

PERPUSTAKAAN FTSP UII

HADIAN/BELEI

TGL. TERIMA : 10 September 2005

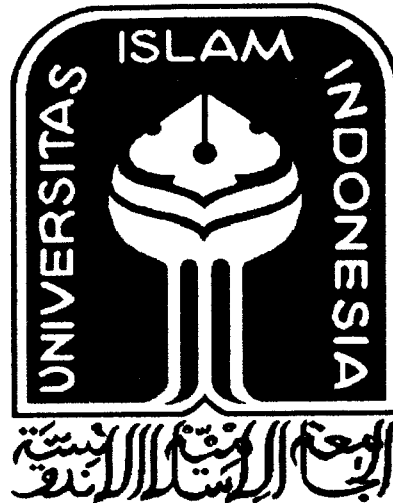
NO. JUDUL : 001091

NO. INV. : 120001631001

NO. INDUK. :

TUGAS AKHIR

**SIMULASI PEMBANGKITAN LISTRIK TENAGA PASANG SURUT
SISTEM DAUR GANDA DENGAN KOLAM TUNGGAL
(STUDI KASUS PULAU SUMATRA)**



Disusun oleh:

SUPRIYONO

00 511 331

YOSEPH VIRTANTO

00 511 340

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
JOGJAKARTA**

2005

TUGAS AKHIR

SIMULASI PEMBANGKITAN LISTRIK TENAGA PASANG SURUT SISTEM DAUR GANDA DENGAN KOLAM TUNGGAL (STUDI KASUS PULAU SUMATRA)

“THE SIMULATION OF TIDAL ELECTRICAL POWER GENERATION DUAL CYCLE SYSTEM WITH SINGLE POOL FORMATION (CASE STUDY OF SUMATRA ISLAND)”

*Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata 1
(S1) pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
Jogjakarta*

Disusun oleh:

SUPRIYONO	00 511 331
YOSEPH VIRTANTO	00 511 340

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
JOGJAKARTA**

2005

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**SIMULASI PEMBANGKITAN LISTRIK TENAGA PASANG SURUT
SISTEM DAUR GANDA DENGAN KOLAM TUNGGAL
(STUDI KASUS PULAU SUMATRA)**

***“THE SIMULATION OF TIDAL ELECTRICAL POWER GENERATION
DUAL CYCLE SYSTEM WITH SINGLE POOL FORMATION
(CASE STUDY OF SUMATRA ISLAND)”***

Disusun oleh:

SUPRIYONO

00 511 331

YOSEPH VIRTANTO

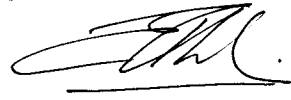
00 511 340

Telah diperiksa dan disetujui oleh,

**DR. Ir. Ruzardi, MS
Dosen Pembimbing I**

Tgl.

**Ir. Endang Tantrawati, MT
Dosen Pembimbing II**



Tgl. 7 - 9 - 2005

KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Wr. Wb.

Alkhamdulillahirobbil'alamiin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala taufiq, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga penyusun berhasil menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.

Tugas Akhir dengan judul "*Simulasi Pembangkitan Listrik Tenaga Pasang Surut Sistem Daur Ganda Dengan Kolam Tunggal*" merupakan penelitian yang membahas potensi energi listrik dari proses pasang surut air laut.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat menempuh jenjang strata satu (S-1) pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Jogjakarta.

Terselesaikannya Tugas Akhir ini, penyusun banyak memperoleh saran, nasehat, gagasan, dorongan serta bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini perkenankanlah penyusun menghaturkan terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. H. Ruzardi, MS, selaku Dosen Pembimbing satu Tugas Akhir yang telah banyak memberikan masukan, kritikan, bimbingan dan solusi,
2. Ir. Endang Tantrawati, M.T, selaku Dosen Pembimbing dua Tugas Akhir yang telah banyak membantu memberikan saran, masukan dan arahan,
3. Orangtua, kakak, adik, dan seluruh anggota keluarga yang dengan tulus ikhlas mendoakan dan memberikan semangat, dorongan moral maupun materi selama menempuh pendidikan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini,

4. Semua pihak yang telah banyak membantu terselesaikannya Tugas Akhir ini dengan segala keikhlasan moral maupun materi dan tidak bisa penyusun sebutkan satu persatu, penyusun mendoakan semoga amal kebbaikannya mendapat balasan yang sepadan.

Penyusun menyadari bahwa penelitian yang sekaligus Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dan masih banyak kekurangan yang dikarenakan keterbatasan penyusun baik secara keilmuan maupun secara pengalaman penelitian. Oleh karena itu penyusun mengaharapkan segala kritik, saran, masukan, ataupun komentar yang membangun sehingga hasil penelitian ini menjadi lebih baik lagi.

Pada akhirnya laporan penelitian yang sekaligus Tugas Akhir ini diharapkan bermanfaat dalam memberikan informasi keilmuan maupun pengetahuan kepada penyusun dan kepada semua pihak. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan bagi semua pihak yang dengan ikhlas membantu, membimbing dan mengarahkan hingga selesainya penelitian dan Tugas Akhir ini dengan imbalan pahala yang setimpal, *amiin ya robbal'alamiin*.

Wabillahittaufiq wal hidayah, Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Jogjakarta, Juli 2005

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
ABSTRAK	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Keaslian Penelitian	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2.1 Uraian Umum	7
2.2 Sejarah Perkembangan Pemanfaatan Tenaga Pasang Surut	8
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air Pasang Susut La Rance, Perancis	9
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Air Pasang Surut Kislaya Guba, Rusia	10
2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Air Pasang Surut Jiangxia, China.....	10
2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Annapolis, Kanada.....	11
2.7 Tempat-tempat Berpotensi di Dunia Untuk Diterapkan Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut.....	12
BAB III LANDASAN TEORI	
3.1 Teori Pasang Surut	13
3.1.1 Teori Pembangkitan Pasang Surut	13
3.1.2 Tipe Pasang Surut	17
3.1.3 Definisi Muka Air	18

3.2 Model Pembangkit Tenaga Pasang Surut	19
3.2.1 Susunan Kolam Tunggal	19
3.2.2 Susunan Kolam Ganda	24
3.2.3 Susunan Kolam Bersama	25
3.3 Tinjauan Topografi	26
3.4 Turbin Air	27
3.5 Perkiraan Energi Listrik Yang Dihasilkan	30
3.5.1 Metode 1	30
3.5.2 Metode 2	32
3.5.3 Metode 3	32
3.6 Prinsip Pengaliran Tergenang	33
3.7 Pengaliran Melalui Pipa	36
3.8 Hipotesis	38
BAB IV METODE PENELITIAN	
4.1 Ketersediaan dan Kualitas Data	39
4.2 Pengumpulan Data	39
4.3 Penentuan Gelombang Pasang Surut Rencana	40
4.4 Metode Analisis	41
4.5 Data Masukan	41
4.6 Data Keluaran	43
4.7 Data Daerah Penelitian	43
4.8 Studi Kelayakan	45
4.9 Analisis Data	45
4.10 Diagram Alir Penelitian	46
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
5.1 Pendahuluan	
5.2 Potensi Pembangkit Tenaga Listrik Pasang Surut di Kawasan Sumatra	47
5.2.1 Data Pasang Surut	47
5.2.2 Waktu Pasang atau Surut	50
5.2.3 Tipe Pasang Surut	52

5.2.4 Kesimpulan	53
5.3 Perkiraan Potensi Tenaga Listrik Pasang Surut di Kawasan Sumatra	53
5.4 Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Sistem daur Ganda dengan Kolam Tunggal	56
5.4.1 Dimensi Kolam Minimal	57
5.4.2 Hubungan Luas Kolam dengan Energi	64
5.4.3 Energi Selama Satu Tahun dengan Luas Kolam Tertentu	68
5.4.4 Kesimpulan	75
 BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1 Kesimpulan	76
6.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	xii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Stasiun Pembangkit Listrik Pasang Surut La Rance, Perancis	10
Gambar 3.1 Jarak Matahari – Bumi - Bulan	13
Gambar 3.2. Bumi - Bulan – Matahari pada saat bulan purnama	15
Gambar 3.3. Kedudukan Bulan - Bumi - Matahari pada saat pasang perbani	15
Gambar 3.4. Bentuk gerakan naik turun muka air	16
Gambar 3.5 Elevasi muka air laut	19
Gambar 3.6 Susunan kolam tunggal	20
Gambar 3.7. Sistem daur air surut tunggal	21
Gambar 3.8. Sistem daur air pasang tunggal	22
Gambar 3.9 Sistem daur ganda	23
Gambar 3.10 Susunan kolam ganda	24
Gambar 3.11 Susunan Kolam Bersama	25
Gambar 3.12 Turbin Pelton	28
Gambar 3.13 Turbin Kaplan	28
Gambar 3.14 Turbin Francis	29
Gambar 3.15 Proses pengisian dan pengosongan kolam	33
Gambar 3.16 Kolam I dengan luas permukaan yang besar	34
Gambar 3.17 Kolam II dengan luas permukaan yang besar	35
Gambar 4.1 Grafik variasi pasang surut dalam periode tertentu	40
Gambar 4.2 Gelombang pasang surut rencana	41
Gambar 5.1 Pergerakan air pasang di Bagan Siapi api dengan luas kolam minimal ..	63
Gambar 5.2 Pergerakan air surut di Bagan Siapi api dengan luas kolam minimal	64
Gambar 5.3 Hubungan luas kolam dengan energi	67
Gambar 5.4 Pergerakan air produksi waktu air laut pasang	72
Gambar 5.5 Pergerakan air produksi waktu air laut surut	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Pembangkit listrik tenaga pasang surut di Cina	11
Tabel 2.2 Tempat-tempat berpotensi di Dunia untuk PLTA Pasut	12
Tabel 3.1 Karakteristik Turbin	28
Tabel 4.1 Pasang susurut kawasan Sumatera	43
Tabel 5.1 Beda Tinggi Pasang Surut Kawasan Sumatera	48
Tabel 5.2 Beda Tinggi Pasang Surut Rata-rata Kawasan Sumatera	49
Tabel 5.3 Periode Pasang Surut Kawasan Sumatera	50
Tabel 5.4 Tipe Pasang Surut Kawasan Sumatera	52
Tabel 5.5 Perkiraan Energi Kawasan Sumatera	55
Tabel 5.6 Hubungan luas kolam dengan energi	66

DAFTAR LAMPIRAN

1. Kartu presensi konsultasi Lampiran A
2. Data pasang surut Bagan Siapi api Lampiran B
3. Hasil perhitungan iterasi saat air pasang dan surut di Bagan Siapi api Lampiran C
4. Peta topografi Bagan Siapi api Lampiran D

ABSTRAK

Peningkatan akan permintaan tenaga listrik tidak seiring dengan penyediaan kebutuhan yang ada sehingga perlu diupayakan sumber daya yang lain yang dapat membantu memecahkan persoalan ini. Sumber energi alternative yang cukup menjanjikan adalah sumber energi yang berasal dari laut, misalnya energi gelombang dan energi pasang surut. Diluar negri, energi pasang surut dimanfaatkan sebagai sumber tenaga pembangkit listrik namun di Indonesia hal tersebut masih belum mendapatkan perhatian. Berdasarkan hal tersebut peneliti mengadakan penelitian "Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Sistem Daur Ganda Dengan Kolam Tunggal".

Pemanfaatan tenaga pasang surut sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik dapat dilakukan dengan berbagai macam cara, Pada prinsipnya dibedakan menjadi tiga, yaitu susunan kolam tunggal, susunan kolam ganda, dan susunan kolam bersama. Dalam susunan kolam tunggal energi listrik dapat dibangkitkan dengan menggunakan tiga macam sistem daur yaitu sistem daur pasang tunggal, sistem daur surut tunggal, dan sistem daur ganda. Susunan kolam ganda ditandai dengan adanya dua buah kolam yang mempunyai elevasi dasar kolam yang sama, masing-masing kolam boleh mempunyai satu unit turbin atau lebih. Tiap-tiap kolam dalam susunan kolam ganda hanya boleh menggunakan satu macam daur saja yaitu daur pasang tunggal atau daur surut tunggal, bila kolam pertama menggunakan daur pasang tunggal (pembangkitan listrik memanfaatkan pasang air laut) maka kolam kedua menggunakan daur air surut tunggal (pembangkitan listrik memanfaatkan surut air laut) atau sebaliknya. Susunan kolam bersama juga ditandai dengan adanya dua kolam yang, namun kedua kolam ini mempunyai elevasi dasar kolam yang berbeda dan posisi turbin berada diantara kolam pertama dan kedua, kolam pertama mempunyai elevasi yang lebih tinggi dibandingkan kolam kedua, kolam pertama digunakan untuk menampung air laut pada saat pasang sedangkan kolam kedua digunakan untuk menampung air yang dialirkan dari kolam pertama dan membuang air menuju laut saat air laut mengalami surut. Dalam susunan kolam bersama pembangkitan listrik dilakukan pada saat pengaliran air dari kolam pertama (elevasi tinggi) menuju kolam kedua (elevasi rendah). Dari ketiga sistem tersebut, Peneliti menggunakan susunan kolam tunggal dengan daur sistem daur ganda.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terhadap 29 stasiun pasang surut yang berada dikawasan Pulau Sumatra diperkirakan ada 7 tempat yang berpotensi untuk Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut, hal ini ditandai dengan adanya perbedaan tinggi pasang surut rata-rata lebih dari 2,5 m. Ketujuh tempat itu adalah Sungai asahan (2,66 m), Bagan Siapi-api (5,12 m), Blandong (3,28 m), Sungai Indragiri (2,84 m), Sungai Jambi (2,52 m), Muntor (2,79 m), Sungai Musi (2,74 m). Dari hasil analisis data daerah Bagan Siapi api memiliki potensi kandungan energi terbesar untuk kawasan Sumatra, energi yang dihasilkan untuk setiap tahunnya adalah sebesar 476.167,39 kWh. Dari penelitian untuk tinjauan daerah di Bagan Siapi api diperoleh Luas kolam minimal adalah 1,27 hektar, luas kolam optimal adalah 6,3 hektar, Energi yang dihasilkan untuk luas kolam optimal dengan 1 unit turbin adalah 3.536,83 MWh dan energi yang dihasilkan untuk luas kolam 76,2 hektar dengan 30 unit turbin adalah 74.824,372 MWh.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Negara-negara maju tidak akan mungkin mencapai tingkat kemajuan tanpa menggunakan energi secara luas. Di Negara-negara yang sudah maju, untuk melakukan sesuatu manusia cukup menekan tombol guna memerintahkan sebuah alat agar melakukan pekerjaan yang diinginkan. Tingkat kemajuan seperti ini tidak mungkin dicapai oleh sebuah Negara tanpa melibatkan penggunaan energi secara besar-besaran. Energi merupakan suatu unsur penunjang yang sangat penting bagi pengembangan secara menyeluruh suatu Negara, pemanfaatannya secara tepatguna akan menjadikan energi sebagai senjata yang ampuh untuk merangsang perkembangan teknologi, tidak hanya itu saja penggunaan energi secara tepat akan dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi suatu Negara. Berdasarkan alasan tersebut, dapat dimengerti apabila pada akhir-akhir ini permintaan terhadap penyediaan energi di Negara-negara seluruh dunia semakin meningkat. Secara garis besar dapat dikatakan bahwa, ditinjau dari segi kebutuhan energi, hampir dapat dipastikan semua Negara diseluruh dunia sedang mengalami “krisis energi”. Menurut Abdul Kadir (1995), diperkirakan penggunaan energi pada tahun 2010 akan menjadi empat kali lipat dari kebutuhan energi pada tahun 1972. Jumlah energi yang dibangkitkan diseluruh dunia pada tahun 1972 mencapai 5620 TWh (1 TWh = 10^7 kWh), jadi jika kebutuhan energi menjadi empat kali lipatnya, maka kebutuhan energi yang harus dipenuhi sangat besar. Semakin jelas bahwa harus ada suatu gagasan baru mengenai sumber-sumber penghasil energi dan rumusan program pelaksanaan dengan efisiensi maksimal.

Kekaguman manusia terhadap gejala alam telah menimbulkan daya tarik untuk memanfaatkannya guna memenuhi kebutuhan energi. Pasang-surut lautan, panas matahari, angin, semuanya dianggap memang diciptakan guna memenuhi kebutuhan sumber energi bagi umat manusia. Meskipun demikian, sampai dengan saat ini pengembangan energi secara besar-besaran dari sumber-sumber tersebut belum merupakan suatu kelaziman. Pengembangan energi secara besar-besaran sampai saat ini masih mengacu kepada sumber-sumber energi konvensional, sumber energi konvensional itu adalah tenaga uap, tenaga air, dan tenaga nuklir. Sumber-sumber lain

untuk pembangkit energi, tentu saja tidak diragukan nilainya, tetapi jika dibandingkan dengan besarnya energi yang dihasilkan oleh ketiga sumber utama tersebut, kontribusinya memang masih sangat terbatas. Sumber-sumber energi lain yang dikatakan sebagai sumber energi nonkonvensional bisa berupa tenaga pasang surut air laut, tenaga panas matahari, tenaga panas bumi, tenaga angin, dan medan magnet hidrodinamik.

Indonesia sebagai Negara berkembang dengan tingkat pertumbuhan jumlah penduduk cukup tinggi dan diimbangi dengan tingkat perekonomian yang semakin membaik, permintaan akan kesejahteraan dan kenikmatan hidup juga semakin meningkat. Salah satu kebutuhan yang meningkat dengan tajam yaitu permintaan akan kebutuhan energi listrik. Energi listrik diperlukan untuk penerangan, pengolahan bahan mentah, pengolahan pangan, transportasi komunikasi dan lain sebagainya. Tingginya permintaan energi listrik di Indonesia tidak diimbangi dengan ketersediaan energi yang memadai sehingga kebutuhan energi listrik tidak dapat terpenuhi dengan baik. Pemenuhan kebutuhan energi listrik saat ini masih didominasi oleh pulau Jawa, sementara pemenuhan kebutuhan energi untuk wilayah-wilayah lain masih belum mendapatkan perhatian secara baik, bahkan beberapa wilayah di Indonesia untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara merata dan memenuhi azas keadilan harus diadakan penyuplaian energi listrik secara bergantian, bila suatu wilayah mendapatkan suplai energi listrik pada hari ini maka wilayah yang lain tidak mendapatkan suplai energi listrik pada hari ini, sedangkan pada keesokan harinya wilayah yang sudah mendapatkan suplai energi listrik tidak mendapatkan suplai karena suplai energi listrik dialihkan kewilayah yang lain dan begitu seterusnya. Mengingat hal tersebut, maka perlu diupayakan sumber-sumber energi listrik lain agar dapat membantu memecahkan persoalan kekurangan energi listrik.

Energi listrik dapat dihasilkan dari minyak dan gas, batubara, geotermal, nuklir, tenaga surya dan tenaga air. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, selama ini pembangkit listrik diseluruh dunia masih mengandalkan tenaga air (Pembangkit Listrik Tenaga Air), tenaga nuklir (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), dan tenaga uap (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) sebagai sumber tenaga pembangkit. Di luar negeri ini sudah mulai mengupayakan untuk mencari sumber-sumber tenaga guna membangkitkan energi listrik, salah satu contohnya adalah penggunaan tenaga pasang surut air laut. Perancis pada tahun 1968 telah berhasil membangun pembangkit listrik yang

memanfaatkan tenaga pasang surut air laut, energi yang dibangkitkan dari pembangkit listrik ini cukup besar yaitu mencapai 240 MWatt, pembangkit listrik ini tepatnya berada di kuala Rance yaitu antara Saint Maro dan Dinard, Brittany, Perancis.

Menurut prakiraan Indonesia mempunyai potensi yang besar untuk dapat memanfaatkan tenaga pasang surut air laut sebagai sumber tenaga pembangkit listrik, mengingat Indonesia merupakan Negara kepulauan yang dikelilingi oleh lautan, dua lautan besar yang mengelilingi Indonesia yaitu samudra Hindia dan samudra Pasifik, serta posisinya berada di lintang khatulistiwa, hal ini menyebabkan kondisi pasang surut, angin, gelombang, dan arus laut cukup besar. Kepulauan Indonesia memiliki panjang pantai lebih kurang 80.000 km, beberapa lokasi mempunyai beda tinggi pasang dan surut air laut yang cukup besar. Menurut data pencatatan pasang surut air laut tahun 2004 yang diterbitkan oleh Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut (TNI AL) khususnya dinas *Hidro-Oseanografi*, di kawasan Sumatra lokasi yang mempunyai perbedaan tinggi muka air laut pasang dan surut cukup besar adalah di Bagan Siapi-api. Bagan Siapi-api mempunyai perbedaan tinggi pasang dan surut air laut mencapai hingga 6,4 m, pada saat pasang tertinggi muka air laut bisa mencapai 6,6 m, sedangkan pada saat surut terendah muka air laut bisa mencapai 0,2 m dihitung dari bidang *datum*. Pasang surut air laut menyebabkan adanya perbedaan ketinggian muka air laut, perbedaan ketinggian ini akan menghasilkan energi potensial dan kinetis. Energi potensial dan kinetis akibat perbedaan ketinggian muka air laut dapat digunakan untuk memutar turbin dan putaran turbin dapat digunakan untuk memutar generator yang dapat menghasilkan tenaga listrik.

Potensi energi pasang surut guna pembangkit tenaga listrik di Indonesia belum mendapatkan perhatian secara khusus seperti halnya yang dilakukan oleh Negara-negara lain seperti Perancis, Inggris, Amerika Serikat, bahkan India sudah mulai melakukan penelitian tentang potensi energi pasang surut air laut untuk pembangkit listrik. Melihat Perancis yang telah berhasil membangun pembangkit listrik yang memanfaatkan pasang surut air laut dengan kapasitas yang sangat besar hingga mencapai 240 MWatt, sudah seharusnya kita mulai memperhatikan pasang surut air laut untuk pembangkit tenaga listrik sebagai sumber energi alternatif. Sumber energi pasang surut bersifat bukan saja dapat diperbaharui (*renewable*) tetapi juga tidak menimbulkan polusi terhadap lingkungan (*environmentally friendly*).

Dengan latar belakang tersebut akan dicoba mengadakan penelitian tentang “Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Sistem Daur Ganda Dengan Kolam Tunggal (Studi Kasus Pulau Sumatra)”.

1.2 Rumusan Masalah

Untuk mencari sumber energi alternatif, khususnya sumber energi yang berasal dari tenaga pasang surut air laut, perlu diadakan sebuah penelitian dan pengkajian tentang potensi sumber tenaga pasang surut yang terkandung dalam suatu wilayah dengan menggunakan metode-metode tertentu. Upaya untuk mendapatkan sumber energi yang efisien perlu adanya sebuah perencanaan yang jelas dan terarah serta rumusan masalah yang tepat, untuk itu peneliti merumuskan permasalahan sebagai berikut.

1. Apakah ada daerah di kawasan Sumatra yang mempunyai potensi untuk pembangkit listrik tenaga pasang surut?.
2. Apabila ada tempat yang berpotensi, Berapa besarnya energi listrik pasang surut yang dikandung untuk daerah-daerah tersebut?
3. Berapa besarnya luas kolam minimal yang efisien untuk pembangkit listrik tenaga pasang surut tersebut?
4. Berapa energi listrik yang dapat dibangkitkan tiap tahun bila menggunakan luas kolam tertentu dan jumlah turbin tertentu di daerah yang memiliki potensi pembangkit listrik tenaga pasang surut?.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dirumuskan pada sub Bab1.2 maka tujuan penelitian tentang “Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Sistem Daur Ganda Dengan Kolam Tunggal (Studi Kasus Pulau Sumatra)” adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui daerah-daerah di kawasan Sumatra yang mempunyai potensi untuk diterapkan pembangkit listrik tenaga pasang surut berdasarkan perbedaan tinggi muka air pasang surut yang terdapat pada daerah yang ditinjau.
2. Mengetahui perkiraan besarnya energi listrik di kawasan Sumatra yang mempunyai potensi terbesar untuk diterapkan pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal.

3. Mengetahui dimensi kolam minimal dan kolam optimal yang efisien untuk pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal dan satu unit turbin di daerah kawasan Sumatra yang memiliki potensi paling tinggi.
4. Mengetahui besarnya energi listrik yang dapat dibangkitkan berdasarkan luas kolam yang akan dibangun dan jumlah turbin yang akan dipasang di daerah kawasan Sumatra yang memiliki potensi paling tinggi.

1.4 Batasan Masalah

Dalam mengadakan penelitian, Analisis yang akan dilakukan perlu dibatasi agar lebih terfokus, batasan-batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data pasang surut yang digunakan adalah data pencatatan pasang surut air laut tahun 2004 di pulau Sumatra yang dikeluarkan oleh dinas *Hidro-Oseanografi* TNI AL untuk menentukan dimensi kolam, pipa *inlet*, maupun pipa *outlet*.
2. Dalam pengolahan data dan analisis potensi pembangkit listrik tenaga pasang surut tidak memperhitungkan *fluktuasi* muka air akibat banjir.
3. Model pembangkit listrik tenaga pasang surut menggunakan metode susunan kolam tunggal dengan sistem daur ganda.
4. Dalam analisis, data pasang surut selama satu tahun dirata-rata guna mendapatkan satu gelombang pasang surut rencana yang pergerakan dan periodenya tetap.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tentang “Potensi Pasang Surut Untuk Pembangkit Tenaga Listrik di Kawasan Pulau Sumatra” adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui beda tinggi pasang surut air laut di kawasan Pulau Sumatra.
2. Mengetahui daerah yang mempunyai potensi untuk dapat diterapkan pembangkit listrik tenaga pasang surut sehingga dapat digunakan sebagai masukan dalam pengambilan keputusan yang berkaitan dengan pemanfaatan sumber energi *alternative* khususnya energi pasang surut air laut.
3. Mengetahui besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga pasang surut menggunakan sistem daur ganda dengan kolam tunggal di suatu daerah tertentu.

1.6 Keaslian Penelitian

Penelitian pemanfaatan tenaga pasang surut untuk pembangkit listrik telah dilakukan oleh beberapa negara Perancis, Rusia, Amerika Serikat, dan Kanada sejak tahun 1920. Sejauh ini penelitian yang dilakukan oleh negara-negara tersebut telah menghasilkan pembangkit listrik tenaga pasang surut. Menurut pengetahuan peneliti, penelitian tentang “Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Sistem Daur Ganda Dengan Kolam Tunggal (Studi Kasus Pulau Sumatra)” belum pernah dilakukan di Indonesia, mengacu terhadap hal tersebut peneliti mencoba untuk mengkaji potensi tenaga pasang surut di pulau Sumatra sebagai pembangkit tenaga listrik dengan menggunakan metode simulasi pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Uraian Umum

Cadangan minyak Bumi, gas alam, dan batu bara akan habis dalam waktu yang tidak lama karena eksploitasi dilakukan tanpa perhitungan dan kontrol yang jelas. Sejumlah pihak seperti Perancis, Rusia, Amerika Serikat, Canada, dan Inggris sedang mengembangkan sumber energi alternatif, sumber energi tersebut adalah tenaga pasang surut air laut untuk pembangkit listrik. Penggunaan tenaga pasang surut untuk pembangkit listrik bukanlah suatu hal yang baru bahkan teknik ini tergolong dalam teknik paling tua yang pernah dipikirkan oleh manusia. Perancis, Rusia, dan Canada telah berhasil membangun stasiun pembangkit listrik dengan memanfaatkan tenaga pasang surut.

Menurut Christian Tobing (2001), penerapan pembangkit listrik tenaga pasang surut di Indonesia bukanlah suatu hal yang mustahil, mengingat hampir 60% dari total luas wilayah Indonesia merupakan lautan. Indonesia mempunyai luas wilayah kurang lebih sebesar 1.929.317 km², itu artinya luas lautan Indonesia berkisar antara 1.157.590,20 km². Indonesia mempunyai garis pantai yang membentang dari barat ke timur sepanjang 5.150 km, sedangkan garis pantai yang membentang dari utara ke selatan sepanjang 1.930 km. Dengan data tersebut Indonesia merupakan negara yang mempunyai garis pantai terpanjang di dunia. Menurut data pencatatan pasang surut yang dikeluarkan oleh Dinas *Hidro-Oseanografi* Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut (TNI AL), Indonesia mempunyai 90 stasiun pasang surut yang tersebar mulai dari Sabang sampai Merauke. Dari beberapa stasiun pasang surut tersebut banyak terdapat stasiun pasang surut yang mempunyai perbedaan tinggi air pasang dan surut melebihi 2,5 m. Berdasarkan kondisi tersebut jelas terbuka kemungkinan bahwa Indonesia dapat memanfaatkan tenaga pasang surut sebagai sumber pembangkit energi listrik.

Dengan potensi alam yang demikian besar seharusnya kita mulai memberikan perhatian secara khusus terhadap penerapan pembangkit listrik tenaga pasang surut.

