

PLTS Terapung: Review Pembangunan dan Simulasi Numerik untuk Rekomendasi Penempatan Panel Surya di Waduk Cirata

Floating Solar Power Plant: Construction Review and Numerical Simulation for Solar Panel Placement Recommendation on Cirata Reservoir

Ivan Marupa^{1*)}, Idham Riyando Moe¹, Airlangga Mardjono¹, Duki Malindo¹

¹Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 12110, Indonesia

Article info:

Kata kunci:

cirata; penempatan; PLTS terapung; simulasi

Keywords:

cirata; placement; floating SPP; simulation

Article history:

Received: 27-09-2021

Accepted: 15-04-2022

*)Koresponden email:
manik.ivan@gmail.com

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung adalah salah satu proyek strategis nasional dari pemerintah Indonesia. *Review* teknis dan sosial adalah hal yang perlu dipertimbangkan. Dalam hal teknis, beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam penempatan panel PLTS terapung adalah *inflow*, *velocity*, tinggi gelombang, distribusi sedimen melayang dan angin kencang. Selain itu, lokasi penempatan PLTS terapung tidak dekat dengan lokasi *spillway* Bendungan. Pada penelitian ini dilakukan simulasi numeris dengan tujuan untuk memberikan rekomendasi area panel PLTS terapung di area Waduk Cirata. Simulasi numerik dilakukan untuk memahami kondisi terberat yang akan dialami oleh PLTS terapung khususnya pada kondisi ekstrem dan angin kencang. Hasil simulasi menunjukkan area genangan dengan kecepatan aliran dan konsentrasi sedimen paling kecil untuk penempatan PLTS terapung. Sebagai hasil analisa didapatkan area seluas 242,93 Ha atau $\pm 4,1\%$ dari total luas genangan Waduk Cirata. Area ini adalah area genangan dengan kecepatan aliran air minimal, yakni < 5 cm/s, dan konsentrasi sedimen layang < 10 gr/m³. Nilai tersebut dapat dijadikan penilaian awal dalam melakukan rekomendasi penempatan panel PLTS terapung di area Waduk Cirata.

Abstract

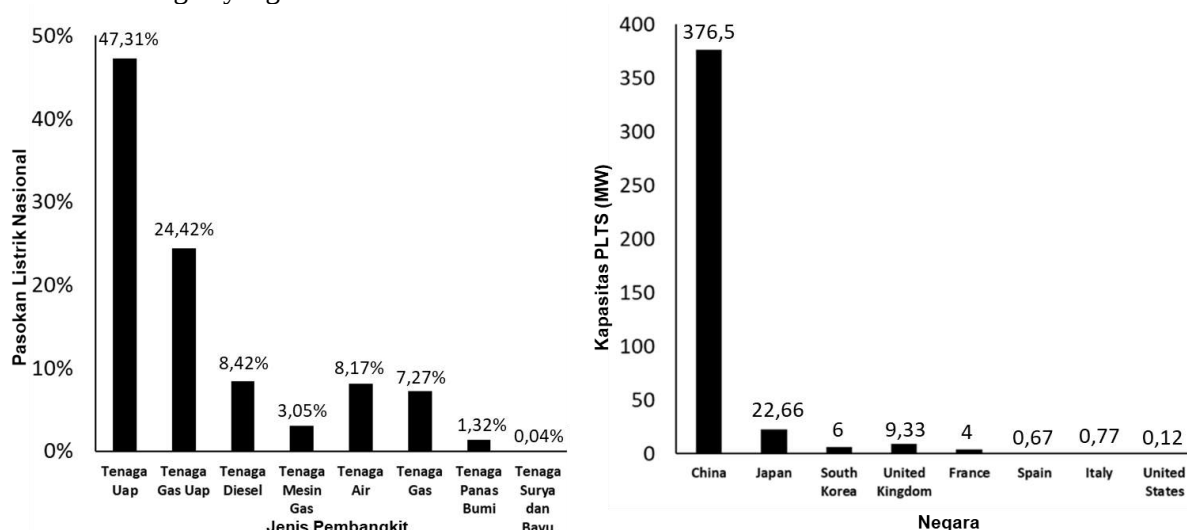
The floating Solar Power Plant (SPP) is a national strategic project of Indonesia. Technical and social reviews are things to be considered. From technical pov, several things that need to be evaluated for panel placements are *inflow*, *velocity*, wave height, floating sediment distribution, and wind. The location of the floating solar power plant shouldn't be close to the dam's *spillway*. In this review, numerical simulations were carried out to provide floating SPP panel placement recommendations for Cirata Reservoir. Simulations were performed to simulate the most challenging conditions that will be experienced. The simulation results showed the inundated area with the lowest flow velocity and sediment concentration for the best placement of floating SPP. As a result, an area of 242.93 Ha or $\pm 4.1\%$ of the total inundation area of the Cirata Reservoir was obtained. This area is inundation with minimum water velocity, < 5 cm/s, and minimum floating sediment concentration, < 10 gr/m³. This value can be used as an initial assessment in making recommendations for floating SPP panel placement in the Cirata Reservoir.

Kutipan: Marupa, I., Moe, I. R., Mardjono, A., Malindo, D. (2022). PLTS Terapung: Review Pembangunan dan Simulasi Numerik untuk Rekomendasi Penempatan Panel Surya di Waduk Cirata. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 13(1), 48-62. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2022.013.01.05>

1. Latar Belakang

Indonesia adalah negara dengan kemajuan ekonomi yang sangat pesat. Qomara (2015) menyebutkan bahwa Indonesia berada dalam kebangkitan ekonomi yang sangat baik. Namun, hal ini tidak diiringi dengan meningkatkan produksi listrik nasional. Upaya Pemerintah Indonesia memperbaiki kinerja kurangnya pasokan listrik nasional, misalnya melalui Program Percepatan Pembangkit 10 GW dan Program 35.000 MW belum menunjukkan hasil yang signifikan. Menurut (Schwab. 2017) dalam *Global Competitiveness Report*, layanan suplai tenaga listrik Indonesia masih jauh di bawah Thailand, dan hanya satu tingkat di atas Vietnam. Sebagai informasi lain, (Sulaeman et al. 2021) menyampaikan pada Gambar 1 bahwa China memiliki PLTS terpasang adalah 376 MW dan Jepang memiliki PLTS terpasang adalah 23 MW.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih mendominasi pada pasokan listrik nasional hingga mencapai 47,31% dari kapasitas listrik terpasang sedangkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) baru hanya dimanfaatkan sebesar 0,04% (Gambar 1). Kementerian ESDM melalui Peraturan Presiden Nomor 18 Tahun 2020 memiliki target strategis nasional yakni Pembangkit Listrik 27.000 MW, Transmisi 19.000 KMS dan Gardu Induk 38.000 MVA. Untuk meningkatkan jumlah pasokan listrik yang signifikan sesuai target Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) berencana untuk memanfaatkan area genangan bendungan yang cukup luas untuk dimanfaatkan sebagai PLTS terapung, di antaranya adalah bendungan yang dimiliki oleh Kementerian PUPR.

