

Analisis Laju Sedimentasi Sungai Benenain dan Pengaruhnya Terhadap Kondisi Banjir pada Ruas Hilir Sungai Benenain Provinsi Nusa Tenggara Timur

Marianus Andre Neka*, Ana Nurganah Chaidar

Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Email: marianusandre53@gmail.com*, ana.nurganah@itb.ac.id

Keywords

sedimentation; sediment transport; river morphology; hydrodynamics; hec-ras

Abstract

Benenain River is one of the major rivers in East Nusa Tenggara Province that has a high sedimentation potential due to the varying topographic conditions between upstream and downstream areas. Sedimentation processes in the downstream section cause riverbed aggradation, river morphology changes, and reduced channel capacity, which increase flood potential. This study aims to analyze sediment transport rates, river morphology changes, and their influence on flood conditions in the downstream reach of the Benenain River during the 2019–2023 period. The research employed a quantitative approach through hydraulic analysis, sediment transport analysis, and one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic modeling using HEC-RAS software. The data used included discharge data, water level measurements, bed load sediment, suspended sediment, and Digital Elevation Model (DEM) data. The results showed that increasing discharge caused the bed shear stress to exceed the critical shear stress, resulting in higher sediment transport rates. The distribution of flow velocity and shear stress at river bends was uneven, causing erosion on the outer bends and sediment deposition on the inner bends. River morphology changes in the form of aggradation and degradation reduced the flow capacity in the downstream reach and increased flood risk. River management using a combination of groynes and riprap was considered effective in reducing erosion and improving river morphology stability.

Kata Kunci

sedimentasi; angkutan sedimen; morfologi sungai; hidrodinamika; hec-ras

Abstrak

Sungai Benenain merupakan salah satu sungai utama di Provinsi Nusa Tenggara Timur yang memiliki potensi sedimentasi tinggi akibat kondisi topografi daerah aliran sungai yang bervariasi antara wilayah hulu dan hilir. Proses sedimentasi pada ruas hilir menyebabkan pendangkalan dasar sungai, perubahan morfologi alur, serta penurunan kapasitas tampung sungai yang berdampak terhadap peningkatan potensi banjir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju angkutan sedimen, perubahan morfologi sungai, serta pengaruhnya terhadap kondisi banjir pada ruas hilir Sungai Benenain selama periode 2019–2023. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis hidraulik, analisis angkutan sedimen, serta pemodelan hidrodinamika satu dimensi dan dua dimensi menggunakan perangkat lunak HEC-RAS. Data penelitian meliputi data debit, tinggi muka air, sedimen dasar, sedimen layang, dan Digital Elevation Model (DEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan debit aliran menyebabkan tegangan geser dasar melampaui tegangan geser kritis sehingga meningkatkan laju transport sedimen. Distribusi kecepatan dan shear stress pada tikungan sungai tidak merata, yang menyebabkan erosi pada sisi luar tikungan dan deposisi pada sisi dalam tikungan. Perubahan morfologi sungai berupa agradasi dan degradasi dasar sungai mengakibatkan penurunan kapasitas aliran pada ruas hilir sehingga meningkatkan risiko banjir. Penanganan berupa kombinasi bangunan krib dan riprap dinilai

PENDAHULUAN

Sungai Benenain merupakan salah satu sungai utama pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Benenain yang berada di Provinsi Nusa Tenggara Timur. DAS Benenain termasuk salah satu DAS terbesar di Pulau Timor bagian barat dengan luas sekitar 3.266,86 km² yang melintasi beberapa wilayah administratif, yaitu Kabupaten Timor Tengah Selatan, Kabupaten Timor Tengah Utara, Kabupaten Malaka, dan sebagian Kabupaten Belu. Sungai Benenain berhulu di kawasan Pegunungan Mutis dan bermuara di Laut Timor, sehingga memiliki karakteristik morfologi yang sangat dipengaruhi oleh variasi topografi dari bagian hulu hingga hilir (Graf, 1984).

Karakteristik geomorfologi DAS Benenain menunjukkan perbedaan kondisi yang cukup signifikan antara bagian hulu dan hilir. Wilayah hulu memiliki kemiringan lereng yang curam sehingga berpotensi menghasilkan erosi yang tinggi, sedangkan wilayah hilir memiliki topografi relatif landai yang cenderung menjadi zona deposisi sedimen (Brandt, 2000; Cao et al., 2021; Khosravi et al., 2020; Yen, 2002). Perbedaan elevasi tersebut menyebabkan terjadinya proses transportasi sedimen dari wilayah hulu menuju hilir sungai secara terus-menerus (Amini et al., 2017; Li et al., 2017; Liro, 2019).

Pada ruas hilir Sungai Benenain ditemukan indikasi pendangkalan dasar sungai akibat proses sedimentasi. Kondisi kemiringan dasar sungai yang relatif landai menyebabkan kecepatan aliran menurun sehingga kapasitas angkut sedimen menjadi lebih rendah. Sedimen yang terbawa dari bagian hulu tidak seluruhnya dapat terangkut menuju muara dan cenderung mengendap di sepanjang alur sungai. Akumulasi sedimen tersebut menyebabkan peningkatan elevasi dasar sungai, pembentukan point bar pada tikungan sungai, penyempitan penampang aliran, dan penurunan kapasitas sungai.

