

Analisa Pemilihan Model Tumpuan Pembangkit Listrik Tenaga Hidrokinetik pada Saluran Kanal PLTU

Bobby Asukmajaya R*, Suhariyanto, Kartika Purwitasari,
Agustin Dita Lestari, Winda Harsanti

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang, Malang

*Koresponden email: bobbyasukma@polinema.ac.id

Diterima: 24 Agustus 2025

Disetujui: 1 September 2025

Abstract

The small hydroelectric power plant (PLTHk) at UP Paiton has been operational since 2021, significantly reducing imported kWh consumption. This innovative technology utilises the potential of alternative green energy from outlet canals that were previously unused. However, the turbine support system requires structural development to enhance safety and durability, particularly in view of the threat of corrosion in coastal environments. This study analyses four alternative support structure designs that use economical, corrosion-resistant reinforced concrete materials. The design alternatives are: (1) a reinforced concrete girder bridge spanning the canal; (2) a reinforced concrete girder bridge with supports in the middle of the canal; (3) a U-shaped support model with three segments crossing the channel; and (4) a U-shaped support model extending along the side of the canal. The evaluation was based on technical and economic feasibility and ease of maintenance. The results of the technical and economic feasibility analyses identified the fourth model, the U-shaped support placed on the side of the canal, as the best alternative. This design offers advantages in terms of economics, long-term durability and ease of access for maintenance. The U-shaped support model on the canal side is the optimal solution for PLTHk development at UP Paiton, improving operational safety, extending the service life and facilitating more efficient maintenance activities.

Keywords: *PLTHk, turbine support structure, reinforced concrete, feasibility analysis, green energy, coastal corrosion*

Abstrak

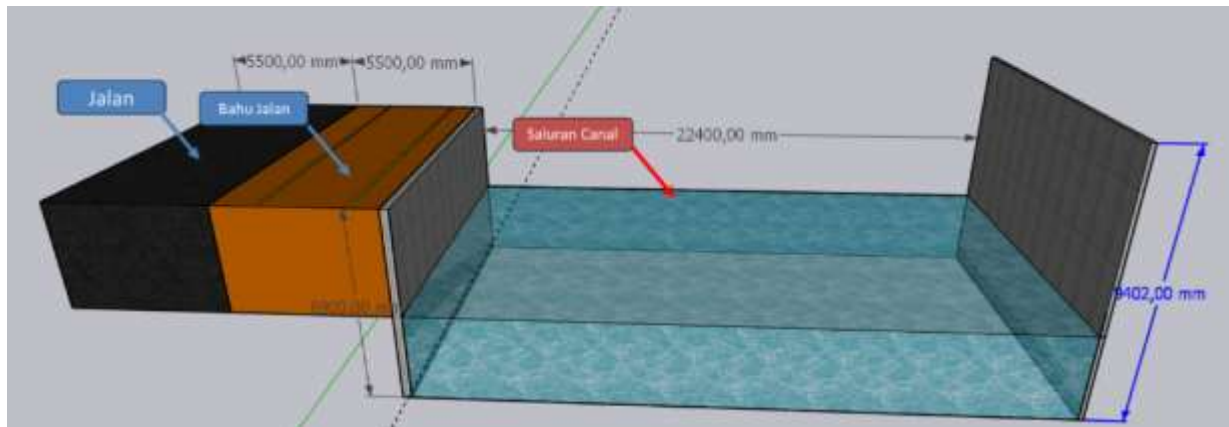
Pembangkit Listrik Tenaga Hidro kecil (PLTHk) di UP Paiton telah beroperasi sejak 2021 dan terbukti memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi konsumsi kWh impor. Inovasi ini memanfaatkan potensi energi hijau alternatif dari kanal outlet yang sebelumnya belum dimanfaatkan. Namun, sistem penopang turbin memerlukan pengembangan aspek struktural untuk meningkatkan keamanan dan durabilitas, terutama mengingat ancaman korosi pada lingkungan pantai. Penelitian ini menganalisis empat alternatif desain struktur penopang menggunakan material beton bertulang yang ekonomis dan tahan korosi. Alternatif desain meliputi: (1) jembatan girder beton bertulang yang membentang di atas kanal, (2) jembatan girder beton bertulang dengan penopang di tengah kanal, (3) model penopang berbentuk U dengan 3 segmen melintang saluran, dan (4) model penopang berbentuk U memanjang pada sisi kanal. Evaluasi dilakukan berdasarkan analisis kelayakan teknis, ekonomis, dan kemudahan pemeliharaan. Dari hasil analisis kelayakan dan biaya, model keempat yaitu penopang berbentuk U yang ditempatkan pada sisi kanal diidentifikasi sebagai alternatif terbaik. Desain ini memiliki keunggulan dalam aspek ekonomis, durabilitas jangka panjang, dan kemudahan akses untuk pemeliharaan. Model penopang berbentuk U pada sisi kanal merupakan solusi optimal untuk pengembangan PLTHk di UP Paiton yang dapat meningkatkan keamanan operasional, memperpanjang umur layanan, dan memfasilitasi aktivitas pemeliharaan yang lebih efisien.

