

Analisis Pastel & Swot Pemanfaatan Teknologi *Pumped Storage Hydropower* untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan di Indonesia

Mujammil Asdhiyoga Rahmanta* Agus Salim Samsudin
Bidang Riset & Teknologi Sistem Pembangunan & Energi,
PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian & Pengembangan Ketenagalistrikan
Corresponding author. email : : mujammil @pln.co.id

Abstrak

Pembangkit listrik energi terbarukan (ET) dapat mengurangi penggunaan pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang merusak lingkungan terkait dengan emisi CO₂. Pusat listrik tenaga surya (PLTS) dan pusat listrik tenaga angin/bayu (PLTB) memiliki sifat intermitten terkait dengan kinerjanya yang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti fluktuasi radiasi sinar matahari & kecepatan angin. Hal ini membuat adanya masalah di kestabilan & kehandalan sistem ketenagalistrikan sehingga pemanfaatannya tidak optimal. Pumped storage hydropower (PSH) merupakan teknologi berbasis energi terbarukan yang mampu menyimpan kelebihan produksi energi dalam sistem ketenagalistrikan pada kondisi beban rendah untuk disalurkan ketika sistem berada dalam kondisi beban puncak. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pemanfaatan PSH kaitannya dengan peningkatan penetrasi pembangkit ET dalam sistem ketenagalistrikan. Metode analisis pastel & SWOT (Strength Weakness Opportunity Threat) digunakan dalam penelitian ini. Dari hasil diskusi & pembahasan didapatkan hasil bahwa teknologi PSH dapat mendukung penetrasi pembangkit ET di Indonesia khususnya PLTB & PLTS karena mampu menghilangkan sifat intermitten pembangkit tersebut dalam sistem ketenagalistrikan. Selain itu, PSH juga merupakan media penyimpanan energi yang sudah mature dalam skala besar & ekonomis, sehingga cocok diaplikasikan dalam sistem ketenagalistrikan yang besar & rumit. Strength dari PSH adalah teknologinya yang sudah mature terutama dari aspek kapasitasnya yang besar & ekonomis. Weakness dari PSH terkait dengan pemanfaatannya tergantung lokasi karena kebutuhan wilayah yang harus memiliki potensi air yang cukup dengan kondisi alam yang berbukit (adanya elevasi), serta lahan yang relatif luas. Opportunity yang ditawarkan oleh PSH adalah Indonesia memiliki banyak daerah yang berpotensi untuk dikembangkan menjadi PSH. Selain itu, pemanfaatan PSH dapat menurunkan biaya pokok produksi dan peningkatan penetrasi PLTS & PLTB. Threat dari PSH adalah tren penurunan biaya penyimpanan & peningkatan kinerja battery.

Kata kunci : Energi terbarukan; Pumped storage hydropower; PASTEL; SWOT

Abstract

Renewable energy (RE) power plants can reduce the use of fossil fuel power plants that damage the environment related to CO₂ emissions. Solar power centers and wind/wind power plants (PLTB) have intermittent characteristics related to their performance which is strongly influenced by environmental conditions such as fluctuations in solar radiation & wind speed. This creates problems in the stability & reliability of the electricity system so that its utilization is not optimal. Pumped storage hydropower (PSH) is a renewable energy-based technology that can store excess energy production in the electricity system at low load conditions to be distributed when the system is in peak load conditions. This study aims to determine the use of PSH concerning increasing the penetration of RE generators in the electricity system. Pastel & SWOT (Strength Weakness Opportunity Threat) analysis methods were used in this study. From the results of the discussion & discussion, it was found that PSH technology can support the penetration of RE power plants in Indonesia, especially PLTB & PLTS because it can eliminate the intermittency nature of these plants in the electricity system. In addition, PSH is also a mature energy storage medium on a large & economical scale, making it suitable for application in large & complex electrical systems. The strength of PSH is its mature technology, especially from the aspect of its large and economical capacity. The weakness of PSH is related to its utilization depending on the location due to the need for the area to have sufficient water potential with hilly natural conditions (their elevation), and relatively large land. The opportunity offered by PSH is that Indonesia has many areas that have the potential to be developed into PSH. In addition, the use of PSH can reduce the cost of production and increase the penetration of PLTS & PLTB. The threat of PSH is the trend of decreasing storage costs & increasing battery performance.

Keywords: Renewable energy; Pumped storage hydropower; PASTEL, SWOT

I. Pendahuluan

Perkembangan teknologi global yang ditandai dengan beberapa isu emisi yang meresahkan negara-negara dunia, memicu kesepakatan Paris oleh 196 negara pada tahun 2015 (United Nations, 2015). Salah satu tujuan dari Perjanjian Paris adalah untuk memperkuat respon

global terhadap isu-isu perubahan iklim dalam konteks pembangunan berkelanjutan dan upaya memerangi kemiskinan. Perubahan iklim dan peningkatan suhu bumi disebabkan oleh gas rumah kaca, seperti CO₂ dari emisi pembangkit listrik. Pembangkit listrik yang bersumber dari bahan bakar fosil menyumbang 33-40% dari emisi CO₂ dunia.

Analisis Pastel & Swot Pemanfaatan Teknologi *Pumped Storage Hydropower* untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan di Indonesia

Pusat listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara adalah kontributor utama emisi ini ([Sekoai et al, 2016], (Tian et al, 2016), [Zhang, 2016]). Proses pembangkitan tenaga listrik global masih didominasi oleh pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi dari batubara dan gas bumi masing-masing sebesar 38,01% dan 23,01%

(IEA, 2020). Di Indonesia, pembangkitan listrik masih didominasi oleh sumber energi fosil yang tidak ramah lingkungan. Data tahun 2019 menunjukkan porsi terbesar sumber energi pembangkit listrik Indonesia yang berasal dari batubara berada pada angka mengkhawatirkan yaitu 59,06%.

