

Pemodelan Hidrodinamika Aliran dan Transportasi Sedimen pada Ruas Pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Cibeet, Jawa Barat

Hydrodynamic and Sediment Transport Modeling At Lower Citarum and Cibeet River Confluence West Java

Yadi Suryadi ¹⁾ Ruth Helena^{2)*} Dhemi Harlan ³⁾ I Putu Samskerta ⁴⁾

^{1,3)} Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung

²⁾ Mahasiswa Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung

⁴⁾ Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan, Kementerian PUPR
Jl. Ir. H. Juanda No. 193 Bandung

Corresponding email: siregar.ruthhelena@gmail.com

Accepted: 15 February 2023; Revised: 17 May 2023; Approved: 29 June 2024

ABSTRACT

Flooding and changes in riverbed morphology often become issues near river confluences, as observed at the confluence of Citarum Hilir and Cibeet Rivers. This study aims to analyze the cross-sectional capacity and riverbed changes around the confluence of Citarum Hilir and Cibeet Rivers. This study utilizes 1D numerical modeling MIKE 11 with Hydrodynamic and Sediment Transport Modules. The hydrodynamic modeling inputs are river network and cross-sectional profiles. Hydrographs with return periods of 2, 5, 10, and 25 years are used as upstream boundaries, and a discharge curve is used as the downstream boundary of the model. The model is calibrated using water surface elevation measurements taken from September 13-16, 2021. The hydrodynamic modeling results indicate that Citarum Hilir and Cibeet Rivers cannot convey flood discharges with a 2-year return period. The sediment transport modeling results show no significant changes in the riverbed of Citarum Hilir before the confluence, but degradation of approximately 0.38 – 0.46 meters occurs after the confluence. Degradation happens in zones of maximum velocity where flow turbulence and shear stress increase, causing erosion of the Citarum Hilir riverbed. Degradation also occurs near the Cibeet River confluence due to flow acceleration at the outer bend of the river. Flooding and sediment transport are natural factors that can alter the morphology of river confluences, such as the confluence of Citarum Hilir and Cibeet Rivers.

Keywords: Citarum river, Cibeet river, river confluence, hydrodynamic modeling, sediment transport modeling

ABSTRAK

Banjir dan perubahan dasar sungai sering menjadi masalah di dekat pertemuan ruas sungai, seperti yang terjadi pada pertemuan ruas Sungai Citarum Hilir dan Cibeet. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kapasitas penampang serta perubahan dasar sungai di sekitar pertemuan ruas Sungai Citarum Hilir dan Cibeet. Penelitian ini menggunakan metode pemodelan numerik 1D MIKE 11 Modul Hydrodynamic dan Sediment Transport. Input dari pemodelan hidrodinamika adalah jaringan sungai dan penampang melintang saluran. Hidrograf dengan periode ulang 2, 5, 10 dan 25 tahun digunakan sebagai batas hulu dan lengkung debit sebagai batas hilir model. Model dikalibrasi menggunakan elevasi muka air hasil pengukuran lapangan dari tanggal 13 September - 16 September 2021. Hasil pemodelan hidrodinamika menunjukkan bahwa Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet tidak mampu mengalirkan debit banjir pada periode 2 tahunan. Hasil pemodelan angkutan sedimen menunjukkan tidak ada perubahan yang signifikan pada dasar Sungai Citarum Hilir sebelum pertemuan ruas sungai, namun terjadi degradasi dasar sungai sekitar 0,38 – 0,46 m setelah pertemuan ruas sungai. Degradasi terjadi pada zona kecepatan maksimum di mana turbulensi aliran dan tegangan geser akan meningkat sehingga mengikis dasar Sungai Citarum Hilir. Degradasi juga terjadi di dekat pertemuan ruas Sungai Cibeet karena adanya percepatan aliran pada tikungan luar sungai. Banjir dan angkutan sedimen merupakan faktor alamiah yang dapat mengubah morfologi pertemuan ruas sungai seperti pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet.

