

ANALISIS PENGARUH PASANG SURUT TERHADAP EFEKTIVITAS OPERASI PINTU AIR DI SUNGAI PETUNG PASURUAN

Mohamad Djaelani

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sunan Giri Surabaya
Jln. Brigjen Katamso II Waru Sidoarjo
e-mail: djaelani.mohamad63@gmail.com

Sebastianus Priambodo

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sunan Giri Surabaya
Jln. Brigjen Katamso II Waru Sidoarjo
e-mail: sebastianus.priambodo@gmail.com

Abstract: *This study aims to assess the influence of tidal fluctuations on the operational effectiveness of a sluice gate in the Petung River, Pasuruan. A quantitative approach was employed, combining hydrological analysis, tidal analysis, and hydraulic modeling using HEC-RAS under unsteady flow conditions. The dataset includes rainfall records, river discharge obtained from AWLR, and tidal data applied as the downstream boundary condition. Dependable discharge was determined using Q80% and Q95% probabilities, while tidal characteristics were analyzed to describe water level variability. The results indicate that the dependable discharge ranges from 0.548–0.730 m³/s (Q80%) and 0.416–0.526 m³/s (Q95%), reflecting limited flow during dry conditions. Tidal variation shows a considerable range, with maximum water levels reaching 2.80 m and minimum levels around 0.41 m, significantly affecting the river water profile. Hydraulic simulation reveals the occurrence of a backwater effect during high tide, leading to upstream water level rise and reduced flow capacity. The evaluation further indicates that sluice gate performance decreases during high tide due to downstream pressure, while flow conditions improve during low tide. Therefore, an adaptive operation strategy based on tidal patterns is required to enhance flow regulation and minimize flood risk.*

Keywords: *tide, HEC-RAS, sluice gate, river hydraulics, backwater effect*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh pasang surut terhadap efektivitas operasi pintu air di Sungai Petung, Pasuruan. Metode yang digunakan berupa pendekatan kuantitatif dengan analisis hidrologi, analisis pasang surut, serta pemodelan hidrolika menggunakan perangkat lunak HEC-RAS dengan skema aliran tidak tunak (*unsteady flow*). Data yang digunakan meliputi curah hujan, debit sungai dari AWLR, serta data pasang surut sebagai kondisi batas hilir (*downstream boundary condition*). Analisis debit dilakukan melalui metode debit andalan (Q80% dan Q95%), sedangkan data pasang surut dianalisis untuk menentukan karakteristik fluktuasi muka air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa debit andalan Sungai Petung berada pada kisaran Q80% sebesar 0,548–0,730 m³/det dan Q95% sebesar 0,416–0,526 m³/det. Fluktuasi pasang surut memiliki rentang yang signifikan dengan elevasi maksimum mencapai 2,80 m dan minimum sekitar 0,41 m, yang berpengaruh terhadap profil muka air sungai. Hasil pemodelan menunjukkan terjadinya *backwater effect* pada kondisi pasang tinggi yang menyebabkan peningkatan muka air ke arah hulu dan menurunkan kapasitas aliran. Evaluasi kinerja pintu air menunjukkan bahwa operasi tidak optimal pada saat pasang akibat adanya tekanan balik dari hilir, sedangkan pada kondisi surut aliran menjadi lebih efektif. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengoperasian pintu air yang adaptif berbasis pola pasang surut untuk meningkatkan kinerja pengendalian aliran dan mengurangi potensi banjir.

Kata kunci: pasang surut, HEC-RAS, pintu air, hidrolika sungai, backwater effect

PENDAHULUAN

Sungai merupakan elemen penting dalam sistem hidrologi yang berperan sebagai jalur utama distribusi air dari daerah hulu menuju hilir serta sebagai sumber daya vital bagi berbagai kebutuhan manusia. Pada wilayah

yang berdekatan dengan laut, karakteristik aliran sungai menjadi lebih kompleks karena tidak hanya dipengaruhi oleh limpasan dari daerah tangkapan air, tetapi juga oleh dinamika pasang surut di bagian hilir. Fluktuasi muka air akibat pasang surut terjadi secara periodik dan

dapat memengaruhi kapasitas aliran, bentuk hidrograf, serta meningkatkan potensi terjadinya genangan maupun banjir (Melda, 2020; Gunawan et al., 2023).

Salah satu fenomena utama yang timbul akibat pengaruh pasang surut adalah terjadinya aliran balik (*backwater effect*), yaitu kondisi ketika muka air di hilir meningkat sehingga menghambat aliran dari hulu. Dampak dari fenomena ini adalah kenaikan muka air sungai ke arah hulu yang dapat memperbesar risiko banjir, terutama jika bertepatan dengan kejadian hujan dengan intensitas tinggi (Sahdimin et al., 2023). Selain itu, interaksi antara aliran sungai dan pasang surut juga berkontribusi terhadap perubahan kecepatan aliran, distribusi debit, serta dinamika sedimen yang dapat memicu perubahan bentuk dan kondisi morfologi sungai (Kurniati, 2022).

Dalam pengelolaan sumber daya air, keberadaan bangunan pengendali seperti pintu air memiliki fungsi yang sangat penting, khususnya dalam mengatur aliran dan menjaga kestabilan muka air. Infrastruktur ini dirancang untuk mengendalikan debit, mengurangi risiko banjir, serta menghambat masuknya air laut ke wilayah daratan. Namun demikian, kinerja pintu air sangat bergantung pada kondisi hidrologi dan hidrolika yang terjadi di lapangan, termasuk fluktuasi muka air akibat pasang surut. Ketika terjadi pasang tinggi, tekanan dari arah hilir dapat mengurangi kemampuan pintu air dalam mengalirkan debit dari hulu, sehingga diperlukan sistem operasi yang mampu menyesuaikan dengan kondisi tersebut (Saputra et al., 2021; Noor et al., 2018).

