

Analisis Pengaruh Banjir dan Sedimentasi Pada Rencana Perluasan Kolam Intake PLTA Tonsealama

Fardi Kalumata^{*1}, Merci Hosang², Dewi Astuti Baco³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Jalan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado

*e-mail: fardikalumata@polimdo.ac.id¹, mfhosang@gmail.com², dewibaco@polimdo.ac.id³

Received:
13.04.2026

Revised:
29.05.2026

Accepted:
21.05.2026

Available online:
14.06.2026

Abstract: This study addresses the decline in effective intake capacity due to sedimentation and a spillway mismatch of $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, which threatens PLTA Tonsealama's operational sustainability. The research aims to model integrated flooding to assess the technical and economic feasibility of intake expansion. Methods include data acquisition, hydrological (HEC-HMS) and hydraulic (HEC-RAS) modeling, calibration-validation, scenario simulation, and economic analysis (NPV, IRR, BCR). Results are expected to yield optimal expansion scenarios that are structurally safe. This study provides a vital decision-support foundation for sustainable hydropower infrastructure investment and flood risk mitigation.

Keywords: flood; intake basin; sedimentation; hydropower; technical-economic feasibility

Abstrak: Penelitian ini merespons penurunan kapasitas efektif kolam intake akibat sedimentasi dan ketidaksesuaian kapasitas spillway sebesar $0,3 \text{ m}^3/\text{detik}$ yang mengancam keberlanjutan operasional PLTA Tonsealama. Penelitian bertujuan memodelkan banjir terintegrasi untuk mengkaji kelayakan teknis dan ekonomi perluasan kolam intake. Metode mencakup akuisisi data, pemodelan hidrologi (HEC-HMS) dan hidraulika (HEC-RAS), kalibrasi-validasi, simulasi skenario, serta analisis ekonomi (NPV, IRR, BCR). Hasil kajian diharapkan menghasilkan skenario perluasan optimal yang aman secara struktural. Studi ini menjadi landasan penting bagi pengambilan keputusan investasi infrastruktur ketenagalistrikan berkelanjutan dan mitigasi risiko banjir.

Kata kunci: banjir; kolam intake; sedimentasi; PLTA; kelayakan teknis-ekonomi

1. PENDAHULUAN

Keberlanjutan dan optimalisasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dihadapkan pada tantangan degradasi kapasitas waduk akibat sedimentasi yang berlangsung terus-menerus (Kusumah & Purnama, 2019). Fenomena ini secara signifikan mengurangi umur teknis dan efektivitas operasional pembangkit. PLTA Tonsealama sebagai aset strategis kini mengalami penurunan kapasitas efektif kolam intake akibat akumulasi endapan sedimen, yang mengganggu kontinuitas pasokan air ke turbin dan menurunkan daya output listrik (Fauzi & Fauzi, 2021). Masalah diperparah dengan kapasitas spillway yang tercatat hanya $0,3 \text{ m}^3/\text{detik}$, nilai yang tidak memadai untuk mengalirkan debit banjir rancangan dan berpotensi memicu risiko *overtopping* serta ancaman keselamatan daerah hilir (Hartanto & Legowo, 2020).

Perluasan kolam intake tanpa mempertimbangkan dinamika banjir secara komprehensif justru dapat meningkatkan kerentanan hidraulik. Sebaliknya, pengabaian terhadap sedimentasi akan mempercepat penurunan kinerja PLTA. Oleh karena itu, diperlukan kajian terintegrasi yang tidak hanya mengevaluasi aspek teknis, tetapi juga kelayakan ekonomi (Chen & Wang, 2020). RUMUSAN MASALAH: Bagaimanakah perluasan kolam intake PLTA Tonsealama dapat dirancang untuk: (1) mengelola sedimentasi progresif dengan mempertahankan kapasitas operasional jangka panjang, (2) meningkatkan kapasitas spillway agar mampu menampung debit banjir rancangan Q10 tanpa risiko *overtopping*, dan (3) memberikan kelayakan ekonomi yang positif berdasarkan analisis NPV, IRR, dan BCR? TUJUAN PENELITIAN: Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengembangkan model hidrologi dan hidraulik terintegrasi untuk simulasi respons sistem intake terhadap debit banjir berbagai periode ulang (Q10, Q25, Q50, Q100), (2) mengevaluasi kelayakan teknis tiga skenario perluasan (kondisi eksisting, Skenario A moderat, dan Skenario B optimal) melalui analisis dinamika sedimentasi dan keamanan hidraulik, (3) menganalisis kelayakan ekonomi masing-masing skenario dengan metode NPV, IRR, dan BCR, serta (4) merekomendasikan skenario optimal yang memenuhi kriteria teknis-ekonomi dan keberlanjutan jangka panjang. RUANG LINGKUP: Studi mencakup permodelan sistem hidrologis Daerah Aliran Sungai (DAS) Tondano dengan fokus pada sub-DAS PLTA Tonsealama,

