

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian yang Relevan

Untuk memetakan landasan teoritis dan perkembangan terkini dalam penelitian terkait pemanfaatan energi dari laut dengan jenis pasang surut (*Tidal Barrage*), peneliti menyusun sebuah tabel yang merangkum studi-studi terdahulu yang dianggap paling relevan. Tabel ini tidak hanya berfungsi untuk menunjukkan kesenjangan penelitian (*research gap*) yang akan diisi oleh studi ini, tetapi juga secara khusus menyoroti aspek keterbaruan (*novelty*) dari setiap literatur. Dengan menganalisis tahun publikasi, metodologi, temuan utama, dan konteks penelitian, tabel ini diharapkan dapat memberikan justifikasi yang kuat mengenai posisi dan kontribusi orisinal penelitian ini dalam percakapan akademik yang sedang berlangsung. Pemilihan literatur dalam tabel difokuskan pada publikasi dalam dekade terakhir untuk memastikan keakuratan dan relevansi dengan konteks kekinian.

Tabel 2. Penelitian yang Relevan dan Keterbaruan

No	Judul Penelitian	Penulis dan Tahun	Gap Penelitian	Kebaruhan
1	A Technological Assessment of The Proposed Cardiff-Weston Tidal Barrage, UK	Geoffrey P. Hammond (2017)	Lokasi: Cardiff-UK; Asesmen teknis dan ekonomi lengkap, tetapi hanya fokus pada <i>Capital Cost</i> .	Penelitian saya secara komprehensif mengadopsi dan menyintesis metode tekno-ekonomi dari berbagai penelitian terdahulu. Penelitian saya mencakup ketiga aspek secara utuh potensi, teknis, dan ekonomi hingga NPV, LCOE, <i>capital cost</i>
2	Analisa Potensi Energi Pasang Surut Air Laut	I Made Agus Mahardiananta (2017)	Lokasi: Bali; Hanya asesmen	Penelitian saya mencakup ketiga aspek secara utuh:

No	Judul Penelitian	Penulis dan Tahun	Gap Penelitian	Kebaruan
	di Selat Pulau Serangan		potensi, tidak ada analisis teknis maupun ekonomi	potensi, teknis (daya produksi, <i>capacity factor</i>), dan ekonomi (NPV, LCOE, <i>capital cost</i>)
3	Assessing the Implication of a Tidal Barrage Power Plant in Hvalfjörður, Iceland	Olive M. Colangelo (2019)	Lokasi: Iceland; Asesmen potensi dan teknis, namun aspek ekonomi tidak dibahas secara kuantitatif	Penelitian saya menyajikan analisis ekonomi kuantitatif yang rinci, mencakup NPV, LCOE, dan estimasi <i>capital cost</i> , yang tidak dilakukan dalam studi ini
4	Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Laut di Perairan Kabupaten Karimun Kepulauan Riau	Zainuddin (2016)	Lokasi: Riau; Asesmen potensi dan teknis dasar, tidak ada kajian ekonomi	Penelitian saya melengkapi aspek ekonomi yang tidak ada dalam studi ini, serta menggunakan data pasang surut <i>real-time</i> dan pemodelan teknis yang lebih detail
5	Opportunities for tidal range projects beyond energy generation: Using Mersey barrage as a case study	Sean Petley (2018)	Lokasi: Mersey-UK; Fokus pada manfaat non-energi, aspek teknis dan ekonomi tidak menjadi fokus utama	Penelitian saya berfokus pada kelayakan tekno-ekonomi sebagai tujuan utama, dengan pendekatan kuantitatif yang komprehensif dan berbasis data lokal
6	Trends In Tidal Power Development	Alberto Borreti (2020)	Lokasi: General; Studi literatur	Penelitian saya bersifat empiris dan spesifik lokasi

No	Judul Penelitian	Penulis dan Tahun	Gap Penelitian	Kebaruan
			global, tidak spesifik lokasi, tidak ada analisis teknis dan ekonomi berbasis data empiris	(Teluk Ambon), dengan pengambilan data pasang surut serta parameter teknis dan ekonomi yang kontekstual
7	Sensitivity of Tidal Lagoon and Barrage Hydrodynamic Impacts and Energy Outputs to Operational Characteristics	Athanasios Angeloudis (2017)	Lokasi: General; Fokus pada pemodelan hidrodinamika, tidak menyentuh aspek ekonomi	Penelitian saya menggabungkan pemodelan teknis (daya produksi, <i>capacity factor</i>) dengan analisis ekonomi (NPV, LCOE, <i>capital cost</i>) dalam satu kerangka terintegrasi
8	A review on Tidal Power Utilization and Operation Optimization	Z J Wang (2019)	Lokasi: General; Studi review, tidak ada kajian empiris di lokasi spesifik	Penelitian saya merupakan studi empiris dengan studi kasus nyata di Teluk Ambon, bukan sekadar tinjauan pustaka
9	Pengaruh Ketinggian dan Panjang Saluran Air Laut terhadap Daya yang Dihasilkan pada Prototype Tidal Barrage	Bima Sakti (2020)	Lokasi: General; Eksperimen skala laboratorium, tidak terkait lokasi riil dan tidak ada aspek ekonomi	Penelitian saya menggunakan skala aktual dengan lokasi riil, serta menyertakan analisis kelayakan ekonomi yang tidak ada dalam penelitian ini
10	Identification of Tidal Energy Resources	Inovasita Alifdini (2018)	Lokasi: Indonesia; Hanya identifikasi	Penelitian saya tidak hanya mengidentifikasi potensi, tetapi juga

No	Judul Penelitian	Penulis dan Tahun	Gap Penelitian	Kebaruan
	using Satellite Altimetry Data for Indonesian Seas		potensi berbasis data satelit, tidak ada pemodelan teknis dan analisis ekonomi	melakukan pemodelan teknis dan analisis ekonomi secara terintegrasi dengan data lapangan
11	A Comprehensive Study of Sea Wave Tidal Power Plant (PLTPS)	E. Warman (2018)	Lokasi: General; Studi konseptual, tidak spesifik lokasi, tidak ada data empiris dan analisis kelayakan	Penelitian saya berbasis data empiris dari Teluk Ambon, dengan pendekatan tekno-ekonomi yang terukur dan kontekstual
12	Asesmen Tekno-Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Air Laut di Teluk Ambon, Indonesia	Achmad Nawawi (2026)	-	Kebaruan utama: (1) Lokasi spesifik dan belum pernah dikaji sebelumnya untuk asesmen tekno-ekonomi <i>tidal barrage</i> di Teluk Ambon; (2) Asesmen lengkap dari potensi, teknis (daya produksi, <i>capacity factor</i>), hingga ekonomi (NPV, LCOE, <i>capital cost</i>) dalam satu kerangka utuh; (3) Menggunakan pendekatan sintesis metodologi dengan mengadopsi dan menyempurnakan berbagai metode tekno-ekonomi dari penelitian

No	Judul Penelitian	Penulis dan Tahun	Gap Penelitian	Kebaruan
				terdahulu yang disesuaikan dengan karakteristik local.

Dari beberapa naskah yang relevan dengan penelitian ini, tidak banyak yang membahas secara mendalam terkait potensi dan asesmen tekno-ekonomi pada energi pasang surut air laut. Lokasi penelitian ini merupakan lokasi yang spesifik, yaitu daerah Ambon, Indonesia yang belum pernah diteliti secara mendalam pada penelitian-penelitian sebelumnya. Daerah Ambon sendiri memiliki karakteristik fisik, demografis, regulasi, dan ketersediaan sumber daya yang pasang surut yang unik dan belum pernah diteliti secara mendalam untuk tujuan pengembangan energi pasang surut sebagai energi baru terbarukan.

Meskipun terdapat beberapa penelitian mengenai potensi energi pasang surut di Indonesia, kajian komprehensif yang difokuskan secara spesifik pada Kawasan Ambon dengan karakteristik iklim, cuaca dan kebijakan tata ruang yang khas, belum pernah dilakukan. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah pengetahuan tersebut.

Kebaruan metodologis penelitian ini terletak pada pendekatan asesmen tiga pilar yang terintegrasi (potensi, teknis, dan ekonomi). Berbeda dengan studi-studi sebelumnya yang seringkali parsial, pendekatan holistik ini memungkinkan penilaian yang lebih komprehensif terhadap kelayakan pengembangan energi pasang surut, sehingga hasilnya tidak hanya secara akademis solid tetapi juga langsung aplikatif dalam perencanaan pembangunan. Penelitian ini merupakan kajian komprehensif pertama yang mengintegrasikan analisis potensi sumber daya, tekno-ekonomi, untuk pengembangan energi pasang surut air laut di Teluk Ambon, Maluku, Indonesia.

Penelitian yang relevan terhadap penelitian yang berjudul “Asesmen Teknik Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Air Laut di Teluk Ambon, Indonesia” secara detail sebagai berikut:

- a. *A Technological Assessment of The Proposed Cardiff-Weston Tidal Barrage, UK*[7]

Penulis : Geoffrey P. Hammond, Craig I. Jones, Rachel Spevack

Tahun : 2017

Penerbit : ICE Publishing

Ringkasan Penelitian:

- Pada penelitian ini akan dilakukan evaluasi pada Cardiff-Weston *barrage* untuk menentukan energi net yang dihasilkan, pengurangan produksi karbon dioksida, analisis finansial, dan juga dampak terhadap lingkungan.
- Biaya yang dibutuhkan untuk Pembangunan Cardiff-Weston *barrage* adalah sekitar 21 miliar euro.
- Listrik yang dapat dihasilkan adalah sebesar 16,8 Twh/ tahun.

b. Analisa Potensi Energi Pasang Surut Air Laur di Selat Pulau Serangan[8]

Penulis : I Made Agus Mahardiananta, Rukmi Sari Hartati, Agus Dharma

Tahun : 2017

Penerbit : E-journal Spektrum Vol. 4, No. 1

Ringkasan Penelitian:

- Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi listrik dan kerapatan daya di Pualu Serangan.
- Metode penelitian adalah dengan pengukuran langsung menggunakan metode lagrange dan alat *current* meter kemudian dilakukan regresi linier sederhana deret waktu untuk meramalkan ketinggian air.
- Dari hasil penelitian didapatkan energi yang dihasilkan saat pasang adalah 248,028046 kJ/hari dan 251,8062 kJ saat surut.
- Kerapatan energi tertinggi di area penelitian adalah 25,3604 – 47,05809 W/m², Sedangkan untuk kerapatan energi terendah berkisar 0,012069 – 0,121019 W/m²

c. *Assessing the Implication of a Tidal Barrage Power Plant in Hvalfjörður, Iceland* [9]

Penulis : Olive M. Colangelo

Tahun : 2019

Penerbit : Independent Study Project (ISP) Collection

Ringkasan Penelitian:

- Analisis teknik pada penelitian ini, pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut di Hvalfjörður, Iceland diprediksi memiliki kapasitas sebesar 840MWh dan dapat menghasilkan 613 GWh per tahun.
- Penelitian ini menyimpulkan bahwa tenaga listrik ini masih terlalu mahal untuk diterapkan, memiliki dampak yang cukup signifikan terhadap lingkungan, dan produksi energi yang rendah, jika dibandingkan dengan sumber energi baru dan terbarukan lainnya.

d. Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Laut di Perairan Kabupaten Karimun Kepulauan Riau[10]

Penulis : Zainuddin, Edy Ervianto

Tahun : 2016

Penerbit : Jom FTEKNIK Volume 3 No 1

Ringkasan Penelitian

- Pasang surut perairan Karimun yang terjadi dua kali pasang surut dengan pasang tertinggi dan terendah pada saat pasang purnama mencapai 3,8 m.
- Perancangan pembangkit listrik tenaga pasang surut menggunakan pipa penstock dimensi 3,7 m, turbin kaplan stainless dan generator ber-daya 39889,7 kW
- Hasil analisis potensi energi pasang surut rata-rata sebesar 46910,6 kWh pada tahun 2013 dan rata-rata 46605,4 kWh pada tahun 2014.

e. *Opportunities for tidal range projects beyond energy generation: Using Mersey barrage as a case study [11]*

Penulis : Sean Petley, Daneel Starr, Linda Parish, Zak Underwood, George A. Aggidis.

Tahun : 2018

Penerbit : Frontiers of Architectural Research

Ringkasan Penelitian:

- Salah satu hambatan dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut adalah aspek ekonomi dan lingkungan.