Sungai Petung yang berada di wilayah perbatasan Kabupaten dan Kota Pasuruan memiliki peran strategis dalam sistem drainase kawasan. Meskipun demikian, kondisi eksisting sungai ini menunjukkan adanya berbagai permasalahan, terutama di bagian hilir yang mengalami perubahan bentuk alur menjadi berkelok-kelok (*meandering*) serta peningkatan sedimentasi yang cukup signifikan. Hal ini berkaitan erat dengan perubahan penggunaan lahan di daerah hulu yang cenderung beralih menjadi kawasan terbuka dan permukiman, sehingga meningkatkan laju erosi dan suplai sedimen ke dalam sungai. Akumulasi sedimen tersebut berdampak pada berkurangnya kapasitas penampang sungai dan menurunkan

kemampuan sungai dalam menampung aliran air (Dokumen AKNOP Sungai Petung, 2020).



Gambar 1. Kondisi Eksisting Sungai Petung

Di sisi lain, kondisi sempadan Sungai Petung memperlihatkan variasi penggunaan lahan yang cukup beragam. Wilayah hilir didominasi oleh area tambak dan lahan kosong, sementara bagian tengah hingga hulu berkembang menjadi kawasan perkotaan dengan dominasi permukiman, pertanian, dan lahan terbuka. Perubahan ini menyebabkan peningkatan limpasan permukaan, terutama pada musim hujan, yang berkontribusi terhadap meningkatnya kejadian banjir di wilayah tengah DAS. Selain dipengaruhi oleh curah hujan, banjir juga diperparah oleh keterbatasan kapasitas aliran akibat penyempitan penampang serta penurunan kualitas tanggul dan bantaran sungai (Dokumen AKNOP Sungai Petung, 2020).

Secara hidrolika, Sungai Petung menunjukkan kondisi di mana pada saat debit tinggi, kapasitas alirannya tidak mencukupi untuk menampung volume air yang masuk, sehingga sering terjadi limpasan ke wilayah sekitar. Kondisi ini menjadi semakin kompleks apabila dipengaruhi oleh pasang surut di bagian hilir yang dapat memperbesar efek *backwater* dan menurunkan efisiensi aliran sungai. Dalam situasi seperti ini, keberadaan pintu air menjadi sangat krusial sebagai pengendali muka air dan distribusi debit.

Berbagai penelitian telah membahas dampak pasang surut terhadap pola aliran sungai dan perilaku hidrodinamika. Namun demikian, kajian yang mengintegrasikan pengaruh pasang surut dengan kinerja operasional pintu air dalam satu kerangka analisis masih jarang dilakukan. Umumnya, penelitian terdahulu menelaah aspek hidrologi dan hidrolika secara terpisah tanpa menjadikan operasi bangunan pengendali sebagai bagian utama dalam analisis (Sufyan et al., 2023; Saputra et al., 2021).

Dengan demikian, kesenjangan penelitian terletak pada belum adanya pendekatan

komprehensif yang menghubungkan dinamika pasang surut, karakteristik aliran, dan kinerja operasi pintu air secara terpadu. Penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui analisis simultan terhadap ketiga komponen tersebut pada Sungai Petung, sehingga diharapkan mampu memberikan landasan yang lebih menyeluruh dalam upaya optimalisasi pengelolaan sistem pengendalian air.

Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan kajian yang lebih menyeluruh untuk memahami pengaruh pasang surut terhadap efektivitas operasi pintu air di Sungai Petung Pasuruan. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis karakteristik hidrologi sungai berdasarkan data curah hujan dan debit aliran, (2) mengidentifikasi pola dan fluktuasi pasang surut sebagai kondisi batas hilir, (3) mengevaluasi kondisi hidrolika sungai termasuk pengaruh backwater effect, serta (4) menilai kinerja operasi pintu air dalam merespons dinamika pasang surut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai keterkaitan antara aspek hidrologi, hidrolika, dan operasional bangunan air, sehingga dapat dirumuskan strategi pengelolaan yang lebih efektif dalam pengendalian banjir dan pemanfaatan sumber daya air secara berkelanjutan..

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis hidrologi dan hidrolika. Pendekatan ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara fluktuasi muka air akibat pasang surut dengan kinerja operasi pintu air berdasarkan data numerik yang diperoleh dari pengamatan lapangan dan instansi terkait. Analisis dilakukan secara deskriptif kuantitatif dan komparatif untuk mengevaluasi efektivitas operasi pintu air pada berbagai kondisi pasang surut. Lokasi penelitian ini dilakukan pada DAS Petung yang berada diantara Kabupaten Pasuruan dan Kota Pasuruan. Luas DAS berdasarkan beberapa sumber dapat diuraikan sebagai berikut sesuai permen PU No. 04 / PRT / M / 2015 tentang pembagian DAS WS Welang Rejoso disebutkan bahwa luas DAS Petung sebesar 166,40 km dengan rincian Kabupaten Pasuruan 148,32 km² dan Kota Pasuruan 18,08 km² dengan Panjang Sungai Utama 14,34 km². DAS

Petung terletak pada kisaran koordinat antara 7°32'–7°40' Lintang Selatan dan 112°50'–113°00' Bujur Timur. Area studi difokuskan pada segmen hilir sungai yang terpengaruh pasang surut dan lokasi bangunan pintu air dan titik pengamatan muka air (AWLR).

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan, meliputi pengukuran penampang melintang sungai, identifikasi kondisi fisik pintu air, serta dokumentasi kondisi aliran dan lingkungan sekitar. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari instansi terkait, seperti data curah hujan dari BMKG, data tinggi muka air dan debit dari alat ukur otomatis (AWLR), data pasang surut, serta peta daerah aliran sungai dan tata guna lahan. Metode analisis yang digunakan meliputi analisis statistik deskriptif, analisis korelasi antara pasang surut dan muka air sungai, analisis komparatif kondisi sebelum dan sesudah pengaruh pasang serta interpretasi hidrograf dan profil muka air.