Adanya *masterplan* yang jelas, untuk mewujudkan penerapan pembangkit listrik tenaga pasang surut di Indonesia bukan suatu hal yang tidak masuk akal.

2.2 Sejarah Perkembangan Pemanfaatan Tenaga Pasang Surut

Pemanfaatan tenaga pasang air laut surut sudah dimulai sejak lama, pada abad 11 di Inggris telah dioperasikan pabrik penggilingan yang memanfaatkan tenaga pasang surut air laut. Beberapa pabrik penggilingan ini masih beroperasi hingga sekarang, tenaga yang dihasilkan berkisar antara 50-100 kWatt. Tenaga air pasang juga digunakan dalam pemasokan air di London dan pompa pembuangan sampah di Hamburg. Pada permulaan abad 20, perhatian terhadap tenaga pasang surut air laut mulai dihidupkan kembali, pengembangan pemanfaatan tenaga pasang surut air laut pada masa ini dipelopori oleh O.Turball dari Kanada, D.P.Cooper dari Amerika Serikat, dan N.Davey dari Inggris. Tahun 1935, Amerika Serikat memulai sebuah proyek pembuatan stasiun pembangkit listrik tenaga pasang surut di teluk Passamaquoddy, proyek ini dikenal dengan nama *International Passamaquoddy Tidal Power Project*. Proyek pembangunan stasiun pembangkit listrik pasang surut Passamaquoddy akhirnya dihentikan sehubungan dengan terbatasnya biaya. Setelah gagalnya proyek Passamaquoddy, dalam periode 25 tahun tidak terlihat kembali aktifitas pengembangan potensi tenaga pasang surut. Seiring dengan perkembangan jaman dan ditemukannya turbin yang mampu beroperasi dengan memanfaatkan ketinggian air yang rendah, baru terlihat kembali adanya perhatian terhadap pemanfaatan tenaga pasang surut air laut untuk pembangkit listrik. L.B.Bernstein dari Uni Soviet dan R.Gibrat dari Perancis mulai meneruskan penggalian potensi tenaga pasang surut air laut. Pada tahun 1966 akhirnya Perancis berhasil membangun stasiun pembangkit listrik tenaga pasang surut dengan kapasitas yang cukup besar. Keberhasilan Perancis dalam membangun pembangkit listrik dengan memanfaatkan tenaga pasang surut merupakan suatu terobosan baru pada jamannya, keberhasilan Perancis mulai diikuti oleh beberapa Negara seperti Rusia, Kanada, Inggris, Amerika Serikat, dan China.

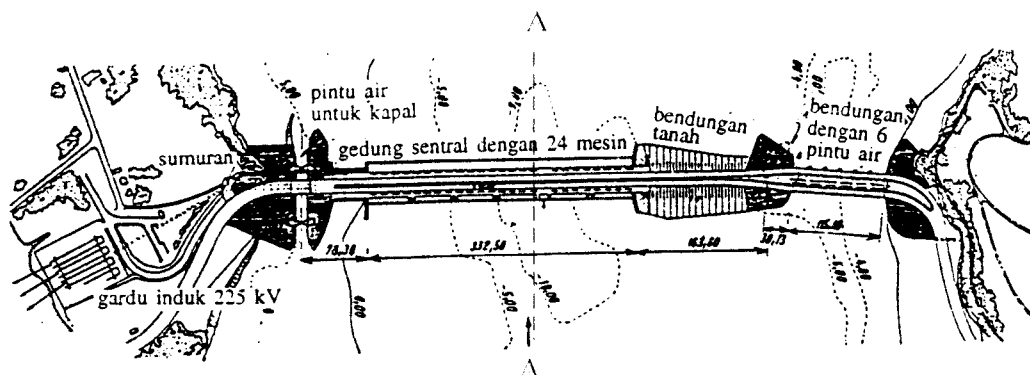
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air Pasang Surut La Rance, Perancis

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) pasang surut La Rance di Perancis diresmikan oleh Presiden de Gaulle pada tahun 1966, pembangkit listrik ini merupakan PLTA pasang surut pertama dalam ukuran besar. PLTA pasang surut La Rance dibangun di sebuah muara sungai yang mempunyai perbedaan tinggi air pasang surut rata-rata sebesar 8,5 m, pada saat terjadi pasang tertinggi (*spring tide*) perbedaan tinggi air pasang surut bisa mencapai 13,5 m, sedangkan pada saat terjadi pasang terendah (*neap tide*) perbedaan tinggi air pasang dan surut adalah 3,5 m. Banyaknya air yang masuk ke dalam kolam penampung pada saat *spring tide* bisa mencapai 18.000 m³/detik. Data-data lain dari PLTA pasang surut La Rance adalah sebagai berikut.

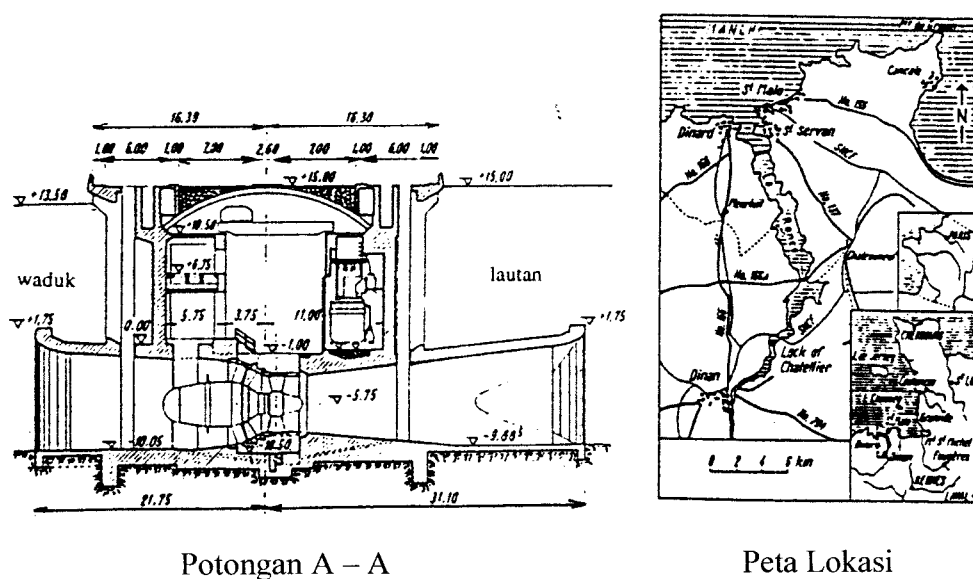
Lubang pintu air	: 10,15 m
Ruang bebas untuk lalu-lintas air	: 65,13 m
Kapasitas turbin	: 10 MWatt
Jumlah turbin	: 24 buah
Daya terpasang	: 240 MWatt
Diameter turbin	: 5,35 m
Luas kolam	: 22 km ²
Pembangkitan energi dalam setahun	
a. Arah kolam-laut	: 537×10^6 kWh
b. Arah laut-kolam	: 72×10^6 kWh
Total	: 609×10^6 kWh
Pengurangan daya untuk pompa	: 65×10^6 kWh
Energi netto dalam setahun	: 544×10^6 kWh

Pembangkit listrik tenaga pasang surut La Rance mengatur *out-put* nya dengan berbagai macam cara, selama air menurun pembangkitan energi listrik hanya dilakukan satu arah yaitu putaran daur air surut karena tinggi permukaan air berkurang tetapi, pemompaan langsung diusahakan guna membantu menggenangkan air sehingga menaikkan air. Operasi pemompaan juga meningkatkan permukaan air untuk pembangkitan energi listrik saat air laut pasang, air dipompa keluar dari dalam kolam penampung menuju laut sehingga perbedaan tinggi muka air laut dan kolam penampung tetap terjaga. Untuk air pasang tingkat sedang dan musim semi, digunakan pengoperasian

daur air ganda, dalam hal ini pembangkitan energi listrik terjadi secara terus menerus baik pada saat air laut pasang maupun air laut sedang surut.



Denah Pembangkit Listrik Pasang Surut La Rance



Gambar 2.1 Stasiun Pembangkit Listrik Pasang Surut La Rance, Perancis
(Sumber O.F. Patty 1995)

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Air Pasang Surut Kislaya Guba, Rusia

Pembangkit listrik tenaga pasang surut Kislaya Guba direncanakan sejak tahun 1966 dan mulai beroperasi sejak tahun 1968. PLTA pasang surut kislaya guba memanfaatkan

perbedaan tinggi pasang surut air laut rata-rata sebesar 2,3 m. Luas kolam penampung air yang digunakan adalah 1,1 km². Kapasitas yang terpasang pada pembangkit listrik ini adalah 0,4 MWatt.

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Air Pasang Surut Jiangxia, China

Pembangkit listrik tenaga pasang surut Jiangxia dioperasikan sejak tahun 1980. Kolam penampung air yang digunakan mempunyai luas 1,4 km², dengan memanfaatkan perbedaan tinggi pasang surut rata-rata 5,08 m pembangkit listrik ini mampu membangkitkan energi listrik sebesar 3,9 MWatt. Selain pembangkit listrik tenaga pasang surut Jiangxia, Cina juga mempunyai beberapa stasiun pembangkit listrik pasang surut air laut yang lain (Tabel 2.1), namun pembangkit listrik tersebut masing-masing mempunyai kapasitas yang tidak besar.

Tabel 2.1 Pembangkit listrik tenaga pasang surut di Cina

No	Lokasi	Beda tinggi pasut (m)	Daya terpasang (MW)	Tahun Beroperasi
1	Shasan	5,1	0,04	1961
2	Yuepu	3,6	0,15	1971
3	Haishan	4,9	0,15	1975
4	Liuhe	2,1	0,15	1976
5	Guozishan	2,5	0,04	1977
6	Baishakou	2,4	0,64	1978
7	Xingfuyang	4,5	1,28	1989

(sumber: Google Answer Intenational Water Power Energy With Focus Tidal Power 2004)

2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Annapolis, Kanada

Pembangkit listrik tenaga pasang surut Annapolis dioperasikan sejak tahun 1984. Pembangkit listrik ini memanfaatkan sebuah teluk sebagai kolam penampung air, teluk yang digunakan adalah Bay of Fundy. Buy of Fundy merupakan salah satu tempat yang mempunyai perbedaan tinggi air pasang dan surut sangat besar, bahkan bisa dikatakan sebagai yang tertinggi didunia. Pada saat terjadi pasang tertinggi (*spring tide*), ketinggian air bisa mencapai 16 m dan perbedaan tinggi air pasang surut rata-ratanya adalah 6,5 m.

Pembangkit listrik pasang surut Anapolis mempunyai kapasitas terpasang sebesar 18 MWatt, dengan luas kolam penampung air seluas 15 km².

2.7 Tempat-tempat Berpotensi di Dunia Untuk Diterapkan Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut

Daya listrik yang terpasang dihitung berdasarkan luas kolam alami (Teluk atau Kuala).

Tabel 2.2 Tempat-tempat berpotensi di Dunia untuk PLTA Pasut

No	Negara	Lokasi	Luas kolam (km ²)	Beda tinggi rerata (m)	Daya terpasang (MW)
1	U S A	Passamaquoddy	300	5,50	400
2	U S A	Cook Inlet	3.100	4,35	18.000
3	Rusia	Mezan	2.640	5,66	15.000
4	Rusia	Tugur	1.080	5,38	6.790
6	Inggris	Severn	490	8,30	6.000
7	Inggris	Mersey	60	8,40	700
8	Argentina	San Jose	780	6,00	7.000
9	Korea	Corlim Bay	90	4,70	480
10	Australia	Secure	130	8,40	570
11	Australai	Wallcot	260	8,40	1.750

(sumber : Google Answer Intenational Water Power Energy With Focus Tidal Power 2004)

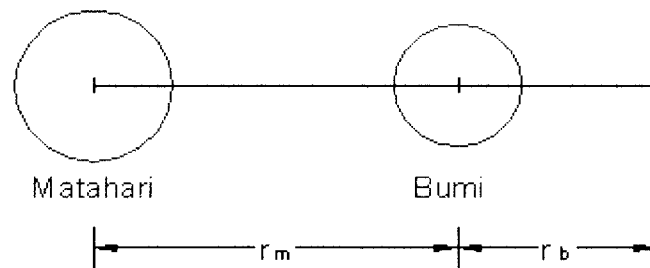
BAB III LANDASAN TEORI

3.1 Teori Pasang Surut

Pasang surut adalah perubahan atau perbedaan permukaan air laut sepanjang waktu yang diakibatkan adanya gaya tarik benda-benda langit, terutama bulan dan matahari serta gerakan revolusi bumi.

3.1.1 Teori Pembangkitan Pasang Surut

Gaya-gaya pembangkit pasang surut air laut ditimbulkan oleh gaya tarik menarik antara bulan, bumi, dan matahari. Bulan dan matahari keduanya memberikan gaya gravitasi tarikan kepada bumi, besarnya gaya tarik tersebut tergantung pada massa benda dan jarak benda yang saling tarik menarik. Massa matahari 2 kali lebih besar dibandingkan massa bulan, tetapi karena jarak matahari lebih jauh 2 kali dibandingkan jarak bulan terhadap bumi, maka pengaruh gaya tarik bulan terhadap bumi lebih besar daripada pengaruh gaya tarik matahari terhadap bumi. Ilustrasi dari gaya tarik menarik antara bulan dengan bumi dan matahari dengan bumi akan di ilustrasikan sebagai berikut



Gambar 3.1. jarak Matahari – Bumi - Bulan
(Bambang Triatmodjo 1996)

Besarnya gaya tarik menarik antara matahari, bumi, bulan dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2} \quad (3.1)$$

Dengan:

F = Gaya tarik menarik antara benda 1 dan benda 2 (N)

m_1, m_2 = Massa benda yang saling tarik menarik (kg)

G = suatu konstanta yang nilainya $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

r = jarak benda yang saling tarik menarik (m)

Dengan menganggap jarak matahari 2 kali lebih besar dibandingkan jarak bulan terhadap bumi, dan massa matahari 2 kali lebih besar dibandingkan massa bulan maka pengaruh gaya tarik dari bulan dan matahari dapat dihitung sebagai berikut.

$$F_{\text{bulan-bumi}} > F_{\text{matahari-bumi}}$$

$$G \frac{m_{\text{bulan}} \times m_{\text{bumi}}}{r_b^2} > G \frac{m_{\text{matahari}} \times m_{\text{bulan}}}{r_m^2} \quad \text{dengan nilai G yang sama maka,}$$

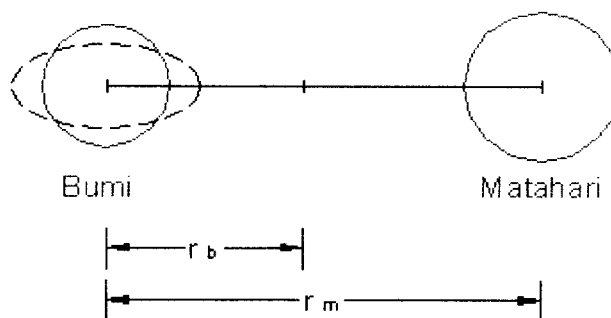
$$\frac{m_{\text{bulan}} \times m_{\text{bumi}}}{r_b^2} > \frac{m_{\text{matahari}} \times m_{\text{bulan}}}{r_m^2} \quad \text{dengan massa bumi yang sama maka,}$$

$$\frac{1}{1^2} > \frac{2}{2^2}$$

$$1 > \frac{1}{2}$$

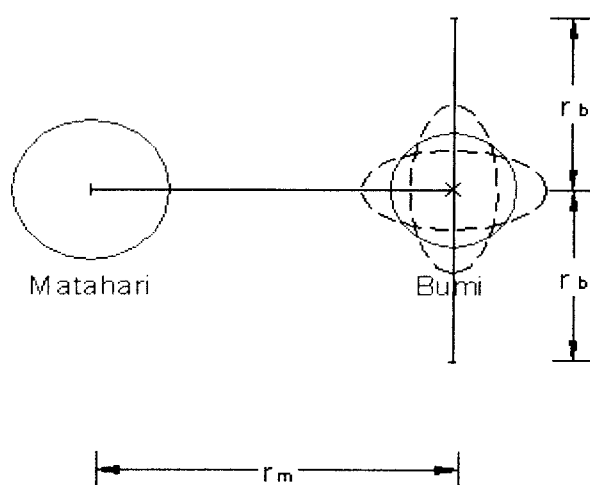
dari uraian diatas dapat dilihat bahwa gaya tarik menarik antara bulan dengan bumi dua kali lebih besar dibandingkan dengan gaya tarik menarik antara matahari dengan bumi.

Rotasi Bumi menyebabkan elevasi muka air laut di khatulistiwa lebih tinggi daripada digaris lintang yang lain, tetapi karena pengaruhnya yang seragam di sepanjang garis lintang yang sama, maka hal ini tidak bisa dianggap sebagai variasi pasang surut. Peredaran Bumi - Bulan - Matahari pada orbitnya selalu berubah-ubah setiap saat, revolusi Bumi terhadap matahari ditempuh dalam waktu 365 hari, sedangkan revolusi Bulan terhadap Bumi ditempuh dalam waktu 29,5 hari (jumlah hari dalam satu bulan menurut kalender tahun Kamariah, yaitu tahun yang didasarkan pada peredaran bulan). Pada setiap tanggal 1 dan 15 bulan kamariah posisi Bumi - Bulan - Matahari berada pada satu garis lurus (ditunjukkan oleh Gambar 3.2), keadaan ini akan menyebabkan pasang air laut tertinggi atau disebut dengan *Spring tide*.



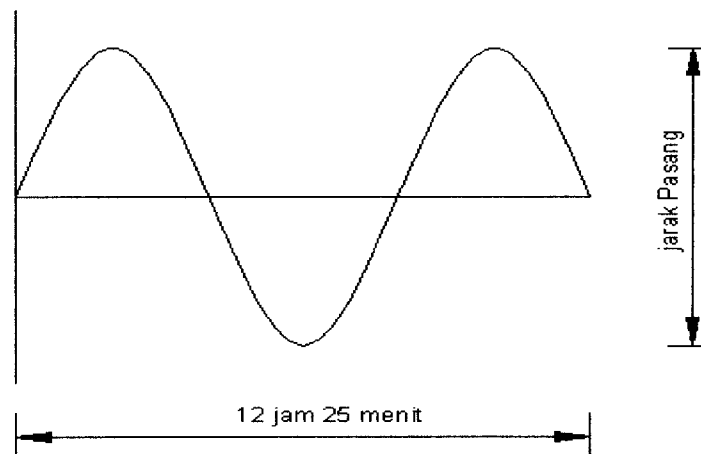
Gambar 3.2. Bumi - Bulan – Matahari pada saat bulan purnama
(Bambang Triatmodjo 1996)

Pada kondisi Bumi – Bulan – Matahari berada pada satu garis lurus, Bulan dan Matahari bekerjasama dalam memberikan gaya tarik terhadap bumi sehingga gaya tarik yang bekerja pada bumi menjadi lebih besar. Pada tanggal 7 dan 21 kalender Kamariah (seperempat dan tiga perempat revolusi bulan terhadap bumi) Bulan dan Matahari membentuk sudut siku-siku terhadap bumi (ditunjukkan oleh Gambar 3.3), maka gaya tarik Bulan terhadap Bumi dan gaya tarik Matahari terhadap Bumi akan saling mengurangi sehingga pada saat ini akan terjadi pasang kecil atau pasang perbani atau juga disebut *neap tide*. Pada saat pasang perbani perbedaan tinggi muka air pasang dan surut relatif lebih kecil dibandingkan dengan hari-hari yang lain.



Gambar 3.3. Kedudukan Bulan - Bumi - Matahari pada saat pasang perbani
(Bambang Triatmodjo 1996)

Tinggi pasang surut adalah jarak vertical antara air tertinggi (puncak air pasang) dan air terendah (lembah air surut) yang berturutan. Periode pasang surut adalah waktu yang dibutuhkan dari posisi muka air pada muka air rerata ke posisi yang sama berikutnya. Periode pasang surut bisa 12 jam 25 menit atau 24 jam 50 menit, yang tergantung oleh tipe pasang surut. Periode pada muka air naik disebut pasang, sedang pada saat muka air turun disebut surut. Variasi muka air menimbulkan arus yang disebut dengan arus pasang surut, yang mengangkut massa air dalam jumlah sangat besar. Arus pasang terjadi pada saat periode pasang dan arus surut terjadi pada saat periode surut. Titik balik (*slack*) terjadi saat arus berbalik antara arus pasang dan arus surut, titik balik ini bisa terjadi saat muka air tertinggi dan muka air terendah, pada saat ini kecepatan arus pasang surut adalah nol. Gerakan muka air pasang surut mengikuti sebuah kurva sinus yang diperlihatkan oleh Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4. Bentuk gerakan naik turun muka air
(Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)

Dari Gambar 3.4 dapat dilihat bahwa, gerakan naik dan turun air laut yang luas menunjukkan adanya sumber tenaga yang tidak terbatas, dan sumber tenaga ini tidak akan berhenti kecuali Bumi - Bulan - Matahari berhenti berputar pada orbitnya. Perubahan naik turun permukaan air pasang dan surut menimbulkan adanya perbedaan ketinggian atau jarak air pasang dengan air surut, hal ini akan menghasilkan energi potensial dan kinetik yang bisa di konversi menjadi energi listrik. Seperti halnya di laut, kerja dari suatu pasang surut juga akan menimbulkan suatu perbedaan turun dan naiknya air dalam suatu

lingkungan semi tertutup dengan laut, seperti *estuary* atau juga kolam buatan yang terhubung dengan laut. Keadaan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan energi yang nyata. Menurut Arismunandar (1975), energi yang terdapat di *estuary* atau kolam buatan yang terhubung dengan laut merupakan energi dalam bentuk energi primer. Secara definisi dikatakan bahwa energi primer adalah energi yang terdapat dalam alam atau yang terjadi secara alamiah. Selanjutnya guna memperoleh tenaga listrik energi tersebut harus diubah menjadi energi sekunder, perubahan dari energi primer menjadi energi sekunder mengalami perubahan bentuk sebanyak dua kali (Arismunandar, 1977). Mula-mula tenaga potensial air dialirkan melalui turbin air untuk memutar roda turbin. Disini energi kinetik air diubah menjadi energi mekanik. Roda turbin yang berputar dihubungkan dengan generator yang berputar dihubungkan dengan generator yang dapat menghasilkan tenaga listrik. Berdasarkan pengamatannya, WEYL (1970) menyimpulkan bahwa dengan membuat suatu jarak kegiatan yang berbeda antara turbin dengan permukaan air akan menghasilkan energi potensial sebesar :

$$E_{pot} = A \times g \times h \quad (3.2)$$

Dengan :

E_{pot} = Energi potensial

A = Massa air

g = Percepatan gravitasi

h = Perbedaan tinggi muka air

3.1.2 Tipe Pasang Surut

Bentuk pasang surut di berbagai daerah tidak sama. Di suatu daerah dalam satu hari dapat terjadi satu kali atau dua kali pasang surut. Secara umum di berbagai daerah dapat dibedakan dalam empat tipe pasang surut.

1. Pasang surut harian ganda (*semi diurnal tide*)

Dalam satu hari terjadi dua kali pasang dan dua kali air surut dengan tinggi yang hampir sama dan pasang surut terjadi secara berurutan dan teratur. Periode pasang surut rata-rata 12 jam 24 menit.

2. Pasang surut harian tunggal (*diurnal tide*)

Dalam satu hari terjadi satu kali air pasang dan satu kali air surut. Periode pasang surut rata-rata 24 jam 50 menit.

3. Pasang surut campuran condong ke harian ganda (*mixed tide prevailing semidiurnal*)

Dalam satu hari terjadi dua kali air pasang dan dua kali air surut tetapi tinggi dan periodenya berbeda. Dalam penelitian, pasang surut tipe ini dimasukkan dalam tipe pasang surut harian ganda.

4. Pasang surut campuran condong ke harian tunggal (*mixed tide prevailing diurnal*)

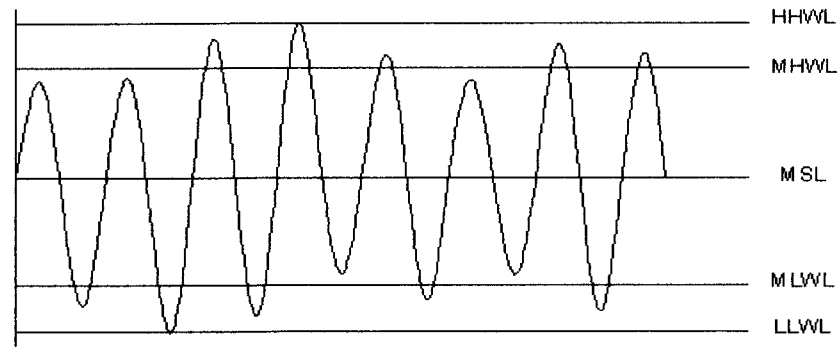
Pada tipe ini dalam satu hari terjadi satu kali air pasang dan satu kali air surut, tetapi kadang-kadang untuk sementara waktu terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi dan periode yang sangat berbeda. Dalam penelitian, pasang surut tipe ini dimasukkan dalam tipe pasang surut harian tunggal.

3.1.3 Definisi Muka Air

Mengingat elevasi muka air laut selalu berubah-ubah setiap saat, maka diperlukan suatu elevasi yang ditetapkan berdasar data pasang surut, yang dapat digunakan sebagai pedoman didalam perencanaan suatu bangunan pantai. Beberapa elevasi tersebut adalah sebagai berikut:

1. Muka air tinggi tertinggi (*Highest High Water Level*, HHWL) yaitu air tertinggi pada saat pasang surut purnama atau bulan mati.
2. Muka air rendah terendah (*Lowest Low Water Level*, LLWL) yaitu air terendah pada saat pasang surut bulan purnama atau bulan mati.
3. Muka air laut rerata (*Mean Sea Level*, MSL) yaitu muka air rerata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata. Elevasi ini digunakan sebagai referensi untuk elevasi di dartaan.
4. Muka air tinggi rerata (*Mean High Water Level*, MHWL) yaitu rerata dari muka air tinggi selama periode 19 tahun.
5. Muka air rendah rerata (*Mean Low Water Level*, MHL) yaitu rerata dari muka air rendah selama periode 19 tahun.

Dalam Gambar 3.5 berikut dapat dilihat posisi dari istilah-istilah elevasi muka air yang telah diuraikan diatas.



Gambar 3.5 Elevasi muka air laut
(Bambang Triatmodjo 1996)

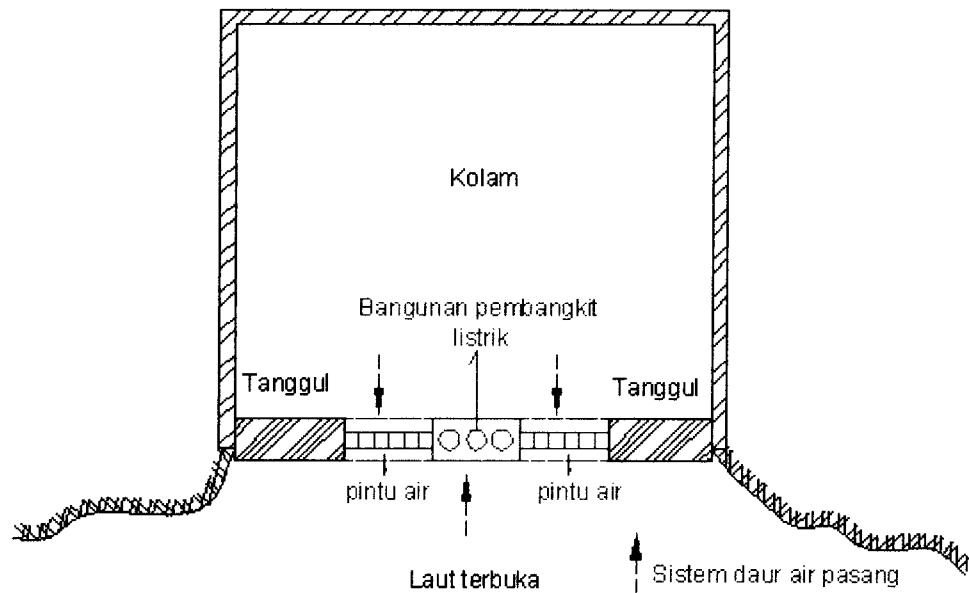
3.2 Model Pembangkit Tenaga Pasang Surut

Menurut Dandekar,MM dan Sherma,KN, 1991, pada dasarnya pembangkit listrik tenaga pasang surut melibatkan kolam penampung air, baik itu kolam buatan maupun kolam yang memanfaatkan kondisi alam. Pada prinsipnya pemanfaatan tenaga pasang surut air laut untuk pembangkit listrik dibedakan menjadi tiga, yaitu susunan kolam tunggal, susunan kolam ganda, dan susunan kolam bersama. Dari prinsip-prinsip dasar ini kemudian dikembangkan beberapa cara untuk mendapatkan energi yang boleh dikatakan terus menerus.