Kata Kunci: *PLTHk, struktur penopang turbin, beton bertulang, analisis kelayakan, energi hijau, korosi pantai*

1. Pendahuluan

Pemanfaatan energi hidrokinetik melalui Pembangkit Listrik Tenaga Hidrokinetik (PLTHk) di saluran kanal PLTU menawarkan solusi yang ramah lingkungan, tanpa memerlukan bendungan besar serta berpotensi meminimalkan biaya konstruksi dan operasi. Namun, keberlangsungan dan kehandalan sistem PLTHk sangat bergantung pada desain struktur penopang yang efektif dan tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras. Salah satu pertimbangan utama dalam desain struktur penopang adalah korosi. Struktur penopang yang berada di tepi laut sangat rentan terhadap serangan ion klorida yang menyebabkan degradasi baja tulangan dan beton. Studi oleh Bayuaji dkk. menunjukkan bahwa struktur beton bertulang

yang telah beroperasi selama 20 tahun di lingkungan laut masih memenuhi batas kekuatan yang berlaku, bahkan dalam skenario terburuk sekalipun, menunjukkan ketahanan beton terhadap korosi di lingkungan maritim [1][2].



Gambar 1 : Rencana Lokasi PLTHk
 Sumber : Data Pribadi (2025)

Selain korosi, beban dinamis akibat getaran dari turbine dan arus air yang kuat (~ 2 m/s) menjadi tantangan desain yang tak bisa diabaikan. Sedangkan, struktur beton telah terbukti memiliki kinerja dinamis yang baik dalam kondisi lingkungan laut, termasuk stabilitas dan kekakuan yang tinggi serta respons terhadap getaran—seperti yang diamati dalam desain fondasi beton untuk turbin lepas pantai [3]. Lebih lanjut, saluran kanal dengan lebar 22 meter dan perbedaan elevasi tepi sebesar 3 meter menjadikan desain girder jembatan sulit diterapkan secara praktis. Penggunaan struktur yang terletak di dalam saluran juga menghadapi tantangan teknis tambahan karena kecepatan arus yang tinggi, yang bisa menyebabkan scouring serta deformasi akibat gaya hidrodinamik. Oleh karena itu, penerapan material beton bertulang untuk penopang PLTHk menjadi pilihan yang rasional.

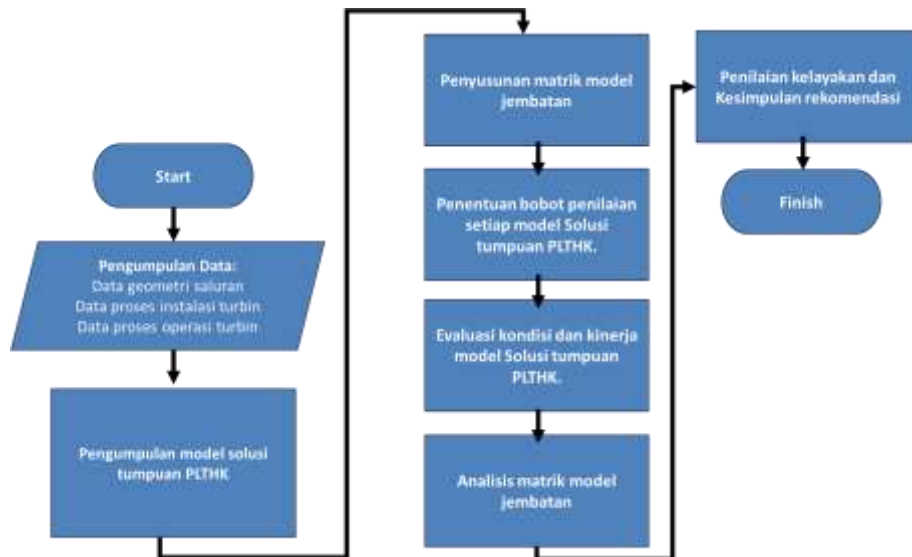
Beton bertulang menawarkan ketahanan korosi yang signifikan, kekakuan struktural yang lebih baik terhadap getaran, umur servis lebih lama, dan memudahkan aktivitas pemeliharaan. Empat alternatif desain yang diusulkan meliputi: (1) jembatan girder beton bertulang melintang kanal, (2) jembatan girder beton bertulang dengan penopang di tengah kanal, (3) model penopang *U-shape* tiga segmen melintang kanal, dan (4) penopang *U-shape* memanjang di sisi kanal. Berdasarkan analisis kelayakan teknis dan biaya, model keempat—penopang *U-shape* di sisi kanal—diidentifikasi sebagai pilihan yang paling ekonomis, tahan lama, dan dapat diterapkan secara praktis.

