz
Jumlah kutub generator	12

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh analisis yang telah dilakukan, kesimpulan mengenai potensi PLTA Kaligua dengan sungai Tuk Bening sebagai sumber air adalah sebagai berikut:

1. Debit yang direncanakan dari sungai Tuk Bening untuk PLTA Kaligua adalah $0,174 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan keandalan 80%.
2. Tinggi energi bersih aliran untuk PLTA Kaligua adalah 84,84 m dengan pipa pesat direncanakan memiliki panjang 513 m dan diameter dalam 388,92 mm.
3. Daya yang dapat dibangkitkan oleh PLTA Kaligua adalah 122,23 kW dengan perkiraan efisiensi 0,846.
4. Jenis turbin yang direncanakan untuk PLTA Kaligua adalah turbin Pelton dengan kecepatan spesifik 0,022, kecepatan rotasional 500 rpm, dan diameter lingkaran *pitch* 0,71 m.

5.2. Saran

Penulis dalam tugas akhir ini hanya melakukan perencanaan pipa pesat dan turbin. Untuk masa mendatang, penulis menyarankan agar perencanaan bagian PLTA lainnya yang berupa rumah turbin, tumpuan pipa pesat, bangunan pemasukan, saluran pembawa, bangunan pengambilan, dan jaringan transmisi dapat dilakukan sehingga biaya pembangunan PLTA Kaligua dapat diperkirakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arisyadi, D. (2016). *Tugas Sarjana - Perencanaan Pipa Pesat Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Perian*. Halaman 13, 42, dan 49 s.d. 53. Bandung: Institut Teknologi Bandung, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara. Tersedia daring di <https://digilib.itb.ac.id/index.php/gdl/download/152230>, terakhir diakses pada 25 Juni 2021.
- Arsali, Satya, O. C., Supardi, dan Purna, I. (2015). Penentuan Koefisien untuk Perhitungan Temperatur Udara Rata-rata Harian Data Stasiun Klimatologi Palembang. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. Volume 16, nomor 1, halaman 38. DOI: <http://dx.doi.org/10.31172/jmg.v16i1.260>.
- ASME B31.1 Power Piping* (2016). Halaman 18, 21 s.d. 24, 121, dan 221. New York: ASME International.
- ASME B36.10M Welded and Seamless Wrought Steel Pipe* (2018). Halaman 2 dan 10. New York: ASME International.
- ASTM A285/A 285M Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, Low- and Intermediate-Tensile Strength* (2007). Halaman 2. West Conshohocken: ASTM International.
- BMKG Kotawaringin Timur (2021). *Peralatan Meteorologi*. Halaman 2 dan 5. Tersedia daring di <https://bmkgkotim.info/peralatan-meteorologi-2/>, terakhir diakses pada 25 Juni 2021.
- Bukori, A. S. (2017). *Tesis - RE142551 - Analisis Ketersediaan Sumber Daya Air dan Upaya Koservasi sub-DAS Lesti Kabupaten Malang*. Halaman 15 s.d. 21. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Teknik Linkungan, Program Megister Bidang Keahlian Teknik Sanitasi Lingkungan.
- Connor, N. (2019). *What is Hydraulic Head - Definition*. Tersedia daring di <https://www.thermal-engineering.org/what-is-hydraulic-head-definition/>, terakhir diakses pada 26 Juni 2021.

- Connors, T. (2008). *How Watersheds Work - What Is a Watershed?*. Tersedia daring di <https://science.howstuffworks.com/environmental/conservation/issues/watershed.htm>, terakhir diakses pada 25 Juni 2021.
- Crittenden, J. C., Trussell R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., dan Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design - Appendix C Physical Properties of Water*. Edisi ke-3. Halaman 1861. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118131473.app3>.
- CV Mitra Muda Rekayasa (2012). *Laporan Studi Kelayakan - Design PLTMH Kalipagak - PT. Perkebunan Nusantara IX - Kebun Kaligua Kab. Brebes - Jawa Tengah*. Semarang
- Darmadi (2012). *Hidraulika Pengaliran dalam Pipa - Materi Kuliah*. Halaman 31 dan 59. Jakarta Timur: Universitas Jayabaya, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Program Studi Sarjana Teknik Sipil.
- ESHA (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. Halaman 17, 21, 138 s.d. 139, 149, 168 s.d. 170, 180, 184, dan 187. Brussels: European Renewable Energy Council.
- Ghavami, P. (2015). *Mechanics of Materials - Appendix A. Shears, Moments and Deflections*. Halaman 242. Cham: Springer International Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07572-3>.
- Hamdi, S. (2014). Mengenal Lama Penyinaran Matahari sebagai Salah Satu Parameter Klimatologi. *Berita Dirgantara*. Volume 15, nomor 1, halaman 7 dan 8. Jakarta Timur: Lembaga Penerbangan dan Antariksa.
- Harto, S. B. (1993). *Analisis Hidrologi*. Halaman 168. Jakarta Barat: Gramedia Pustaka Utama.
- IESR (2019). *Laporan Status Energi Bersih Indonesia: Potensi, Kapasitas Terpasang, dan Rencana Pembangunan Listrik Energi Terbarukan 2019*. Halaman 7 s.d. 23. Jakarta Selatan.
- Indarto, Widodo, S., dan Subakti, A. P. (2013). Karakteristik Fisik dan Kurva Durasi Aliran pada 15 DAS di Jawa Timur. *Agritech*. Volume 33, nomor 4, halaman 471. DOI: <https://doi.org/10.22146/agritech.9543>.

IPCC (2011). 5: *Hydropower - Graphics*. Tersedia daring di <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/hydropower/>, terakhir diakses pada 26 Juni 2021.

Isnugroho (2015). Perilaku Hidraulik pada Pengembangan Fungsi Bendung Gerak Serayu sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air. *Jurnal Teknik Hidraulik*. Volume 6, nomor 1, halaman 42. DOI: <https://doi.org/10.32679/jth.v6i1.510>.

Kumar, A., Schei, T., Ahenkorah, A., Rodriguez, C. R., Devarnay, J. -M., dan Freitas, M., Hall, D., Killingtviel, A., dan Liu, Z. (2011). *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Hydropower*. Edisi Edonhofer, O., Madruga R. P., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eckermeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., dan Stechow, von C. Halaman 451 dan 452. Cambridge: Cambridge University Press.

Laporan Audit Energi PT Perkebunan Nusantara IX Pabrik Teh Kaligua (2013). Semarang: Dinas ESDM Provinsi Jawa Tengah.

Limantara, L. M. dan Putra, W. R. (2016). Analisa Keandalan Tampungan Waduk di Embung Tambak Pocok Bangkalan. *Jurnal Teknik Sipil*. Volume 23, nomor 2, halaman 127 s.d. 134. DOI: <https://doi.org/10.5614/jts.2016.23.2.5>.

Litsaniyah, A. (2018). *Skripsi - Evaluasi dan Rasionalisasi Kerapatan Jaringan Pos Hujan dan Pos Duga Air dengan Metode Stepwise*. Halaman 10 dan 11. Malang: Universitas Brawijaya, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Pengairan.

Najamuddin, N. I. (2017). *Skripsi - Studi Perencanaan Operasi Waduk Budong-budong Kabupaten Mamuju Tengah Provinsi Sulawesi Barat*. Malang: Universitas Brawijaya, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Pengairan.

Nave, C. R. (2017). *Gravitational Potential Energy*. Atlanta: Georgia State University, Departement of Physics and Astronomy. Tersedia daring di <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/gpot.html>, terakhir diakses pada 27 Juni 2021.

- Oo, T. Z., Nyi, N., dan Khaing, C. C. (2019). Design Calculation of Pelton Turbine for 220 kW. *International Journal of Scientific and Research Publications*. Volume 9, nomor 7, halaman 220 s.d. 222. DOI: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.
- Penche, C. (1998). *Layman's Handbook on How to Develop a Small Hydro Site*. Halaman 76, 164, dan 165. Brussels: Commission of the European Communities, European Small Hydropower Association.
- Singh, D. (2009). *Micro Hydro Power - Resource Assessment Handbook*. Halaman 2. New Delhi: Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology of the United Nations, Economic and Social Comission for Asia and The Pacific.
- SNI 6738:2015 Perhitungan Debit Anndalan Sungai dengan Kurva Durasi Debit*. Halaman i. Jakarta Pusat: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 7745:2012 Tata Cara Perhitungan Evapotranspirasi Tanaman Acuan dengan Metode Penman-Monteith*. Jakarta Pusat: Badan Standarisasi Nasional.
- Syaifullah, M. D. (2015). Suhu Permukaan Laut Perairan Indonesia dan Hubungannya Dengan Pemanasan Global. *Jurnal Segara*. Voulme 11, nomor 1, halaman 39. DOI: <http://dx.doi.org/10.15578/segara.v11i2.7356>.
- USBR (1977). *Welded Steel Penstock*. Halaman 19 s.d. 21, 34, dan 37. Washington, D.C.: United States Government Printing Office.



Lampiran 1. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2010

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	21,15	21,75	21,98	22,44	22,30	21,82	21,72	21,81	21,86	21,89	21,97	21,14
e_s	kPa	Per. 2.25	2,51	2,60	2,64	2,72	2,69	2,62	2,60	2,61	2,62	2,63	2,64	2,51
ϕ	%	Tab. 4.2	84,55	83,29	81,84	78,77	81,19	81,17	78,55	77,61	79,57	77,58	79,27	84,13
e_a	kPa	Per. 2.26	2,12	2,17	2,16	2,14	2,19	2,12	2,04	2,03	2,09	2,04	2,09	2,11
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	2,45	1,86	1,61	1,73	1,68	1,53	1,87	2,06	1,97	2,16	2,10	2,35
U_2	m/s	Per. 2.31	1,80	1,37	1,18	1,27	1,23	1,12	1,37	1,51	1,45	1,59	1,54	1,73
ε'	-	Per. 2.32	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 1. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2010 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
φ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	3,61	5,12	4,98	5,59	5,48	4,76	5,14	6,10	7,99	5,00	4,49	3,34
f	-	Per. 2.37	0,36	0,48	0,47	0,53	0,52	0,47	0,50	0,57	0,70	0,47	0,43	0,34
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,81	2,36	2,36	2,66	2,60	2,37	2,58	2,95	3,58	2,44	2,18	1,72
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	15,34	17,88	17,30	17,11	15,56	13,82	14,63	17,18	21,40	17,46	16,67	14,78
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	11,81	13,76	13,32	13,17	11,98	10,64	11,26	13,23	16,48	13,44	12,84	11,38
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	10,00	11,40	10,96	10,52	9,39	8,27	8,68	10,28	12,90	11,00	10,65	9,66
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,07	3,50	3,42	3,41	3,02	2,68	2,88	3,37	4,01	3,57	3,43	2,99

Lampiran 2. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2011

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	21,08	21,01	21,24	21,65	21,79	21,46	21,02	21,01	21,61	22,14	21,94	21,78
e_s	kPa	Per. 2.25	2,50	2,49	2,52	2,59	2,61	2,56	2,49	2,49	2,58	2,67	2,64	2,61
ϕ	%	Tab. 4.2	85,10	85,86	83,39	81,73	80,10	74,40	76,71	72,13	69,97	72,90	78,53	81,03
e_a	kPa	Per. 2.26	2,13	2,14	2,11	2,12	2,09	1,90	1,91	1,80	1,81	1,94	2,07	2,11
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	3,10	2,79	2,19	2,10	2,00	2,53	2,29	2,84	3,07	2,77	2,20	2,74
U_2	m/s	Per. 2.31	2,28	2,05	1,61	1,54	1,47	1,86	1,68	2,08	2,25	2,03	1,62	2,01
ε'	-	Per. 2.32	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 2. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2011 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	2,98	3,67	4,11	5,35	5,56	6,90	7,29	7,76	7,35	5,76	4,21	4,22
f	-	Per. 2.37	0,32	0,37	0,41	0,51	0,53	0,64	0,66	0,69	0,65	0,53	0,41	0,41
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,58	1,84	2,05	2,56	2,70	3,45	3,57	3,88	3,67	2,84	2,10	2,05
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	14,35	15,57	15,93	16,75	15,67	16,62	17,50	19,57	20,42	18,66	16,23	16,14
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	11,05	11,99	12,26	12,90	12,07	12,80	13,47	15,07	15,73	14,37	12,50	12,43
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	9,47	10,15	10,21	10,34	9,37	9,35	9,90	11,19	12,06	11,53	10,40	10,38
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	2,93	3,06	3,16	3,26	3,05	3,25	3,27	3,81	4,20	3,95	3,39	3,34

Lampiran 3. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2012

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	29	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	21,11	21,33	21,25	21,92	22,10	21,56	21,06	20,99	21,66	22,44	22,37	21,72
e_s	kPa	Per. 2.25	2,50	2,54	2,53	2,63	2,66	2,57	2,50	2,49	2,59	2,72	2,71	2,60
ϕ	%	Tab. 4.2	85,13	83,10	82,48	78,97	75,32	75,20	71,65	69,77	69,70	72,06	76,03	80,87
e_a	kPa	Per. 2.26	2,13	2,11	2,08	2,08	2,00	1,94	1,79	1,73	1,81	1,96	2,06	2,10
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	3,10	2,21	2,58	2,20	2,32	2,60	2,74	3,03	2,97	2,71	2,27	2,06
U_2	m/s	Per. 2.31	2,28	1,62	1,89	1,62	1,70	1,91	2,01	2,22	2,18	1,99	1,67	1,51
ε'	-	Per. 2.32	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	15	45	77	107	137	168	198	229	259	289	320	350
δ	rad	Per. 2.34	-0,37	-0,24	-0,03	0,18	0,34	0,41	0,37	0,23	0,03	-0,17	-0,34	-0,41

Lampiran 3. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2012 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,57	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,38	12,23	12,03	11,82	11,66	11,58	11,62	11,77	11,97	12,17	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	3,63	4,85	3,80	6,11	7,04	4,77	7,19	7,19	7,42	6,78	4,40	3,55
f	-	Per. 2.37	0,36	0,46	0,38	0,57	0,64	0,47	0,66	0,65	0,66	0,60	0,42	0,36
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,81	2,30	1,95	2,90	3,40	2,53	3,68	3,71	3,70	3,24	2,19	1,81
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,71	38,93	37,79	35,08	32,01	30,32	31,11	33,85	36,73	38,36	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	15,36	17,45	15,42	17,83	17,67	13,83	17,40	18,80	20,57	20,27	16,52	15,10
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	11,82	13,43	11,87	13,73	13,60	10,65	13,40	14,48	15,84	15,61	12,72	11,63
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	10,01	11,13	9,92	10,83	10,21	8,12	9,71	10,77	12,14	12,37	10,53	9,82
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,06	3,42	3,13	3,50	3,46	2,93	3,44	3,82	4,22	4,22	3,54	3,15

Lampiran 4. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2013

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	21,09	21,69	21,96	22,09	22,11	21,78	21,32	21,43	21,29	20,67	21,84	21,51
e_s	kPa	Per. 2.25	2,50	2,60	2,64	2,66	2,66	2,61	2,54	2,55	2,53	2,44	2,62	2,57
ϕ	%	Tab. 4.2	85,74	81,50	81,03	80,60	80,74	81,87	79,61	73,87	71,50	73,60	77,12	82,44
e_a	kPa	Per. 2.26	2,14	2,12	2,14	2,14	2,15	2,14	2,02	1,89	1,81	1,79	2,02	2,12
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055
U_h	m/s	Tab. 4.3	2,39	2,39	2,03	1,97	1,84	1,97	1,97	2,29	2,50	2,40	2,12	2,70
U_2	m/s	Per. 2.31	1,75	1,75	1,49	1,45	1,35	1,45	1,45	1,68	1,84	1,76	1,56	1,98
ε'	-	Per. 2.32	0,13	0,14	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 4. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2013 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
φ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	3,57	4,77	5,55	5,23	5,65	5,14	5,99	7,15	7,12	6,21	4,50	3,93
f	-	Per. 2.37	0,36	0,45	0,52	0,50	0,54	0,50	0,56	0,65	0,64	0,56	0,43	0,38
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,78	2,28	2,59	2,50	2,69	2,51	2,93	3,52	3,55	3,11	2,24	1,94
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	15,28	17,32	18,19	16,57	15,80	14,32	15,76	18,69	20,07	19,37	16,69	15,69
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	11,76	13,34	14,01	12,76	12,16	11,02	12,14	14,39	15,45	14,91	12,85	12,08
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	9,98	11,06	11,42	10,26	9,48	8,52	9,21	10,87	11,91	11,80	10,61	10,15
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,02	3,47	3,59	3,29	3,06	2,77	2,99	3,63	3,99	3,84	3,48	3,21