- Pada penelitian ini, di desain pemanfaatan dari pembangkit tidak hanya sebagai penghasil listrik, akan tetapi juga dimanfaatkan sebagai sarana umum dan perkantoran.
- Pemanfaatannya diantaranya sebagai taman wisata, stasiun kereta api, jalur sepeda dan pejalan kaki, serta area perkantoran.

f. *Trends In Tidal Power Development [12]*

Penulis : Alberto Borreti

Tahun : 2020

Penerbit : E3S Web of Conferences

Ringkasan Penelitian:

- Pembangkit Listrik pasang surut pertama kali dibangun pada tahun 1966 bernama *La Rance Tidal Power Plant* dengan kapasitas 240 MW dan *capacity factor* 0,26.
- Pada tahun 2011 dibangun pembangkit Listrik pasang surut di korea bernaam *Sihwa Lake Tidal Power Plant* dengan kapasitas 254 MW dengan *capacity factor* 0,25.
- Teknologi pasang surut masih jauh dari solusi bagi masalah energi dan polusi karbon saat ini, karena masih memerlukan penelitian lebih lanjut yang signifikan serta solusi bagi banyak tantangan.

g. *Sensitivity of Tidal Lagoon and Barrage Hydrodynamic Impacts and Energy Outputs to Operational Characteristics [13]*

Penulis : Athanasios Angeloudis, Roger A. Falconer

Tahun : 2017

Penerbit : Renewable Energi 114 Elsavier

Ringkasan Penelitian:

- Dilakukan beberapa design perhitungan pembangkit Listrik tenaga pasang surut pada Swansea Bay Lagoon, Cardiff Lagoon, Newport Lagoon, dan Severn Barrage.
- Diperkirakan energi yang dapat dihasilkan dari pembangkit per tahun, diantaranya Swansea Bay Lagoon = TWh 0,615 per tahun, Cardiff Lagoon =

5,18 TWh per tahun, Newport Lagoon = 3,05 TWh per tahun, dan Severn Barrage = 36,06 TWh per tahun.

- Dari seluruh pembangkit Listrik yang dirancang, diperkirakan dapat memenuhi kebutuhan 2,3% Listrik di UK.

h. A review on Tidal Power Utilization and Operation Optimization [14]

Penulis : Z J Wang dan Z W Wang

Tahun : 2019

Penerbit : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science

Ringkasan Penelitian:

- Potensi energi pasang surut yang ada di dunia diantaranya di Eropa sekitar 12 GW, di Russia sekitar 110 GW, dan di China sekitar 13,9 GW.
- Beberapa pembangkit pasang surut yang sudah ada di dunia diantaranya La Rance 240 MW (France), Kislaya Guba 1,7 MW (Rusia), Jiangxia 3,9 MW (China), Anapolis 20 MW (Canada), Sihwa 254 MW (Korea Selatan)
- Beberapa proyek perencanaan pembangkit listrik pasang surut yang ada di dunia diantaranya Incheon 1320 MW (Korea Selatan), Swansea 320 MW (UK), Severn 8.640 MW (UK), Mezen 19.200 MW (Russia), dan Penzhin 87.000 MW (Russia).

i. Pengaruh Ketinggian dan Panjang Saluran Air Laut terhadap Daya yang Dihasilkan pada Prototype Tidal Barrage [15]

Penulis : Bima Sakti, Nur Rani Alham, Ahmad Nur Fajri, Ilham Rizal Ma'rif

Tahun : 2020

Penerbit : J-Eltrik

Ringkasan Penelitian:

- Dilakukan penelitian dengan membuat *prototype* pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut (*Tidal Barrage*).
- Saat ketinggian air pasang dipasang 26 cm, akan membangkitkan daya 0,068 Watt saat tidak diberi beban dan menghasilkan 0,061 saat diberi beban LED 1,7 V dan 30 mA.

- Saat ketinggian air pasang dipasang 20 cm, akan membangkitkan daya 0,059 Watt.

j. Identification of Tidal Energy Resources using Satellite Altimetry Data for Indonesian Seas [16]

Penulis : Inovasita Alifdini; Ratu Almira Kismawardhani; Anindya Wirasatriya; Denny Nugroho Sugianto; Omar bin Yaakob; Adrian Bela Widodo

Tahun : 2018

Penerbit : IEEE

Ringkasan Penelitian:

- Menggunakan *FES 2014 tidal satellite altimetry* diketahui bahwa daerah Papua memiliki potensi energi pasang surut terbesar, hingga 5m. Wilayah barat Indonesia memiliki potensi yang rendah, sekitar 1 m
- Prediksi daya listrik yang dapat dimanfaatkan berkisar antara 60,45 MW hingga 3719,13 MW.
- Papua bagian Barat Daya dan Sumatera bagian Timur Laut merupakan wilayah yang paling berpotensi untuk mengembangkan energi pasang surut.

k. A Comprehensive Study of Sea Wave Tidal Power Plant (PLTPS) [17]

Penulis : E. Warman, W. Armi, and F. Fahmi

Tahun : 2018

Penerbit : SCITEPRESS

Ringkasan Penelitian:

- Pemanfaatan Tidal Energi dibagi lagi berdasarkan metode ekstraksi energinya, yaitu energi potensial yang merupakan pergerakan air vertikal yang berkaitan dengan pasang surut air laut dan energi kinetik yang merupakan hasil dari gerakan horizontal air laut yang disebut juga dengan arus pasang surut.
- Prospek pelaksanaan pengembangan pemanfaatan energi laut, khususnya energi pasang surut air laut, cukup baik dilihat dari potensi laut Indonesia yang memiliki jangkauan dan kecepatan arus yang memenuhi persyaratan, terutama di beberapa selat di kawasan timur Indonesia.

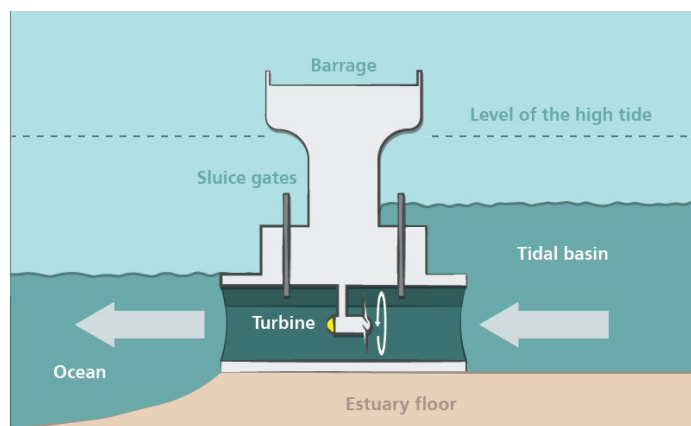
- Penentuan lokasi, pemilihan jenis turbin, dan jenis duty cycle ditentukan oleh karakteristik lokasi itu sendiri baik dari topologi, jangkauan pasang surut air laut, maupun kecepatan arus pasang surut air laut.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Perkembangan Pemanfaatan Energi dari Laut

Pemanfaatan energi dari laut menjadi energi listrik dapat dilakukan dengan berbagai sistem konversi energi. Secara garis besar, pemanfaatan energi dari laut dibagi menjadi lima berdasarkan sistem konversi energinya, yaitu *Tidal Barrage*, *Tidal Stream*, Pemanfaatan Gelombang, OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*) dan *Salinity Gradien*. [5]

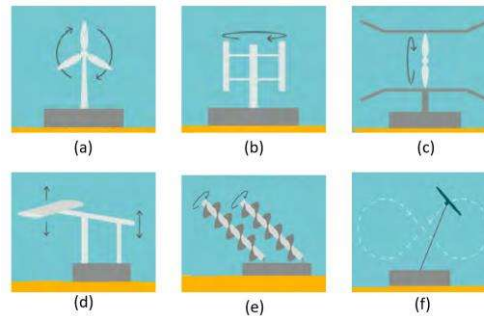
Tidal Barrage merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan pasang surut yang terjadi secara periodik pada air laut. Dengan membangun bendungan, air laut akan tetap berada di dalam kolam sehingga timbul perbedaan ketinggian permukaan air laut antara bagian kolam dalam dengan laut terbuka. Perbedaan ketinggian ini kemudian akan dimanfaatkan untuk memutar turbin air dengan sistem kerja mirip dengan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). [18]



Gambar 4. Diagram Skematik Pembangkit Listrik Tidal Barrage

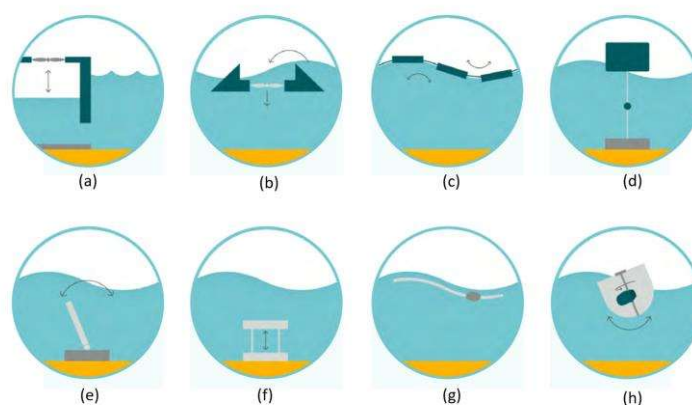
Tidal Stream atau arus laut merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan arus yang berada di bawah lautan. Arus laut ini akan dimanfaatkan untuk memutar turbin secara langsung dengan prinsip kerja mirip dengan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). Beberapa tipe pemanfaatan energi dari aur laut dibagi berdasarkan tipe turbin yang digunakan, yaitu Tipe turbin pada tidal stream (a) (b)(c)(d)(e)(f) *horizontal-axis turbine*, *vertical-axis turbine*, *enclosed tips*, *reciprocating devices*, *archimedes screw/ spiral*, dan

tidal kite. Gambar dari beberapa jenis turbin pada *tidal stream* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.[19]



Gambar 5. Tipe turbin pada tidal stream (a)*horizontal-axis turbine*, (b)*vertical-axis turbine*, (c)*enclosed tips*, (d)*reciprocating devices*, (e)*archimedes screw/ spiral*, dan (f)*tidal kite*

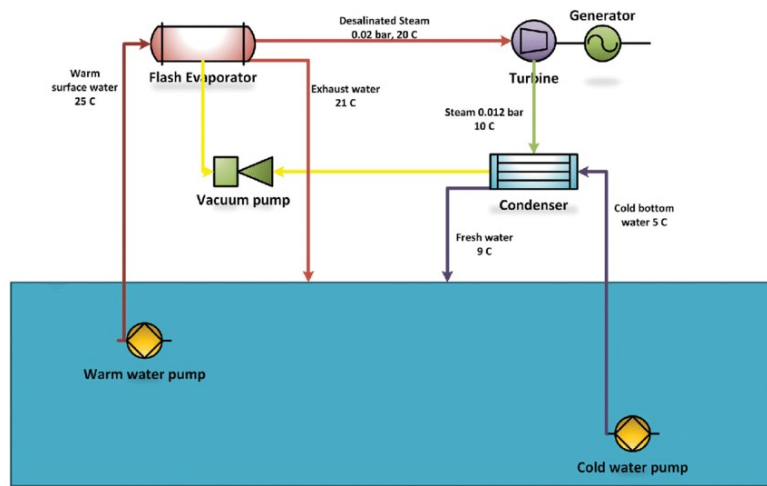
Pemanfaatan energi gelombang laut atau biasa disebut *wave energy* merupakan konversi energi dengan memanfaatkan energi kinetik yang dihasilkan dari gelombang laut menjadi energi listrik. Beberapa energi ombak yang dapat dimanfaatkan adalah energi kinetik dan energi potensial gravitasi. Beberapa metode pemanfaatan energi gelombang laut diantaranya dengan *oscillating water column (OWC)*, *overtopping devices*, *attenuator*, *point absorber*, *oscillating water surge convertet (OWSC)*, *submerged pressure differential* dan *rotating mass*. Diagram skematik dari beberapa pemanfaatan energi gelombang laut menjadi energi listrik dapat dilihat pada gambar di bawah ini.[5]



Gambar 6. (a)*oscillating water collumn (OWC)*, (b)*overtopping devices*, (c)*attenuator*, (d)*point absorber*, (e)*oscillating water surge convertet (OWSC)*, (f)*submerged pressure differential*, (g)*bulge wave* dan (h)*rotating mass*

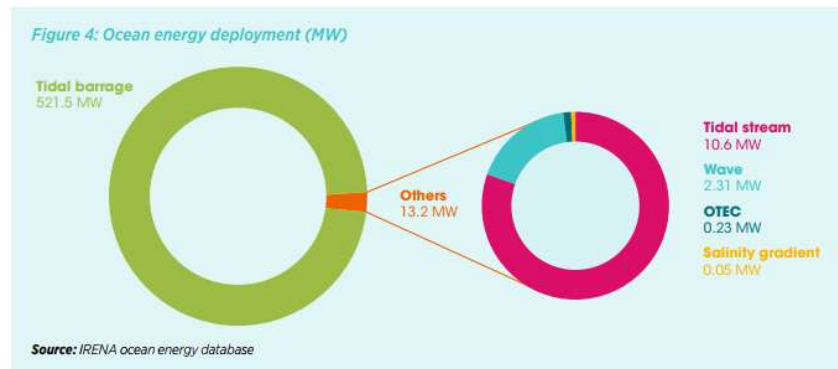
OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*) merupakan sistem konversi energi yang memanfaatkan perbedaan temperatur antara permukaan air laut dengan laut dalam.