2. Metode Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis mulai dari pengumpulan data dasar, pemodelan alternatif solusi tumpuan, hingga penilaian kelayakan dan rekomendasi. Dengan pendekatan ini, diharapkan penelitian dapat memberikan hasil yang terukur, objektif, serta mendukung pemilihan desain struktur penopang PLTHk yang paling sesuai dengan kondisi teknis, lingkungan, dan ekonomis.

Pemilihan desain struktur dalam proyek konstruksi merupakan tahapan krusial yang memerlukan pendekatan sistematis agar keputusan yang diambil dapat memberikan hasil yang optimal, baik dari segi teknis maupun ekonomis. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah metode matriks keputusan (Decision Matrix Method), di mana alternatif desain dibandingkan berdasarkan sejumlah kriteria yang telah ditentukan. Kriteria tersebut biasanya mencakup aspek kekuatan struktur, ketahanan terhadap korosi, kemudahan konstruksi, biaya, serta dampak lingkungan. Setiap kriteria diberikan bobot tertentu sesuai tingkat kepentingannya, lalu alternatif desain dievaluasi dan diberi skor sehingga diperoleh peringkat akhir.

Dalam konteks pemilihan desain tumpuan Pembangkit Listrik Tenaga Hidrokinetik (PLTHk), penggunaan matriks ini menjadi relevan mengingat kondisi lingkungan yang kompleks, seperti saluran dengan lebar 22 meter, perbedaan elevasi tepi kanal 3 meter, serta arus air mencapai 2 m/s yang menuntut pertimbangan khusus terhadap stabilitas dan ketahanan struktur.



Gambar 2 : Diagram Penelitian
Sumber : Data Pribadi (2025)

Keandalan hasil penilaian metode matriks sangat dipengaruhi oleh kompetensi tim penilai yang mengisi matriks. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, pengisian matriks dilakukan oleh tim yang memiliki pengalaman lebih dari 10 tahun dalam bidang konstruksi, khususnya struktur dan material. Pengalaman ini penting agar bobot dan skor yang diberikan tidak hanya berdasarkan pertimbangan teoritis, tetapi juga didukung oleh praktik empiris dan pembelajaran dari kasus-kasus nyata di lapangan. Metode matriks telah terbukti efektif dalam pengambilan keputusan teknik sipil, karena dapat menggabungkan penilaian kuantitatif dan kualitatif dengan transparan serta meminimalkan subjektivitas individu [4].

Beberapa penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa penerapan metode matriks dalam pemilihan desain infrastruktur mampu meningkatkan akurasi keputusan dan mengurangi risiko kegagalan struktural. Misalnya, studi oleh [5] menekankan bahwa decision matrix approach dapat membantu mengevaluasi material konstruksi yang beroperasi dalam kondisi lingkungan ekstrem. Selain itu, penelitian oleh [6] menegaskan bahwa penggunaan metode ini dalam pemilihan metode konstruksi jembatan memberikan hasil yang lebih objektif dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Dengan demikian, metode matriks dipandang sebagai pendekatan yang tepat dalam menentukan model tumpuan PLTHK pada saluran kanal PLTU.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengukuran Kecepatan Aliran

Pengukuran kecepatan aliran adalah proses untuk menentukan seberapa cepat suatu fluida (cairan atau gas) bergerak melalui suatu titik atau bagian dari suatu sistem. Pengukuran kecepatan aliran di saluran dilakukan dengan menggunakan alat Tatonas Universal Current Meter TH-031 tipe baling-baling. Setelah alat siap, selanjutnya pengukuran dilakukan melalui jembatan eksisting dengan tetap memperhatikan keselamatan kerja (K3). Pengukuran kecepatan aliran dilakukan di bagian sisi kiri dan sisi kanan saluran. Baling-baling (rotor) current meter dipastikan terendam sepenuhnya dalam air dan menghadap ke arah arus. Dalam kasus ini, baling-baling berada di kedalaman ± 30 cm dari permukaan aliran. Kedalaman ini dipilih karena kecepatan aliran terbesar terjadi pada permukaan aliran. Pembacaan data kecepatan arus berdasarkan yang ditampilkan pada layar unit display dan mencatat hasil pengukurannya. Untuk mendapatkan data yang lebih akurat, dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali pada setiap lokasi. Dari hasil pengukuran kecepatan aliran, didapatkan kecepatan sebesar 2,0292 m/dt di sisi kiri saluran dan kecepatan aliran sebesar 1,0831 m/dt di sisi kanan saluran.