Selain itu, beberapa segmen sungai memperlihatkan tikungan tajam yang mengindikasikan adanya distribusi energi aliran yang tidak merata. Pada sisi luar tikungan terjadi konsentrasi energi aliran yang menyebabkan erosi tebing, sedangkan pada sisi dalam tikungan terjadi deposisi sedimen akibat penurunan kecepatan aliran. Fenomena ini menunjukkan bahwa dinamika hidrodinamika lokal memiliki pengaruh besar terhadap perubahan morfologi sungai.

Perubahan morfologi sungai yang terjadi secara terus-menerus dapat meningkatkan kerentanan terhadap banjir di wilayah hilir (Arafat et al., 2015; Ardiansyah, 2014). Pendangkalan dasar sungai mengurangi kapasitas tampung aliran sehingga pada kondisi debit tinggi air lebih mudah meluap ke dataran sekitarnya. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang mampu menjelaskan hubungan antara laju angkutan sedimen, karakteristik aliran, dan perubahan morfologi sungai untuk mendukung upaya pengelolaan sungai yang berkelanjutan.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas perubahan morfologi sungai akibat sedimentasi menggunakan pendekatan hidraulika dan pemodelan numerik. Penelitian (Fitriadin, 2016) menunjukkan bahwa perubahan morfologi sungai di daerah hilir dipengaruhi oleh distribusi kecepatan aliran dan pola transport sedimen yang tidak merata. Penelitian (Farchan, 2024) juga menjelaskan bahwa pembangunan infrastruktur sungai dapat mengubah pola hidrodinamika dan mempercepat terjadinya agradasi maupun degradasi dasar sungai. Selain itu, penelitian (Ariani, 2017) mengenai normalisasi sungai menunjukkan bahwa sedimentasi yang tinggi dapat menurunkan efektivitas kapasitas aliran sungai dan meningkatkan risiko banjir pada wilayah hilir. Kajian lain yang dilakukan oleh (Hjulström, 1935; Knighton, 1998; Meyer-Peter & Müller, 1948; Van Rijn, 1984) serta (Yang, 1996) menegaskan bahwa besarnya angkutan sedimen sangat dipengaruhi oleh tegangan geser dasar dan debit aliran. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus

pada pendekatan satu dimensi dalam analisis hidraulika sungai sehingga belum mampu menggambarkan distribusi aliran secara detail pada tikungan kritis yang memiliki dinamika morfologi tinggi.

Keterbatasan penelitian terdahulu menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (research gap) terkait integrasi analisis hidrodinamika satu dimensi dan dua dimensi dalam mengevaluasi perubahan morfologi sungai akibat sedimentasi, khususnya pada Sungai Benenain. Sebagian besar kajian sebelumnya hanya menitikberatkan pada analisis debit aliran dan sedimentasi tanpa mengevaluasi pola distribusi energi aliran secara spasial pada tikungan sungai. Padahal, distribusi kecepatan aliran, shear stress, dan stream power pada tikungan sungai memiliki pengaruh besar terhadap proses erosi dan deposisi sedimen (Chow, 1959; Einstein, 1950). Selain itu, penelitian mengenai perubahan morfologi Sungai Benenain masih relatif terbatas sehingga belum tersedia informasi yang komprehensif mengenai hubungan antara karakteristik aliran, laju transport sedimen, dan potensi banjir pada ruas hilir sungai. Kondisi ini menunjukkan perlunya penelitian yang mampu mengintegrasikan analisis hidrodinamika dan sedimentasi secara lebih detail untuk menghasilkan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap dinamika morfologi Sungai Benenain.

Urgensi penelitian ini semakin meningkat karena perubahan morfologi sungai yang tidak terkendali dapat menimbulkan dampak signifikan terhadap lingkungan dan masyarakat di wilayah hilir Sungai Benenain. Pendangkalan dasar sungai akibat sedimentasi menyebabkan kapasitas aliran berkurang sehingga air lebih mudah meluap ketika terjadi debit tinggi. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan frekuensi dan intensitas banjir yang dapat mengganggu aktivitas masyarakat, merusak infrastruktur, serta menurunkan kualitas lingkungan sekitar sungai. Selain itu, erosi tebing yang berlangsung secara terus-menerus dapat mengancam kestabilan lahan di sekitar alur sungai dan mempercepat perubahan bentuk sungai. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mampu memberikan gambaran ilmiah mengenai proses sedimentasi dan perubahan morfologi Sungai Benenain sebagai dasar dalam penyusunan strategi pengelolaan sungai yang berkelanjutan dan adaptif terhadap risiko bencana hidrologi.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada penggunaan pendekatan kombinasi pemodelan hidrodinamika satu dimensi (1D) dan dua dimensi (2D) menggunakan perangkat lunak HEC-RAS untuk menganalisis interaksi antara aliran, transport sedimen, dan perubahan morfologi sungai pada ruas hilir Sungai Benenain. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih detail terhadap distribusi velocity, shear stress, stream power, dan perubahan dasar sungai pada tikungan kritis yang sebelumnya belum banyak dikaji secara terintegrasi. Selain itu, penelitian ini tidak hanya menganalisis laju angkutan sedimen, tetapi juga mengevaluasi pengaruh perubahan morfologi sungai terhadap peningkatan risiko banjir pada wilayah hilir. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baru dalam pengembangan kajian hidrodinamika sungai dan pengelolaan sedimentasi berbasis pemodelan numerik.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju angkutan sedimen pada ruas hilir Sungai Benenain selama periode 2019–2023, mengevaluasi perubahan morfologi sungai akibat sedimentasi, serta menganalisis pengaruh distribusi aliran terhadap potensi erosi dan deposisi sedimen pada tikungan sungai. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk merumuskan alternatif penanganan morfologi sungai guna mengurangi risiko banjir dan meningkatkan kestabilan alur sungai. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat teoritis dalam pengembangan ilmu hidraulika sungai dan transport sedimen, serta manfaat praktis sebagai dasar pertimbangan bagi pemerintah dan instansi terkait dalam pengelolaan Sungai Benenain secara berkelanjutan. Penelitian ini juga diharapkan mampu menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pemodelan hidrodinamika, sedimentasi, dan perubahan morfologi sungai di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada ruas hilir Sungai Benenain di Kabupaten Malaka, Provinsi Nusa Tenggara Timur, sepanjang $\pm 5,96$ km yang berjarak sekitar 14 km dari muara sungai. Lokasi kajian dipilih karena menunjukkan indikasi perubahan morfologi sungai berupa pendangkalan, erosi tebing, dan pembentukan point bar.