Cahaya matahari membuat permukaan air laut lebih hangat dibandingkan dengan laut dalam. Sistem kerja dari OTEC mirip dengan sistem kerja pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Perbedaan temperatur ideal untuk dibangun pembangkit listrik OTEC adalah 20°C , sehingga diperlukan kedalaman laut sekitar 1000 m untuk memperoleh perbedaan tersebut.[20]. Diagram skematik pemanfaatan energi laut dengan OTEC dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Permukaan air laut yang relatif lebih hangat dimanfaatkan untuk mendidihkan fluida kerja pada *flash evaporator*. Fluida kerja ini kemudian didinginkan dengan menggunakan air laut dalam dengan suhu yang relatif lebih dingin.[5]



Gambar 7. Diagram Skematik OTEC

Total energi listrik yang telah dibangun di berbagai belahan dunia saat ini berjumlah 534,7 MW dengan sebagian besar adalah pembangkit listrik dengan memanfaatkan pasang surut air laut (*tidal barrage*). Total pembangkit pasang surut air laut yang telah terpasang sebesar 521,5 MW dan pembangkit lainnya berupa arus laut, gelombang, OTEC dan *salinity gradien* adalah sebesar 13,2 MW. Dengan besarnya pembangkit listrik pasang surut yang telah terpasang di dunia, maka perlu dilakukan penelitian untuk dibangun di Indonesia.[5]



Gambar 8. Perkembangan pemanfaatan energi dari laut

2.2.2. Sistem Kelistrikan Kota Ambon

Sistem kelistrikan di kota Ambon didominasi oleh beberapa pembangkit thermal berupa Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) dan Barge Mounted Power Plant (BMPP). PLTD Poka berkapasitas 8,9 MW dan PLTD Hative Kecil berkapasitas 2,5 MW. PLTMG Ambon peaker berkapasitas 30 MW berada di kabupaten Maluku Tengah. BMPP berkapasitas 60 MW diletakan di kabupaten Maluku Tengah menggantikan Leasing Marine Vessel Power Plant (LMVPP) Karadeniz Yasin Bey milik Turki yang berkapastitas sama. Sistem kelistrikan ambon dihubungkan dengan jaringan 150 kV. Secara lengkap sistem kelistrikan Ambon dapat dilihat pada gambar di bawah ini. [1]



Gambar 9. Sistem Kelistrikan Ambon

Dalam RUPTL PLN tahun 2021-2030, terdapat beberapa perubahan yang akan dilakukan. PLN akan fokus pada peningkatan pembangkit listrik baru terbarukan untuk

melistriki daerah Ambon. Perubahan untuk daerah provinsi Maluku dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 3 Perubahan rencana pembangunan pembangkit listrik Maluku[1]

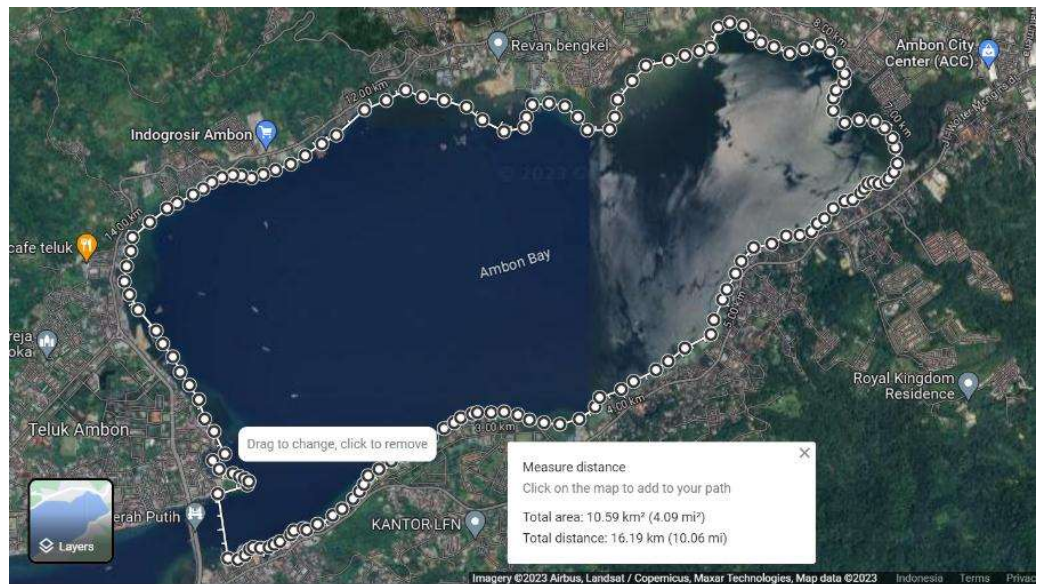
No	RUPTL 2019 - 2028			RUPTL 2021 - 2030			Ket
	Nama	Kap	COD	Nama	Kap	COD	
	Proyek	MW		Proyek	MW		
1	PLTP Tulehu	7	2021-2022	PLTP Tulehu	20	2025-2026	
2	PLTM Wae Mala	2	2024	PLTM Wae Mala	1,1	2026	
3	Lisdes Maluku Tersebar	5,05	2019-2023	Lisdes Maluku Tersebar	30,44	2011-2023	
4	PLTU Ambon	50	2021/22	PLT EBT Base Ambon	50	2030	
5	PLTG/MG Ternate 2	30	2019/22	PLTG/MG Ternate 2	20	2022	
6	Lisdes Maluku Utara tersebar	2,34	2021-2023	Lisdes Maluku Utara tersebar	19,37	2021-2023	
7	PLTBio Sanana 2	5	2028	PLTBio Sanana 2	10	2024	

Dari rencana PLN dalam mengembangkan kelistrikan di daerah provinsi Maluku, salah satunya adalah pembangunan PLT EBT Base Ambon sebesar 50 MW yang direncanakan akan COD pada tahun 2030. Dari RUPTL sebelumnya, PLN berencana akan membangun PLTU Ambon 50 MW yang direncanakan akan COD pada tahun 2022 lalu, akan tetapi dengan adanya rencana Net Zero Emission di Indonesia pada tahun 2060, maka rencana Pembangunan PLTU tersebut diubah pada RUPTL 2021-2030 menjadi pembangunan pembangkit listrik berbasis energi baru terbarukan. Energi pasang surut air laut perlu dikaji dan dianalisis kelayakannya secara teknis dan finansial. Energi dari laut merupakan energi dengan potensi yang cukup besar dan perlu dipertimbangkan dalam Pembangunan pembangkit berbasis energi baru terbarukan.[2]

2.2.3. Geometri Teluk Ambon

Teluk Ambon merupakan salah satu teluk yang terdapat di pulau Ambon, provinsi Maluku. Diambil dari aplikasi google map, teluk Ambon terdapat di titik koordinat sekitar 3,6554268358961113 Lintang Selatan dan 128,19234130575995 Bujur Timur. Teluk Ambon terdiri atas dua bagian teluk, yaitu Teluk Ambon Dalam (TAD) dan Teluk Ambon Luar (TAL). TAL merupakan bagian teluk ambon yang berhadapan

langsung dengan laut banda. Sedangkan TAD merupakan teluk dengan karakteristik semi tertutup dengan. TAD memiliki rata-rata kedalaman 30 m. Bagian TAD dan TAL dipisahkan dengan sebuah ambang yang sempit dan dangkal dengan lebar sekitar 477 m dengan variasi kedalaman antara 8-12 m. Luas dari TAD sendiri sekitar 10,59 km². [21]



Gambar 10. Geometri teluk Ambon dalam dari citra satelit google

Pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut akan di rancang memanfaatkan Teluk Ambon Dalam (TAD) dengan bendungan dan power house berada di bagian ambang sempit antara TAD dan TAL sepanjang 477 m. Di antara TAD dan TAL terapat jembatan yang memisahkan keduanya, yaitu jembatan merah-putih. Gambar teluk ambon dapat dilihat pada gabar di bawah ini. Potensi energi pasang surut di teluk Ambon ini diharapkan dapat menghasilkan energi yang cukup besar mengingat area teluk Ambon cukup luas dengan bendungan yang cukup pendek. Sehingga biaya yang produksi energi listrik di teluk Ambon dengan pasang surut ini diharapkan seminimal mungkin. [22]



Gambar 11. Teluk Ambon

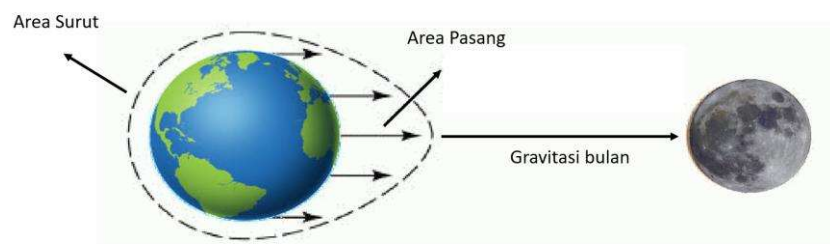
2.2.4. Energi Pasang Surut Air Laut

Energi pasang surut air laut di teluk Ambon berpotensi untuk dapat menghasilkan listrik untuk daerah Ambon dan sekitarnya. Dalam sub bab ini akan dijelaskan mengenai teknologi konversi energi dari pasang surut air laut menjadi energi listrik. Beberapa hal yang akan dijelaskan dalam bab ini diantaranya adalah bagaimana proses terjadinya pasang surut air laut, teknologi konversi energi dari energi pasang surut menjadi energi listrik, dan teknologi terkini terkait pemanfaatan energi pasang surut sebagai penghasil listrik.

2.2.4.1. Pasang Surut Air Laut

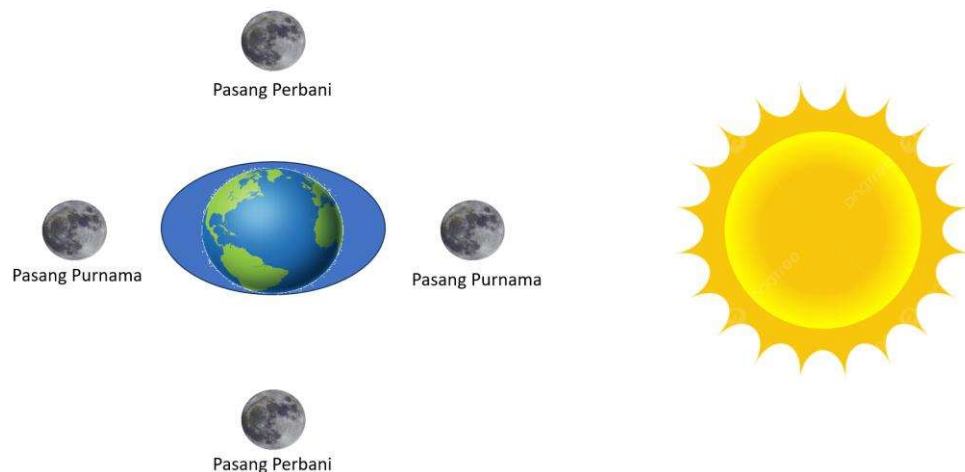
Pasang surut air laut merupakan fenomena alam yang terjadi pada air laut di seluruh permukaan bumi. Sebagian besar wilayah di dunia biasanya mengalami pasang surut air laut sebanyak dua kali dalam sehari. Pasang surut air laut terjadi karena pengaruh gaya gravitasi bulan gravitasi matahari. Efek dari kedua hal ini menyebabkan sejumlah air laut mengalami pasang di satu sisi yang tertarik dan juga mengalami surut pada sisi yang lainnya.[23]

Gambaran mengenai pasang surut air laut akibat gravitasi bulan dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Sebagian sisi air laut yang dekat dengan bulan akan terpengaruhi oleh tarikan dari gravitasi bulan sehingga mengalami area pasang. Sedangkan area yang jauh dari sisi bulan akan mengalami surut. [24]



Gambar 12. Pasang Surut air laut akibat gravitasi bulan

Selain dari gravitasi bulan, gravitasi matahari juga mempengaruhi efek dari pasang surut air laut di bumi. Walaupun massa matahari jauh lebih besar dari pada massa bulan, akan tetapi gravitasi bulan lebih mempengaruhi efek pasang surut di bumi sebesar 2,2 kali. Hal ini karena jarak bulan ke bumi yang jauh lebih dekat dari pada jarak bumi ke matahari. Skekantik dari pengaruh gaya gravitasi bulan dan gaya gravitasi matahari kepada pasang surut air laut di bumi dapat dilihat pada gambar di bawah ini.[23]

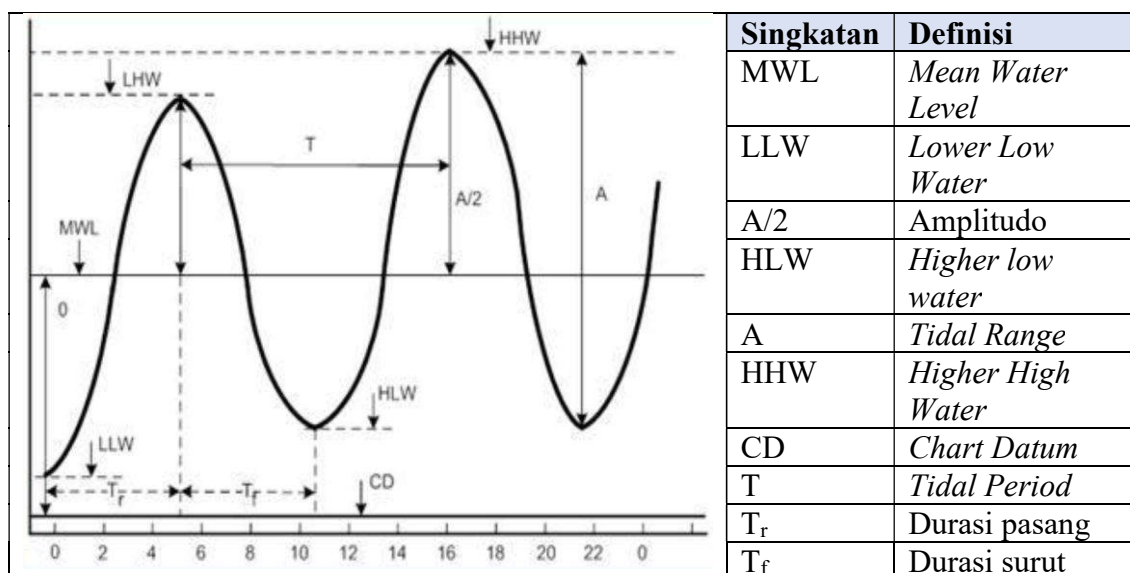


Gambar 13. Pasang surut air laut akibat gravitasi bulan dan matahari

Pada saat posisi bulan, matahari dan bumi sejajar yaitu pada saat bulan purnama dan bulan baru atau bulan mati, gaya gravitasi dari bulan dan matahari saling menguatkan sehingga menghasilkan air pasang yang tinggi atau dinamakan pasang purnama. Sedangkan saat matahari dan bulan berada pada posisi tegak lurus, tarikan gravitasi antara keduanya saling menghilangkan dan menghasilkan pasang yang tidak terlalu tinggi atau