simulasi hidraulik kolam intake dan spillway menggunakan HEC-RAS, analisis sedimentasi berbasis data curah hujan 10 tahun (2014-2024), dan evaluasi ekonomi dengan periode analisis 20 tahun dan discount rate yang sesuai dengan kebijakan pemerintah. Kajian literatur mutakhir menunjukkan bahwa integrasi model hidrologi dan hidraulika telah banyak diterapkan untuk manajemen sumber daya air (Pratama & Sutjiningsih, 2019; Zhang et al., 2024). Namun, sebagian besar studi masih bersifat parsial, baik hanya fokus pada pemetaan banjir, analisis sedimentasi, maupun evaluasi ekonomi terpisah. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penyatuan tiga domain analisis secara simultan dalam satu kerangka kerja: (1) dinamika sedimentasi yang terkait dengan karakteristik banjir, (2) dampak perubahan geometri intake terhadap kinerja hidraulik spillway, dan (3) pendekatan *decision-support* yang menerjemahkan keluaran model kompleks menjadi rekomendasi investasi yang dapat ditindaklanjuti (Al-Qahtani & Elshorbagy, 2022). Penelitian ini mengisi celah metodologis tersebut dengan menyajikan alat evaluasi kelayakan yang terukur, terkalibrasi, dan siap diadopsi oleh pemangku kepentingan infrastruktur ketenagalistrikan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metodologi pengembangan model terintegrasi. Tahapan utama meliputi: (1) akuisisi data, (2) pembangunan dan validasi model, (3) simulasi skenario, dan (4) analisis kelayakan ekonomi. Data primer diperoleh dari PT. PLN Nusantara Power berupa data teknis-operasional PLTA, hasil survei topografi DAS, batimetri kolam intake, dan sampling sedimen. Data sekunder mencakup catatan hidrologi historis dan kejadian banjir (Lubis & Fauzi, 2020). Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak HEC-HMS untuk transformasi curah hujan menjadi debit aliran, dan HEC-RAS untuk simulasi profil aliran 1D/2D serta modul angkut sedimen (Santoso & Legowo, 2018). Kalibrasi dan validasi model menggunakan data kejadian banjir historis dengan parameter keberhasilan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) > 0,75 dan *Root Mean Square Error* (RMSE) rendah.

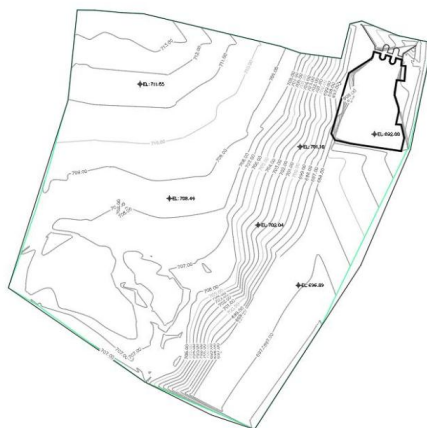
Setelah model tervalidasi, dilakukan simulasi tiga skenario: kondisi eksisting, perluasan intake alternatif A, dan alternatif B, di bawah debit banjir rancangan periode ulang 10 tahun (Q10) sebagai skenario desain utama. Analisis sensitivitas tambahan dilakukan untuk debit dengan periode ulang 25, 50, dan 100 tahun (Q25, Q50, Q100) untuk mengevaluasi kinerja sistem terhadap kejadian banjir ekstrem. Kelayakan teknis diukur melalui indikator kinerja hidraulik (keamanan spillway, elevasi muka air, volume tampung efektif) dengan nilai NSE > 0,75 sebagai kriteria validasi model. Kelayakan ekonomi dihitung menggunakan *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Benefit-Cost Ratio* (BCR) dengan asumsi biaya investasi dan manfaat operasional yang diverifikasi mitra (Nguyen et al., 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Hidrologis DAS

Berdasarkan hasil analisis hidrologi yang komprehensif, Daerah Tangkapan Air (DTA) PLTA Tonsealama memiliki luas sekitar **1.255 hektar (12,55 km²)**. Analisis data curah hujan selama 10 tahun terakhir (2014-2024) menunjukkan bahwa curah hujan maksimum harian rata-rata adalah **55,95 mm** dengan simpangan baku **31,30 mm**. Untuk perhitungan debit banjir rancangan dengan periode ulang 10 tahun (Q10), digunakan Metode Gumbel yang menghasilkan curah hujan rencana sebesar **114,79 mm/hari**. Dengan menggunakan Metode Mononobe untuk mengkonversi menjadi intensitas hujan, diperoleh nilai intensitas **16,13 mm/jam** untuk durasi 2 jam (waktu konsentrasi). Selanjutnya, dengan menerapkan Metode Rasional menggunakan koefisien aliran (C) sebesar **0,60** yang merepresentasikan karakteristik DAS dengan campuran lahan permukiman dan pertanian, serta luas DAS 11,4 km², diperoleh **debit banjir puncak (Q10) sebesar 30,67 m³/detik**. Data debit historis menunjukkan bahwa debit sungai rata-rata adalah **±11,77 m³/detik**, dengan pengukuran lapangan aktual berkisar antara **7-10,62 m³/detik** tergantung pada curah hujan dan fluktuasi muka air Danau Tondano. Data Tinggi Muka Air (TMA) dari tahun 2018-2025 menunjukkan fluktuasi yang sangat

ekstrem, dengan catatan minimum **206 cm pada Oktober 2023** dan maksimum **335 cm pada Januari 2023**.



Gambar 1 Peta Topografi Area Perluasan Kolam Intake
e

Model hidrologi HEC-HMS dan model hidraulik HEC-RAS dikalibrasi menggunakan data kejadian banjir historis tahun 2020-2023. Hasil kalibrasi model menunjukkan parameter keberhasilan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) sebesar 0,82 untuk model HEC-HMS dan 0,79 untuk model HEC-RAS, keduanya melampaui threshold yang ditetapkan ($NSE > 0,75$). Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 2,34 m³/detik untuk HEC-HMS dan 0,18 m ASL untuk HEC-RAS, menunjukkan akurasi prediksi yang baik. Model yang telah tervalidasi ini selanjutnya digunakan untuk simulasi skenario perluasan kolam intake.