3.2.1 Susunan Kolam Tunggal

Dalam susunan kolam tunggal, hanya terdapat sebuah kolam penampung air yang langsung berhadapan dengan laut. Kolam dan laut dipisahkan oleh tanggul, sedangkan aliran antara keduanya disalurkan melalui pintu air yang terletak disepanjang tanggul, pada tanggul ini juga terdapat bangunan pembangkit listrik. Arus yang masuk dari laut menuju kolam penampung atau dari kolam penampung menuju laut dapat digunakan untuk memutar turbin.

Dalam susunan kolam tunggal energi listrik dapat dibangkitkan dengan menggunakan tiga macam sistem daur air, tiga sistem daur air itu adalah sistem daur air pasang tunggal, sistem daur air surut tunggal, dan sistem daur air ganda. berikut ini akan dijelaskan mekanisme kerja dari pembangkit listrik pasang surut dengan menggunakan masing-masing sistem daur air.

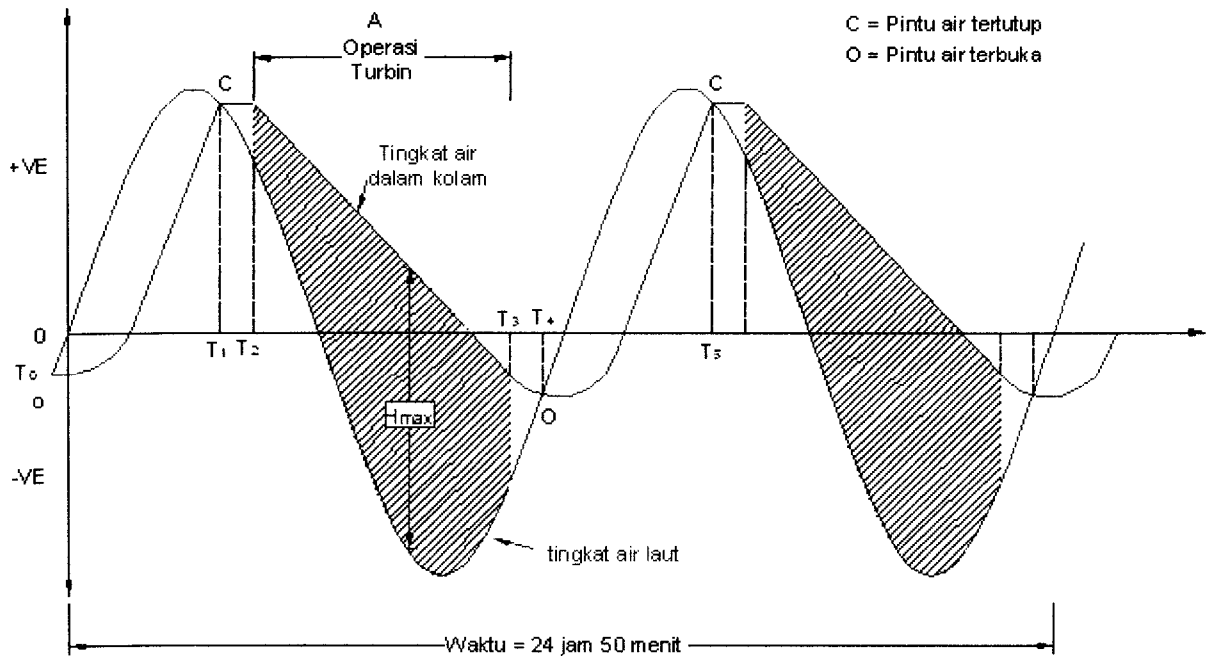


Gambar 3.6 Susunan kolam tunggal
(Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)

1. Sistem daur air surut tunggal

Dalam sistem ini tenaga diperoleh dengan menampung air laut pada keadaan pasang. Pada saat air laut pasang pintu-pintu air dibuka untuk mengisi kolam dengan air, hingga pada suatu saat permukaan air dalam kolam kolam dengan permukaan air dilaut menjadi sama, pintu air ditutup. Pada saat air laut surut dengan memperhitungkan perbedaan ketinggian muka air tertentu, pintu air dibuka untuk mengalirkan air dari dalam kolam menuju ke laut yang permukaan airnya lebih rendah. air ini dialirkan melauai turbin sehingga turbin dapat berputar. Saat T_1 , pintu air ditutup sehingga muka air dalam kolam tidak berubah, Sementara diluar kolam air laut terus turun karena sedang mengalami surut, setelah selang waktu menunggu T_1-T_2 air akan mempunyai perbedaan tinggi minimal (H_{min}) yang diperhitungkan mampu untuk memutar turbin guna membangkitkan listrik. pada saat T_2 pintu air dibuka untuk mengalirkan air dari dalam kolam menuju ke laut, selama T_2-T_3 turbin beroperasi membangkitkan listrik. Pada saat T_3 pintu air ditutup

sehingga permukaan air dalam kolam tidak berubah. berahirnya siklus surut akan disusul dengan siklus pasang, pada siklus pasang ini kolam penampung mulai di isi yaitu pada waktu $T_4 - T_5$, pada saat T_5 permukaan air dalam kolam akan sama dengan permukaan air dilaut sehingga pada saat ini pintu air ditutup agar permukaan air dalam kolam tidak berubah. Selanjutnya pembangkitan listrik pada siklus pasang surut berikutnya akan sama saja dengan urutan $T_1 - T_5$.

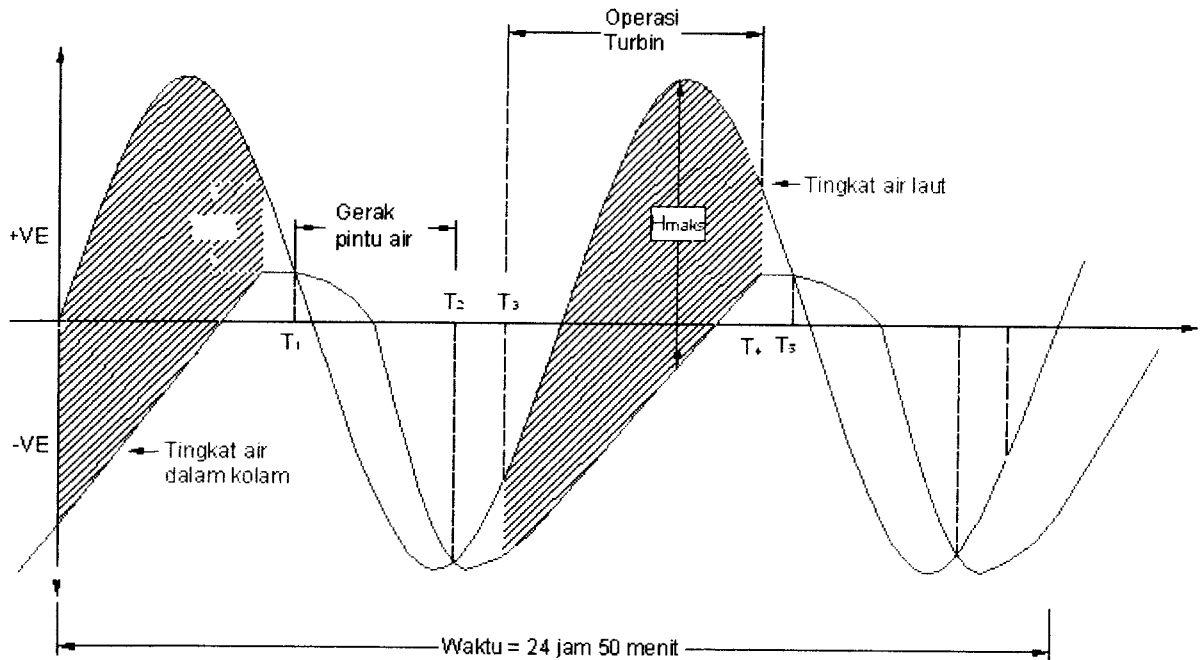


Gambar 3.7. Sistem daur air surut tunggal
(Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)

2. Sistem daur air pasang tunggal

Sistem daur air pasang tunggal merupakan kebalikan dari sistem daur air surut tunggal, dalam sistem daur air pasang tunggal tenaga diperoleh pada saat air laut sedang mengalami pasang. Pada awalnya kolam dibiarkan kosong terlebih dahulu, pada saat air laut pasang dan mencapai ketinggian minimal (H_{min}) air dialirkan kedalam kolam melalui turbin. Setelah periode pasang selesai dan periode surut mulai, air yang berada dikolam dibuang melalui pintu air ke laut bersamaan dengan turunya permukaan air laut. Pada saat air laut mencapai titik terendah maka pintu air ditutup agar kolam tetap kosong. Berahirnya periode surut

akan disusul dengan periode pasang, pada periode pasang ini listrik akan kembali dibangkitkan. Berikut akan digambarkan mekanisme kerja dari sistem daur air pasang tunggal.

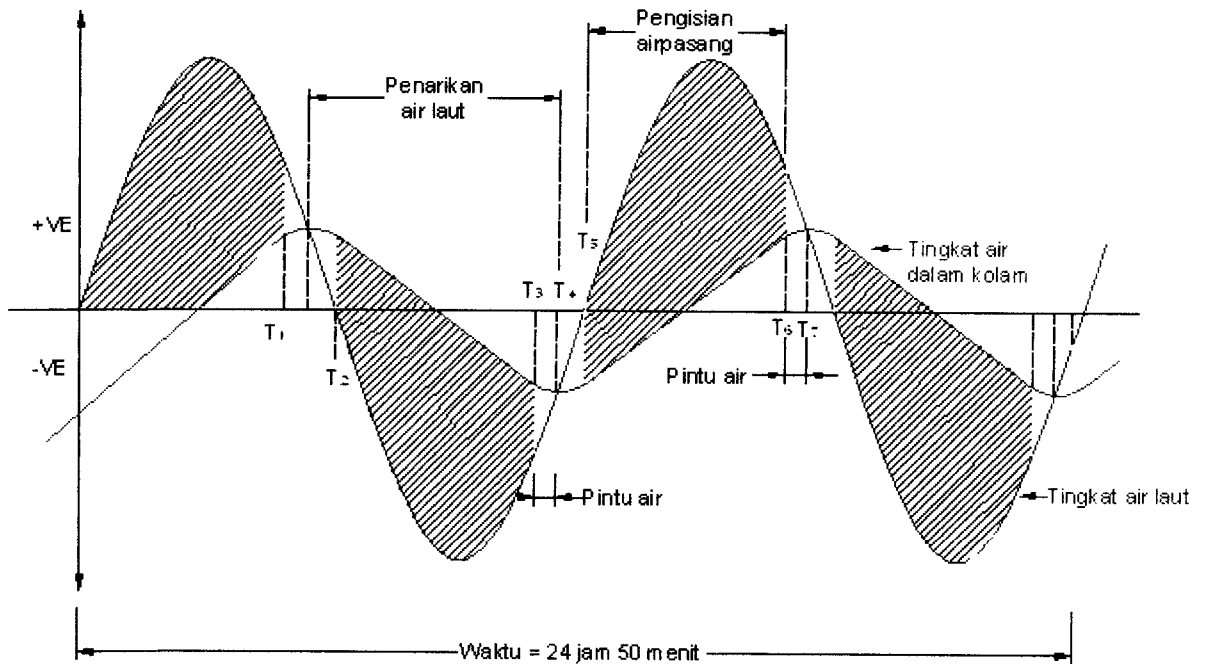


Gambar 3.8. Sistem daur air pasang tunggal
(Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)

Pada saat T_1 - T_2 laut sedang mengalami surut, pintu air dibuka agar air yang berada dalam kolam dapat keluar bersamaan dengan surutnya air laut, sehingga mencapai titik terendah. Pada saat permukaan air laut dan kolam penampung sama yaitu pada saat T_2 pintu air ditutup agar kolam tetap dalam keadaan kosong. T_2 - T_3 merupakan selang waktu tunggu agar air mempunyai perbedaan tinggi minimal (H_{min}) yang dianggap mampu untuk menggerakkan turbin, setelah beda tinggi minimal tercapai maka pada T_3 air mulai dimasukkan ke dalam kolam melalui turbin, sehingga listrik akan dibangkitkan selama T_3 - T_4 . Pada saat T_4 pintu air ditutup karena ketinggian air sudah tidak mampu memutar. T_4 - T_5 merupakan selang waktu tunggu agar permukaan air dalam kolam menjadi sama dengan laut yang sedang mengalami surut, pada saat T_5 pintu air dibuka untuk membuang air dari dalam kolam menuju laut yang sedang surut. Untuk selanjutnya, pembangkitan listrik pada siklus berikutnya akan sama seperti siklus sebelumnya.

3. Sistem daur ganda

Sistem ini merupakan gabungan dari kedua sistem di atas. Sistem ini sangat menguntungkan karena mampu membangkitkan tenaga listrik pada waktu pasang dan pada waktu surut.



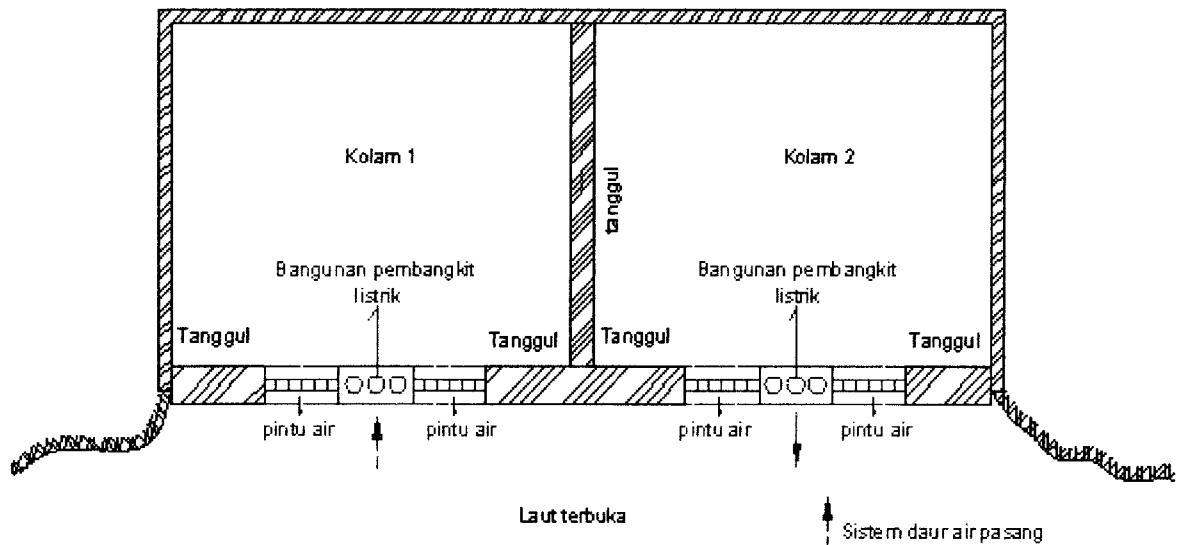
Gambar 3.9 Sistem daur ganda
(Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)

Pada saat T_1 ketika air laut dan air dalam kolam sama tinggi, pintu air dan katup turbin ditutup. Muka air dalam kolam tidak berubah, sedangkan air laut terus turun karena adanya siklus surut. T_1 - T_2 merupakan waktu tunggu agar air laut dan kolam mempunyai beda tinggi yang cukup untuk memutar turbin, saat ketinggian tersebut sudah dicapai pada saat T_2 katup turbin dibuka untuk mengalirkan air dari kolam menuju ke laut, sehingga energi listrik dapat dibangkitkan. Pada saat T_3 ketika terdapat lagi ketinggian minimum, katup turbin ditutup dan pintu air dibuka sehingga air dalam kolam dapat keluar dan pada saat T_4 muka air dalam kolam menjadi sama tinggi dengan permukaan air laut. Pada saat T_4 pintu air ditutup sehingga air dalam kolam tidak berubah, sedangkan di laut air naik karena sedang mengalami pasang. Pada saat T_5 ketika perbedaan muka air laut dan muka air kolam mencapai tinggi minimum, katup turbin kembali dibuka sehingga air akan masuk

dari laut kedalam kolam melalui turbin. Pada saat T_6 katup turbin ditutup dan pintu air dibiarkan terbuka hingga pada saat T_7 permukaan air dalam kolam akan sama tinggi dengan permukaan air dilaut. Untuk siklus pasang surut berikutnya metode kerja pembangkitan energi listrik akan sama saja dengan dengan siklus sebelumnya.

3.2.2 Susunan Kolam Ganda

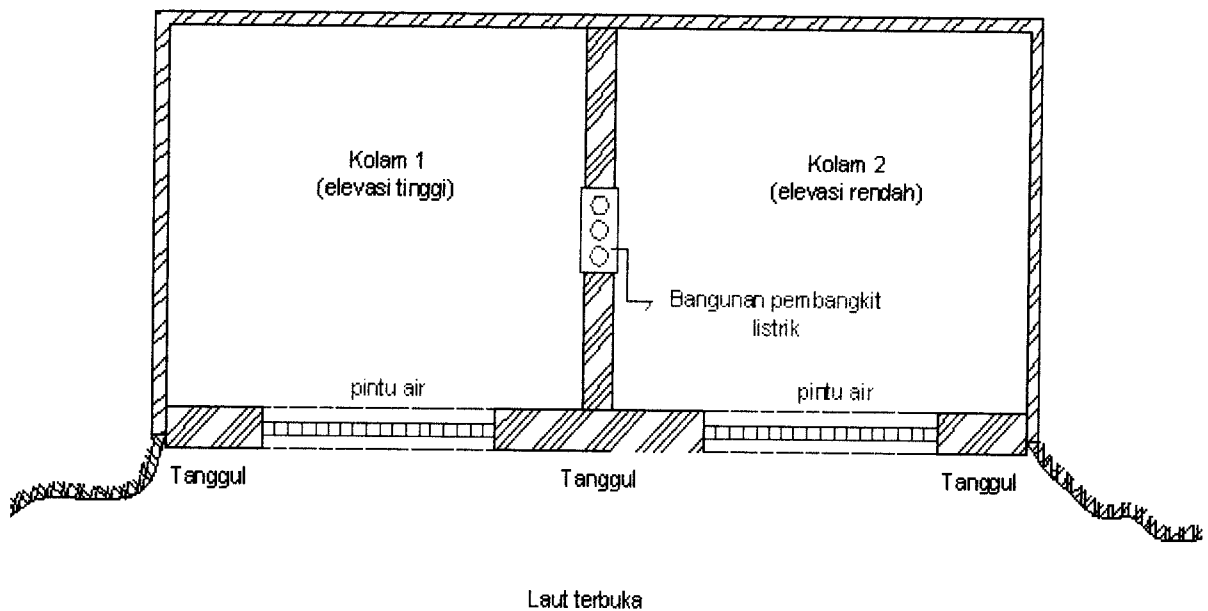
Dalam susunan kolam ganda, terdapat dua buah kolam dengan elevasai dasar kolam yang sama. Kolam pertama dan kolam kedua dibatasi oleh tanggul, sementara sisi kolam yang berhubungan dengan laut dilengkapi dengan pintu air dan turbin. Dalam susunan kolam ganda, masing-masing kolam boleh mempunyai sebuah bangunan pembangkit listrik. Kedua kolam dioperasikan secara bergantian, jika kolam pertama sedang membangkitkan listrik saat air laut sedang pasang (yaitu selama pengisian kolam), maka kolam kedua akan digunakan membangkitkan listrik saat laut sedang mengalami surut (yaitu pengosongan kolam). Susunan kolam ini dapat digambarkan sebagai gabungan dua susunan kolam tunggal, kolam pertama dengan menggunakan siklus air pasang tunggal dan kolam kedua menggunakan siklus air surut tunggal.



Gambar 3.10 Susunan kolam ganda
(Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)

3.2.3 Susunan Kolam Bersama

Susunan kolam bersama disebut juga dengan kerjasama sistem kolam ganda, susunan kolam ini ditandai dengan adanya dua kolam dengan elevasi dasar kolam yang berbeda dan dihubungkan melalui turbin. Kolam pertama mempunyai elevasi dasar kolam lebih tinggi dibandingkan dengan elevasi dasar kolam kedua. Kedua kolam ini juga mempunyai pintu air yang menghubungkan kolam dengan laut. Pintu pada kolam pertama dipergunakan untuk memasukan air dari laut menuju ke kolam pada saat terjadi pasang, sedangkan pintu kedua dipergunakan untuk mengeluarkan air dari dalam kolam menuju kelaut pada saat terjadi surut. Pada tanggul yang memisahkan kolam dengan laut hanya dilengkapi pintu-pintu air dan tidak dilengkapi dengan turbin (Gambar 3.11)



Gambar 3.11 Susunan Kolam Bersama
(Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)

Pengoperasian dalam susunan kolam bersama dilakukan dengan mengisi penuh kolam pertama pada saat air pasang, sementara kolam kedua dibiarkan kosong terlebih dahulu. Pada saat kolam pertama sudah penuh pintu air yang menghubungkan kolam pertama dengan laut ditutup agar volume tidak berubah karena adanya surut air laut. Kolam pertama yang sudah penuh airnya akan segera dipindahkan menuju ke kolam kedua yang masih

kosong. Tingkat permukaan kolam pertama akan turun karena airnya dipindahkan ke kolam kedua, sedangkan kolam kedua permukaan airnya akan bertambah tinggi karena dialiri air dari kolam pertama. Pada saat permukaan air di kolam pertama dan kedua menjadi sama tinggi, pintu air kolam kedua dibuka untuk mengeluarkan air menuju ke laut yang sedang surut. Air dikeluarkan dari kolam kedua menuju laut hingga mencapai titik surut terendah, pada titik surut terendah ini permukaan air dalam kolam kedua akan sama dengan permukaan air dilaut dan pada saat ini pintu air kolam kedua ditutup agar air tidak masuk kedalam kolam pada saat terjadi pasang. berakhirnya siklus surut akan disusul dengan datangnya siklus pasang, bila tingkat ketinggian air pasang menyamai ketinggian permukaan air dalam kolam pertama, maka pintu air kolam pertama dibuka kembali untuk mengisi kolam sampai dengan siklus pasang berhenti. Selanjutnya air dalam kolam pertama akan dialirkan kembali menuju ke kolam kedua dan dikeluarkan melalui pintu kolam kedua pada saat surut dan begitu seterusnya untuk siklus pasang dan surut berikutnya.

3.3 Tinjauan Topografi

Keadaan *topografi* daratan dan bawah laut harus memungkinkan untuk membangun suatu pembangkit listrik tenaga pasang surut dan untuk pengembangan di masa mendatang. Lokasi yang paling cocok untuk sebuah pembangkit tenaga air pasang surut ialah dalam sebuah teluk, kuala, atau *estuary*. Bagian dari kuala atau anak sungai ditanggul untuk menghasilkan sebuah kolam, yang kemudian akan dioperasikan dengan menghubungkannya dengan laut yang terbuka guna menghasilkan tenaga. Berikut adalah syarat-syarat ketepatan untuk memilih lokasi menurut M.M Dandekar dan K.N. Sharma adalah :

1. Tinggi air pasang pada lokasi yang diijinkan harus memadai sepanjang tahun.
2. Kuala atau *estuary* harus mempunyai suatu *geomorfologi*, yang dengan tanggul yang relatif pendek dapat dikembangkan sebagai kolam penampung air.
3. Lokasi yang diusulkan tersebut tidak mempunyai muatan endapan yang luar biasa. *Estuary* itu yang membawa endapan lumpur berat ke dalam laut, dan diperlukan untuk mengangkat endapan ke atas suatu kolam yang dikembangkan.
4. Lokasi yang dipilih harus bebas dari serangan ombak laut.

5. Lokasi yang dipilih harus sedemikian rupa sehingga akibat pembendungan *estuary* tidak terjadi perubahan yang berarti pada pola pasang surut.

Untuk kawasan Sumatra daerah yang ditinjau berdasarkan perbedaan muka air pasang dan surut tertinggi adalah Bagan Siapi api di propinsi Riau. Dengan pertimbangan tersebut daerah Bagan Siapi api mempunyai potensi lokasi *estuary* yang dapat dibangun menjadi sebuah kolam penampung untuk sarana pembangkit listrik tenaga pasang surut.

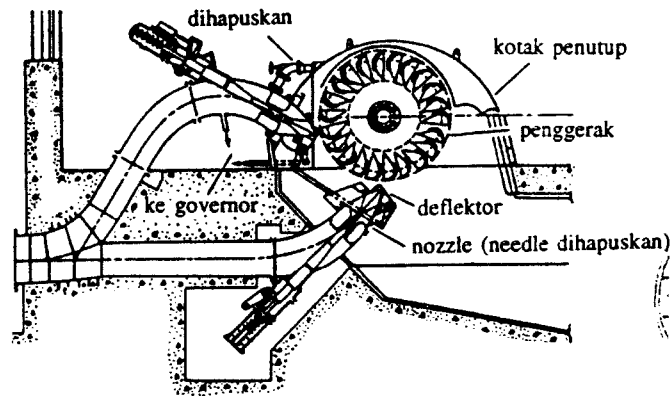
3.4 Turbin Air

Pemilihan turbin dapat direncanakan dengan baik apabila diketahui tinggi energi, yaitu tinggi muka air ditambah tinggi kecepatan tepat dimuka turbin. Tinggi energi yang dimaksud adalah tinggi muka air dalam kolam penampung air. Turbin air dibedakan menjadi dua golongan utama, yaitu turbin impuls dan turbin reaksi, contoh dari turbin impuls adalah Pelton Banki sedangkan contoh dari turbin reaksi adalah turbin Francis, Kaplan, dan Propeler. Untuk mendapatkan hasil energi yang optimal dari turbin, perlu dipilih karakteristik turbin yang sesuai dengan kondisi pergerakan air laut. Menurut karakteristik dari turbin, dalam penelitian ini ditetapkan memakai jenis turbin reaksi yaitu turbin kaplan. Dengan pertimbangan beda tinggi yang dihasilkan oleh pasang surut air laut kecil, sedangkan turbin kaplan dapat memproduksi energi dengan tinggi air jatuh yang rendah, antara 2 sampai 70 meter (M.M. Dandekar dan K.N. Sharma). Turbin kaplan dapat menghasilkan tenaga maksimum sampai 300000 daya kuda, Maksimum diameter roda 10 meter, dan kecepatan khusus turbinnya dapat berputar pada kisaran 300 sampai 1100 putaran tiap menit (*rotation per minute, rpm*), kecepatan khusus adalah kecepatan pada keadaan di mana mesin menghasilkan 1 daya kuda di bawah tinggi tekan 1 meter. Dan berdasarkan penggolongan turbin-turbin atas dasar kecepatan khusus, turbin Kaplan termasuk jenis turbin berkecepatan khusus tinggi yang dikenal sebagai turbin yang mempunyai mesin penggerak cepat. Berikut ini akan disajikan sebuah tabel yang menggambarkan tingkat ketinggian yang dibutuhkan untuk memutar turbin.