Kata Kunci: sungai Citarum, sungai Cibeet, pertemuan sungai, pemodelan hidrodinamika, pemodelan transportasi sedimen

PENDAHULUAN

Confluence terbentuk apabila dua atau lebih aliran sungai bergabung menjadi aliran tunggal (Collick et al., 2009). *Confluence* merupakan simpul penting dalam jaringan sungai yang mempengaruhi aliran (Bahmanpouri et al., 2022; Dixon et al., 2018; Leite Ribeiro et al., 2012; Rhoads & Sukhodolov, 2008), angkutan sedimen (Biron et al., 2002; Deng et al., 2020; Gualtieri et al., 2019; Lewis et al., 2020; Parsons et al., 2008; Shen et al., 2022; Yuan et al., 2021), kualitas air (Shen et al., 2021; Xiao et al., 2017), dan pola ekologi (Hui et al., 2022; Osawa et al., 2010) sungai di hilirnya. Perubahan signifikan dalam hidrodinamika, morfologi dasar sungai serta fitur lingkungan dan ekologi terjadi pada pertemuan, di mana aliran dari dua anak sungai bergabung dan menyesuaikan dengan geometri daratan setelah pertemuan sungai (Yuan et al., 2021). Beberapa penelitian yang telah dilakukan baik secara numerik maupun percobaan laboratorium menyatakan, perilaku dan karakteristik aliran pada zona pertemuan sungai jauh lebih kompleks dan rumit dibandingkan dengan saluran tunggal (Alizadeh & Fernandes, 2021; Luo, 2017; Ramos, 2022; Rhoads & Sukhodolov, 2004; Sukhodolov et al., 2010). Daerah pertemuan sungai ditandai dengan terbentuknya zona hidrodinamika pertemuan ruas sungai atau *confluence hydrodynamic zone* (CHZ) yang terdiri atas 6 fitur utama : zona stagnasi, zona defleksi aliran, zona pemisahan, lapisan pencampuran, zona kecepatan maksimum dan pemulihan aliran (Best, 1987). Luas CHZ tergantung pada karakteristik morfologi geometri sungai yang membentuk pertemuan dan karakteristik hidrologi aliran pertemuan (Kenworthy & Rhoads, 1995). Karena morfologi dan hidrologi sungai bervariasi dari waktu ke waktu, luasan CHZ juga berubah secara dinamis (Rhoads, 2020).

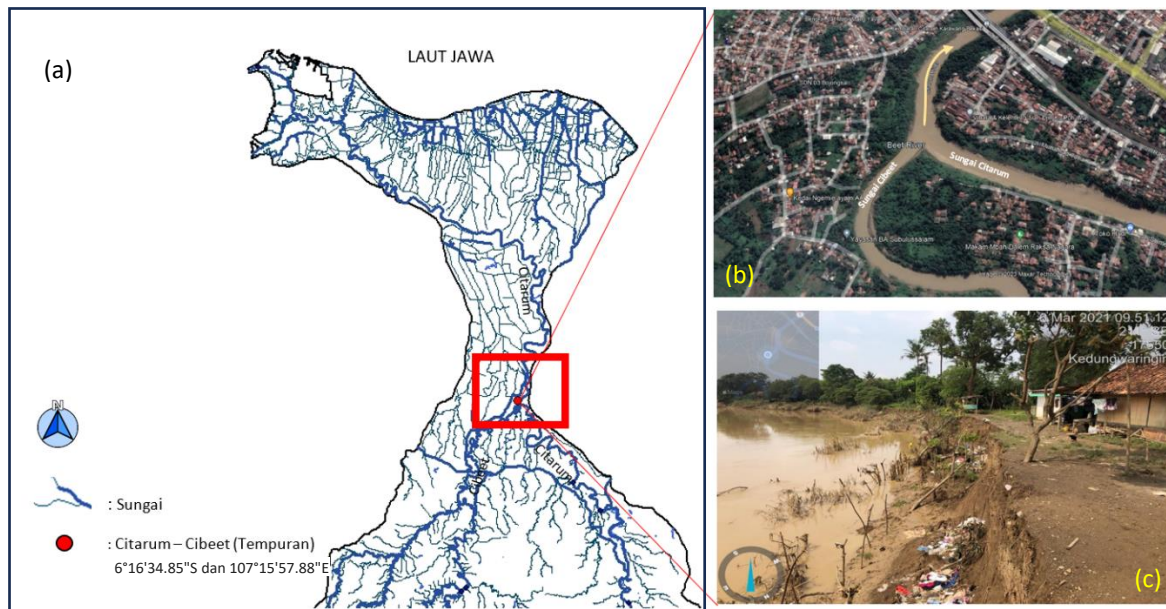
Pada pertemuan ruas sungai terjadi interaksi antara gelombang banjir di sungai utama dan anak sungai yang dapat menghasilkan efek aliran balik (*backwater*) yang dapat meluas hingga beberapa kilometer ke hulu anak sungai, terkhusus pada sungai dengan tingkat kemiringan landai (Dyhouse, 1985). Aliran sungai yang membawa sedimen biasanya akan berhenti pada saat tiba di pertemuan sungai dengan aliran yang lebih besar, aliran dengan gradien yang lebih rendah atau ditempat lain dengan gradien yang menurun yang kemudian membentuk endapan sedimen (Lancaster dkk., 2010; Rice, 2017). Analisis pertemuan sungai dan dampaknya terhadap aliran sedimen, morfologi sungai, dan gerusan sangat penting untuk perencanaan teknis yang tepat, penilaian keselamatan, dan langkah-langkah mitigasi di wilayah di mana pertemuan sungai terjadi.