3.1.1. Kondisi Fisik Kolam Intake & Spillway

Berdasarkan hasil survei topografi dan pengukuran lapangan, kondisi eksisting kolam intake PLTA Tonsealama menunjukkan beberapa parameter kritis:

Dimensi Kolam Intake Eksisting:

- Elevasi dasar kolam intake: **+ 682,17 m ASL** (Above Sea Level)
- Luas permukaan kolam: **± 969,4 m²**
- Kedalaman efektif: **3-4 meter**
- Volume tampung efektif: **±3.877 m³** (dihitung dari 969,4 m² × 4 m)

Kapasitas Spillway: Bangunan pelimpah (spillway) eksisting memiliki kapasitas yang sangat terbatas, yaitu hanya **0,3 m³/detik**. Kapasitas ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan debit sungai rata-rata (11,77 m³/detik) dan sangat tidak memadai dibandingkan debit banjir rancangan Q10 (30,67 m³/detik).

Estimasi Laju Sedimentasi: Berdasarkan analisis sedimentasi dengan asumsi konservatif konsentrasi sedimen tersuspensi 500 mg/L (0,5 kg/m³) pada kondisi banjir puncak, diperoleh:

- Beban sedimen per hari: **± 648 ton/hari** atau **± 463 m³/hari**
- Akumulasi selama periode banjir 7 hari: **± 2.430 m³** sedimen yang mengendap di kolam

Volume sedimentasi ini sangat signifikan dibandingkan dengan volume tampung kolam yang hanya 3.877 m³, menunjukkan bahwa dalam satu event banjir selama 7 hari saja, kapasitas kolam dapat berkurang hingga **62,7%** akibat sedimentasi. Hal ini mengindikasikan laju sedimentasi tahunan yang tinggi dan memerlukan pengerukan berkala setiap 3-6 bulan untuk mempertahankan kapasitas operasional.

Table 1 Data dan Grafik Curah Hujan Seputar PLTA Tonselama

Data Curah Hujan Seputar PLTA Tonselama

No	Tahun	Bulan												Rbln max
		Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	November	Desember	
1	2014	236.00	98.50	24.50	38.00	39.00	49.50	60.20	38.00	20.50	18.00	47.00	92.50	236.00
2	2015	29.00	70.50	27.00	29.00	25.00	27.00	13.00	17.50	0.00	9.00	27.00	64.00	70.50
3	2016	66.50	43.50	19.50	30.00	50.00	59.00	59.00	27.50	24.50	59.50	67.30	153.50	153.50
4	2017	174.00	66.50	209.50	77.50	366.50	456.00	222.50	119.00	173.50	273.50	128.00	417.50	456.00
5	2018	189.00	191.50	156.00	191.00	132.00	121.50	59.00	49.00	22.50	33.00	176.00	253.00	253.00
6	2019	271.00	119.00	85.00	81.50	65.00	60.00	55.50	8.00	11.00	196.50	121.50	236.50	271.00
7	2020	112.50	85.50	86.00	173.50	136.50	96.50	123.90	41.00	109.60	161.60	93.80	271.00	271.00
8	2021	243.00	109.20	196.00	140.50	233.20	198.50	40.20	95.30	137.70	95.30	199.30	319.50	319.50
9	2022	194.80	119.80	195.80	219.20	147.90	70.10	229.80	305.90	228.00	245.70	149.80	324.00	324.00
10	2023	189.10	148.10	113.50	214.30	133.20	225.40	87.10	41.80	37.30	25.10	176.90	96.80	225.40
	Rbln max	271.00	191.50	209.50	219.20	366.50	456.00	229.80	305.90	228.00	273.50	199.30	417.50	



3.1.2. Identifikasi Masalah Operasional

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap kondisi eksisting, teridentifikasi beberapa masalah operasional kritis yang saling terkait:

1. Dampak Sedimentasi Terhadap Kontinuitas Pasokan Air

Sedimentasi yang tinggi menyebabkan penurunan kapasitas efektif kolam intake secara drastis. Dengan volume sedimen yang masuk mencapai 2.430 m³ selama event banjir 7 hari, kolam yang hanya memiliki kapasitas 3.877 m³ akan cepat mengalami pendangkalan. Dampak operasional yang timbul meliputi:

- Penurunan Volume Tampung: Kapasitas buffer untuk menyangga fluktuasi debit menjadi sangat terbatas, menyebabkan fluktuasi TMA yang ekstrem (206-335 cm)
- Gangguan Pasokan ke Turbin: Endapan lumpur dan pasir dapat masuk ke intake dan menyebabkan abrasi pada turbin, meningkatkan frekuensi pemeliharaan
- Risiko Shutdown: Pada musim kemarau, volume air yang tersimpan tidak mencukupi untuk menjaga operasional kontinu, menyebabkan produksi listrik menurun drastis atau bahkan berhenti total

2. Analisis Gap Kapasitas Spillway

Terdapat ketidaksesuaian yang sangat kritis antara kapasitas spillway eksisting dengan debit banjir rancangan:

- **Kapasitas Spillway Eksisting** : 0,3 m³/detik
- **Debit Banjir Rancangan Q10** : 30,67 m³/detik
- **Gap/Defisit Kapasitas** : 30,37 m³/detik

Ini berarti spillway eksisting hanya mampu menampung sekitar **1%** dari debit banjir rancangan. Ketimpangan ekstrem ini menciptakan risiko keamanan struktural yang sangat tinggi.