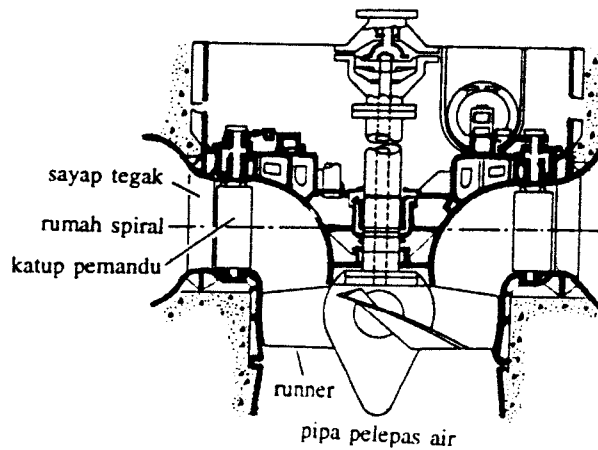
Tabel 3.1 Karakteristik turbin

Penggerak	Kecepatan khusus (rpm)			Tinggi air jatuh (m)	Tenaga (Dk)	Diameter turbin maks (m)
	Lambat	Sedang	Cepat			
Pelton	4-15	16-30	31-70	300-2000	330000	5,5
Francis	60-150	151-250	251-250	30-500	960000	10
Kaplan	300-450	451-450	701-1100	2-70	300000	10

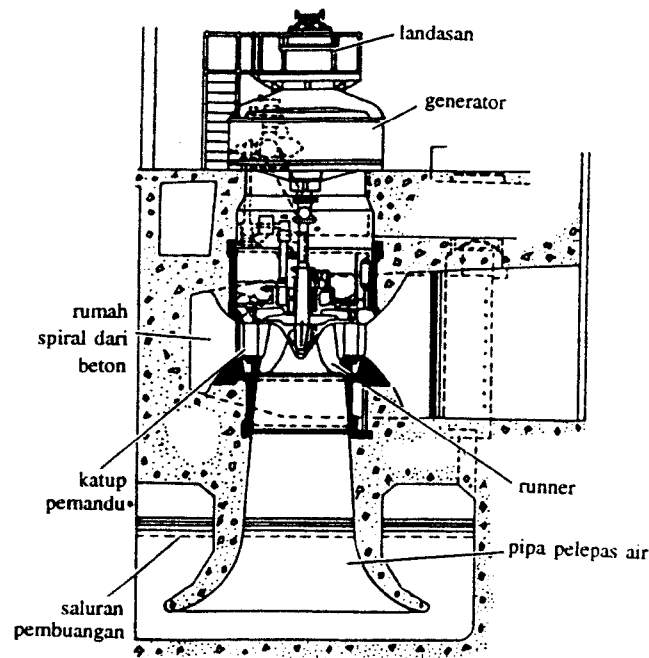
(sumber Dandekar, M.M dan Sherma, K.N 1991)



Gambar 3.12 Turbin Pelton
(O.F. Patty 1995)



Gambar 3.13 Turbin Kaplan
(O.F. Patty 1995)



Gambar 3.14 Turbin Francis

(O.F. Patty 1995)

Agar dapat menjamin kerja di sekitar daerah efisiensi maksimum serta untuk mencegah peristiwa terjadinya gelembung-gelembung uap di dalam cairan (air laut) yang mengalir apabila tekanan di tempat tersebut sama dengan tekanan uapnya (*kavitasi*), maka tinggi air jatuh yang diperbolehkan harus dibatasi. Hal tersebut dilakukan dengan *deviasi* nilai persen dari tinggi air jatuh yang direncanakan. Dalam penelitian ini penggunaan turbin Kaplan menggunakan efisiensi sebesar 75 persen. Simulasi Energi Pasang Surut Optimal Sistem daur Ganda dengan Kolam Tunggal menggunakan mekanisme kerja di mana turbin mulai dijalankan pada waktu air kolam dan laut memiliki selisih ketinggian 2 meter sampai ketinggian air pasang ataupun surut mencapai puncak, kemudian pintu air mulai dibuka dan turbin masih bisa menjalankan produksi sampai ketinggian antara air kolam dan laut 2 meter. Dalam pengoperasian pembangkit listrik pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal turbin berhenti operasi pada waktu pipa air ditutup bersamaan dengan pintu air ditutup dan dioperasikan lagi ketika pipa air dibuka yaitu saat ketinggian air kolam dan laut berjarak 2 meter tanpa dibukanya pintu air. Hal ini dimaksudkan untuk

mendapatkan nilai energi listrik yang tinggi dan menekan biaya perawatan turbin ditinjau dari umur penggunaan.

Turbin Kaplan merupakan turbin-turbin aliran aksial. Penggerak turbin ini menyerupai sebuah ulir atau sebuah baling-baling, di mana baling-baling berbentuk lengkung dinaikkan. Baling-baling bertindak sebagai *cantilever* didukung hanya pada pusat. Jumlah dayung untuk sebuah baling-baling turbin kaplan bervariasi dari 3 sampai 8 tergantung pada jangkauan (*range*) kecepatan spesifik. Dalam hal (*case*) turbin-turbin Kaplan, rumah-rumah poros penyelesaian mekanikal yang otomatis mengubah dayung tergantung pada beban. Garis tengah poros dari tipe ini tergantung pada ketinggian di bawah fungsi turbin. Untuk ketinggian air jatuh yang rendah, garis tengah poros sekitar $0,35 \times$ dayung *tip-to-tip* garis tengah keseluruhan, tetapi bila tinggi jatuh air naik di atas 50 meter, garis tengah poros turbin menjadi lebih dari 1,5 dari garis tengah keseluruhan dan turbin menjadi tidak ekonomis dibandingkan dengan turbin Francis.

3.5 Perkiraan Energi Listrik Yang Dihasilkan

Energi yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit listrik tenaga air pasang surut tergantung pada jarak luasan air pasang dan kapasitas volumetrik kolamnya. Energi listrik yang dibangkitkan oleh pembangkit listrik tenaga pasang surut dapat diperkirakan secara kasar dengan metode-metode tertentu. Menurut Dandekar, M.M dan Sherma, K.N, ada tiga metode yang dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya energi listrik yang dihasilkan, ketiga metode tersebut mengasumsikan bahwa cara pengaliran air bersifat tetap (*steady flow*). Ketiga metode tersebut adalah sebagai berikut.

3.5.1 Metode 1

Energi listrik dapat dibangkitkan pada saat pengisian kolam (saat air laut pasang) maupun pengosongan kolam (saat air laut surut). Pada metode ini energi listrik yang dibangkitkan tergantung pada lamanya pemanfaatan waktu produksi. Perkiraan energi listrik secara kasar dihitung dengan menggunakan rumus-rumus sebagai berikut.

$$V = A \times \Delta h \quad (3.3)$$

dengan :

A = Luas kolam (m^2)

Δh = Beda tinggi pasang dan surut (m)

V = Volume kolam (m^3)

Debit air rata-rata v

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.4)$$

Dengan :

Q = Debit air rata-rata ($m^3/detik$)

t = Lamanya pembangkit dalam satu kali operasi produksi (detik)

Besarnya tenaga pada beberapa saat

$$P = \eta_0 \times \frac{hp \times Q \times \gamma}{75} \text{ DK} \quad (3.5)$$

dengan :

hp = Beda tinggi pasang surut rata-rata (m)

γ = Berat jenis air laut (Kg/m^3)

η_0 = Efisiensi turbin (diambil 0,75)

P = Besarnya tenaga pada suatu saat ($Dk = \text{Daya kuda}$)

Jumlah energi dalam kWh/daur air pasang

$$E = \int P \, dt = \int \eta_0 \times \frac{hp \times Q \times \gamma}{75} \, dt \times 0,736 \quad \text{kW} \quad (3.6)$$

Dengan :

E = Jumlah energi (kW)

Dalam satu tahun yang terdiri 365 hari, untuk tipe pasang surut harian ganda terdapat 705 daur air pasang penuh maka,

Untuk tipe pasang surut harian ganda akan diperoleh :

$$E_{(1 \text{ Tahun})} = \eta_0 \frac{hp \times Q \times \gamma}{75} \times t \times 705 \times 0,736 \quad \text{kWh} \quad (3.7)$$

Bila pembangkitan listrik menggunakan sistem daur air ganda akan diperoleh :

$$E_{(1 \text{ Tahun})} = 2 \times \eta_o \frac{\text{hp} \times Q \times \gamma}{75} \times t \times 705 \times 0,736 \text{ kWh} \quad (3.8)$$

3.5.2 Metode 2

Dalam memperkirakan energi secara kasar metode ini dapat dijadikan salah satu alternatif pilihan. Dalam metode ini, waktu pembangkitan energi listrik diabaikan. Rumus yang digunakan dalam perhitungan energi listrik secara kasar adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{1}{2} \times \eta \times \gamma \times A \times R^2 \quad (3.9)$$

dengan :

E = Jumlah energi satu daur air pasang (kW)

A = Luas kolam (m²)

R = Jarak luasan air pasang (m)

η = 20 sampai 30 persen (diambil 30 persen)

3.5.3 Metode 3

Perkiraan energi yang dihasilkan dari tenaga pasang surut juga dapat dihitung dengan menggunakan rumus empiris berikut ini.

$$P = 311 \times A \times R^2 \text{ kW} \quad (3.10)$$

Dengan :

P = Kapasitas tenaga yang dibutuhkan (kW)

A = Luas kolam (m²)

R = Jarak luasan air pasang (m)

Debit air maksimum (Qmaks) yang keluar dari kolam dihitung dengan menggunakan rumus

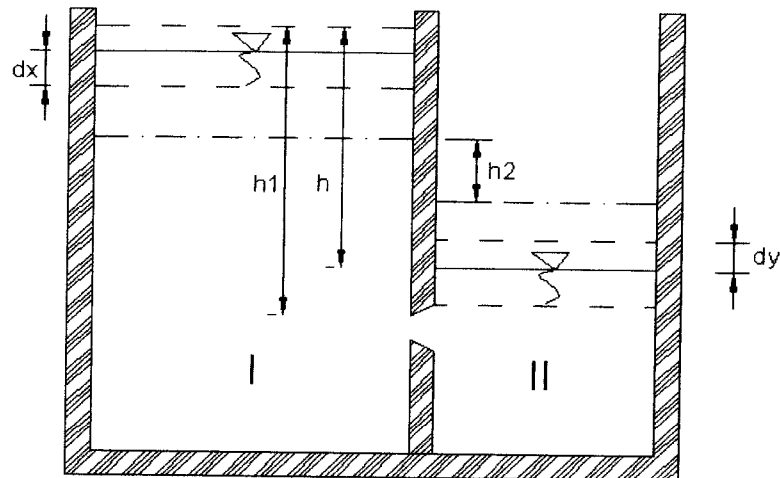
$$Q_{\text{maks}} = 57 \times A \times R \text{ m}^3/\text{detik} \quad (3.11)$$

Dengan memperkirakan 30 persen produksi, persamaan di atas menghasilkan perkiraan produksi energi ($E_{(1\text{tahun})}$) tiap tahun sebagai :

$$E_{(1 \text{ tahun})} = 5,9 \times 10^5 \times A \times R^2 \text{ kWh} \quad (3.12)$$

3.6 Prinsip Pengaliran Tergenang

Kolam penampungan ini dapat berupa sebuah teluk, bagian dan anak sungai, daerah meander sungai dan daerah rawa yang terkena pengaruh pasang surut. Karena pengaruh air laut yang mengalami peristiwa pasang dan surut, begitu juga di kolam karena proses pengisian dan pengosongan kolam untuk proses pemutaran turbin maka menyebabkan aliran *unsteady*.



Gambar 3.15. Proses pengisian dan pengosongan kolam
(Bambang Triatmodjo 1996)

Apabila diketahui : luas kolam I = A_1

luas kolam II = A_2

luas lubang = A

Dipandang pada saat beda tinggi h

$$Q = C_d \times A \sqrt{2gh} \quad (3.13)$$

$$dV = Q \times dt$$

$$= C_d \times A \sqrt{2gh} \times dt \quad (3.14)$$

Dimana :

C_d = koefisien debit

Apabila tidak ada penyelidikan khusus biasa diambil $C_d = C_v \times C_c = 0,97 \times 0,64 = 0,62$

g = gaya gravitasi ($9,8 \text{ m/det}^2$)

Waktu yang diperlukan untuk merubah beda tinggi dari h_1 menjadi h_2 :

$$t = 2 \times \frac{A_1 \times A_2}{A_1 + A_2} \times \frac{1}{C_d \times A \sqrt{2 \times g}} \times (h_1^{1/2} - h_2^{1/2}) \quad (3.15)$$

Dengan :

t = Lama waktu pembangkit tenaga dalam satu operasi

Untuk $h_2 = 0$

$$t = 2 \times \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times \frac{1 \times h_1}{C_d \times A \sqrt{2 \times g \times h_1}}$$

$$t = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times \frac{V}{Q_0} \quad (3.16)$$

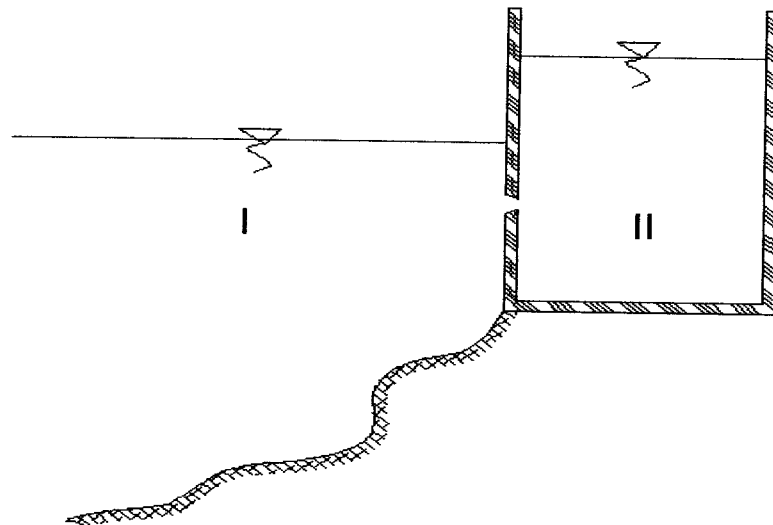
$$V = A_1 \times h_1$$

$$Q_0 = C_d \times A \sqrt{2 \times g \times h_1} \quad (3.17)$$

Dengan :

Q_0 = debit permulaan

Keadaan khusus :



Gambar 3.16 Kolam I dengan luas permukaan yang besar.

(Bambang Triatmodjo 1996)

Jika $A_1 = \infty$ (Gambar 3.16)

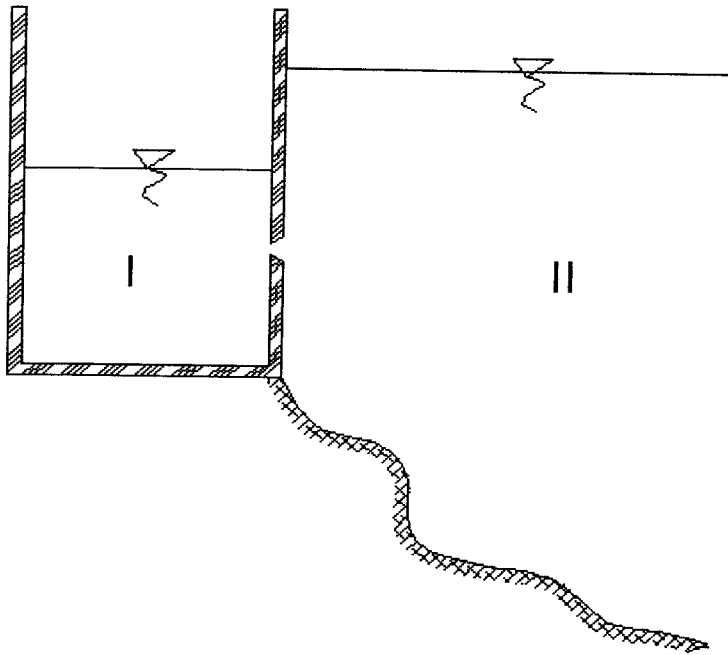
Karena permukaan zat cair di kolam I sedemikian luasnya sehingga permukaan tersebut tidak berubah elevasinya.

$$t = 2 \times \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times \frac{V}{Q_0} \quad (3.18)$$

$$t = 2 \times \frac{A_2}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \times \frac{V}{Q_0}$$

$$t = 2 \times \frac{A_2}{1 + \frac{A_2}{\infty}} \times \frac{V}{Q_0}$$

$$t = 2 \times \frac{V}{Q_0} \quad (3.19)$$



Gambar 3.17 Kolam II dengan luas permukaan yang besar.

(Bambang Triatmodjo 1996)

Jika $A_2 = \infty$ (Gambar 3.17)

Karena permukaan zat cair di kolam II sedemikian luasnya sehingga permukaan tersebut tidak berubah elevasinya.

$$t = 2 \times \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times \frac{V}{Q_0} \quad (3.20)$$

$$t = 2 \times \frac{A_2}{\frac{A_1}{A_2} + 1} \times \frac{V}{Q_0}$$

$$t = 2 \times \frac{A_2}{\frac{A_1}{\infty} + 1} \times \frac{V}{Q_0}$$

$$t = 2 \times \frac{V}{Q_0} \quad (3.21)$$

Jika nilai waktu (t) telah diketahui, ketinggian air pasang dan surut air laut diketahui maka nilai yang dicari adalah volume kolam (V kolam)

$$V = \frac{A_1 + A_2}{A_2} \times \frac{Q_0 \times t}{2} \quad (3.22)$$

3.7 Pengaliran Melalui Pipa

Alat pengangkut (penghubung) adalah berupa pipa-pipa yang mengalirkan air dari tempat yang mempunyai ketinggian air lebih menuju tempat turbin, selanjutnya air dialirkan kembali ke tempat yang lebih rendah (muka air) dari muka air di tempat awal dialirkan. Dalam penelitian ini diameter pipa ditetapkan 1,5 meter, luasan pipa (A_p) 1,76625 meter persegi. Pengaliran dalam pipa untuk zat cair ideal tidak ada tenaga yang hilang, tetapi pada zat cair biasa (mempunyai kekentalan) akan terjadi gesekan antara zat cair dengan pipa dan (atau) antara zat cair dengan zat cair itu sendiri, sehingga terjadi kehilangan tenaga. Kehilangan tenaga ini menurut Weisbach berbanding langsung dengan tinggi kecepatan. Pada pembangkit listrik tenaga pasang surut pengaliran air laut melalui pipa juga mengalami kehilangan tenaga. Jika panjang pipa dalam penelitian 5 m, maka pipa dalam proyek tersebut dapat berfungsi sebagai curat, sebab memenuhi syarat :

$$L > 1 \frac{1}{2} d \quad (3.23)$$

di mana :

L = Panjang pipa (m)

d = Diameter pipa (m)

Dengan demikian suatu lubang yang cukup tebal juga dapat dianggap sebagai curat. Maka persamaan *Bernoulli* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h \quad (3.24)$$

Dengan:

H = Tinggi tempat (satuan panjang)

Z = Tinggi tempat (satuan panjang)

h = Tenaga yang hilang dalam perjalanan (satuan panjang)

$\frac{p}{\gamma}$ = Tinggi tekanan (satuan panjang)

$\frac{V_2^2}{2g}$ = Tinggi kecepatan (satuan panjang)

Dari persamaan diatas didapat koefisien kecepatan (*coefficient of velocity, Cv*) ialah nilai banding antara kecepatan arus pada batas kontraksi dengan kecepatan teoritis. Di mana kecepatan teoritis (V_{th}) adalah kecepatan arus di tempat kontraksi sama dengan kecepatan tinggi jatuh setinggi muka air sampai lubang (hukum *Torricelli*).

$$V_{th} = \sqrt{2 \times g \times H} \quad (3.25)$$

Dengan :

V_{th} = Kecepatan teoritis (m/detik)

g = Percepatan gravitasi, di wilayah Indonesia sebesar 9,78 m/detik² (Sumber: M.M dan Sherma, K.N, setrusnya dalam perhitungan nilai percepatan gravitasi bumi yang digunakan adalah 9,78 m/detik²)

H = Tinggi air jatuh (satuan panjang)

Sehingga didapat koefisien debit (*coefficient of discharge, Cd*) ialah nilai banding antara debit yang sebenarnya dengan debit teoritis sebesar 0,82. Dari persamaan tersebut diatas, maka debit air yang melauai lubang curat dapat diketahui dengan persamaan :

$$Q = C_d \times A_p \times \sqrt{2 \times g \times H} \quad (3.26)$$

Dengan :

Q = Debit air yang melalui curat (m³/detik)

C_d = Koefisien debit (0,82)

A_p = Luas curat/pipa (m²)

3.8 Hipotesis

Indonesia merupakan Negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang di dunia dan mempunyai 90 stasiun pasang surut yang tersebar di sepanjang garis pantai dari Sabang sampai Merauke. Beberapa stasiun pasang surut mempunyai perbedaan tinggi air pasang dan surut yang memungkinkan untuk dimanfaatkan sebagai sumber tenaga pembangkit listrik. Dari beberapa stasiun pasang surut yang mempunyai potensi sebagai sumber tenaga pembangkit listrik, Peneliti mengambil kasus hanya untuk kawasan pulau Sumatra khususnya Bagan Siapi-api. Pasang air tertinggi pada daerah ini adalah 6,6 m sedangkan surut terendah adalah 0,2 m dihitung dari muka air laut rata-rata.

Berdasarkan kondisi pasang surut yang berada di Bagan Siapi-api serta kondisi topografi peneliti dapat menarik sebuah kesimpulan sementara, bahwa pada daerah ini dimungkinkan untuk dibangun pembangkit listrik tenaga pasang surut dan akan menghasilkan energi listrik yang cukup besar.

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1 Ketersediaan dan Kualitas Data

Dalam penelitian potensi pasang surut untuk pembangkit listrik, peneliti menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Dinas *Hidro-Oceanografi* TNI AL. Data ini diperoleh berdasarkan *survey* lapangan yang dilakukan oleh Dinas *Hidro-Oceanografi* TNI AL. Selain berdasarkan data primer pihak Dinas *Hidro-Oceanografi* TNI AL data pasang surut ini juga diperoleh dari perhitungan ramalan pasang surut air laut yang dilakukan dengan menggunakan metode *Admiralty*. Ramalan data pasang surut menunjukkan kedudukan air setiap satu jam dalam satu hari selama satu tahun. Perlu diperhatikan bahwa sifat laut selalu berubah-ubah, terutama karena pengaruh angin kencang, banjir di hulu sungai yang tidak diperhitungkan dalam ramalan pasang surut dapat menyebabkan terjadinya penyimpangan-penyimpangan dari kenyataan dilapangan. Terlepas dari hal itu peramalan data pasang surut ini dianggap mendekati kenyataan yang sebenarnya.

4.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan kegiatan pengumpulan data-data yang diperlukan dalam penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Data pasang surut selama satu tahun.

Data pasang surut yang digunakan adalah data pencatatan pasang surut tahun 2004 yang dikeluarkan oleh Dinas *Hidro-Oceanografi* TNI AL, khususnya data stasiun pasang surut yang berada di kawasan Sumatra.

2. Peta topografi dan situasi.

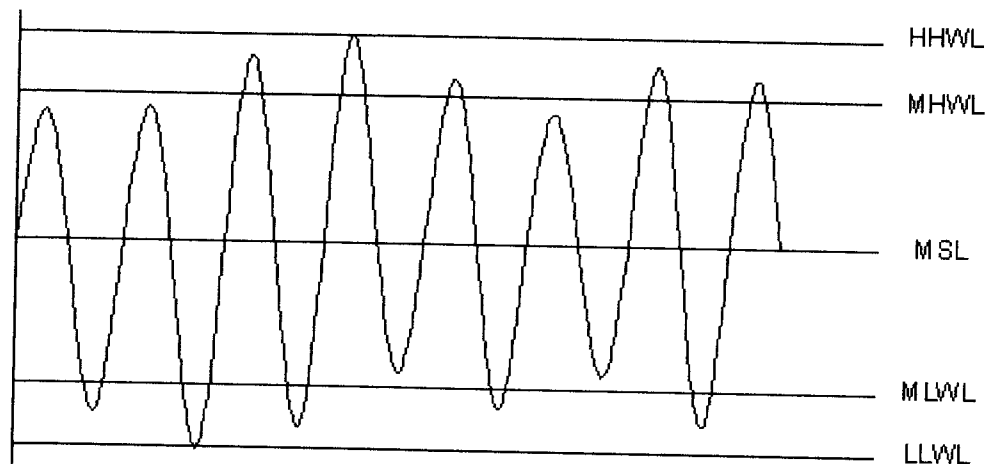
Peta *topografi* yang digunakan adalah peta *topografi* Bagan Siapi api karena menurut *hipotesis* peneliti daerah ini memiliki potensi tertinggi untuk kawasan Sumatra.

3. Data Turbin.

Data turbin digunakan untuk menentukan beda tinggi minimal yang masih bisa dilayani turbin untuk menghasilkan energi listrik, dan juga mengetahui karakteristik turbin yang memiliki tinggi jatuh yang rendah.

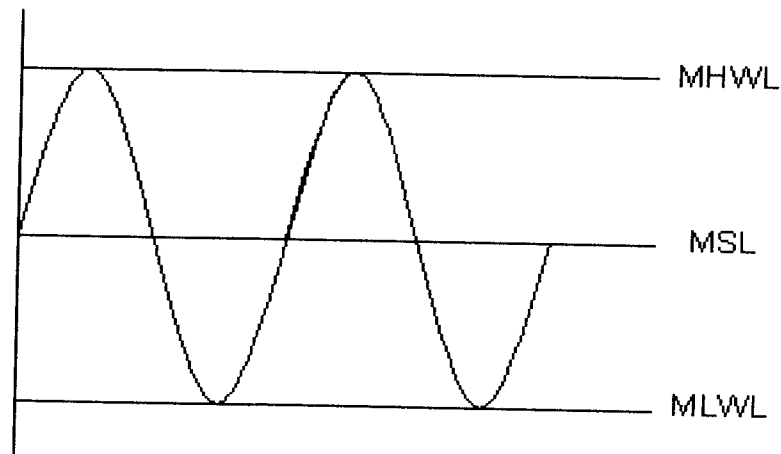
4.3 Penentuan Gelombang Pasang Surut Rencana

Data pasang surut yang diperoleh selama satu tahun digambarkan dalam sebuah grafik pasang surut sehingga dapat dilihat perbedaan ketinggian air pasang dan surut. Dari grafik pasang surut dalam satu periode tertentu dapat ditentukan ketinggian air pasang tertinggi dan air surut terendah (Gambar 4.1).



Gambar 4.1 Grafik variasi pasang surut dalam periode tertentu
(Bambang Triatmodjo 1996)

Dari grafik pasang surut tersebut dapat diketahui *Highest High Water level* (HHWL) yaitu muka air tertinggi, *Mean High Water Level* (MHWL) yaitu muka air tinggi rata-rata, *Mean Sea Level* (MSL) yaitu muka air rerata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata, *Lowest Low Water Level* (MLWL) yaitu muka air terendah, *Mean Low Water Level* (MLWL) yaitu muka air rendah rata-rata. Dalam perencanaan sebuah bangunan pantai perlu adanya gelombang rencana yang diambil dari variasi gelombang yang ada. Gelombang rencana yang dianggap mewakili variasi gelombang yang ada diambil berdasarkan kondisi MHWL dan MLWL, sehingga dari gambar 4.1 dapat diambil sebuah gelombang rencana sebagai berikut (Gambar 4.2). Gelombang pasang surut dianggap sebagai gelombang sinusoidal yang mempunyai periode tetap dengan tinggi gelombang adalah jarak antara MHWL dengan MLWL.



Gambar 4.2 Gelombang pasang surut rencana

4.4 Metode Analisis

Metode analisis yang digunakan dimulai dari pengumpulan data yang dibutuhkan yaitu, data pasang surut minimal 1 tahun, data karakteristik turbin, peta topografi di daerah potensial. Setelah data pasang surut minimal 1 tahun diketahui kemudian dicari gelombang rencana (MHWL dan MLWL), Turbin yang akan dipakai dengan tinggi air jatuh untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi yang paling rendah diketahui, serta identifikasi lokasi di daerah potensial yang memiliki beda tinggi pasang surut layak untuk dibangun pembangkit listrik tenaga pasang surut diketahui, maka dapat kita tentukan dimensi kolam yang akan dibangun. Dimensi kolam yang akan dibangun berdasarkan acuan luas kolam minimal yang masih layak untuk dibangun dan luas kolam optimum yang layak untuk dibangun untuk menghasilkan energi listrik. Setelah semua data yang dibutuhkan diketahui maka dari proses perhitungan dapat diketahui jumlah energi listrik yang dihasilkan selama 1 tahun.

4.5 Data Masukan

Sebagai data masukan (*input data*) ada enam variabel bebas yang harus diketahui. Variabel bebas adalah sebuah nilai yang dapat ditentukan berdasarkan acuan tertentu sebelum masuk dalam proses penghitungan, enam variable yang dimaksud yaitu.

1. Data tinggi muka air pasang tertinggi (*highest high water level*, HHWL).

Data yang akan dianalisa membutuhkan data tinggi muka air pasang tertinggi dalam jangka waktu setahun.

2. Data tinggi muka air surut terendah (*lowest low water level*, LLWL).

Data muka air rendah terendah adalah data masukan dari data tinggi muka air surut terendah dalam setahun.

3. Data tinggi muka air pasang rata-rata (*mean high water level*, MHWL).

Data tinggi muka air pasang rata-rata adalah data masukan dari data tinggi muka air pasang rata-rata dalam kurun waktu setahun.

4. Data tinggi muka air surut rata-rata (*mean low water level*, MLWL).

Data tinggi muka air surut rata-rata adalah data masukan dari data tinggi muka air surut rata-rata dalam kurun waktu setahun.

5. Data periode pasang/surut (Tps).

Data periode pasang/surut adalah waktu rata-rata pasang/surut dalam setahun.

6. Data tipe pasang surut (d).

Tipe pasang surut akan mempengaruhi jumlah pengoperasian pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal dalam satu hari. Untuk tipe pasang surut harian tunggal dan tipe pasang surut campuran condong keharian tunggal masukan datanya 1 ($d = 1$), yang berarti terjadi 2 kali pengoperasian dalam satu hari dan untuk tipe pasang surut harian ganda dan tipe pasang surut campuran condong keharian ganda masukan datanya 2 ($d = 2$), yang berarti 4 kali pengoperasian dalam satu hari.

7. Waktu membuka pintu air (Tmp).

Data masukan ini disesuaikan dengan data waktu pasang/surut (Tps) dan data tipe pasang surut ditempat tersebut. Sehingga dapat ditentukan waktu yang tepat untuk membuka pintu air waktu mengisi kolam maupun nengosongkan kolam di luar waktu produksi. Waktu membuka pintu air ini berkisar antara 15 menit sampai 30 menit, untuk pembangkit listrik tenaga pasang surut yang menggunakan sistem daur ganda dengan kolam tunggal. Waktu membuka pintu air ini dibatasi nilai minimal 15 menit, hal ini disebabkan jika waktu yang digunakan kurang dari 15 menit akan menyebabkan luas pintu air semakin besar dan sistem kerja *hidrolis* pintu air dalam membuka dan menutup kurang efektif. Dan dibatasi waktu membuka pintu air lebih dari 30 menit dikarenakan semakin

besar waktu membuka pintu air akan menyebabkan energi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik system daur ganda menggunakan kolam tunggal semakin kecil.