Gambar 3 : Kiri : Alat Current Meter, Kanan : Proses pengukuran arus kanal.
 Sumber : Dokumentasi Pribadi (2025)

3.2 Pemilihan Desain Tumpuan PLTHk.

Kriteria yang digunakan dalam pendekatan pemilihan beberapa alternatif desain Struktur Penopang Turbin PLTHk pada sistem kanal PLTU antara lain:

1. Ketahanan Korosi: Durabilitas di lingkungan air laut. : Bobot 5%
2. Pengaruh Arus Deras : Bobot 10%
3. Kemudahan Konstruksi: Waktu, peralatan, dan dampak pada operasional turbin. Bobot 10%
4. Lifetime/ Daya Tahan : Bobot 15%
5. Kapasitas Beban Dinamik : Bobot 10%
6. Biaya: Konstruksi dan perawatan jangka Panjang : Bobot 25%, 10%
7. Durasi Konstruksi : Bobot 5%
8. Estetika: Kompatibilitas dengan infrastruktur eksisting dan akses perawatan : Bobot 5%
9. Pemeliharaan konstruksi : Bobot 5%
10. Aksesibilitas maintenance turbin : Bobot 10%

3.2.1 Deskripsi Alternatif Desain

Setelah melakukan inspeksi lapangan secara menyeluruh terhadap kondisi eksisting Pembangkit Listrik Tenaga Hidrokinetik (PLTHk)—termasuk observasi terhadap tata letak struktur jembatan yang ada, mekanisme operasional, dan kekuatan struktur—diperoleh empat alternatif solusi penggantian sistem penopang. Alternatif pertama (**Model 1**) adalah penggantian struktur jembatan eksisting dengan girder beton bertulang pada elevasi rata dengan permukaan jalan, dibarengi dengan pembongkaran sebagian dinding saluran untuk menjaga kontinuitas aliran air. Alternatif kedua (**Model 2**) adalah girder beton bertulang pada elevasi di atas permukaan jalan, yang meskipun membutuhkan modifikasi geometri saluran lebih besar, menawarkan perlindungan tambahan terhadap limpasan air. Alternatif ketiga (**Model 3**) menerapkan sistem pracetak beton bertulang berbentuk huruf U (U-girder), yang memungkinkan pelaksanaan konstruksi lebih cepat dan kontrol kualitas lebih baik berkat fabrikasi di pabrik. Alternatif keempat (**Model 4**) adalah sistem pracetak beton bertulang berbentuk U terbalik dengan sel tunggal (single-cell), ditempatkan di samping saluran sehingga memberikan fleksibilitas tinggi dalam adaptasi terhadap geometri kanal dan meminimalkan hambatan terhadap aliran.

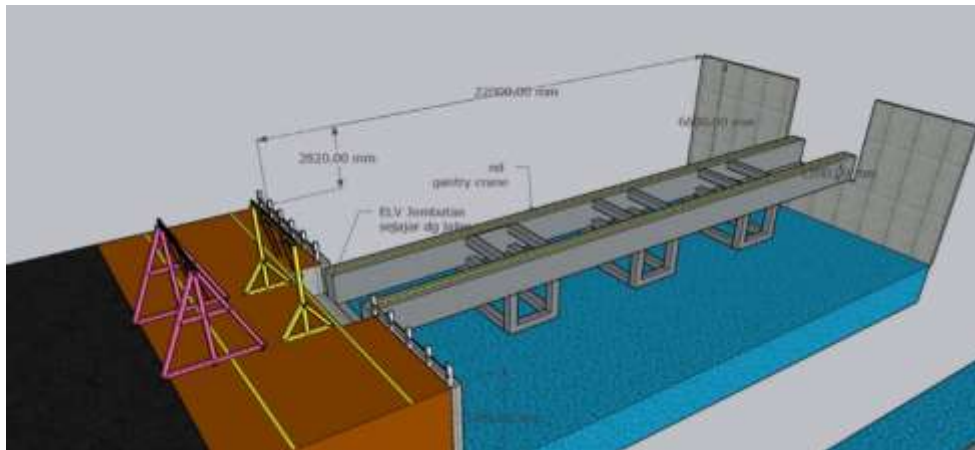
Berbagai studi terbaru mendukung keunggulan desain pracetak U-girder untuk struktur jembatan, terutama dalam konteks efisiensi material dan durabilitas. Chandane et al. menunjukkan bahwa konstruksi U-girder memiliki efisiensi material tinggi yang menurunkan konsumsi beton dan baja hingga 20 %, serta menyederhanakan proses konstruksi berkat desain yang tidak memerlukan parapet tambahan [7]. Selain itu, Wang dan Kim mengulas secara sistematis keunggulan prestressed tub girders (tur-sungai) dalam konteks struktur jembatan yang tahan lama dan minim gangguan lalu lintas selama konstruksi, serta lebih efisien dari segi biaya siklus hidup [8]. Selain pertimbangan material, aspek dinamis dan performa keandalan struktur juga penting—studi kontemporer menunjukkan bahwa analisis keandalan dinamis terhadap struktur beton pracetak sangat relevan untuk memastikan performa jangka panjang di lingkungan yang terpapar beban variatif [9].

Dengan demikian, keempat alternatif desain tersebut menyediakan kerangka pilihan yang solid, yang selanjutnya dapat dievaluasi menggunakan metode penilaian berbasis matriks keputusan (decision matrix), memperhitungkan kriteria seperti ketahanan korosi, stabilitas hidrodinamik, kecepatan konstruksi,

dan biaya. Penilaian tersebut, apabila dilakukan oleh tim ahli struktur dan bahan dengan pengalaman lebih dari 10 tahun, akan memperkuat validitas hasil dan memastikan pemilihan solusi struktur tumpuan PLTHK yang paling optimal dan berkelanjutan.