Tabel 1. Pemanfaatan ET di sektor ketenagalistrikan

No.	Source	Potency (MW)	Installed Capacity (MW)		Utilization (%)
			PLN	IPP	
1	Geothermal	29,544.00	579.26	1,863.42	6.31%
2	Hydro (All)	85,476.00	3,584.07	5,174.00	6.05%
3	Bioenergy	32,654.00		13.70	0.04%
4	Solar	20.7898 (4,80 kWh/m ² /day)	78.50	-	0.00%
5	Wind	60.647 (>= 4 m/s)	131.00	-	0.00%
6	Sea Wave	17,989.00	0.30	-	0.00%

Sumber : Data Sekunder, PT. PLN (Persero), 2022

Energi terbarukan (ET) merupakan solusi efektif untuk tantangan energi dan lingkungan, yaitu transisi dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan. Dalam beberapa tahun terakhir, topik penelitian terkait 100% listrik terbarukan telah banyak dibahas (Bin Lu, 2021). Sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 minimal 23% dan 31% pada tahun 2050. Indonesia memiliki potensi energi baru dan terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer. Energi terbarukan seperti modul potovoltaik (PV) dalam pusat listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) banyak digunakan dalam sistem kelistrikan. Tabel 1 menunjukkan bahwa pemanfaatan ET di Indonesia masih sangat rendah, dengan panas bumi (*geothermal*) & air (*hydro*) merupakan penyumbang terbesar utilitasi ET dengan prosentasi lebih dari 6%.

Masalah yang dihadapi oleh sistem kelistrikan adalah sifat generator yang terputus-putus (*intermittency*) karena sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti matahari, angin, & kondisi cuaca ([Heptonstall et al, 2016], [Notton et al, 2018], Suchet et al, 2020]). Karakteristik energi terbarukan yang berselang-seling menjadi penghambat peningkatan penetrasi energi terbarukan di jaringan listrik. Hal Ini karena

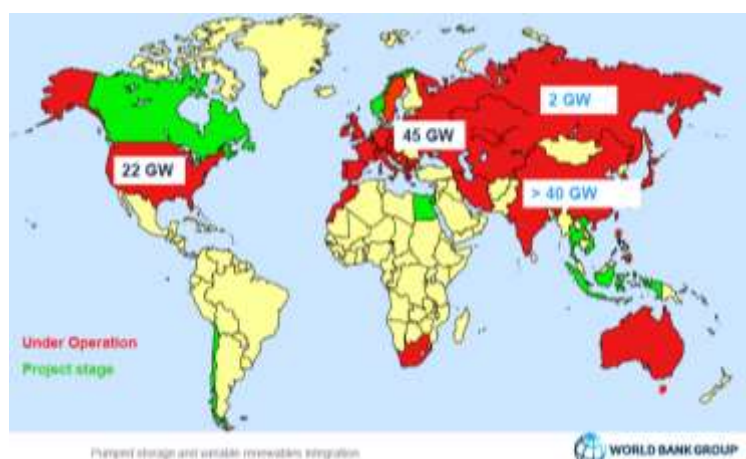
keluaran energi angin dan matahari yang tidak menentu yang disebabkan oleh variasi kecepatan angin dan radiasi matahari sehingga menimbulkan tantangan pada sistem kelistrikan, misalkan ketidakstabilan frekuensi ([Bozalakov et al, 2019], [Bozalakov, 2020]). Untuk mengatasi hal tersebut, mitigasi pola operasi dengan menggabungkan energi terbarukan dengan pembangkit listrik tenaga diesel/gas telah banyak dilakukan. Pemasangan baterai dapat dilakukan, tetapi biaya investasi yang relatif tinggi dapat meningkatkan produksi listrik (Rahimi, 2013).

Pumped-storage hydropower (PSH) dapat digunakan untuk menstabilkan sistem kelistrikan sehingga dapat dimanfaatkan energi terbarukan dalam skala besar. PSH menawarkan biaya yang ekonomis. Ketika permintaan listrik rendah, kelebihan kapasitas pembangkit digunakan untuk memompa air ke *reservoir* yang lebih tinggi. Ketika ada permintaan yang lebih tinggi, air dilepaskan kembali ke *reservoir* yang lebih rendah melalui turbin untuk menghasilkan listrik di *electric generator* (Florian et al, 2015). PSH tidak hanya merupakan sumber energi terbarukan dan berkelanjutan tetapi juga memiliki fleksibilitas dan kapasitas penyimpanan yang memungkinkan peningkatan stabilitas jaringan dan mendukung pengembangan sumber energi terbarukan yang terputus-putus (Rehman, 2015).

Beberapa negara telah menerapkan integrasi pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan dengan PSH seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Potensi PSH di daerah perbukitan telah banyak dikaji (Hunt *et al*, 2020). Diperkirakan kapasitas penyimpanan energi dunia sebesar 17.325 TWh atau sekitar 79% dari konsumsi listrik dunia pada tahun 2017. Hal ini tentunya dikarenakan besarnya potensi PSH yang ada dan merupakan salah satu alternatif pengganti baterai yang sering mengalami kendala dalam proses daur ulang sehingga berdampak pada lingkungan. Studi tentang peran

panel surya dan PSH terhadap 100% energi terbarukan di Indonesia telah banyak dipelajari. Dijelaskan, Indonesia memiliki 26.000 calon lokasi potensial untuk PSH dengan total kapasitas penyimpanan hingga 821.000 GWh, yang 1.000 kali lebih dari cukup untuk mendukung sistem kelistrikan Indonesia dengan 100% energi terbarukan.

Kajian ini bertujuan untuk menganalisis potensi pemanfaatan PSH untuk mendukung peningkatan penetrasi ET di Indonesia.



Gambar 1. Peta negara yang sudah mengoperasikan & mengembangkan PSH (Louis, 2015)

II. Metode

Analisis PASTEL merupakan singkatan dari *political, economic, sociocultural, technological, legal, and environmental* atau dapat kita artikan menjadi politik, ekonomi, sosial budaya, teknologi, hukum, dan lingkungan. Analisis PESTEL merupakan alat untuk menganalisis faktor-faktor yang ada dalam sebuah negara atau pasar dan menelaah bagaimana faktor-faktor tersebut memengaruhi keberhasilan kompetisi pasar sebuah perusahaan (Investopedia, 2022).

Faktor Politik mencakup kebijakan pemerintah dan perubahan legislatif yang mempengaruhi ekonomi seperti pajak dan hukum ketenagakerjaan. Faktor Ekonomi contohnya inflasi, nilai tukar, resesi, penawaran dan permintaan. Faktor sosial dan budaya mencakup demografi konsumen, budaya dan gaya hidup. Teknologi mencakup faktor-faktor seperti perubahan teknologi, bagaimana teknologi digunakan di berbagai sektor dan industri, serta riset. Aspek-aspek tersebut terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Aspek-aspek pada analisis Pastel

Analisis Pastel & Swot Pemanfaatan Teknologi *Pumped Storage Hydropower* untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan di Indonesia

Faktor hukum yang mempengaruhi bisnis seperti hukum konsumen, hukum hak cipta, dan hukum kesehatan dan keselamatan. lingkungan memiliki sangat sedikit ikatan dengan bisnis actual meliputi iklim, polusi, cuaca, dan hukum yang berkaitan dengan lingkungan. Analisis pastel berguna untuk mendapatkan gambaran besar pengaruh faktor eksternal terhadap kinerja suatu organisasi atau perusahaan terhadap suatu masalah tertentu (Newton, 2014). Selain itu, analisis ini juga untuk mengetahui kesempatan dan ancaman dari berbagai faktor yang mempengaruhi kinerja (Abdullah, 2009). Analisis PESTEL juga menyediakan mekanisme untuk mengidentifikasi dan mengeksplorasi peluang baru serta mencari kesulitan dari memasuki pasar baru (Siti Paramadita *et al*, 2020).