Data Penelitian

Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer meliputi pengambilan sampel sedimen dasar, sedimen layang, serta pengukuran debit aliran sesaat di lapangan. Data sekunder meliputi data Digital Elevation Model (DEM), data tinggi muka air, data curah hujan, dan data spasial pendukung lainnya.

Tabel 1. Inventarisasi Data Penelitian

No	Data	Sumber Data	Keterangan
1	Curah hujan harian	BBWS Nusa Tenggara II	Data tahun 2004–2023
2	Data iklim	BMKG Kupang	Data tahun 2015–2020
3	Data DEM	BIG	Analisis topografi DAS
4	Tinggi muka air	BBWS Nusa Tenggara II	Data PDA Numbei
5	Sedimen	Survei lapangan	Sampel sedimen dasar dan layang
6	Debit sesaat	Survei lapangan	Data pendukung analisis

Sumber: BBWS Nusa Tenggara II, BMKG Kupang, BIG, dan Survei Lapangan (2024)

Analisis Topografi DAS

Analisis topografi DAS dilakukan untuk memahami karakteristik fisik wilayah tangkapan air yang memengaruhi proses aliran, erosi, dan suplai sedimen menuju Sungai Benenain. Data topografi diperoleh dari Digital Elevation Model (DEM) yang diolah menggunakan perangkat lunak berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Analisis ini penting karena kondisi topografi memiliki pengaruh langsung terhadap pola limpasan permukaan, distribusi energi aliran, serta besarnya material sedimen yang masuk ke saluran utama sungai.

Hasil delineasi DAS menunjukkan bahwa DAS Benenain memiliki luas sekitar 3.266,86 km² dengan pola aliran utama yang berkembang dari wilayah Pegunungan Mutis menuju bagian hilir di Kabupaten Malaka. Bagian hulu DAS memiliki karakteristik topografi curam dengan relief yang relatif tinggi, sedangkan bagian hilir memiliki bentuk lahan yang lebih datar. Perbedaan kondisi topografi ini mengakibatkan terjadinya ketidakseimbangan antara kemampuan erosi di bagian hulu dan kemampuan deposisi di bagian hilir.

Distribusi kemiringan lereng pada DAS Benenain memperlihatkan bahwa wilayah dengan lereng curam dan sangat curam mendominasi bagian hulu DAS. Kondisi tersebut meningkatkan potensi erosi tanah dan memperbesar suplai sedimen yang terbawa menuju sungai utama. Sebaliknya, wilayah hilir dengan lereng landai memiliki kapasitas aliran yang lebih rendah sehingga cenderung menjadi zona pengendapan sedimen.

Selain berpengaruh terhadap suplai sedimen, kemiringan lereng juga memengaruhi respon hidrologi DAS terhadap curah hujan. Wilayah dengan lereng curam memiliki waktu konsentrasi yang lebih singkat sehingga limpasan permukaan terbentuk lebih cepat dan meningkatkan debit aliran sungai. Kondisi ini menyebabkan proses transport sedimen berlangsung lebih intensif terutama pada saat debit tinggi.

Analisis topografi juga digunakan untuk mendukung penyusunan model hidrodinamika melalui interpolasi data elevasi pada ruas kajian. Hasil interpolasi menunjukkan bahwa beberapa segmen sungai mengalami perubahan bentuk penampang akibat proses agradasi dan degradasi yang berlangsung secara alami selama periode simulasi.

Analisis topografi dilakukan menggunakan data DEM berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Analisis ini meliputi deliniasi DAS, klasifikasi kemiringan lereng, dan interpolasi topografi untuk memperoleh karakteristik fisik DAS yang memengaruhi proses aliran dan sedimentasi.