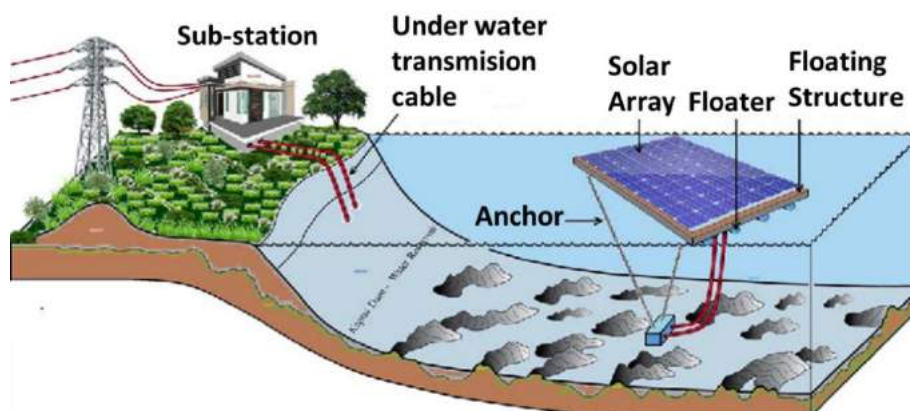


Gambar 1. Kapasitas Listrik Terpasang Menurut Jenis Pembangkit di Indonesia dalam prosentase (kiri) dan PLTS terpasang di beberapa negara maju (kanan)

Sumber: Sulaeman et al. 2021

Pembebasan lahan adalah salah satu tantangan yang dihadapi dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia. Indonesia sampai saat ini sudah memiliki banyak bendungan terbangun dengan area genangan waduk yang sangat luas. Area genangan waduk yang luas ini merupakan area yang sangat strategis dan potensial untuk penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung di Indonesia. Pemanfaatan genangan waduk ini akan menghilangkan kebutuhan lahan yang luas pada pengaplikasian PLTS konvensional, sehingga dapat secara signifikan mengurangi biaya yang dibutuhkan.

Sampai saat ini, Indonesia belum punya pengalaman yang cukup dalam pemanfaatan genangan waduk untuk PLTS meskipun potensi untuk pemanfaatan PLTS merupakan peluang yang sangat besar dalam mendukung keperluan pasokan listrik di Indonesia. Sebagai gambaran, ilustrasi sistem PLTS terapung dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi sistem PLTS terapung

Sumber: Rahman et al. 2017

Rinaldi dan Mulyono (2021) menyebutkan terdapat peluang dan tantangan pada pengembangan PLTS di area genangan waduk. Susanto (2020) juga menyebutkan adanya peluang pembangunan PLTS Terapung di Bendungan Nadra Krenceng. Tidak hanya di dalam negeri (Jamalludin et al. 2019) dalam studinya menyebutkan bahwa 6 lokasi potensial yang terdapat di Malaysia mampu membangkitkan sekitar 14.530 MWh per tahun. Melihat potensi PLTS terapung yang besar, khususnya di Indonesia, beberapa investor telah melakukan studi untuk membangun PLTS dengan memperhatikan kaidah keamanan bendungan serta perundang-undangan yang ada. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia telah memiliki peraturan yakni Peraturan Menteri PUPR No. 6 tahun 2020, Pasal 105, ayat (6) menyatakan bahwa pemanfaatan ruang pada daerah genangan waduk hanya dapat dilakukan untuk kegiatan pariwisata, kegiatan olahraga, budi daya perikanan dan pembangkit listrik tenaga surya terapung. Perlu dicatat bahwa untuk pemanfaatan area genangan waduk juga diatur di dalam Peraturan Menteri PUPR tersebut, dimana luas permukaan daerah genangan waduk yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga surya terapung paling tinggi 5% (lima persen) dari luas permukaan genangan waduk pada muka air normal. Terkait pedoman pembangunan PLTS terapung, hingga saat studi ini dilakukan dan ditulis, belum didapati pedoman teknis dalam bidang sumber daya air dalam rangka membangun PLTS terapung pada area genangan waduk dan tampungan air lainnya.

Selain itu, belum didapati penelitian ilmiah yang melakukan evaluasi kuantitatif teknis dan non teknis dari pembangunan PLTS terapung ini pada area genangan waduk di Indonesia. Pada studi ini, dilakukan *review* terhadap tata cara teknis dan non-teknis pembangunan PLTS terapung di area genangan waduk pada beberapa negara. Tidak hanya melakukan *review* terhadap PLTS terapung yang telah ada saat ini, studi ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi lokasi penempatan panel surya pada salah satu bendungan di Indonesia, yakni Bendungan Cirata di Jawa Barat, juga diuji coba dan dievaluasi menggunakan simulasi numeris pada saat musim hujan deras dan angin kencang.

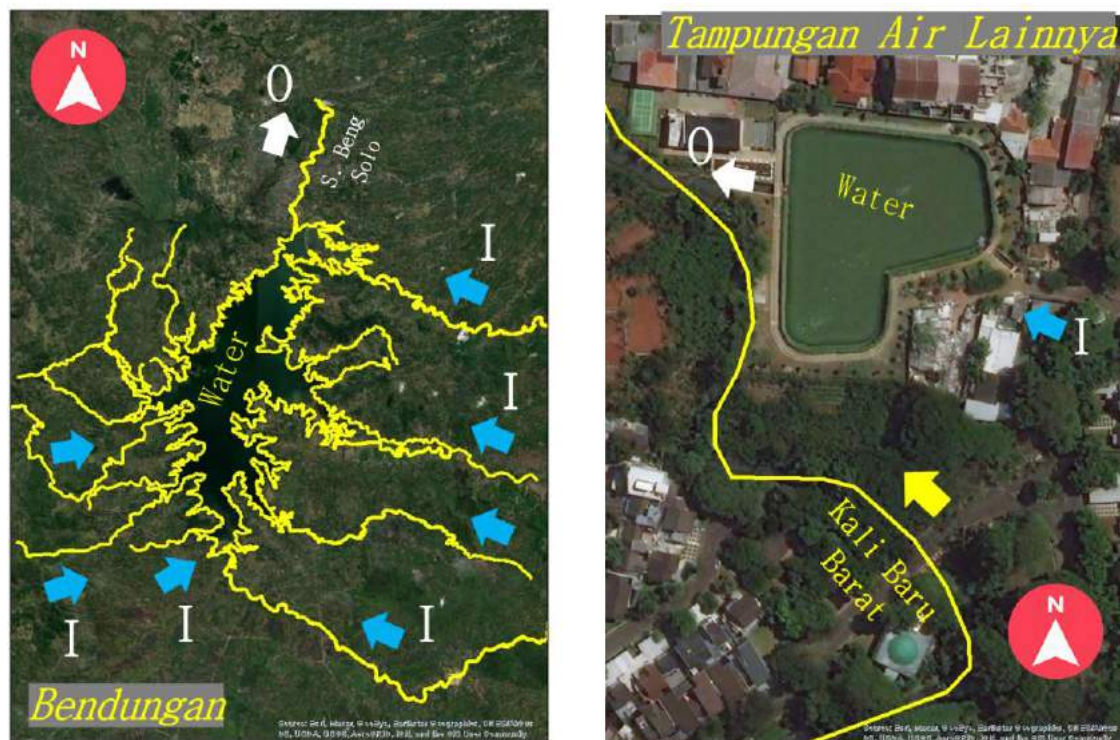
2. Bahan Review PLTS Terapung

Umumnya, pemasangan PLTS terapung dilaksanakan pada area genangan waduk dan tampungan air lainnya. Situasi *inflow* yang datang ke dalam suatu waduk ataupun tampungan air lainnya menjadikan pertimbangan yang berbeda dalam menempatkan panel PLTS terapung.

2.1. Karakteristik Pemasangan PLTS Terapung

Dapat dilihat pada Gambar 3, dengan menggunakan *Google Earth Imagery*, situasi *inflow* pada suatu Bendungan Besar (sebagai contoh pada Gambar 3 bagian kiri adalah Bendungan Wonogiri) umumnya memiliki jumlah *point inflow* sungai yang sangat banyak. Tidak jarang juga bendungan yang hanya memiliki satu *point inflow* sungai, namun debit yang datang dan terukur sangat besar hingga pengelola harus memiliki operasi khusus dan spesifik dalam pengoperasian bendungan pada musim hujan. Hal ini sesuai dengan situasi bangunan fisik bendungan yang dibangun guna menahan

debit puncak yang besar dan cepat. Dengan kata lain, desain debit pada bendungan adalah Q_{PMF} (*Probable Maximum Flood*). Dapat juga dilihat pada Gambar 3, tampungan air lainnya dengan jumlah *inflow* terukur dan skala debit kecil menjadi target atau opsi lain dalam pemasangan PLTS terapung.