Permasalahan banjir sering ditemukan pada daerah di sekitar pertemuan ruas sungai, seperti yang terjadi pada pertemuan ruas Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet. Curah hujan tinggi yang berlangsung secara terus menerus mengakibatkan Waduk Jatiluhur tidak mampu menampung debit banjir sehingga limpas di pelimpah. Akibatnya aliran keluar dari waduk mengalir ke Sungai Citarum, bersamaan dengan meluapnya Sungai Cikao di Purwakarta dan Sungai Cibeet di Karawang yang mengalir ke Sungai Citarum sehingga alur sungai Citarum di Karawang tidak mampu lagi menampung debit banjir, yang menyebabkan terjadinya banjir di Teluk Jambe, Karawang Kulon, Karawang Wetan, Kabupaten Karawang, dan Kabupaten Bekasi. (Imansyah, 2012)

Segmen Sungai Citarum Hilir melalui kabupaten Karawang dan Kabupaten Bekasi, dimulai dari *Tailrace* Bendungan Jatiluhur sampai dengan Muara Gembong dengan panjang ± 140 km. Pada segmen Sungai Citarum Hilir terdapat dua anak sungai, yaitu Sungai Cikao sepanjang 35 km dan Sungai Cibeet dengan panjang ± 121 km (Gambar 1(a)). Salah satu lokasi yang sering terdampak banjir, berada pada pertemuan Sungai Citarum Hilir dengan Sungai Cibeet, tepatnya wilayah Desa Laban Sari Kampung Nanggawer, Kec. Cikarang Timur, Kab. Bekasi (Gambar 1 (b)). Pada lokasi ini terdapat tanggul kritis yang sering terlampaui air sungai akibat curah hujan yang tinggi. Pada bulan Februari 2021 aliran air melimpas yang mengakibatkan bangunan perkuatan tebing roboh sehingga pemukiman warga menjadi tergenang hingga ketinggian 2 m (Sindonews.com, 21 Februari 2021). Akibat kejadian banjir tersebut kondisi tanggul sungai rusak parah seperti terlihat pada (Gambar 1 (c)).

Maksud dari penelitian ini adalah melakukan kajian banjir dan morfologi sungai pada pertemuan ruas Sungai Citarum dan Sungai Cibeet. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas penampang sungai serta potensi perubahan dasar sungai khususnya di sekitar pertemuan ruas Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet dengan menggunakan pemodelan numerik.