Kemiringan lereng dihitung menggunakan persamaan:

$$S = (\Delta h / \Delta x) \times 100\%$$

di mana S merupakan kemiringan lereng, Δh adalah perbedaan elevasi, dan Δx adalah jarak horizontal.

Analisis Debit Aliran

Analisis debit aliran dilakukan untuk memperoleh besaran debit yang digunakan sebagai dasar dalam simulasi hidrodinamika dan analisis angkutan sedimen. Ketersediaan data debit observasi yang terbatas menyebabkan penelitian ini menggunakan pendekatan hubungan hidraulik penampang sungai berdasarkan data tinggi muka air dan geometri penampang sungai.

Perhitungan debit dilakukan dengan menggunakan persamaan Manning melalui parameter luas penampang basah, jari-jari hidraulik, kemiringan energi, dan koefisien kekasaran saluran. Penampang sungai yang digunakan dalam analisis diperoleh dari hasil survei lapangan dan validasi terhadap data DEM. Pendekatan ini memungkinkan transformasi data tinggi muka air menjadi debit harian selama periode simulasi 2019–2023.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perubahan tinggi muka air memiliki hubungan yang cukup kuat terhadap peningkatan debit aliran. Pada kondisi muka air rendah, debit yang dihasilkan relatif kecil sehingga kemampuan aliran dalam mengangkut sedimen masih terbatas. Sebaliknya, pada kondisi muka air tinggi debit meningkat secara signifikan dan menyebabkan kapasitas angkut sedimen bertambah.

Penyusunan kurva hubungan debit dan tinggi muka air atau rating curve dilakukan untuk menghasilkan hubungan matematis yang dapat digunakan dalam transformasi data tinggi muka air menjadi debit. Hasil kurva hubungan menunjukkan pola eksponensial yang menggambarkan bahwa peningkatan tinggi muka air menyebabkan kenaikan debit secara progresif.

Variasi debit selama periode simulasi memperlihatkan bahwa Sungai Benenain mengalami fluktuasi debit yang cukup besar, terutama pada musim hujan. Kondisi ini memengaruhi pola hidrodinamika sungai dan berperan penting dalam proses perubahan morfologi. Debit tinggi menyebabkan peningkatan tegangan geser dasar sehingga memicu erosi dan transport sedimen yang lebih aktif.

Debit aliran dihitung menggunakan pendekatan hubungan hidraulik penampang sungai dengan memanfaatkan data tinggi muka air dan geometri penampang sungai. Perhitungan debit menggunakan persamaan Manning:

$$Q = (1/n) A R^{2/3} S^{1/2}$$

Keterangan: Q = debit aliran (m³/det) A = luas penampang basah (m²) R = jari-jari hidraulik (m) S = kemiringan energi n = koefisien Manning

Hubungan antara tinggi muka air dan debit selanjutnya disusun dalam bentuk rating curve untuk memperoleh debit harian selama periode simulasi.

Analisis Angkutan Sedimen

Analisis angkutan sedimen dilakukan untuk mengetahui besarnya laju sedimentasi pada ruas hilir Sungai Benenain serta pengaruhnya terhadap perubahan dasar sungai. Analisis ini mencakup perhitungan sedimen dasar (bed load), sedimen layang (suspended load), dan total angkutan sedimen berdasarkan kondisi hidraulik dan karakteristik material dasar sungai.

Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa material dasar sungai didominasi oleh sedimen pasir non-kohefif dengan distribusi ukuran butir relatif seragam. Karakteristik sedimen ini menunjukkan bahwa material dasar sungai cukup mudah tertransportasikan ketika tegangan geser dasar meningkat akibat bertambahnya debit aliran.

Perhitungan tegangan geser dasar menunjukkan bahwa pada kondisi debit rendah nilai tegangan geser masih berada di bawah tegangan geser kritis sehingga sebagian besar material dasar sungai berada dalam kondisi stabil. Namun, ketika debit meningkat, nilai tegangan geser dasar melampaui tegangan geser kritis dan menyebabkan sedimen mulai bergerak sebagai bed load maupun suspended load.

Laju angkutan sedimen layang menunjukkan hubungan yang sebanding dengan peningkatan debit aliran. Semakin besar debit aliran maka turbulensi aliran semakin tinggi sehingga lebih banyak partikel halus yang terangkat dan terbawa dalam kolom aliran. Sedimen layang mendominasi proses transport pada kondisi debit tinggi terutama pada segmen sungai dengan aliran turbulen.

Sementara itu, angkutan sedimen dasar terjadi melalui mekanisme menggelinding, meluncur, dan meloncat di sepanjang dasar sungai. Sedimen dasar cenderung bergerak lebih aktif pada bagian sungai yang memiliki kecepatan aliran dan tegangan geser tinggi. Pada tikungan sungai, pergerakan sedimen dasar dipengaruhi oleh distribusi kecepatan aliran yang tidak merata sehingga menyebabkan erosi pada sisi luar tikungan dan deposisi pada sisi dalam.

Hasil rekapitulasi laju angkutan sedimen menunjukkan bahwa total angkutan sedimen meningkat secara signifikan pada kondisi debit tinggi. Kondisi ini memperlihatkan bahwa dinamika aliran Sungai Benenain memiliki kemampuan besar dalam mengubah bentuk dasar sungai dalam periode simulasi.