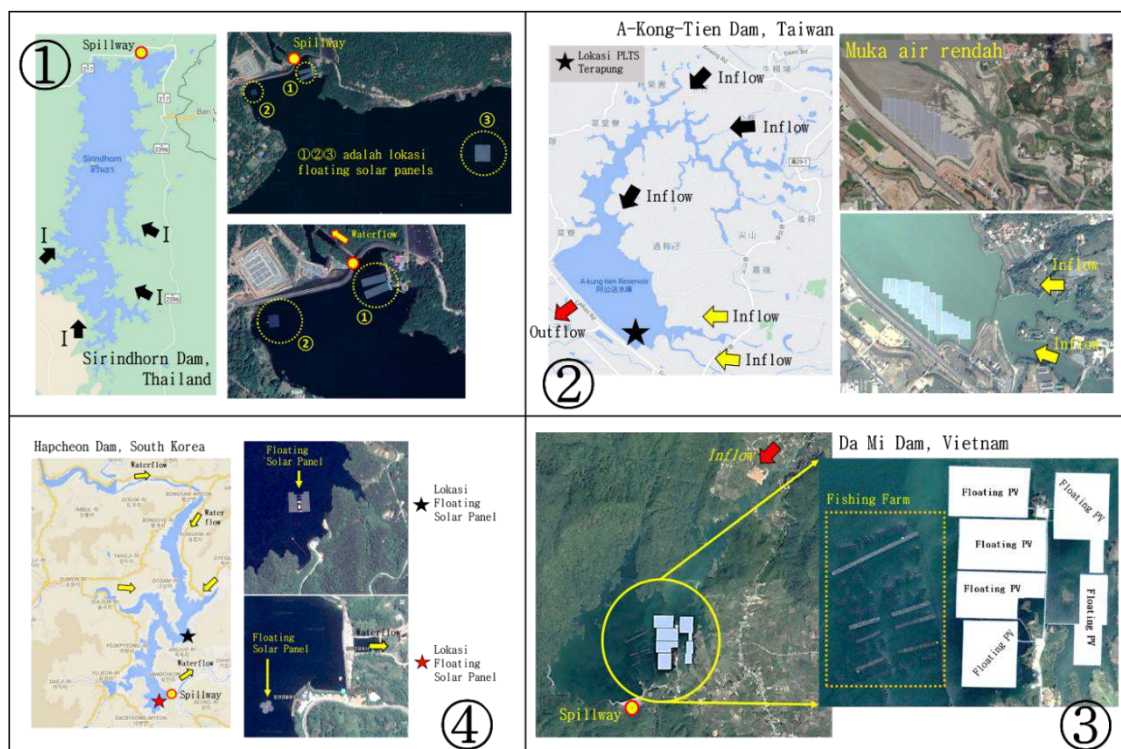
Gambar 3. Klasifikasi pemanfaatan PLTS terapung berdasarkan *inflow* di bendungan dan tampungan air lainnya.

Sumber: Google Earth Imagery, 2021

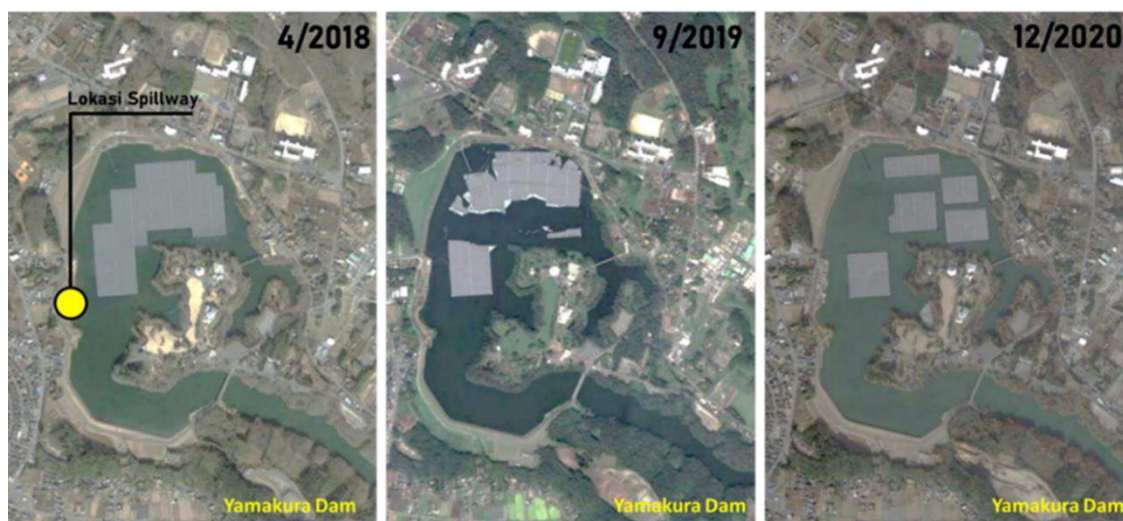
2.2. PLTS terapung pada area genangan waduk di beberapa negara

Telah terdapat beberapa PLTS terapung yang dibangun di beberapa negara. Dapat dilihat pada Gambar 4, dengan menggunakan *Google Earth Imagery*, terdapat beberapa contoh negara yang membangun PLTS terapung di area genangan waduk. Beberapa bendungan yang telah menggunakan area genangan waduk untuk PLTS terapung di antaranya adalah: Bendungan Hapcheon (Korea Selatan), Bendungan Sirindhorn (Thailand), Bendungan A-Kong-Tien (Taiwan), Bendungan Da Mi (Vietnam), dan Bendungan Yamakura (Jepang). Bendungan-bendungan tersebut akan di-review dalam studi ini.

Dapat terlihat pada Gambar 4 dimana *inflow* yang masuk ke bendungan tersebut memiliki jumlah *point inflow* sungai yang cukup banyak seperti Bendungan Sirindhorn (Thailand), Bendungan Hapcheon (Korea Selatan), dan Bendungan A-Kong-Tien (Taiwan). Untuk Bendungan Da Mi, Vietnam, terlihat menggunakan *Google Earth Imagery* hanya memiliki satu *point inflow* sungai, namun Q maksimum *inflow* tahunannya adalah $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Dengan situasi debit *inflow* besar ini sangatlah perlu pertimbangan teknis yang cukup sebelum melakukan penempatan panel PLTS terapung. Sebagai tambahan informasi lain, terlihat juga pada Gambar 4 untuk Bendungan A-Kong-Tien, Taiwan dimana PLTS terapung berada pada kondisi air tidak ada, artinya PLTS terapung berada di area dasar waduk tersebut pada bulan Mei tahun 2020 dan kembali terapung pada genangan waduk pada bulan Januari tahun 2021. Pada Bendungan Yamakura di Jepang, dengan menggunakan *Google Earth Imagery*, terlihat pada Gambar 5 bahwa luasan pembangunan PLTS terapung di Bendungan tersebut cukup luas. Lokasi PLTS terapung yang dibangun pada Bendungan Yamakura ini pun juga dekat dengan lokasi *spillway*.



Gambar 4. Beberapa contoh PLTS terapung yang dibangun di beberapa negara
Sumber: Direktorat Bendungan dan Danau, 2021



Gambar 5. Sebelum bencana (kiri), saat bencana (tengah) dan setelah bencana angin badai (kanan)
Sumber: Direktorat Bendungan dan Danau, 2021

Terdapat catatan penting dari Bendungan Yamakura ini, dapat dilihat area PLTS terapung yang awalnya dibangun berupa satu kepulauan panel PLTS terapung menjadi beberapa kepulauan panel PLTS terapung yang terpisah. Hal ini diakibatkan oleh angin badai kencang yang datang di area Bendungan Yamakura pada Tahun 2019 tersebut adalah 38 m/s (Deroo et al. 2021) dan menghancurkan satu kepulauan panel PLTS terapung ini. Sehingga pemerintah Jepang melakukan desain ulang terhadap penempatan lokasi PLTS terapung ini. Dengan kecepatan angin yang datang 38 m/s pada Tahun 2019, sebagian tambatan PLTS terapung tidak mampu menahan satu kepulauan panel PLTS terapung, sehingga, di tahun 2020, desain ulang dilakukan dengan beberapa kepulauan panel PLTS terapung. Situasi ini menjadikan beban tambatan PLTS terapung ini tersebar di setiap pulau panel yang dibangun.