Lampiran 5. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2014

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	20,88	20,97	21,57	22,02	22,35	22,18	21,42	21,06	22,19	21,43	22,23	21,80
e_s	kPa	Per. 2.25	2,47	2,48	2,58	2,65	2,70	2,67	2,55	2,50	2,68	2,55	2,68	2,61
ϕ	%	Tab. 4.2	85,79	86,32	84,02	80,60	80,45	78,85	77,61	79,25	79,29	71,81	76,03	81,13
e_a	kPa	Per. 2.26	2,12	2,14	2,16	2,13	2,17	2,11	1,98	1,98	2,12	1,83	2,04	2,12
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	2,84	2,25	2,03	2,00	2,06	1,97	2,06	2,60	2,79	2,40	2,08	2,23
U_2	m/s	Per. 2.31	2,08	1,65	1,49	1,47	1,51	1,45	1,51	1,91	2,05	1,76	1,53	1,64
ε'	-	Per. 2.32	0,14	0,14	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 5. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2014 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	2,58	3,75	6,47	6,54	7,30	7,05	6,29	6,30	5,45	7,65	6,10	4,33
f	-	Per. 2.37	0,29	0,38	0,58	0,60	0,66	0,65	0,59	0,58	0,51	0,67	0,54	0,41
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,44	1,86	2,89	3,01	3,31	3,30	3,10	3,06	2,59	3,70	2,85	2,09
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	13,73	15,70	19,64	18,52	18,07	16,82	16,16	17,47	17,51	21,63	19,19	16,31
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	10,57	12,09	15,12	14,26	13,91	12,95	12,45	13,45	13,48	16,66	14,77	12,56
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	9,13	10,22	12,23	11,25	10,60	9,65	9,35	10,40	10,90	12,96	11,93	10,47
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	2,80	3,06	3,70	3,55	3,41	3,18	3,09	3,35	3,57	4,26	3,88	3,33

Lampiran 6. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2015

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	21,15	20,72	21,55	21,65	21,87	21,53	21,05	20,87	21,46	22,18	22,63	22,10
e_s	kPa	Per. 2.25	2,51	2,45	2,57	2,59	2,62	2,57	2,50	2,47	2,56	2,67	2,75	2,66
ϕ	%	Tab. 4.2	84,65	86,86	82,75	83,00	77,28	74,65	74,76	74,15	70,23	70,02	74,93	81,94
e_a	kPa	Per. 2.26	2,13	2,12	2,13	2,15	2,03	1,92	1,87	1,83	1,80	1,87	2,06	2,18
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	2,21	2,20	2,11	1,90	2,00	2,10	2,29	2,47	2,70	2,39	2,03	2,10
U_2	m/s	Per. 2.31	1,62	1,62	1,55	1,39	1,47	1,54	1,68	1,81	1,98	1,75	1,49	1,54
ε'	-	Per. 2.32	0,14	0,14	0,14	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,13
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 6. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2015 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
φ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	4,70	4,66	6,35	5,41	7,65	8,12	8,39	8,68	9,43	9,08	7,70	4,93
f	-	Per. 2.37	0,44	0,44	0,57	0,51	0,69	0,73	0,75	0,76	0,81	0,77	0,66	0,46
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	2,21	2,20	2,88	2,55	3,60	3,95	4,09	4,21	4,55	4,27	3,45	2,27
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	17,04	17,14	19,45	16,84	18,55	18,22	18,97	20,88	23,61	23,89	21,69	17,24
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	13,12	13,20	14,98	12,97	14,28	14,03	14,61	16,08	18,18	18,39	16,70	13,28
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	10,92	11,00	12,09	10,42	10,68	10,09	10,51	11,87	13,63	14,12	13,25	11,01
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,30	3,23	3,69	3,24	3,48	3,38	3,48	3,86	4,52	4,68	4,30	3,46

Lampiran 7. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2016

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	29	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	22,18	21,34	22,23	22,49	22,60	22,08	21,86	21,80	21,91	21,94	22,04	21,82
e_s	kPa	Per. 2.25	2,67	2,54	2,68	2,72	2,74	2,66	2,62	2,61	2,63	2,64	2,65	2,62
ϕ	%	Tab. 4.2	82,39	86,86	83,68	81,80	80,58	79,11	80,63	77,32	80,43	80,46	80,29	81,15
e_a	kPa	Per. 2.26	2,20	2,21	2,24	2,23	2,21	2,10	2,11	2,02	2,12	2,12	2,13	2,12
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	1,94	2,17	1,84	2,03	2,16	2,10	2,03	2,06	1,90	2,06	1,87	2,21
U_2	m/s	Per. 2.31	1,42	1,59	1,35	1,49	1,59	1,54	1,49	1,51	1,39	1,51	1,37	1,62
ε'	-	Per. 2.32	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	15	45	77	107	137	168	198	229	259	289	320	350
δ	rad	Per. 2.34	-0,37	-0,24	-0,03	0,18	0,34	0,41	0,37	0,23	0,03	-0,17	-0,34	-0,41

Lampiran 7. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2016 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,57	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,38	12,23	12,03	11,82	11,66	11,58	11,62	11,77	11,97	12,17	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	5,78	4,12	5,35	5,72	6,71	6,84	7,35	7,17	7,57	5,12	5,03	4,38
f	-	Per. 2.37	0,52	0,40	0,50	0,54	0,62	0,63	0,67	0,65	0,67	0,48	0,47	0,42
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	2,56	1,96	2,43	2,62	3,05	3,22	3,39	3,39	3,39	2,42	2,36	2,11
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,71	38,93	37,79	35,08	32,01	30,32	31,11	33,85	36,73	38,36	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	18,72	16,29	17,85	17,26	17,21	16,54	17,61	18,77	20,80	17,66	17,51	16,39
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	14,41	12,54	13,75	13,29	13,25	12,73	13,56	14,45	16,02	13,60	13,48	12,62
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	11,85	10,58	11,31	10,66	10,20	9,51	10,17	11,06	12,63	11,18	11,13	10,51
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,68	3,16	3,50	3,39	3,32	3,14	3,26	3,58	3,92	3,54	3,52	3,34

Lampiran 8. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2017

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	21,24	21,25	21,70	21,91	22,04	21,82	21,29	21,32	21,76	22,39	22,01	21,75
e_s	kPa	Per. 2.25	2,52	2,53	2,60	2,63	2,65	2,62	2,53	2,54	2,61	2,71	2,65	2,60
ϕ	%	Tab. 4.2	85,86	85,02	82,53	81,32	79,29	80,04	75,83	71,96	72,84	75,39	78,70	80,38
e_a	kPa	Per. 2.26	2,17	2,15	2,14	2,14	2,10	2,09	1,92	1,83	1,90	2,04	2,08	2,09
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	1,87	2,36	1,81	1,97	1,97	2,03	2,31	2,65	2,53	2,42	1,85	2,18
U_2	m/s	Per. 2.31	1,37	1,73	1,33	1,45	1,45	1,49	1,70	1,95	1,86	1,78	1,36	1,60
ε'	-	Per. 2.32	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 8. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2017 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	3,72	4,60	5,63	6,58	6,65	6,82	6,68	8,41	8,13	7,02	4,35	4,35
f	-	Per. 2.37	0,37	0,44	0,52	0,60	0,61	0,63	0,62	0,74	0,71	0,62	0,42	0,42
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,83	2,18	2,61	3,02	3,13	3,21	3,32	4,13	3,88	3,24	2,14	2,11
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	15,51	17,05	18,32	18,58	17,17	16,52	16,68	20,50	21,62	20,64	16,45	16,34
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	11,94	13,13	14,11	14,31	13,22	12,72	12,85	15,78	16,65	15,89	12,67	12,58
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	10,12	10,95	11,50	11,29	10,10	9,51	9,53	11,65	12,77	12,65	10,53	10,47
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,06	3,31	3,54	3,54	3,28	3,09	3,21	3,94	4,21	4,14	3,39	3,35

Lampiran 9. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2018

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	21,79	20,78	21,60	22,06	22,08	21,57	20,90	20,94	21,79	22,32	22,53	22,18
e_s	kPa	Per. 2.25	2,61	2,45	2,58	2,65	2,66	2,58	2,47	2,48	2,61	2,70	2,73	2,67
ϕ	%	Tab. 4.2	80,05	87,44	82,23	80,60	77,52	76,77	72,46	69,29	70,42	71,36	75,08	75,66
e_a	kPa	Per. 2.26	2,090	2,146	2,122	2,140	2,060	1,978	1,792	1,717	1,839	1,924	2,051	2,023
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	2,58	1,84	1,81	1,63	1,97	2,17	2,42	2,52	2,60	2,75	2,12	2,21
U_2	m/s	Per. 2.31	1,89	1,35	1,33	1,20	1,45	1,59	1,78	1,85	1,91	2,02	1,56	1,62
ε'	-	Per. 2.32	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 9. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2018 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	3,81	4,13	5,82	6,89	7,39	7,33	8,42	8,41	8,27	8,62	5,30	4,58
f	-	Per. 2.37	0,377	0,404	0,535	0,624	0,670	0,670	0,752	0,743	0,722	0,738	0,487	0,432
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	1,92	1,99	2,69	3,14	3,47	3,54	4,20	4,26	4,02	4,02	2,54	2,27
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	15,65	16,30	18,62	19,04	18,19	17,19	19,01	20,50	21,83	23,16	17,94	16,70
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	12,05	12,55	14,34	14,66	14,01	13,23	14,64	15,78	16,81	17,84	13,81	12,86
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	10,13	10,56	11,64	11,52	10,54	9,69	10,43	11,52	12,79	13,82	11,27	10,59
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,30	3,11	3,58	3,61	3,45	3,23	3,54	3,94	4,31	4,62	3,76	3,55

Lampiran 10. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2019

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
T	°C	Tab. 4.1	22,46	22,42	22,52	23,06	23,00	22,11	21,61	21,69	22,08	23,13	23,56	23,10
e_s	kPa	Per. 2.25	2,72	2,71	2,73	2,82	2,81	2,66	2,58	2,60	2,66	2,83	2,91	2,83
ϕ	%	Tab. 4.2	82,88	82,34	81,61	80,25	77,25	72,55	71,22	69,06	69,50	69,52	71,37	78,56
e_a	kPa	Per. 2.26	2,25	2,23	2,23	2,26	2,17	1,93	1,84	1,79	1,85	1,97	2,07	2,22
Δ	kPa/ °C	Per. 2.27	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,17
λ	MJ/kg	Per. 2.28	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
z	mdpl	Kontur	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732	1732
T_0	°C	Asumsi	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
p_{Az}	kPa	Per. 2.29	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98	82,98
γ	kPa/ °C	Per. 2.30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
U_h	m/s	Tab. 4.3	1,95	1,85	2,16	1,81	1,97	2,37	2,48	2,42	2,50	2,68	2,50	1,79
U_2	m/s	Per. 2.31	1,43	1,36	1,59	1,33	1,45	1,74	1,82	1,78	1,84	1,97	1,84	1,31
ε'	-	Per. 2.32	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13
J	-	Per. 2.33	17	47	76	106	136	167	197	228	258	288	319	349
δ	rad	Per. 2.34	-0,36	-0,22	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,23	0,04	-0,17	-0,33	-0,41

Lampiran 10. Analisis Evapotranspirasi Acuan DPS Tuk Bening Tahun 2019 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
ϕ	rad	Gam. 4.2	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
ω_s	rad	Per. 2.35	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,52	1,54	1,57	1,59	1,62	1,63
N	jam	Per. 2.36	12,37	12,22	12,03	11,83	11,66	11,58	11,62	11,77	11,96	12,16	12,34	12,42
n	Jam	Tab. 4.4	4,50	6,24	4,13	6,97	7,30	7,72	8,29	8,50	8,98	9,09	7,47	5,94
f	-	Per. 2.37	0,43	0,56	0,41	0,63	0,66	0,70	0,74	0,75	0,78	0,77	0,64	0,53
R_{nl}	MJ/m ² /hari	Per. 2.38	2,08	2,74	2,01	3,08	3,34	3,79	4,12	4,24	4,32	4,19	3,39	2,63
d_r	-	Per. 2.39	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,03
R_a	MJ/m ² /hari	Per. 2.40	38,74	38,91	37,85	35,19	32,10	30,34	31,04	33,75	36,65	38,33	38,59	38,44
R_s	MJ/m ² /hari	Per. 2.41	16,73	19,66	15,96	19,16	18,07	17,70	18,83	20,63	22,92	23,90	21,33	18,80
R_{ns}	MJ/m ² /hari	Per. 2.42	12,88	15,14	12,29	14,76	13,91	13,63	14,50	15,88	17,65	18,41	16,42	14,48
R_n	MJ/m ² /hari	Per. 2.43	10,81	12,40	10,28	11,68	10,57	9,84	10,38	11,65	13,33	14,22	13,04	11,85
Et_o	Mm/hari	Per. 2.44	3,40	3,84	3,31	3,74	3,52	3,46	3,63	4,02	4,49	4,85	4,48	3,83

Lampiran 11. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2010

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
R	-	Tab. 4.7	876	491	637	340	414	219	198	213	401	280	369	887
n_R	-	Tab. 4.8	29	23	24	23	22	18	18	18	23	25	26	29
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	95,19	98,03	106,04	102,17	93,77	80,35	89,40	100,95	124,37	107,22	106,43	89,81
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-5,24	-2,45	-3,18	-2,55	-1,88	0	0	0	-3,11	-3,75	-4,26	-4,94
Eta	mm	Per. 2.12	100,43	100,48	109,22	104,72	95,65	80,35	89,40	100,95	127,48	110,97	110,69	94,75
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	775,6	390,5	527,8	235,3	318,4	138,7	108,6	112,1	273,5	169,0	258,3	792,3
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
WS	mm	Per. 2.16	775,57	390,52	527,78	235,28	318,35	138,65	108,60	112,05	273,52	169,03	258,31	792,25
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 11. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2010 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	310,23	156,21	211,11	94,11	127,34	55,46	43,44	44,82	109,41	67,61	103,33	316,90
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	248,18	124,97	168,89	75,29	101,87	44,37	34,75	35,86	87,53	54,09	82,66	253,52
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	134,82	229,80	212,86	229,05	182,60	170,69	129,03	98,27	80,48	100,80	92,93	105,36
GS_i	mm	Per. 2.20	383,00	354,77	381,75	304,34	284,48	215,05	163,78	134,13	168,00	154,89	175,59	358,88
ΔS_i	mm	Per. 2.19	158,3	-28,2	27,0	-77,4	-19,9	-69,4	-51,3	-29,7	33,9	-13,1	20,7	183,3
BF	mm	Per. 2.17	151,92	184,44	184,13	171,52	147,20	124,88	94,71	74,48	75,53	80,72	82,62	133,62
DR	mm	Per. 2.18	465,34	234,31	316,67	141,17	191,01	83,19	65,16	67,23	164,11	101,42	154,99	475,35
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	617,27	418,75	500,80	312,69	338,22	208,07	159,87	141,71	239,64	182,14	237,61	608,97
F	km^2	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m^3/s	Per. 2.23	0,240	0,180	0,194	0,125	0,131	0,083	0,062	0,057	0,093	0,073	0,092	0,244

Lampiran 12. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2011

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
R	-	Tab. 4.7	479	731	509	405	347	33	31	0	13	197	696	555
n_R	-	Tab. 4.8	26	23	24	24	18	5	6	0	5	17	30	26
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	90,79	85,74	97,94	97,85	94,47	97,63	101,23	114,34	130,06	118,60	105,24	100,16
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-3,63	-2,14	-2,94	-2,94	0	6,35	6,07	10,29	8,45	0,59	-6,31	-4,01
Eta	mm	Per. 2.12	94,42	87,88	100,88	100,79	94,47	91,28	95,16	104,05	121,61	118,01	111,55	104,17
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	384,6	643,1	408,1	304,2	252,5	-58,3	-64,2	-104,0	-108,6	79,0	584,4	450,8
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	200	141,72	77,56	0	0	78,99	200	200
WS	mm	Per. 2.16	384,58	643,12	408,12	304,21	252,53	0	0	0	0	78,99	584,45	450,83
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 12. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2011 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	153,83	257,25	163,25	121,69	101,01	0	0	0	0	31,60	233,78	180,33
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	123,07	205,80	130,60	97,35	80,81	0	0	0	0	25,28	187,02	144,27
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	215,326	203,03	245,30	225,54	193,73	164,73	98,84	59,30	35,58	21,35	27,98	129,00
GS_i	mm	Per. 2.20	338,39	408,83	375,90	322,89	274,54	164,73	98,84	59,30	35,58	46,63	215,00	273,27
ΔS_i	mm	Per. 2.19	-20,5	70,4	-32,9	-53,0	-48,3	-109,8	-65,9	-39,5	-23,7	11,0	168,4	58,3
BF	mm	Per. 2.17	174,32	186,81	196,18	174,70	149,36	109,82	65,89	39,53	23,72	20,55	65,41	122,07
DR	mm	Per. 2.18	230,75	385,87	244,87	182,53	151,52	0	0	0	0	47,40	350,67	270,50
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	405,06	572,68	441,06	357,23	300,88	109,82	65,89	39,53	23,72	67,95	416,07	392,57
F	km ²	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m ³ /s	Per. 2.23	0,157	0,246	0,171	0,143	0,117	0,044	0,026	0,016	0,009	0,027	0,162	0,158