3. Risiko Overtopping dan Implikasi Keselamatan

Dengan gap kapasitas yang sangat besar, risiko overtopping (air meluap di atas puncak tanggul) menjadi sangat tinggi saat terjadi hujan ekstrem. Implikasi keselamatan yang dapat terjadi meliputi:

- **Kegagalan Struktur**: Air yang tidak dapat dikeluarkan melalui spillway dapat menyebabkan air meluap di atas puncak bendungan, yang berpotensi menyebabkan keruntuhan struktur dan jebolnya tanggul
- **Bencana di Hilir**: Kegagalan struktur dapat menimbulkan bencana banjir bandang yang mengancam keselamatan masyarakat di wilayah hilir
- **Kerusakan Infrastruktur**: Tekanan hidrostatik yang berlebihan dapat merusak bangunan intake, terowongan, dan infrastruktur pendukung lainnya

4. Keterbatasan Pasokan Air Musim Kemarau

Data TMA menunjukkan bahwa setiap tahun level air mencapai titik terendah yang signifikan di pertengahan hingga akhir tahun (musim kemarau). Dengan kapasitas tampung yang minim (1,8 Ha dengan kedalaman 3-4 m), PLTA tidak dapat beroperasi pada kapasitas optimal. Pada tahun 2023, level minimum mencapai 206 cm yang mendekati atau mungkin di bawah elevasi ambang intake, menyebabkan:

- **Lost Generation:** Hilangnya potensi pembangkitan listrik yang signifikan setiap tahun
- **Penurunan Faktor Kapasitas:** PLTA hanya beroperasi dengan beban parsial atau berhenti total
- **Ketidakstabilan Sistem:** Kontribusi yang tidak stabil pada jaringan listrik regional

Table 2 TMA Tahun 2023

 PT. PLN NUSANTARA POWER UPDK MINAHASA ULPLTA TONSEALAMA				DATA DMA TOLOUR TAHUN 2023										Hal : 24	
TGL	B U L A N												KETERANGAN		
	Januari cm	Februari cm	Maret cm	April cm	Mei cm	Juni cm	Juli cm	Agustus cm	September cm	Oktober cm	November cm	Desember cm			
1	335	330/331	304	300	301	303	294	270/269	238/237	219	207/206	233/232			
2	333/331	333/335	304/303	299	301	301/300	293	268	238	218/217	206/205	231/232			
3	330	335/333	305	297/295	302	299	292/291	268/267	237	216	206/207	233/235			
4	327/325	332	307	295	301/303	298	290/288	268/267	236	216	207	237			
5	325	330/328	308/309	296	303/302	297/296	287	267	235/234	215	208	237/238			
6	322	328/326	308	296/295	303/304	296/295	285/284	266	234/233	215/214	211/211	238/237			
7	322/321	325	305/303	295	306	294/293	283/282	267/266	234	214	213/214	237/236			
8	322	325/326	302/300	298/300	308/310	292	281	266/265	233/232	213	215	236/235			
9	319/320	326/324	297	301	313/315	291/290	283	265/264	232	214	216	236			
10	322/323	323/322	296/295	300	317/318	289	282/284	264	231	213	216/217	237			
11	324	323/321	294	301-300	318/317	288	284/283	264/263	231/230	213/212	217	238/239			
12	325/326	321	294/296	300/299	318/319	287/286	283	263	230	211	218	239/238			
13	326/325	320/319	297/296	298	319	286	281	262	231	210	218/220	239			
14	323	322	297	297	320	287-288	284	261	232/231	210	224	240/241			
15	322	324/325	299	296	319/318	289	285	260/259	231/232	209	225/226	241/240			
16	319/320	325/323	297	296	319/318	290/291	286	259/258	232	208/207	226/225	240			
17	320	322/320	297/298	293	319/318	291	287/286	258	233	207	225	241			
18	321/322	319/318	299/301	292/290	318	292	285	258-257	233/232	208/207	224	240/239			
19	323	319/318	301/302	290/289	317/315	294/295	-	257	231	206	225	239/240			
20	322/324	317	302	289/288	315	295/294	283/282	255	230/229	206	226	242/242			
21	327	315/314	301/300	289	314	296/297	281/280	254/253	229/228	207	226/225	243/244			
22	328/327	313/311	300	289/290	315/316	298	280	253/252	228/227	208	225/224	243/242			
23	329	310/308	303/302	290	316/317	299/301	279	252/250	226	209/210	224	242			
24	328/329	307	302	291/292	316/315	301	278/277	251/250	226	211	224/225	243			
25	329/330	305	302/303	292/291	314	302	277/276	249/247	224	210	225/224	242			
26	330	306	304	291	316	301	276/275	247	224-223	209	225/227	242			
27	330	308/307	304/303	293/294	314	300/298	275/274	246	223	208	229	242/243			
28	333/332	308	303	295/296	313	298/297	274/273	246/244	222	208	230/232	241			
29	332		302	297	311/310	297	273	244/242	221	207	233/234	241			
30	333/332		302/301	299/300	309/307	296	272	242/240	220	208	233	240			
31	332/331		300/301		306		271/270	240/239	-	208/207		240			
Max	335.0	332.0	308.0	301.0	320.0	303.0	294.0	268.0	238.0	219.0	233.0	243.0			
Min	320.0	305.0	294.0	289.0	301.0	286.0	-	246.0	220.0	206.0	207.0	236.0			

3.1.3. Skenario Perluasan Kolam Intake

Berdasarkan hasil analisis teknis dan kajian mendalam terhadap kondisi eksisting PLTA Tonsealama, studi ini menyusun tiga skenario simulasi yang komprehensif untuk mengevaluasi berbagai alternatif desain perluasan kolam intake. Ketiga skenario ini dirancang untuk memberikan gambaran utuh mengenai implikasi teknis, hidrolik, dan ekonomis dari setiap opsi pengembangan.