3.3 Model Tumpuan 1

Pada Model 1, penyesuaian elevasi girder dan jalan memerlukan pelubangan dinding beton, namun mutu beton yang tinggi berisiko menimbulkan retak karena sifat getasnya. Meski demikian, desain ini tetap unggul karena menghasilkan tampilan rapi dengan elevasi sejajar jalan serta tidak memerlukan modifikasi crane eksisting. Dari sisi pelaksanaan, metode dapat mengombinasikan sistem pracetak dan cor di tempat (cast in situ) dengan pemanfaatan jembatan eksisting sebagai perancah, sehingga efisiensi waktu, biaya, dan kualitas konstruksi tetap terjaga. [10]



Gambar 4 : Model Tumpuan 1, dengan elevasi rata dengan jalan.
 Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

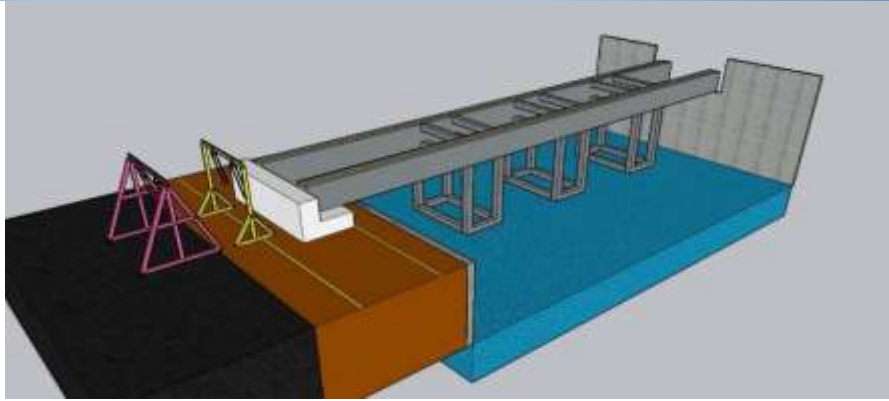
Tabel 1. Penilaian Kriteria Model 1

No	Kriteria	Bobot	Model 1
1	Ketahanan Korosi	5%	4,00
2	Pengaruh Arus Deras	10%	3,50
3	Kemudahan Konstruksi	10%	2,50
4	Lifetime / Daya Tahan	15%	4,00
5	Kapasitas Beban Dinamik	10%	3,75
6	Biaya	25%	3,50
7	Durasi Konstruksi	5%	3,25
8	Estetika	5%	3,25
9	Pemeliharaan Jembatan	5%	3,75
10	Aksesibilitas maintenance turbin	10%	3,00

Sumber : Hasil Analisis (2025)

3.4 Model Tumpuan 2

Pada **Model 2**, diperlukan pelubangan pada dinding kanan untuk menyesuaikan elevasi, namun hal ini berisiko menimbulkan retak pada beton di sekitarnya. Kelebihan desain ini adalah minim pelubangan dinding serta tetap memberi ruang bagi jalur kabel di sisi kiri saluran. Dari segi pelaksanaan, metode dapat menggunakan sistem **pracetak** maupun **cor di tempat (cast in situ)** dengan memanfaatkan jembatan eksisting sebagai perancah untuk meningkatkan efisiensi. Meski demikian, kelemahan utamanya terletak pada aspek estetika yang kurang baik serta kolom tarik yang cukup panjang (± 4 m), sehingga perlu solusi penggunaan material non-concrete atau kombinasi baja-beton dalam bentuk **struktur komposit** untuk menjaga kekuatan dan keamanan konstruksi.[11]



Gambar 5 : Model Tumpuan 2, Girder diletakkan lebih tinggi
 Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