Lampiran 13. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2012

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
R	-	Tab. 4.7	519	460	526	339	235	8	6	7	0	162	262	452
n_R	-	Tab. 4.8	27	20	26	22	17	3	3	2	0	14	21	27
n_d	-	Kalender	31	29	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	94,99	99,08	96,97	104,86	107,33	87,79	106,76	114,56	130,68	126,55	109,75	94,42
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-4,27	-0,99	-3,88	-2,10	0,54	6,58	8,01	9,16	11,76	2,53	-1,65	-4,25
Eta	mm	Per. 2.12	99,26	100,07	100,85	106,96	106,79	81,21	98,75	105,40	118,92	124,02	111,40	98,67
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	419,7	359,9	425,2	232,0	128,2	-73,2	-92,8	-98,4	-118,9	38,0	150,6	353,3
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	200	126,79	34,04	0	0	37,98	188,58	200
WS	mm	Per. 2.16	419,74	359,93	425,15	232,04	128,21	0	0	0	0	37,98	150,60	353,33
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 13. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2012 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	167,89	143,97	170,06	92,82	51,28	0	0	0	0	15,19	60,24	141,33
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	134,32	115,18	136,05	74,25	41,03	0	0	0	0	12,15	48,19	113,07
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	163,959	178,96	176,49	187,52	157,06	118,85	71,31	42,79	25,67	15,40	16,53	38,84
GS_i	mm	Per. 2.20	298,27	294,14	312,53	261,77	198,09	118,85	71,31	42,79	25,67	27,56	64,73	151,90
ΔS_i	mm	Per. 2.19	25,01	-4,1	18,4	-50,8	-63,7	-79,2	-47,5	-28,5	-17,1	1,9	37,2	87,2
BF	mm	Per. 2.17	142,89	148,10	151,67	143,58	114,97	79,24	47,54	28,53	17,12	13,31	23,07	54,16
DR	mm	Per. 2.18	251,84	215,96	255,09	139,23	76,92	0	0	0	0	22,79	90,36	212,00
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	394,73	364,06	406,76	282,80	191,89	79,24	47,54	28,53	17,12	36,10	113,43	266,16
F	km ²	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m ³ /s	Per. 2.23	0,153	0,151	0,158	0,113	0,075	0,032	0,018	0,011	0,007	0,014	0,044	0,107

Lampiran 14. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2013

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
R	-	Tab. 4.7	452	270	167	277	136	177	147	27	27	122	145	252
n_R	-	Tab. 4.8	27	23	23	25	18	15	14	2	1	13	22	27
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	93,75	97,30	111,14	98,66	94,95	83,04	92,58	108,90	123,75	115,08	107,73	96,30
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-4,22	-2,43	-2,78	-3,45	0	1,25	1,85	8,71	10,52	2,88	-2,15	-4,33
Eta	mm	Per. 2.12	97,97	99,73	113,92	102,11	94,95	81,79	90,73	100,19	113,23	112,20	109,88	100,63
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	354,0	170,3	53,1	174,9	41,1	95,2	56,3	-73,2	-86,2	9,8	35,1	151,4
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	200	200	200	126,81	40,58	50,38	85,49	200
WS	mm	Per. 2.16	354,03	170,27	53,08	174,89	41,05	95,21	56,27	0	0	9,80	35,12	151,37
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 14. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2013 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	141,61	68,11	21,23	69,95	16,42	38,08	22,51	0	0	3,92	14,05	60,55
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	113,29	54,49	16,99	55,96	13,14	30,47	18,01	0	0	3,14	11,24	48,44
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	91,1415	122,66	106,29	73,96	77,96	54,66	51,07	41,45	24,87	14,92	10,83	13,24
GS_i	mm	Per. 2.20	204,43	177,14	123,27	129,93	91,09	85,12	69,08	41,45	24,87	18,06	22,07	61,68
ΔS_i	mm	Per. 2.19	52,5	-27,3	-53,9	6,7	-38,8	-6,0	-16,0	-27,6	-16,6	-6,8	4,0	39,6
BF	mm	Per. 2.17	89,08	95,39	75,10	63,30	55,25	44,05	38,55	27,63	16,58	10,73	10,03	20,94
DR	mm	Per. 2.18	212,42	102,16	31,85	104,93	24,63	57,12	33,76	0	0	5,88	21,07	90,82
<hr/>														
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	301,50	197,55	106,95	168,23	79,88	101,18	72,31	27,63	16,58	16,61	31,10	111,76
F	km ²	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m ³ /s	Per. 2.23	0,117	0,085	0,042	0,068	0,031	0,041	0,028	0,011	0,006	0,007	0,012	0,045

Lampiran 15. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2014

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
R	-	Tab. 4.7	165	160	142	81	88	63	101	54	3	116	269	268
n_R	-	Tab. 4.8	21	18	16	10	11	7	11	7	1	9	24	21
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	86,83	85,75	114,55	106,63	105,65	95,26	95,89	100,37	110,57	127,66	120,36	99,91
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-1,30	0,00	1,15	4,27	3,70	5,24	3,36	5,52	9,40	5,74	-3,61	-1,50
Et_a	mm	Per. 2.12	88,13	85,75	113,40	102,36	101,95	90,02	92,53	94,85	101,17	121,92	123,97	101,41
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	76,9	74,3	28,6	-21,4	-14,0	-27,0	8,5	-40,8	-98,2	-5,9	145,0	166,6
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	178,64	164,68	137,66	146,13	105,28	7,11	1,19	146,22	200
WS	mm	Per. 2.16	76,87	74,25	28,60	0	0	0	8,47	0	0	0	145,03	166,59
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 15. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2014 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	30,75	29,70	11,44	0	0	0	3,39	0	0	0	58,01	66,64
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	24,60	23,76	9,15	0	0	0	2,71	0	0	0	46,41	53,31
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	37,0078	36,96	36,43	27,35	16,41	9,85	5,91	5,17	3,10	1,86	1,12	28,52
GS_i	mm	Per. 2.20	61,61	60,72	45,58	27,35	16,41	9,85	8,62	5,17	3,10	1,86	47,53	81,82
ΔS_i	mm	Per. 2.19	-0,1	-0,9	-15,1	-18,2	-10,9	-6,6	-1,2	-3,4	-2,1	-1,2	45,7	34,3
BF	mm	Per. 2.17	30,82	30,58	26,58	18,23	10,94	6,56	4,62	3,45	2,07	1,24	12,35	32,34
DR	mm	Per. 2.18	46,12	44,55	17,16	0	0	0	5,08	0	0	0	87,02	99,95
<hr/>														
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	76,94	75,13	43,73	18,23	10,94	6,56	9,70	3,45	2,07	1,24	99,36	132,29
F	km ²	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m ³ /s	Per. 2.23	0,030	0,032	0,017	0,007	0,004	0,003	0,004	0,001	0,001	0	0,039	0,053

Lampiran 16. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2015

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
R	-	Tab. 4.7	274	271	246	237	56	44	0	0	0	6	275	145
n_R	-	Tab. 4.8	25	25	23	19	6	3	0	0	0	1	23	25
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	102,40	90,56	114,48	97,15	107,86	101,46	107,99	115,83	140,11	140,43	133,17	103,86
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-3,58	-3,17	-2,86	-0,49	6,47	7,61	9,72	10,42	12,61	11,94	-3,33	-3,64
Et_a	mm	Per. 2.12	105,98	93,73	117,34	97,64	101,39	93,85	98,27	105,41	127,50	128,49	136,50	107,50
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	168,0	177,3	128,7	139,4	-45,4	-49,9	-98,3	-105,4	-127,5	-122,5	138,5	37,5
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	154,61	104,76	6,49	0	0	0	138,50	176,01
WS	mm	Per. 2.16	168,02	177,27	128,66	139,36	0	0	0	0	0	0	138,50	37,50
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 16. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2015 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	67,21	70,91	51,46	55,75	0	0	0	0	0	0	55,40	15,00
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	53,77	56,73	41,17	44,60	0	0	0	0	0	0	44,32	12,00
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	49,0949	61,72	71,07	67,34	67,16	40,30	24,18	14,51	8,70	5,22	3,13	28,47
GS_i	mm	Per. 2.20	102,86	118,44	112,24	111,94	67,16	40,30	24,18	14,51	8,70	5,22	47,45	40,47
ΔS_i	mm	Per. 2.19	21,0	15,6	-6,2	-0,3	-44,8	-26,9	-16,1	-9,7	-5,8	-3,5	42,2	-7,0
BF	mm	Per. 2.17	46,17	55,33	57,67	56,04	44,78	26,87	16,12	9,67	5,80	3,48	13,17	21,98
DR	mm	Per. 2.18	100,81	106,36	77,19	83,62	0	0	0	0	0	0	83,10	22,50
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	146,98	161,69	134,86	139,66	44,78	26,87	16,12	9,67	5,80	3,48	96,27	44,48
F	km ²	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m ³ /s	Per. 2.23	0,057	0,070	0,052	0,056	0,017	0,011	0,006	0,004	0,002	0,001	0,037	0,018

Lampiran 17. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2016

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
R	-	Tab. 4.7	124	293	222	166	204	146	51	72	207	113	298	374
n_R	-	Tab. 4.8	23	28	23	28	25	15	13	13	25	16	30	23
n_d	-	Kalender	31	29	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	113,96	91,73	108,44	101,82	102,88	94,17	100,91	107,49	121,44	106,08	109,15	100,23
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-2,85	-4,59	-2,71	-5,09	-3,60	1,41	2,52	2,69	-4,25	1,06	-6,55	-2,51
Eta	mm	Per. 2.12	116,81	96,32	111,15	106,91	106,48	92,76	98,39	104,80	125,69	105,02	115,70	102,74
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	7,2	196,7	110,8	59,1	97,5	53,2	-47,4	-32,8	81,3	8,0	182,3	271,3
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	183,20	200	200	200	200	200	152,61	119,81	200	200	200	200
WS	mm	Per. 2.16	7,19	196,68	110,85	59,09	97,52	53,24	0	0	81,31	7,98	182,30	271,26
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 17. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2016 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	2,88	78,67	44,34	23,64	39,01	21,30	0	0	32,52	3,19	72,92	108,51
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	2,30	62,94	35,47	18,91	31,21	17,04	0	0	26,02	2,55	58,34	86,80
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	24,2843	15,95	47,33	49,68	41,16	43,42	36,27	21,76	13,06	23,45	15,60	44,36
GS_i	mm	Per. 2.20	26,59	78,89	82,81	68,59	72,36	60,45	36,27	21,76	39,08	26,00	73,94	131,17
ΔS_i	mm	Per. 2.19	-13,9	52,3	3,9	-14,2	3,8	-11,9	-24,2	-14,5	17,3	-13,1	47,9	57,2
BF	mm	Per. 2.17	16,76	26,37	40,42	37,85	35,24	33,20	24,18	14,51	15,21	16,27	24,98	51,28
DR	mm	Per. 2.18	4,31	118,01	66,51	35,45	58,51	31,95	0	0	48,79	4,79	109,38	162,76
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	21,08	144,38	106,93	73,30	93,75	65,15	24,18	14,51	64,00	21,06	134,36	214,03
F	km ²	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m ³ /s	Per. 2.23	0,008	0,060	0,042	0,029	0,036	0,026	0,009	0,006	0,025	0,008	0,052	0,086

Lampiran 18. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2017

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
R	-	Tab. 4.7	275	260	136	175	110	46	60	57	52	322	198	236
n_R	-	Tab. 4.8	27	23	17	20	13	6	7	6	5	30	21	27
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	94,90	92,64	109,81	106,11	101,58	92,71	99,63	118,05	130,66	124,28	105,24	100,35
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-4,27	-2,32	0,55	-1,06	2,54	5,56	5,48	7,08	8,49	-7,46	-1,58	-4,52
Et_a	mm	Per. 2.12	99,17	94,96	109,26	107,17	99,04	87,15	94,15	110,97	122,17	131,74	106,82	104,87
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	175,8	165,0	26,7	67,8	11,0	-41,1	-34,2	-54,0	-70,2	190,3	91,2	131,1
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	200	158,85	124,70	70,74	0,57	190,83	200	200
WS	mm	Per. 2.16	175,83	165,04	26,74	67,83	10,96	0	0	0	0	190,26	91,18	131,13
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 18. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2017 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	56,27	52,81	8,56	21,71	3,51	0	0	0	0	60,88	29,18	41,96
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	78,6999	80,98	80,28	53,30	45,00	29,11	17,46	10,48	6,29	3,77	38,79	40,78
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	134,97	133,79	88,83	75,00	48,51	29,11	17,46	10,48	6,29	64,66	67,97	82,75
GS_i	mm	Per. 2.20	3,8	-1,2	-45,0	-13,8	-26,5	-19,4	-11,6	-7,0	-4,2	58,4	3,3	14,8
ΔS_i	mm	Per. 2.19	66,53	67,19	55,66	40,96	30,88	19,40	11,64	6,99	4,19	17,74	33,16	37,68
BF	mm	Per. 2.17	105,50	99,03	16,04	40,70	6,58	0	0	0	0	114,16	54,71	78,68
DR	mm	Per. 2.18	70,33	66,02	10,70	27,13	4,38	0	0	0	0	76,11	36,47	52,45
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	172,03	166,22	71,70	81,66	37,45	19,40	11,64	6,99	4,19	131,89	87,87	116,36
F	km^2	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m^3/s	Per. 2.23	0,067	0,071	0,028	0,033	0,015	0,008	0,005	0,003	0,002	0,053	0,034	0,047

Lampiran 19. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2018

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
R	-	Tab. 4.7	231	348	204	203	73	53	0	0	77	74	468	578
n_R	-	Tab. 4.8	17	26	24	22	12	6	0	0	11	5	19	17
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	102,21	87,18	111,03	108,27	106,80	96,89	109,72	118,13	133,71	138,47	116,48	106,37
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	0,51	-3,49	-3,33	-2,17	3,20	5,81	9,87	10,63	4,68	9,00	-0,58	0,53
Eta	mm	Per. 2.12	101,70	90,67	114,36	110,44	103,60	91,08	99,85	107,50	129,03	129,47	117,06	105,84
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	129,3	257,3	89,6	92,6	-30,6	-38,1	-99,8	-107,5	-52,0	-55,5	350,9	472,2
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	169,40	131,33	31,48	0	0	0	200	200
WS	mm	Per. 2.16	129,30	257,33	89,64	92,56	0	0	0	0	0	0,00	350,94	472,16
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 19. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2018 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	51,72	102,93	35,86	37,03	0	0	0	0	0	0	140,38	188,86
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	41,38	82,35	28,68	29,62	0	0	0	0	0	0	112,30	151,09
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	49,6476	54,61	82,18	66,52	57,68	34,61	20,77	12,46	7,48	4,49	2,69	68,99
GS_i	mm	Per. 2.20	91,02	136,96	110,86	96,14	57,68	34,61	20,77	12,46	7,48	4,49	114,99	220,09
ΔS_i	mm	Per. 2.19	8,3	45,9	-26,1	-14,7	-38,5	-23,1	-13,8	-8,3	-5,0	-3,0	110,5	105,1
BF	mm	Per. 2.17	43,44	57,00	61,96	51,75	38,45	23,07	13,84	8,31	4,98	2,99	29,87	83,77
DR	mm	Per. 2.18	77,58	154,40	53,78	55,54	0	0	0	0	0	0	210,56	283,30
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	121,02	211,40	115,74	107,29	38,45	23,07	13,84	8,31	4,98	2,99	240,43	367,07
F	km^2	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m^3/s	Per. 2.23	0,047	0,091	0,045	0,043	0,015	0,009	0,005	0,003	0,002	0,001	0,093	0,147