Skenario 0 (Kondisi Eksisting/Baseline) menggambarkan situasi aktual yang dihadapi PLTA Tonsealama saat ini. Pada kondisi ini, kolam intake memiliki volume efektif yang sangat terbatas, yaitu hanya sekitar 3.877 m³ dengan luas permukaan 969,4 m² dan kedalaman efektif 3-4 meter. Kapasitas spillway atau bangunan pelimpah yang ada hanyalah 0,3 m³/detik, sebuah angka yang sangat kecil jika dibandingkan dengan debit sungai rata-rata yang mencapai 11,77 m³/detik, apalagi dengan debit banjir rancangan Q10 sebesar 30,67 m³/detik. Kondisi ini menciptakan situasi yang sangat rentan terhadap risiko overtopping dan kegagalan struktural saat terjadi hujan ekstrem.

Skenario A (Perluasan Moderat) merupakan skenario yang direkomendasikan dalam laporan studi kelayakan ini. Skenario ini mengusulkan perluasan kolam intake menjadi berkapasitas 24.000 m³, dengan luas permukaan sekitar 6.000 m² dan kedalaman rata-rata 4 meter. Peningkatan volume ini mewakili kenaikan kapasitas sebesar lebih dari 6 kali lipat dibandingkan kondisi eksisting. Selain itu,

skenario ini juga mencakup peningkatan kapasitas spillway menjadi 20 m³/detik, yang meskipun belum sepenuhnya menyamai debit banjir rancangan Q10, sudah jauh lebih memadai dibandingkan kondisi eksisting. Skenario ini dipilih sebagai opsi yang paling seimbang antara aspek teknis, ekonomis, dan kelayakan implementasi.

Skenario B (Perluasan Optimal) merupakan skenario ideal yang dirancang untuk memberikan tingkat keamanan dan keandalan maksimal. Pada skenario ini, volume kolam intake direncanakan mencapai 40.000 m³ atau lebih, menciptakan "baterai hidrologis" yang sangat besar untuk menyangga fluktuasi debit musiman. Yang lebih penting lagi, skenario ini mengusulkan peningkatan kapasitas spillway menjadi 30 m³/detik, yang hampir menyamai debit banjir rancangan Q10 sebesar 30,67 m³/detik. Dengan konfigurasi ini, risiko overtopping dapat diminimalkan secara signifikan, dan keamanan struktural bendungan dapat terjamin bahkan saat terjadi banjir dengan periode ulang 10 tahun.

3.1.4. Respons Hidraulik terhadap Debit Banjir Rancangan

Analisis respons hidraulik dilakukan untuk mengevaluasi perilaku sistem pada masing-masing skenario ketika menghadapi debit banjir dengan berbagai periode ulang (Q25, Q50, dan Q100). Evaluasi ini mencakup tiga parameter kritis: elevasi muka air maksimum, kecepatan aliran di sekitar intake dan spillway, serta status keamanan terhadap risiko overtopping.

Pada Skenario 0 (Eksisting), simulasi menunjukkan respons hidraulik yang sangat mengkhawatirkan. Ketika menghadapi debit banjir Q10 sebesar 30,67 m³/detik, elevasi muka air di kolam intake meningkat secara drastis melampaui elevasi aman tanggul. Dengan kapasitas spillway hanya 0,3 m³/detik, sistem tidak memiliki kemampuan yang memadai untuk membuang kelebihan air. Akibatnya, terjadi akumulasi volume air yang cepat di dalam kolam, menyebabkan kenaikan tinggi muka air yang berpotensi melampaui freeboard (tinggi jagaan) yang tersedia. Kondisi ini menempatkan struktur bendungan pada risiko sangat tinggi terhadap overtopping, yang dapat berujung pada kegagalan total struktur dan bencana di wilayah hilir.

Kecepatan aliran di sekitar intake pada kondisi eksisting juga menunjukkan pola yang tidak ideal. Saat debit masuk tinggi namun kapasitas keluar terbatas, terjadi turbulensi signifikan di area intake yang dapat menyebabkan erosi lokal pada dasar dan tebing kolam. Selain itu, aliran yang tidak terkontrol meningkatkan risiko masuknya sedimen dan debris ke dalam sistem penstock, yang berpotensi menyebabkan abrasi pada turbin dan penurunan efisiensi pembangkitan.

Pada Skenario A (Perluasan Moderat), respons hidraulik menunjukkan perbaikan yang sangat signifikan. Dengan volume kolam yang diperbesar menjadi 24.000 m³, sistem memiliki kapasitas penyangga yang jauh lebih baik untuk menyerap fluktuasi debit masuk. Simulasi menunjukkan bahwa elevasi muka air maksimum saat menghadapi Q10 dapat dikendalikan dalam batas aman, dengan kenaikan yang lebih gradual dan terkendali. Peningkatan kapasitas spillway menjadi 20 m³/detik memungkinkan pembuangan air berlebih yang lebih efektif, meskipun masih terdapat defisit sekitar 10 m³/detik dibandingkan debit banjir Q10.

Kecepatan aliran di sekitar intake pada Skenario A lebih stabil dan terprediksi. Desain kolam yang lebih luas memungkinkan distribusi aliran yang lebih merata, mengurangi turbulensi lokal dan risiko erosi. Area sediment trap yang lebih besar juga memberikan waktu tinggal (residence time) yang lebih lama bagi partikel sedimen untuk mengendap sebelum air masuk ke terowongan dan penstock, sehingga melindungi turbin dari abrasi.

Status keamanan pada Skenario A dikategorikan aman dengan catatan, asalkan dilakukan pemantauan ketat selama kejadian banjir ekstrem dan diterapkan prosedur operasi standar yang ketat untuk pengoperasian pintu air. Namun, untuk kejadian banjir dengan periode ulang lebih tinggi (Q25, Q50, atau Q100), masih terdapat risiko yang perlu dimitigasi melalui sistem peringatan dini dan rencana tanggap darurat yang komprehensif.