Analisis angkutan sedimen dilakukan untuk menghitung laju angkutan sedimen dasar dan sedimen layang. Perhitungan didasarkan pada karakteristik ukuran butir sedimen, debit aliran, dan tegangan geser dasar.

Tegangan geser dasar dihitung menggunakan persamaan:

$$\tau_0 = \rho g R S$$

Sedangkan tegangan geser kritis dihitung menggunakan pendekatan Shields (Shields, 1936):

$$\tau_c = \theta_c (\rho_s - \rho) g d_{50}$$

Apabila nilai τ_0 lebih besar dari τ_c , maka sedimen mulai bergerak dan terangkut oleh aliran.

Laju angkutan sedimen total dihitung menggunakan persamaan:

$$Q_t = Q_b + Q_s$$

Keterangan: Q_t = angkutan sedimen total Q_b = angkutan sedimen dasar Q_s = angkutan sedimen layang

Pemodelan Hidrodinamika

Pemodelan hidrodinamika dilakukan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS melalui pendekatan satu dimensi (1D) dan dua dimensi (2D). Model 1D digunakan untuk menganalisis profil muka air, distribusi kecepatan, dan tegangan geser sepanjang ruas sungai. Model 2D digunakan untuk menganalisis pola aliran pada tikungan kritis secara lebih detail.

Parameter yang dianalisis dalam model meliputi:

1. Kedalaman aliran (depth)
2. Kecepatan aliran (velocity)
3. Water Surface Elevation (WSE)
4. Shear stress
5. Stream power
6. Bed change
7. Total-load transport rate

Analisis Penanganan Morfologi Sungai

Analisis penanganan dilakukan berdasarkan hasil identifikasi zona kritis yang mengalami erosi dan deposisi dominan. Alternatif penanganan yang dievaluasi meliputi perlindungan tebing, krib, dan riprap untuk mengurangi energi aliran pada tikungan kritis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Eksisting Sungai

Kondisi eksisting Sungai Benenain menunjukkan adanya perubahan morfologi pada beberapa segmen sungai. Pada bagian tertentu ditemukan pendangkalan akibat deposisi sedimen, sedangkan pada bagian lain terjadi erosi tebing yang cukup intensif. Variasi bentuk penampang sungai dan perubahan arah aliran pada tikungan menyebabkan distribusi energi aliran menjadi tidak seragam.

Material dasar sungai didominasi oleh sedimen pasir non-koheusif dengan distribusi ukuran butir yang relatif seragam. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa sedimen memiliki karakteristik yang mudah tertransportasikan ketika debit aliran meningkat.

Tabel 2. Karakteristik Ukuran Butir Sedimen Dasar Sungai

Titik Sampel	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc	Fraksi Dominan
Sampel 1	0,18	0,42	0,48	2,67	3,70	Pasir
Sampel 2	0,20	0,45	0,50	2,50	3,40	Pasir
Sampel 3	0,17	0,40	0,47	2,76	3,55	Pasir
Sampel 4	0,19	0,43	0,49	2,58	3,60	Pasir

Sumber: Hasil Uji Laboratorium Sedimen (2024)

Karakteristik sedimen tersebut menunjukkan bahwa dasar sungai didominasi oleh pasir dengan tingkat keseragaman relatif tinggi. Kondisi ini menyebabkan sedimen lebih mudah bergerak ketika tegangan geser aliran meningkat.

Analisis Topografi DAS

Hasil analisis topografi menunjukkan bahwa DAS Benenain memiliki variasi kemiringan lereng yang cukup besar antara wilayah hulu dan hilir. Wilayah hulu didominasi lereng curam yang berpotensi menghasilkan erosi tinggi, sedangkan wilayah hilir memiliki kemiringan relatif datar sehingga menjadi area deposisi sedimen.

Tabel 3. Kelas Kemiringan Lereng DAS Benenain

Kelas Lereng	Kemiringan (%)	Karakteristik
Datar	0–8	Potensi erosi rendah
Landai	8–15	Erosi sedang
Curam	15–25	Erosi tinggi
Sangat Curam	>25	Erosi sangat tinggi

Sumber: Hasil Analisis DEM dan SIG (2024)

Distribusi kemiringan lereng tersebut berpengaruh terhadap suplai sedimen yang masuk ke Sungai Benenain. Semakin curam lereng di bagian hulu, semakin besar potensi sedimen yang terbawa menuju bagian hilir.

Analisis Debit Aliran

Perhitungan debit aliran dilakukan menggunakan hubungan hidraulik penampang sungai dan data tinggi muka air. Hasil analisis menunjukkan bahwa debit aliran meningkat signifikan pada musim hujan sehingga memengaruhi kemampuan aliran dalam mengangkut sedimen.

Tabel 4. Parameter Hidraulik dalam Perhitungan Debit

Parameter	Nilai
Koefisien Manning	0,030
Kemiringan dasar sungai	0,0008
Lebar rata-rata sungai	85 m

Parameter	Nilai
Kedalaman rata-rata	3,2 m

Sumber: Hasil Perhitungan Penelitian (2024)

Hubungan antara tinggi muka air dan debit menunjukkan pola eksponensial yang menggambarkan peningkatan debit secara signifikan ketika muka air meningkat.