8. Jumlah turbin yang dipasang (j).

Jumlah turbin yang dipasang akan mempengaruhi produksi energi yang dihasilkan, semakin banyak turbin yang dipasang semakin besar pula produksi energi yang akan dihasilkan.

9. Luas kolam yang akan dibangun (Ak).

Luas kolam yang akan dibangun harus lebih besar dari batas minimal luas kolam minimal yang disyaratkan. Luas kolam minimal dalam penelitian ini adalah luas kolam yang didapat dari debit masukan air tetap dari awal produksi sampai ketika air laut pasang/surut tertinggi dan turbin berhenti produksi. Jumlah turbin juga mempengaruhi penentuan luas kolam, untuk itu luas kolam yang akan dibangun dibagi jumlah turbin yang akan dipasang harus tetap lebih besar dari luas kolam minimal.

4.6 Data Keluaran

Data keluaran dalam proses penghitungan adalah jumlah energi listrik yang dihasilkan selama 1 tahun ($E_{1 \text{ tahun}}$). Energi listrik yang dihasilkan selama 1 tahun dalam penelitian sebagai variabel tergantung, variabel tergantung adalah variabel yang besarnya nilai dipengaruhi (tergantung) dari besarnya variabel bebas

4.7 Data Daerah Penelitian

Daerah penelitian dipilih stasiun pasang surut yang berada di kawasan pulau Sumatra. Pulau Sumatra mempunyai 29 stasiun pasang surut dengan perbedaan ketinggian pasang surut yang beragam, untuk lebih jelasnya akan disajikan dalam table 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Pasang surut kawasan Sumatra

no	Lokasi	HHWL(m)	LLWL(m)	MSL(m)
1	Sabang	1,80	0,00	0,90
2	Blang Lancang	2,20	0,10	1,10
3	Teluk Aru	2,70	0,20	1,50

Tabel 4.1 Lanjutan

no	Lokasi	HHWL(m)	LLWL(m)	MSL(m)
4	Kuala Tanjung	2,90	0,20	1,60
5	Belawan Deli	2,80	0,30	1,50
6	Sungai Asahan	4,00	0,20	2,10
7	Sibolga	1,30	0,20	0,70
8	Gunung Sitoli	1,30	0,20	0,70
9	Padang (Teluk Bayur)	1,50	0,20	0,70
10	Siberut (Muara sungai Siberut)	1,40	0,20	0,70
11	Bagan Siapi api	6,60	0,20	3,20
12	Dumai (Dermaga Caltex)	3,60	0,20	1,70
13	Bengkalis	3,10	0,30	1,80
14	Sungai Siak (Pelabuhan)	3,30	0,40	1,80
15	Sunga Paking	3,40	0,20	1,80
16	Blandong	4,20	0,20	2,10
17	Pasir Panjang (Karimun Barat)	1,50	0,10	1,80
18	Sungai Indragiri	4,40	0,10	2,80
19	Sungai Jambi (Kuala Nur)	3,90	0,20	2,50
20	Batu Ampar (pulauBatam)	3,20	0,10	1,85
21	Singapura	3,40	0,20	2,00
22	Selat Kijang	2,00	0,10	1,25
23	Tarempa	2,10	0,20	1,10
24	Muntor	4,20	0,10	1,95
25	Sungai Musi (Ambang Alur)	3,90	0,20	1,90
26	Pulau Baai (Bengkulu)	1,50	0,10	0,70
27	Panjang	1,50	0,10	0,80
28	Bakahuni	1,00	0,20	0,60
29	Suralaya	1,00	0,20	0,60

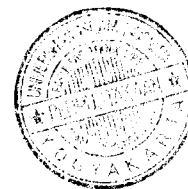
Sumber : Analisis data

4.8 Studi Kelayakan

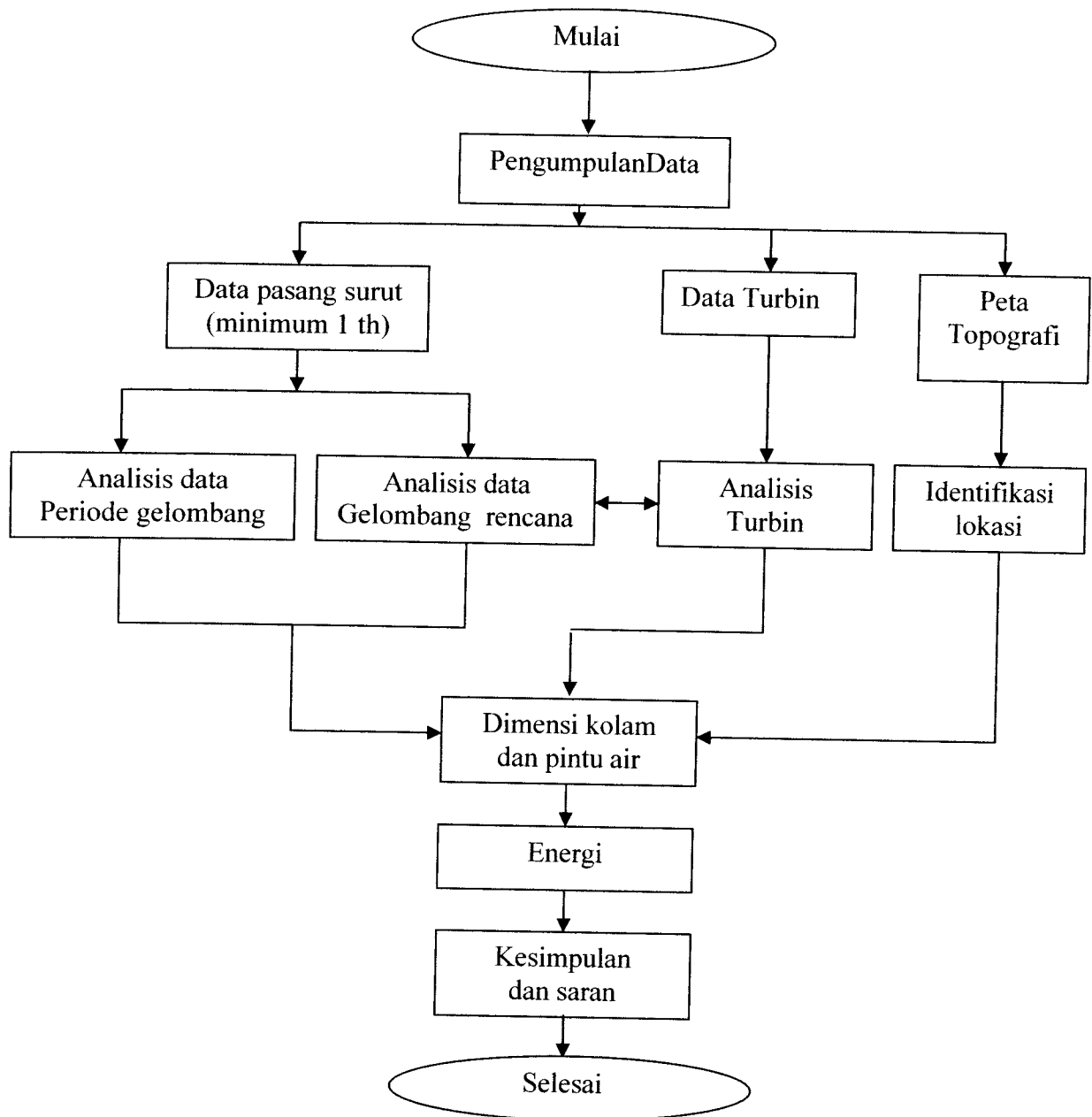
Studi kelayakan dilakukan untuk mengetahui kondisi daerah tersebut layak untuk dibangun pembangkit listrik tenaga pasang surut, ditinjau dari segi kemampuan turbin. Dalam hal ini berdasarkan karakteristik dari turbin yang ada, maka dipakai turbin Kaplan yang mempunyai batasan tinggi jatuh minimal setinggi 2 meter. Dari sudut ekonomi pembangunan proyek tersebut kurang efisien jika produksi yang dihasilkan kecil jika dibandingkan dengan biaya pembangunan yang besar. Hal tersebut disebabkan produksi energi yang dihasilkan sangat tergantung dari beda tinggi rata-rata ($\Delta \bar{h}$) air laut. Maka dalam penelitian ini batasan kelayakan pembangunan proyek untuk beda tinggi rata-rata ($\Delta \bar{h}$) ditetapkan harus lebih besar atau sama dengan 2,5 meter, dengan pertimbangan tinggi jatuh air yang dilayani turbin Kaplan untuk produksi energi minimal 2 meter, sedangkan dengan tinggi jatuh minimal 2,5 meter yang disyaratkan, maka didapat pemanfaatan produksi minimal 0,5 meter per satuan waktu dalam satu kali operasi produksi.

4.9 Analisis Data

1. Analisis data pasang surut untuk mengetahui beda tinggi rata-rata air pasang surut.
2. Analisis data pasang surut untuk mengetahui perkiraan energi listrik yang dikandung di suatu daerah di kawasan Sumatra.
3. Membuat model simulasi untuk penentuan besarnya potensi wilayah dengan menggunakan sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal.



4.10 Diagram Alir Penelitian



BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Pendahuluan

Seperti yang diuraikan dalam BAB I, bahwa tujuan dari penelitian adalah untuk menentukan energi pasang surut yang optimal yang dapat digunakan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut. Dari dasar pertimbangan di atas maka diadakan penelitian Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut dalam hal ini penelitian menggunakan sistem susunan kolam tunggal dengan daur ganda. Penelitian ini dilakukan terhadap pulau Sumatra yang memiliki 29 stasiun pasang surut (Dishidros TNI-AL, 2004). Data-data pasang surut dalam penelitian ini diambil dari Dinas *Hidro-Oceanografi* Tentara Nasional Indonesia-Angkatan Laut (Dishidros TNI-AL) antara bulan Januari sampai Desember tahun 2004.

5.2 Potensi Pembangkit Tenaga Listrik Pasang Surut di Kawasan Sumatra

Kawasan Sumatra merupakan salah satu kawasan di Indonesia yang masih minim akan pemenuhan kebutuhan listrik, sehingga perlu dicari sumber-sumber energi alternatif guna memenuhi kebutuhan listrik. Salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga pasang surut, yang dalam pemanfaatannya menggunakan beda tinggi muka pasang dan surut air laut.

5.2.1 Data Pasang Surut

Seperti disebutkan di depan bahwa data-data pasang surut yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan data dari Dishidros TNI-AL dari tanggal 1 Januari sampai 31 Desember 2004. Data pasang surut tersebut dikelompokkan tiap bulan dengan interval 1 jam.

Dari data pasang surut dapat diketahui beda tinggi pasang surutnya (Δh) dengan mencari data muka air tinggi tertinggi (*highest high water level*, HHWL) dalam kurun waktu setahun (tahun 2004) dikurangkan dengan data muka air rendah terendah (*lowest low water level*, LLWL) dalam kurun waktu yang sama. Beda tinggi pasang surut untuk kawasan Sumatra dapat dilihat dalam tabel 5.1 Beda Tinggi Pasang Surut Kawasan pulau Sumatra.

Tabel 5.1 Beda Tinggi Pasang Surut Kawasan Sumatra

No	Stasiun Pasang Surut	HHWL(m)	LLWL(m)	Δh (m)
1	Sabang	1,80	0,00	1,80
2	Blang Lancang	2,20	0,10	2,10
3	Teluk Aru	2,70	0,20	2,50
4	Kuala Tanjung	2,90	0,20	2,70
5	Belawan Deli	2,80	0,30	2,50
6	Sungai Asahan	4,00	0,20	3,80
7	Sibolga	1,30	0,20	1,10
8	Gunung Sitoli	1,30	0,20	1,10
9	Padang (Teluk Bayur)	1,50	0,20	1,30
10	Siberut (Muara sungai Siberut)	1,40	0,20	1,20
11	Bagan Siapi api	6,60	0,20	6,40
12	Dumai (Dermaga Caltex)	3,60	0,20	3,40
13	Bengkalis	3,10	0,30	2,80
14	Sungai Siak (Pelabuhan)	3,30	0,40	2,90
15	Sunga Paking	3,40	0,20	3,20
16	Blandong	4,20	0,20	4,00
17	Pasir Panjang (Karimun Barat)	1,50	0,10	1,40
18	Sungai Indragiri	4,40	0,10	4,30
19	Sungai Jambi (Kuala Nur)	3,90	0,20	3,70
20	Batu Ampar (Pulau Batam)	3,20	0,10	3,10
21	Singapura	3,40	0,20	3,20
22	Selat Kijang	2,00	0,10	1,90
23	Tarempa	2,10	0,20	1,90
24	Muntor	4,20	0,10	4,10
25	Sungai Musi (Ambang Alur)	3,90	0,20	3,70
26	Pulau Baai (Bengkulu)	1,50	0,10	1,40
27	Panjang	1,50	0,10	1,40
28	Bakahuni	1,00	0,20	0,80
29	Suralaya	1,00	0,20	0,80

sumber : Analisis data

Untuk kawasan Sumatra beda tinggi pasang surut (Δh) tertinggi berada di daerah Bagan Siapi api (Propinsi Riau) sebesar 6,4 meter.

Penentuan potensi dan data masukan pembangkit tenaga listrik pasang surut diambil berdasarkan perbedaan tinggi antara muka air tinggi rerata (*mean high water level*, MHWL) dan muka air rendah rerata (*mean low water level*, MLWL). *Mean high water level* (MHWL) adalah rerata dari muka air tinggi selama periode 19 tahun, dan *mean low water level* (MLWL) adalah rerata dari muka air rendah selama periode 19 tahun. Karena pembangkitan listrik tenaga pasang surut digunakan dalam jangka waktu yang lama maka dalam perancangan perlu diketahui perbedaan tinggi rata-rata pasang surut dalam kurun waktu 19 tahun. Untuk penentuan MHWL berdasarkan rata-rata tinggi air pasang selama 1 tahun (tahun 2004) dan MLWL ditentukan berdasarkan rata-rata tinggi air surut selama 1 tahun (tahun 2004), dengan pertimbangan bahwa di Indonesia data pasang surut untuk jangka waktu 19 tahun belum ada dan data pasang surut dari Dishidros TNI AL tidak menyertakan data nilai MHWL dan MLWL. Pertimbangan yang kedua tinggi air pasang dan air surut tiap tahun tidak mengalami perubahan yang besar dan cenderung sama. Beda tinggi pasang surut rata-rata ($\Delta \bar{h}$) yang dipakai dalam perancangan dicari dengan mencari selisih antara MHWL dan MLWL.

Tabel 5.2 Beda Tinggi Pasang Surut Rata-rata Kawasan Sumatra.

No	Stasiun Pasang Surut	MHWL(m)	MLWL(m)	$\Delta \bar{h}$ (m)
1	Sabang	1,53	0,27	1,26
2	Blang Lancang	1,99	0,31	1,68
3	Teluk Aru	2,38	0,53	1,85
4	Kuala Tanjung	2,60	0,50	2,11
5	Belawan Deli	2,48	0,63	1,85
6	Sungai Asahan	3,43	0,77	2,66
7	Sibolga	1,09	0,41	0,68
8	Gunung Sitoli	1,14	0,37	0,77
9	Padang (Teluk Bayur)	1,32	0,38	0,94
10	Siberut (Muara sungai Siberut)	1,24	0,36	0,89
11	Bagan Siapi api	5,96	0,84	5,12
12	Dumai (Dermaga Caltex)	2,95	0,85	2,11

Tabel 5.2 Lanjutan

No	Stasiun Pasang Surut	MHWL(m)	MLWL(m)	Δh (m)
13	Bengkalis	2,62	0,78	1,85
14	Sungai Siak (Pelabuhan)	2,87	0,84	2,03
15	Sunga Paking	2,98	0,62	2,37
16	Blandong	3,84	0,56	3,28
17	Pasir Panjang (Karimun Barat)	1,25	0,35	0,90
18	Sungai Indragiri	3,67	0,83	2,84
19	Sungai Jambi (Kuala Nur)	3,31	0,79	2,52
20	Batu Ampar (Pulau Batam)	2,74	0,57	2,17
21	Singapura	2,95	0,65	2,30
22	Selat Kijang	1,75	0,35	1,41
23	Tarempa	1,83	0,47	1,37
24	Muntor	3,54	0,76	2,79
25	Sungai Musi (Ambang Alur)	3,42	0,68	2,74
26	Pulau Baai (Bengkulu)	1,23	0,37	0,87
27	Panjang	1,28	0,32	0,95
28	Bakahuni	0,89	0,31	0,58
29	Suralaya	0,90	0,30	0,59

sumber : Analisis data

5.2.2 Periode Pasang atau Surut

Periode pasang atau surut adalah waktu rata-rata pasang atau surut dalam setahun yang dibutuhkan untuk pergerakan air laut dalam satu kali air pasang atau surut saja. Periode pasang/surut di kawasan Sumatra ditunjukkan dengan tabel 5.3 Periode Pasang/Surut Kawasan Sumatra.

Tabel 5.3 Periode Pasang Surut Kawasan Sumatra

No	Stasiun Pasang Surut	Periode Pasang/Surut (jam)
1	Sabang	6
2	Blang Lancang	5
3	Teluk Aru	5

Tabel 5.3 Lanjutan

No	Stasiun Pasang Surut	Waktu Pasang/Surut (jam)
4	Kuala Tanjung	4
5	Belawan Deli	5
6	Sungai Asahan	5
7	Sibolga	5
8	Gunung Sitoli	6
9	Padang (Teluk Bayur)	5
10	Siberut (Muara sungai Siberut)	5
11	Bagan Siapi api	4
12	Dumai (Dermaga Caltex)	5
13	Bengkalis	5
14	Sungai Siak (Pelabuhan)	5
15	Sunga Paking	5
16	Blandong	5
17	Pasir Panjang (Karimun Barat)	6
18	Sungai Indragiri	7
19	Sungai Jambi (Kuala Nur)	6
20	Batu Ampar (Pulau Batam)	6
21	Singapura	5
22	Selat Kijang	5
23	Tarempa	7
24	Muntor	9
25	Sungai Musi (Ambang Alur)	9
26	Pulau Baai (Bengkulu)	5
27	Panjang	5
28	Bakahuni	5
29	Suralaya	5

Sumber : Analisis data

5.2.3 Tipe Pasang Surut

Tipe pasang surut mempengaruhi banyaknya pengoperasian turbin dalam kurun waktu sehari ataupun setahun. Potensi kawasan Sumatra yang memiliki 29 stasiun pasang surut dilihat berdasarkan tipe pasang surutnya dapat dilihat dalam tabel 5.4 Tipe Pasang Surut Kawasan Sumatra.

Tabel 5.4 Tipe Pasang Surut Kawasan Sumatra

No	Stasiun Pasang Surut	Tipe Pasang Surut
1	Sabang	Pasang surut harian tunggal
2	Blang Lancang	Pasang surut harian ganda
3	Teluk Aru	Pasang surut harian ganda
4	Kuala Tanjung	Pasang surut harian ganda
5	Belawan Deli	Pasang surut harian ganda
6	Sungai Asahan	Pasang surut harian ganda
7	Sibolga	Pasang surut harian ganda
8	Gunung Sitoli	Pasang surut harian tunggal
9	Padang (Teluk Bayur)	Pasang surut harian ganda
10	Siberut (Muara sungai Siberut)	Pasang surut harian ganda
11	Bagan Siapi api	Pasang surut harian ganda
12	Dumai (Dermaga Caltex)	Pasang surut harian ganda
13	Bengkalis	Pasang surut harian ganda
14	Sungai Siak (Pelabuhan)	Pasang surut harian ganda
15	Sunga Paking	Pasang surut harian ganda
16	Blandong	Pasang surut harian tunggal
17	Pasir Panjang (Karimun Barat)	Pasang surut harian tunggal
18	Sungai Indragiri	Pasang surut harian tunggal
19	Sungai Jambi (Kuala Nur)	Pasang surut harian tunggal
20	Batu Ampar (Pulau Batam)	Pasang surut harian tunggal
21	Singapura	Pasang surut harian ganda
22	Selat Kijang	Pasang surut harian ganda
23	Tarempa	Pasang surut harian tunggal
24	Muntor	Pasang surut harian tunggal
25	Sungai Musi (Ambang Alur)	Pasang surut harian tunggal

Table 5.4 Lanjutan

No	Stasiun Pasang Surut	Tipe Pasang Surut
26	Pulau Baai (Bengkulu)	Pasang surut harian ganda
27	Panjang	Pasang surut harian ganda
28	Bakahuni	Pasang surut harian ganda
29	Suralaya	Pasang surut harian ganda

Sumber : Analisis

Karena mempengaruhi jumlah waktu pengoperasian turbin dalam memproduksi energi listrik maka perlu diketahui jumlah waktu pengoperasian turbin dalam memproduksi energi selama satu tahun. Untuk kurun waktu setahun (365 hari), menurut M.M. Dandekar dan K.N. Sharma tipe pasang surut harian ganda terjadi 705 kali air pasang dan 705 kali air surut, dalam penelitian ini karena tipe pasang surut campuran condong keharian ganda digolongkan ke dalam tipe pasang surut harian ganda maka jumlah terjadinya air pasang atau surut dianggap sama dengan tipe pasang surut harian ganda. Karena tidak ada penelitian khusus untuk tipe pasang surut harian tunggal dan tipe pasang surut campuran condong keharian tunggal oleh peneliti diasumsikan terjadi 365 kali air pasang dan 365 kali air surut. Penetapan angka tersebut berdasarkan rata-rata jumlah hari dalam setahun.

5.2.4 Kesimpulan

Dari analisis data diatas dapat diketahui bahwa berdasar syarat kelayakan untuk membangun pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal yaitu beda tinggi rata-rata ($\Delta \bar{h}$) minimal 2,5 m, kawasan sumatra memiliki 7 tempat yang berpotensi, ketujuh tempat itu adalah Sungai asahan (2,66 m), Bagan Siapi-api (5,12 m), Blandong (3,28 m), Sungai Indragiri (2,84 m), Sungai Jambi (2,52 m), Muntor (2,79 m), Sungai Musi (2,74 m).

5.3 Perkiraan Potensi Tenaga Listrik Pasang Surut di Kawasan Sumatra.

Dalam metode penghitungan perkiraan potensi tenaga listrik, digunakan 3 metode (menurut Sharma dan Dandekar), dalam ketiga metode ini menggunakan asumsi yang pertama bahwa cara pengaliran air bersifat tetap (*steady flow*). Pengaliran tetap (*steady flow*) adalah suatu aliran dimana pada suatu titik tertentu besarnya tekanan dan

kecepatan tidak berubah dengan waktu. Hal ini bertentangan dengan kenyataan di lapangan bahwasanya pengaliran air laut ke kolam atau air kolam ke laut di suatu titik tertentu besarnya tekanan dan kecepatan selalu berubah dengan waktu (*unsteady flow*). Asumsi yang kedua penghitungan ketersediaan energi yang dianalisis hanya untuk produksi air pasang saja. Asumsi yang ketiga luasan kolam yang dipakai ditetapkan 1 hektar (10.000 meter persegi). Penghitungan perkiraan energi listrik dilakukan dengan pertimbangan bahwa untuk perkiraan potensi tenaga listrik pasang surut, besaran nilai yang didapat hanya untuk mengetahui potensi ketersediaan energi secara kasar. Untuk kepentingan yang lebih mendalam data ketersediaan energi ini dapat digunakan sebagai acuan pemetaan besaran energi yang dikandung untuk wilayah tinjauan. Dari ketiga metode tersebut dapat disimpulkan bahwa metode 1 dinilai sebagai metode yang paling mendekati keadaan yang sebenarnya di lapangan untuk perkiraan penghitungan pembangkit listrik tenaga pasang surut karena dalam metodenya sudah memperhitungkan waktu pasang atau surut dan jumlah pasang atau surut dalam kurun waktu satu tahun.

Dalam penelitian ini analisis perkiraan potensi tenaga listrik pasang surut di kawasan Sumatra menggunakan metode 1 dengan pertimbangan-pertimbangan yang telah disebut diatas. Sebagai contoh hitungan menggunakan data pasang surut stasiun pasang surut Bagan Siapi api.

Data-data yang sudah diketahui adalah sebagai berikut.

$$\text{HHWL} = + 6,60 \text{ m}$$

$$\text{LLWL} = + 0,20 \text{ m}$$

$$\text{Berat jenis air laut } (\gamma) = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Waktu pasang surut } (T_{ps}) = 4 \text{ jam}$$

$$\text{Jumlah pasang surut / hari} = 2 \text{ kali (tipe pasang surut harian ganda)}$$

$$\text{Efisiensi turbin } (\eta_0) = 75 \%$$

Penyelesaian :

$$\text{Tinggi kolam } (H_0) = 6,60 - 0,2 = 6,40 \text{ m}$$

$$\text{MHWL} = 5,96 \text{ m}$$

$$\text{MLWL} = 0,84 \text{ m}$$

$$\text{hp} = 5,96 - 0,84 = 5,12 \text{ m}$$

Dengan asumsi luas kolam yang tersedia = 10.000 m² (1 Ha), maka mengacu rumus 3.3 diperoleh volume kolam (V),

$$V = 10.000 \times 6,40 = 64.000 \text{ m}^3$$

Mengacu kepada rumus 3.4 maka diperoleh debit air rata-rata (Q),

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{64.000}{4 \times 3.600} = 4,4444 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Dengan menggunakan rumus 3.5, jumlah tenaga yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut.

$$P = 75 \% \times \frac{5,12 \times 4,4444 \times 1025}{75} \text{ DK} = 233,242112 \text{ DK}$$

Dengan menggunakan rumus 3.6 daya yang dihasilkan, energi yang diproduksi tiap daur air pasang dapat dihitung sebagai berikut.

$$E = 233,242112 \times 0,736 \times 4 = 686,6678 \text{ kWh}$$

Dengan menggunakan rumus 3.7 perhitungan jumlah seluruhnya daur air pasang tiap tahun adalah 705 kali untuk tipe pasang surut harian ganda, maka energi yang dihasilkan tiap tahun dapat dihitung sebagai berikut.

$$E_{\text{1tahun}} = 686,6678 \times 705 = 476.167,39 \text{ kWh}$$

Dengan menggunakan cara yang sama, perkiraan energi secara kasar untuk tempat-tempat yang lain dapat dihitung. Dalam Tabel 5.5 Perkiraan Energi Kawasan Sumatra berikut,

Tabel 5.5 Perkiraan Energi Kawasan Sumatra

No	Stasiun Pasang Surut	Energi 1 th (kWh)
1	Sabang	17.530,52
2	Blang Lancang	51.267,05
3	Teluk Aru	67.208,07
4	Kuala Tanjung	82.628,88
5	Belawan Deli	67.208,07
6	Sungai Asahan	146.884,15
7	Sibolga	10.901,51
8	Gunung Sitoli	6.546,89
9	Padang (Teluk Bayur)	17.681,90

Table 5.5 Lanjutan

No	Stasiun Pasang Surut	Energi 1 th (kWh)
10	Siberut (Muara sungai Siberut)	15.484,74
11	Bagan Siapi api	476.167,39
12	Dumai (Dermaga Caltex)	104.149,99
13	Bengkalis	75.191,67
14	Sungai Siak (Pelabuhan)	85.546,80
15	Sunga Paking	110.113,71
16	Blandong	190.652,96
17	Pasir Panjang (Karimun Barat)	9.695,90
18	Sungai Indragiri	94.326,28
19	Sungai Jambi (Kuala Nur)	71.955,54
20	Batu Ampar (Pulau Batam)	51.996,40
21	Singapura	107.137,66
22	Selat Kijang	38.819,38
23	Tarempa	20.090,54
24	Muntor	88.354,46
25	Sungai Musi (Ambang Alur)	78.304,56
26	Pulau Baai (Bengkulu)	17.658,65
27	Panjang	19.367,55
28	Bakahuni	6.696,10
29	Suralaya	6.882,11

Sumber : Analisis

Perkiraan energi menggunakan metode I untuk daerah yang mempunyai perkiraan potensi energi listrik paling tinggi di kawasan Sumatra berada di daerah Bagan Siapi api dengan perkiraan energi yang dihasilkan setiap tahun adalah sebesar 476.167,39 kWh.