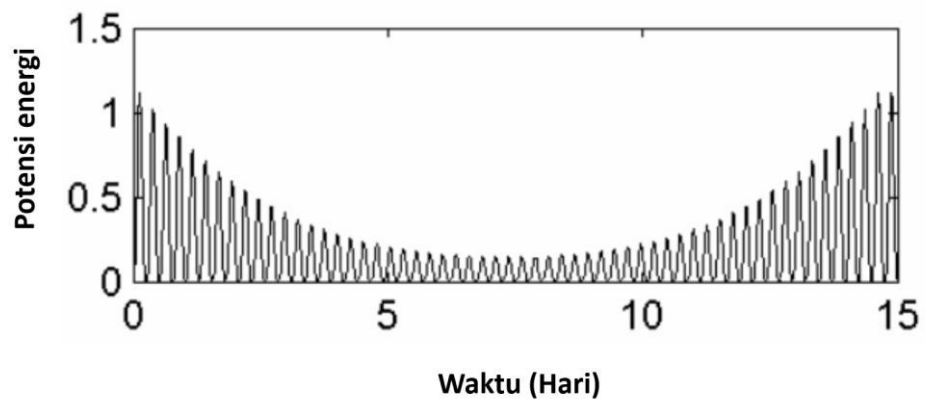
biasa disebut pasang perbani. Energi pasang surut terbesar dihasilkan pada saat pasang purnama, dan pada saat pasang perbani menghasilkan energi yang minimal.[23]

Gambar di bawah ini menjelaskan mengenai beberapa definisi pada fenomena pasang surut air laut di bumi. Pada fenomena pasang surut, permukaan air laut akan naik mencapai titik maksimum, kemudian permukaan air laut akan turun hingga mencapai titik terendahnya. Setelah itu permukaan air laut akan naik kembali dan turun, begitu seterusnya. Jarak antara dua titik puncak permukaan air laut ini dinamakan periode pasang surut. Untuk lebih jelasnya, beberapa definisi pada siklus pasang surut dijelaskan pada gambar di bawah ini.[24]



Gambar 14. Definisi siklus fenomena pasang surut

Fenomena pasang surut yang terjadi di bumi terjadi secara periodik. Periode dari terjadinya pasang surut dalam pasang perbani dan pasang purnama dipengaruhi oleh pergerakan rotasi bumi dan juga revolusi bulan mengelilingi bumi. Rata-rata interval dari bulan baru atau bulan mati menuju ke bulan purnama dan kembali lagi ke bulan mati adalah sepanjang 29,5 hari. Pergerakan bulan ini mempengaruhi besar pasang surut di bumi secara periodik. Periode besaran pasang surut air laut tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Dimulai dari bulan baru dengan nilai pasang yang maksimum, pada hari ke-7 sampai ke-8 laut mengalami pasang terendah atau pasang perbani, kemudian pada hari ke-15 pasang kembali ke pasang purnama.[24]

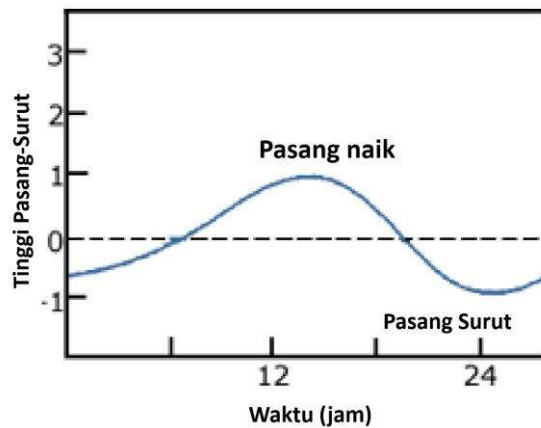


Gambar 15. Besar periode pasang surut

Fenomena pasang surut yang sebenarnya terjadi di bumi jauh lebih kompleks dari pada teori yang telah dijelaskan di atas dan sangat sulit untuk diprediksi. Hal ini dikarenakan orbit putar terhadap bumi tidak tegak lurus dan rotasi bumi yang miring terhadap orbit revolusi bumi ke matahari. Hal ini mengakibatkan adanya tiga jenis tipe fenomena pasang surut yang terjadi di bumi, yaitu sekali sehari atau *diurnal*, dua kali sehari atau *semi diurnal* dan campuran. Beberapa jenis pasang surut air laut yang ada di bumi dapat dilihat pada penjelasan di bawah ini. [23]

a. Sekali Sehari atau *Diurnal*

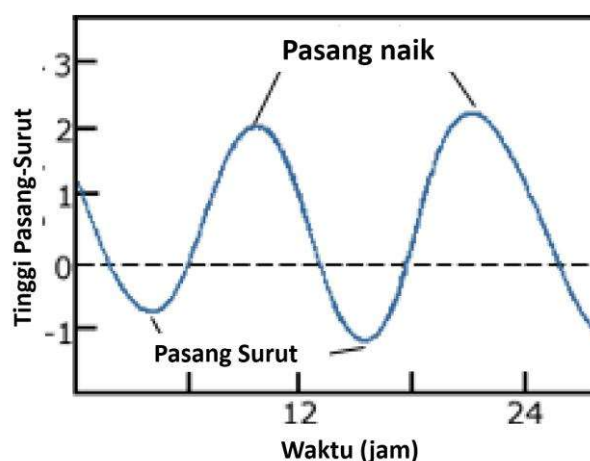
Jenis pasang surut ini ditemukan di Laut Cina dan Tahiti. Lama periode pasang surut jenis ini adalah 24 jam 50 menit 28 detik, yaitu sama dengan waktu revolusi penuh bulan mengelilingi bumi akibat rotasi bumi. Pada saat yang bersamaan bumi juga mengalami rotasi terhadap porosnya yang mengakibatkan efek gelembung air di sekitaran garis khatulistiwa. Pada titik tertentu di permukaan bumi, efek antara rotasi bumi dan gravitasi bulan saling menghilangkan di salah satu periode pasang, sehingga bagian bumi ini hanya mengalami satu kali pasang dan satu kali surut dalam satu hari. Gambaran pasang surut tipe *diurnal* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 16. pasang surut tipe *diurnal*

b. Dua Kali Sehari atau *Semi Diurnal*

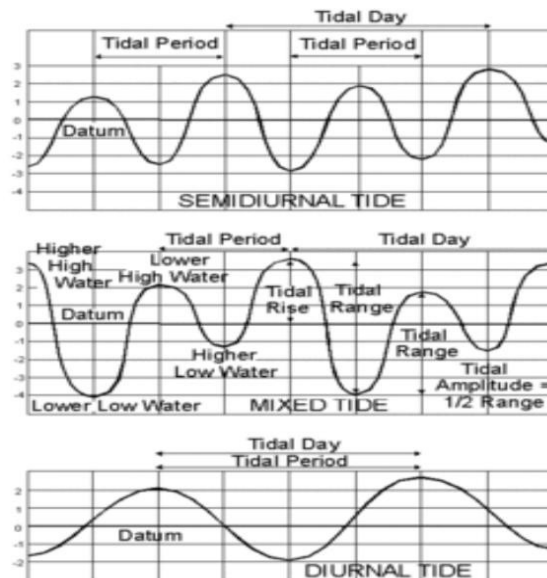
Pasang surut air laut yang terjadi dua kali dalam satu hari atau biasa disebut *semi diurnal*, memiliki periode pasang-surut sekitar 12 jam 25 menit. Dalam tipe ini, terjadi dua kali pasang dalam satu hari dan juga terjadi dua kali surut dalam satu hari. Amplitudo dari pasang surut ini bergantung pada posisi bulan terhadap bumi. Bumi mengalami pasang maksimum pada saat bulan purnama dan bulan baru, sedangkan pada bulan sabit pasang yang terjadi adalah pasang perbani. Salah satu pasang memiliki ketinggian yang lebih tinggi dari pada yang lain, dan memiliki surut yang lebih rendah dari pada yang lain. Pasang surut tipe *semi diurnal* dapat digambarkan pada gambar di bawah ini.[23]



Gambar 17. pasang surut tipe *semi diurnal*

c. Campuran

Pasang surut jenis campuran ini merupakan kombinasi antara pasang surut *diurnal* dan *semi diurnal*. Pasang surut ini dapat memiliki variasi bulanan dan dua bulanan. Beberapa lokasi yang mengalami pasang surut campuran diantaranya laut Mediterania dan laut Saigon. Skema pasang surut jenis campuran dapat dilihat pada gambar di bawah ini.[23]



Gambar 18. pasang surut tipe campuran

2.2.4.2. Konversi Energi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Air Laut

Pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut merupakan pembangkit yang bekerja dengan konsep bendungan. Bendungan ini memisahkan suatu area air laut dengan laut lepas. Saat air laut pasang, air akan memasuki area tertutup tersebut. Kemudian, saat air laut lepas mengalami surut, akan timbul perbedaan ketinggian antara kedua bagian laut ini. Air laut akan mengalir melalui bendungan melewati turbin air sehingga menghasilkan energi listrik. [25]

a) Konversi Energi

Pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut memanfaatkan beda potensial ketinggian air antara basin bagian dalam dengan basin bagian luar ataupun dengan laut lepas. Secara sederhana, energi potensial dari perbedaan ketinggian akibat pasang surut air laut dapat dirususkan sebagai berikut;

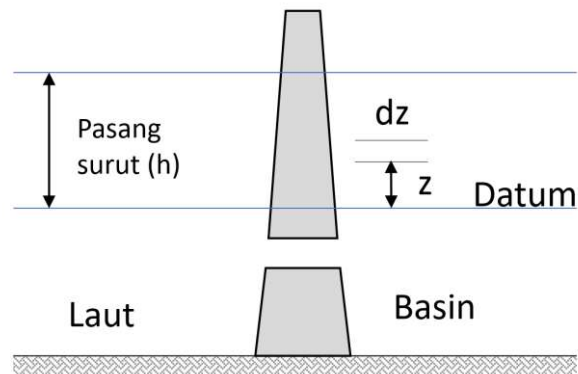
$$E = g\rho A \int z dz = 0.5g\rho Ah^2$$

Persamaan 1. konversi energi [24]

Dengan:

- E = energi potensial yang mungkin didapatkan (Joule)
- g = percepatan gravitasi bumi ($9,8 \text{ m/s}^2$)
- ρ = massa jenis air laut (kg/m^3)
- A = luas area basin
- z = koordinat vertical dari permukaan air (m)
- h = ketinggian pasang surut (m)

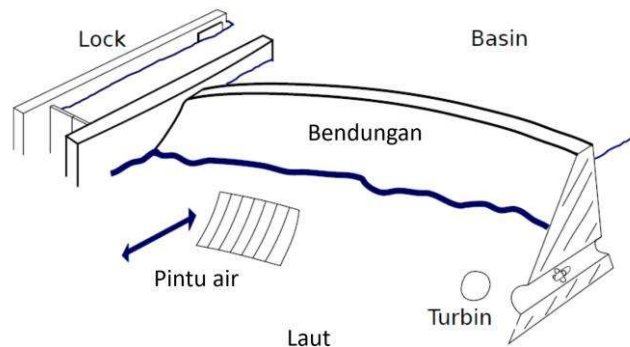
Penjelasan dari persamaan (1) tersebut dapat digambarkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 19. Skematik persamaan energi potensial

Konversi energi yang terjadi pada pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut memiliki persamaan yang cukup banyak dengan pembangkit Listrik tenaga air. Pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut dapat memproduksi Listrik dengan jumlah yang relative konstan dan sangat mudah untuk di prediksi kapan harus produksi dan tidak beroperasi. [24]

Sistem pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut dasarnya adalah dengan membangun sebuah bendungan antara dua sisi lautan. Beberapa komponen dasar dalam pembangkit ini adalah turbin, pintu air, tanggul atau bendungan dan juga lock yang diperlukan jika bendungan dilalui kapal. Secara skematik, pembangkit Listrik tenaga pasang surut dapat digambarkan pada gambar di bawah ini. [24]