Kerangka konseptual dalam penelitian ini menjelaskan keterkaitan antara aspek hidrologi, dinamika pasang surut, karakteristik fisik sungai, serta sistem operasi pintu air dalam mempengaruhi kinerja pengendalian aliran di Sungai Petung. Pada wilayah pesisir, sistem sungai memiliki kompleksitas yang lebih tinggi karena dipengaruhi oleh dua arah gaya utama, yaitu aliran dari hulu dan pengaruh pasang surut dari hilir. Kondisi ini menyebabkan perubahan pada profil muka air dan kapasitas aliran, yang dalam kajian hidrolika dikenal sebagai pengaruh kondisi batas (*boundary condition*) (Triatmodjo, 2019).

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini meliputi beberapa komponen utama, yaitu faktor hidrologi seperti curah hujan dan debit aliran, faktor pasang surut berupa elevasi muka air laut dan karakteristik pasut, parameter fisik sungai seperti bentuk penampang, kemiringan dasar, serta kekasaran saluran, dan juga aspek teknis bangunan pintu air. Interaksi antar variabel tersebut menentukan kondisi aliran sungai secara keseluruhan. Hal ini sejalan dengan pendapat Chow et al. (1988) yang menyatakan bahwa kapasitas aliran sangat dipengaruhi oleh geometri saluran dan kondisi aliran yang dapat berubah akibat pengaruh eksternal, termasuk pasang surut.

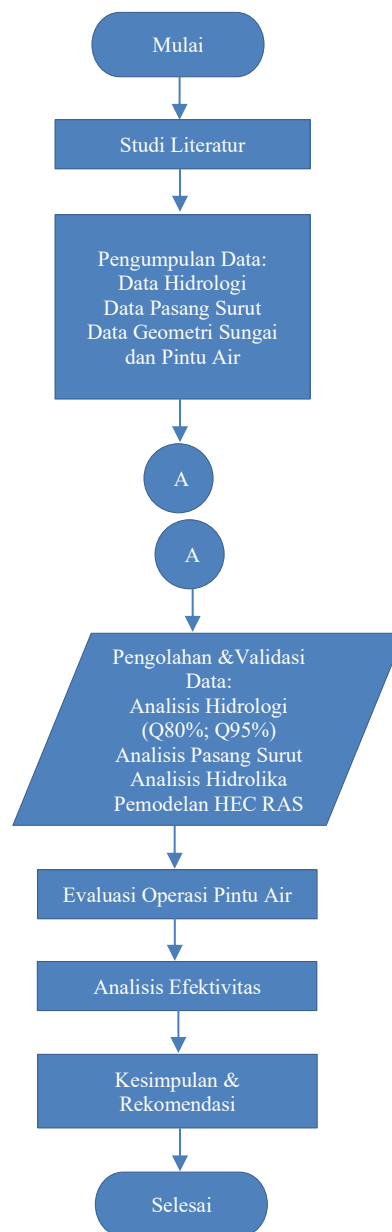
Tahapan analisis dalam penelitian ini mencakup analisis hidrologi, analisis pasang surut, dan analisis hidrolika untuk memahami karakteristik aliran sungai secara menyeluruh. Salah satu fenomena utama yang dianalisis adalah *backwater effect*, yaitu kondisi di mana kenaikan muka air di bagian hilir menyebabkan peningkatan muka air ke arah hulu. Berdasarkan panduan HEC-RAS (USACE, 2016), fenomena ini terjadi akibat adanya hambatan aliran yang dipicu oleh perubahan elevasi muka air di hilir, sehingga mempengaruhi distribusi energi dan profil aliran.

Hasil dari analisis tersebut selanjutnya digunakan untuk menilai efektivitas operasi pintu air dalam mengendalikan sistem aliran. Penilaian dilakukan berdasarkan kemampuan pintu air dalam mengatur muka air, menjaga kestabilan debit, serta meminimalkan kejadian limpasan atau genangan. Dalam sistem pengelolaan sumber daya air, pintu air berperan sebagai pengatur aliran yang harus dioperasikan secara responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan, khususnya fluktuasi hidrologi dan pasang surut (Noor et al., 2018). Ketidaktepatan dalam pengoperasian dapat menurunkan kinerja sistem bahkan meningkatkan potensi banjir. Untuk alur penelitian dapat dilihat pada gambar berikut:

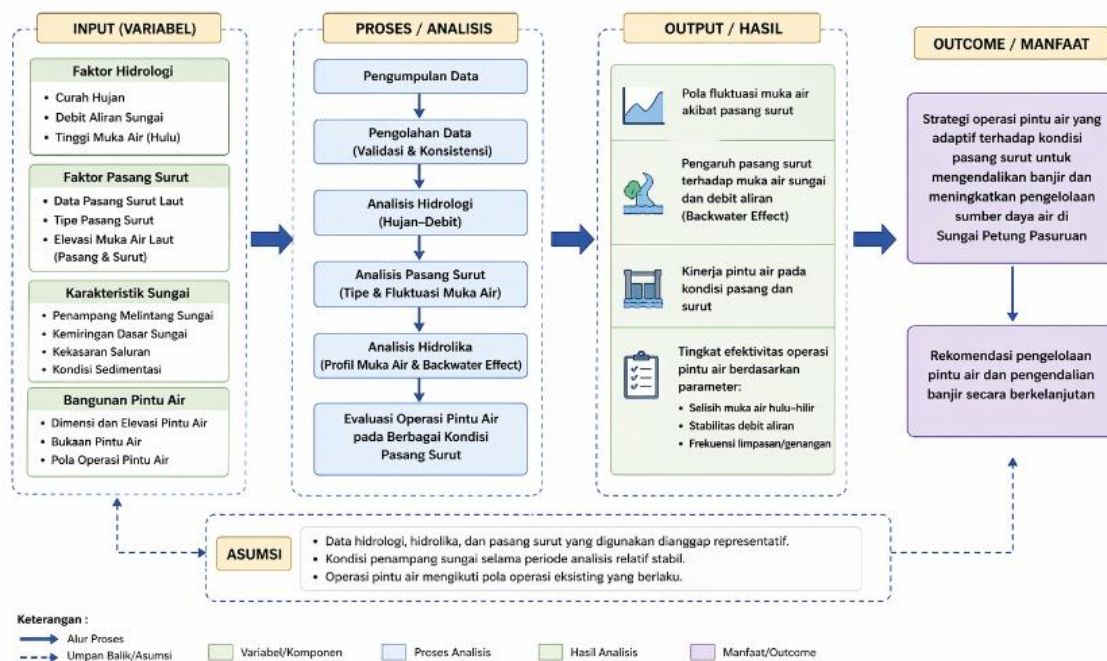
Secara keseluruhan, hubungan antara variabel input, proses analisis, dan hasil penelitian dalam kerangka ini mengacu pada pendekatan sistem terpadu dalam pengelolaan sumber daya air. Pendekatan ini menekankan pentingnya keterkaitan antara aspek hidrologi, hidrolika, dan infrastruktur pengendali dalam suatu sistem yang saling mempengaruhi (Maidment, 1993). Oleh karena itu, integrasi antara analisis pasang surut dan evaluasi operasi pintu air menjadi aspek penting dalam penelitian ini.

Dengan demikian, kerangka konseptual yang dikembangkan menunjukkan bahwa kinerja pintu air tidak hanya dipengaruhi oleh aspek desain teknis, tetapi juga oleh dinamika lingkungan yang bersifat alami, seperti pasang

surut dan kondisi hidrologi. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pengelolaan sumber daya air berkelanjutan yang menekankan keseimbangan antara sistem alami dan intervensi teknis manusia (Sufyan et al., 2023). Secara sederhana kerangka konseptual penelitian dapat di lihat pada gambar berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. Kerangka Konseptual Penelitian

HASIL PEMBAHASAN

Untuk mendapatkan ketersediaan air di suatu stasiun diperlukan debit aliran yang bersifat runtut (*time series*), misalnya data debit harian sepanjang tahun selama beberapa tahun. Debit andalan dapat ditentukan dengan menggunakan kurva massa debit yang dibentuk dengan menyusun data debit, dari debit maksimum sampai debit minimum. Susunan data dapat dinyatakan dalam bentuk gambar kurva massa atau dalam bentuk tabel. Pada kurva massa debit, ordinat adalah debit aliran sedangkan waktu (hari) atau % waktu sebagai absis. Kurva menunjukkan besarnya debit disamai atau dilampaui untuk beberapa persen waktu yang diinginkan. Untuk bentuk tabel, data debit harian diurutkan dari nilai terbesar sampai terkecil, persen keandalan diperoleh seperti persamaan dibawah ini yang dinyatakan dalam % (Triatmodjo, Bambang. 2010).

$$\text{Keandalan (\%)} = \frac{m}{n+1}$$

dimana :

m = nomor urut data

n = jumlah data

Pada penelitian ini dipakai perhitungan debit andalan dengan metode bulan dasar (*Basic*

Month), yaitu mengambil satu pola debit dari tahun tertentu. Peluang kejadiannya dihitung dengan persamaan Weibull (Subarkah, 1980)

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\%$$

dengan :

P = probabilitas (%)

m = nomor urut data debit

n = banyaknya data debit

Prosedur perhitungan debit andalan adalah sebagai berikut (1) menghitung total debit dalam satu tahun untuk tiap tahun data yang diketahui, (2) merangking data mulai dari yang besar hingga kecil, (3) menghitung probabilitas untuk masing-masing data dengan menggunakan persamaan Weibull di atas. Tabel berikut disajikan untuk menunjukkan hasil analisis debit andalan Sungai Petung berdasarkan data pengamatan debit yang diolah menggunakan metode probabilitas. Penyajian data ini bertujuan untuk mengidentifikasi variasi debit pada berbagai tingkat peluang kejadian (10%–100%) serta menentukan nilai debit representatif, yaitu Q80% sebagai kondisi kering dan Q95% sebagai debit minimum. Informasi ini penting sebagai dasar dalam analisis ketersediaan air dan evaluasi kinerja

sistem pengendalian aliran, khususnya dalam kaitannya dengan operasi pintu air. dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut:

Tabel 1. Debit Andalan 80% dan 90%

No	Prob. (%)	Debit (m ² /dt)								
		JANUARI			FEBRUARI			MARET		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	10	11.589	12.134	13.164	15.031	21.054	15.348	17.583	21.404	19.425
2	20	10.840	6.881	10.286	11.411	9.415	10.619	10.349	9.640	10.116
3	30	4.550	2,904	5,766	6,489	4,246	6,924	6,835	7,996	4,385
4	40	1.698	2,206	4,709	3,989	4,064	3,781	5,202	5,388	3,271
5	50	1.695	1,863	3,358	3,464	3,732	3,389	4.000	2,722	2,054
6	60	1.690	1,586	1,906	3,087	2,336	2,956	3,356	1,934	1,985
7	70	1.437	1,425	1,835	2,649	1,964	2.140	2,681	1,717	1,576
8	80	0,863	0,927	1,440	1,483	1,486	2,005	2,403	1,504	1,265
9	90	0,729	0,687	0,864	0.900	1,106	1,086	1,077	1.210	1.070
10	100	0,311	0,316	0,392	0,427	0.410	0,748	0,526	0,549	0,535
Q-80 % (Pola Kering)		0,863	0,927	1,44	1,483	1,486	2,005	2,403	1,504	1,265
Q-95 % (Debit Riparian)		0.520	0,502	0,628	0,664	0,758	0,917	0,802	0.880	0,803