5.4 Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Sistem daur Ganda dengan Kolam Tunggal

Untuk mendapatkan Energi pasang surut yang optimal menggunakan sistem daur ganda dengan kolam tunggal, diperlukan sebuah kolam penampung air laut dengan dimensi yang tepat. Sehingga dengan turbin yang sesuai dengan keadaan *hidrodinamika*

air laut dan dimensi pipa yang sesuai, debit air yang mengalir dapat dimanfaatkan secara maksimal, disesuaikan dengan waktu produksi yang ada, karena waktu produksi pembangkit listrik tenaga pasang surut ini sangat tergantung dari durasi pasang atau surut air laut. Maka dalam penelitian ini simulasi energi yang dapat dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga pasang surut mengoptimalkan dimensi kolam sebagai alternatif efisiensi pembangunan proyek tersebut dan untuk memaksimalkan produksi energi yang dihasilkan tiap tahunnya. Daerah Bagan Siapi api sebagai daerah yang memiliki beda tinggi pasang surut tertinggi untuk kawasan Sumatra ditetapkan sebagai tempat tinjauan dalam penelitian ini.

5.4.1 Dimensi Kolam Minimal

Dalam menentukan dimensi kolam yang akan dibangun perlu diketahui batasan luas kolam minimal yang disyaratkan, agar dalam pemanfaatan pergerakan air laut (pasang dan surut) dapat dioptimalkan. Karena luas kolam minimal pergerakan air laut (pasang dan surut) dari titik terendahnya sampai titik tertinggi pergerakan air laut sudah bisa dimanfaatkan tetapi dalam keadaan debit air yang minimal. Keadaan debit air minimal dalam pembangkit listrik tenaga pasang surut menggunakan sistem daur ganda dan menggunakan kolam tunggal adalah keadaan dengan debit air yang masuk ke dalam kolam pada awal produksi sampai ketinggian air laut pasang di titik tertinggi sama (tetap) atau keadaan dengan debit air yang keluar dari kolam pada awal produksi sampai ketinggian air laut surut berada di titik tertinggi juga sama (tetap). Pada awal produksi debit air yang masuk atau keluar dari kolam menggunakan beda tinggi air jatuh untuk menggerakkan turbin kaplan minimal setinggi 2 meter, sehingga tinggi air jatuh untuk menentukan luas kolam minimal dari awal produksi sampai ketinggian air laut pasang atau surut tertinggi juga 2 meter, berdasarkan rumus 3.13 dapat diketahui besarnya debit air minimal dan untuk luas kolam minimal debit air tetap dari awal produksi sampai akhir produksi..

Data-data yang sudah diketahui adalah sebagai berikut.

$$\text{Koefisien debit (Cd)} = 0,82$$

$$\text{Luas tampang pipa (Ap)} = 1,76625 \text{ m}^2$$

$$\text{Gaya gravitasi (g)} = 9,78 \text{ m/detik}^2$$

Tinggi air jatuh waktu awal produksi (hp_a) = 2 m

Tinggi air jatuh waktu berhenti produksi (hp_b) = 2 m

Tinggi air jatuh rata-rata waktu produksi (hp) = 2 m

maka

$$Q = 0,82 \times 1,76625 \sqrt{2 \times 9,78 \times 2} = 9,058691095 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Data periode pasang/surut digunakan sebagai acuan dalam menentukan waktu produksi. Untuk mengetahui pergerakan air laut waktu pasang atau surut tiap satuan waktu, maka dalam penelitian ini ditetapkan ukuran pergerakan tiap 0,01 meter. Penentuan ukuran pergerakan air laut tiap 0,01 m ini untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan air untuk bergerak (pasang atau surut) tiap satuan panjang (tinggi), dan nilai 0,01 m (1 cm) diambil karena dari ketelitian dianggap sudah mencukupi. Dengan penentuan itu maka periode pergerakan air pasang atau surut tiap satuan panjang (tinggi, 0,01 m) dapat diketahui, tetapi sebelumnya harus diketahui dahulu jumlah kumulatif data untuk ketinggian air pasang/surut untuk pergerakan air tiap 0,01 meter (na). Untuk mengetahui nilai na dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut.

$$na = \frac{(MHWL - MLWL)}{0,01} \quad (5.1)$$

Periode pergerakan air pasang atau surut tiap 0,01 meter ($Tpsa$) dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut.

$$Tpsa = \frac{Tps}{na} \quad (5.2)$$

dengan

Tps = Periode pasang/surut (detik)

Untuk daerah Bagan Siapi api

$$\begin{aligned} na &= \frac{(5,96 - 0,84)}{0,01} \\ &= 512 \text{ data} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tpsa &= \frac{(4 \times 3.600)}{512} \\ &= 28,125 \text{ detik} \end{aligned}$$

Selain data periode pasang/surut sebagai acuan dalam menentukan waktu produksi, diperlukan penentuan waktu membuka pintu air (Tmp). Jika waktu membuka pintu air

sudah ditentukan maka tinggi penurunan atau naiknya muka air kolam akibat dibukanya pintu air (h_{pi}) dapat diketahui dengan persamaan :

$$h_{pi} = \frac{T_{mp}}{T_{psa}} \times 0,01 \quad (5.3)$$

Untuk daerah Bagan Siapi api, waktu membuka pintu air untuk daerah tersebut dalam sekali operasi oleh peneliti ditentukan 15 menit (900 detik) dengan pertimbangan pengambilan waktu ini berdasarkan penjelasan yang telah diurai pada bab IV (sub Bab 4.5 pada bagian “waktu membuka pintu air”).

$$\begin{aligned} h_{pi} &= \frac{900}{28,125} \times 0,01 \\ &= 0,32 \text{ meter} \end{aligned}$$

Dari persamaan-persamaan diatas, dapat diketahui titik ketinggian air laut dan kolam saat turbin melakukan awal operasi produksi energi listrik. Tinggi air waktu produksi dapat diketahui pada titik ketinggian tertentu dengan persamaan :

Tinggi air kolam awal produksi saat air pasang (HK_{pa})

$$HK_{pa} = MLWL + h_{pi} \quad (5.4)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HK_{pa} &= 0,84 + 0,32 \\ &= 1,16 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air kolam saat air pasang berada di titik MHWL (HK_{pp})

$$HK_{pp} = MHWL - h_{pb} \quad (5.5)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HK_{pp} &= 5,96 - 2 \\ &= 3,39 \text{ meter} \end{aligned}$$

Untuk luas kolam minimal karena beda tinggi mulai dari awal produksi sampai beda tinggi air kolam dengan titik rata-rata tinggi air laut pasang (MHWL) adalah dengan 2 meter, dan beda tinggi 2 meter adalah beda tinggi minimal yang masih bisa untuk menghasilkan energi listrik maka setelah tinggi air berada di titik HK_{pp} (pintu air mulai dibuka) sudah tidak dapat menghasilkan energi listrik lagi. Titik ketinggian berhentinya produksi luas kolam minimal untuk pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal adalah di titik HK_{pp} .

Tinggi air pasang saat produksi awal (HL_{pa})

$$HL_{pa} = HK_{pa} + h_{pa} \quad (5.6)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HL_{pa} &= 1,16 + 2 \\ &= 3,16 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air pasang saat berada di titik MHWL (HL_{pp})

$$HL_{pp} = \text{MHWL} \quad (5.7)$$

Untuk tinjauan di daerah di Bagan Siapi-api

$$HL_{pp} = 5,96 \text{ meter}$$

Tinggi air kolam awal produksi saat air surut (HK_{sa})

$$HK_{sa} = \text{MHWL} - hp_i \quad (5.8)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HK_{sa} &= 5,96 - 0,32 \\ &= 5,64 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air kolam saat air surut berada di titik MLWL (HK_{sp})

$$HK_{sp} = \text{MLWL} + hp_b \quad (5.9)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HK_{sp} &= 0,84 + 2 \\ &= 2,84 \text{ meter} \end{aligned}$$

Seperti halnya waktu air laut pasang pada waktu air laut surut pembangkit listrik tenaga pasang surut menggunakan sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal dengan luas kolam minimal, maka waktu produksi berhenti memproduksi energi listrik berada di titik HK_{sp} .

Tinggi air surut saat produksi awal (HL_{sa})

$$HL_{sa} = HK_{sa} - hpa \quad (5.10)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HL_{sa} &= 5,64 - 2 \\ &= 3,64 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air surut saat berada di titik MLWL (HL_{sp})

$$HL_{sp} = \text{MLWL} \quad (5.11)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$HL_{sp} = 0,84 \text{ meter}$$

Setelah ketinggian air kolam dan air laut waktu produksi diketahui, maka waktu produksi untuk titik-titik tertentu baik saat air laut pasang atau surut dapat diketahui dengan menggunakan persamaan-persamaan :

Waktu produksi awal saat air pasang ($T_{h_{pa}}$)

$$T_{h_{pa}} = \frac{(HL_{pa} - MLWL)}{0,01} \times T_{psa} \quad (5.12)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} T_{h_{pa}} &= \frac{(3,16 - 0,84)}{0,01} \times 28,125 \\ &= 6.525 \text{ detik} \end{aligned}$$

Waktu produksi saat air pasang berada di titik MHWL ($T_{h_{pp}}$)

$$T_{h_{pp}} = T_{ps} \quad (5.13)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$T_{h_{pp}} = 14.400 \text{ detik}$$

Waktu produksi awal saat air surut ($T_{h_{sa}}$)

$$T_{h_{sa}} = \frac{(MHWL - HL_{sa})}{0,01} \times T_{psa} \quad (5.14)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} T_{h_{sa}} &= \frac{(5,96 - 3,64)}{0,01} \times 28,125 \\ &= 6525 \text{ detik} \end{aligned}$$

Waktu produksi saat air surut berada di titik MLWL ($T_{h_{sp}}$)

$$T_{h_{sp}} = T_{ps} \quad (5.15)$$

Untuk tinjauan daerah Bagan Siapi-api

$$T_{h_{sp}} = 14.400 \text{ detik}$$

Waktu produksi yang dibutuhkan pada saat air laut pasang (T_{p_p}), dan waktu produksi pada saat air laut surut (T_{p_s}) dapat dicari dengan persamaan :

Waktu produksi pada saat air pasang (T_{p_p})

$$T_{p_p} = \frac{(HK_{pp} - HK_{pa})}{0,01} \times T_{psa} \quad (5.16)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} T_{p_p} &= \frac{(3,96 - 1,16)}{0,01} \times 28,125 \\ T_{p_p} &= 7.875 \text{ detik} \end{aligned}$$

Waktu produksi pada saat air surut (T_{ps})

$$T_{ps} = \frac{(HK_{sa} - HK_{sp})}{0,01} \times T_{psa} \quad (5.17)$$

Untuk tinjauan daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} T_{ps} &= \frac{(5,64 - 2,84)}{0,01} \times 28,125 \\ &= 7.875 \text{ detik} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa waktu produksi pada saat air pasang (T_{pp}) dan waktu produksi pada saat air surut (T_{ps}) adalah sama, ini berarti bahwa waktu produksi (T_p) yang digunakan untuk menghitung dimensi kolam untuk pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda dengan kolam tunggal adalah sama dengan waktu produksi saat air pasang (T_{pp}) ataupun surut (T_{ps}). Maka volume kolam produksi (V_k) sudah dapat diketahui dengan dengan mengacu pada rumus 3.19 dan 3.21, yaitu :

$$V_k = \frac{1}{2} \times Q \times T_p$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} V_k &= \frac{1}{2} \times 9,058691095 \times 7.875 \\ &= 35.668,59619 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Dengan tinggi kolam (H_k)

$$H_k = HHWL + 0,5 \text{ m} \quad (5.18)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} H_k &= 6,6 + 0,5 \\ &= 7,1 \text{ meter} \end{aligned}$$

Untuk mencari luasan kolam perlu diketahui ketinggian air kolam produktif (H_{kp}). Karena ketinggian air kolam produktif antara waktu produksi air pasang dan surut sama, maka persamaannya menjadi :

$$\begin{aligned} H_{kp} &= HK_{pp} - H_{kpa} \\ &= HK_{sa} - HK_{sp} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} H_{kp} &= 3,96 - 1,16 \\ &= 2,8 \text{ meter} \end{aligned}$$

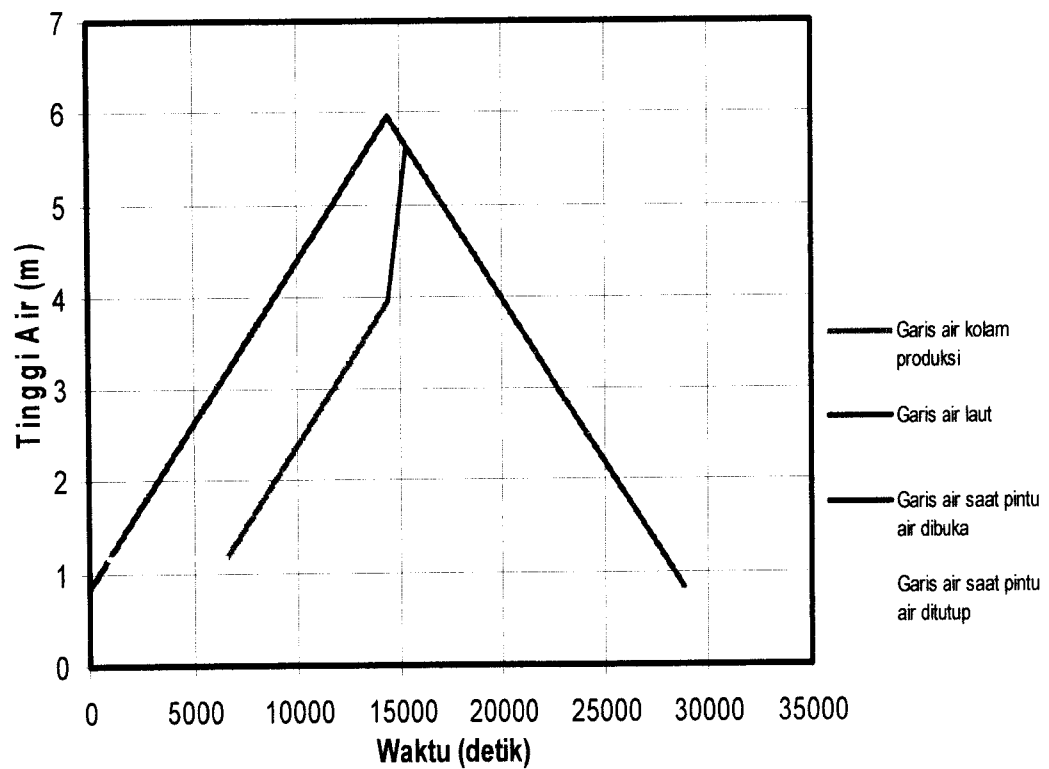
Luas kolam (A_k)

$$A_k = \frac{V_k}{Hk_p} \quad (5.20)$$

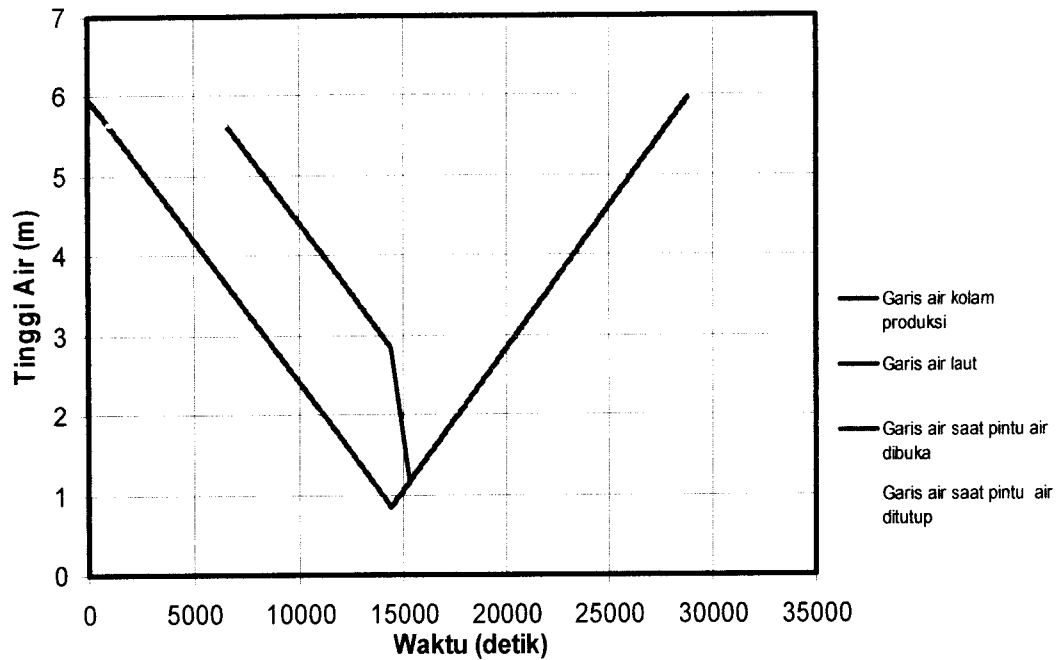
Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{35.668,59619}{2,8} \\ &= 12.738.78435 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Luas kolam ini menjadi batasan untuk menentukan luas kolam yang akan kita bangun di daerah Bagan Siapi api (luas kolam minimal, A_{k_m}). Gambar pergerakan air laut dan pergerakan air dalam kolam pada pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal dengan luas kolam minimal di daerah Bagan Siapi api dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 5.1 Pergerakan air pasang di Bagan Siapi api dengan luas kolam minimal



Gambar 5.2 Pergerakan air surut di Bagan Siapi api dengan luas kolam minimal

5.4.2 Hubungan Luas Kolam dengan Energi

Selain mengetahui luas kolam minimal dalam pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal juga harus mengetahui luas kolam optimal untuk digunakan sebagai acuan dalam menentukan luas kolam yang akan dibangun. Maka dalam menentukan luas kolam yang optimal perlu mengetahui produksi energi yang dihasilkan untuk tiap luasan kolam tertentu dengan 1 unit turbin (Ak_1). Penentuannya berdasarkan beda tinggi antara air laut dan air kolam untuk menggerakkan turbin yang menghasilkan energi listrik, maka beda tinggi awal air laut dengan air kolam (hp_a) sampai beda tinggi air laut dengan air kolam saat air laut berada di titik MHWL maupun MLWL (hp_b) dapat diketahui. Untuk hp_a , karena tinggi air jatuh minimal dari turbin kaplan dalam memproduksi energi listrik mensyaratkan 2 meter maka nilai hp_a dipakai 2 meter, dan untuk hp_b dapat diketahui dengan persamaan :

$$\begin{aligned} hp_b &= (MHWL - Hk_{pa}) - 0,1 \\ &= (HK_{sa} - MLWL) - 0,1 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api

$$hp_b = (5,96 - 1,16) - 0,1$$

$$\begin{aligned} hp_b &= (5,64 - 0,84) - 0,1 \\ &= 4,70 \text{ m} \end{aligned}$$

Debit air yang dipakai untuk menghitung produksi energi yang dihasilkan dihitung dari beda tinggi awal produksi (hp_a) sampai beda tinggi air laut dengan kolam saat air laut berada di titik MHWL atau MLWL (hp_b) dengan jarak interval 0,1 m, sehingga dapat dicari volume kolam produksi (V_k) menggunakan rumus 5.18 dan didapat luas kolam tiap interval beda tinggi air jatuh menggunakan rumus 5.21. Setelah pintu air dibuka dengan beda tinggi air laut dengan kolam saat air laut berada di titik MHWL atau MLWL (hp_b) lebih besar dari 2 meter, produksi energi listrik masih berlanjut sampai beda tinggi air laut dengan kolam akhir waktu pintu air dibuka (hp_{pb}) sebesar 2 meter. Untuk mengetahui besarnya luas kolam optimal maka menggunakan beda tinggi air laut dengan kolam saat air berada di titik MHWL atau MLWL (hp_b). Untuk menentukan waktu produksi turbin waktu pintu air dibuka (T_{pi}), dapat diketahui dengan,

$$T_{pi} = T_{mp} - \frac{(h_{ppb} \times T_{mp})}{h_{pb}} \quad (5.22)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api, jika h_{pb} menggunakan 4,70 m

$$T_{pi} = 900 - \frac{(2 \times 900)}{4,70}$$

$$= 517,02 \text{ detik}$$

Maka energi yang dihasilkan selama 1 tahun dapat dicari dengan mengacu pada rumus 3.6 dan 3.7, karena waktu produksi, debit air, beda tinggi air jatuh waktu air laut pasang dan air surut sama, energi yang dihasilkan selama 1 tahun,

$$E_{1 \text{ Tahun}} = 2^d \times \eta_0 \times \frac{\gamma \times Q \times hp}{75} \times \left(\frac{T_p + T_{pi}}{3600} \right) \times D \times n_c \times 0,736 \text{ kWh} \quad (5.23)$$

dengan,

d = Jumlah rata-rata air pasang/surut dalam sehari

D = Jumlah air pasang/surut selama 1 tahun (365 jumlah air pasang/surut untuk tipe pasang surut harian tunggal/ campuran condong keharian tunggal, dan 705 air pasang/surut untuk tipe harian ganda/ campuran condong keharian ganda).

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api, dengan h_p menggunakan 4,70 m, maka h_p sebesar 3,35 m maka energi yang dihasilkan selama 1 tahun adalah :

$$E_{1 \text{ Tahun}} = 2^2 \times 0,75 \times \frac{1025 \times 11,723 \times 3,35}{75} \times \frac{7875 + 517,02}{3600} \times 705 \times 1 \times 0,736$$

$$= 3.895,4939 \text{ kWh}$$

Energi selama 1 tahun dan luas kolam yang dihasilkan dari beda tinggi air jatuh untuk produksi energi listrik yang berinterval 0,1 meter dapat dilihat di tabel 5.6 Hubungan luas kolam dengan energi dan gambar 5.3 Hubungan luas kolam dengan energi.

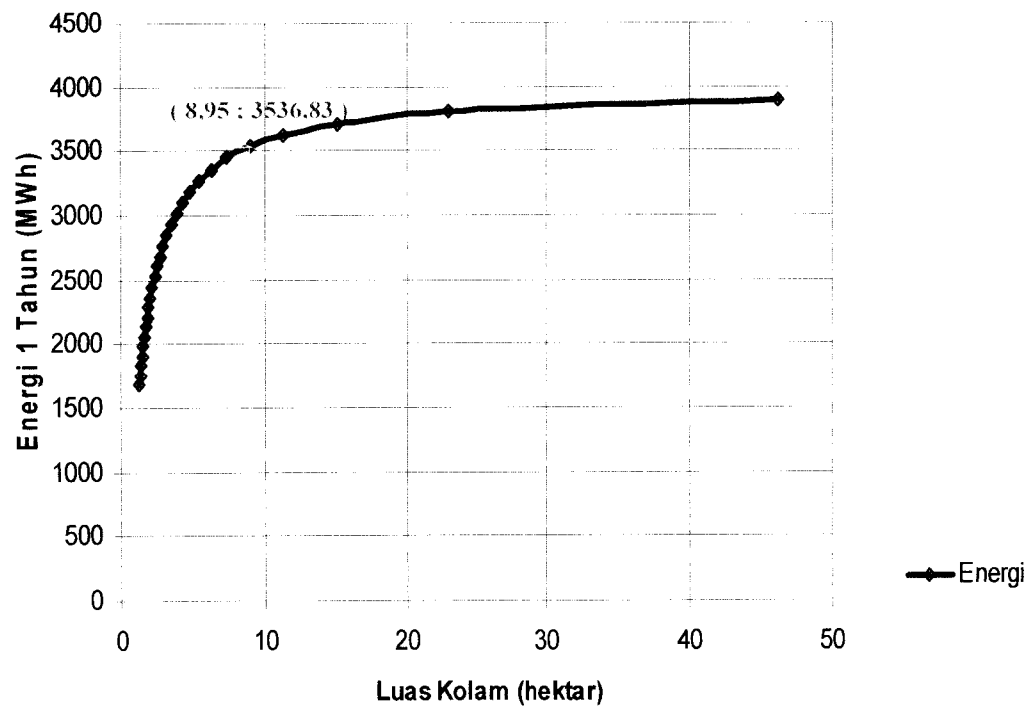
Tabel 5.6 Hubungan luas kolam dengan energi

h_p (m)	Ak (hektar)	$E_{1 \text{ Tahun}}$ (MWh)
2,0	1,27	1.686,2591
2,1	1,34	1.759,4106
2,2	1,41	1.833,1463
2,3	1,48	1.907,4940
2,4	1,56	1.982,4754
2,5	1,64	2.058,1075
2,6	1,74	2.134,4036
2,7	1,84	2.211,3736
2,8	1,95	2.289,0254
2,9	2,08	2.367,3644
3,0	2,22	2.446,3946
3,1	2,37	2.526,1188
3,2	2,54	2.606,5385
3,3	2,74	2.687,6543
3,4	2,96	2.769,4660
3,5	3,22	2.851,9728
3,6	3,52	2.935,1736
3,7	3,87	3.019,0665
3,8	4,30	3.103,6495
3,9	4,81	3.188,9202

Tabel 5.6 Lanjutan

hpb (m)	Ak (hektar)	$E_{(1 \text{ Tahun})}$ (MWh)
4,0	5,46	3.274,8760
4,1	6,29	3.361,5141
4,2	7,40	3.448,8314
4,3	8,95	3.536,8248
4,4	11,28	3.625,4912
4,5	15,16	3.714,8270
4,6	22,91	3.804,8291
4,7	46,16	3.895,4939

Sumber : Analisis data



Gambar 5.3 Hubungan luas kolam dengan energi

Dengan metode grafis dapat diketahui luas kolam optimal menggunakan 1 unit turbin untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api adalah 8,95 hektar dan energi listrik yang dihasilkan setiap tahun 3.536,83 MWh.

5.4.3 Energi Selama Satu Tahun dengan Luas Kolam Tertentu.

Data masukan yang dibutuhkan dalam pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal adalah berikut ini.

1. *High highest water level* (HHWL) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api sebesar 6,60 m.
2. *Low lowest water level* (LLWL) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api sebesar 0,20 m.
3. *Mean high water level* (MHWL) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api sebesar 5,96 m.
4. *Mean low water level* (MLWL) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api sebesar 0,84 m.
5. Periode pasang/surut rata-rata dalam setahun (Tps) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api adalah 4 jam.
6. Waktu membuka pintu air (Tmp) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api menggunakan waktu 15 menit.
7. Jumlah air pasang/surut dalam sehari (d) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api adalah 2 kali, maka termasuk tipe pasang surut harian ganda dan jumlah air pasang/surut selama setahun (D) adalah 705 kali.
8. Luas kolam yang akan dibangun (Ak) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api sebesar 76,2 hektar sudah memenuhi persyaratan lebih dari luas kolam minimal 1,27 hektar.
9. Jumlah turbin yang akan dipasang (nc) untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api menggunakan 30 unit turbin, hal ini juga sudah memenuhi persyaratan untuk luas kolam yang dilayani 1 unit turbin (Ak_1) adalah 2,54 hektar, lebih besar dari kolam minimal.