2.3. PLTS terapung di Indonesia

Di Indonesia, belum banyak PLTS terapung yang telah dibangun. Sebagai contoh, dalam skala penelitian, Universitas Indonesia telah melakukan uji coba pembangunan PLTS terapung ini dengan kapasitas listrik sekitar 13,000 MW. Dapat dilihat pada Gambar 6, menggunakan *Google Earth Imagery*, bahwa PLTS terapung dengan dimensi 12 m x 8 m ini telah dipasang di Danau Mahoni. Tercatat di Direktorat Jenderal SDA, bahwa usulan pemasangan PLTS terapung di beberapa lokasi genangan bendungan telah diajukan. Sebagai contoh, usulan pemasangan PLTS terapung di Waduk Cirata telah diusulkan perizinan dan pembangunannya.



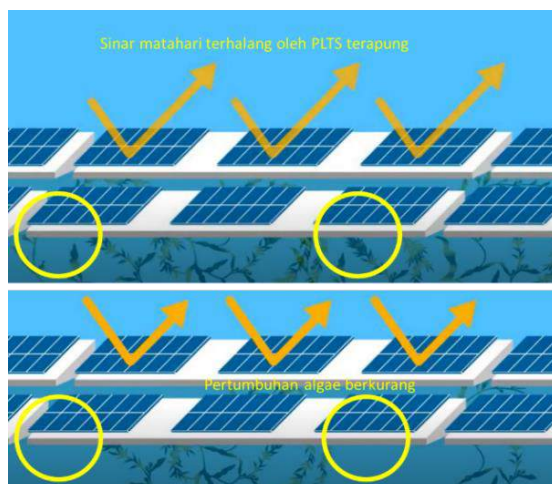
Gambar 6. PLTS terapung di Danau Mahoni, Universitas Indonesia
Sumber: *Google Earth Imagery*, 2021

2.4. Kajian teknis PLTS terapung

Menurut beberapa studi literatur, terdapat beberapa evaluasi yang harus dilakukan dalam membangun PLTS terapung di bendungan, danau, embung, ataupun bangunan tampungan air lainnya. Dalam bidang sumber daya air, perlu diketahui terlebih dahulu terdapat manfaat yang baik dalam pembangunan PLTS terapung di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Pembangunan PLTS terapung dapat mengurangi pertumbuhan Alga (K-Water 2011). Pertumbuhan Alga yang membutuhkan sinar matahari terhambat ataupun terhalangi oleh adanya PLTS terapung ini. Gambar 7 menunjukkan ilustrasi dari terhambatnya sinar matahari kepada pertumbuhan Alga.
2. Mengurangi evaporasi pada area genangan air, sehingga air lebih banyak ter konservasi dan mengurangi penguapan air ke udara bebas. (Choi 2014) menyatakan bahwa penguapan atau evaporasi dapat berkurang hingga 30% di danau dan kolam air dan mencapai 50% pada bangunan air buatan manusia (*man-made water construction*).

Namun demikian, terdapat tantangan dalam bidang sumber daya air yang harus dihadapi guna membangun dan meletakkan panel PLTS terapung di genangan waduk atau tampungan air lainnya, yaitu panel PLTS terapung yang menutupi sebagian besar area genangan waduk atau tampungan air lainnya cukup memiliki tantangan yang besar dalam melakukan pembersihan sedimen dan pengambilan ulang data batimetri saat diperlukan. Pemahaman tersebut dapat dilihat pada Bendungan Lazer di Perancis (Gambar 8) dimana tampungan air tersebut penuh oleh *Floating Solar Panel*.



Gambar 7. Sinar matahari sebagai sumber pertumbuhan alga berkurang akibat terhalang oleh panel PLTS terapung

Sumber: Direktorat Bendungan dan Danau 2021



Gambar 8. Panel PLTS pada Bendungan Lazer, Perancis.

Sumber: Gérard, Pralong, dan Rousselin 2021

Setelah mengetahui keuntungan dan tantangan terhadap pembangunan PLTS terapung ini, evaluasi kajian teknis dilakukan untuk mengetahui tata cara dalam lokasi peletakan panel PLTS terapung dari berbagai sumber informasi yang telah ada. Satu per satu *review* studi dievaluasi guna mengetahui parameter-parameter yang diperlukan dalam meletakkan panel di atas genangan air waduk.

2.4.1 *Review peraturan terkait PLTS terapung (Permen PUPR no 6 Tahun 2020)*

Dasar hukum pembangunan PLTS terapung pada waduk di Indonesia adalah Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 6/PRT/M/2020 tentang perubahan atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 tentang bendungan.

Hingga saat studi ini dilaksanakan, di peraturan tersebut hanya disampaikan besaran area yang dapat dimanfaatkan dalam membangun PLTS terapung, yakni 5% dari luas area genangan waduk pada elevasi normal. Sebagai contoh, luas genangan pada Bendungan Bili-Bili di Sulawesi Selatan adalah $18,5 \text{ km}^2$, artinya PLTS terapung dapat dibangun di area genangan Bendungan Bili-Bili adalah maksimal sebesar 5% dari $18,5 \text{ km}^2$ yakni seluas $0,925 \text{ km}^2$ PLTS terapung. Namun, terkait hal-hal teknis lainnya seperti batas kecepatan angin, sedimen dan kecepatan air belum dibahas pada Peraturan Menteri PUPR Nomor 6/PRT/M/2020 ini.

2.4.2 Review dari beberapa scientific paper

Dari beberapa *literature review* yang telah dilakukan. Terdapat beberapa *paper* yang menyimpulkan parameter-parameter penting dalam membangun PLTS terapung, di antaranya adalah:

1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya terapung ini harus dievaluasi dengan baik terhadap: variasi kedalaman air, variasi suhu, kecepatan aliran, dan penguapan (Sahu, Yadav, dan Sudhakar. 2016).
2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya terapung harus dapat bertahan dalam kondisi alam yang kurang baik seperti banjir, *cyclone*, gelombang muka air tinggi dan angin kencang (Sahu et al. 2016).
3. Terlibatnya dan koordinasi yang baik antara *stakeholder* dan pihak terkait sangat perlu dalam tahap perencanaan, terutama meyakinkan terhadap penerimaan masyarakat (Tsoutsos et al. 2005). Pada aspek sosial, hal ini menjadi penting untuk dievaluasi.

Sebagai tambahan informasi, (Dai et al. 2020), dalam tulisannya berjudul “*Design and construction of floating modular photovoltaic system for water reservoirs*” dengan studi kasus Tengeh Dam di Singapura, menyampaikan beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam merencanakan PLTS terapung. Beberapa parameter batasan yang digunakan untuk merencanakan PLTS terapung di Bendungan Tengeh, Singapura dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Parameter Batasan di Bendungan Tengeh

No	Parameter	Nilai
1	<i>Fundamental basic wind velocity</i>	20 m/s
2	<i>Current speed</i>	<i>Negligible</i>
3	<i>Significant wave height</i>	0,2 m
4	<i>Wave peak period</i>	4 s

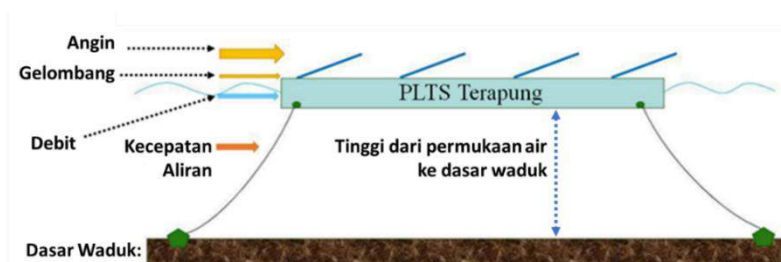
Sumber: Dai et al. 2020

2.4.3. Review dari International Commission on Large Dams (ICOLD)

Menurut *International Commision on Large Dam* (ICOLD), terdapat 3 parameter utama yang perlu diperhatikan dalam perencanaan PLTS terapung, yaitu:

1. Angin (m/s)
2. Gelombang permukaan air (m) dan
3. Debit (m^3/s) dan *velocity* aliran (m/s)
4. Ketinggian muka air dari panel PLTS terapung ke dasar bendungan (m)

Ilustrasi dari ketiga parameter utama tersebut dapat dilihat pada Gambar 9 di bawah ini.