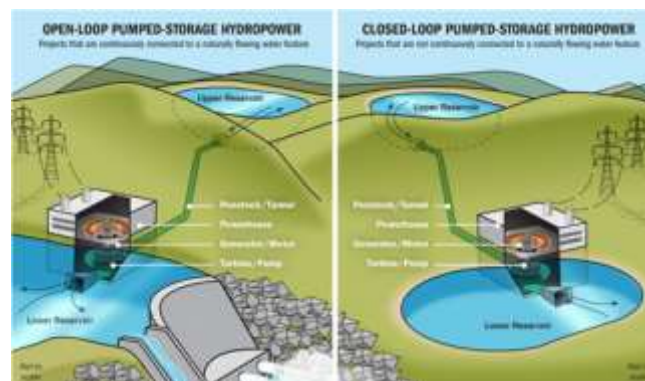
Kajian pemanfaatan PSH di Indonesia dalam rangka meningkatkan penetrasi energi terbarukan menggunakan pendekatan analisis pastel. Berbagai faktor terkait aspek politik,

ekonomi, teknologi, hukum, & lingkungan dianalisis untuk melihat gambaran umum potensi pemanfaatan teknologi PSH.

III. Hasil dan Pembahasan

A. Aspek Teknologi PSH

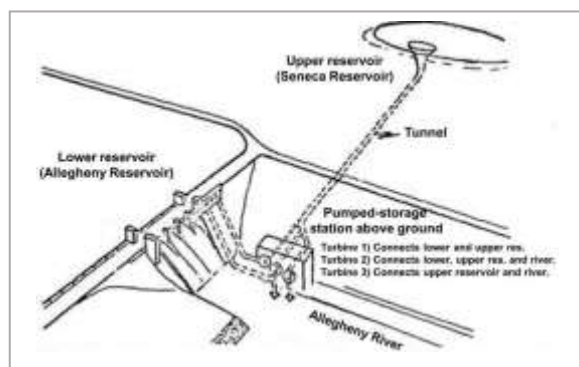
PSH adalah salah satu tipe media penyimpanan energi dengan cara *hydroelectric* dengan konfigurasi 2 *reservoir* air pada elevasi yang berbeda. Karena perbedaan elevasi tersebut, dengan menggunakan *reversible turbine/generator*, aliran air ke bawah dapat digunakan untuk menghasilkan energi dengan menggunakan turbin serta air dapat dipompa kembali ke atas guna menyerap energi. Oleh karena ketergantungannya terhadap air, PSH dapat dikarakteristikan menjadi dua yaitu *open loop* (*reservoir* bawah terkoneksi ke aliran air yang mengalir secara alami) dan *closed loop* (*reservoir* bawah tidak mengalir) seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. PSH tipe open loop dan closed loop (United States Department of Energy, (2017)

Jenis *open loop* dapat diaplikasikan jika terdapat arus sungai yang terletak didekat *reservoir* atas atau reservoir bawah, seperti ditunjukkan Pada Gambar 4. Pengoperasian pompa-turbin pada PSH tipe *open loop* dapat mengganggu laju aliran air dan biota sungai. Efek buruk ini penggunaan PSH tipe *open loop* dapat diminimalkan dengan cara memanfaatkan bendungan sebagai *lower reservoir*, sehingga *powerhouse* dapat dibangun pada

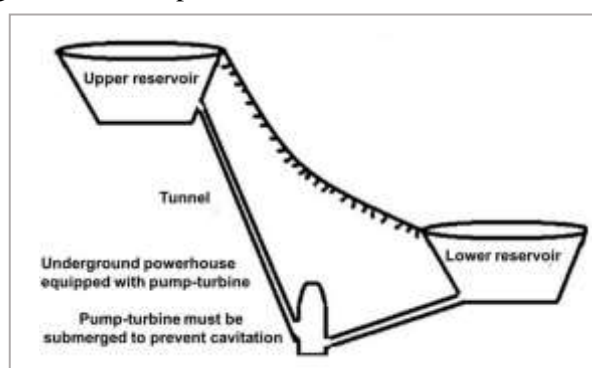
downstream dari bendungan. Penggunaan cara ini meminimalisir kegiatan penggalian yang dapat mengganggu kestabilan lingkungan sekitar sungai, karena *powerhouse* dapat membangkitkan listrik dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian air yang sudah ada. Hal ini sudah diaplikasikan pada PSH Seneca, USA yang sudah beroperasi dari tahun 1970 (Fitzgerald *et al*, 1973).



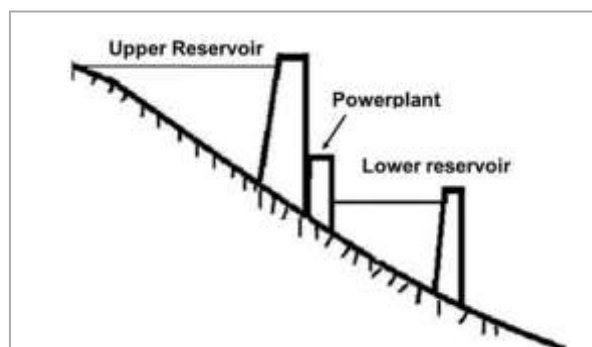
Gambar 4. PSH Jenis Open-loop, Senca USA
(Fitzgerald *et al*, 1973)

Sementara itu, PSH tipe *closed loop* terdiri dari *upper* dan *lower* reservoir yang terletak jauh dari sumber air melimpah, sehingga input air kedalam sistem PSH adalah terbatas. Gambar skematis PSH tipe *closed loop* dapat ditunjukkan pada Gambar 5. Tipe PSH *closed loop* dapat diimplementasikan pada danau buatan berukuran kecil yang berisi air tanah atau sumber air lain yang ditambahkan. Efek lingkungan dari PSH tipe *closed*

loop umumnya lebih kecil jika dibandingkan PSH tipe *open loop*. Namun, penggunaan PSH tipe *closed loop* memiliki siklus operasi yang terbatas karena penyimpanan air hanya terbatas dalam jangka beberapa hari hingga satu bulan, bergantung ketersediaan air. Contoh PSH tipe ini ada pada Marmora PSH yang terletak di Kanada (Northland Power, 2013).