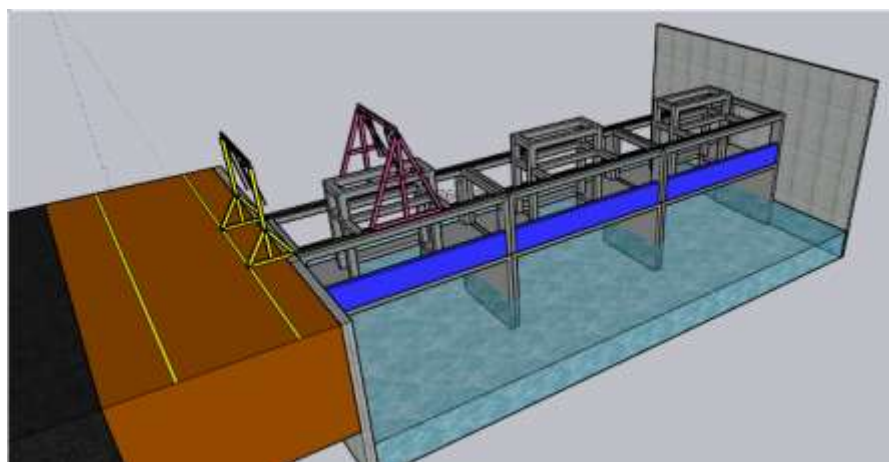
Tabel 2. Penilaian Kriteria Model 2

No	Kriteria	Bobot	Model 2
1	Ketahanan Korosi	5%	4,25
2	Pengaruh Arus Deras	10%	3,75
3	Kemudahan Konstruksi	10%	3,25
4	Lifetime / Daya Tahan	15%	4,00
5	Kapasitas Beban Dinamik	10%	3,50
6	Biaya	25%	3,00
7	Durasi Konstruksi	5%	3,00
8	Estetika	5%	2,25
9	Pemeliharaan Jembatan	5%	3,50
10	Aksesibilitas maintenance turbin	10%	2,25

Sumber : Hasil Analisis (2025)

3.5 Model Tumpuan 3

Model 4 memiliki keunggulan karena mampu menjawab poin penting jika dinding saluran bermutu tinggi, rawan korosi, arus yang tinggi, dan sekaligus memudahkan maintenance di masa depan dengan memanfaatkan saluran beton mutu tinggi sebagai dudukan turbin tanpa perlu pondasi baru atau pelubangan dinding eksisting. Meski demikian, perlu kajian terhadap potensi hanyutan arus dan kemiringan saluran agar pelat atas sejajar, sementara metode pelaksanaannya dengan pengecoran tiga segmen pracetak berbentuk U yang kemudian dipasang bertahap menggunakan mobile crane, dinilai masih relatif sulit dan memiliki risiko keselamatan yang lebih tinggi dibanding metode konvensional sehingga memerlukan pengawasan ketat [12]



Gambar 6 : Model Tumpuan 3, Sistem Beton Bertulang model U melintang pada kanal.
 Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

Tabel 3. Penilaian Kriteria Model 3

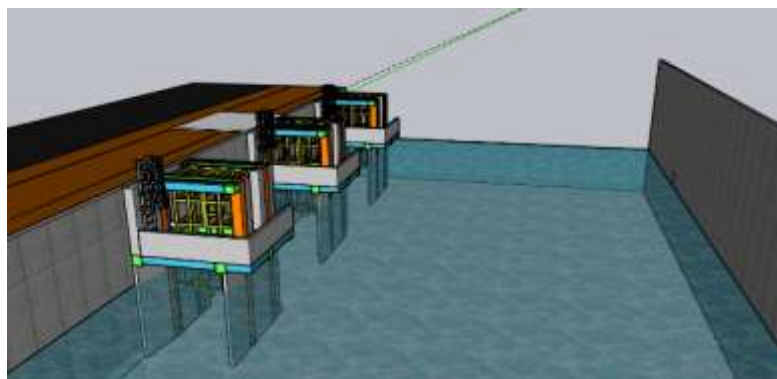
No	Kriteria	Bobot	Model 3
1	Ketahanan Korosi	5%	4,00
2	Pengaruh Arus Deras	10%	2,75
3	Kemudahan Konstruksi	10%	4,00
4	Lifetime / Daya Tahan	15%	4,00
5	Kapasitas Beban Dinamik	10%	4,50
6	Biaya	25%	2,75
7	Durasi Konstruksi	5%	3,25
8	Estetika	5%	4,00
9	Pemeliharaan Jembatan	5%	4,00
10	Aksesibilitas maintenance turbin	10%	4,00

Sumber : Hasil Analisis (2025)

3.6 Model Tumpuan 4

Model 4 mengadopsi prinsip desain yang sama seperti model 3, yaitu, memanfaatkan dinding saluran beton mutu tinggi sebagai dudukan turbin tanpa memerlukan pondasi baru atau pelubangan. Namun, orientasinya berbeda karena diposisikan memanjang di sepanjang kanal dekat jalan, memberikan manfaat signifikan dari sisi aksesibilitas dan keselamatan pemeliharaan: perawatan dapat dilakukan dari tepi jalan tanpa perlu peralatan khusus atau risiko kerja di atas air. Dari perspektif konstruksi, model ini juga lebih efisien dan ekonomis: pemasangan modular dapat dilakukan langsung dari sisi kanal, mengurangi penggunaan crane dan operasi berat lainnya, sehingga meningkatkan keselamatan kerja dan memangkas biaya pelaksanaan.

Studi tentang tilt-up dan pembangunan pracetak memanjang menunjukkan bahwa metode ini mempercepat waktu konstruksi, mengurangi kompleksitas logistik, serta menurunkan risiko kecelakaan di lokasi kerja [13]. Selain itu, pengaturan crane di jalur darat telah terbukti lebih aman dibanding penggunaan crane di atas saluran, seperti dimodelkan pada simulasi penempatan crane tetap terhadap truk transport [14]. Di lingkungan terpapar pada kondisi pantai atau semi-marin, penggunaan struktur pracetak terintegrasi di sisi kanal terbukti meningkatkan ketahanan terhadap korosi sekaligus memudahkan pemeliharaan jangka panjang [15].