Lampiran 20. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2019

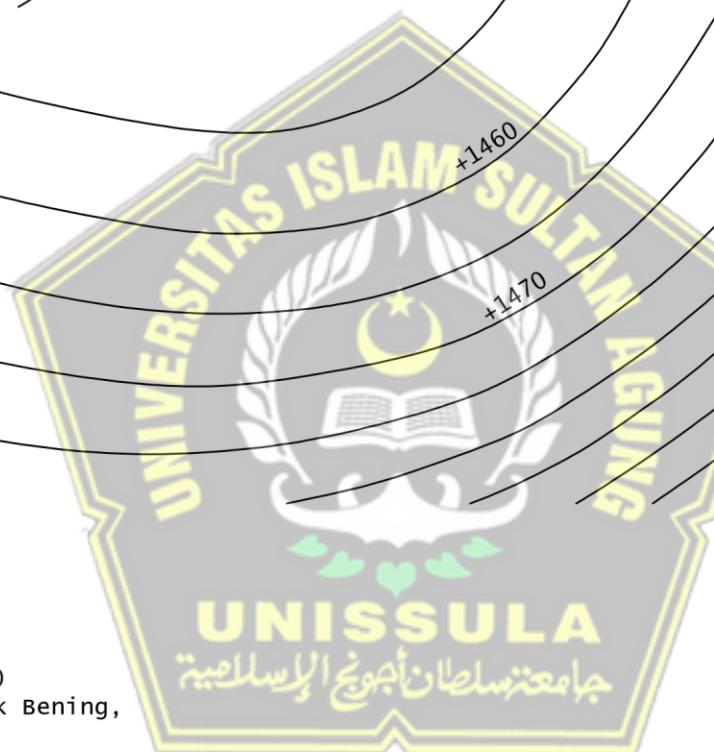
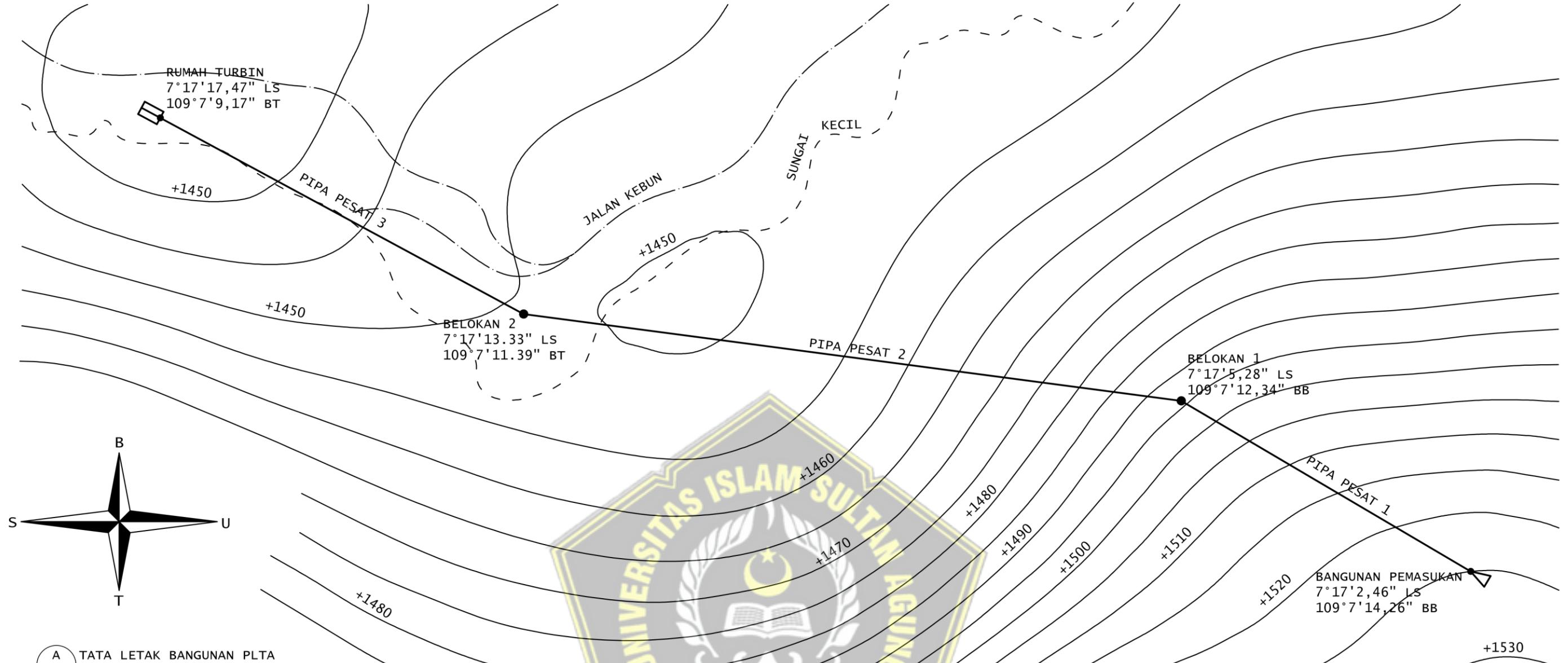
Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
i	-	-	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132
R	-	Tab. 4.7	310	275	262	128	72	0	0	0	0	16	107	254
n_R	-	Tab. 4.8	26	26	28	17	19	0	0	0	0	4	16	26
n_d	-	Kalender	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30
Evapotranspirasi														
Et_o	mm	Tab. 4.5	105,35	107,57	102,49	112,08	109,09	103,76	112,44	120,64	139,32	145,57	138,97	114,79
m	%	Asumsi	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔEt	mm	Per. 2.13	-4,21	-4,30	-5,12	0,56	-0,55	9,34	10,12	10,86	12,54	10,19	1,39	-4,59
Et_a	mm	Per. 2.12	109,56	111,87	107,61	111,52	109,64	94,42	102,32	109,78	126,78	135,38	137,58	119,38
Surplus Air														
ER	mm	Per. 2.14	200,4	163,1	154,4	16,5	-37,6	-94,4	-102,3	-109,8	-126,8	-119,4	-30,6	134,6
SMC	mm	Asumsi	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SMS	mm	Per. 2.15	200	200	200	200	162,36	67,94	0	0	0	0	0	134,62
WS	mm	Per. 2.16	200,44	163,13	154,39	16,48	0	0	0	0	0	0	0	134,62
Aliran Dasar dan Limpasan Langsung														
IF	-	Asumsi	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Lampiran 20. Simulasi Debit Rerata Sungai Tuk Bening Tahun 2019 (Lanjutan)

Variabel	Satuan	Sumber	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agu.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
RC	-	Asumsi	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
I	mm	Per. 2.21	80,17	65,25	61,75	6,59	0	0	0	0	0	0	0	53,85
$0,5 \times (1 + RC) \times I$	mm	Per. 2.20	64,14	52,20	49,40	5,27	0	0	0	0	0	0	0	43,08
$RC \times GS_{i-1}$	mm	Per. 2.20	132,052	117,71	101,95	90,81	57,65	34,59	20,75	12,45	7,47	4,48	2,69	1,61
GS_i	mm	Per. 2.20	196,19	169,92	151,35	96,09	57,65	34,59	20,75	12,45	7,47	4,48	2,69	44,69
ΔS_i	mm	Per. 2.19	-23,9	-26,3	-18,6	-55,3	-38,4	-23,1	-13,8	-8,3	-5,0	-3,0	-1,8	42,0
BF	mm	Per. 2.17	104,07	91,53	80,32	61,86	38,43	23,06	13,84	8,30	4,98	2,99	1,79	11,85
DR	mm	Per. 2.18	120,26	97,88	92,63	9,89	0	0	0	0	0	0	0	80,77
<hr/>														
Debit Rerata Simulasi														
$BF + DR$	mm	Per. 2.23	224,33	189,40	172,95	71,75	38,43	23,06	13,84	8,30	4,98	2,99	1,79	92,62
F	km ²	Gam. 4.2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Q_{ave}	m ³ /s	Per. 2.23	0,087	0,081	0,067	0,029	0,015	0,009	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001	0,037



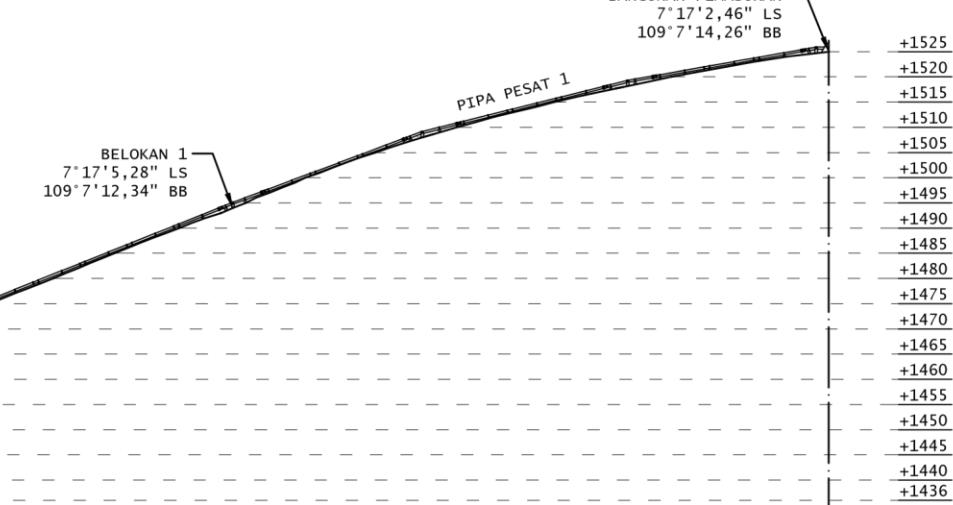
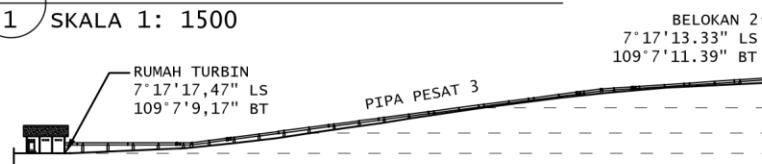
Lampiran 21
Gambar Rencana PLTA Kaligua



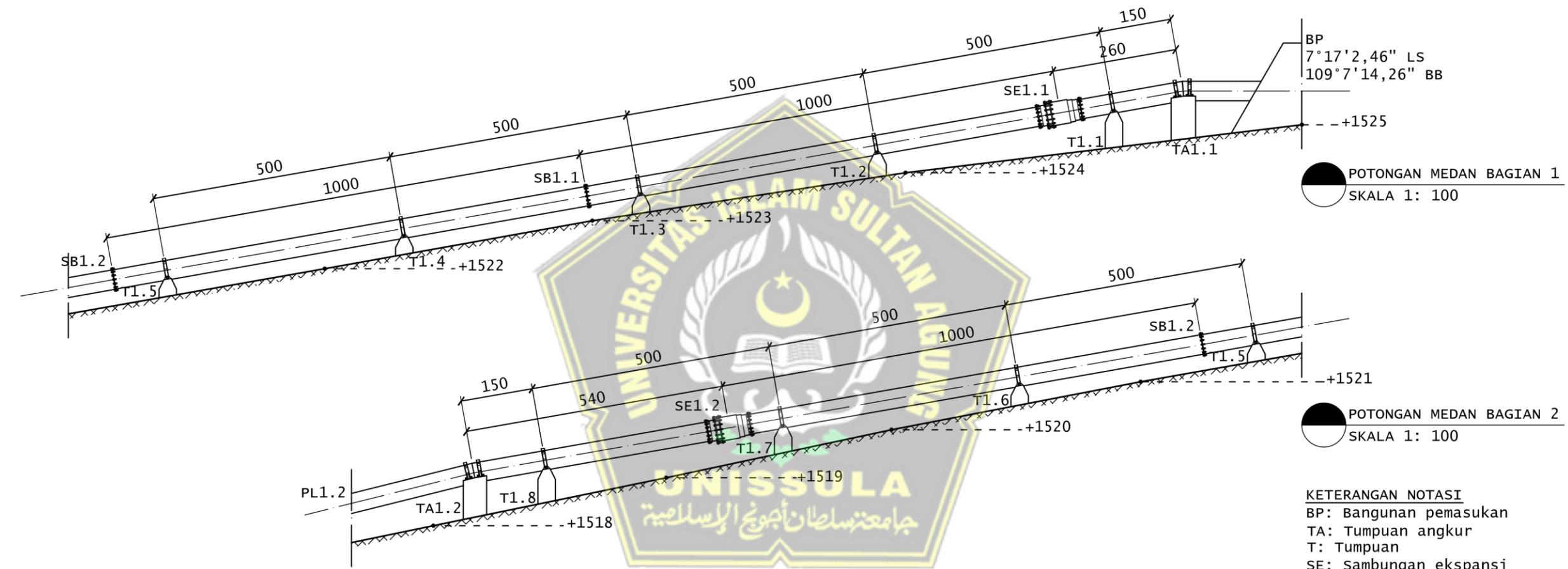
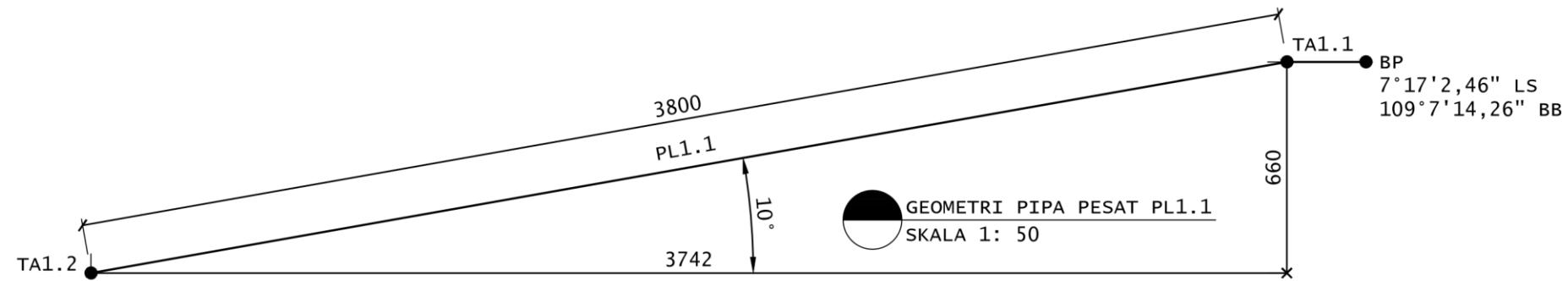
KETERANGAN

- Elevasi kontur dalam satuan meter dari permukaan laut (mdpl)
- Lokasi bangunan pengambilan berada di dekat Kolam Wisata Tuk Bening, koordinat 7°16'26,38" LS - 109°7'23,53" BT

B
1
POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT
SKALA 1: 1500



	TUGAS AKHIR ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES	DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH: MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN NIM 30201900252 PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG 2021	DOSEN PEMBIMBING: ARI SENTANI, S.T., M.Sc. NIK 210214086 Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D. NIK 210296020	GAMBAR: A. TATA LETAK BANGUNAN PLTA; B. POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT	LEMBAR: 1
	GAMBAR RENCANA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR			SKALA: A. 1: 1500; B. 1: 1500	JUMLAH LEMBAR: 14



A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL1.1
2 SKALA 1: 100



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:

ARI SENTANI, S.T., M.Sc.
NIK 210214086

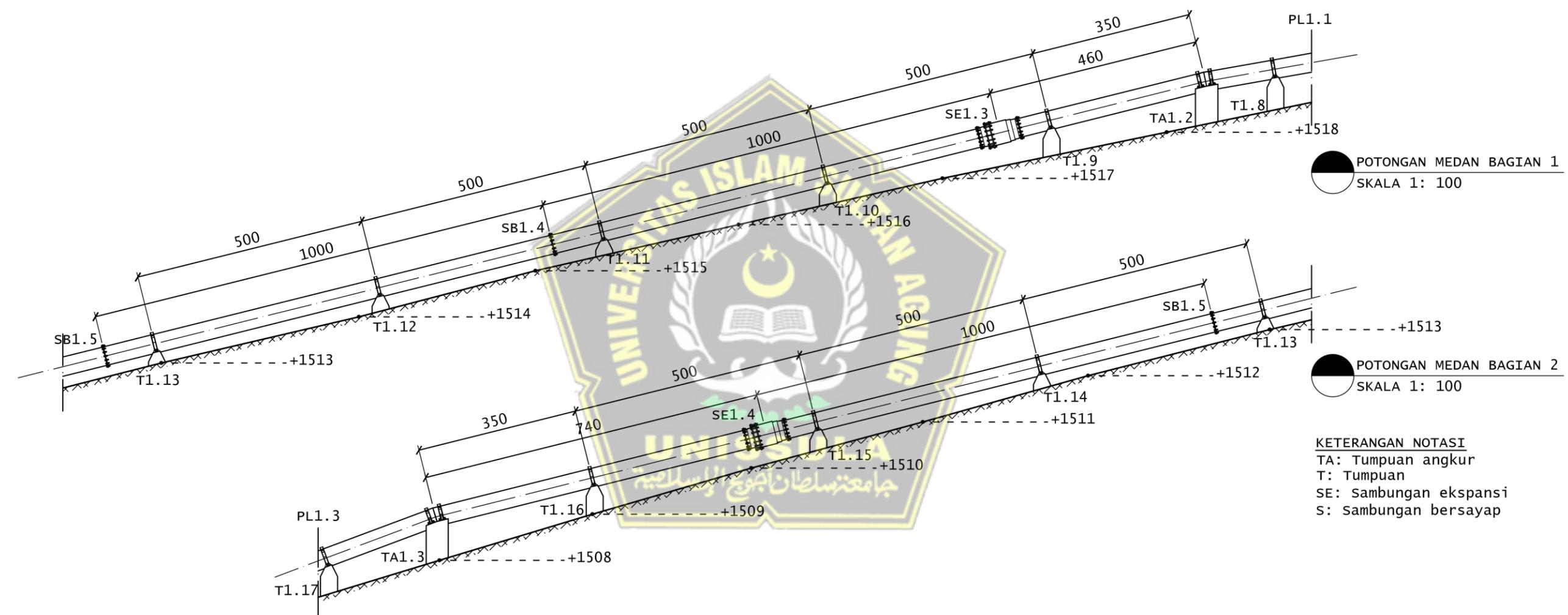
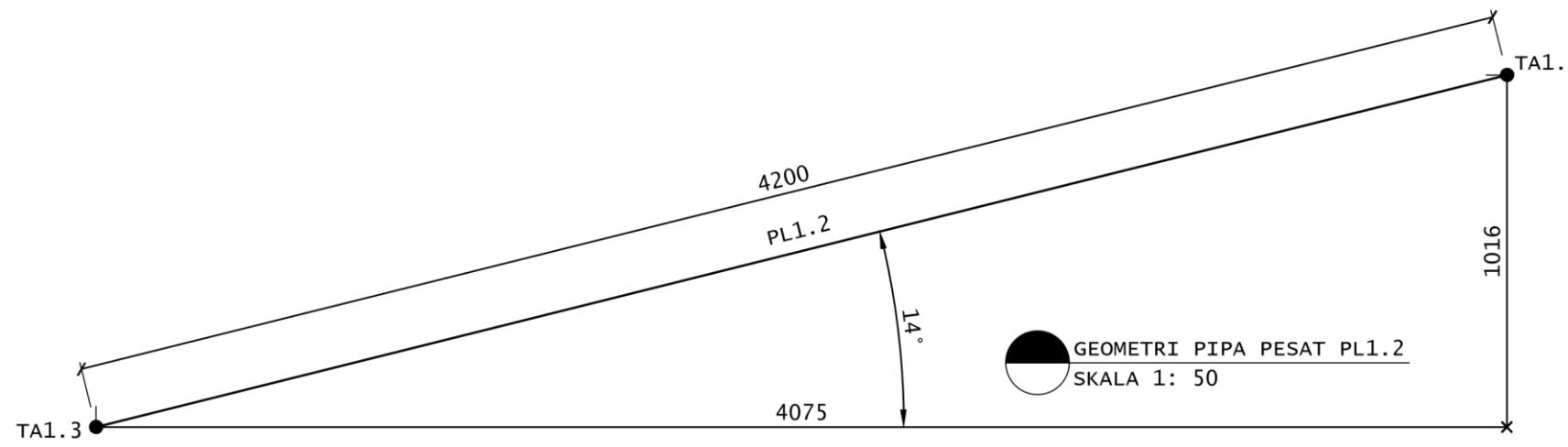
Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:
A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG
PIPA PESAT PL1.1

LEMBAR:
2

SKALA:
A. 1: 100

JUMLAH LEMBAR:
14



A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL1.2
3 SKALA 1: 100

0 100 250 450 700



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAHKMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:

ARI SENTANI, S.T., M.Sc.
NIK 210214086

Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:

A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG
PIPA PESAT PL1.2

LEMBAR:

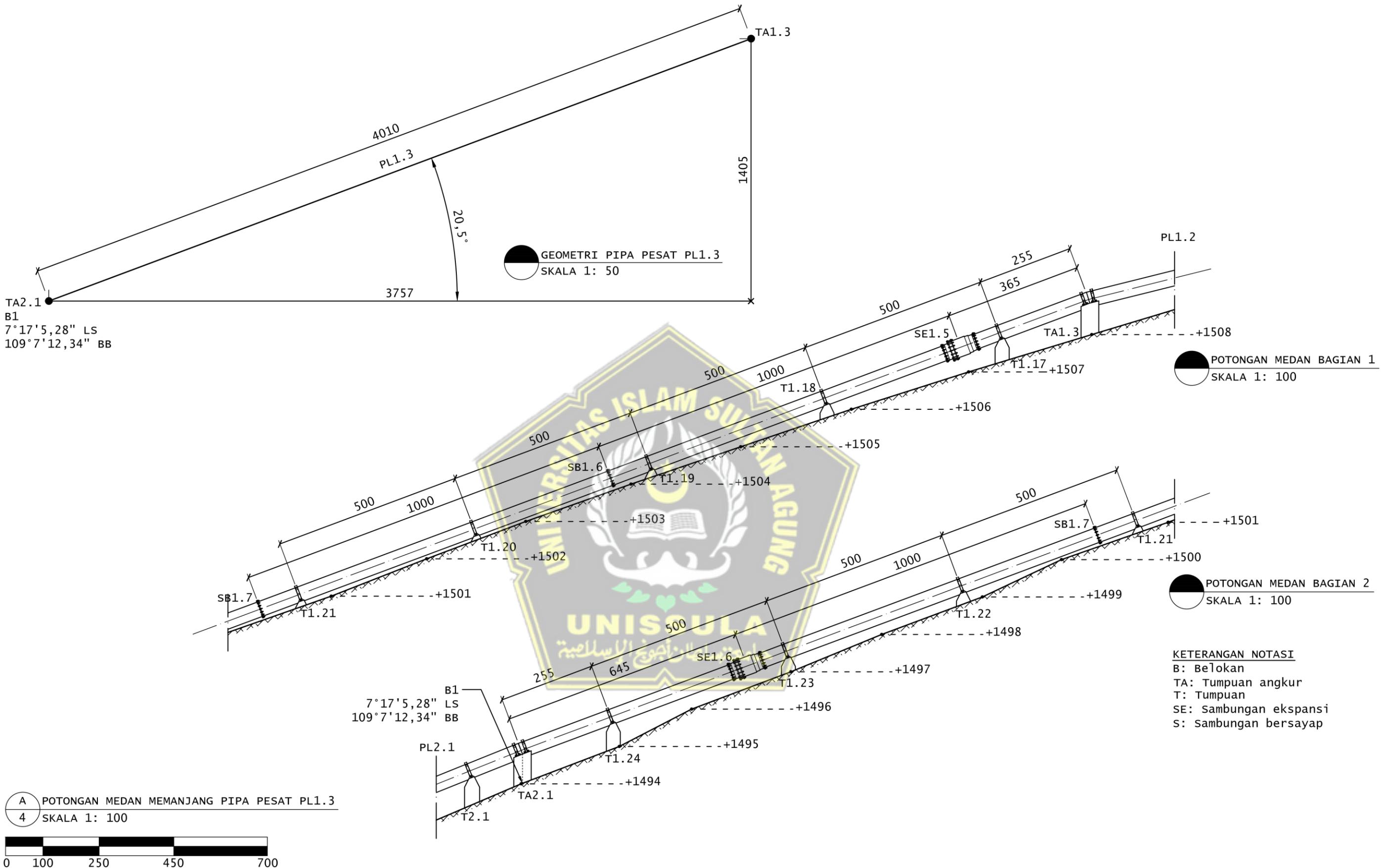
3

SKALA:

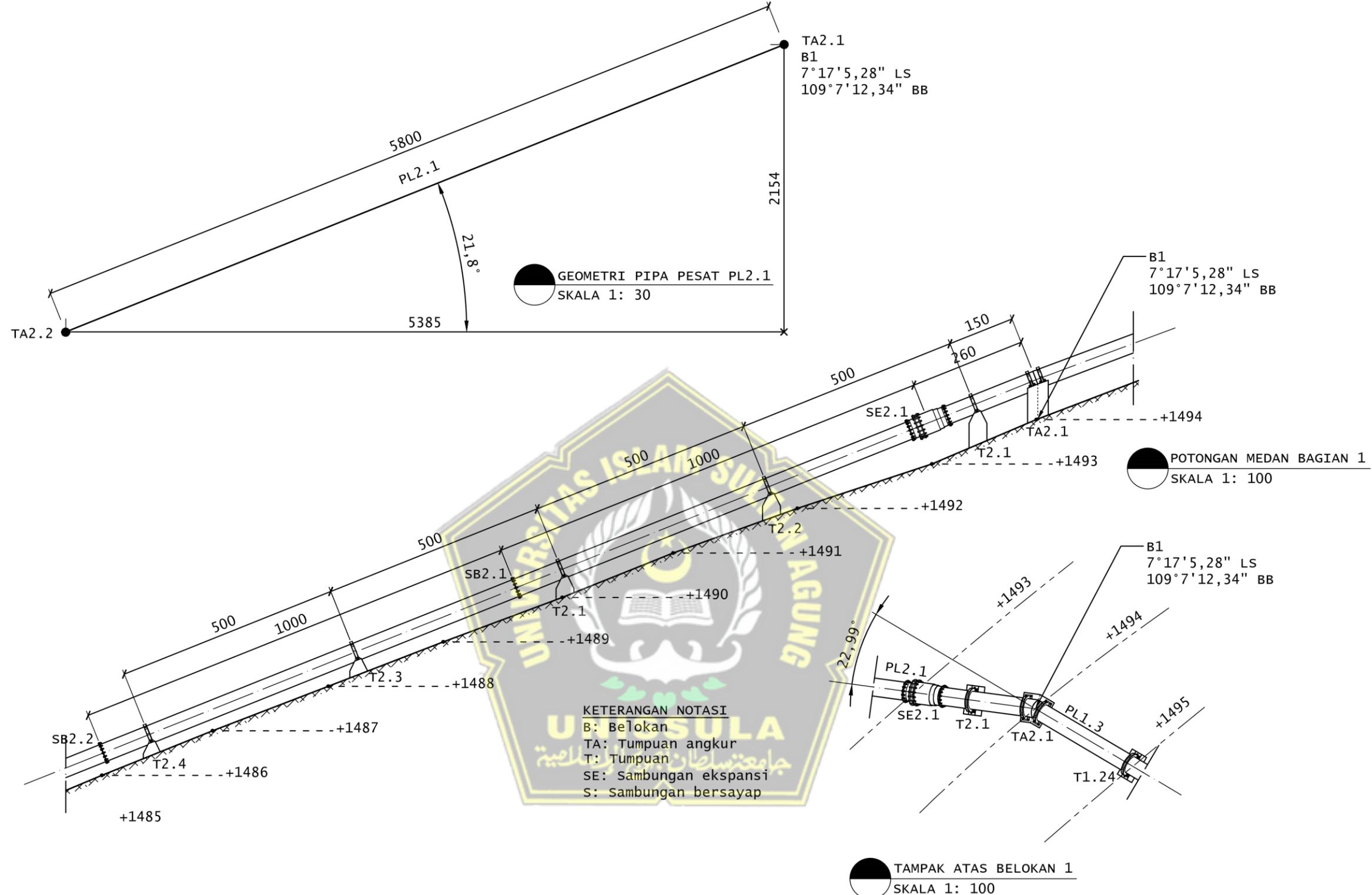
A. 1: 100

JUMLAH LEMBAR:

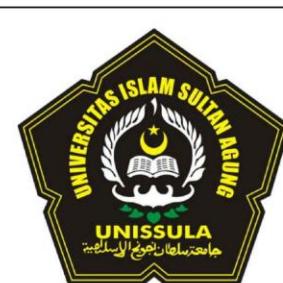
14



	TUGAS AKHIR ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES	DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH: MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN NIM 30201900252 PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG 2021	DOSEN PEMBIMBING: ARI SENTANI, S.T., M.Sc. NIK 210214086 Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D. NIK 210296020	GAMBAR: A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL1.3	LEMBAR: 4
	GAMBAR RENCANA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR			SKALA: A. 1: 100	JUMLAH LEMBAR: 14



A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL2.1
5 SKALA 1: 100



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:

ARI SENTANI, S.T., M.Sc.

NIK 210214086

Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:

A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG
PIPA PESAT PL2.1

LEMBAR:

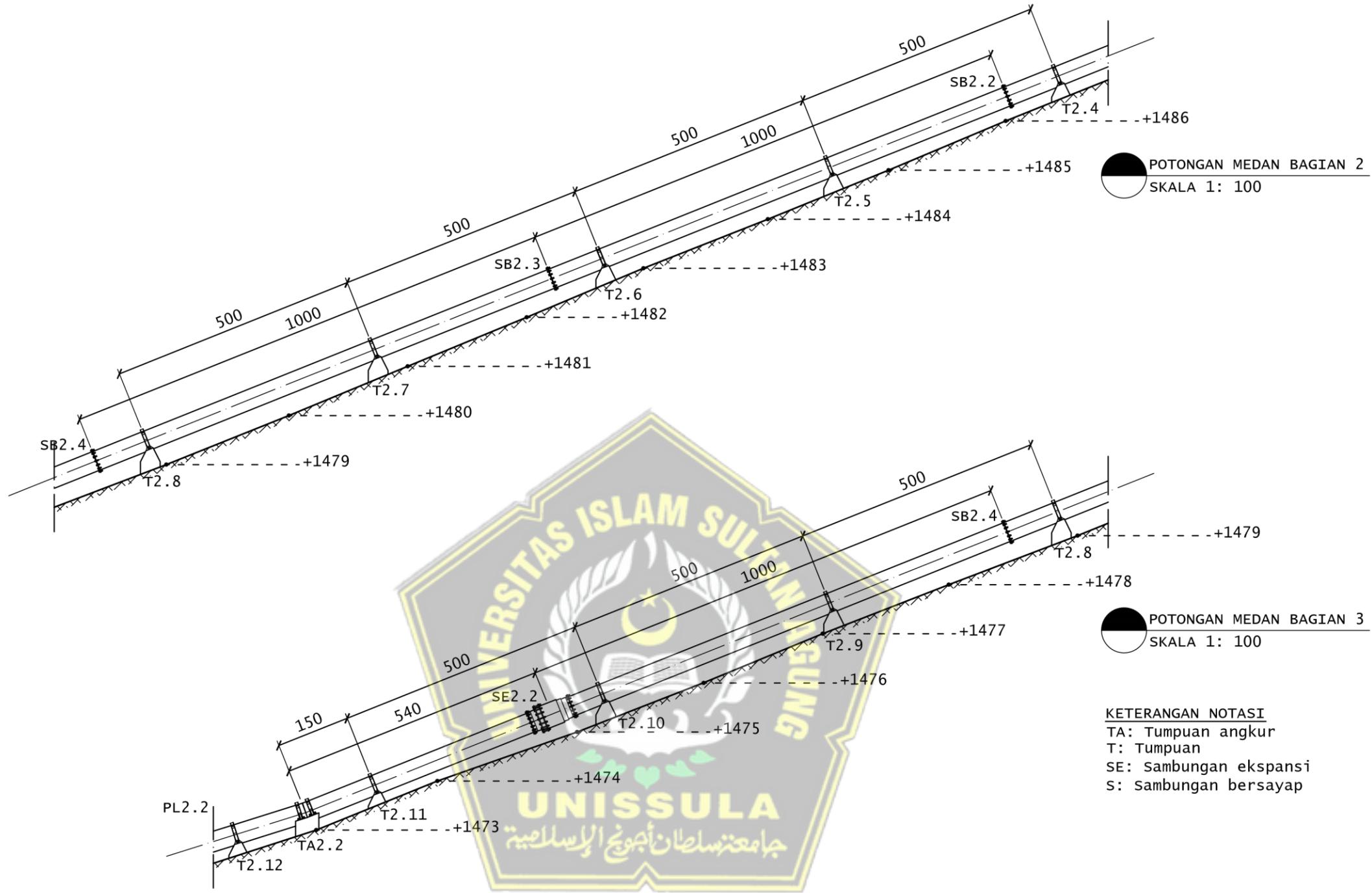
5

SKALA:

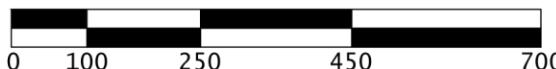
A. 1: 100

JUMLAH LEMBAR:

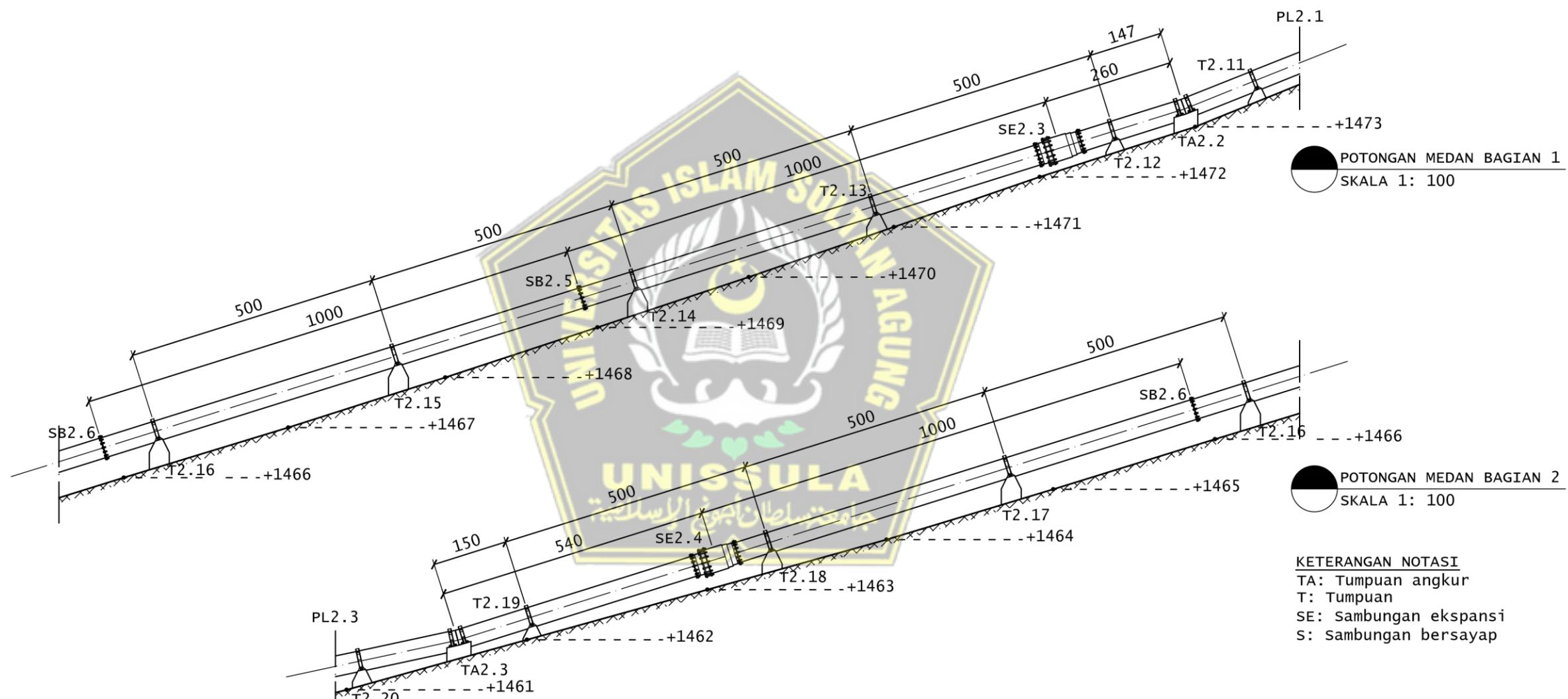
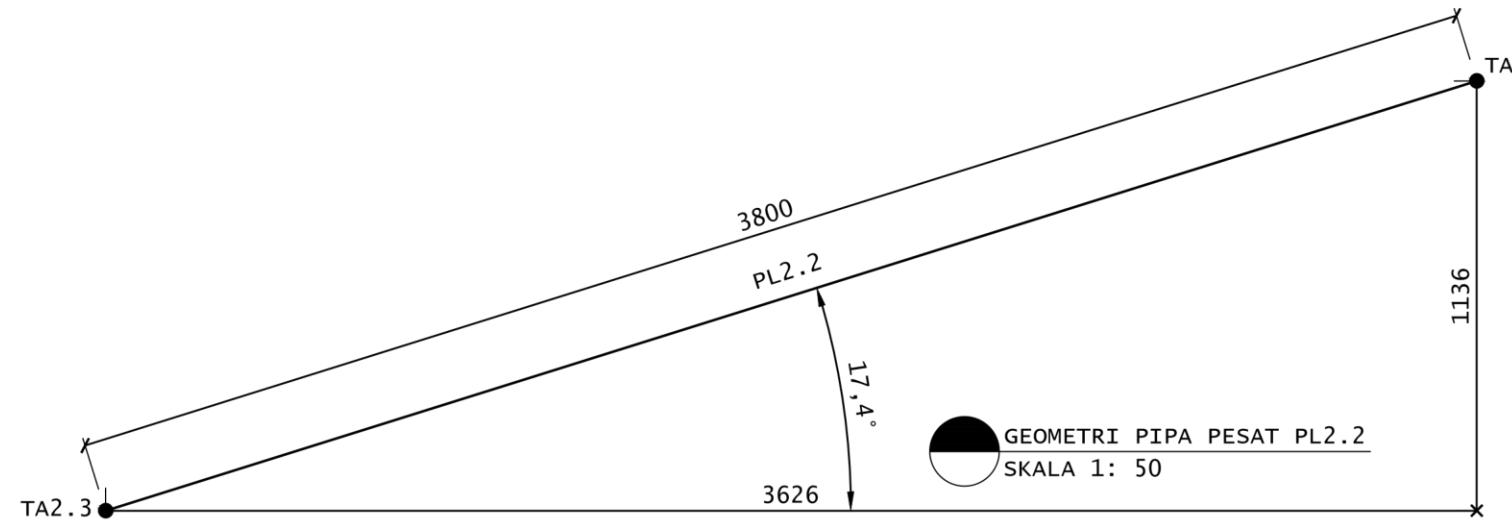
14



A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL2.1 (LANJUTAN)
6 SKALA 1: 100

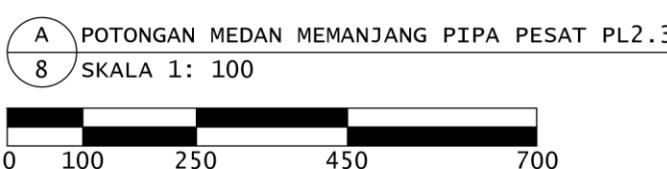
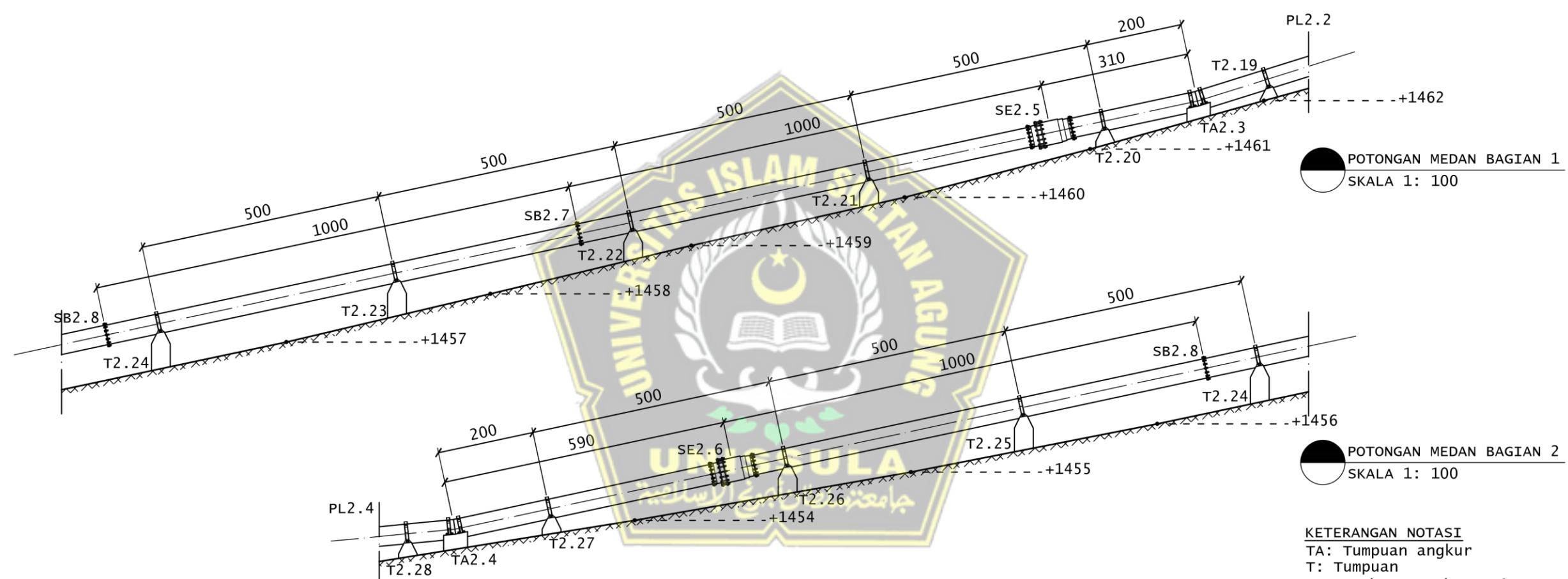
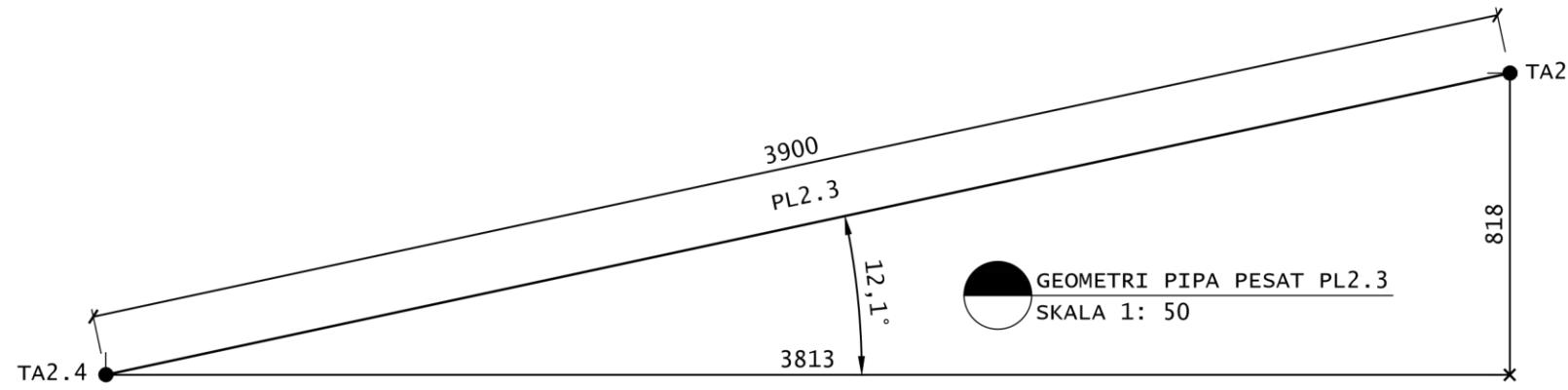


	TUGAS AKHIR ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES	DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH: MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN NIM 30201900252 PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG 2021	DOSEN PEMBIMBING: ARI SENTANI, S.T., M.Sc. NIK 210214086 Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D. NIK 210296020	GAMBAR: A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL2.1 (LANJUTAN)	LEMBAR: 6
	GAMBAR RENCANA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR			SKALA: A. 1: 100	JUMLAH LEMBAR: 14



KETERANGAN NOTASI
 TA: Tumpuan angkur
 T: Tumpuan
 SE: Sambungan ekspansi
 S: Sambungan bersayap

	TUGAS AKHIR ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES	DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH: MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN NIM 30201900252 PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG 2021	DOSEN PEMBIMBING: ARI SENTANI, S.T., M.Sc. NIK 210214086 Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D. NIK 210296020	GAMBAR: A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL2.2	LEMBAR: 7
	GAMBAR RENCANA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR			SKALA: A. 1: 100	JUMLAH LEMBAR: 14



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:

ARI SENTANI, S.T., M.Sc.
NIK 210214086

Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

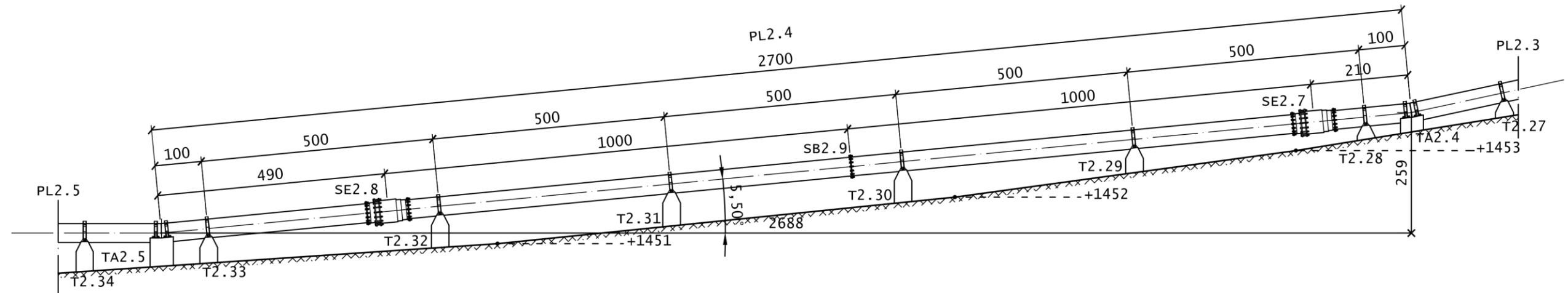
GAMBAR:
A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG
PIPA PESAT PL2.3

SKALA:
A. 1: 100

LEMBAR:

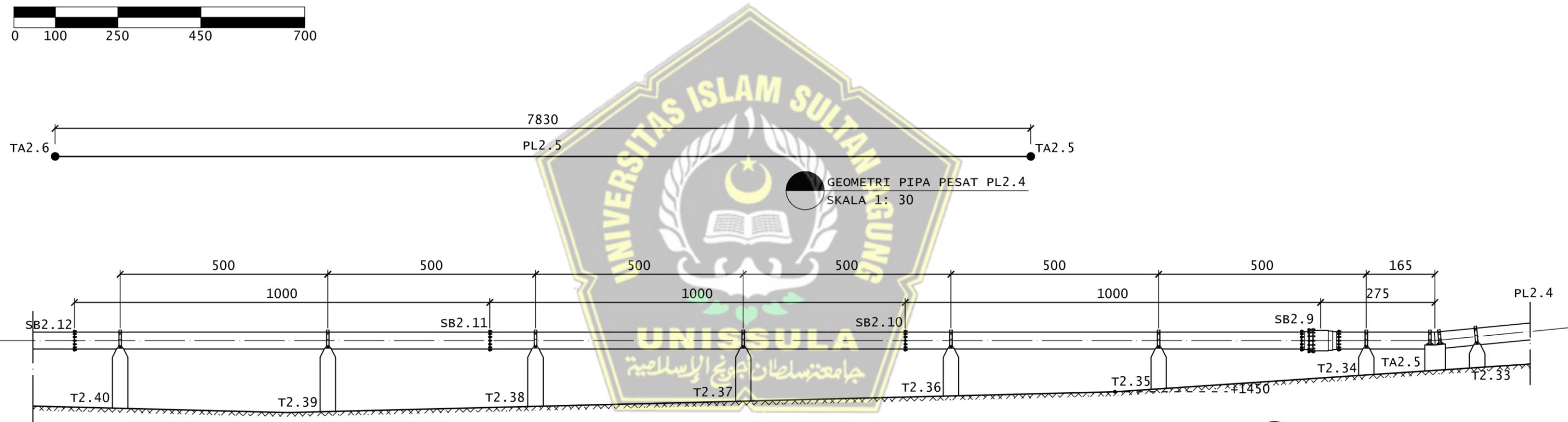
8

JUMLAH LEMBAR:
14



A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL2.4
9 SKALA 1: 100

A horizontal number line representing a range from 0 to 700. The line is divided into five major segments by tick marks at 0, 100, 250, 450, and 700. The segments from 0 to 100, 100 to 250, 250 to 450, and 450 to 700 are shaded black. The segments from 0 to 100 and 100 to 250 are white.