Penghitungan produksi energi yang dihasilkan dimulai dengan menentukan jumlah kumulatif data untuk ketinggian air pasang/surut untuk pergerakan air tiap 0,01 meter (na) yang dapat dicari dengan rumus 5.1 dan periode pergerakan air pasang atau surut tiap 0,01 meter (Tpsa) dapat diketahui dengan rumus 5.2 untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api,

$$\begin{aligned} na &= \frac{(5,96 - 0,84)}{0,01} \\ &= 512 \text{ data} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{psa} &= \frac{(4 \times 3600)}{512} \\ &= 28,125 \text{ detik} \end{aligned}$$

Selain data periode pasang/surut sebagai acuan dalam menentukan waktu produksi, diperlukan penentuan waktu membuka pintu air (T_{mp}). Jika waktu membuka pintu air sudah ditentukan maka tinggi penurunan atau naiknya muka air kolam akibat dibukanya pintu air (h_{p_i}) dapat diketahui dengan rumus 5.3, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api waktu membuka pintu air dalam sekali operasi adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} h_{p_i} &= \frac{900}{28,125} \times 0,01 \\ &= 0,32 \text{ meter} \end{aligned}$$

Dari persamaan-persamaan diatas, dapat diketahui titik ketinggian air laut dan kolam saat turbin melakukan awal operasi produksi energi listrik. Tinggi air waktu produksi dapat diketahui pada titik ketinggian tertentu dengan rumus 5.4, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} HK_{pa} &= 0,84 + 0,32 \\ &= 1,16 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air pasang saat produksi awal (HL_{pa}) dapat dicari dengan rumus 5.6, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} HL_{pa} &= 1,16 + 2 \\ &= 3,16 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air kolam awal produksi saat air surut (HK_{sa}) dapat dicari dengan rumus 5.8, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} HK_{sa} &= 5,96 - 0,32 \\ &= 5,64 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air surut saat produksi awal (HL_{sa}) dapat dicari dengan rumus 5.10, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} HL_{sa} &= 5,64 - 2 \\ &= 3,64 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tinggi air pasang saat berada di titik MHWL (HL_{pp}) dapat dicari dengan persamaan 5.7, untuk tinjauan di daerah di Bagan Siapi-api adalah sebagai berikut.

$$HL_{pp} = 5,96 \text{ meter}$$

Tinggi air surut saat berada di titik MLWL (HL_{sp}) dapat dicari dengan persamaan 5.11, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api adalah sebagai berikut.

$$HL_{sp} = 0,84 \text{ meter}$$

Karena penambahan atau pengurangan muka air laut (pergerakan air pasang/surut) berjarak interval 0,01 m, jarak interval pergerakan air laut 0,01 m, maka tinggi air kolam saat air laut berada di titik MHWL atau MLWL (HK_{pp} atau HK_{sp}) dicari dengan cara iterasi seperti tabel Hasil perhitungan iterasi saat air pasang di Bagan Siapi api dan tabel Hasil perhitungan iterasi saat air surut di Bagan Siapi api pada bagian lampiran C (Tabel C-1 dan C-2). Dari tabel tersebut dapat diketahui tinggi air kolam saat air laut berada di titik MHWL (HK_{pp}) 2,90 m dan tinggi air kolam saat air laut berada di titik MLWL (HK_{sp}) 3,90 m. Beda tinggi air jatuh pada awal produksi sebelum pintu air dibuka (hp_a) adalah sama nilainya dengan beda tinggi air jatuh saat berhenti produksi setelah pintu air dibuka (hp_{pb}) yaitu 2 meter. Beda tinggi air jatuh saat air laut berada di titik MHWL atau MLWL (hp_b) sama dengan beda tinggi air jatuh saat awal pintu air dibuka (hp_{pa}) dapat diketahui dengan cara sebagai berikut.

$$\begin{aligned} hp_b &= hp_{pa} = HL_{pp} - HK_{pp} \\ &= HK_{sp} - HL_{sp} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} hp_b &= hp_{pa} = 5,96 - 2,90 \\ &= 3,06 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk mengetahui tinggi air kolam berhenti produksi saat air laut pasang (HK_{pb}) dan tinggi air kolam berhenti produksi saat air surut (HK_{sb}) harus dicari dahulu waktu pengaliran air saat pintu air dibuka untuk tiap 0,01 m (T_{pa}), karena dengan luas kolam yang besarnya lebih besar dari luas kolam minimal HK_{pb} dan HK_{sb} berada di titik setelah pintu air dibuka. Sebelum menghitung nilai T_{pa} harus dicari jumlah kumulatif data tinggi air saat pintu air dibuka tiap 0,01 m (nb).

$$nb = \frac{(MHWL - h_{pi}) - HK_{pp}}{0,01} \quad (5.25)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} nb &= \frac{(5,96 - 0,32) - 2,90}{0,01} \\ &= 274 \end{aligned}$$

$$T_{pa} = \frac{T_{mp}}{nb} \quad (5.26)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} T_{pa} &= \frac{900}{274} \\ &= 3,28 \text{ detik} \end{aligned}$$

Waktu produksi setelah pintu air dibuka dapat dicari dengan cara sebagai berikut.

$$T_{pi} = T_{mp} - \frac{(h_{ppb} \times T_{mp})}{h_{pb}} \quad (5.27)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} T_{pi} &= 900 - \frac{(2 \times 900)}{3,06} \\ &= 311,76 \text{ detik} \\ HK_{pb} &= HK_{pp} + \frac{T_{pi}}{T_{pa}} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HK_{pb} &= 2,90 + \frac{311,76}{3,28} \\ &= 3,85 \text{ m} \\ HK_{sb} &= HK_{sp} - \frac{T_{pi}}{T_{pa}} \end{aligned} \quad (5.29)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} HK_{sb} &= 3,90 + \frac{311,76}{3,28} \\ &= 2,95 \text{ m} \end{aligned}$$

Waktu air pasang atau surut awal produksi ($T_{h_{pa}}$ atau $T_{h_{sa}}$) dapat dicari menggunakan rumus 5.12 dan 5.14, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api.

$$T_{h_{pa}} = 6525 \text{ detik}$$

$$T_{h_{sa}} = 6.525 \text{ detik}$$

Waktu produksi saat air laut berada dititik MHWL atau MLWL ($T_{h_{pp}}$ atau $T_{h_{sp}}$) dapat dicari menggunakan rumus 5.13 dan 5.15, untuk tinjauan didaerah Bagan Siapi api.

$$T_{h_{pp}} = 14.400 \text{ detik}$$

$$T_{h_{sp}} = 14.400 \text{ detik}$$

Waktu produksi pada saat air pasang (T_{pp}) dapat dicari dengan rumus 5.16, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api.

$$T_{pp} = \frac{(3,96 - 1,16)}{0,01} \times 28,125 = 7.875 \text{ detik}$$

Waktu produksi pada saat air surut (T_{ps}) dapat dicari dengan rumus 5.17, untuk tinjauan daerah Bagan Siapi-api.

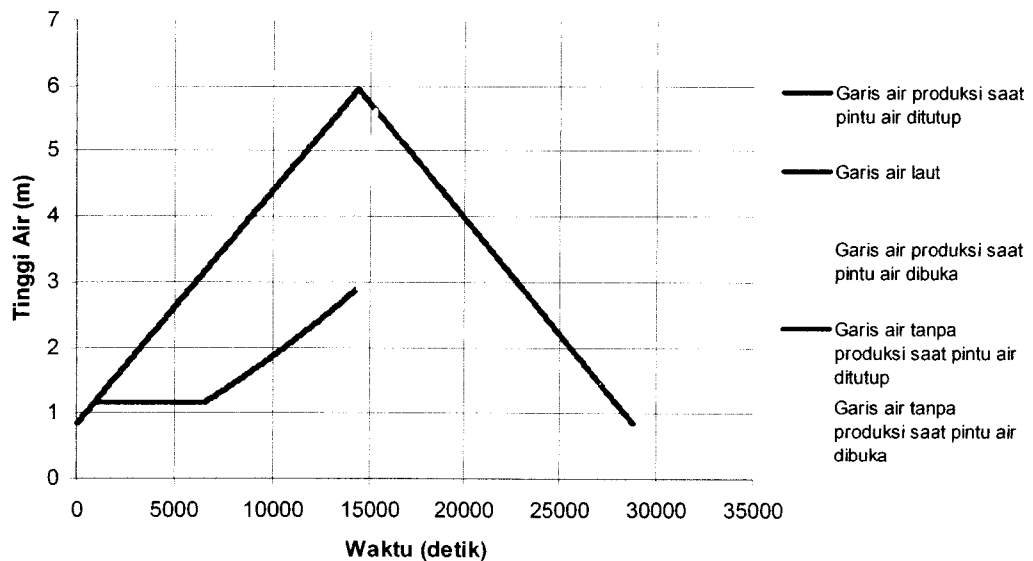
$$T_{ps} = \frac{(5,64 - 2,84)}{0,01} \times 28,125 = 7.875 \text{ detik}$$

Waktu produksi produksi (T_p) adalah 7.875 detik ($T_{pp} = T_{ps}$)

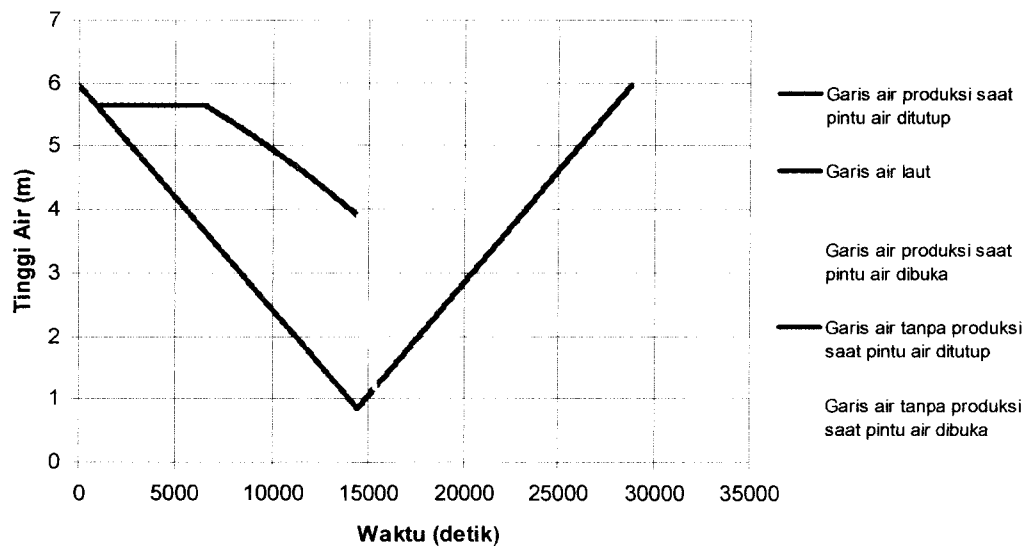
Untuk mengetahui debit air dapat dicari dengan menggunakan rumus 3.13, karena rata-rata beda tinggi air jatuh air produksi sebelum pintu air dibuka (h_p) dan setelah pintu air dibuka (h_{pp}) adalah sama yaitu sebesar 2,53 m, maka untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api adalah sebagai berikut.

$$Q = 0,82 \times 1,76625 \sqrt{2 \times 9,78 \times 2,53} = 10,19 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Pergerakan air laut dan air kolam dalam memproduksi energi dapat dilihat dalam grafik 5.4 Pergerakan air produksi waktu air laut pasang, dan grafik 5.5 Pergerakan air produksi waktu air laut surut.



Gambar 5.4 Pergerakan air produksi waktu air laut pasang



Gambar 5.5 Pergerakan air produksi waktu air laut surut.

Untuk mengetahui luas pintu air maka perlu dicari tinggi air yang dimasukan atau dikeluarkan ke dalam kolam selama pintu air dibuka (ht).

$$\begin{aligned} ht &= HK_{sa} - HK_{pp} \\ &= HK_{sp} - HK_{pa} \end{aligned} \quad (5.30)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} ht &= 5,64 - 2,90 \\ &= 3,90 - 1,16 \\ &= 2,74 \text{ m} \end{aligned}$$

Volume air yang dimasukan ke dalam atau dikeluarkan dari kolam selama membuka pintu air (V_{kb}).

$$V_{kb} = ht \times Ak_1 \quad (5.31)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$\begin{aligned} V_{kb} &= 2,74 \times 25.400 \\ &= 69.596 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Debit air awal waktu membuka pintu air (Q_{p0}) dapat dicari dengan mengacu dengan menggunakan rumus 5.18.

$$Q_{p0} = \frac{2 \times V_{kb}}{T_{mp}} \quad (5.32)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$Q_{p_0} = \frac{2 \times 69.596}{900}$$

$$= 154,66 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Debit air awal yang dilayani oleh pipa ke dalam atau ke luar kolam (Q_{p_p}) dengan menggunakan rumus 3.13, untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api.

$$Q_{p_p} = 0,82 \times 1,76625 \sqrt{2 \times 9,78 \times 2,74} = 10,6 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Debit air awal yang dilayani oleh pintu air ke dalam atau ke luar kolam (Q_{p_i}) dapat dicari dengan cara sebagai berikut.

$$Q_{p_i} = Q_{p_0} - Q_{p_p} \quad (5.33)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$Q_{p_i} = 154,66 - 10,6$$

$$= 144,05 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Luas pintu air (A_{p_i}) dapat diketahui dengan mengacu dari rumus 3.13, didapat persamaan sebagai berikut.

$$A_{p_i} = \frac{Q_{p_i}}{cd \times \sqrt{2 \times g \times ht}} \quad (5.34)$$

Untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi-api

$$A_{p_i} = \frac{144,05}{0,82 \times \sqrt{2 \times 9,78 \times 2,74}}$$

$$= 24 \text{ m}^2.$$

Daya yang dihasilkan turbin untuk satu kali operasi (P) dapat dihitung menggunakan rumus 3.5, karena beda tinggi air jatuh produksi rata-rata saat sebelum dan setelah membuka pintu air sama maka untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api adalah sebagai berikut.

$$P = \eta_0 \times \frac{(h_p + h_{pp}) \times Q \times \gamma}{75} \times nc \quad (5.35)$$

$$P = 0,75 \times \frac{(2,53 + 2,53) \times 10,19 \times 1025}{75} \times 60$$

$$= 15.852,81 \text{ DK}$$

Energi yang dihasilkan selama satu tahun dapat dicari dengan mengacu pada rumus 5.23, karena waktu produksi, debit air, beda tinggi air jatuh waktu air laut pasang dan

air surut sama, energi yang dihasilkan selama 1 tahun untuk tinjauan di daerah Bagan Siapi api adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 E_{1\text{Tahun}} &= 2^2 \times 0,75 \times \frac{(2,53 + 2,53) \times 10,19 \times 1025}{75} \times \left(\frac{7875 + 311,76}{3600} \right) \times 705 \times 30 \times 0,736 \\
 &= 74.824.372 \text{ kWh} = 74.824,372 \text{ MWh}
 \end{aligned}$$

5.4.4 Kesimpulan

Dari hasil simulasi pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal untuk tinjauan daerah di Bagan Siapi api adalah Luas kolam minimal adalah 1,27 hektar, luas kolam optimal adalah 8,95 hektar, energi yang dihasilkan untuk luas kolam optimal dengan 1 unit turbin adalah 3.536,83 MWh dan energi yang dihasilkan untuk luas kolam 76,2 hektar dengan 30 unit turbin adalah 74.824,372 MWh.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari penelitian potensi pasang surut untuk pembangkit listrik di dapat kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasar syarat kelayakan untuk membangun pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal yaitu beda tinggi rata-rata ($\Delta \bar{h}$) minimal 2,5 m, kawasan sumatra memiliki 7 tempat yang berpotensi, ketujuh tempat itu adalah Sungai asahan (2,66 m), Bagan Siapi-api (5,12 m), Blandong (3,28 m), Sungai Indragiri (2,84 m), Sungai Jambi (2,52 m), Muntor (2,79 m), Sungai Musi (2,74 m).
2. Dari hasil analisis data daerah Bagan Siapi api memiliki potensi kandungan energi terbesar untuk kawasan Sumatra yaitu perkiraan energi tiap tahunnya sebesar 476.167,39 kWh.
3. Dari hasil simulasi pembangkit listrik tenaga pasang surut sistem daur ganda menggunakan kolam tunggal untuk tinjauan daerah di Bagan Siapi api adalah Luas kolam minimal adalah 1,27 hektar, luas kolam optimal adalah 8,95 hektar.
4. Energi yang dihasilkan untuk luas kolam optimal dengan 1 unit turbin adalah 3.536,83 MWh dan energi yang dihasilkan untuk luas kolam 76,2 hektar dengan 30 unit turbin adalah 74.824,372 MWh.

6.2 Saran

1. Di Indonesia perlu adanya pengumpulan data pasang surut air laut dalam jangka waktu 19 tahun untuk mengetahui MHWL dan MLWL yang tepat.
2. Perlu adanya kajian nilai ekonomis terhadap penerapan pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut ditinjau dari segi nilai investasi, pengembalian modal investasi, dan energi yang dihasilkan.
3. Dalam penelitian ini belum melibatkan struktur dari pembangkit listrik tenaga pasang surut, sehingga perlu direncanakan struktur yang tepat untuk dapat menerapkan pembangkit listrik tenaga pasang surut.
4. Penggunaan metode susunan kolam tunggal dengan sistem daur air ganda hanya merupakan salah satu metode yang dapat digunakan unruk memperhitungkan besarnya potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit listrik tenaga pasang

surut, untuk itu perlu adanya penerapan metode lain agar dapat diperoleh perbandingan besarnya energi yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abdulmutallib Danuningrat, 1977, *Kuliah Pelabuhan Bagian I*, Departemen Teknik Sipil ITB, Bandung.
2. Abdul Kadir, 1995, *Energy*, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta
3. A.M. Gorlov, 2001, *Tydal Energy*, Academic Press of Northeastern University, Boston Massacushetts
4. Bambang Triatmojo 1996, *Pelabuhan*, Penerbit Beta Offset, Jogjakarta.
5. Bambang Triatmojo, 1996, *Teknik Pantai*, Penerbit Beta Offset, Jogjakarta
6. Christian Tobing, 2001, *Menggagas energi alternatif memanfaatkan pasang surut air laut*, Sinar Harapan, Jakarta
7. Dandekar,M.M. & Sharma,K.N, 1991, *Pembangkit Listrik Tenaga Air*, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta.
8. Google Answers, 2004, *International Water Power Energy Business with a focus on tidal power*, Google.com
9. Harsono Supardjo, 2003, *Energi pasang surut*, Kompas, Jakarta
10. Pusat Penelitian Dan Pengembangan Oseanologi – LIPPI, 1991, *Loka Karya Nasional Tentang Pemanfaatan Data Pasang Surut Dan Data Lain Yang Terkait*, Dinas Hidro-Oseanografi TNI AL, Jakarta
11. Laboratorium Pengkajian Teknik Pantai BPP, 1993, *Teknologi & Japan International Cooperation Agency*, Seminar Teknik Pantai '93, Yogyakarta.

12. Microsoft Encarta, 2005, *Encarta Reference Library Premium 2005*, Microsoft Corporation
13. O.F Patty, 1995, *Tenaga Air*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
14. Wiranto Arismunandar, 2004, *Penggerak Mula Turbin*, Penerbit Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Lampiran A
Kartu Peserta Tugas Akhir



UNTUK DOSEN

KARTU PRESENSI KONSULTASI
TUGAS AKHIR MAHASISWA

PERIODE KE : 1 (Sep 04 - Feb 05) ✓

TAHUN : 2004 - 2005

BERLAKU MULAI TGL ~~14-Dec-04~~ ^{Juni} ~~14-Feb-05~~ ? !

NO	N A M A	NO.MHS.	BID.STUDI
1.	Supriyono	00 511 331	Teknik Sipil
2.	Yoseph Virtanto	00 511 340	Teknik Sipil

JUDUL TUGAS AKHIR

Penelitian potensial energi pasang surut untuk pembangkit tenaga listrik

Dosen Pembimbing I : Ruzardi,Dr,Ir,H,MS

Dosen Pembimbing II : Endang Tantrawati,Ir,MT



Jogyakarta, 14-Dec-04

a.n. Dekan

Munadhir
 Ir.H.Munadhir, MS

Catatan :

Seminar : _____

Sidang : _____

Pendadaran : _____

16:12:02

Diperpanjang 8/1 Juli 2005

23/5
16

Lampiran B

Data Pasang Surut

Bagan Siapi api

11. BAGAN SI-API-API

Posisi : Lintang (Lat): 02°.2 U(N)
(Position) Bujur (Long): 100°.6 T(E)

Waktu : GMT+07.00
(Time)

Gerakan pasang surut diramalkan terhadap suatu Muka Surutan yang letaknya 32 dm di bawah DT.
(Predictions are referred to Chart Datum 32 dms below MSL).

Tetapan yang digunakan (Tidal constants)	:	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	M4	MS4	Zo
Amplitudo dalam cm (Amplitude in cm)	:	170	90	35	24	18	4	6	13	14	320
360° - g°	:	226	176	235	176	332	162	333	159	113	-

KOREKSI BULANAN (dalam cm) (Monthly correction in cm)

Jan	Peb	Mrt	Apr	Mei	Juni	Juli	Agus	Sept	Okt	Nop	Des
Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec

HAL-HAL YANG KHUSUS (Particulars)

Keterangan – keterangan yang dikutip dari Berita Pelaut Indonesia, diumumkan setelah penerbitan daftar pasang surut.
(Additional data published in Notice to Mariners)

Tanggal (Date)	Nomor Berita (No.)	Hal-hal yang khusus (Particulars)

Lampiran C
Hasil Perhitungan Iterasi
Saat Air Pasang dan Surut
Di Bagan Siapi api

Lampiran C

Tabel C-1 Hasil perhitungan iterasi saat air pasang di Bagan Siapi api

HL (m)	Hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
3,16	2,000	9,059	28,125	127,388	1,16
3,17	2,005	9,070	56,250	255,093	1,17
3,18	2,010	9,081	84,375	383,114	1,17
3,19	2,015	9,092	112,500	511,448	1,18
3,20	2,020	9,104	140,625	640,094	1,18
3,21	2,025	9,115	168,750	769,051	1,19
3,22	2,030	9,126	196,875	898,316	1,19
3,23	2,035	9,137	225,000	1.027,889	1,20
3,24	2,040	9,148	253,125	1.157,766	1,20
3,25	2,044	9,159	281,250	1.287,947	1,21
3,26	2,049	9,170	309,375	1.418,429	1,21
3,27	2,054	9,181	337,500	1.549,212	1,22
3,28	2,059	9,191	365,625	1.680,294	1,22
3,29	2,064	9,202	393,750	1.811,673	1,23
3,30	2,069	9,213	421,875	1.943,347	1,23
3,31	2,073	9,224	450,000	2.075,315	1,24
3,32	2,078	9,234	478,125	2.207,575	1,24
3,33	2,083	9,245	506,250	2.340,126	1,25
3,34	2,088	9,256	534,375	2.472,966	1,25
3,35	2,093	9,266	562,500	2.606,095	1,26
3,36	2,097	9,277	590,625	2.739,509	1,26
3,37	2,102	9,287	618,750	2.873,208	1,27
3,38	2,107	9,298	646,875	3.007,190	1,27
3,39	2,112	9,308	675,000	3.141,454	1,28
3,40	2,116	9,318	703,125	3.275,999	1,28
3,41	2,121	9,329	731,250	3.410,822	1,29

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	Hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
3,42	2,126	9,339	759,375	3.545,923	1,29
3,43	2,130	9,349	787,500	3.681,300	1,30
3,44	2,135	9,360	815,625	3.816,952	1,30
3,45	2,140	9,370	843,750	3.952,878	1,31
3,46	2,144	9,380	871,875	4.089,075	1,32
3,47	2,149	9,390	900,000	4.225,543	1,32
3,48	2,154	9,400	928,125	4.362,280	1,33
3,49	2,158	9,410	956,250	4.499,285	1,33
3,50	2,163	9,420	984,375	4.636,556	1,34
3,51	2,167	9,430	1.012,500	4.774,093	1,34
3,52	2,172	9,440	1.040,625	4.911,894	1,35
3,53	2,177	9,450	1.068,750	5.049,958	1,35
3,54	2,181	9,460	1.096,875	5.188,283	1,36
3,55	2,186	9,470	1.125,000	5.326,868	1,36
3,56	2,190	9,480	1.153,125	5.465,712	1,37
3,57	2,195	9,490	1.181,250	5.604,814	1,38
3,58	2,199	9,499	1.209,375	5.744,172	1,38
3,59	2,204	9,509	1.237,500	5.883,786	1,39
3,60	2,208	9,519	1.265,625	6.023,653	1,39
3,61	2,213	9,529	1.293,750	6.163,773	1,40
3,62	2,217	9,538	1.321,875	6.304,145	1,40
3,63	2,222	9,548	1.350,000	6.444,767	1,41
3,64	2,226	9,557	1.378,125	6.585,639	1,41
3,65	2,231	9,567	1.406,250	6.726,758	1,42
3,66	2,235	9,576	1.434,375	6.868,125	1,42
3,67	2,240	9,586	1.462,500	7.009,737	1,43

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
3,68	2,244	9,595	1.490,625	7.151,593	1,44
3,69	2,248	9,605	1.518,750	7.293,694	1,44
3,70	2,253	9,614	1.546,875	7.436,036	1,45
3,71	2,257	9,624	1.575,000	7.578,620	1,45
3,72	2,262	9,633	1.603,125	7.721,444	1,46
3,73	2,266	9,642	1.631,250	7.864,507	1,46
3,74	2,270	9,652	1.659,375	8.007,809	1,47
3,75	2,275	9,661	1.687,500	8.151,347	1,48
3,76	2,279	9,670	1.715,625	8.295,120	1,48
3,77	2,283	9,679	1.743,750	8.439,129	1,49
3,78	2,288	9,688	1.771,875	8.583,371	1,49
3,79	2,292	9,698	1.800,000	8.727,846	1,50
3,80	2,296	9,707	1.828,125	8.872,553	1,50
3,81	2,301	9,716	1.856,250	9.017,490	1,51
3,82	2,305	9,725	1.884,375	9.162,657	1,52
3,83	2,309	9,734	1.912,500	9.308,053	1,52
3,84	2,314	9,743	1.940,625	9.453,676	1,53
3,85	2,318	9,752	1.968,750	9.599,526	1,53
3,86	2,322	9,761	1.996,875	9.745,601	1,54
3,87	2,326	9,770	2.025,000	9.891,901	1,54
3,88	2,331	9,779	2.053,125	10.038,424	1,55
3,89	2,335	9,788	2.081,250	10.185,170	1,56
3,90	2,339	9,796	2.109,375	10.332,138	1,56
3,91	2,343	9,805	2.137,500	10.479,327	1,57
3,92	2,347	9,814	2.165,625	10.626,735	1,57
3,93	2,352	9,823	2.193,750	10.774,363	1,58

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
3,94	2,356	9,832	2.221,875	10.922,208	1,58
3,95	2,360	9,840	2.250,000	11.070,270	1,59
3,96	2,364	9,849	2.278,125	11.218,549	1,60
3,97	2,368	9,858	2.306,250	11.367,042	1,60
3,98	2,372	9,866	2.334,375	11.515,750	1,61
3,99	2,377	9,875	2.362,500	11.664,672	1,61
4,00	2,381	9,883	2.390,625	11.813,805	1,62
4,01	2,385	9,892	2.418,750	11.963,151	1,63
4,02	2,389	9,901	2.446,875	12.112,707	1,63
4,03	2,393	9,909	2.475,000	12.262,473	1,64
4,04	2,397	9,918	2.503,125	12.412,448	1,64
4,05	2,401	9,926	2.531,250	12.562,631	1,65
4,06	2,405	9,934	2.559,375	12.713,022	1,65
4,07	2,409	9,943	2.587,500	12.863,618	1,66
4,08	2,414	9,951	2.615,625	13.014,421	1,67
4,09	2,418	9,960	2.643,750	13.165,428	1,67
4,10	2,422	9,968	2.671,875	13.316,639	1,68
4,11	2,426	9,976	2.700,000	13.468,053	1,68
4,12	2,430	9,985	2.728,125	13.619,669	1,69
4,13	2,434	9,993	2.756,250	13.771,487	1,70
4,14	2,438	10,001	2.784,375	13.923,506	1,70
4,15	2,442	10,009	2.812,500	14.075,724	1,71
4,16	2,446	10,018	2.840,625	14.228,142	1,71
4,17	2,450	10,026	2.868,750	14.380,757	1,72
4,18	2,454	10,034	2.896,875	14.533,570	1,73
4,19	2,458	10,042	2.925,000	14.686,580	1,73

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
4,20	2,462	10,050	2.953,125	14.839,786	1,74
4,21	2,466	10,058	2.981,250	14.993,187	1,74
4,22	2,470	10,066	3.009,375	15.146,782	1,75
4,23	2,474	10,074	3.037,500	15.300,571	1,76
4,24	2,478	10,082	3.065,625	15.454,552	1,76
4,25	2,482	10,090	3.093,750	15.608,726	1,77
4,26	2,485	10,098	3.121,875	15.763,091	1,77
4,27	2,489	10,106	3.150,000	15.917,647	1,78
4,28	2,493	10,114	3.178,125	16.072,393	1,79
4,29	2,497	10,122	3.206,250	16.227,327	1,79
4,30	2,501	10,130	3.234,375	16.382,451	1,80
4,31	2,505	10,138	3.262,500	16.537,761	1,80
4,32	2,509	10,146	3.290,625	16.693,259	1,81
4,33	2,513	10,154	3.318,750	16.848,943	1,82
4,34	2,517	10,162	3.346,875	17.004,813	1,82
4,35	2,521	10,169	3.375,000	17.160,868	1,83
4,36	2,524	10,177	3.403,125	17.317,106	1,84
4,37	2,528	10,185	3.431,250	17.473,529	1,84
4,38	2,532	10,193	3.459,375	17.630,133	1,85
4,39	2,536	10,200	3.487,500	17.786,920	1,85
4,40	2,540	10,208	3.515,625	17.943,889	1,86
4,41	2,544	10,216	3.543,750	18.101,038	1,87
4,42	2,547	10,223	3.571,875	18.258,367	1,87
4,43	2,551	10,231	3.600,000	18.415,876	1,88
4,44	2,555	10,239	3.628,125	18.573,563	1,89
4,45	2,559	10,246	3.656,250	18.731,429	1,89