Gambar 20. Skematik sistem pembangkit listrik tenaga pasang surut

Dalam merancang sebuah pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut, perlu di perhitungkan mengenai beberapa hal berikut ini:

- Tipe dari struktur yaitu sistem satu basin atau sistem dua basin
- Lokasi dari pembangunan bendungan
- Sistem operasi yaitu satu arah atau dua arah, dengan maupun tanpa pompa
- Besar daya dari turbin dan generator
- Total energi listrik yang dapat dihasilkan

Nett energi tahunan yang dapat dihasilkan pada pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut dapat digambarkan dengan persamaan berikut ini:

$$E_{annual} = \frac{a \cdot \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H_{avg} \cdot V_{avg}}{3.6 \cdot 10^{12}} \quad \text{Persaman 2. energi yang dimanfaatkan [23]}$$

Tabel 4. Nett energi tahunan yang dapat dihasilkan pada pembangkit [23]

Simbol	Nilai	Satuan	Item	Note
α	0,96	-	Pasang surut yang dapat dimanfaatkan	Tidak semua pasang surut dapat digunakan untuk pembangkitan energi karena akan ada pasang surut yang dapat digunakan periode pemeliharaan atau badai. Pembangkit di La Rance mampu menghasilkan daya 96% setiap tahunnya
η	0,9	-	Efisiensi Pembangkit	Efisiensi Efisiensi pembangkit bergantung pada desain pembangkit. Faktor utama yang berkontribusi terhadap efisiensi ini

				adalah jenis turbin, tata letak pembangkit, dan dimensi pintu air. efisiensi dapat mencapai 90%
ρ	1035	[kg/m]	Massa jenis	Berbagai ukuran dapat ditemukan untuk massa jenis air laut. air laut Pengukuran berkisar antara 1025 hingga 1035 kg/m
g	9,81	[m ² /s]	gravitasi	gravitasi
H_{avg}	-	m	Head rata-rata	Tidak semua head dapat termanfaatkan. System satu basin dengan tipe turbin satu arah dapat mencapai nilai 66%. Sistem satu basin dengan tipe turbin dua arah dapat mencapai 50% tiap arah.
V_{avg}	-	m ³	Volume air rata-rata	Volume dengan mengalikan H_{avg} dengan luas teluk.
E_{annual}	-	GWh	Tahunan Energi yang dapat diekstraksi	Tahunan Energi yang dapat diekstraksi menjadi energi Listrik.

Spesifikasi turbin dapat ditentukan dengan beberapa parameter seperti luas area basin, head yang dapat dimanfaatkan, dan selang waktu yang antara puncak tertinggi dan puncak terendah dalam satu siklus. Laju aliran air yang melewati turbin dapat dilihat pada persamaan 3 dibawah ini, dan daya pembangkit yang dapat dihasilkan dapat dilihat pada persamaan 4 dibawah ini.

$$Q_{avg,total} = \frac{dh \cdot A}{dT}$$

Persaman 3. Laju aliran air [23]

$$P = \rho \cdot g \cdot Q_{avg,total} \cdot H_{rated\ head}$$

Persaman 4. Daya pembangkit [23]

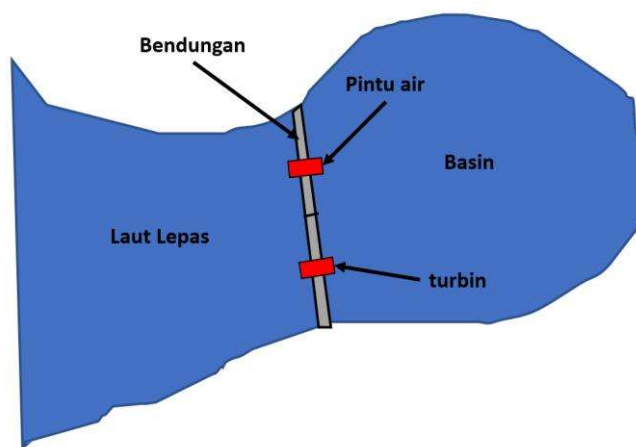
Dengan:

- Q_{avg} = Laju aliran air
- dh = Head air yang dapat dimanfaatkan
- A = Luas area basin
- dT = Selang waktu antara pasang-surut
- P = Daya pembangkit
- ρ = masa jenis air laut
- g = gravitasi bumi
- H_{rated} = Head air yang dapat dimanfaatkan

Beberapa klasifikasi dari pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut dijelaskan dalam beberapa paragraph di bawah ini.

b) Sistem Satu Basin

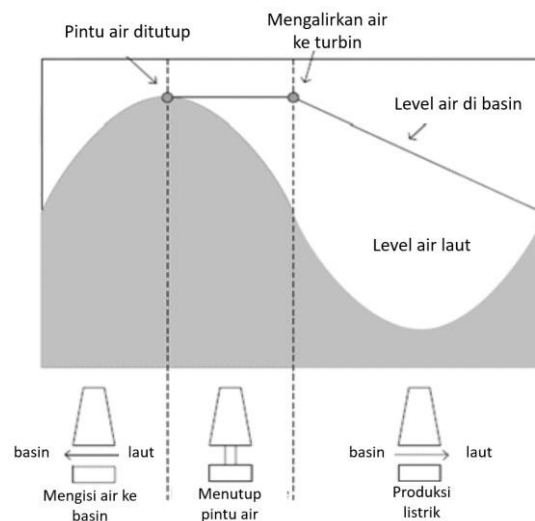
Sistem pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut dengan menggunakan satu basin memiliki satu buah basin dengan bendungan yang membatasi basin tersebut. Dalam bendungan ini terdapat pintu air dan juga turbin. Skematik dari sistem satu basin dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Sistem satu basin dapat diklafifikasikan lagi menjadi tiga sistem operasi, yaitu sistem pembangkitan surut, sistem pembangkitan pasang, dan sistem dua arah. [23]



Gambar 21. Skematik sistem satu basin

- Sistem Pembangkitan Surut/ *ebb generation*

Sistem pembangkitan surut atau biasa disebut dengan *ebb generation* merupakan sistem yang paling sederhana dari pada sistem yang lain di pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut. Pada pembangkitan surut, pada saat permukaan air laut mengalami kenaikan atau pasang, pintu air dibuka untuk mengisi basin. Kemudian ketika permukaan air laut berada pada puncak ketinggiannya, pintu air ditutup menjaga air tetap di dalam basin. Pintu air tetap tertutup hingga permukaan air laut pada level terendah dan cukup untuk mengalir melewati turbin air untuk menghasilkan listrik selama periode tertentu. Setelah permukaan air basin sama dengan permukaan air laut luar, aliran melalui turbin berhenti dan pintu air kembali dibuka untuk mengisi kembali basin pada periode pasang, begitu seterusnya. Sistem ini dinamakan pembangkitan surut karena proses produksi listrik terjadi saat periode surut. Diagram skematik dari sistem pembangkitan surut dapat dilihat pada gambar di bawah ini. [24]



Gambar 22. diagram skematis sistem pembangkitan surut (*ebb generation*)

Beberapa karakteristik pada periode sistem pembangkitan surut diantaranya; siklus operasi pembangkit setiap harinya biasa terjadi dua kali yaitu 3 jam setelah puncak pasang terjadi dan beroperasi selama 4 hingga 6 jam, besarnya energi listrik yang dihasilkan bergantung pada ketinggian pasang surut air laut, dan biasanya mengalami siklus 14 hari. Biasanya, waktu pasang setiap harinya bergeser satu jam pada hari berikutnya.

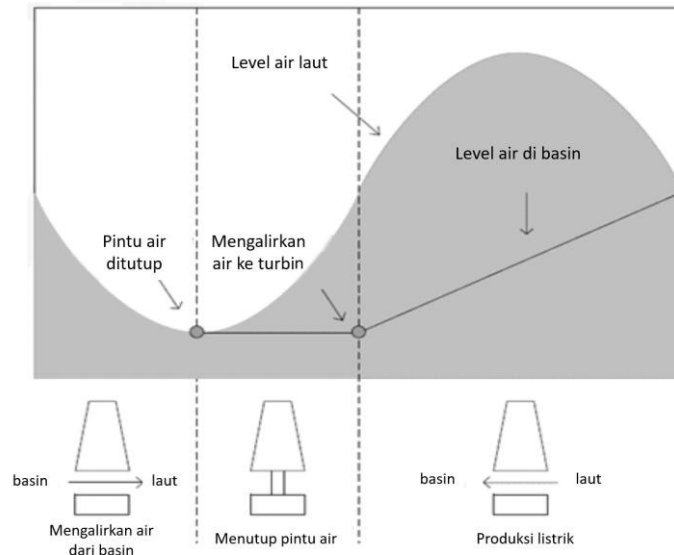
- Sistem Pembangkitan Pasang/ *flood generation*

Sistem pembangkitan pasang memanfaatkan aliran air dari laut lepas menuju ke dalam basin. Pada fase perukaa air laut mulai naik atau pasang, pintu air dan turbin akan tertutup hingga permukaan air laut mencapai level yang cukup tinggi. Ketika level permukaan air laut cukup, maka air akan dialirkan menuju ke basin melalui turbin.

Secara umum, sistem pembangkitan pasang kurang efisien dibandingkan pembangkitan surut karena volume air yang disimpan di basin (di mana pembangkitan surut beroperasi) lebih besar dibandingkan volume yang disimpan di basin (diisi selama pembangkitan pasang). Oleh karena itu, tinggi air antara basin dan laut pada sistem pasang, berkurang lebih cepat dibandingkan dengan sistem pembangkitan surut, sehingga energi yang dihasilkan lebih sedikit.

Selain itu, karena ketinggian waduk mengalami perubahan ketinggian air secara terus-menerus pada sistem pasang, maka akan berdampak negatif pada pelayaran dan

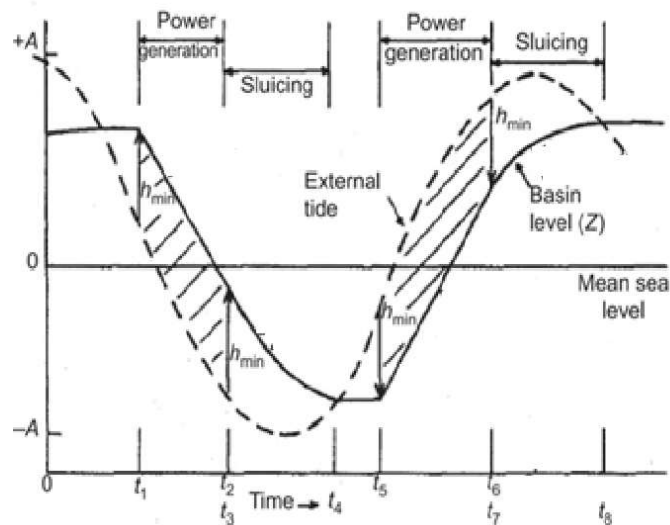
lingkungan. Sedangkan pada pembangkitan pasang surut, perubahan ketinggian air yang lebih cepat dialami oleh basin. Diagram skematik sistem pembangkitan pasang dilihat pada gambar di bawah ini. [24]



Gambar 23. Sistem pembangkitan pasang

- Sistem Pembangkitan Dua Arah

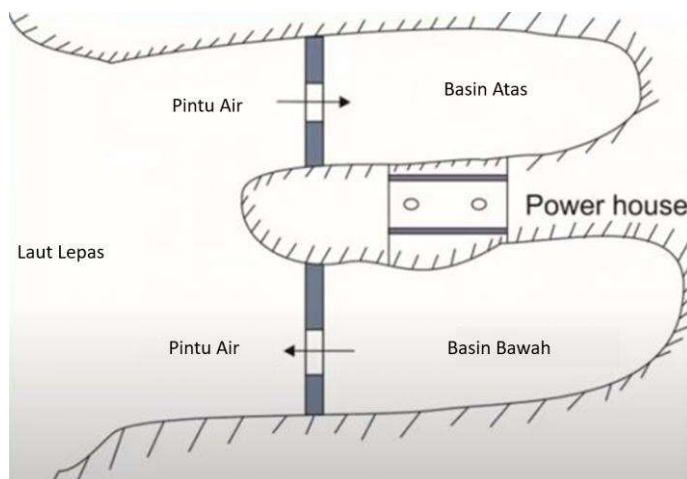
Sistem pembangkitan dua arah merupakan kombinasi antara sistem pembangkitan pasang dan sistem pembangkitan surut. Pintu air ditutup saat permukaan air pada posisi pasang hingga surut, kemudian pintu air turbin akan dibuka dan air akan menuju ke laut melalui turbin serta menghasilkan energi listrik seperti pada sistem surut. Kemudian pintu air kembali ditutup hingga permukaan air laut mencapai pasang tertinggi. Pada saat permukaan air laut mencapai pasang tertinggi, pintu air turbin akan dibuka dan air laut akan menuju ke basin melalui turbin serta menghasilkan Listrik seperti pada sistem pembangkitan pasang. Sistem pembangkitan dua arah ini lebih efisien karena memiliki periode produksi listrik yang lebih panjang. Sistem ini akan lebih efisien jika menggunakan turbin yang dapat beroperasi dalam dua arah aliran. Diagram skematik dari sistem pembangkitan dua arah merupakan gabungan dari sistem pembangkitan pasang dan sistem pembangkitan surut. [24]