A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL2.5
9 SKALA 1: 100

KETERANGAN NOTASI
TA: Tumpuan angkur
T: Tumpuan
SE: Sambungan ekspansi
S: Sambungan bersayap



TUGAS AKHIR

ANALISIS POTENSI PEMABANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SUNGAI TUK BENTING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DITGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NTM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:
ARI SENTANI, S.T., M.Sc
NTK 210214086

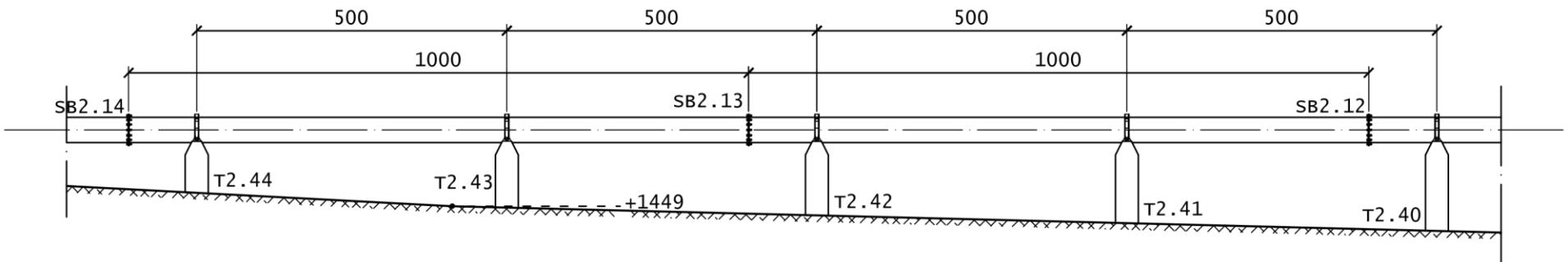
Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D
NIK 210296020

GAMBAR :

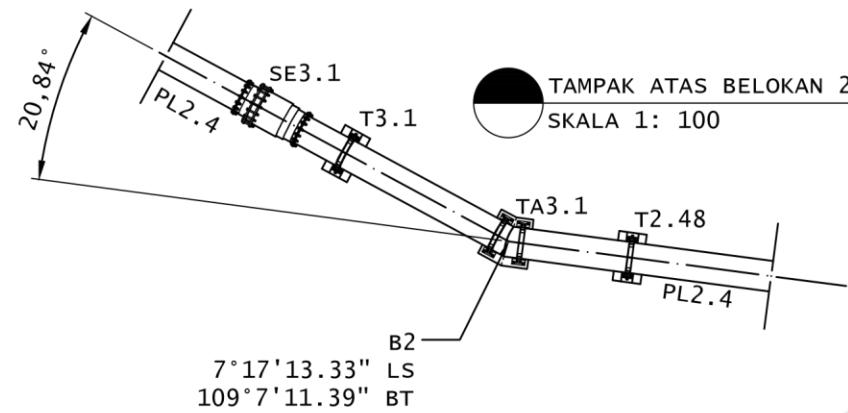
SKALA:

LEMBAR :
9

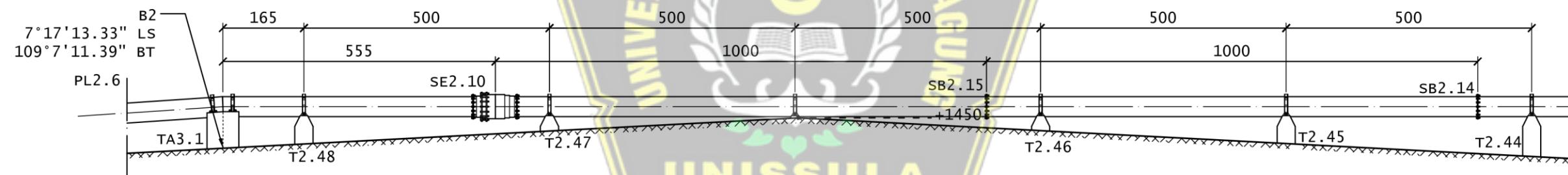
14



POTONGAN MEDAN BAGIAN 2
SKALA 1: 100

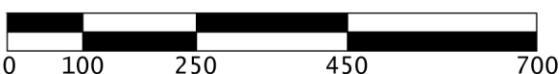


KETERANGAN NOTASI
B: Belokan
TA: Tumpuan angkur
T: Tumpuan
SE: Sambungan ekspansi
S: Sambungan bersayap



POTONGAN MEDAN BAGIAN 3
SKALA 1: 100

A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL2.5 (LANJUTAN)
10 SKALA 1: 100



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:

ARI SENTANI, S.T., M.Sc.

NIK 210214086

Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:

A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG
PIPA PESAT PL2.5 (LANJUTAN)

LEMBAR:

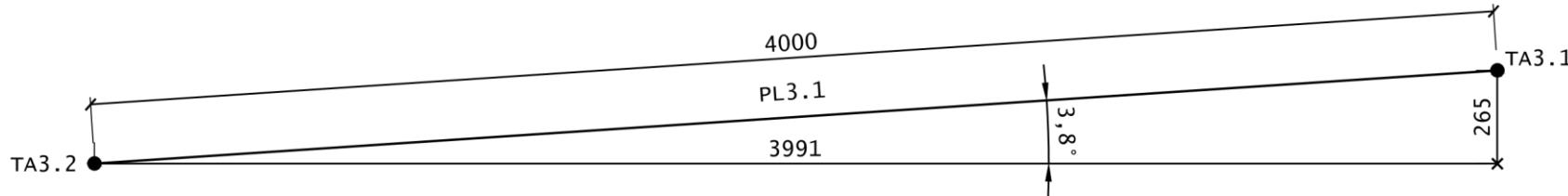
10

SKALA:

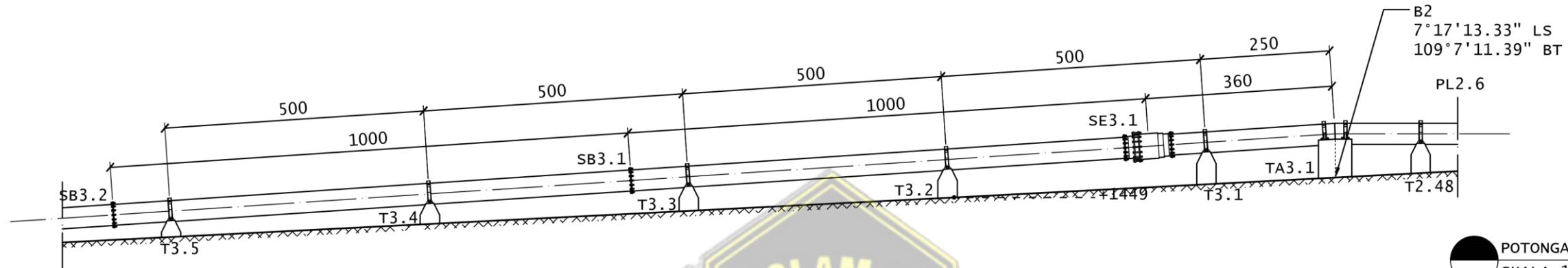
A. 1: 100

JUMLAH LEMBAR:

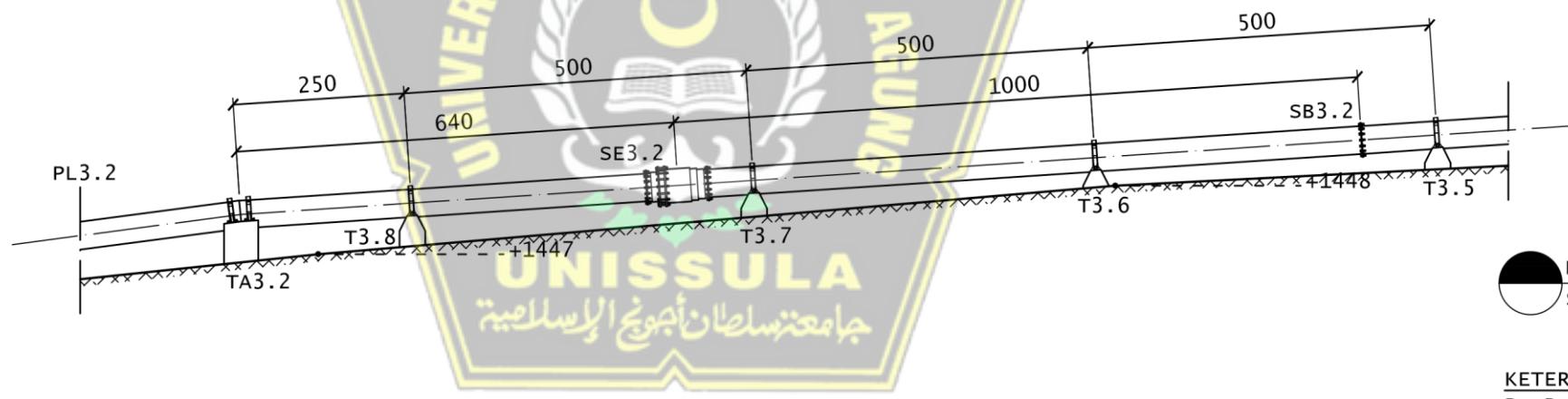
14



GEOMETRI PIPA PESAT PL3.1
SKALA 1: 50



POTONGAN MEDAN BAGIAN 1
SKALA 1: 100



POTONGAN MEDAN BAGIAN 2
SKALA 1: 100

KETERANGAN NOTASI
B: Belokan
TA: Tumpuan angkur
T: Tumpuan
SE: Sambungan ekspansi
S: Sambungan bersayap

A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL3.1
11 SKALA 1: 100



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:

ARI SENTANI, S.T., M.Sc.
NIK 210214086

Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:
A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG
PIPA PESAT PL3.1

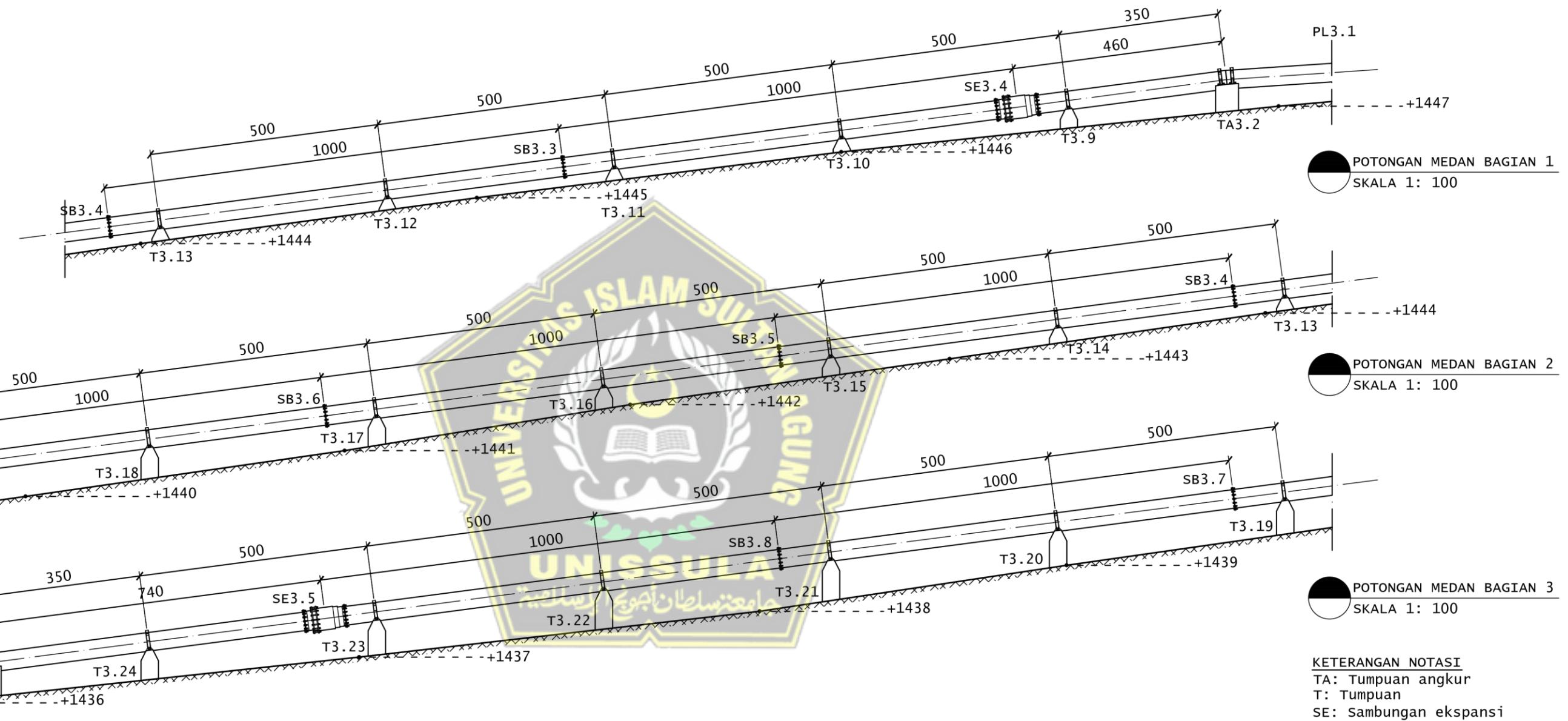
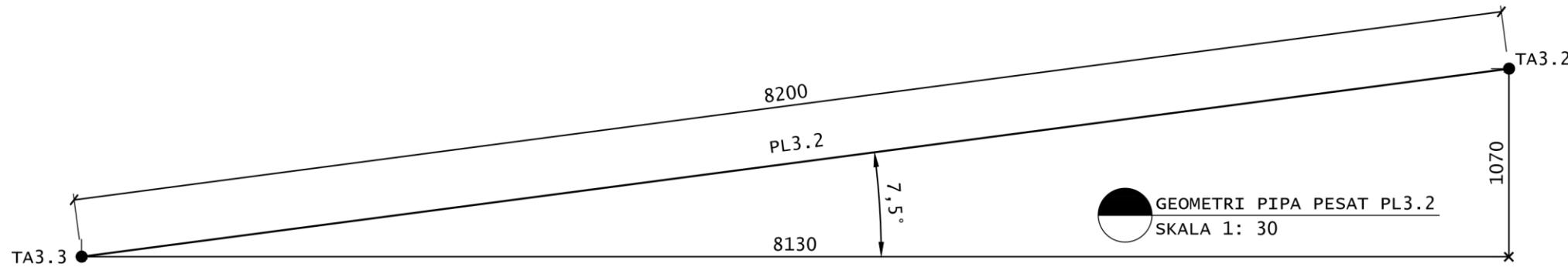
LEMBAR:

11

SKALA:
A. 1: 100

JUMLAH LEMBAR:

14



KETERANGAN NOTASI
TA: Tumpuan angkur
T: Tumpuan
SE: Sambungan ekspansi
S: Sambungan bersayap

A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL3.2
12 SKALA 1: 100



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:
ARI SENTANI, S.T., M.Sc.
NIK 210214086

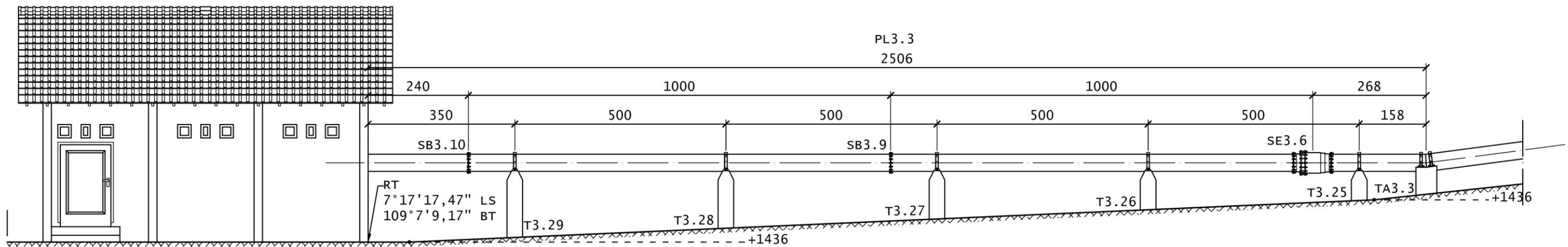
Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:
A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG
PIPA PESAT PL3.2