Pada Skenario B (Perluasan Optimal), respons hidraulik menunjukkan kinerja terbaik di antara ketiga skenario. Dengan volume kolam 40.000 m³ dan kapasitas spillway 30 m³/detik yang hampir menyamai debit banjir Q10, sistem memiliki kemampuan yang sangat memadai untuk mengelola fluktuasi debit ekstrem. Simulasi menunjukkan bahwa elevasi muka air maksimum tetap

berada dalam batas aman dengan margin freeboard yang memadai, bahkan saat menghadapi banjir dengan periode ulang hingga 25 tahun.

Kecepatan aliran di seluruh sistem pada Skenario B sangat terkendali dan optimal. Desain hidraulik yang matang memastikan distribusi aliran yang seragam, minimalisasi turbulensi, dan efisiensi pengendapan sedimen yang maksimal. Status keamanan dikategorikan sangat aman untuk operasional jangka panjang, dengan risiko overtopping yang dapat diabaikan untuk kejadian banjir dengan probabilitas hingga Q25.

3.1.5. Dampak terhadap Kapasitas Tampung dan Sedimentasi

Analisis dampak terhadap kapasitas tampung dan sedimentasi merupakan komponen kritis dalam evaluasi kelayakan proyek, mengingat sedimentasi telah diidentifikasi sebagai salah satu masalah fundamental yang dihadapi PLTA Tonsealama. Berdasarkan data hidrologi dan karakteristik DAS Tondano, studi ini memproyeksikan laju sedimentasi dan dampaknya terhadap umur teknis kolam intake pada masing-masing skenario.

Pada kondisi eksisting, kapasitas tampung yang hanya 3.877 m³ sangat rentan terhadap dampak sedimentasi. Berdasarkan analisis dengan asumsi konservatif konsentrasi sedimen tersuspensi 500 mg/L pada kondisi banjir puncak, diperkirakan beban sedimen yang masuk mencapai sekitar 648 ton per hari atau setara dengan 463 m³/hari. Selama periode banjir yang berlangsung 7 hari, akumulasi sedimen yang mengendap di kolam dapat mencapai 2.430 m³. Angka ini sangat signifikan karena mewakili sekitar 62,7% dari total volume kolam eksisting.

Implikasi dari kondisi ini sangat serius. Dalam satu event banjir saja, kapasitas efektif kolam dapat berkurang lebih dari setengahnya, yang secara drastis mengurangi kemampuan kolam untuk menyangga fluktuasi debit. Jika tidak dilakukan pengerukan secara intensif (setiap 3-6 bulan), kolam akan mengalami pendangkalan progresif yang pada akhirnya membuatnya tidak fungsional. Umur teknis kolam intake pada kondisi eksisting, tanpa program pengerukan yang konsisten, diperkirakan hanya 1-2 tahun sebelum kapasitasnya menurun ke level yang tidak lagi memungkinkan operasi PLTA yang andal.

Pada Skenario A (Perluasan Moderat) dengan volume 24.000 m³, dampak sedimentasi relatif lebih dapat dikelola. Dengan asumsi laju sedimentasi yang sama (2.430 m³ per event banjir 7 hari), volume sedimen tersebut hanya mewakili sekitar 10% dari total kapasitas kolam. Ini memberikan ruang yang jauh lebih besar untuk operasi normal di antara periode pengerukan.

Proyeksi laju sedimentasi untuk 5-10 tahun ke depan menunjukkan bahwa tanpa program pengelolaan sedimen yang sistematis, kolam akan kehilangan sekitar 15-20% kapasitasnya per tahun akibat akumulasi sedimen. Namun, dengan volume awal yang lebih besar, kolam masih dapat berfungsi secara efektif meskipun mengalami penurunan kapasitas gradual. Estimasi umur teknis kolam intake pada Skenario A, dengan asumsi pelaksanaan pengerukan berkala setiap 6-12 bulan, dapat mencapai 15-20 tahun sebelum diperlukan rehabilitasi mayor atau perluasan lebih lanjut.

Yang penting untuk dicatat adalah bahwa Skenario A juga mencakup desain sediment trap yang lebih efektif di area inlet, yang diharapkan dapat menangkap 60-70% sedimen sebelum masuk ke area utama kolam. Fitur desain ini, dikombinasikan dengan program pengerukan terjadwal, akan memperpanjang umur teknis kolam dan mengurangi frekuensi serta biaya pemeliharaan.

Pada Skenario B (Perluasan Optimal) dengan volume 40.000 m³ atau lebih, dampak sedimentasi menjadi paling minimal relatif terhadap kapasitas total. Volume sedimen 2.430 m³ dari satu event banjir hanya mewakili sekitar 6% dari kapasitas kolam. Ini memberikan buffer yang sangat besar untuk mengakomodasi beberapa event banjir berturut-turut tanpa kehilangan kapasitas operasional yang signifikan.

Proyeksi untuk 10 tahun ke depan menunjukkan bahwa bahkan dengan akumulasi sedimentasi penuh, kolam masih akan mempertahankan lebih dari 70% kapasitas awalnya. Umur teknis kolam intake pada Skenario B diperkirakan dapat mencapai 25-30 tahun dengan program pemeliharaan yang konsisten, menjadikannya investasi infrastruktur yang sangat berkelanjutan.

Selain itu, Skenario B memungkinkan implementasi sistem manajemen sedimen yang lebih canggih, seperti flushing gate otomatis, sistem pompa dredging permanen, dan area pengendapan terpisah yang dapat dibersihkan tanpa mengosongkan seluruh kolam. Fitur-fitur ini tidak hanya memperpanjang umur teknis tetapi juga mengurangi biaya operasional dan pemeliharaan jangka panjang.