Gambar 5. PSH Jenis Closed-loop, Senca USA
(Deane *et al*, 2010)



Gambar 6. PSH Jenis pump-back
(Deane *et al*, 2010)

Teradapat inovasi lain dari PSH, yaitu tipe *pump-back storage* yang dapat diaplikasikan pada bendungan *hydropower* yang memiliki *reservoir* langsung tambahan dibawahnya, seperti ditunjuk-

kan pada Gambar 6. Penggunaan PSH jenis ini memungkinkan air dapat mengalir secara 2 arah diantara dua *reservoir*. PSH jenis *pump back storage* meningkatkan fleksibilitas dan jenis

Analisis Pastel & Swot Pemanfaatan Teknologi *Pumped Storage Hydropower* untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan di Indonesia

operasional, karena penggunaan konfigurasi *pump-turbines* dapat digunakan untuk pembangkitan listrik tenaga air secara konvensional atau penyimpanan energi. Sebagai contoh, pada saat musim kering pembangkitan listrik tenaga air secara konvensional akan berkurang, namun masih dapat digunakan sebagai *pumped storage*. Jenis PSH *pump back storage* dapat banyak dijumpai di Jepang, dimana banyak bendungan yang memiliki reversible turbines (Deane et al, 2010). Hal ini disebabkan Jepang memiliki banyak surplus energi listrik dari penggunaan pembangkit listrik tenaga nuklir, sehingga membutuhkan penyimpanan energi listrik setiap harinya.

Pada awal dibuat, PSH merupakan salah satu alternatif media penyimpanan energi pada saat periode permintaan energi rendah dan dipakai ketika permintaan energi tinggi. Namun, seiring berkembangnya teknologi serta permintaan terhadap sumber energi terbarukan pada masa kini, kehadiran PSH dapat menjadi jembatan penghubung antara sumber energi alami yang *intermittent* seperti PLTB atau PLTS dengan jaringan listrik. Hal ini disebabkan karena PSH dapat menyerap energi yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan yang bersifat *intermittent* dan menjadi sumber energi ketika dibutuhkan agar operasi jaringan listrik lebih handal. Sehingga,

aplikasi PSH akan mendukung penurunan emisi gas rumah kaca karena dapat menjadi media penyimpanan energi yang ramah lingkungan serta dapat mendukung produksi sumber energi terbarukan lainnya. Hingga saat ini, PSH terbukti telah menjadi alternatif penyimpanan energi masal dan digunakan secara luas. Keuntungan menggunakan PSH sebagai berikut:

- Memungkinkan transfer energi dari beban minimum ke beban puncak pada jaringan listrik
- Meningkatkan fleksibilitas dan kehandalan dari penyalur energi listrik akibat dari kemampuannya dalam memberikan respon yang cepat terhadap permintaan beban puncak pada jaringan listrik.
- Meningkatkan efisiensi dari pembangkit listrik dan fasilitas transmisi jaringan yang sudah ada.
- Sebagai pemasok energi tambahan yang membuat jaringan listrik lebih stabil.
- Mengintegrasikan sumber energi terbarukan yang *intermittent* ke sistem jaringan listrik.
- Dianggap sebagai media penyimpanan energi yang ramah lingkungan.



Gambar 7. Perbandingan Power Rating dan Discharge Duration antar teknologi yang umum digunakan (San Martin et al, 2011)

Dalam kaitannya PSH sebagai penyimpan energi yang dibandingkan dengan baterai, PSH memiliki manajemen energi yang lebih baik karena *power rating* dan *discharge duration* yang lebih tinggi seperti pada Gambar 7. Aplikasi teknologi PSH telah dipraktekkan diberbagai negara, akan tetapi kebanyakan teknologi tersebut tidak memiliki keekonomian yang baik atau cukup berkembang untuk diterapkan dalam skala besar.

PT PLN (Persero) menargetkan pembangkit listrik tenaga air *pump storage* Cisokan dengan total kapasitas 1.000 Megawatt mulai beroperasi pada 2025. Adapun Pusat listrik tenaga air (PLTA) *pump storage* yang berada di Jawa Barat tersebut nantinya akan menjadi yang pertama dan satu-satunya di Indonesia. Proyek PLTA Didalam RUPTL 2019-2028, terdapat 2 lokasi yang menjadi usulan untuk pengembangan teknologi *Pumped Storage* di

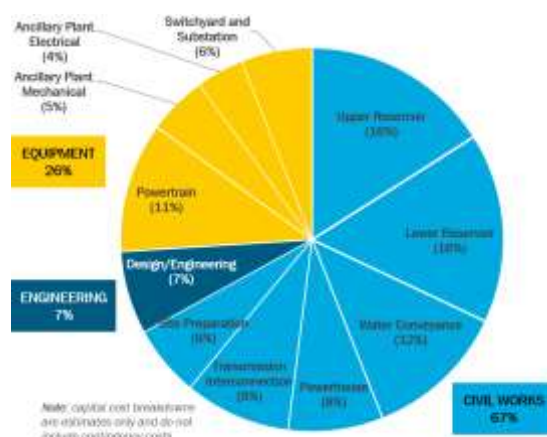
Indonesia yaitu PLTA *Pumped Storage* Matenggeng (943 MW) dan PLTA *Pumped Storage* Grindulu (1000 MW). *Pumped storage* tersebut sangat penting untuk dapat menurunkan Biaya pokok penyediaan (BPP) terutama pada saat beban puncak, memperbaiki *load factor* dan meningkatkan *capacity factor* PLTU batubara, serta dapat berperan sebagai *flexible generation* guna mengantisipasi masuknya pembangkit ET yang bersifat *intermittent*.