No	Prob. (%)	Debit (m ² /dt)								
		APRIL			MEI			JUNI		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	10	17.628	14.316	14.645	13.664	11.878	31.449	8.715	7.077	6.827
2	20	8.024	7.646	7.342	8.405	7.836	24.592	6.699	6.585	5.464
3	30	5,534	6,434	4,787	7,060	4,054	15,147	6,224	2,627	2,416
4	40	4,313	4,495	3,986	4,459	3,275	12,378	4,117	2,499	1,666
5	50	3,222	4,353	2,908	2,856	3,059	10,132	2,524	1,618	0,949
6	60	3,062	3,761	1,862	2,172	2,994	9,339	1,867	1,507	0,926
7	70	2,305	1,18	1,031	1,591	1,998	6,630	1,689	1,293	0,910
8	80	1,847	0,922	0,961	1,338	1,094	4,059	0,932	1,008	0,834
9	90	1.130	0,804	0.800	1,032	0,919	3,178	0,805	0,930	0,746
10	100	0,514	0,515	0,493	0,448	0,451	1,552	0,429	0,441	0,472
Q-80 % (Pola Kering)		1,847	0,922	0,961	1,338	1,094	4,059	0,932	1,008	S
Q-95 % (Debit Riparian)		0,822	0.660	0,647	0.740	0,685	2,365	0,617	0,685	0,609

No	Prob. (%)	Debit (m ² /dt)								
		JULI			AGUSTUS			SEPTEMBER		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	10	6,415	6.400	6,388	6,326	6,253	6,241	6,194	6,137	6.050
2	20	4,997	4,571	4,214	4,023	3,777	3,606	3.450	3,409	3,284

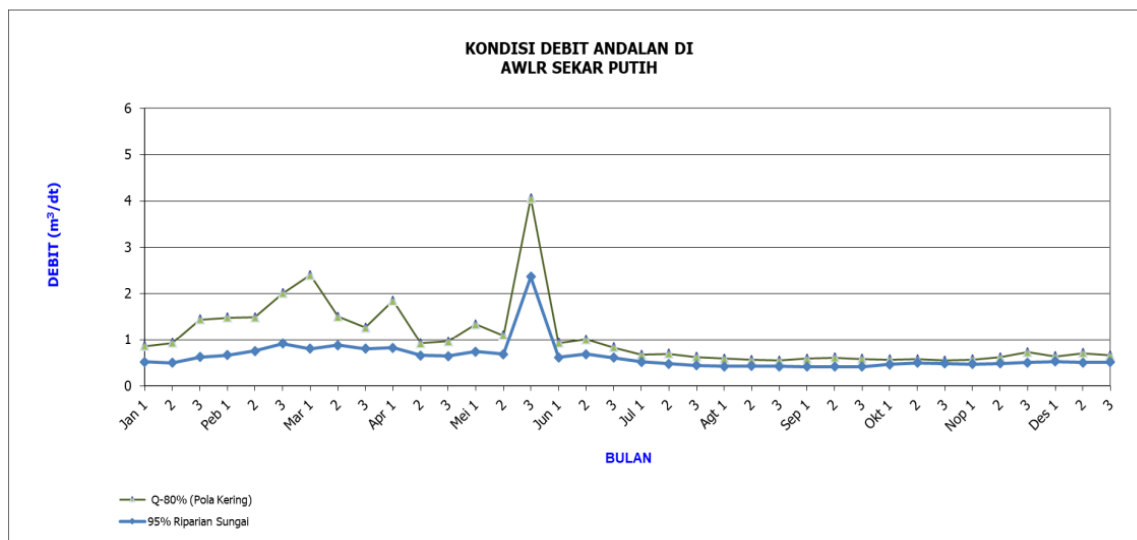
3	30	2,366	2,349	2,841	2,242	2,222	2,279	2,254	2,349	2,588
4	40	1,580	1,538	2,303	1,468	1,469	1,429	1,362	1,345	1,324
5	50	0,936	1,102	1,516	1,225	0,866	0,846	0,831	0,814	0,884
6	60	0,897	0,913	0,905	0,871	0,802	0,782	0,773	0,762	0,780
7	70	0,798	0,898	0,738	0,798	0,795	0,687	0,587	0,710	0,719
8	80	0,674	0,691	0,622	0,593	0,566	0,548	0,587	0,610	0,583
9	90	0,571	0,538	0,481	0,465	0,474	0,467	0,462	0,451	0,444
10	100	0,472	0,426	0,416	0,390	0,391	0,381	0,378	0,380	0,392
Q-80 % (Pola Kering)		0,674	0,691	0,622	0,593	0,566	0,548	0,587	0,610	0,583
Q-95 % (Debit Riparian)		0,522	0,482	0,449	0,428	0,433	0,424	0,420	0,416	0,418

Debit (m ² /dt)										
No	Prob. (%)	OKTOBER			NOVEMBER			DESEMBER		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	10	6,000	5,893	6,026	5,900	5,936	7,157	6,523	10,93	6,702
2	20	3,180	3,180	2,977	3,703	3,858	4,694	6,193	6,005	6,230
3	30	2,570	2,582	2,503	2,500	2,811	2,835	5,040	4,499	5,053
4	40	1,299	1,788	1,526	2,385	1,492	2,737	3,349	2,576	2,788
5	50	1,043	1,261	1,238	1,609	0,908	1,865	1,617	2,083	2,575
6	60	0,771	0,769	0,736	0,713	0,864	0,790	1,271	1,506	1,773
7	70	0,639	0,588	0,565	0,592	0,707	0,779	0,817	0,869	1,561
8	80	0,568	0,578	0,551	0,573	0,619	0,730	0,641	0,707	0,662
9	90	0,506	0,522	0,541	0,513	0,494	0,553	0,544	0,527	0,514
10	100	0,420	0,484	0,430	0,428	0,475	0,458	0,508	0,486	0,514
Q-80 % (Pola Kering)		0,568	0,578	0,551	0,573	0,619	0,730	0,641	0,707	0,662
Q-95 % (Debit Riparian)		0,463	0,503	0,485	0,471	0,485	0,506	0,526	0,507	0,514