Gambar 24. Diagram Skematik Sistem Pembangkitan Dua Arah

c) Sistem Dua Basin

Seperti namanya, sistem dua basin memiliki dua kolam yaitu basin atas dan basin bawah yang dibatasi dengan bendungan. Masing-masing basin memiliki pintu air yang terhubung ke laut lepas. Antara basin atas dan basin bawah dihubungkan dengan *power house* berisi turbin dan generator yang menghasilkan listrik. Diagram skematik dari sistem dua basin dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 25. Diagram skematik sistem dua basin

Cara kerja dari sistem dua basin ini adalah dengan mengisi basin atas dengan air laut dengan membuka pintu air saat permukaan air laut mulai pasang dan menutup pintu air ketika permukaan air laut mencapai titik tertingginya. Ketika permukaan basin atas mencapai level tertingginya, kemudian power house akan dibuka untuk mengalirkan air

dari basin atas ke basin bawah dan menghasilkan listrik. Air dialirkan dari basin atas menuju basin bawah hingga level basin atas dan basin bawah sama. Setelah selesai memproduksi listrik, kemudian pintu air basin bawah dibuka dan air dari basin bawah mengalir keluar dari laut saat kondisi air laut surut. Ketika kondisi permukaan air laut pada level terendah, pintu air basin bawah ditutup. Ketika air kembali pasang, pintu air bagian basin atas dibuka untuk mengilirkan air dari air laut menuju ke basin atas. Pintu air pada basin atas ditutup ketika air laut pada level tertingginya. Kemudian *power house* dibuka untuk mengalirkan air dari basin atas menuju basin bawah dan menghasilkan energi. Begitu seterusnya. [26]

Kelebihan dari sistem dua basin ini adalah terkait dengan waktu produksi listrik yang dapat diatur sesuai dengan kebutuhan konsumen. Akan tetapi sistem dua basin ini memiliki beberapa kekurangan diantaranya kurangnya pemanfaatan energi dari potesni pasang surut yang ada dan biaya konstruksi yang relatif lebih tinggi.[24]

d) Tipe Turbin

Turbin adalah salah satu peralatan yang paling penting dalam sebuah pembangkit, khususnya pada pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut yang akan diteliti pada penelitian ini. Turbin berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung pada fluida kerja menjadi energi putar poros. Energi putar poros ini yang akan digunakan untuk memutar generator dan menghasilkan listrik.[27]

Sistem kerja pada pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut sama dengan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Sehingga, turbin yang digunakan merupakan turbin air. Turbin air sendiri terbagi ke dalam beberapa jenis tipe turbin. Turbin air diklasifikasikan berdasarkan tipe perubahan energi dan tipe arah aliran fluida. Klasifikasi turbin air berdasarkan tipe perubahan energi adalah sebagai berikut:

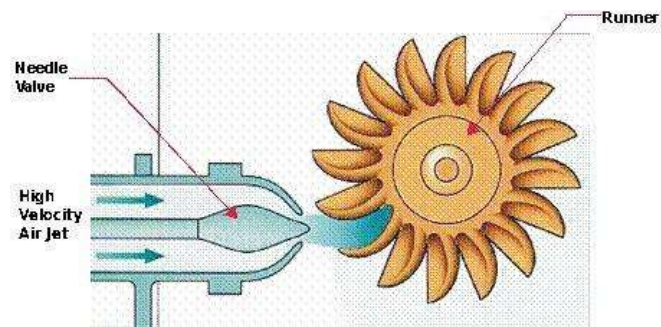
- Turbin Impuls atau Turbin Aksi

Turbin aksi mendapatkan efisiensi maksimumnya Ketika dioperasikan pada *head* yang tinggi dan *flow* yang rendah, biasanya digunakan pada *head* dari 2 m hingga 180 m. Turbin aksi memanfaatkan kecepatan dari air yang keluar dari sudu tetap pada tekanan atmosfer. Turbin ini mengubah energi kinetik yang terkandung dalam air untuk memutar turbin. Turbin jenis ini relatif lebih sederhana dan murah. Beberapa jenis yang merupakan turbin aksi diantaranya adalah Turbin Turgo, pelton, dan *cross*

flow yang dapat digunakan untuk *head* air yang rendah dan kapasitas pembangkit yang kecil.

a) Turbin Turgo

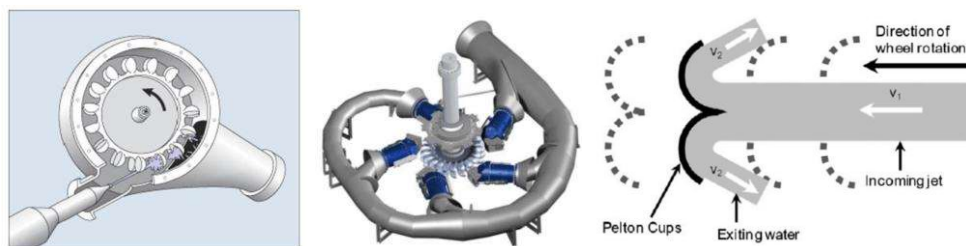
Pada tahun 1920 Gilbert Gilkes menemukan turbin Turgo seperti yang ditunjukkan pada Gambar 25. Turgo umumnya digunakan sebagai turbin impuls dengan head sedang hingga tinggi. Turbin Turgo memiliki efisiensi yang cukup baik pada laju aliran air yang tinggi dan rentang head yang rendah.[27]



Gambar 26. Turbin Turgo

b) Turbin Pelton

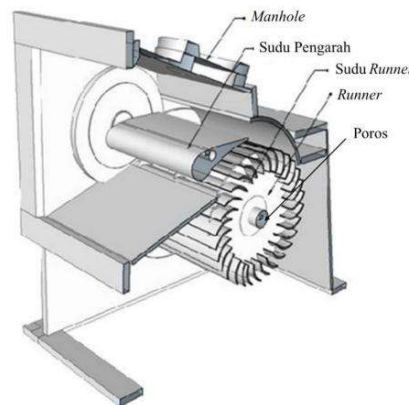
Pada turbin Pelton, semburan air dari nosel menghantam sudu Gerak yang terpasang pada roda. Hal ini akan yang menyebabkan gaya yang memutar roda pada tingkat efisiensi tinggi sebesar 70 hingga 90 persen. Roda Pelton memiliki satu atau beberapa jet nosel. Turbin Pelton cocok untuk aplikasi dengan head tinggi dan aliran rendah. Turbin Pelton sering kali digunakan untuk sistem tenaga air kecil. Untuk sistem kecil, biasanya digunakan satu semburan air. Prinsip kerja dari turbin pelton dapat dilihat pada gambar 26 dibawah ini.



Gambar 27. Turbin pelton skala kecil (kiri), Turbin pelton multi jet (Tengah), prinsip turbin pelton (kanan)

c) Turbin *Cross Flow*

Turbin *Cross Flow* atau biasa dikenal juga sebagai turbin Ossberger karena dirancang oleh Ossberger, berbentuk seperti drum dan menggunakan nosel berpenampang persegi panjang yang memanjang yang diarahkan ke sudu Gerak yang berbentuk silinder. Turbin *cross flow* memungkinkan air mengalir melalui sudu gerak dua kali. Selama lintasan pertama, air mengalir dari sisi luar sudu ke dalam; lintasan kedua dari dalam kembali ke luar. Jenis turbin ini dapat digunakan baik dalam orientasi horizontal maupun vertikal. Turbin ini dapat menangani aliran air yang tinggi dan head yang lebih rendah daripada turbin Pelton. [27] Turbin ini dapat digunakan untuk pembangkit Listrik tenaga air berkapasitas 5 kW hingga 100 kW. [28]



Gambar 28. Turbin *cross flow* tampak dalam

- Turbin Reaksi

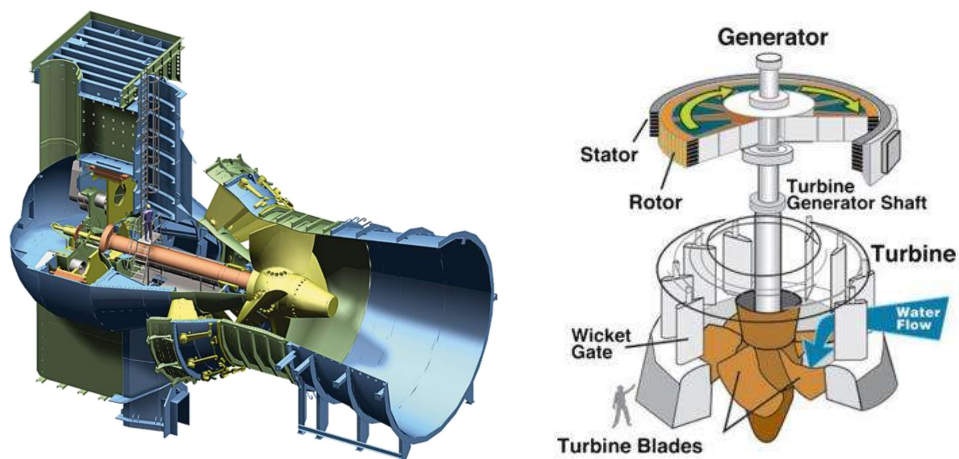
Turbin Reaksi memiliki kinerja yang lebih baik pada kondisi head rendah dan laju aliran tinggi. Turbin ini tidak memiliki nosel, bilahnya menjorok secara radial dari pinggiran runner, dibentuk dan dipasang sedemikian rupa sehingga ruang di antara sudu memiliki bentuk nosel pada penampang melintang. Turbin reaksi menghasilkan daya dari gabungan aksi tekanan dan pergerakan air. Pada kecepatan operasi yang lambat, efisiensi turbin reaksi lebih baik daripada turbin impuls. Turbin reaksi juga umumnya lebih disukai daripada turbin impuls ketika head yang lebih rendah tetapi laju aliran yang lebih tinggi tersedia[27]. Jenis-jenis dari turbin aksi diantaranya:

- a) Turbin Propeller

Sebagian besar turbin reaksi adalah turbin tipe propeller; turbin ini praktis, yang menunjukkan efisiensi, kesederhanaan, dan efektivitas yang baik. Turbin propeller seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28 umumnya memiliki runner dengan tiga hingga enam sudu tempat aliran air menghantam secara terus-menerus pada laju yang konstan.

Pitch pada sudu akan tetap atau dapat disesuaikan. Komponen utama selain runner adalah scroll case, wicket gate, dan draft tube[27].

Ada tiga jenis turbin propeller yang berbeda yaitu Turbin Bulb, turbin *straflo*, dan turbin *Tub*. Turbin *bulb* merupakan turbin yang memiliki satu kesatuan casing dengan generator di depan aliran air. *Straflo*, generator terpasang langsung pada keliling turbin. Turbin *Tube* merupakan turbin dengan penstock ditekuk diposisikan sebelum atau setelah runner untuk membuat sambungan garis lurus ke generator. Pada tahun 1913, turbin propeller dengan pitch variabel dirancang oleh Kaplan, sehingga disebut turbin Kaplan. Runnernya secara hidrolik mirip dengan runner turbin propeller kecuali hub-nya yang berbeda yaitu terdapat mekanisme untuk mengatur sudut bilah dan pintu gawang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28 dibawah ini. [27]

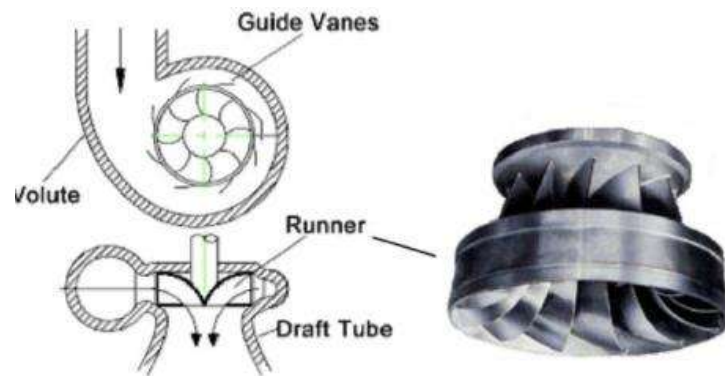


Gambar 29. Turbine bulb (kiri) dan Kaplan turbine (kanan)

Salah satu turbin yang bisa digunakan untuk aplikasi skala kecil hingga besar, mulai dari PLTA *run of river* hingga ke pasang surut air laut adalah turbin bulb. Turbin ini mampu menghasilkan Listrik dengan *head* kisaran 0,5 meter hingga 30 meter. [29]

b) Turbin Francis

Turbin Francis adalah turbin yang paling umum digunakan dalam pembangkit Listrik tenaga air. Turbin ini memiliki runner aliran radial atau campuran radial/aksial yang paling umum dipasang dalam casing spiral dengan baling-baling pemandu internal yang dapat disesuaikan. Air dimasukkan tepat di atas runner dan di sekelilingnya lalu jatuh, mengakibatkan sudu dapat berputar. Selain runner, komponen utama lainnya adalah *scroll case*, *wicket gate*, dan *draft tube*. Tampilan penampang turbin Francis ditunjukkan pada Gambar dibawah ini



Gambar 30. Turbin Francis

Sedangkan tipe turbin berdasarkan arah aliran turbin dibagi menjadi beberapa jenis, diantaranya;