Gambar 9. Parameter yang perlu diperhatikan dalam perencanaan PLTS terapung

Pada dasarnya, informasi dari 4 (empat) parameter yang dipertimbangkan oleh ICOLD dalam perencanaan PLTS terapung ini sangat esensial. Namun, perlu dicatat bahwa informasi dari empat parameter tersebut tidak tetap nilainya di setiap bendungan yang akan dibangun PLTS terapung. Sebagai contoh, kecepatan angin yang terjadi paling maksimal (badai) di Bendungan Cirata tentunya akan sangat berbeda dengan kecepatan angin paling maksimal di Bendungan Wonogiri. Situasi ini

harus dievaluasi dan dipertimbangkan sangat detail menggunakan model numerik saat melakukan perencanaan dan pembangunan PLTS terapung.

Tidak hanya parameter angin, parameter gelombang muka air waduk yang timbul sangat dipengaruhi oleh *inflow* (debit) yang masuk di dalam suatu genangan ditambah parameter angin akan mengubah gaya gelombang muka air di permukaan. Pergerakan muka air (kecepatan/*velocity*) dengan kecepatan rendah (minimal) juga menjadi syarat penting untuk dipertimbangkan dalam pembangunan PLTS terapung. Kecepatan minimal harus ditentukan dalam memberi rekomendasi peletakan panel PLTS terapung guna mengurangi gaya dorong pada setiap pengikat PLTS terapung di dasar areal genangan bendungan ataupun tampungan air lainnya. Informasi detail terkait *review* dari ICOLD dapat dilihat pada Kajian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung oleh (Balai Teknik Bendungan 2021).

Dapat juga terlihat di Gambar 9 tersebut bahwa ketinggian muka air dari panel PLTS terapung ke dasar bendungan adalah salah satu parameter yang perlu dipertimbangkan juga. Pada saat musim kering hingga kedalaman air sangat rendah, tali tambatan bisa mengenai tubuh bendungan. Nilai kedalaman dari panel surya dan dasar waduk dapat dilihat dari data batimetri bendungan. Parameter-parameter penting seperti yang terlihat pada Gambar 9 tersebut sangat disarankan untuk diselesaikan dengan model numeris guna memahami mekanisme yang akan terjadi terhadap area genangan waduk pada saat kondisi hujan deras dan angin kencang. Selanjutnya area rekomendasi pembangunan PLTS terapung tersebut dapat ditentukan pada suatu area genangan waduk.

2.4.4. Lesson learned dari pihak swasta di Indonesia

Pada tahun 2019-2020, PT Krakatau Tirta Industri telah melakukan studi lebih lanjut untuk menentukan parameter-parameter yang dapat digunakan sebagai batasan dalam merencanakan PLTS terapung di Bendungan Krenceng. Rangkuman parameter kunci dalam perencanaan PLTS terapung yang dikeluarkan oleh PT Krakatau Tirta Industri dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.

Dari PT. Krakatau Tirta Industri dapat juga disampaikan mengenai pembatasan luasan area genangan waduk yang diizinkan untuk dimanfaatkan sebagai PLTS terapung. PT. Akuo Energy Indonesia, Pemrakarsa proyek PLTS terapung pada PT. Krakatau Tirta Industri (KTI), mengirimkan surat konfirmasi ke *International Commission on Large Dams* (ICOLD) untuk mendapatkan referensi dalam pembatasan *coverage ratio* untuk area pemanfaatan PLTS. ICOLD memberikan tanggapan bahwa tidak ada pembatasan spesifik dari ICOLD atas *coverage ratio* penggunaan permukaan waduk untuk PLTS. Pihak ICOLD tidak dapat memastikan dan merekomendasikan *maximum coverage ratio* untuk waduk secara umum, karena rasio tersebut bisa $< 1\%$ atau $> 70\%$ tergantung pada ukuran dan kondisi serta kajian dampaknya.

Tabel 2. Parameter kunci perencanaan PLTS terapung yang digunakan PT. KTI

Parameter	Ideal	Batasan Teknis
Angin	Serendah-rendahnya kecepatan angin	210 km/jam
Aliran Air	Serendah-rendahnya kecepatan arus air	1 m/s
Variasi Ketinggian Muka Air	< 10 m	30 m (tidak menutup kemungkinan untuk variasi di atas 30 meter, dengan penyesuaian tertentu)
Kedalaman Air	< 10 m	80 m (tidak menutup kemungkinan untuk kedalaman di atas 80 meter, namun akan berpengaruh pada biaya <i>anchoring</i>)

Sumber: PT. Krakatau Tirta Industri, 2021

3. Studi Kasus dan Pembahasan

Di Indonesia telah ada usulan terhadap pemasangan PLTS terapung, salah satunya di Bendungan Cirata. Pada studi ini, rekomendasi PLTS terapung coba diusulkan menggunakan model numerik. Batasan parameter yang dijadikan pedoman pada rekomendasi lokasi peletakan panel PLTS terapung ini berasal dari kajian teknis yang telah di-review pada penjelasan sebelumnya.

3.1 Persamaan

Perpindahan sedimen dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$q_i = q_b + q_s \quad (1)$$

Dimana q_t adalah perpindahan sedimen total, q_b adalah perpindahan sedimen dasar, dan q_s adalah perpindahan sedimen layang.

Studi ini menggunakan model perpindahan sedimen yang mengkombinasikan gaya oleh gelombang dan aliran, serta tipe sedimen dasar dan sedimen layang. Menurut (Fredsoe. 1984), Perkembangan lapisan dalam waktu terhadap pergerakan aliran dan gelombang didiskripsikan oleh persamaan orde pertama berikut ini:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{z(1+a-e^z)}{e^z(z-1)+1} \frac{1}{U_0} \frac{\partial U_0}{\partial t} + \frac{30K}{k} \frac{(K^2 U_0^2 + U_{f0}^2 + 2K_z U_{f0} U_0 \cos \gamma)^{1/2}}{e^z(z-1)+1} \quad (2)$$

Dimana,

K : von karman constanta

t : time

z : parameter yang berhubungan dengan ketebalan lapisan batas

U_0 : kecepatan gelombang orbital dekat dasar

U_{f0} : kecepatan gesekan oleh aliran di dalam lapisan gelombang batas

γ : sudut antara aliran dan gelombang

k : kekasaran dasar, diambil sebesar $2,5 d_{50}$ pada dasar rata, dan $2,5d_{50} + k_R$ pada dasar beralur

d_{50} : median ukuran butiran

k_R : tingkat kekasaran alur

Nilai perpindahan sedimen vertikal diperhitungkan dengan menggunakan persamaan difusi berikut ini:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = w \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (3)$$

Dimana:

ε_s : koefisien turbulensi

c : konsentrasi sedimen layang

w : kecepatan vertikal

Input grain sizes yang digunakan adalah 0,08 mm (pasir halus) dengan debit *inflow* maksimum 979 m³/s dan 1989 m³/s di masing-masing Sungai Cisokan dan Citarum. Nilai porositas adalah 0,4 dan nilai *relative density* adalah 2,65. Selain itu kondisi angin maksimum adalah 40 m/s dan inisial muka air waduk adalah 0 meter di puncak *spillway*.