Analisis Angkutan Sedimen

Analisis angkutan sedimen menunjukkan bahwa laju transport sedimen meningkat seiring bertambahnya debit aliran. Pada kondisi debit rendah, sebagian besar sedimen masih berada dalam kondisi stabil. Namun, pada debit tinggi tegangan geser dasar melebihi tegangan geser kritis sehingga sedimen mulai bergerak.

Tabel 5. Perbandingan Tegangan Geser Dasar dan Tegangan Geser Kritis

Debit (m ³ /det)	τ_0	τ_c	Kondisi
150	2,10	2,35	Stabil
250	2,80	2,35	Mulai bergerak
350	3,45	2,35	Sedimen bergerak
450	4,10	2,35	Transport aktif

Sumber: Hasil Analisis Hidraulik dan Sedimen (2024)

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan debit secara langsung meningkatkan kemampuan aliran dalam menggerakkan sedimen. Pada kondisi debit tinggi, sedimen terangkut baik sebagai bed load maupun suspended load.

Tabel 6. Rekapitulasi Laju Angkutan Sedimen Total

Debit (m ³ /det)	Sedimen Dasar (Q _b)	Sedimen Layang (Q _s)	Sedimen Total (Q _t)
150	12,5	8,4	20,9
250	24,8	17,6	42,4
350	37,5	29,3	66,8
450	52,1	40,7	92,8

Sumber: Hasil Simulasi Angkutan Sedimen HEC-RAS (2024)

Berdasarkan hasil tersebut, dapat diketahui bahwa laju angkutan sedimen total mengalami peningkatan signifikan pada kondisi debit tinggi. Kondisi ini menyebabkan perubahan elevasi dasar sungai secara bertahap.

Analisis Hidrodinamika 1D

Pemodelan hidrodinamika satu dimensi dilakukan untuk mengevaluasi perilaku aliran sepanjang ruas kajian Sungai Benenain. Model 1D digunakan untuk mengetahui distribusi muka air, kedalaman aliran, kecepatan, tegangan geser, dan perubahan elevasi dasar sungai sepanjang alur sungai.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi kecepatan aliran tidak seragam pada seluruh ruas sungai. Segmen dengan penampang relatif sempit dan kemiringan dasar yang lebih besar menunjukkan kecepatan aliran lebih tinggi dibandingkan segmen yang lebih lebar dan landai. Kondisi ini menyebabkan distribusi energi aliran menjadi tidak merata.

Profil muka air hasil simulasi memperlihatkan adanya kenaikan elevasi muka air pada beberapa segmen sungai yang mengalami pendangkalan akibat sedimentasi. Pendangkalan dasar sungai menyebabkan kapasitas aliran berkurang sehingga muka air meningkat ketika debit besar terjadi.

Distribusi tegangan geser sepanjang ruas sungai menunjukkan bahwa beberapa segmen memiliki nilai tegangan geser yang tinggi dan berpotensi mengalami erosi dasar maupun erosi

tebing. Sebaliknya, segmen dengan tegangan geser rendah cenderung mengalami deposisi sedimen. Pola ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara kemampuan aliran mengangkut sedimen dan suplai sedimen yang masuk ke saluran.

Hasil simulasi bed change memperlihatkan bahwa perubahan dasar sungai terjadi secara dinamis selama periode simulasi. Pada bagian tertentu terjadi degradasi dasar sungai akibat erosi, sedangkan pada bagian lainnya terjadi aggradasi akibat deposisi sedimen. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa Sungai Benenain memiliki karakter morfologi yang aktif.

Hasil simulasi hidrodinamika satu dimensi menunjukkan adanya variasi distribusi kecepatan dan tegangan geser sepanjang ruas kajian. Pada bagian tikungan sungai, kecepatan aliran cenderung meningkat pada sisi luar tikungan akibat konsentrasi energi aliran.

Tabel 7. Rekapitulasi Parameter Hidrodinamika 1D

Parameter	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
Kedalaman aliran	1,25 m	4,80 m
Kecepatan aliran	0,85 m/det	2,95 m/det
Shear stress	1,80 N/m ²	4,20 N/m ²
Stream power	15 W/m ²	65 W/m ²

Sumber: Hasil Simulasi HEC-RAS 1D (2024)

Distribusi parameter hidrodinamika menunjukkan bahwa lokasi dengan kecepatan dan tegangan geser tinggi memiliki potensi erosi yang lebih besar dibandingkan segmen lainnya.

Analisis Hidrodinamika 2D

Pemodelan hidrodinamika dua dimensi dilakukan pada tiga tikungan kritis yang dipilih berdasarkan hasil simulasi satu dimensi dan observasi kondisi lapangan. Analisis ini bertujuan untuk memahami distribusi aliran secara horizontal serta mengevaluasi potensi erosi dan deposisi pada tikungan sungai.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi kecepatan aliran pada tikungan sungai bersifat tidak merata. Kecepatan tertinggi terjadi pada sisi luar tikungan akibat konsentrasi energi aliran, sedangkan sisi dalam tikungan memiliki kecepatan yang lebih rendah. Kondisi ini menyebabkan terjadinya erosi pada sisi luar dan deposisi pada sisi dalam tikungan.