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
4,46	2,563	10,254	3.684,375	18.889,471	1,90
4,47	2,566	10,261	3.712,500	19.047,691	1,90
4,48	2,570	10,269	3.740,625	19.206,086	1,91
4,49	2,574	10,276	3.768,750	19.364,657	1,92
4,50	2,578	10,284	3.796,875	19.523,403	1,92
4,51	2,581	10,291	3.825,000	19.682,323	1,93
4,52	2,585	10,299	3.853,125	19.841,417	1,93
4,53	2,589	10,306	3.881,250	20.000,684	1,94
4,54	2,593	10,314	3.909,375	20.160,123	1,95
4,55	2,596	10,321	3.937,500	20.319,733	1,95
4,56	2,600	10,329	3.965,625	20.479,515	1,96
4,57	2,604	10,336	3.993,750	20.639,467	1,97
4,58	2,607	10,343	4.021,875	20.799,588	1,97
4,59	2,611	10,351	4.050,000	20.959,880	1,98
4,60	2,615	10,358	4.078,125	21.120,339	1,99
4,61	2,618	10,365	4.106,250	21.280,967	1,99
4,62	2,622	10,372	4.134,375	21.441,762	2,00
4,63	2,626	10,380	4.162,500	21.602,724	2,00
4,64	2,629	10,387	4.190,625	21.763,852	2,01
4,65	2,633	10,394	4.218,750	21.925,146	2,02
4,66	2,637	10,401	4.246,875	22.086,605	2,02
4,67	2,640	10,409	4.275,000	22.248,229	2,03
4,68	2,644	10,416	4.303,125	22.410,016	2,04
4,69	2,648	10,423	4.331,250	22.571,967	2,04
4,70	2,651	10,430	4.359,375	22.734,081	2,05
4,71	2,655	10,437	4.387,500	22.896,356	2,06

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
4,72	2,659	10,444	4.415,625	23.058,794	2,06
4,73	2,662	10,451	4.443,750	23.221,392	2,07
4,74	2,666	10,458	4.471,875	23.384,152	2,07
4,75	2,669	10,465	4.500,000	23.547,071	2,08
4,76	2,673	10,472	4.528,125	23.710,149	2,09
4,77	2,677	10,479	4.556,250	23.873,387	2,09
4,78	2,680	10,486	4.584,375	24.036,782	2,10
4,79	2,684	10,493	4.612,500	24.200,336	2,11
4,80	2,687	10,500	4.640,625	24.364,047	2,11
4,81	2,691	10,507	4.668,750	24.527,915	2,12
4,82	2,694	10,514	4.696,875	24.691,939	2,13
4,83	2,698	10,521	4.725,000	24.856,118	2,13
4,84	2,701	10,528	4.753,125	25.020,453	2,14
4,85	2,705	10,535	4.781,250	25.184,942	2,15
4,86	2,708	10,542	4.809,375	25.349,586	2,15
4,87	2,712	10,549	4.837,500	25.514,383	2,16
4,88	2,715	10,555	4.865,625	25.679,333	2,16
4,89	2,719	10,562	4.893,750	25.844,436	2,17
4,90	2,723	10,569	4.921,875	26.009,691	2,18
4,91	2,726	10,576	4.950,000	26.175,097	2,18
4,92	2,729	10,583	4.978,125	26.340,655	2,19
4,93	2,733	10,589	5.006,250	26.506,363	2,20
4,94	2,736	10,596	5.034,375	26.672,221	2,20
4,95	2,740	10,603	5.062,500	26.838,229	2,21
4,96	2,743	10,609	5.090,625	27.004,386	2,22
4,97	2,747	10,616	5.118,750	27.170,691	2,22

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
4,98	2,750	10,623	5.146,875	27.337,145	2,23
4,99	2,754	10,629	5.175,000	27.503,746	2,24
5,00	2,757	10,636	5.203,125	27.670,494	2,24
5,01	2,761	10,643	5.231,250	27.837,389	2,25
5,02	2,764	10,649	5.259,375	28.004,431	2,26
5,03	2,767	10,656	5.287,500	28.171,618	2,26
5,04	2,771	10,663	5.315,625	28.338,950	2,27
5,05	2,774	10,669	5.343,750	28.506,427	2,28
5,06	2,778	10,676	5.371,875	28.674,048	2,28
5,07	2,781	10,682	5.400,000	28.841,813	2,29
5,08	2,784	10,689	5.428,125	29.009,722	2,30
5,09	2,788	10,695	5.456,250	29.177,774	2,30
5,10	2,791	10,702	5.484,375	29.345,968	2,31
5,11	2,795	10,708	5.512,500	29.514,304	2,32
5,12	2,798	10,715	5.540,625	29.682,781	2,32
5,13	2,801	10,721	5.568,750	29.851,400	2,33
5,14	2,805	10,727	5.596,875	30.020,160	2,34
5,15	2,808	10,734	5.625,000	30.189,059	2,34
5,16	2,811	10,740	5.653,125	30.358,099	2,35
5,17	2,815	10,747	5.681,250	30.527,278	2,36
5,18	2,818	10,753	5.709,375	30.696,596	2,36
5,19	2,821	10,759	5.737,500	30.866,052	2,37
5,20	2,825	10,766	5.765,625	31.035,646	2,38
5,21	2,828	10,772	5.793,750	31.205,378	2,38
5,22	2,831	10,778	5.821,875	31.375,247	2,39
5,23	2,835	10,785	5.850,000	31.545,253	2,40

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
5,24	2,838	10,791	5.878,125	31.715,396	2,40
5,25	2,841	10,797	5.906,250	31.885,674	2,41
5,26	2,845	10,804	5.934,375	32.056,088	2,42
5,27	2,848	10,810	5.962,500	32.226,637	2,42
5,28	2,851	10,816	5.990,625	32.397,320	2,43
5,29	2,855	10,822	6.018,750	32.568,138	2,44
5,30	2,858	10,828	6.046,875	32.739,090	2,44
5,31	2,861	10,835	6.075,000	32.910,175	2,45
5,32	2,864	10,841	6.103,125	33.081,393	2,46
5,33	2,868	10,847	6.131,250	33.252,744	2,46
5,34	2,871	10,853	6.159,375	33.424,227	2,47
5,35	2,874	10,859	6.187,500	33.595,841	2,48
5,36	2,877	10,865	6.215,625	33.767,588	2,48
5,37	2,881	10,872	6.243,750	33.939,465	2,49
5,38	2,884	10,878	6.271,875	34.111,473	2,50
5,39	2,887	10,884	6.300,000	34.283,611	2,50
5,40	2,890	10,890	6.328,125	34.455,879	2,51
5,41	2,893	10,896	6.356,250	34.628,276	2,52
5,42	2,897	10,902	6.384,375	34.800,803	2,52
5,43	2,900	10,908	6.412,500	34.973,458	2,53
5,44	2,903	10,914	6.440,625	35.146,242	2,54
5,45	2,906	10,920	6.468,750	35.319,153	2,54
5,46	2,909	10,926	6.496,875	35.492,192	2,55
5,47	2,913	10,932	6.525,000	35.665,358	2,56
5,48	2,916	10,938	6.553,125	35.838,651	2,56
5,49	2,919	10,944	6.581,250	36.012,071	2,57

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
5,50	2,922	10,950	6.609,375	36.185,616	2,58
5,51	2,925	10,956	6.637,500	36.359,287	2,58
5,52	2,929	10,962	6.665,625	36.533,083	2,59
5,53	2,932	10,968	6.693,750	36.707,005	2,60
5,54	2,935	10,973	6.721,875	36.881,051	2,61
5,55	2,938	10,979	6.750,000	37.055,221	2,61
5,56	2,941	10,985	6.778,125	37.229,514	2,62
5,57	2,944	10,991	6.806,250	37.403,932	2,63
5,58	2,947	10,997	6.834,375	37.578,472	2,63
5,59	2,951	11,003	6.862,500	37.753,136	2,64
5,60	2,954	11,009	6.890,625	37.927,921	2,65
5,61	2,957	11,014	6.918,750	38.102,829	2,65
5,62	2,960	11,020	6.946,875	38.277,858	2,66
5,63	2,963	11,026	6.975,000	38.453,009	2,67
5,64	2,966	11,032	7.003,125	38.628,281	2,67
5,65	2,969	11,037	7.031,250	38.803,673	2,68
5,66	2,972	11,043	7.059,375	38.979,186	2,69
5,67	2,975	11,049	7.087,500	39.154,819	2,69
5,68	2,978	11,055	7.115,625	39.330,571	2,70
5,69	2,982	11,060	7.143,750	39.506,443	2,71
5,70	2,985	11,066	7.171,875	39.682,433	2,72
5,71	2,988	11,072	7.200,000	39.858,543	2,72
5,72	2,991	11,077	7.228,125	40.034,770	2,73
5,73	2,994	11,083	7.256,250	40.211,115	2,74
5,74	2,997	11,089	7.284,375	40.387,578	2,74
5,75	3,000	11,094	7.312,500	40.564,159	2,75

Lampiran C

Tabel C-1 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tpsa (detik)	Vk (m ³)	Hk (m)
5,76	3,003	11,100	7.340,625	40.740,856	2,76
5,77	3,006	11,106	7.368,750	40.917,670	2,76
5,78	3,009	11,111	7.396,875	41.094,600	2,77
5,79	3,012	11,117	7.425,000	41.271,646	2,78
5,80	3,015	11,123	7.453,125	41.448,807	2,78
5,81	3,018	11,128	7.481,250	41.626,084	2,79
5,82	3,021	11,134	7.509,375	41.803,476	2,80
5,83	3,024	11,139	7.537,500	41.980,983	2,81
5,84	3,027	11,145	7.565,625	42.158,604	2,81
5,85	3,030	11,150	7.593,750	42.336,339	2,82
5,86	3,033	11,156	7.621,875	42.514,187	2,83
5,87	3,036	11,161	7.650,000	42.692,150	2,83
5,88	3,039	11,167	7.678,125	42.870,225	2,84
5,89	3,042	11,172	7.706,250	43.048,413	2,85
5,90	3,045	11,178	7.734,375	43.226,713	2,85
5,91	3,048	11,183	7.762,500	43.405,126	2,86
5,92	3,051	11,189	7.790,625	43.583,650	2,87
5,93	3,054	11,194	7.818,750	43.762,286	2,88
5,94	3,057	11,200	7.846,875	43.941,034	2,88
5,95	3,060	11,205	7.875,000	44.119,892	2,89
5,96	3,063	11,210	7.903,125	44.298,861	2,90

Lampiran C

Tabel C-2 Hasil perhitungan iterasi saat air surut di Bagan Siapi api

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
3,64	2,000	9,059	28,125	127,388	5,64
3,63	2,005	9,070	56,250	255,093	5,63
3,62	2,010	9,081	84,375	383,114	5,63
3,61	2,015	9,092	112,500	511,448	5,62
3,60	2,020	9,104	140,625	640,094	5,62
3,59	2,025	9,115	168,750	769,051	5,61
3,58	2,030	9,126	196,875	898,316	5,61
3,57	2,035	9,137	225,000	1.027,889	5,60
3,56	2,040	9,148	253,125	1.157,766	5,60
3,55	2,044	9,159	281,250	1.287,947	5,59
3,54	2,049	9,170	309,375	1.418,429	5,59
3,53	2,054	9,181	337,500	1.549,212	5,58
3,52	2,059	9,191	365,625	1.680,294	5,58
3,51	2,064	9,202	393,750	1.811,673	5,57
3,50	2,069	9,213	421,875	1.943,347	5,57
3,49	2,073	9,224	450,000	2.075,315	5,56
3,48	2,078	9,234	478,125	2.207,575	5,56
3,47	2,083	9,245	506,250	2.340,126	5,55
3,46	2,088	9,256	534,375	2.472,966	5,55
3,45	2,093	9,266	562,500	2.606,095	5,54
3,44	2,097	9,277	590,625	2.739,509	5,54
3,43	2,102	9,287	618,750	2.873,208	5,53
3,42	2,107	9,298	646,875	3.007,190	5,53
3,41	2,112	9,308	675,000	3.141,454	5,52
3,40	2,116	9,318	703,125	3.275,999	5,52
3,39	2,121	9,329	731,250	3.410,822	5,51
3,38	2,126	9,339	759,375	3.545,923	5,51

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
3,37	2,130	9,349	787,500	3.681,300	5,50
3,36	2,135	9,360	815,625	3.816,952	5,50
3,35	2,140	9,370	843,750	3.952,878	5,49
3,34	2,144	9,380	871,875	4.089,075	5,48
3,33	2,149	9,390	900,000	4.225,543	5,48
3,32	2,154	9,400	928,125	4.362,280	5,47
3,31	2,158	9,410	.956,250	4.499,285	5,47
3,30	2,163	9,420	984,375	4.636,556	5,46
3,29	2,167	9,430	1.012,500	4.774,093	5,46
3,28	2,172	9,440	1.040,625	4.911,894	5,45
3,27	2,177	9,450	1.068,750	5.049,958	5,45
3,26	2,181	9,460	1.096,875	5.188,283	5,44
3,25	2,186	9,470	1.125,000	5.326,868	5,44
3,24	2,190	9,480	1.153,125	5.465,712	5,43
3,23	2,195	9,490	1.181,250	5.604,814	5,42
3,22	2,199	9,499	1.209,375	5.744,172	5,42
3,21	2,204	9,509	1.237,500	5.883,786	5,41
3,20	2,208	9,519	1.265,625	6.023,653	5,41
3,19	2,213	9,529	1.293,750	6.163,773	5,40
3,18	2,217	9,538	1.321,875	6.304,145	5,40
3,17	2,222	9,548	1.350,000	6.444,767	5,39
3,16	2,226	9,557	1.378,125	6.585,639	5,39
3,15	2,231	9,567	1.406,250	6.726,758	5,38
3,14	2,235	9,576	1.434,375	6.868,125	5,38
3,13	2,240	9,586	1.462,500	7.009,737	5,37
3,12	2,244	9,595	1.490,625	7.151,593	5,36
3,11	2,248	9,605	1.518,750	7.293,694	5,36

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
3,10	2,253	9,614	1.546,875	7.436,036	5,35
3,09	2,257	9,624	1.575,000	7.578,620	5,35
3,08	2,262	9,633	1.603,125	7.721,444	5,34
3,07	2,266	9,642	1.631,250	7.864,507	5,34
3,06	2,270	9,652	1.659,375	8.007,809	5,33
3,05	2,275	9,661	1.687,500	8.151,347	5,32
3,04	2,279	9,670	1.715,625	8.295,120	5,32
3,03	2,283	9,679	1.743,750	8.439,129	5,31
3,02	2,288	9,688	1.771,875	8.583,371	5,31
3,01	2,292	9,698	1.800,000	8.727,846	5,30
3,00	2,296	9,707	1.828,125	8.872,553	5,30
2,99	2,301	9,716	1.856,250	9.017,490	5,29
2,98	2,305	9,725	1.884,375	9.162,657	5,28
2,97	2,309	9,734	1.912,500	9.308,053	5,28
2,96	2,314	9,743	1.940,625	9.453,676	5,27
2,95	2,318	9,752	1.968,750	9.599,526	5,27
2,94	2,322	9,761	1.996,875	9.745,601	5,26
2,93	2,326	9,770	2.025,000	9.891,901	5,26
2,92	2,331	9,779	2.053,125	10.038,424	5,25
2,91	2,335	9,788	2.081,250	10.185,170	5,24
2,90	2,339	9,796	2.109,375	10.332,138	5,24
2,89	2,343	9,805	2.137,500	10.479,327	5,23
2,88	2,347	9,814	2.165,625	10.626,735	5,23
2,87	2,352	9,823	2.193,750	10.774,363	5,22
2,86	2,356	9,832	2.221,875	10.922,208	5,22
2,85	2,360	9,840	2.250,000	11.070,270	5,21
2,84	2,364	9,849	2.278,125	11.218,549	5,20

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
2,83	2,368	9,858	2.306,250	11.367,042	5,20
2,82	2,372	9,866	2.334,375	11.515,750	5,19
2,81	2,377	9,875	2.362,500	11.664,672	5,19
2,80	2,381	9,883	2.390,625	11.813,805	5,18
2,79	2,385	9,892	2.418,750	11.963,151	5,17
2,78	2,389	9,901	2.446,875	12.112,707	5,17
2,77	2,393	9,909	2.475,000	12.262,473	5,16
2,76	2,397	9,918	2.503,125	12.412,448	5,16
2,75	2,401	9,926	2.531,250	12.562,631	5,15
2,74	2,405	9,934	2.559,375	12.713,022	5,15
2,73	2,409	9,943	2.587,500	12.863,618	5,14
2,72	2,414	9,951	2.615,625	13.014,421	5,13
2,71	2,418	9,960	2.643,750	13.165,428	5,13
2,70	2,422	9,968	2.671,875	13.316,639	5,12
2,69	2,426	9,976	2.700,000	13.468,053	5,12
2,68	2,430	9,985	2.728,125	13.619,669	5,11
2,67	2,434	9,993	2.756,250	13.771,487	5,10
2,66	2,438	10,001	2.784,375	13.923,506	5,10
2,65	2,442	10,009	2.812,500	14.075,724	5,09
2,64	2,446	10,018	2.840,625	14.228,142	5,09
2,63	2,450	10,026	2.868,750	14.380,757	5,08
2,62	2,454	10,034	2.896,875	14.533,570	5,07
2,61	2,458	10,042	2.925,000	14.686,580	5,07
2,60	2,462	10,050	2.953,125	14.839,786	5,06
2,59	2,466	10,058	2.981,250	14.993,187	5,06
2,58	2,470	10,066	3.009,375	15.146,782	5,05
2,57	2,474	10,074	3.037,500	15.300,571	5,04

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
2,56	2,478	10,082	3.065,625	15.454,552	5,04
2,55	2,482	10,090	3.093,750	15.608,726	5,03
2,54	2,485	10,098	3.121,875	15.763,091	5,03
2,53	2,489	10,106	3.150,000	15.917,647	5,02
2,52	2,493	10,114	3.178,125	16.072,393	5,01
2,51	2,497	10,122	3.206,250	16.227,327	5,01
2,50	2,501	10,130	3.234,375	16.382,451	5,00
2,49	2,505	10,138	3.262,500	16.537,761	5,00
2,48	2,509	10,146	3.290,625	16.693,259	4,99
2,47	2,513	10,154	3.318,750	16.848,943	4,98
2,46	2,517	10,162	3.346,875	17.004,813	4,98
2,45	2,521	10,169	3.375,000	17.160,868	4,97
2,44	2,524	10,177	3.403,125	17.317,106	4,96
2,43	2,528	10,185	3.431,250	17.473,529	4,96
2,42	2,532	10,193	3.459,375	17.630,133	4,95
2,41	2,536	10,200	3.487,500	17.786,920	4,95
2,40	2,540	10,208	3.515,625	17.943,889	4,94
2,39	2,544	10,216	3.543,750	18.101,038	4,93
2,38	2,547	10,223	3.571,875	18.258,367	4,93
2,37	2,551	10,231	3.600,000	18.415,876	4,92
2,36	2,555	10,239	3.628,125	18.573,563	4,91
2,35	2,559	10,246	3.656,250	18.731,429	4,91
2,34	2,563	10,254	3.684,375	18.889,471	4,90
2,33	2,566	10,261	3.712,500	19.047,691	4,90
2,32	2,570	10,269	3.740,625	19.206,086	4,89
2,31	2,574	10,276	3.768,750	19.364,657	4,88
2,30	2,578	10,284	3.796,875	19.523,403	4,88

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
2,29	2,581	10,291	3.825,000	19.682,323	4,87
2,28	2,585	10,299	3.853,125	19.841,417	4,87
2,27	2,589	10,306	3.881,250	20.000,684	4,86
2,26	2,593	10,314	3.909,375	20.160,123	4,85
2,25	2,596	10,321	3.937,500	20.319,733	4,85
2,24	2,600	10,329	3.965,625	20.479,515	4,84
2,23	2,604	10,336	3.993,750	20.639,467	4,83
2,22	2,607	10,343	4.021,875	20.799,588	4,83
2,21	2,611	10,351	4.050,000	20.959,880	4,82
2,20	2,615	10,358	4.078,125	21.120,339	4,81
2,19	2,618	10,365	4.106,250	21.280,967	4,81
2,18	2,622	10,372	4.134,375	21.441,762	4,80
2,17	2,626	10,380	4.162,500	21.602,724	4,80
2,16	2,629	10,387	4.190,625	21.763,852	4,79
2,15	2,633	10,394	4.218,750	21.925,146	4,78
2,14	2,637	10,401	4.246,875	22.086,605	4,78
2,13	2,640	10,409	4.275,000	22.248,229	4,77
2,12	2,644	10,416	4.303,125	22.410,016	4,76
2,11	2,648	10,423	4.331,250	22.571,967	4,76
2,10	2,651	10,430	4.359,375	22.734,081	4,75
2,09	2,655	10,437	4.387,500	22.896,356	4,74
2,08	2,659	10,444	4.415,625	23.058,794	4,74
2,07	2,662	10,451	4.443,750	23.221,392	4,73
2,06	2,666	10,458	4.471,875	23.384,152	4,73
2,05	2,669	10,465	4.500,000	23.547,071	4,72
2,04	2,673	10,472	4.528,125	23.710,149	4,71
2,03	2,677	10,479	4.556,250	23.873,387	4,71

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
2,02	2,680	10,486	4.584,375	24.036,782	4,70
2,01	2,684	10,493	4.612,500	24.200,336	4,69
2,00	2,687	10,500	4.640,625	24.364,047	4,69
1,99	2,691	10,507	4.668,750	24.527,915	4,68
1,98	2,694	10,514	4.696,875	24.691,939	4,67
1,97	2,698	10,521	4.725,000	24.856,118	4,67
1,96	2,701	10,528	4.753,125	25.020,453	4,66
1,95	2,705	10,535	4.781,250	25.184,942	4,65
1,94	2,708	10,542	4.809,375	25.349,586	4,65
1,93	2,712	10,549	4.837,500	25.514,383	4,64
1,92	2,715	10,555	4.865,625	25.679,333	4,64
1,91	2,719	10,562	4.893,750	25.844,436	4,63
1,90	2,723	10,569	4.921,875	26.009,691	4,62
1,89	2,726	10,576	4.950,000	26.175,097	4,62
1,88	2,729	10,583	4.978,125	26.340,655	4,61
1,87	2,733	10,589	5.006,250	26.506,363	4,60
1,86	2,736	10,596	5.034,375	26.672,221	4,60
1,85	2,740	10,603	5.062,500	26.838,229	4,59
1,84	2,743	10,609	5.090,625	27.004,386	4,58
1,83	2,747	10,616	5.118,750	27.170,691	4,58
1,82	2,750	10,623	5.146,875	27.337,145	4,57
1,81	2,754	10,629	5.175,000	27.503,746	4,56
1,80	2,757	10,636	5.203,125	27.670,494	4,56
1,79	2,761	10,643	5.231,250	27.837,389	4,55
1,78	2,764	10,649	5.259,375	28.004,431	4,54
1,77	2,767	10,656	5.287,500	28.171,618	4,54
1,76	2,771	10,663	5.315,625	28.338,950	4,53

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
1,75	2,774	10,669	5.343,750	28.506,427	4,52
1,74	2,778	10,676	5.371,875	28.674,048	4,52
1,73	2,781	10,682	5.400,000	28.841,813	4,51
1,72	2,784	10,689	5.428,125	29.009,722	4,50
1,71	2,788	10,695	5.456,250	29.177,774	4,50
1,70	2,791	10,702	5.484,375	29.345,968	4,49
1,69	2,795	10,708	5.512,500	29.514,304	4,48
1,68	2,798	10,715	5.540,625	29.682,781	4,48
1,67	2,801	10,721	5.568,750	29.851,400	4,47
1,66	2,805	10,727	5.596,875	30.020,160	4,46
1,65	2,808	10,734	5.625,000	30.189,059	4,46
1,64	2,811	10,740	5.653,125	30.358,099	4,45
1,63	2,815	10,747	5.681,250	30.527,278	4,44
1,62	2,818	10,753	5.709,375	30.696,596	4,44
1,61	2,821	10,759	5.737,500	30.866,052	4,43
1,60	2,825	10,766	5.765,625	31.035,646	4,42
1,59	2,828	10,772	5.793,750	31.205,378	4,42
1,58	2,831	10,778	5.821,875	31.375,247	4,41
1,57	2,835	10,785	5.850,000	31.545,253	4,40
1,56	2,838	10,791	5.878,125	31.715,396	4,40
1,55	2,841	10,797	5.906,250	31.885,674	4,39
1,54	2,845	10,804	5.934,375	32.056,088	4,38
1,53	2,848	10,810	5.962,500	32.226,637	4,38
1,52	2,851	10,816	5.990,625	32.397,320	4,37
1,51	2,855	10,822	6.018,750	32.568,138	4,36
1,50	2,858	10,828	6.046,875	32.739,090	4,36
1,49	2,861	10,835	6.075,000	32.910,175	4,35

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
1,48	2,864	10,841	6.103,125	33.081,393	4,34
1,47	2,868	10,847	6.131,250	33.252,744	4,34
1,46	2,871	10,853	6.159,375	33.424,227	4,33
1,45	2,874	10,859	6.187,500	33.595,841	4,32
1,44	2,877	10,865	6.215,625	33.767,588	4,32
1,43	2,881	10,872	6.243,750	33.939,465	4,31
1,42	2,884	10,878	6.271,875	34.111,473	4,30
1,41	2,887	10,884	6.300,000	34.283,611	4,30
1,40	2,890	10,890	6.328,125	34.455,879	4,29
1,39	2,893	10,896	6.356,250	34.628,276	4,28
1,38	2,897	10,902	6.384,375	34.800,803	4,28
1,37	2,900	10,908	6.412,500	34.973,458	4,27
1,36	2,903	10,914	6.440,625	35.146,242	4,26
1,35	2,906	10,920	6.468,750	35.319,153	4,26
1,34	2,909	10,926	6.496,875	35.492,192	4,25
1,33	2,913	10,932	6.525,000	35.665,358	4,24
1,32	2,916	10,938	6.553,125	35.838,651	4,24
1,31	2,919	10,944	6.581,250	36.012,071	4,23
1,30	2,922	10,950	6.609,375	36.185,616	4,22
1,29	2,925	10,956	6.637,500	36.359,287	4,22
1,28	2,929	10,962	6.665,625	36.533,083	4,21
1,27	2,932	10,968	6.693,750	36.707,005	4,20
1,26	2,935	10,973	6.721,875	36.881,051	4,19
1,25	2,938	10,979	6.750,000	37.055,221	4,19
1,24	2,941	10,985	6.778,125	37.229,514	4,18
1,23	2,944	10,991	6.806,250	37.403,932	4,17
1,22	2,947	10,997	6.834,375	37.578,472	4,17

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
1,21	2,951	11,003	6.862,500	37.753,136	4,16
1,20	2,954	11,009	6.890,625	37.927,921	4,15
1,19	2,957	11,014	6.918,750	38.102,829	4,15
1,18	2,960	11,020	6.946,875	38.277,858	4,14
1,17	2,963	11,026	6.975,000	38.453,009	4,13
1,16	2,966	11,032	7.003,125	38.628,281	4,13
1,15	2,969	11,037	7.031,250	38.803,673	4,12
1,14	2,972	11,043	7.059,375	38.979,186	4,11
1,13	2,975	11,049	7.087,500	39.154,819	4,11
1,12	2,978	11,055	7.115,625	39.330,571	4,10
1,11	2,982	11,060	7.143,750	39.506,443	4,09
1,10	2,985	11,066	7.171,875	39.682,433	4,08
1,09	2,988	11,072	7.200,000	39.858,543	4,08
1,08	2,991	11,077	7.228,125	40.034,770	4,07
1,07	2,994	11,083	7.256,250	40.211,115	4,06
1,06	2,997	11,089	7.284,375	40.387,578	4,06
1,05	3,000	11,094	7.312,500	40.564,159	4,05
1,04	3,003	11,100	7.340,625	40.740,856	4,04
1,03	3,006	11,106	7.368,750	40.917,670	4,04
1,02	3,009	11,111	7.396,875	41.094,600	4,03
1,01	3,012	11,117	7.425,000	41.271,646	4,02
1,00	3,015	11,123	7.453,125	41.448,807	4,02
0,99	3,018	11,128	7.481,250	41.626,084	4,01
0,98	3,021	11,134	7.509,375	41.803,476	4,00
0,97	3,024	11,139	7.537,500	41.980,983	3,99
0,96	3,027	11,145	7.565,625	42.158,604	3,99
0,95	3,030	11,150	7.593,750	42.336,339	3,98

Lampiran C

Tabel C-2 Lanjutan

HL (m)	hp (m)	Q (m ³ /detik)	Kumulatif Tps (detik)	Vk (m ³)	HK (m)
0,94	3,033	11,156	7.621,875	42.514,187	3,97
0,93	3,036	11,161	7.650,000	42.692,150	3,97
0,92	3,039	11,167	7.678,125	42.870,225	3,96
0,91	3,042	11,172	7.706,250	43.048,413	3,95
0,90	3,045	11,178	7.734,375	43.226,713	3,95
0,89	3,048	11,183	7.762,500	43.405,126	3,94
0,88	3,051	11,189	7.790,625	43.583,650	3,93
0,87	3,054	11,194	7.818,750	43.762,286	3,92
0,86	3,057	11,200	7.846,875	43.941,034	3,92
0,85	3,060	11,205	7.875,000	44.119,892	3,91
0,84	3,063	11,210	7.903,125	44.298,861	3,90

Lampiran D

*Peta Topografi
Bagan Siapi api*