SKALA:
A. 1: 100

LEMBAR:
12

JUMLAH LEMBAR:
14

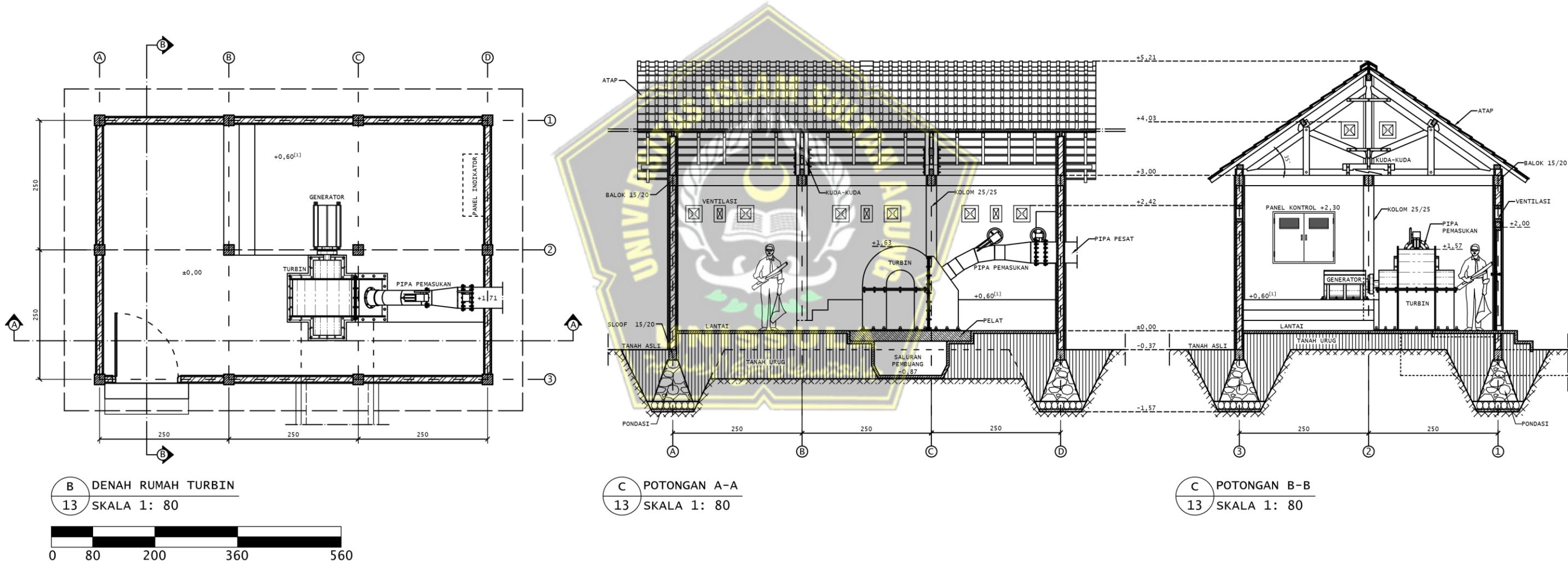


A POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL3.3
13 SKALA 1: 100

0 100 250 450 700

KETERANGAN NOTASI

TA: Tumpuan angkur
T: Tumpuan
SE: Sambungan ekspansi
S: Sambungan bersayap
RT: Rumah turbin



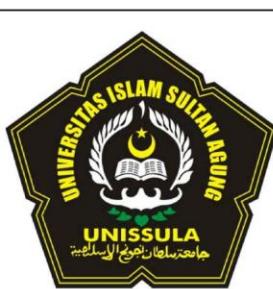
B DENAH RUMAH TURBIN
13 SKALA 1: 80

0 80 200 360 560

KETERANGAN
[1] Elevasi lantai generator disesuaikan terhadap dimensi generator

C POTONGAN A-A
13 SKALA 1: 80

C POTONGAN B-B
13 SKALA 1: 80



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:
ARI SENTANI, S.T., M.Sc.
NIK 210214086

Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:

A. POTONGAN MEDAN MEMANJANG PIPA PESAT PL3.3;
B. DENAH RUMAH TURBIN; C. POTONGAN A-A;
D. POTONGAN B-B

LEMBAR:

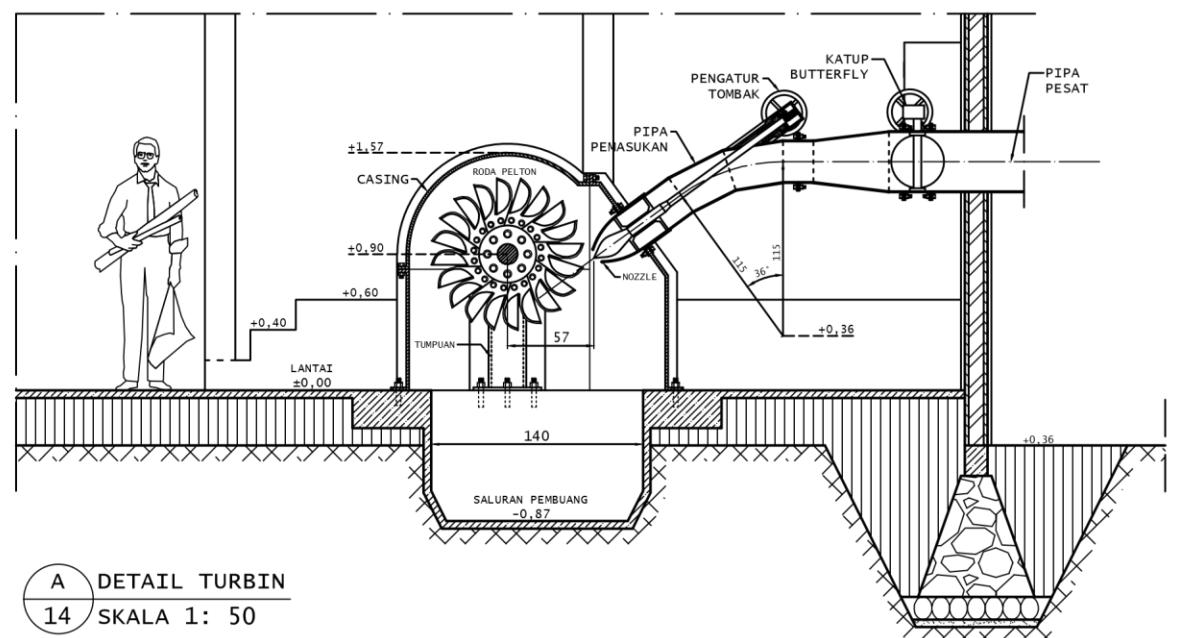
13

SKALA:

A. 1: 100;
B. 1: 80; c. 1: 80;
D. 1: 80

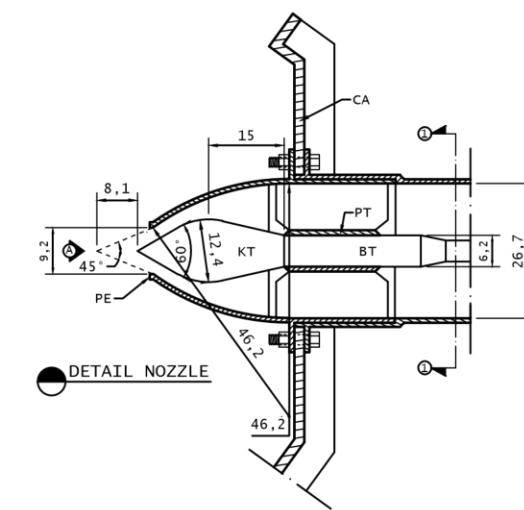
JUMLAH LEMBAR:

14

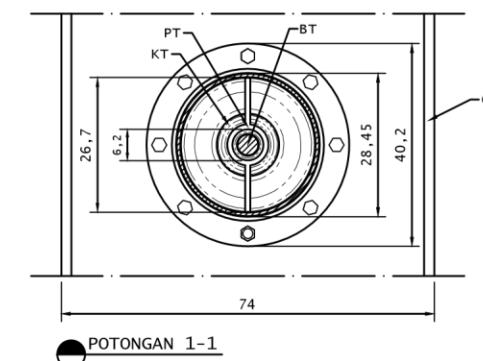
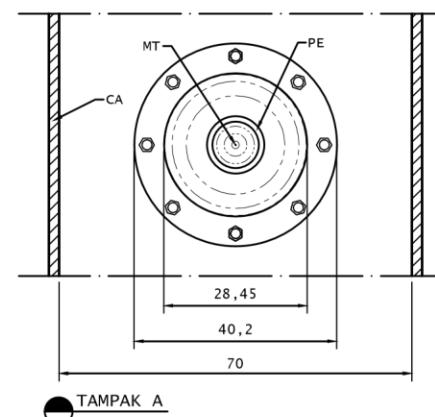


A DETAIL TURBIN
14 SKALA 1: 50

0 50 125 225 350



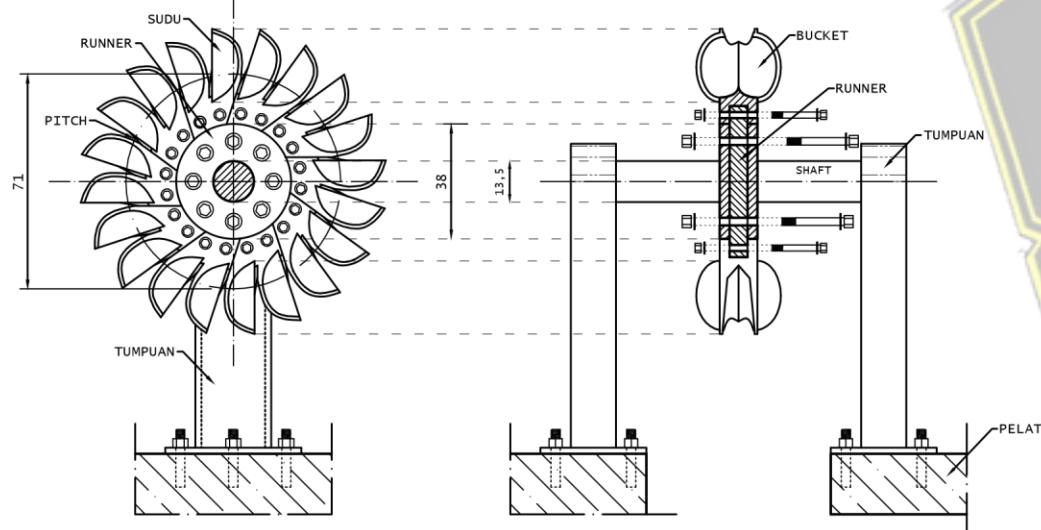
B DETAIL NOZZLE
14 SKALA 1: 15



KETERANGAN PIPA PESAT
ASME B36.10M DN 400 Welded Pipe
ASTM A 285B Carbon Steel
Diameter luar: 406,4 mm
Tebal dinding: 8,74 mm

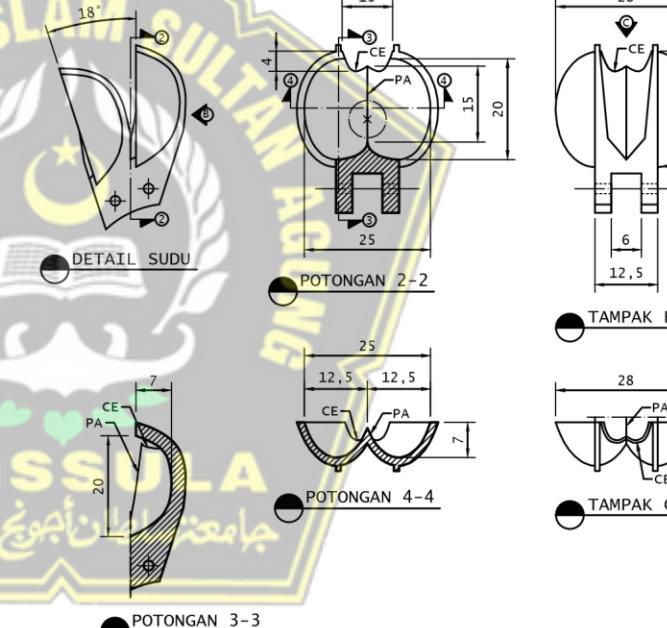
- KETERANGAN UMUM
- Debit aliran: $0,174 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Tinggi energi efektif: 84,84 m
 - Daya listrik teoritis: 144,56 kw
 - Perkiraan efisiensi: 0,846
 - Perkiraan daya listrik terpasang: 122,23 kw
 - Kecapatan aliran jet: $40,19 \text{ m/s}$
 - Diameter aliran jet: 74,9 mm
 - Kecapatan spesifik turbin: 0,022 (22,32 rpm)
 - Kecepatan rotasional turbin: 500 rpm
 - Jumlah kutub generator: 12
 - Frekuensi generator: 50 Hz
 - Diameter pitch: 710 mm
 - Jumlah bucket: 20

KETERANGAN NOTASI
PE: PENGELURARAN
KT: Kepala tombak
CA: Casing
PT: Pengarah tombak
BT: Badan tombak
MT: Mata tombak
CE: Cekukan
PA: Pemisah aliran



C DETAIL RODA PELTON
14 SKALA 1: 25

0 25 62,5 112,5 175



D DETAIL SUDU
14 SKALA 1: 15

0 15 37,5 67,5 150



TUGAS AKHIR
ANALISIS POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR
SUNGAI TUK BENING KEBUN KALIGUA BREBES

GAMBAR RENCANA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

DIRENCANAKAN DAN DIGAMBAR OLEH:

MUHAMMAD MUJIBURRAKHMAN
NIM 30201900252

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021

DOSEN PEMBIMBING:

ARI SENTANI, S.T., M.Sc.

NIK 210214086

Ir. MOH FAIQUN NI'AM, M.T., Ph.D.
NIK 210296020

GAMBAR:

A. DETAIL TURBIN; B. DETAIL NOZZLE;
C. DETAIL RODA PELTON; D. DETAIL BUCKET

LEMBAR:

14

SKALA:

A. 1: 50; B. 1: 15;
C. 1: 25; D. 1: 15

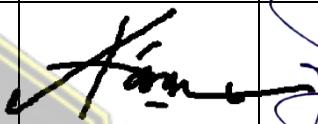
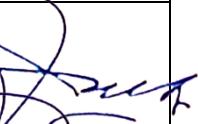
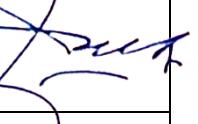
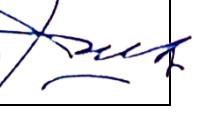
JUMLAH LEMBAR:

14



LEMBAR BIMBINGAN TUGAS AKHIR

Nama : Muhammad Mujiburrahman
NIM : 30201900252
Judul Tugas Akhir : Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes
Dosen Pembimbing I : Ari Sentani, S.T., M.Sc.
Dosen Pembimbing II : Ir. Moh Faiqun Ni'am, M.T., Ph.D.

Tanggal	Keterangan	Tanda Tangan	
		Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
12-04-2021	Acc BAB I		
12-05-2021	Acc BAB II		
28-06-2021	Acc BAB III		
02-07-2021	Acc hasil analisis data dan pendaftaran seminar hasil		
28-07-2021	Acc BAB IV dan V. Persiapan untuk seminar hasil		



YAYASAN BADAN WAKAF SULTAN AGUNG
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG (UNISSULA)

Jl. Raya Kaligawe Km.4 Semarang 50112 Telp. (024) 6583584 (8 Sal) Fax.(024) 6582455
email : informasi@unissula.ac.id web : www.unissula.ac.id

FAKULTAS TEKNIK

Bismillah Membangun Generasi Khaira Ummah

BERITA ACARA SEMINAR TUGAS AKHIR

Nomor : 34 / A.2 / SA - T / VII / 2021

Pada hari ini, Kamis Tanggal 29 Juli 2021 telah dilaksanakan

Seminar Tugas Akhir, dengan peserta sebagai berikut :

1 Nama

Muhammad Mujiburrahman

30201900252

2 Nama

Judul TA

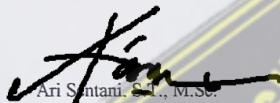
Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes

Dengan Hasil

: Baik dg kerjanya terlampir.

Demikian Berita Acara Seminar Tugas Akhir ini dibuat untuk diketahui dan pergunakan seperlunya.

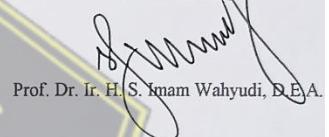
Dosen Pembimbing I


Ari Santani, S.T., M.Sc.

Dosen Pembimbing II


Ir. M. Faziqun Ni'am, M.T., Ph.D.

Dosen Pembanding


Prof. Dr. Ir. H. S. Imam Wahyudi, D.E.A.

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil


M. Rusli Ahyar, S.T., M.Eng.

UNISSULA
جامعة سلطان أوجونج الإسلامية