3.1.6. Analisis Sensitivitas Parameter Kunci

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi seberapa besar variasi parameter input kunci mempengaruhi hasil simulasi dan kinerja sistem pada masing-masing skenario. Analisis ini penting untuk mengidentifikasi parameter-parameter kritis yang memerlukan pemantauan ketat dan untuk memahami tingkat ketidakpastian dalam proyeksi kinerja sistem.

Variasi Curah Hujan Ekstrem merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap hasil model. Berdasarkan data historis 10 tahun (2014-2024), curah hujan maksimum harian rata-rata adalah 55,95 mm dengan simpangan baku 31,30 mm, menunjukkan variabilitas yang sangat tinggi. Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan curah hujan rencana dari skenario konservatif ($R_{24} = 80$ mm) hingga skenario ekstrem ($R_{24} = 150$ mm atau lebih).

Pada Skenario 0 (Eksisting), sistem menunjukkan sensitivitas yang sangat tinggi terhadap variasi curah hujan. Peningkatan curah hujan sebesar 20% dari nilai rencana (dari 114,79 mm menjadi 137,75 mm) menyebabkan peningkatan debit banjir puncak dari 30,67 m³/detik menjadi sekitar 36,8 m³/detik. Dengan kapasitas spillway hanya 0,3 m³/detik, kondisi ini hampir pasti menyebabkan overtopping dan kegagalan struktural. Sistem eksisting tidak memiliki resilien terhadap ketidakpastian curah hujan dan sangat rentan terhadap kejadian ekstrem yang melampaui nilai rencana.

Pada Skenario A (Perluasan Moderat), sistem menunjukkan resilien yang lebih baik namun masih sensitif terhadap variasi curah hujan ekstrem. Peningkatan curah hujan 20% masih dapat dikelola dengan kenaikan elevasi muka air yang terkendali, asalkan tidak melampaui Q25. Namun, untuk kejadian dengan curah hujan yang mendekati atau melampaui 150 mm/hari (yang secara statistik dapat terjadi sekali dalam 25-50 tahun), sistem masih memerlukan protokol operasi darurat dan kemungkinan pembukaan pintu air tambahan untuk mencegah overtopping.

Pada Skenario B (Perluasan Optimal), sistem menunjukkan tingkat resilien tertinggi terhadap variasi curah hujan. Bahkan dengan peningkatan curah hujan hingga 30-40% dari nilai rencana, sistem masih dapat mempertahankan elevasi muka air dalam batas aman berkat volume buffer yang besar dan kapasitas spillway yang memadai. Analisis menunjukkan bahwa Skenario B dapat menangani kejadian hujan dengan probabilitas hingga Q50 tanpa risiko overtopping yang signifikan, menjadikannya pilihan yang paling robust terhadap ketidakpastian iklim. Dampak Ketidakpastian Data Sedimen juga dievaluasi secara mendalam dalam analisis sensitivitas. Asumsi konsentrasi sedimen tersuspensi 500 mg/L yang digunakan dalam perhitungan adalah nilai konservatif berdasarkan literatur sungai tropis. Namun, konsentrasi aktual dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada kondisi DAS, intensitas hujan sebelumnya, dan tingkat erosi di hulu.

Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi sedimen dari 200 mg/L (kondisi baik dengan vegetasi DAS yang terjaga) hingga 1.000 mg/L (kondisi buruk dengan erosi tinggi). Pada konsentrasi 200 mg/L, laju sedimentasi turun menjadi sekitar 259 m³ per event banjir 7 hari, yang secara signifikan memperpanjang interval pengerukan dan umur teknis kolam. Sebaliknya, pada konsentrasi 1.000 mg/L, laju sedimentasi meningkat menjadi 1.290 m³ per event, yang pada Skenario 0 akan membuat kolam tidak fungsional dalam waktu kurang dari 6 bulan. Pada Skenario A, variasi konsentrasi sedimen dari 200 hingga 1.000 mg/L mengubah estimasi umur teknis dari 30-35 tahun (pada kondisi baik) menjadi 8-10 tahun (pada kondisi buruk). Ini menegaskan pentingnya program pengelolaan DAS terpadu untuk mengendalikan erosi dan sedimentasi di hulu sebagai komponen integral dari keberlanjutan proyek. Pada Skenario B, sistem menunjukkan ketahanan terbaik terhadap ketidakpastian data sedimen. Bahkan pada konsentrasi 1.000 mg/L, umur teknis masih diperkirakan mencapai 15-18 tahun dengan program pengerukan berkala. Namun, biaya

operasional untuk pengerukan akan meningkat secara proporsional dengan laju sedimentasi, yang perlu diperhitungkan dalam analisis ekonomi lifecycle proyek. Parameter Kunci Lainnya yang dianalisis meliputi variasi efisiensi turbin, fluktuasi debit dasar (base flow) selama musim kemarau, dan perubahan koefisien limpasan (C) akibat perubahan tata guna lahan di DAS. Analisis menunjukkan bahwa sistem pada Skenario B memiliki tingkat ketahanan tertinggi terhadap variasi parameter-parameter ini, sementara Skenario O sangat rentan terhadap perubahan kecil sekalipun.

Sebagai sintesis dari analisis sensitivitas, direkomendasikan untuk:

1. Memasang sistem monitoring real-time untuk curah hujan, tinggi muka air, dan kualitas air (termasuk turbidity sebagai proksi konsentrasi sedimen) guna memungkinkan operasi adaptif berbasis kondisi aktual.
2. Melakukan pembaruan berkala terhadap model hidrologi setiap 3-5 tahun seiring dengan tersedianya data baru dan perubahan kondisi DAS.
3. Mengembangkan skenario operasi fleksibel yang dapat disesuaikan dengan kondisi ekstrem yang melampaui nilai rencana, termasuk protokol tanggap darurat untuk kejadian banjir langka (Q50, Q100).
4. Memprioritaskan program konservasi DAS di hulu untuk mengendalikan variabilitas sedimentasi dan meningkatkan ketahanan sistem jangka panjang.