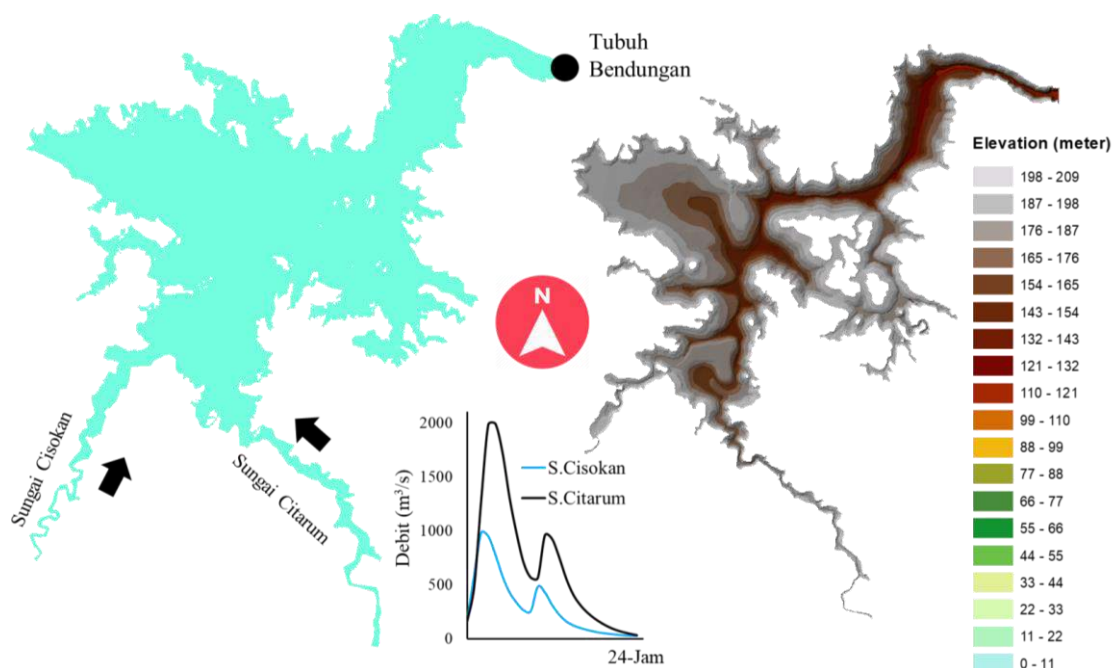
3.2 Aplikasi model numerik

Direktorat Bendungan dan Danau mencoba merespons terkait usulan ataupun rekomendasi terhadap pembangunan PLTS terapung di area genangan bendungan ataupun tampungan air lainnya. Dalam hal ini, Permen PUPR No.6 tahun 2020, Pasal 105, ayat (6) terkait batasan maksimal 5% luasan area genangan waduk yang dapat dimanfaatkan dijadikan sebagai *boundary*. Evaluasi dilakukan menggunakan model numerik di area genangan bendungan. Banyak perangkat lunak yang dapat digunakan dalam melakukan evaluasi PLTS terapung ini. Seperti contohnya perangkat lunak MIKE 21 FM, HEC-RAS, FLOW-3D, atau DELF3D.

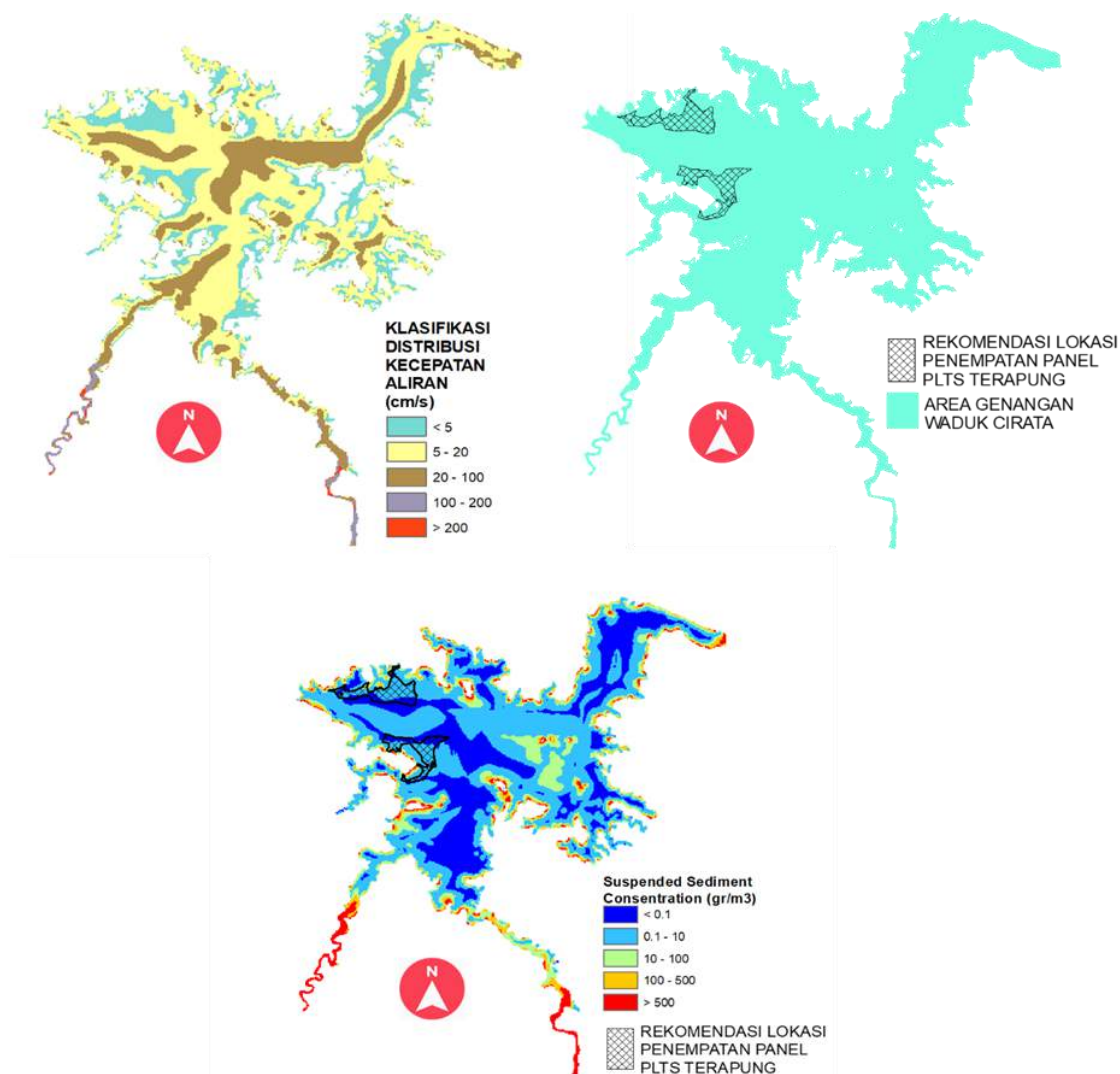
Sebagai contoh, pada Gambar 11 di bawah ini ditunjukkan hasil simulasi numeris terhadap usulan pemasangan ataupun pembangunan PLTS terapung di Bendungan Cirata dilakukan melalui simulasi numeris 2D menggunakan perangkat lunak MIKE 21 FM, pemodelan dilakukan menggunakan *mesh* fleksibel dengan sudut minimal 10° dan ukuran *mesh* maksimal 1000 m², dengan *boundary condition* adalah *inflow* pada Sungai Citarum dan Sungai Cisokan dengan debit banjir puncak 2000 m³/s dan 1000 m³/s masing-masingnya, serta menggunakan *boundary condition outflow* pada elevasi *spillway* Bendungan Cirata. Parameter *inflow*, angin, *velocity*, kedalaman air, serta tidak dekatnya usulan

rekomendasi pembangunan PLTS terapung terhadap *spillway* diakomodasi dalam simulasi numerik. Informasi-informasi yang perlu diperhatikan dari hasil simulasi numeris tersebut adalah sebagai berikut:

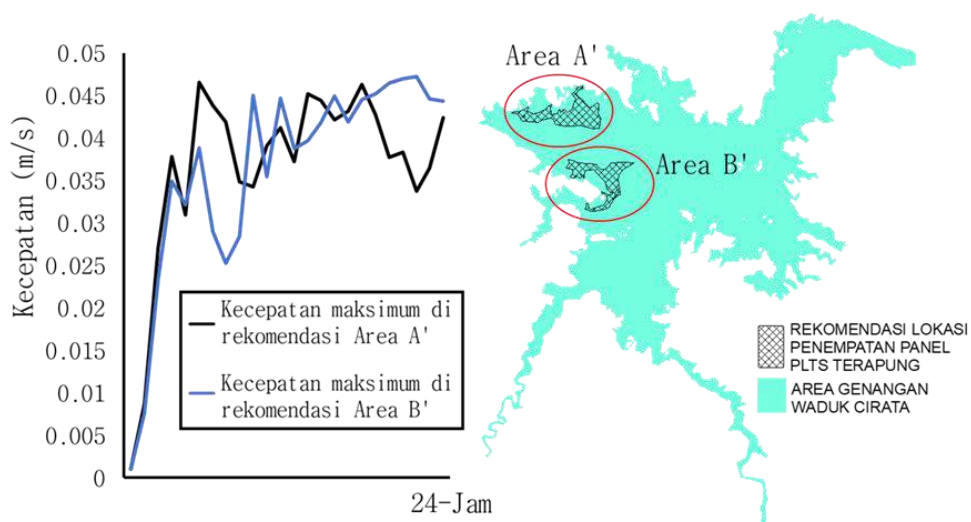
1. Sungai Citarum adalah sungai utama yang memberi *inflow* ke Waduk Cirata (Gambar 10)
2. Penempatan panel PLTS terapung perlu memperhatikan faktor kecepatan (*velocity*) pergerakan air pada pola operasi waduk, kecepatan angin dan distribusi konsentrasi sedimen layang di Waduk Cirata khususnya pada musim banjir.
3. Terdapat data *bathymetry* dari hasil pengukuran dengan kedalaman maksimum 220 m, (sumber data: LIPI, 2016). Data tersebut dapat dilihat pada Gambar 10.
4. Berdasarkan butir (a), (b), dan (c), telah dilakukan perhitungan distribusi kecepatan pergerakan air dan sedimentasi layang secara numeris yang mungkin terjadi pada pola operasi waduk dengan kondisi banjir Q_{100} tahun dengan kecepatan angin maksimum 40 m/s. Hasil perhitungan numeris distribusi kecepatan air dan sedimen layang menunjukkan daerah rekomendasi penempatan PLTS terapung berada pada area dengan kecepatan air minimal, yakni < 5 cm/s, dan konsentrasi sedimen layang < 10 gr/m³. Area rekomendasi penempatan PLTS terapung adalah sekitar 242,93 Ha atau $\pm 4,1\%$ dari total luas genangan Waduk Cirata, yang didapatkan dari hasil simulasi numeris tersebut. Distribusi kecepatan pergerakan air, distribusi sedimen layang dan area rekomendasi penempatan PLTS terapung dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Input simulasi: area genangan, *inflow* Waduk Cirata (Kiri) dan data *bathymetry* (Kanan)



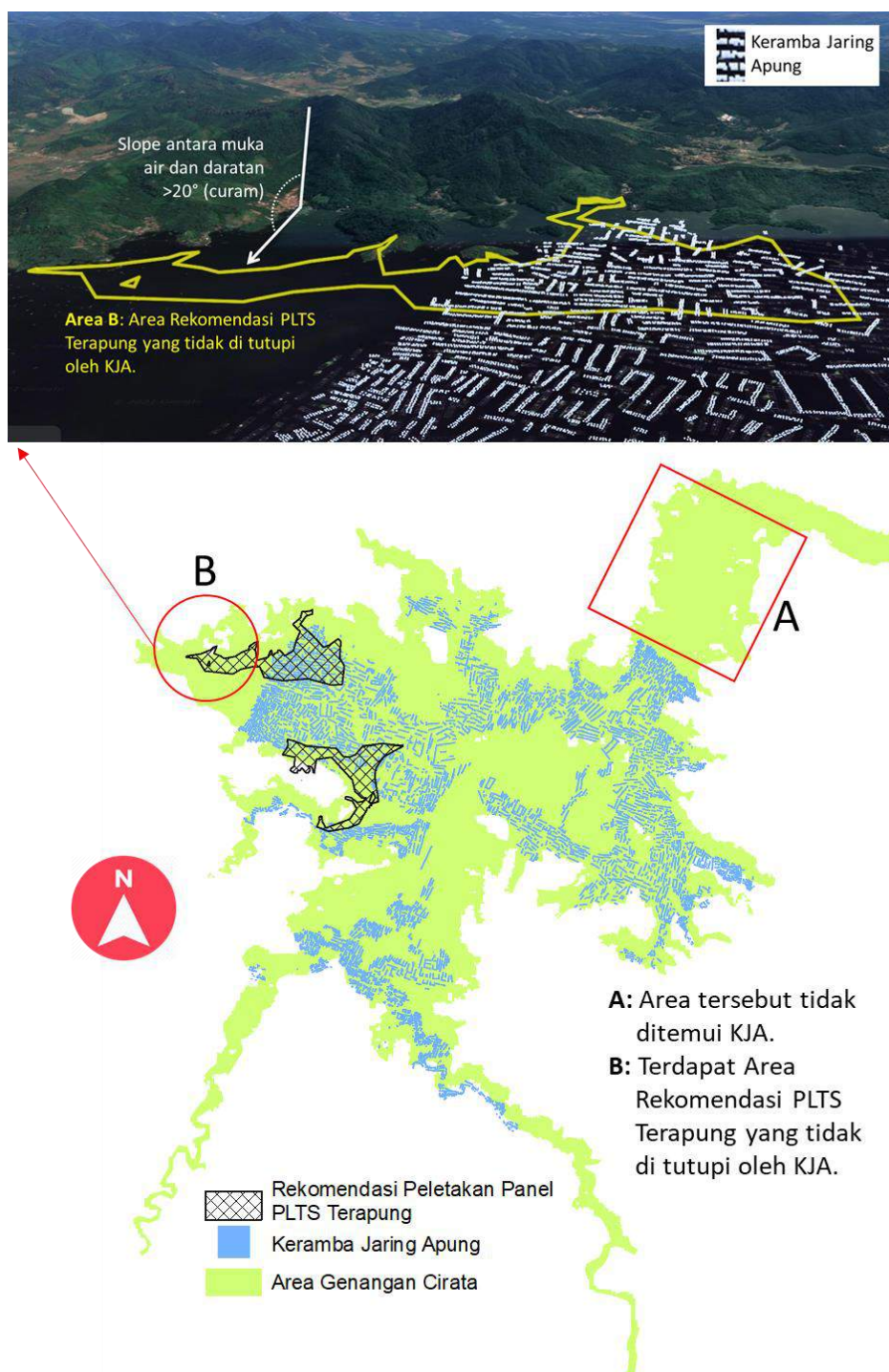
Gambar 11. Output Simulasi: klasifikasi distribusi kecepatan dalam cm/s (kiri atas), area rekomendasi penempatan PLTS terapung (kanan atas), dan sedimen layang dalam gr/m³ (bawah).



Gambar 12. Kecepatan maksimum pada rekomendasi area A' dan area B'.

Dapat terlihat pada Gambar 12, dalam kondisi *inflow* yang sangat tinggi yakni Q_{PMF} , baik pada hasil rekomendasi area A' dan rekomendasi area B', kecepatan maksimum pada masing-masing area

rekomendasi untuk dipasang panel PLTS terapung masih sangat kecil dalam hal kecepatan arus gelombang muka air di Waduk Cirata.