- Turbin Tangensial

Turbin tangensial merupakan turbin dengan arah aliran air tegak lurus dengan poros. Salah satu contoh yang merupakan turbin tangensial adalah turbin *pleton* dan turbin *cross flow* yang dapat dilihat pada gambar 26 dan gambar 27 diatas.[30]

- Turbin aksial

Turbin aksial merupakan turbin dengan arah aliran sejajar dengan poros turbin. Dua turbin yang telah dijelaskan diatas yaitu turbin Kaplan dan turbin propeller merupakan turbin dengan tipe aliran aksial. Skematik dari turbin Kaplan dapat dilihat pada gambar 28 diatas.[30]

- Turbin aksial - radial

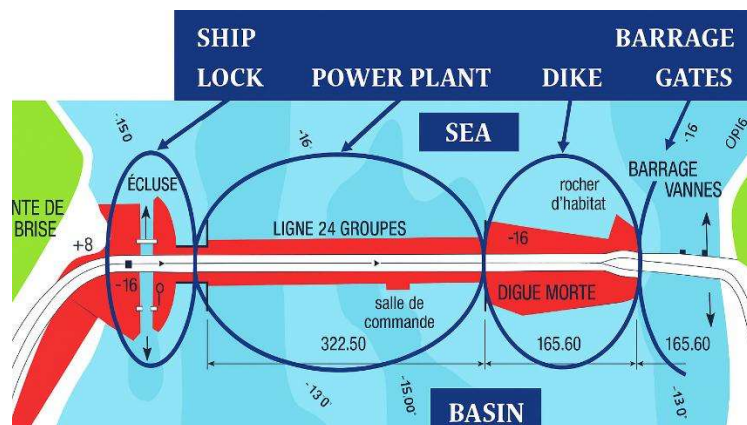
Turbin radial merupakan turbin dengan arah aliran air masuk sudu turbin secara radial dan keluar sudu turbin secara aksial atau sejajar dengan poros turbin. Salah satu yang menjadi turbin jenis aksial radial ini adalah turbin *francis* yang dapat dilihat pada gambar 29 Datas.[30]

2.2.5. Desain *Barrage* Pada Beberapa Pemangkit Eksisting

Secara umum, *barrage* atau dam dari pembangkit Listrik tenaga pasang surut dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Beberapa komponen dan fungsinya adalah sebagai berikut:

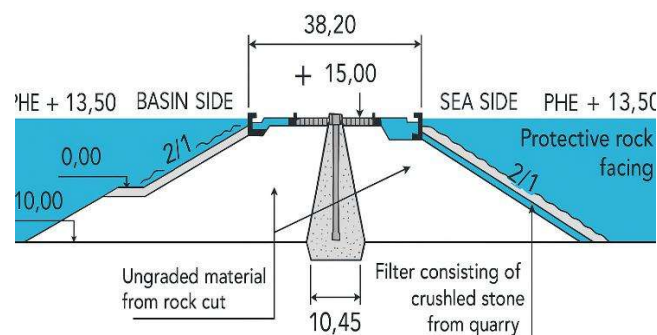
- Gate: Gate yang mengendalikan aliran air antara laut dan Basin.

- Gardu Induk: Generator tanah untuk menaikkan tegangan dan menghubungkan ke jaringan.
- Basin: Area penampungan air saat pasang dan mengembalikan air ke laut saat surut.
- Tanggul: Penghalang dan pemisah antara laut dan basin
- *Power Plant*: Umumnya, pembangkit Listrik ini menggunakan turbin bulb sebagai penggerak awalnya.
- *Barrage Gate*: Struktur yang dibangun di antara laut dan cekungan yang memungkinkan kapal atau perahu untuk lewat.

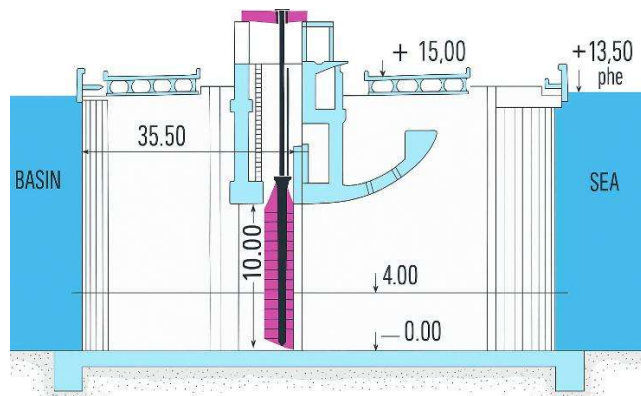


Gambar 31 Layout dari Pembangkit Listrik Pasang Surut

Tanggul atau bendungan pada Pembangkit Listrik pasang surut La Rance mempunyai panjang 163,6 m dengan panjang bendungan 145,1 m, 6 pintu air dengan tinggi 10 m, lebar 15 m dan debit air maksimum $9600 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan luas basin 22 km^2 seperti yang diilustrasikan pada Gambar di bawah ini. [17]

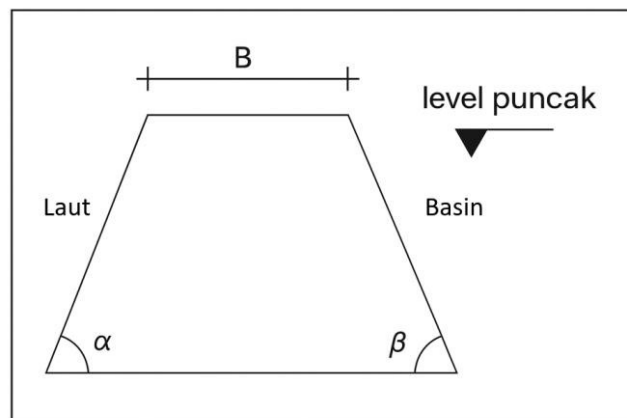


Gambar 32 Cross Sectional Area Bendungan La Rance



Gambar 33 *Cross Sectional gate La Rance*

Secara garis besar, bendungan yang ada pada pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut dapat dilihat pada gambar 33 dibawah ini.



Gambar 34 *Cross Sectional Bendungan Pasang Surut*

Puncak bendungan merupakan bagian datar horizontal di paling atas trapesium. Ketebalan puncak bendungan dapat = B dan level puncak = H. Sisi miring sebelah kiri bendungan merupakan sisi laut. Slope Angle = α (alpha) merupakan sudut bendungan arah Laut Terbuka. Sisi miring sebelah kanan merupakan sisi yang menghadap ke bendungan dengan Slope Angle = β (beta). [31]

Profil melintang dam penutup terdiri dari dua bagian utama: profil konstruksi dan profil akhir. Profil konstruksi berfungsi untuk menutup tidal basin secara fisik sehingga basin tersebut tidak lagi dipengaruhi oleh pasang surut air laut. Parameter desain utama untuk profil konstruksi ini adalah Tinggi Puncak (H), Lebar Puncak (B), dan Sudut Kemiringan (α dan β). Profil akhir yang dibangun di atas profil konstruksi memiliki fungsi perlindungan tambahan tetapi tidak mempengaruhi desain perlindungan dasar, sehingga tidak dibahas lebih lanjut dalam konteks ini.[31]

Profil Konstruksi adalah struktur inti dan fokus dari bab ini. Fungsinya adalah untuk melakukan penutupan terhadap area basin. Dengan adanya dam ini, pergerakan pasang surut dari laut tidak dapat lagi masuk ke dalam basin, menciptakan area yang stabil di belakangnya.

Profil Akhir adalah struktur tambahan yang dibangun di atas profil konstruksi setelah closure selesai. Fungsinya terutama adalah sebagai pelindung terhadap banjir (sea defense) untuk area reklamasi di belakang dam. Karena tidak berkontribusi pada stabilitas selama proses penutupan, profil ini tidak mempengaruhi desain perlindungan dasar dan untuk sementara tidak dipertimbangkan.

Tinggi Puncak (H) merupakan elevasi atau ketinggian puncak dam dari dasar laut. Tinggi ini harus cukup untuk mencegah limpasan (overtopping) air laut selama proses penutupan dan operasi normal. Lebar Puncak (B) merupakan lebar permukaan atas dam. Lebar ini mempengaruhi stabilitas struktur dan dapat berfungsi sebagai jalur akses selama konstruksi. [31]

Sudut Kemiringan α (alpha) merupakan sudut kemiringan pada sisi yang menghadap laut. Slope ini langsung menghadapi gaya dari gelombang dan arus laut, sehingga biasanya memerlukan perlindungan khusus. Sudut kemiringan β (beta) merupakan sudut kemiringan pada sisi yang menghadap basin (basin side). Karena basin sudah tertutup dan tenang, slope ini mungkin memiliki desain yang berbeda dengan sisi laut.[31]

Perlindungan khusus pada area yang menghadap laut biasanya akan menggunakan lapisan bottom protection. Ini adalah lapisan material (seperti batu besar atau) yang diletakkan di dasar laut di depan kaki slope sisi laut. Fungsinya adalah untuk melindungi dasar laut dari erosi yang disebabkan oleh pusaran air yang kuat yang terjadi saat air mengalir deras melalui celah penutupan.

Sudut kemiringan α (sisi laut) dan β (sisi basin) terutama bergantung pada metode konstruksi yang diterapkan. Tujuannya adalah membangun profil secepat mungkin untuk meminimalkan erosi (scour), yang sekaligus mempengaruhi volume material yang dibutuhkan.[31]

Pemuatan dalam Lapisan Lebar (Dumping in wide layers): Jika batu disebar dalam lapisan yang lebar, kemiringan yang dihasilkan akan lebih landai (hampir datar).

Metode ini tidak efisien untuk penutupan karena membutuhkan volume material (m^3) yang sangat besar.

Pemuatan dalam Garis (Dumping in a line): Untuk mempercepat konstruksi dan meminimalkan total volume material, batu justru dibuang terus-menerus membentuk suatu garis memanjang. Dengan metode ini, timbunan batu akan secara alami mencapai sudut kemiringan maksimumnya sebelum runtuh.[31]

Kesimpulan dari metode ini adalah, nilai cotangen α dan cotangen β menjadi 1,5. Ini berarti kemiringan alami maksimum untuk tumpukan batu (rubble mound) yang dibuang dengan cara ini telah tercapai, yang merupakan kondisi paling efisien. Metode alternatif adalah dengan membangun dam menggunakan truk pembuang (dump trucks). Dalam metode ini, batu ditumpahkan dari ujung kepala bundar (roundheads) yang telah terbentuk sebelumnya. Meskipun metode konstruksinya berbeda, hasil akhir untuk sudut kemiringannya sama. Saat batu ditumpahkan dari ketinggian, mereka akan menggelinding dan berhenti pada sudut keseimbangan alaminya.[31]

Terlepas dari metode konstruksinya (apakah dari kapal atau truk), prinsip utamanya adalah menutup celah secepat mungkin dengan volume material minimal. Kedua metode konstruksi tersebut menghasilkan kemiringan yang sama, yaitu dengan $\cot \alpha = \cot \beta = 1,5$. Ini mewakili sudut kemiringan alami maksimum dari tumpukan batu yang tidak disusun, yang merupakan kondisi paling efisien dan stabil secara alami untuk konstruksi semacam ini. Nilai $\cot \alpha = 1,5$ ini kemudian menjadi parameter desain tetap yang digunakan untuk merencanakan dimensi dan volume material dam. [31]

Lebar puncak dari profil konstruksi sangat bergantung pada metode konstruksi yang diterapkan. Jika metode penutupan vertikal murni diterapkan, lebar puncak yang dibutuhkan bisa sangat sempit. Lebarnya kira-kira hanya sebesar D_{50} (ukuran batu representatif) dari material yang dibuang pada fase akhir penutupan. Ini karena tidak ada kendaraan yang perlu melintas di atasnya.[31]

Metode Penutupan Horizontal atau Kombinasi (Horizontal or Combined Closure) menggunakan truk pembuang (dump trucks) perlu melintas di atas puncak dam untuk membuang material. Lebar puncak dalam skenario ini ditentukan oleh Intensitas Lalu Lintas. Berapa banyak truk yang perlu beroperasi secara bersamaan. Kebutuhan Salip-Menyalip, jika truk-truk tersebut perlu saling mendahului di atas dam.