3.1.7. Analisis Terhadap Aspek Ekonomi

Dari aspek ekonomi, skenario yang layak secara teknis dianalisis lebih lanjut menggunakan indikator NPV, IRR, dan BCR. Skenario A menunjukkan NPV positif, IRR di atas *discount rate* yang berlaku, dan $BCR > 1$, sehingga direkomendasikan sebagai opsi optimal. Keunggulan pendekatan ini adalah kemampuan memetakan titik kritis hidraulik sebelum investasi fisik dilakukan, sehingga meminimalkan risiko *cost-overflow* dan kegagalan teknis (Hidayat & Pratama, 2022). Kelemahan utama terletak pada ketergantungan terhadap resolusi data topografi dan asumsi stasioneritas iklim dalam proyeksi debit (Soewarno & Pratama, 2018). Tingkat kesulitan pelaksanaan terutama pada akses lokasi survei dan sinkronisasi data operasional dengan pihak PLN. Peluang pengembangan ke depan meliputi integrasi sistem pemantauan sedimentasi *real-time*, penambahan skenario perubahan iklim (RCP 4.5/8.5), serta penerapan model *machine learning* untuk prediksi laju sedimentasi jangka panjang (Wibowo & Sutjningsih, 2017).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan kerangka pemodelan banjir terintegrasi yang mampu mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi perluasan kolam intake PLTA Tonsealama. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perluasan intake hanya layak apabila disertai penyesuaian kapasitas spillway dan mitigasi sedimentasi terpadu. Skenario terbaik menghasilkan indikator ekonomi positif ($NPV > 0$, $BCR > 1$) dan memenuhi batas keamanan hidraulik pada debit banjir rancangan. Keterbatasan penelitian mencakup asumsi data historis yang stasioner dan resolusi batimetri yang perlu ditingkatkan. Pengembangan selanjutnya disarankan mengintegrasikan pemantauan sedimen *real-time*, skenario perubahan iklim, serta analisis sensitivitas parameter ekonomi untuk mendukung keputusan investasi infrastruktur ketenagalistrikan yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pihak PT. PLN Persero, dalam hal ini PLN Nusantara Power yang sudah membantu menyediakan data yang diperlukan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Qahtani, A., & Elshorbagy, A. (2022). Sediment transport modeling in reservoir systems: A review of recent advances and data requirements. *Journal of Hydrology*, 605, 127345. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127345>

- Chen, Y., & Wang, J. (2020). Integrated hydrological-hydraulic modeling for flood risk assessment in mountainous watersheds. *Water Resources Management*, 34(5), 1891–1907. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02540-4>
- Darmawan, R., & Setiawan, B. (2023). Evaluasi kelayakan teknis-ekonomis modifikasi bangunan intake PLTA menggunakan simulasi HEC-RAS 2D. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, 8(2), 112–125.
- Fauzi, M., & Fauzi, A. (2021). Analisis kelayakan rehabilitasi pembangkit listrik tenaga minihidro di Desa Kerta Khana Merauke. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 10(1), 11–20.
- Hartanto, S., & Legowo, A. (2020). Kalibrasi model HEC-RAS untuk simulasi banjir bandang di daerah aliran sungai tropis. *Jurnal Teknik Hidrolik*, 11(1), 45–58.
- Hidayat, M. I., & Pratama, G. A. (2022). Integrasi sistem informasi geografis dan pemodelan HEC-RAS untuk zonasi rawan banjir. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 24(3), 201–215.
- Krisnayanti, D. S., et al. (2021). Penerapan analisis manfaat-biaya dalam perencanaan infrastruktur pengendali banjir perkotaan. *Jurnal Infrastruktur dan Pembangunan Wilayah*, 13(4), 301–315.
- Kusumah, M. S., & Purnama, I. (2019). Integrasi pemodelan hidrologi dan ekonomi dalam manajemen waduk multipurpose. *Jurnal Sumber Daya Air*, 15(2), 89–102.
- Lubis, R. R., & Fauzi, M. (2020). Kajian ulang kapasitas tampung waduk akibat sedimentasi menggunakan perangkat lunak HEC-HMS. *Jurnal Teknik Sipil*, 17(3), 265–274.
- Nguyen, T. H., et al. (2021). Economic feasibility analysis of hydropower infrastructure upgrades under climate uncertainty. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110201>
- Pratama, G. A., & Sutjiningsih, D. (2019). Analisis pengaruh perubahan tata guna lahan terhadap debit banjir menggunakan model HEC-HMS. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(2), 103–112.
- Santoso, B., & Legowo, A. (2018). Evaluasi kinerja spillway waduk Sutami terhadap debit banjir rancangan. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 24(1), 31–40.
- Soewarno, & Pratama, Y. (2018). Analisis ketidakpastian debit banjir rancangan menggunakan metode statistik Bayesian. *Jurnal Rekayasa Lingkungan dan Sumber Daya Air*, 5(2), 112–125.
- Wibowo, H. D., & Sutjiningsih, D. (2017). Kajian pemanfaatan lahan dan implikasinya terhadap laju sedimentasi di waduk. *Jurnal Teknik Pengairan*, 8(1), 1–10.
- Zhang, L., et al. (2024). Decision-support framework for sustainable reservoir expansion under sedimentation and flood risk. *Sustainability*, 16(4), 1452. <https://doi.org/10.3390/su16041452>