Secara administrasi lokasi penelitian berada di sekitar Kabupaten Karawang dan Bekasi ($6^{\circ}16'34,85''S$ dan $107^{\circ}15'57,88''E$). Pemodelan hidrodinamik dan angkutan sedimen Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet ini dilakukan pada debit banjir dengan kala ulang 2, 5, 10 dan 25 tahun. Debit banjir kala ulang yang digunakan berdasarkan hasil analisis yang dilakukan penulis pada saat penyusunan Tesis yang berjudul "Kajian Banjir dan Morfologi Sungai Pada Lokasi Pertemuan Sungai Citarum dan Sungai Cibeet" pada tahun 2022.



Gambar 1 Lokasi kajian pertemuan ruas Sungai Citarum Hilir dan Cibeet

METODOLOGI

Pada studi ini dilakukan pengumpulan dan pengolahan data serta pemodelan numerik satu dimensi (1D). Data yang dikumpulkan meliputi survei primer berupa peninjauan lokasi dan wawancara dengan warga terdampak banjir. Selain itu dilakukan juga pengumpulan data sekunder, berupa: data hidrologi yang diperoleh dari Perum Jasa Tirta II (curah hujan dan data debit bendung Walahar dan Cibeet), data geometri dasar sungai tahun 2022 diperoleh dari BBWS Citarum (peta situasi dan potongan melintang), *Digital Elevation Model* (DEM) dan data hidrometri diperoleh dari hasil pengukuran Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan (tinggi muka air, penampang sungai dan sedimen). Data tersebut diolah dan dianalisis untuk selanjutnya digunakan sebagai *input* pemodelan hidrodinamika dan angkutan sedimen.

Pemodelan numerik 1D pada kajian ini menggunakan perangkat lunak MIKE 11 yang dikembangkan oleh *Danish Hydraulic Institute* (DHI). Pemodelan numerik dilakukan untuk mengetahui kapasitas saluran dalam mengalirkan debit banjir dan perubahan morfologi sungai. Untuk keperluan tersebut, modul yang umum digunakan adalah Modul *Hydrodynamic* dan *Sediment Transport* (Rosliani et al., 2013; Lestari, 2015). Modul *Hydrodynamic* (HD) MIKE 11 memecahkan persamaan Saint-Venant dengan menggunakan skema perbedaan-hingga secara implisit enam titik yang dikembangkan oleh Abbott dan Ionescu. Persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut (DHI, 2017):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

Dimana:

- Q : debit (m³/s)
- A : luas penampang basah (m²)
- q : debit aliran lateral (m³/s per m')
- α : koefisien distribusi momentum (-)
- g : percepatan gravitasi (9,8 m/s²)
- h : kedalaman air (m)
- C : koefisien kekasaran Chezy (-)
- R : jari-jari hidraulik (m)
- x : jarak (m)
- t : waktu (s)

Pada modul *Sediment Transport* (ST) MIKE 11 untuk *sub model* sedimen non kohesif (*noncohesive sediment transport/NST*) persamaan yang digunakan adalah (DHI, 2017):

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial (Wz_b)}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Dimana:

- z_b : elevasi dasar sungai (m);
- Q_s : debit angkutan sedimen (m³/s);
- ε : porositas sedimen dasar; dan
- W : lebar penampang di permukaan air (m).

Modul NST menyediakan 2 jenis mode perhitungan, yaitu mode morfologi dan mode eksplisit. Dengan menjalankan modul NST dalam mode morfologi, angkutan sedimen dihitung bersamaan dengan modul HD, artinya dasar saluran diperbarui setiap langkah waktu sambil menjalankan HD dan NST secara bersamaan (Neary