Berdasarkan data pada tabel, terlihat bahwa nilai debit cenderung menurun seiring dengan meningkatnya probabilitas kejadian. Nilai debit pada peluang kecil (10%–20%) menunjukkan kondisi aliran tinggi, sedangkan pada peluang besar (80%–95%) mencerminkan kondisi aliran rendah. Nilai Q80% yang berkisar sekitar 0,5–0,7 m³/det menunjukkan debit pada kondisi kering, sementara Q95% yang berada pada kisaran ±0,4–0,5 m³/det menggambarkan debit minimum sungai. Pola ini menunjukkan bahwa Sungai Petung memiliki variasi debit yang cukup signifikan sepanjang tahun, yang berimplikasi pada keterbatasan kapasitas aliran

pada musim kemarau. Kondisi tersebut menjadi faktor penting dalam menentukan strategi operasi pintu air, terutama saat terjadi interaksi dengan pasang surut di hilir.

Gambar berikut disajikan untuk memperlihatkan kondisi debit andalan akibat pasang surut berdasarkan data pengamatan dan hasil peramalan. Penyajian grafik ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik debit andalan, kesesuaian model terhadap data lapangan, serta mengetahui besarnya variasi elevasi muka air yang berpotensi mempengaruhi kondisi hidrolika sungai.

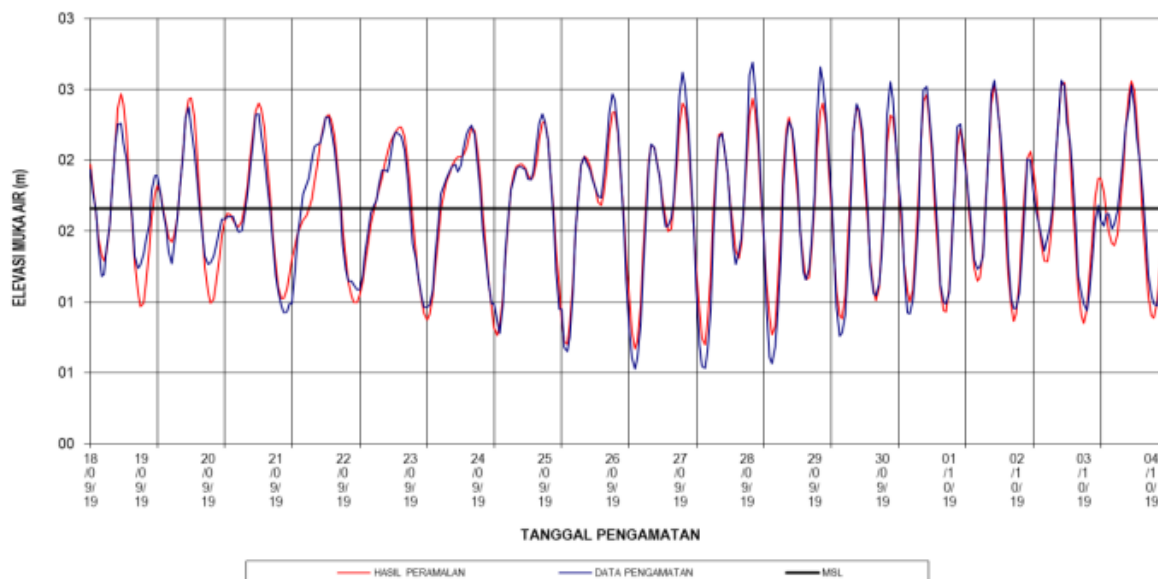


Gambar 4.
Grafik Debit andalan 80% dan 95% di AWLR Sekar putih

Berdasarkan analisis hidrologi Sungai petung bahwa hasil pengolahan data debit dari AWLR Sekar Putih, diperoleh nilai debit andalan Sungai Petung pada probabilitas tertentu. Debit andalan digunakan untuk menggambarkan kondisi ketersediaan air sungai pada kondisi normal hingga kering. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai debit Q80% berkisar antara 0,548–0,730 m^3/det , sedangkan debit Q95% berada pada kisaran 0,416–0,526 m^3/det . Nilai Q80% menunjukkan kondisi aliran yang relatif stabil dan masih dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan operasional, sedangkan Q95% mencerminkan kondisi debit minimum yang umumnya digunakan sebagai acuan dalam perencanaan konservasi aliran dan pengendalian sistem air.

Menurut Ven Te Chow et al. (1988), debit andalan merupakan parameter penting dalam analisis hidrologi karena mencerminkan probabilitas ketersediaan air dalam suatu sistem sungai. Rendahnya nilai debit minimum pada Sungai Petung menunjukkan bahwa pada kondisi kering, kapasitas aliran sangat terbatas. Hal ini berimplikasi pada pengoperasian pintu air yang harus disesuaikan agar tetap dapat mengatur distribusi air tanpa menyebabkan gangguan pada sistem aliran.