Metode konstruksi adalah faktor kunci yang mempengaruhi lebar puncak. Kebutuhan akses untuk kendaraan konstruksi (terutama dump truck) menjadi pertimbangan utama saat metode horizontal atau kombinasi digunakan. Proyek besar dengan dam yang panjang dan target produksi tinggi, penggunaan dua jalur dengan lebar total 10-meter direkomendasikan untuk memastikan kelancaran operasional dan efisiensi.[31]

2.2.6. Perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Air Laut di Dunia

Terdapat beberapa pembangkit listrik tenaga pasang surut air laut yang kini beroperasi di dunia. Salah satu yang paling terkenal adalah La Ranch Tidal Barrage yang berada di Prancis. Beberapa bagian utama dari pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut diantaranya ada turbin dan generator, *sluice gate*, beberapa *ship lock* serta area turis. Gambar dibawah ini menggambarkan pembangkit Listrik tenaga pasang surut Danau Shiwa yang berada di Korea Selatan.[14]



Gambar 35 Pembangkit Listrik *Tidal Barrage* Danau Shiwa, Korea Selatan

Sampai dengan saat ini, terdapat lima pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut yang beroperasi di dunia. Selain itu juga terdapat beberapa pembangkit yang masih dalam tahap penelitian dan perkembangan. Tabel di bawah ini merupakan spesifikasi dari lima pembangkit yang sudah secara komersial beroperasi di dunia.[14]

Tabel 5. Beberapa Pembangkit Listrik *Tidal Barrage* yang Beroperasi

Nama	La Rance	Kislaya Guba	Jiangxia	Annapolis	Shiwa
Negara	Prancis	Rusia	China	Canada	Korea Selatan

Kapasitas (MW)	240	1,7	3,9	20	254
Kapasitas Annual (GWh)	540		6,5	30	553
Tahun	1966	1968	1980	1984	2012
Jumlah Turbin	24	1	6	1	10
Tipe turbin	Bulb	Savonius	Bulb	Rim	Bulb
Luas basin km ²	22	1,1	1,4	15	56
Rata-rata pasang surut (m)	8,5	2,3	5,1	6,4	5,6

Kislaya Guba di Rusia mempunyai kapasitas 1,7 MW, dibangun tahun 1968 dengan hanya 1 turbin tipe Savonius. Luas basinya 1,1 km² dan rata-rata pasang surutnya 2,3 meter. Annapolis di Kanada dibangun pada tahun 1984 dengan kapasitas 20 MW dan kapasitas tahunan 30 GWh. Pembangkit ini menggunakan 1 turbin tipe Rim, luas basin 15 km², serta rata-rata pasang surut 6,4 meter. Shiwa di Korea Selatan memiliki kapasitas terbesar yaitu 254 MW dengan kapasitas tahunan 553 GWh. Dibangun pada tahun 2015, menggunakan 10 turbin tipe Bulb, luas basin 56 km², dan rata-rata pasang surut 5,6 meter.

Salah satu pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut terbesar dan tertua di dunia yang masih aktif beroperasi hingga saat ini adalah *La Rance Tidal Barrage* yang ada di Prancis. Pembangkit ini dibangun pada tahun 1966 dengan kapasitas 240 MW dan mampu menghasilkan 540 GWh per tahunnya dan dapat menerangi 4% rumah di Brittany. Pembangkit ini menelan biaya sebesar 95 juta euro pada tahun 1967 yang diperkirakan LCOE pada tahun 2009 sebesar \$ 1,8 sen per kWh. Pembangkit ini memiliki bendungan sebesar 115 m dengan 24 turbin bulb yang reversible.[14]

Jianxia tidal barrage power station dibangun di dekat mulut Sungai Yalu di Wuyantou, provinsi Zhejiang, China dan mulai beroperasi secara komersial pada tahun 1980. Kapasitas dari pembangkit ini adalah 3,9 MW dan dapat menghasilkan energi hingga 6,5 GWh per tahun. Pembangkit ini memiliki 5 *sluice gate* dan 6 turbin tipe bulb dengan spesifikasi dan tahun mulai operasi yang berbeda-beda. Dua turbin bulb kapasitas 545 dan kecepatan 118 rpm beroperasi pada tahun 1980. Turbin bulb kapasitas 659 dan kecepatan 118 rpm mulai beroperasi pada tahun 1984. Tiga turbin bulb dengan kapasitas 600 kW dan 700 kW dengan kecepatan 125 rpm mulai beroperasi masing-masing tahun 1985 dan 2007.[14]

2.2.7. Perhitungan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Air Laut

Berapa pembangkit Listrik *tidal barrage* yang kini telah beroperasi dapat diketahui biaya Pembangunan nya, dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 6. Biaya Pembangunan Beberapa Pembangkit Listrik *Tidal Barrage*

Power Plant	Sihwa Lake Tidal Power Plant[32]	Uldolmok Tidal Power Station[32][33]	La Rance Tidal Power Station[32]
Location	South Korea	South Korea	France
Capacity (MW)	254	1,5	240
turbine capacity	10 X 25,4 MW	1 MW + 0,5 MW	24 X 10 MW
tidal range (m)	5,6	3	8
basin area (km ²)	43	unkown	22,5
Start construction	04-Aug-11	01-Jul-05	26-Jul-63
Start operation	2012	May 14, 2009	26-Nov-66
Annual Generation (GWh)	552	2,4	500
Capacity Factor (CF) (%)	22,14%	18%	28%
Construction cost total (report)	USD 297.517.516	USD 10.000.000	\$115m in 1664 (inflation) \$918m in 2019
LCOE	87,75 Won/kWh		€0.12/kWh
Status	Operation	Operation	Operation

Sihwa *Lake Tidal Barrage Power Plant* merupakan pembangkit terbesar dan termahal yang saat ini ada di dunia, dengan kapasitas terpasang sebesar 254 MW dan berdasarkan data dari IRENA biaya yang dihabiskan untuk Pembangunan pembangkit ini adalah \$298 juta pada tahun 2011. LCOE dari pembangkit ini diperkirakan sebesar \$0,02 per kWh, dengan 10 turbin generator pembangkit ini mampu menghasilkan 550 GWh per tahunnya. [31]

Korea Selatan sebelum membangun Sihwa *Lake Tidal Barrage Power Plant* juga telah membangun pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut Uldomok dengan kapasitas sebesar 2,5 MW. Biaya Pembangunan dari pembangkit ini diperkirakan sebesar \$10 juta pada tahun 2009. Korea Selatan juga berencana untuk meningkatkan kapasitas dari pembangkit ini menjadi 90 MW. Korea Selatan juga sedang berencana untuk membangun pembangkit Listrik tenaga pasang surut air laut di Inchecon dengan kapasitas 1320 MW dan di Garorim sebesar 520 MW.[31]

Uldolmok Tidal Power Station juga berada di Korea Selatan dengan kapasitas 1,5 MW. Pembangkit ini memiliki 2 turbin dengan kapasitas masing-masing 1 MW dan 0,5 MW. Rentang pasang surutnya sekitar 3 meter. Dibangun pada 1 Juli 2005 dan mulai beroperasi pada 14 Mei 2009. Produksi listrik tahunan mencapai 2,4 GWh dengan faktor kapasitas 18%. Biaya konstruksi sebesar USD 10.000.000 dan statusnya saat ini beroperasi. [33]

La Rance *Tidal Barrage Power Plant* merupakan pembangkit Listrik tertua jenis ini yang dibangun pada tahun 1966. Pembangkit ini saat ini telah berusia 59 tahun dan belum ada tanda-tanda pension. Biaya Pembangunan dari pembangkit ini diperkirakan \$115 juta pada tahun 1966 dan diperkirakan pada tahun 2019 biaya ini adalah sebesar \$918 juta. LCOE dari pembangkit ini diperkirakan sebesar \$0,04 – \$0,12 per kWh dengan kapasitas pembangkit 240 MW.[32]

Biaya pengeluaran dan pemasukan pada proyek Teknik, khususnya pada pembangkit listrik biasanya terbagi dalam beberapa kategori berikut: [35]

- Biaya awal (*Fix Capital Cost*) = biaya untuk membangun atau membeli dan installasi pembangkit.
- Biaya Pengoperasian dan pemeliharaan (*O&M Cost*) = biaya tahunan, seperti listrik, tenaga kerja, dan perbaikan kecil.
- Nilai sisa (*Salvage Value*) = penerimaan pada akhir proyek untuk penjualan atau pemindahan peralatan (dapat disebut biaya sisa atau *salvage cost*)
- Pendapatan (*revenue*) = penerimaan tahunan karena penjualan produk atau layanan
- Perbaikan menyeluruh (*overhaul*) = biaya perbaikan menyeluruh atau perbaikan besar yang dilakukan dalam daur hidup pembangkit.

Proyek secara spesifik sering kali memiliki biaya, pendapatan, atau manfaat pengguna yang spesifik pula. Misalnya, biaya pengoperasian dan pemeliharaan (O&M) tahunan dapat dibagi lagi menjadi biaya tenaga kerja langsung, listrik, dan biaya spesifik lainnya.[35]

Pada perhitungan ekonomi pembangkit Listrik, teori utama yang digunakan adalah Konsep Nilai Waktu Uang (*Time Value of Money*) yang menjadi dasar bagi perhitungan kelayakan investasi, khususnya dalam proyek pembangkit listrik. Secara

sekilas pada bagian ini akan menguraikan konsep *Future Value*, *Net Present Value* (NPV), dan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) yang bermanfaat dalam penelitian ini. Tinjauan terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan juga disajikan untuk memberikan konteks dan menunjukkan celah pengetahuan yang coba diisi oleh penelitian ini.[35]

Inti dari konsep *Time Value of Money* adalah premis bahwa sejumlah uang yang diterima pada saat ini memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan jumlah yang sama yang diterima di masa depan. Hal ini disebabkan oleh adanya faktor-faktor seperti peluang investasi, risiko, dan inflasi. Sebagai contoh, uang Rp 1 juta hari ini dapat diinvestasikan sehingga nilainya menjadi lebih dari Rp 1 juta setahun kemudian. Konsep inilah yang melandasi semua analisis keuangan jangka panjang, termasuk penilaian investasi pada pembangkit listrik.[35]

Future Value (FV) adalah nilai suatu aset atau sejumlah uang pada tanggal di masa depan dengan mengasumsikan tingkat pertumbuhan (tingkat bunga) yang tertentu. Perhitungan FV menjawab pertanyaan “Berapa nilai investasi saya di masa depan jika saya menginvestasikan sejumlah uang tertentu hari ini dengan tingkat bunga tertentu”. Persamaan *Future Value* untuk investasi tunggal dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut:[35]

$$\bullet \quad FV = PV \times (1 + i)^n \qquad \text{Persaman 5. Nilai Future Value}[35]$$

Di mana:

- FV = Nilai Masa Depan (*Future Value*)
- PV = Nilai Sekarang (*Present Value*)
- i = Tingkat suku bunga per periode
- n = Jumlah periode

Dalam konteks pembangkit listrik, konsep FV dapat digunakan untuk memproyeksikan nilai investasi awal di masa depan atau biaya operasi yang akan tumbuh seiring inflasi.

Net Present Value (NPV) merupakan teknik penganggaran modal yang dianggap paling teoretis benar karena secara penuh menggabungkan prinsip *Time Value of Money*.

NPV didefinisikan sebagai selisih antara nilai sekarang dari semua arus kas masuk (*cash inflow*) dan nilai sekarang dari semua arus kas keluar (*cash outflow*) selama umur proyek.[35]

Dalam konteks pembangkit Listrik, NPV dirumuskan sebagai:

$$\bullet \quad NPV = \sum [CF_t / (1 + r)^t] - C_0 \quad \text{Persaman 6. Net Present Value [35]}$$

Di mana:

- CF_t = Arus kas bersih pada periode t
- r = suku bunga (discount rate)
- t = Periode waktu
- C_0 = Investasi awal (arus kas keluar pada periode 0)

Menurut teori keuangan, suatu proyek investasi layak untuk dijalankan jika menghasilkan $NPV \geq 0$. Nilai NPV positif menunjukkan bahwa proyek tersebut diharapkan dapat menghasilkan return yang melebihi biaya modalnya, sehingga menciptakan nilai bagi perusahaan. Sebaliknya, NPV negatif menunjukkan proyek akan merusak nilai perusahaan.

Levelized Cost of Electricity (LCOE) adalah ukuran biaya pembangkitan listrik yang terlevelisasi atau terataratakan selama usia ekonomis suatu pembangkit. Perhitungan LCOE pada dasarnya adalah nilai Present Value dari total biaya yang dikeluarkan selama umur proyek dibagi dengan total energi listrik yang dihasilkan, yang juga didiskontokan. Rumus dasarnya dapat ditulis:

$$LCOE = [\sum (Investasi_t + Biaya\ Operasi_t + Biaya\ Bahan\ Bakar_t) / (1 + r)^t] / [\sum Energi_listrik_t / (1 + r)^t] \quad \text{Persaman 7. LCOE[35]}$$

LCOE memiliki kemampuannya untuk membandingkan biaya pembangkitan dari berbagai teknologi yang memiliki umur, modal awal, dan pola operasi yang berbeda-beda

Secara konseptual, baik NPV maupun LCOE merupakan anak turunan dari konsep Time Value of Money. NPV menggunakan teknik diskonto untuk menghitung nilai bersih sebuah proyek dalam satuan mata uang, sedangkan LCOE menggunakan teknik yang sama untuk menghitung biaya per unit energi (kWh) yang membuat proyek

impas. Dengan kata lain, LCOE adalah tingkat harga (price) yang membuat NPV proyek menjadi nol. Oleh karena itu, dalam analisis kelayakan, kedua metrik ini saling melengkapi: LCOE untuk membandingkan efisiensi teknologi dan NPV untuk menilai nilai yang diciptakan proyek under specific tariff assumptions.[35]

Berdasarkan metodologi yang dikembangkan oleh Fay dan Smachlo pada tahun 1983, memperkirakan biaya modal awal dari pembangkit listrik tenaga pasang surut (tidal range) terdiri dari lima komponen utama, yaitu *Turbo-generator*, *Power House*, *Sluice* (pintu air), Coferdam, dan Bendungan (*Bund*). Berdasarkan hasil penelitiannya, biaya awal (*capital cost*) dari *Turbo-generator* mencapai 53,3 % dari biaya keseluruhan. [36]