Gambar 7 : Model Tumpuan 4, Sistem Beton Bertulang model U memanjang pada kanal.

Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

Tabel 4. Penilaian Kriteria Model 4

No	Kriteria	Bobot	Model 4
1	Ketahanan Korosi	5%	4,00
2	Pengaruh Arus Deras	10%	2,75
3	Kemudahan Konstruksi	10%	4,00
4	Lifetime / Daya Tahan	15%	4,00
5	Kapasitas Beban Dinamik	10%	4,50
6	Biaya	25%	4,50
7	Durasi Konstruksi	5%	4,50
8	Estetika	5%	4,00
9	Pemeliharaan Jembatan	5%	4,50
10	Aksesibilitas maintenance turbin	10%	4,50

Sumber : Hasil Analisis (2025)

3.7 Pengumpulan Nilai dan Pemilihan Solusi Tumpuan

Berdasarkan hasil analisis multi-kriteria dengan bobot yang telah ditentukan, diperoleh skor akhir sebagai berikut: Model 1 = 3,46, Model 2 = 3,28, Model 3 = 3,58, dan Model 4 = 4,15. Nilai ini menunjukkan bahwa Model 4 merupakan alternatif paling optimal dibandingkan tiga model lainnya. Penjelasan lebih detail dapat diberikan sebagai berikut :

Tabel 5. Rekapitulasi hasil penilaian masing – masing model PLTHk.

No	Kriteria	Bobot	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
1	Ketahanan Korosi	5%	4	4,3	4	4
2	Pengaruh Arus Deras	10%	3,5	3,8	2,8	2,75
3	Kemudahan Konstruksi	10%	2,5	3,3	4	4
4	Lifetime / Daya Tahan	15%	4	4	4	4
5	Kapasitas Beban Dinamik (Ketahanan Terhadap Getaran)	10%	3,8	3,5	4,5	4,5
6	Biaya	25%	3,5	3	2,8	4,5
7	Durasi Konstruksi	5%	3,3	3	3,3	4,5
8	Estetika	5%	3,3	2,3	4	4
9	Pemeliharaan Jembatan	5%	3,8	3,5	4	4,5
10	Aksesibilitas maintenance turbin	10%	3	2,3	4	4,5
Total		100%	3,46	3,28	3,58	4,15

Sumber : Hasil Analisis (2025)

a. Ketahanan Korosi & Lifetime (Dayatahan)

Seluruh model memperoleh skor setara (4,0), menandakan semua alternatif memiliki performa yang relatif sama pada aspek ini.

b. Pengaruh Arus Deras

Model 4 mendapat skor terendah (2,75) dibanding Model 2 (3,8) dan Model 1 (3,5). Artinya, Model 4 relatif lebih rentan terhadap kondisi arus deras. Namun, faktor ini hanya berbobot 10%, sehingga dampaknya terhadap hasil akhir lebih kecil.

c. Kemudahan Konstruksi & Durasi

Model 4 mendapatkan skor maksimal (4,0 – 4,5) dibandingkan model lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa metode pelaksanaan lebih praktis, cepat, dan efisien dibanding alternatif lain.

d. Kapasitas Beban Dinamik (Ketahanan Getaran)

Model 3 (4,5) dan Model 4 (4,5) unggul dalam aspek ini, menandakan keduanya lebih andal terhadap beban dinamis dan getaran.

e. Biaya, Pemeliharaan, dan Aksesibilitas Maintenance Turbin

Model 4 memperoleh skor tertinggi (4,5) pada ketiga kriteria ini, yang menjadi faktor pembeda paling dominan karena bobot biaya mencapai 25%. Dengan demikian, meskipun kurang unggul dalam menghadapi arus deras, Model 4 jauh lebih efisien dari segi ekonomi, operasional, dan keberlanjutan pemeliharaan.

f. Rekomendasi

Dengan skor total tertinggi (4,15), Model 4 direkomendasikan sebagai pilihan paling layak untuk implementasi. Keunggulannya terletak pada efisiensi biaya, kemudahan pelaksanaan, kecepatan konstruksi, serta aksesibilitas perawatan turbin. Namun, karena ada kelemahan pada aspek pengaruh arus deras, maka diperlukan kajian teknis tambahan berupa analisis hidrodinamika dan strategi perlindungan struktur untuk memastikan keandalan jangka panjang di lokasi pembangunan.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan serangkaian tahap penilaian terhadap beberapa alternatif desain struktur, diperoleh kesimpulan bahwa Model 1 dan Model 2 sebenarnya dapat dijadikan sebagai solusi pengganti desain, namun keduanya dinilai kurang efisien dari sisi kemudahan konstruksi, potensi getaran akibat beban dinamik, serta keterbatasan aksesibilitas bagi pengguna. Model 3 menunjukkan hasil penilaian yang baik pada beberapa aspek dan bahkan memperoleh nilai rata-rata tertinggi secara keseluruhan. Meski demikian,