Berdasarkan pengamatan bahwa pengaruh pasang surut, tidak mencapai jarak 4 km dari hilir yaitu dari patok 00 sampai dengan patok 4.00 di bawah 1 kilometer Dam Blandongan. Namun demikian dikarenakan di daerah hilir terjadi sedimentasi yang cukup tinggi serta upaya normalisasi di hilir Sungai Petung, maka perlu dilakukan analisa pasang tertinggi yang terjadi di daerah hilir sebagai pembatas masukan dari program HEC RAS, di daerah hilir. Pola pasang surut dapat diperoleh dengan menganalisis data pengamatan pasang surut. Karena pada dasarnya pergerakan pasang surut bersifat beraturan sehingga dapat diuraikan menjadi komponen-komponen harmonik yang jumlahnya sangat banyak. Untuk kebutuhan praktis cukup diketahui 6 (enam) komponen yang dinyatakan dalam konstanta pasang surut. Penentuan besarnya konstanta harmonik pasut ini akan dilakukan dengan metode *Least Square*. Peramalan pasang surut berguna untuk menentukan tinggi pasang tertinggi dan surut terendah di lokasi studi guna perencanaan tanggul dan analisis terhadap bangunan pengaman banjir. Hasil pengamatan dan peramalan pasang surut air laut di muara Sungai Petung dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 5. Grafik Pengamatan dan Peramalan Pasang Surut di Muara Sungai Petung

Grafik pasang surut menunjukkan pola fluktuasi periodik dengan tipe semi-diurnal, ditandai oleh dua kali pasang dan dua kali surut dalam satu hari. Rentang elevasi muka air berkisar antara $\pm 0,8-1,2$ m pada kondisi surut hingga $\pm 2,8-3,0$ m saat pasang, dengan MSL sekitar $\pm 2,1-2,2$ m, yang mengindikasikan pengaruh pasang surut cukup kuat terhadap sistem sungai. Kurva peramalan mengikuti pola data observasi dengan baik meskipun terdapat deviasi kecil pada kondisi ekstrem. Variasi amplitudo juga menunjukkan adanya fase pasang besar dan kecil. Kondisi ini berimplikasi pada munculnya

backwater effect yang dapat menghambat aliran dari hulu saat pasang tinggi, sehingga menurunkan kinerja pintu air, sedangkan pada saat surut aliran menjadi lebih lancar. Oleh karena itu, pola pasang surut perlu dijadikan dasar dalam pengoperasian pintu air agar pengendalian aliran lebih efektif.

Adapun data hasil pengamatan dan peramalan pasang surut seperti yang tertera pada tabel berikut yang digunakan sebagai masukan model hidrolika Sungai Petung untuk muka air di hilir Sungai Petung

Tabel 2.
Komponen Pasang Surut

No	Komponen Pasang Surut	Pengamatan (m)	Peramalan (m)
1	<i>Highest Measured Tide</i>	2,69	2,80
2	<i>Mean Higher High Water (MHHW)</i>	2,39	2,15
3	<i>Mean High Water (MHW)</i>	2,15	2,15
4	<i>Mean Sea Level (MSL)</i>	1,66	1,66
5	<i>Mean Low Water (MLW)</i>	1,26	1,14
6	<i>Mean Lower Low Water (MLLW)</i>	1,26	1,14
7	<i>Lowest Measured Tide</i>	0,53	0,41

Pada analisis pasang surut dapat dilihat dari data pasang surut menunjukkan adanya fluktuasi muka air yang signifikan di bagian hilir Sungai Petung. Berdasarkan hasil pengamatan, muka air pasang tertinggi (*Highest Tide*) mencapai sekitar 2,69–2,80 m, sedangkan muka air terendah (*Lowest Tide*) berada pada kisaran 0,41–0,53 m. Nilai *Mean Sea Level* (MSL) tercatat sebesar 1,66 m. Perbedaan elevasi antara kondisi pasang dan surut yang cukup besar menunjukkan bahwa Sungai Petung memiliki pengaruh pasang surut yang signifikan. Fluktuasi ini berperan sebagai kondisi batas hilir (*downstream boundary condition*) yang sangat mempengaruhi perilaku aliran sungai. Menurut *US Army Corps of Engineers* (2016), kondisi batas hilir merupakan faktor dominan dalam menentukan profil muka air pada model hidrolika, terutama pada sungai yang terhubung dengan laut.

Perubahan muka air akibat pasang surut ini berpotensi menimbulkan fenomena *backwater effect*, di mana kenaikan muka air di hilir menghambat aliran dari hulu. Kondisi ini menjadi semakin kritis ketika terjadi bersamaan dengan debit tinggi akibat hujan.

Analisis hidrolika dilakukan dengan mempertimbangkan parameter geometri sungai, kekasaran aliran, serta debit yang masuk ke dalam sistem. Persamaan Manning digunakan untuk menghitung kecepatan dan debit aliran berdasarkan kondisi penampang sungai.

Parameter seperti luas penampang basah, keliling basah, serta kemiringan dasar sungai menjadi faktor utama dalam menentukan kapasitas aliran. Berdasarkan hasil analisis, kapasitas penampang Sungai Petung menunjukkan keterbatasan dalam menampung debit aliran, terutama pada kondisi debit tinggi.

Hal ini disebabkan oleh adanya sedimentasi yang mengurangi luas penampang efektif serta perubahan morfologi sungai. Menurut Chow et al. (1988), kapasitas aliran sangat dipengaruhi oleh kondisi geometri dan kekasaran saluran, sehingga perubahan kecil pada parameter tersebut dapat berdampak signifikan terhadap aliran. Selain itu, pengaruh pasang surut dari hilir menyebabkan perubahan profil muka air sepanjang sungai. Pada kondisi pasang, muka air di hilir meningkat sehingga mengurangi gradien energi dan memperlambat aliran. Sebaliknya, pada kondisi surut, aliran menjadi

lebih lancar karena adanya peningkatan kemiringan energi.

Evaluasi efektivitas operasi pintu air dilakukan dengan menganalisis interaksi antara debit aliran dari hulu dan fluktuasi muka air akibat pasang surut di hilir. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi pasang tinggi, muka air di hilir meningkat secara signifikan sehingga menyebabkan terjadinya tekanan balik (*backwater*). Kondisi ini menghambat aliran dari hulu dan mengurangi efektivitas pintu air dalam mengalirkan debit.