Gambar 13. Klasifikasi distribusi kecepatan dalam cm/s (kiri atas), Area rekomendasi penempatan PLTS terapung (kanan atas), dan sedimen layang gr/m^3 (bawah).

Hasil tersebut dapat dijadikan sebagai penilaian awal dalam menempatkan PLTS terapung di area genangan waduk. Namun, situasi lapangan bisa jadi tidak memungkinkan untuk area rekomendasi pemasangan panel PLTS terapung ini untuk segera diaplikasikan. Hal tersebut diakibatkan oleh banyaknya Keramba Jaring Apung (KJA) untuk budidaya ikan pada area genangan Waduk Cirata seperti yang terlihat pada Gambar 13. Bila Keramba Jaring Apung ini belum ditertibkan, area

rekomendasi lokasi pemasangan PLTS terapung seperti yang disarankan dan ditunjukkan pada Gambar 11 tidak akan dapat berjalan dengan baik. Permasalahan sosial mungkin saja timbul bila penertiban terhadap KJA ini dilakukan, untuk itu perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap penertiban KJA ini. Data spasial KJA di dapat dari LIPI (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia).

Solusi lainnya untuk peletakan PLTS terapung, dapat dilihat melalui *Google Earth Imagery*, lebih detail pada Gambar 13, pada sebagian area rekomendasi pemasangan PLTS terapung ini belum sepenuhnya tertutupi oleh KJA (lihat Area B pada Gambar 13). Itu artinya terdapat potensi untuk pemasangan PLTS terapung ini. Namun demikian, perlu diperhatikan langkah lebih lanjut dalam pemasangan instalasi listrik pada tahap konstruksi. Secara umum, area rekomendasi B pada Gambar 13 memiliki daratan yang cukup curam dan rumit untuk dilakukan pemasangan dan instalasi listrik. Hal tersebut mungkin saja dilakukan namun memiliki potensi pembiayaan yang cukup besar dengan membangun instalasi listrik dan *power station* di area pegunungan.

Area lain juga dapat diusulkan pada pemasangan PLTS terapung, bila melihat pada Gambar 13, terdapat area A yang masih bebas terhadap KJA, yakni area sekitar tubuh bendungan ($\pm 3,5$ km dari tubuh bendungan). Konsekuensi yang ditimbulkan dari area rekomendasi dekat dengan tubuh bendungan mungkin berupa pemasangan tambatan di dasar genangan Bendungan Cirata harus cukup kuat menahan angin badai yang sangat kencang dan gelombang agar tidak terlepas mengenai tubuh Bendungan Cirata. Namun hal ini hanya akan menimbulkan dampak sosial yang minimum, dengan melibatkan *stakeholder* dan pihak terkait khususnya pada tahap perencanaan.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan *review* terhadap pembangunan PLTS terapung di berbagai negara, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan. Tidak hanya informasi kesuksesan terhadap pembangunan PLTS terapung, namun juga kegagalan yang mungkin akan terjadi selama proses pengoperasiannya. Untuk itu, pada studi ini kami menyimpulkan beberapa hal yang penting dilakukan dalam merencanakan PLTS terapung. Penyusunan rencana PLTS terapung di genangan waduk memerlukan aspek teknis dan sosial yang perlu dievaluasi. Dalam hal teknis, beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam penempatan panel PLTS terapung adalah *inflow*, *velocity*, tinggi gelombang, distribusi sedimen melayang, dan angin kencang. Selain itu, lokasi penempatan PLTS terapung tidak dekat dengan lokasi *spillway* pada bendungan. Pada aspek sosial, keterlibatan dan pelaksanaan koordinasi yang baik antara *stakeholder* dan pihak terkait sangat perlu dalam tahap perencanaan, terutama meyakinkan masyarakat terhadap penerimaan PLTS terapung.

Sebagai studi kasus evaluasi teknis, diambil contoh adalah Waduk Cirata. Simulasi numerik dilakukan dalam memberikan rekomendasi area panel PLTS terapung di area Waduk Cirata. Simulasi numerik dilakukan untuk memahami kondisi terberat yang akan dialami oleh PLTS terapung khususnya pada kondisi cuaca ekstrim dan angin kencang. Hasil simulasi menunjukkan area genangan dengan kecepatan aliran dan konsentrasi sedimen paling kecil yang disarankan untuk penempatan PLTS terapung. Sebagai hasil analisa didapatkan area seluas 242,93 Ha atau $\pm 4,1\%$ dari total luas genangan Waduk Cirata. Area ini adalah area genangan dengan kecepatan aliran air minimal, yakni < 5 cm/s, dan konsentrasi sedimen layang < 10 gr/m³. Nilai tersebut dapat dijadikan penilaian awal dalam melakukan rekomendasi penempatan panel PLTS terapung di area Waduk Cirata.

Daftar Pustaka

- Balai Teknik Bendungan. 2021. *PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) TERAPUNG*. Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. Kajian Teknis.
- Choi, Young-Kwan. 2014. "A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact."
- Dai, Jian dkk. 2020. "Design and Construction of Floating Modular Photovoltaic System for Water Reservoirs." *Energy* 191: 116549.
- Deroo, L, ISL, France, dan Chair of ICOLD Technical Committee. 2021. "Floating PV solar on dam reservoirs." *Hydropower & Dams* 28(3): 62–66.

- Direktorat Bendungan dan Danau. 2021. *Kajian Teknis Pemanfaatan Area Genangan Waduk untuk PLTS*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Gérard, Nicolas, Julien Pralong, dan Arnaud Rousselin. 2021. "The Lazer (France) and Nam Theun 2 (Laos) floating solar projects." Dalam ICOLD.
- Jamalludin, Mohd Alif Saifuddin dkk. 2019. "Potential of Floating Solar Technology in Malaysia." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 10(3): 1638–44.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. 2020. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 6 Tahun 2020 tentang Perubahan atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan*.
- K-Water. 2011. *Groundwork research for Commercialization of Floated Photovoltaic System*.
- Peraturan Presiden Nomor 18 Tahun 2020. 2020. *Peraturan Presiden (PERPRES) tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional Tahun 2020-2024*.
- PT. Krakatau Tirta Industri. 2021. "Porsi Luasan Yang Layak Untuk PLTS terapung Di Waduk Krenceng." Dipresentasikan pada Rapat Koordinasi Bappenas.
- Qomara, Grienda. 2015. "Kebangkitan Tiongkok dan Relevansinya terhadap Indonesia." *Jurnal Hubungan Internasional* 8: 31–44.
- Rahman, Md Wazedur dkk. 2017. "Solar lanes and floating solar PV: New possibilities for source of energy generation in Bangladesh." Dalam *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore: IEEE, 1–6.
- Rinaldi, Aris, dan Joko Mulyono. 2021. "Peluang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Genangan Waduk." 7: 106–13.
- Sahu, Alok, Neha Yadav, dan K. Sudhakar. 2016. "Floating Photovoltaic Power Plant: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66: 815–24.
- Schwab, Klaus. 2017. *The Global Competitiveness Report*. World Economic Forum.
- Sulaeman, Samer, Erik Brown, Raul Quispe-Abad, dan Norbert Müller. 2021. "Floating PV System as an Alternative Pathway to the Amazon Dam Underproduction." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135: 110082.
- Susanto, H. 2020. "Rencana dan Pelaksanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung di Permukaan Waduk untuk Mendukung Program Energi Terbarukan." Dipresentasikan pada Webinar Presentasi, Komisi Nasional Indonesia untuk Bendungan Besar (KNIBB), Jakarta, Indonesia.
- Tsoutsos, Theocharis, Niki Frantzeskaki, dan Vassilis Gekas. 2005. "Environmental Impacts from the Solar Energy Technologies." *Energy Policy* 33(3): 289–96.