B. Aspek Ekonomi

Biaya pengembangan proyek PSH modern dapat bervariasi berdasarkan kondisi spesifik lokasi seperti ketersediaan infrastruktur sipil dan pembangkit/transmisi yang ada, tanah, dan air, serta ukuran proyek, peraturan lingkungan, geologi lokasi, ketersediaan air, akses ke jaringan transmisi, dan biaya konstruksi keseluruhan. Lokasi proyek yang layak akan mencakup perkiraan perkiraan biaya mulai dari \$1.700/kW hingga \$2.500/kW, berdasarkan perkiraan proyek berukuran 1.000 MW. Proyek yang lebih kecil biasanya tidak memiliki skala ekonomi yang sama dan dapat menghasilkan biaya per unit yang lebih tinggi (dalam \$/kW) daripada proyek besar, tetapi biaya

proyek secara keseluruhan akan jauh lebih sedikit. Biaya ini mewakili semua aspek proyek PSH kecuali pembebasan lahan, biaya interkoneksi transmisi, dan beberapa biaya pemilik, yang dapat berkisar dari biaya yang sangat kecil hingga yang signifikan, berdasarkan kondisi spesifik lokasi. Biaya PSH yang diratakan merupakan salah satu bentuk penyimpanan energi dengan biaya terendah (United States Department of Energy, 2019).

Dari semua komponen pengembangan proyek, pembangunan reservoir atas dan bawah (pekerjaan sipil), bersama dengan komponen powertrain (peralatan) dan pengangkutan air (pekerjaan sipil), membentuk proporsi terbesar dari keseluruhan biaya modal proyek dengan total mencapai 55% dari keseluruhan biaya proyek PSH. Demikian pula, komponen *reservoir* atas dan bawah, alat angkut air, dan interkoneksi transmisi (pekerjaan sipil) memerlukan durasi waktu yang paling lama, dan komponen *reservoir* atas dan bawah serta alat angkut air memiliki potensi risiko terbesar untuk mempengaruhi penyelesaian proyek secara negatif melalui kenaikan biaya yang tidak terduga atau penundaan jadwal.

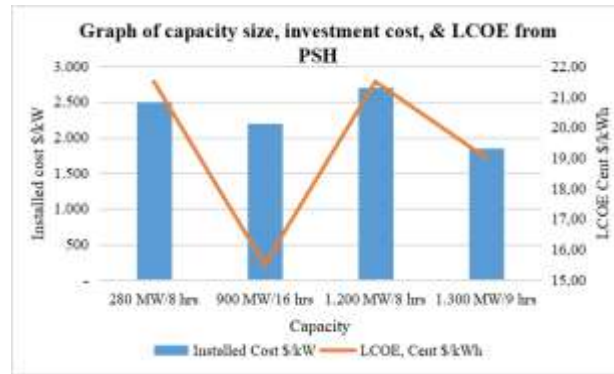


Gambar 8. Komponen Biaya Pengembangan PSH
 (United States Department of Energy, 2020)

Biaya investasi PSH berkisar antara 1.850 USD hingga 2.700 USD per kW untuk PSH dengan kapasitas 280-1.300MW. Investasi PSH tersebut dapat menghasilkan energi listrik dengan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) berkisar antara 15,50 Cent USD hingga 220 Cent USD per kWh. Harga

tersebut merupakan harga present value dalam US Dollar pada tahun 2012. Total plant cost dalam \$/kW dan LCOE dalam \$/kWh untuk PSH dengan kapasitas 280MW/8 hours, 900 MW/16 hours, 1200ME/8 hours, dan 1300MW/9 hours pada Gambar 9.

Analisis Pastel & Swot Pemanfaatan Teknologi *Pumped Storage Hydropower* untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan di Indonesia



Gambar 9. Biaya Total dan LCOE PSH
(Sandia National Laboratories, 2015)

Tabel 2. Perbandingan harga teknologi penyimpanan energi skala utilitas

No.	Jenis Teknologi	Maturity	Kapasitas Terpasang (MW)	Durasi Discharge (jam)	Total Siklus	Total Biaya (\$/kW)	LCOE (Cent \$/kWh)
1	Pumped storage hydropower	Mature	280-530	6-10	>13.000	2.500-4.300	21,5
			900-1.400	6-10	>13.000	1.500-2.700	15,5-21,5
2	Compressed Air Energy Storage	Komersial	135	8	>13.000	1.000	13,5-21
			135	20	>13.000	1.250	
3	Sodium-Sulfur	Komersial	50	6	4.500	3.100-3.300	29,4
4	Advanced Lead Acid	Komersial	50	4	2.200	1.700-1.900	22,5-29,5
			20-50	5	4.500	4.600-4.900	54-55
		Demo	100	4	4.500	2.700	60
5	Vanadium Redox	Demo	50	5	>10.000	3.100-3.700	43-57
6	Zn/Br Redox	Demo	50	5	>10.000	1.450-1.750	22
7	Fe/Cr Redox	R&D	50	5	>10.000	1.800-1.900	19,5
8	Zn/air Redox	R&D	50	5	>10.000	1.440-1.700	16

(Sumber: Data Sekunder, Sandia National Laboratories, 2015)

Tabel 2 menyajikan perbandingan biaya pengembangan total dalam USD per kW dan LCOE dalam USD per MWh bagi berbagai jenis teknologi penyimpanan energi berdasarkan data pada tahun 2012. Perbandingan ini dilakukan pada penggunaan teknologi penyimpanan energi sebagai penyimpanan energi massal untuk mendukung sistem dan integrasi energi baru terbarukan. Berdasarkan perbandingan pada tabel 6 tersebut, PSH merupakan satu-satunya teknologi yang telah mature untuk aplikasi penyimpanan energi pada skala penyimpanan energi massal (*bulk*). Dibandingkan dengan opsi teknologi lain yang telah komersial, dari sisi biaya investasi dan LCOE, PSH tidak lebih ekonomis dibandingkan dengan

compressed air energy storage (CAES) tetapi lebih ekonomis dibandingkan opsi lain seperti sodium-sulfur dan lead acid. Perlu dicatat juga terdapat beberapa opsi teknologi penyimpanan energi yang masih dalam tahap demo maupun pengembangan yang berpotensi memiliki tingkat keekonomian lebih baik seperti Zn/Br, Fe/Cr dan Zinc air meskipun memiliki skala kapasitas yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan PSH.