Sebaliknya, pada kondisi surut, pintu air dapat berfungsi lebih optimal karena aliran dari hulu tidak mengalami hambatan dari hilir. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas operasi pintu air sangat bergantung pada kondisi pasang surut yang terjadi. Menurut Noor et al. (2018), pengoperasian pintu air pada sistem yang dipengaruhi pasang surut harus dilakukan secara adaptif agar dapat menyesuaikan dengan dinamika muka air. Selain itu, ketidaksesuaian antara waktu operasi pintu air dan kondisi pasang surut dapat menyebabkan peningkatan risiko genangan di bagian hulu. Oleh karena itu, diperlukan strategi operasi yang mempertimbangkan pola pasang surut secara *real-time*.

Hasil penelitian menunjukkan adanya keterkaitan yang signifikan antara komponen hidrologi, dinamika pasang surut, dan karakteristik hidrolika dalam menentukan kinerja operasi pintu air di Sungai Petung. Interaksi antara debit dari hulu dan fluktuasi muka air di hilir membentuk kondisi aliran yang bersifat dinamis dan berubah terhadap waktu. Pada kondisi debit rendah (Q95%), pengaruh pasang surut cenderung lebih dominan karena kontribusi aliran dari hulu relatif kecil, sehingga tekanan dari hilir lebih mempengaruhi profil muka air sungai. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa pada sungai yang dipengaruhi pasang surut, interaksi antara debit dan elevasi muka air laut menjadi faktor utama dalam menentukan kondisi aliran dan potensi *backwater* (Gunawan et al., 2023; Sufyan et al., 2023; Kurniati, 2022; Pratama et al., 2021; Hidayat et al., 2020). Sebaliknya, pada kondisi debit tinggi, kombinasi antara aliran dari hulu dan pasang tinggi dapat menyebabkan peningkatan muka air yang signifikan dan berpotensi menimbulkan banjir. Fenomena ini

sejalan dengan konsep sistem hidrologi terpadu yang dikemukakan oleh David R. Maidment (1993), di mana interaksi antara komponen hidrologi dan hidrolika harus dianalisis secara bersamaan untuk memahami perilaku sistem secara keseluruhan.

Dengan demikian, efektivitas operasi pintu air di Sungai Petung tidak hanya ditentukan oleh kapasitas struktur, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam merespons perubahan kondisi pasang surut dan debit aliran. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan yang terintegrasi untuk meningkatkan kinerja sistem pengendalian banjir dan aliran sungai.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik hidrologi Sungai Petung ditandai oleh debit andalan yang relatif kecil, yaitu Q80% berkisar 0,548–0,730 m³/det dan Q95% sebesar 0,416–0,526 m³/det, yang mencerminkan keterbatasan aliran pada periode kering. Analisis pasang surut mengindikasikan adanya fluktuasi muka air yang cukup besar, dengan elevasi antara 0,41 m hingga 2,80 m, sehingga berperan sebagai kondisi batas hilir yang mempengaruhi profil muka air sungai. Hasil kajian hidrolika memperlihatkan bahwa kapasitas aliran belum optimal akibat sedimentasi serta adanya pengaruh backwater yang meningkatkan muka air ke arah hulu.

Evaluasi terhadap operasi pintu air menunjukkan bahwa kinerjanya sangat dipengaruhi oleh dinamika pasang surut, di mana efisiensi menurun saat pasang tinggi dan meningkat pada kondisi surut. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk menganalisis keterkaitan antara faktor hidrologi, pasang surut, dan operasi pintu air telah tercapai, serta menegaskan bahwa diperlukan pola pengoperasian pintu air yang responsif terhadap kondisi pasang surut guna meningkatkan efektivitas pengendalian aliran.

DAFTAR PUSTAKA

AKNOP Sungai Petung. (2020). Analisis kebutuhan operasi dan pemeliharaan Sungai Petung. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.

Gunawan, G., Hidayat, T., & Prasetyo, B. (2023). Karakteristik arus pasang surut di muara Sungai Mempawah, Kalimantan Barat. *Jurnal Laut Khatulistiwa*, 6(2), 45–54.

Hidayat, R., Setiawan, B., & Rahman, A. (2020). Analisis interaksi debit sungai dan pasang surut terhadap karakteristik aliran. *Jurnal Sumber Daya Air*, 16(1), 25–34.

Kurniati, K. (2022). Pengaruh pasang surut terhadap profil aliran di muara Sungai Krueng Baro. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 24(1), 33–42.

Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.

Melda, M. (2020). Analisis fluktuasi muka air akibat pasang surut di wilayah muara sungai. *Bioedusains: Jurnal Pendidikan Biologi dan Sains*, 3(2), 101–109.

Noor, H., Suroso, S., & Wicaksono, A. (2018). Evaluasi operasi pintu air pada jaringan irigasi rawa pasang surut. *Jurnal Teknik Pengairan*, 9(1), 1–10.

Pratama, R., Nugroho, S., & Wibowo, A. (2021). Pengaruh pasang surut terhadap debit dan muka air sungai di wilayah pesisir. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 12(2), 67–75.

Saputra, A., Putra, D. P., & Nugroho, S. (2021). Analisis pasang surut di Sungai Musi menggunakan metode least square (Studi kasus intake Gandus Palembang). *Jurnal Teknik Hidraulik*, 12(1), 55–64.

Sahdimin, S., Rinaldi, R., & Hidayat, R. (2023). Analisis pengaruh pasang surut terhadap karakteristik aliran Sungai Pemangkat. *Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil*, 5(2), 120–129.

Subarkah, I. (1980). *Hidrologi untuk perencanaan bangunan air*. Bandung: Idea Dharma.

Sufyan, A., Widodo, A., & Pranowo, W. (2023). Analisis karakteristik pasang surut dan arus di muara Sungai Porong, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), 115–126.

Triatmodjo, B. (2010). *Hidrologi terapan*. Yogyakarta: Beta Offset.

Triatmodjo, B. (2019). *Hidrologi terapan (Edisi revisi)*. Yogyakarta: Beta Offset.

United States Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual*. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.