Distribusi shear stress pada model dua dimensi memperlihatkan pola yang sama dengan distribusi kecepatan aliran. Nilai shear stress tertinggi berada pada bagian luar tikungan yang mengalami gerusan aktif. Sementara itu, bagian dalam tikungan menunjukkan nilai shear stress lebih rendah sehingga memungkinkan terjadinya akumulasi sedimen dan pembentukan point bar.

Hasil simulasi stream power menunjukkan bahwa energi aliran terkonsentrasi pada tikungan tertentu sehingga memperbesar potensi perubahan morfologi. Tikungan dengan nilai stream power tinggi cenderung mengalami migrasi alur yang lebih aktif dibandingkan segmen lainnya.

Selain itu, hasil simulasi total-load transport rate menunjukkan bahwa distribusi transport sedimen tidak merata pada seluruh tikungan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa proses transport sedimen sangat dipengaruhi oleh pola aliran lokal dan geometri sungai.

Model dua dimensi juga menunjukkan terbentuknya secondary flow pada tikungan sungai. Secondary flow menyebabkan aliran permukaan bergerak menuju sisi luar tikungan sedangkan aliran dekat dasar bergerak ke sisi dalam. Mekanisme ini memperkuat erosi pada sisi luar dan deposisi pada sisi dalam tikungan.

Pemodelan dua dimensi dilakukan pada tiga tikungan kritis yang menunjukkan perubahan morfologi paling aktif. Hasil simulasi memperlihatkan pola aliran sekunder yang menyebabkan erosi pada sisi luar tikungan dan deposisi pada sisi dalam.

Tabel 8. Rekapitulasi Parameter Tikungan Kritis

Tikungan	Velocity	Shear Stress	Kondisi Dominan
	Maksimum (m/det)	Maksimum	
Tikungan 1	2,75	4,10	Erosi
Tikungan 2	2,40	3,85	Deposisi
Tikungan 3	2,95	4,25	Erosi

Sumber: Hasil Simulasi HEC-RAS 2D (2024)

Distribusi velocity dan shear stress memperlihatkan bahwa energi aliran terkonsentrasi pada sisi luar tikungan. Kondisi ini menyebabkan pengikisan tebing yang cukup intensif dan berpotensi mengubah bentuk alur sungai.

Analisis Perubahan Morfologi Sungai

Perubahan morfologi Sungai Benenain dianalisis berdasarkan hasil simulasi hidrodinamika dan transport sedimen selama periode 2019–2023. Perubahan morfologi yang diamati meliputi perubahan elevasi dasar sungai, perubahan bentuk penampang, migrasi alur, serta perkembangan point bar pada tikungan sungai.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sedimentasi memiliki pengaruh langsung terhadap peningkatan elevasi dasar sungai terutama pada bagian hilir yang memiliki kemiringan dasar relatif landai. Kondisi ini menyebabkan kemampuan aliran dalam mengangkut sedimen menjadi berkurang sehingga material sedimen cenderung terendapkan.

Pada beberapa segmen sungai terjadi aggradasi dasar sungai yang cukup signifikan akibat akumulasi sedimen. Pendangkalan tersebut menyebabkan penampang aliran menjadi lebih dangkal dan kapasitas tampung sungai menurun. Sebaliknya, pada segmen dengan konsentrasi energi aliran tinggi terjadi degradasi dasar sungai akibat proses erosi yang berlangsung terus-menerus.

Perubahan morfologi juga terlihat pada bagian tikungan sungai. Sisi luar tikungan mengalami erosi aktif yang menyebabkan pengikisan tebing dan pelebaran alur sungai. Pada sisi dalam tikungan terjadi deposisi sedimen yang membentuk point bar. Kondisi ini menyebabkan bentuk alur sungai mengalami perubahan secara bertahap.

Distribusi perubahan dasar sungai menunjukkan bahwa dinamika morfologi Sungai Benenain sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara debit aliran, karakteristik sedimen, dan geometri sungai. Pada kondisi debit tinggi, perubahan morfologi berlangsung lebih aktif karena kemampuan aliran dalam menggerakkan sedimen meningkat.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sedimentasi dan perubahan morfologi Sungai Benenain memiliki keterkaitan yang erat dengan peningkatan risiko banjir pada ruas hilir sungai. Pendangkalan dasar sungai menyebabkan kapasitas aliran menurun sehingga pada saat debit besar terjadi potensi limpasan menjadi lebih tinggi.

Perubahan morfologi sungai ditunjukkan oleh terjadinya aggradasi dan degradasi dasar sungai selama periode simulasi. Pada beberapa segmen sungai terjadi peningkatan elevasi dasar akibat deposisi sedimen, sedangkan pada segmen lainnya terjadi penurunan elevasi dasar akibat erosi.

Tabel 9. Rekapitulasi Perubahan Morfologi Sungai

Segmen Sungai	Kondisi Dominan	Dampak
Hulu Kajian	Erosi	Penurunan dasar sungai
Tengah Kajian	Transport aktif	Ketidakstabilan alur
Hilir Kajian	Deposisi	Pendangkalan sungai

Sumber: Hasil Analisis Morfologi Sungai (2024)

Pendangkalan yang terjadi pada ruas hilir menyebabkan kapasitas sungai menurun sehingga meningkatkan potensi banjir pada saat debit tinggi. Selain itu, perubahan bentuk penampang sungai juga memengaruhi distribusi energi aliran.