C. Aspek Politik & Sosial

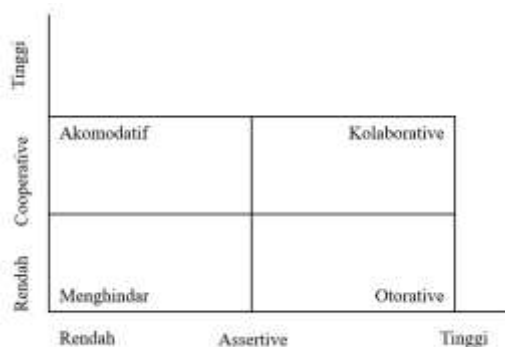
Dimensi sosial perencanaan dan pelaksanaan PSH adalah segala hal yang berhubungan dengan kegiatan masyarakat yang secara langsung maupun tidak langsung mempengaruhi kehidupan

masyarakat yang telah, sedang dan akan terjadi di lokasi pembangunan PSH. Kata kunci penilaian aspek sosial berkorelasi dengan perubahan kondisi sosial masyarakat di lokasi PSH saat perencanaan pembangunan dan implementasi operasional PSH. Adapun sisi perencanaan yang dimaksud berhubungan dengan berbagai hal pada masa perencanaan pembangunan PSH di lokasi yang telah ditentukan. Misalnya, seperti ketersediaan lahan, rekrutmen tenaga kerja, eksisting konflik masyarakat, dampak konstruksi atas polusi, dan kerusakan lingkungan. Sedangkan sisi implementasi berhubungan dengan sisi sosial yang mempengaruhi operasional PSH ketika dijalankan. Misalnya: hubungan dengan masyarakat lokal, janji-janji yang belum terpenuhi saat perencanaan pembangunan, konflik yang belum terselesaikan, dampak operasional termasuk perubahan kondisi lingkungan, perubahan mata pencaharian dan sebagainya.

Prinsip analisis sosial merujuk pada suatu proses dari usaha untuk mendapatkan gambaran yang lengkap tentang situasi, keadaan dan kenyataan sosial di lokasi yang menjadi tujuan kajian sosial (Etzioni, 1968). Kemudian yang dimaksudkan dengan gambaran lengkap adalah gambaran mengenai hubungan-hubungan struktural, kultural dan historis, dari situasi sosial yang diamati dan di alami tersebut. Ternyata muncul masalah, misalnya: masyarakat yang tinggal di sekitar PSH telah mendapati kenyataan kualitas panen yang menurun, sebagai akibat dari perubahan kelembaban tanah akibat sedimentasi dan menurunnya kualitas air. Kondisi tersebut membuat terjadinya kerusakan lingkungan serta pendapatan masyarakat menurun. Mengapa masalah tersebut

terjadi? Apakah ini adalah hasil dari kesalahan petani? Apakah kasus ini hanya dialami oleh satu atau dua orang petani, ataukah pada kebanyakan petani. Analisis sosial yang baik akan berusaha membongkar masalah yang dirumuskan dalam pertanyaan kajian di atas, sehingga diperoleh suatu kejelasan, mengapa masalah tersebut terjadi, apa penyebabnya, siapa saja yang terlibat, prosesnya dan siapa yang paling dirugikan dari situasi tersebut.

Pertama, berguna untuk mengidentifikasi dan memahami persoalan-persoalan yang berkembang secara lebih mendalam dan seksama; berguna untuk membedakan mana akar masalah dan mana yang bukan, atau mana yang merupakan masalah turunan atau masalah ikutan. Kedua, dipakai untuk mengetahui potensi yang ada (kekuatan dan kelemahan) yang dihidup di masyarakat jadi dalam proses analisis kita tidak melulu berkuat dalam masalah, melainkan diarahkan untuk bisa memecahkan masalah. Ketiga dapat mengetahui lebih akurat kelompok masyarakat yang paling dirugikan. Keempat meramalkan apa yang akan terjadi sehingga bisa memperkirakan resiko dan mempersiapkan apa yang akan dilakukan. Oleh sebab itu, kata kunci analisis sosial adalah memperhatikan berbagai perubahan sosial yang muncul di sekitar lokasi pembangunan PSH. Adapun perubahan sosial yang dimaksud adalah perubahan yang bersifat lambat dan cepat, serta langsung dan tidak langsung. Termasuk bagaimana mengidentifikasi keterlibatan aktor yang bersinggungan dengan perencanaan dan implementasi PSH. Selanjutnya terlihat dalam gambar berikut ini.



Gambar 8. Keterlibatan aktor dan Respon Pembangunan PSH
 (Miller *et al*, 2003)

Gambar 8 menunjukkan perbedaan keterlibatan dan respon atas pembangunan PSH. Kwadran ideal terlihat pada kwadran kolaboratif yakni ketika

terjadi pertemuan antara sumbu *cooperative*/kerjasama dan *assertive*/bersikap secara terbuka terhadap perubahan dan kepentingan antar aktornya

Analisis Pastel & Swot Pemanfaatan Teknologi *Pumped Storage Hydropower* untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan di Indonesia

sama-sama tinggi. Sebaliknya kwadran eksisting seringkali terjadi ketika terjadi pertemuan sumbu kooperatif dengan asertif sama-sama rendah yang memunculkan tindakan menghindar. Kedua kwadran di atas antara kolaboratif dan tindakan menghindar justru mengilustrasikan kejelasan keberpihakan. Selanjutnya, kwadran akomodatif dan otoritatif menunjukkan dimensi pertemuan kooperatif dan asertif yang mempertemukan kedua sumbu dalam posisi tinggi dan rendah. Pada kwadran ini pula elemen-elemen problematik muncul mengikutinya. Misalnya tindakan akomodatif dan otoritatif yang memuat kepentingan tertentu, ketika kepentingan gagal tercapai atau mendapat respon penolakan maka terjadi konflik.

Secara metodologis analisis kwadran di atas penting dilakukan sebagai upaya sistematis dengan pendekatan yang berproses dari bawah ke atas atau *bottom-up*, hal ini bermanfaat untuk meminimalisasi resiko sosial saat perencanaan maupun operasional PSH. Upaya sistematisasi minimalisasi resiko sosial dalam perencanaan dan operasional PSH tersebut dilakukan untuk mengetahui langsung kondisi sosial dalam bentuk fakta dan kejadian yang telah, sedang dan diperkirakan akan berlangsung dilokasi pembangunan PSH. Sedangkan pendekatan *bottom-up* dilakukan dengan beberapa langkah sebagai berikut: pertama, identifikasi masalah, proses awal ini penting untuk mengetahui isu-isu masalah sosial yang telah dan sedang terjadi. Kedua, identifikasi kronologi masalah, proses ini menjadi penting untuk dilakukan karena untuk melihat pemicu dan perkembangan masalah atau *magnitude of the problem*. Ketiga, siapa yang terlibat dalam masalah, identifikasi aktor sangat relevan dilakukan untuk mengetahui sejauh mana hubungan antar aktor utama, pendukung maupun penghambat baik antar masyarakat, antar lembaga sosial, dan antara masyarakat dengan pengelola PSH. Empat, analisis masalah, proses ini dilakukan secara kualitatif dengan menjelaskan persamaan dan perbedaan masalah, menjelaskan tendensi atau kecenderungan masalah, dan intepretasi atas masalah. Selanjutnya, digunakan untuk merumuskan hasil identifikasi dan sekaligus memberikan ilustrasi temuan masalah sementara yang akan menjadi prioritas untuk diselesaikan. Selanjutnya, metode kajian sosial yang diprioritas pada analisis sosial dengan pendekatan *bottom up* di atas terbagi menjadi tiga tahap. Pertama, tahap persiapan meliputi *desk study* data sekunder tentang eksisting lokasi, *on the spot interview* dan pengamatan di lokasi, Kedua tahap perencanaan meliputi matrik (rangking masalah,