perhatian khusus perlu diberikan pada potensi hanyutan, yang pada dasarnya masih dapat diatasi melalui perhitungan teknis terkait gaya hanyutan benda. Di sisi lain, Model 4 dinilai sebagai solusi yang sangat baik karena menawarkan peluang pengembangan lebih lanjut (R&D) dengan biaya yang relatif lebih rendah, sekaligus memiliki keunggulan dalam metode pelaksanaan dan kemudahan perawatan (maintenance). Sementara itu, Model 4 juga direkomendasikan untuk diterapkan, khususnya secara massal di sepanjang kanal, karena dinilai efektif, ekonomis, serta mampu meningkatkan aspek aksesibilitas dan efisiensi pelaksanaan konstruksi.

5. Referensi

- [1] R. Bayuaji, M. Sigit Darmawan, N. A. Husin, R. B. Anugraha, A. Budipriyanto, and M. G. Stewart, "Corrosion damage assessment of a reinforced concrete canal structure of power plant after 20 years of exposure in a marine environment: A case study," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 84, pp. 287–299, 2018, doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.014.
- [2] H. G. Kim and B. J. Kim, "Design optimization of conical concrete support structure for offshore wind turbine," *Energies*, vol. 13, no. 18, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/en13184876.
- [3] W. Morris, "Corrosion of Reinforced Concrete Exposed to Marine Environment," *Corros. Rev.*, vol. 20, no. 6, pp. 469–508, 2002, doi: 10.1515/Corrrev.2002.20.6.469.
- [4] T. L. Saaty and K. P. Kearns, *The Analytic Hierarchy Process*, no. July. 1985. doi: 10.1016/b978-0-08-032599-6.50008-8.
- [5] X. Zhu, X. Meng, and M. Zhang, "Application of multiple criteria decision making methods in construction: A systematic literature review," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 27, no. 6, pp. 372–403, 2021, doi: 10.3846/jcem.2021.15260.
- [6] V. Balali, A. Mottaghi, O. Shoghli, and M. Golabchi, "Selection of appropriate material, construction technique, and structural system of bridges by use of multicriteria decision-making method," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2431, no. 1, pp. 79–87, 2014, doi: 10.3141/2431-11.
- [7] M. J. Chandane, S. R. Suryawanshi, P. V. P. Bhusare, and P. Y. R. Suryavanshi, "Comparative Analysis of U-Girders and Conventional Psc I Girders for Metro Rapid Transit Systems: a Cost and Structural Efficiency Perspective," *Int. J. Appl. Eng. Technol. Copyrights @ Rom. Sci. Publ. Ins.*, vol. 5, no. 4, p. 1856, 2023.
- [8] J. Wang and Y. J. Kim, "A state-of-the-art review of prestressed concrete tub girders for bridge structures," *J. Infrastruct. Preserv. Resil.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1186/s43065-022-00058-1.
- [9] Z. Zhang, H. Li, J. Xiong, F. Wang, L. Wei, and L. Ke, "Determination of the Target Reliability Index of the Concrete Main Girder of Long-Span Structures Based on Structural Design Service Life," *Buildings*, vol. 12, no. 12, 2022, doi: 10.3390/buildings12122249.
- [10] L. Wang *et al.*, "Full-Scale Prefabrication and Non-Destructive Quality Monitoring of Novel Bridge Substructure for 'Pile-Column Integration,'" *Buildings*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/buildings12060715.
- [11] K. H. Yang, H. W. Lee, A. K. Alkaabi, and S. J. Kwon, "Temperature Effect on Service Life of Reinforced Concrete (RC) Structure Under Chemical Erosion: Deterministic and Probabilistic Approach," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 9, pp. 1–16, 2025, doi: 10.3390/app15094816.
- [12] C. Ahmad, F. Nugraheni, and Faisal, "Development of work safety procedures for PCI Girder installation using interactive analysis models," *Teknisia*, vol. 29, no. 1, pp. 24–36, 2024, doi: 10.20885/teknesia.vol29.iss1.art3.
- [13] A. Salih, C. C. Wang, R. Tian, and M. Mojtahedi, "A Case-Study-Based Comparative Analysis of Using Prefabricated Structures in Industrial Buildings," *Buildings*, vol. 15, no. 14, pp. 1–17, 2025, doi: 10.3390/buildings15142416.
- [14] S. Malaikrisanachalee, N. Wongwai, and N. Butsan, "Optimal Position of Fixed crane and Dynamic Transport Truck Parking in Precast Building Construction Project," 2024, doi: 10.20944/preprints202403.1121.v1.
- [15] I. Segura, S. Cavalaro, A. de la Fuente, A. Aguado, and V. Alegre, "Service-Life Assessment of Existing Precast Concrete Structure Exposed to Severe Marine Conditions," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 30, no. 3, 2016, doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000765.