Rekomendasi Penanganan Sungai

Berdasarkan hasil analisis, penanganan perubahan morfologi sungai diarahkan pada perlindungan tebing dan pengendalian aliran pada tikungan kritis. Alternatif penanganan yang dipilih adalah kombinasi bangunan krib dan riprap.

Tabel 10. Alternatif Penanganan Morfologi Sungai

Alternatif	Fungsi Utama	Kelebihan
Riprap	Melindungi tebing	Stabil dan mudah diterapkan
Krib	Mengarahkan aliran	Mengurangi erosi tikungan
Normalisasi	Meningkatkan kapasitas	Mengurangi pendangkalan

Sumber: Hasil Analisis dan Rekomendasi Penelitian (2024)

Hasil simulasi pasca perbaikan menunjukkan adanya penurunan kecepatan aliran pada sisi luar tikungan sehingga potensi erosi dapat dikurangi. Selain itu, distribusi energi aliran menjadi lebih merata dibandingkan kondisi eksisting.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Sungai Benenain memiliki dinamika morfologi yang dipengaruhi oleh interaksi antara debit aliran, karakteristik sedimen, dan kondisi topografi DAS. Material dasar sungai didominasi oleh sedimen pasir non-kohefif yang mudah terangkut pada kondisi debit tinggi. Analisis angkutan sedimen menunjukkan bahwa peningkatan debit menyebabkan tegangan geser dasar melampaui tegangan geser kritis sehingga memicu transport sedimen yang lebih aktif. Pemodelan hidrodinamika satu dimensi dan dua dimensi menunjukkan bahwa distribusi kecepatan dan tegangan geser tidak merata, terutama pada bagian tikungan sungai. Kondisi ini menyebabkan erosi pada sisi luar tikungan dan deposisi pada sisi dalam yang membentuk point bar. Perubahan morfologi sungai yang terjadi berdampak pada peningkatan elevasi dasar sungai dan penurunan kapasitas aliran pada ruas hilir Sungai Benenain sehingga meningkatkan potensi banjir. Rekomendasi penanganan berupa kombinasi bangunan krib dan riprap dinilai mampu mengurangi konsentrasi energi aliran pada tikungan kritis dan memperbaiki kestabilan morfologi sungai. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data debit observasi yang lebih lengkap dan analisis hidrograf banjir agar simulasi hidrodinamika dan sedimentasi dapat memberikan hasil yang lebih komprehensif.

REFERENSI

- Amini, N., Balouchi, B., & Shafai Bejestan, M. (2017). Reduction of local scour at river confluences using a collar. *International Journal of Sediment Research*, 32(3), 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.06.001>
- Arafat, Y., Pallu, M. S., Thaha, M. A., & Lopa, R. T. (2015). Studi Karakteristik Sebaran Sedimen Hilir Bendung Karet Sungai Jeneberang. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Ardiansyah, A. (2014). *Normalisasi Sungai Dapit Menuju Kuala Maras*. Universitas Tanjungpura.
- Ariani, M. B. (2017). *Normalisasi Sungai Pemali Kabupaten Brebes*.
- Brandt, S. A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40(4), 375–401. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00093-X)

- Cao, Z., Hu, P., Pender, G., & Liu, H. (2021). Morphodynamic processes in rivers with cascade movable weirs: A case study of the middle Fen River. *Journal of Hydrology*, 603, 127069. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127069>
- Chow, V. Te. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Einstein, H. A. (1950). *The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows*. U.S. Department of Agriculture.
- Farchan, A. (2024). *Kajian Perubahan Morfologi Sungai Akibat Pembangunan Bendung Karet Sungai Juana Provinsi Jawa Tengah*.
- Fitriadin, I. (2016). *Morphology Analysis in Middle–Downstream Area of Progo River*.
- Graf, W. H. (1984). *Hydraulics of Sediment Transport*. Water Resources Publications.
- Hjulström, F. (1935). Studies of the Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institution of the University of Uppsala*, 25, 221–527.
- Khosravi, K., Chegini, A. H. N., Cooper, J. R., Daggupati, P., Binns, A., & Mao, L. (2020). Uniform and graded bed-load sediment transport in a degrading channel with non-equilibrium conditions. *International Journal of Sediment Research*, 35(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.10.005>
- Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. Arnold Publisher.
- Li, Z., Yu, G., Brierley, G., & Wang, Z. (2017). Migration and oscillation of the mainstream of the upper Yellow River on the Zoige Basin in the eastern Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 295, 714–725. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.008>
- Liro, M. (2019). Gravel-bed river morphology upstream and downstream of a run-of-river reservoir: a comparative study. *Geomorphology*, 328, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.016>
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for Bed-Load Transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Research*.
- Shields, A. (1936). *Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement*. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431–1456. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))
- Yang, C. T. (1996). *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill.
- Yen, B. C. (2002). Open Channel Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 20–39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:1\(20\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(20))