kebutuhan, SWOT), visual (analisis pohon masalah), informasi waktu (kalender kerja dan aktivitas) dan Informasi spasial (Transek Sosial, Ekonomi dan Wilayah). Ketiga, tahap pelaksanaan, melakukan *logical framework analysis* (LFA) dengan analisis Resiko. Ketiga, tahap di atas menunjukkan proses kajian yang dilakukan secara sistematis dan berbasis data yang jelas (Lahmami, 2020).

D. Aspek Legal

Pada saat ini masih belum ada, regulasi yang mengatur secara langsung di Indonesia. Secara umum aturan terkait PSH masih mengacu pada aturan energi baru terbarukan (EBT). Adapun regulasi yang mengatur mengenai EBT tercantum pada:

1. Perpres 22 tahun 2017 terkait Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)
2. Perpres No. 61 tahun 2011 terkait penurunan emisi
3. Permen ESDM No. 16 tahun 2020 terkait arah kebijakan energi

Adapun rekomendasi dari *National Hydropower Association* (NHA) terkait teknologi PSH adalah:

1. Menetapkan proses perizinan alternatif yang sederhana untuk pembangkit listrik tenaga air penyimpanan yang dipompa, seperti proyek off-channel, modular, atau loop tertutup.
2. Di negara bagian yang mengandalkan perencanaan sumber daya terintegrasi versus pasar bebas, diperlukan penyimpanan energi dalam proses perencanaan energi jangka panjang yang terintegrasi; termasuk membutuhkan pertimbangan yang sama dengan sumber daya tradisional.
4. Menciptakan produk pasar yang fleksibel berdasarkan sumberdaya serta mampu memenuhi batasan dari grid, salah satunya respon yang cepat ketika dibutuhkan kapasitas maksimal. Sehingga dibutuhkan regulasi yang jelas terkait kecepatan ramping agar kehandalan energi dapat dijaga.
5. Perlu adanya regulasi dan mekanisme market yang mengatur mengenai keseluruhan sistem transmisi, serta mempertimbangkan biaya siklus pembangkit, performa, dan degradasi energi penyimpanan.
6. Menciptakan mekanisme pasar dan produk level regional.

7. Menciptakan mekanisme pasar dan produk yang dapat diintegrasikan dengan energi saat ini, dengan adanya penambahan teknologi PSH.

E. Aspek Lingkungan

Secara geografis pembangunan PSH ini memerlukan tempat di elevasi yang tinggi dan juga tersedia air yang memadai. Lokasi yang cocok untuk pembangunan PSH ini di area berbukit atau area pegunungan. Karena *off-river* PSH memerlukan sepasang *reservoir*, area yang dibutuhkan bervariasi dari 10 hingga 100 hektar di area berbukit. Umumnya PSH ini memiliki umur konstruksi sekitar 50 tahun (Arena, 2017). Secara umum perubahan tata guna lahan mengakibatkan perubahan kualitas air dan udara, mengubah fungsi Daerah Tangkapan Air, menghasilkan sampah, dan

mempengaruhi iklim serta kesehatan masyarakat. Dengan demikian, perubahan tata guna lahan berdampak terhadap kesehatan.

Selain itu dapat ditinjau juga dampak lingkungan akibat fluktuasi muka air *reservoir*. Diperlukan informasi mengenai peruntukan *reservoir* selain untuk menghasilkan energi, apakah *reservoir* juga digunakan untuk *clean water supply*, pengendali banjir, keperluan rekreasi, & perikanan.

Peta tata guna lahan juga digunakan untuk menganalisis aktivitas di sekitar *reservoir* yang dapat berpengaruh pada kualitas air *reservoir* termasuk mengakibatkan terjadinya *eutrophication* dan pencemaran air akibat limbah domestik yang tidak diolah dan *runoff* dari lahan pertanian.



Gambar 9. Fish Ladder (US Army, 2021)

Jika *reservoir* dibangun di suatu sungai dengan membangun dam, maka perlu dipertimbangkan juga dampaknya terhadap keanekaragaman biota air yang ada di sungai tersebut. Seperti dengan adanya dam, maka ikan tidak dapat bergerak ke hulu. Sebagai solusinya dapat dibangun *fishway*/ tangga ikan supaya ikan dapat bergerak hilir mudik dari hilir ke hulu seperti contoh pada gambar 9.

F. Analisis SWOT

Strength dari teknologi PSH:

- a. Merupakan teknologi energi terbarukan yang dapat menghilangkan karakteristik intermitent pembangkit ET dalam sistem ketenagalistrikan.
- b. Dapat digunakan sebagai salah satu energi cadangan maupun tambahan yang dapat mendukung jaringan listrik agar lebih stabil dan handal.

- c. Biaya PSH yang diratakan merupakan salah satu bentuk penyimpanan energi dengan biaya terendah
- d. Merupakan salah satu teknologi penyimpanan energi skala besar yang telah *mature* secara teknologi

Weakness dari teknologi PSH:

- a. Tempat untuk teknologi PSH terbatas dari potensi air, serta elevasi daratan.
- b. Dibutuhkan luasan yang cukup besar untuk teknologi PSH, sehingga memerlukan biaya yang cukup banyak pada pembebasan lahan
- c. Teknologi PSH dapat merusak ekosistem biota air, sehingga diperlukan solusi, salah satunya adalah dibangunnya *fish way*.

Analisis Pastel & Swot Pemanfaatan Teknologi *Pumped Storage Hydropower* untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan di Indonesia

Opportunity dari teknologi PSH:

- a. Dapat sebagai salah satu cara peningkatan ET dengan *power rating* dan *discharge duration* yang lebih tinggi daripada baterai.
- b. Saat ini teknologi PSH merupakan satu-satunya teknologi yang telah *mature* untuk aplikasi penyimpanan energi pada skala penyimpanan energi massal.
- c. Komponen biaya terbesar dari teknologi PSH adalah komponen biaya pekerjaan sipil sehingga dapat meningkatkan TKDN pembangkit EBT di Indonesia.

Threat dari teknologi PSH:

- a. Meningkatnya efektifitas & penurunan biaya teknologi baterai.
- b. Perubahan regulasi sehingga mempengaruhi seluruh sistem dan mekanisme pasar.

IV. Kesimpulan

Dari diskusi & pembahasan dapat disimpulkan bahwa teknologi PSH dapat mendukung penetrasi pembangkit ET di Indonesia khususnya PLTB & PLTS karena mampu menghilangkan sifat *intermittency* pembangkit tersebut dalam sistem ketenagalistrikan. Selain itu, PSH juga merupakan media penyimpan energi yang sudah *mature* dalam skala besar & ekonomis, sehingga cocok diaplikasikan dalam sistem ketenagalistrikan yang besar & rumit.

V. Daftar Pustaka

Abdullah, Fathi S.M. (2009). *PESTEL Framework and Porter's Five Forces Model*.

Arena. (2017). *What is pumped hydro and how does it work?*.

Bin Lu. (2021) *Low-cost, low-emission 100% renewable electricity in Southeast Asia supported by pumped hydro storage*. Energy 236.

Bozalakov D., Mnati M.J., Laveyne J., Desmet J., Vandeveld L. (2019) *Battery storage integration in voltage unbalance and overvoltage mitigation control strategies and its impact on the power quality*. Energies 12 1501.

Bozalakov D.V., Laveyne J., Mnati MJ, Van de Vyver J, Vandeveld L. (2020). *Possible Power Quality Ancillary Services in Low-Voltage Grids Provided by the Three-Phase*

Damping Control Strategy. Appl. Sci. 10 7876.

Deane, J. Paul, BP Ó. Gallachóir, and E. J. McKeogh. (2010). *Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, no. 4, pp 1293-1302.

Etzioni A. (1968). *Social Analysis and Social Action*. *American Behavioral Scientist*. 12(1):31-33.
doi:10.1177/000276426801200107.

Fitzgerald, J. P., E. A. Cooper, and F. P. Solomon. (1973). *Operation of seneca pumped storage plant*. " IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 5 (1973): 1510-1516.

Florian Ion Tiberiu Petrescu. (2015). *Hydropower and Pumped-Storage*.

Heptonstall P., Gross R, Steiner F,. (2016). *The Costs and Impacts of Intermittency Update: A Systematic Review of the Evidence on the Costs and Impacts of Intermittent Electricity Generation Technologies Technical Report*. UK Energy Research Centre: London, UK.

Hunt, Julian David, Behnam Zakeri, Rafael Lopes, Paulo Sérgio Franco Barbosa, Andreas Nascimento, Nivalde José de Castro, Roberto Brandão, Paulo Smith Schneider, and Yoshihide Wada. (2020). *Existing and new arrangements of pumped-storage hydropower plants*. Renewable and Sustainable Energy 129 109914.

https://www.army.mil/article/248558/that_sounds_fishy_fish_ladders_at_high_head_dams_impact_largely_unneeded

<https://www.investopedia.com/terms/p/pest-analysis.asp>

IEA. (2020). *World Energy Outlook*.

Lahmami, H. (2020). *Methodology of Social Science Research: The Case of the Sociology of Action in Relation to Values*. *Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 23(1), 59-73. DOI: <https://doi.org/10.6018/reifop.404931>.

Louis F. (2015). *Pumped Storage and Variable Renewables Integration: Main Technologies and Applications of Pumped Storage*. World Bank Group.

- Miller, Gale & Bartos, Otomar & Wehr, Paul. (2003). *Using Conflict Theory. Contemporary Sociology*. 32. 524. 10.2307/1556608.
- Newton, Paul. (2014). *What is the PESTLE Analysis?*. ISBN 139788740308341.
- Northland Power. (2013). *Marmora pumped storage.*" Retrieved from Northland Power.
- Notton G, Nivet M.L., Voyant C., Paoli C., Darras C., Motte F., Fouilloy A. (2018) *Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences, cost of intermittence and benefit of forecasting*. *Renew Sustain Energy Rev* 87, pp 96–105.
- PT. PLN (Persero). (2022). *Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030*.
- Rahimi E., Rabiee A., Aghaei J., Muttaqi K.M., Nezhad A.E. (2013). *On the management of wind power intermittency*. *Renew Sustain Energy* 28 pp 643–653.
- Rehman S., Al-Hadhrami L. M., Alam M. M. (2015). *Pumped hydro energy storage system: A technological review*. *Renewable and Sustainable Energy* 44, pp 586-598.
- San Martín J. I., I. Zamora, J.J. San Martín, V. Aperribay, P. Eguí. (2011). *Energy Storage Technologies for Electric Applications*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11) Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
- Sandia National Laboratories. (2015). *DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*.
- Sekoai, P.T. dan K.O. Yoro. (2016). *Biofuel development initiatives in sub-Saharan Africa: opportunities and challenges*. *Climate* 4 (2).
- Siti Paramadita, Abdullah Umar, Y. Jhony Kurniawan. (2020). *Analisis Pestel Terhadap Penetrasi Gojek Di Indonesia Pestel Analysis Towards Gojek's Penetration In Indonesia*. *Jurnal Pengabdian dan Kewirausahaan* Vol. 4 (No. 1), pp 37-49.
- Suchet D., Jeantet A., Elghozi T., Jehl Z. (2020). *Defining and Quantifying Intermittency in the Power Sector*. *Energies* 13 3366.
- Tian, Z.H. dan Z.L. Yang. (2016). *Scenarios of carbon emissions from the power sector in Guangdong province*. *Sustainability* 8 (9) pp 863.
- United Nations. (2015). *Paris Agreement*.
- United States Department of Energy. (2017). *Pumped storage hydropower*.
- United States Department of Energy. (2019). *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report*.
- United States Department of Energy. (2020). *Pumped Storage Hydropower FAST Commissioning Technical Analysis*.
- Zhang, Z.(2016). *Making the transition to a low-carbon economy: the key challenges for China*. *Asia Pac. Policy Stud.* 3 (2), pp187–202.