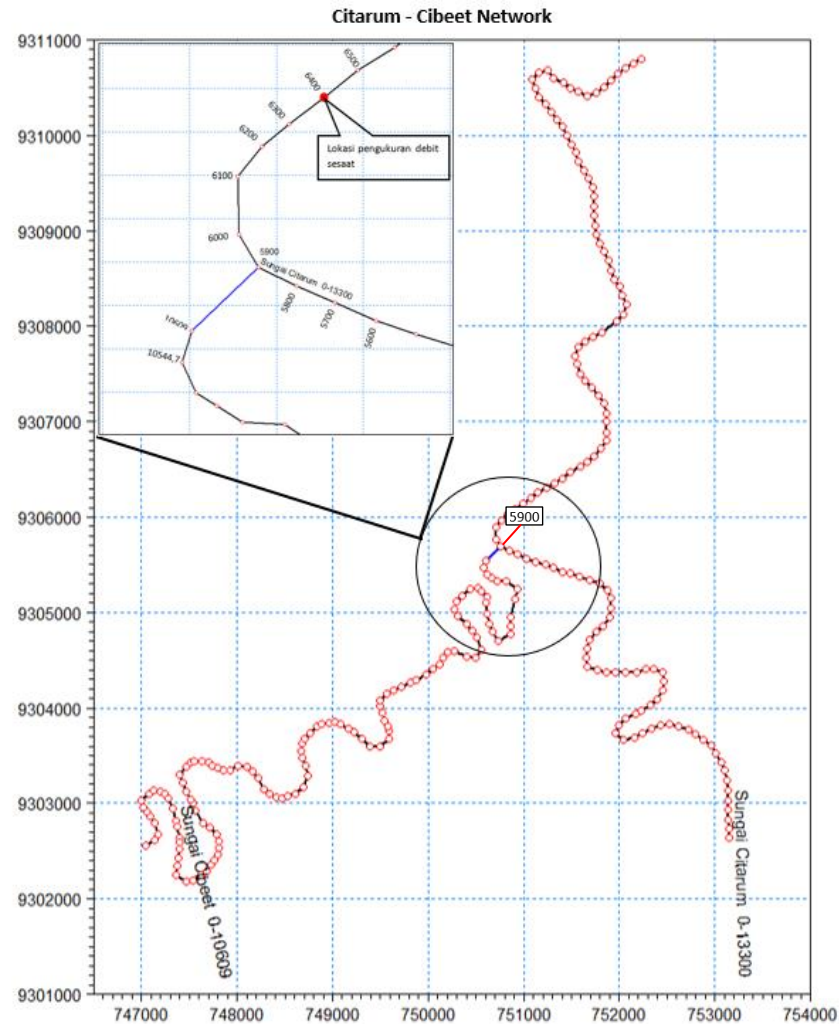
et al., 2001). Hasilnya berupa laju angkutan sedimen, perubahan elevasi dasar saluran, angka resistensi dan dimensi gumuk. Mode ini lebih mewakili proses aluvial yang dinamis daripada mode eksplisit tetapi membutuhkan waktu komputasi yang jauh lebih lama (DHI, 2017).

Modul NST dilengkapi dengan lima metode yang berbeda untuk perhitungan laju angkutan sedimen dan kekasaran saluran. Metode Engelund dan Hansen, Ackers dan White, dan Smart dan Jaeggi untuk perhitungan angkutan sedimen total, sedangkan Metode Engelund dan Fredsøe dan van Rijn untuk perhitungan angkutan sedimen dasar dan sedimen layang secara terpisah. Semua metode ini dapat dijalankan menggunakan satu ukuran butir atau menggunakan sejumlah ukuran butir yang mewakili fraksi ukuran butir dalam material bergradasi sebagai modul tambahan. Ketentuan juga dibuat untuk menentukan standar deviasi geometris dari distribusi ukuran butir untuk memungkinkan diameter rata-rata material tersuspensi dapat dihitung (DHI, 2017).

Model numerik terlebih dahulu dikalibrasi agar hasil simulasi mendekati kondisi lapangan. Kalibrasi model hidrodinamika dilakukan dengan membandingkan elevasi muka air hasil pengukuran lapangan dengan hasil pemodelan numerik (Jahandideh-Tehrani dkk., 2020). Caranya dengan mencari nilai kekasaran dasar saluran yang dapat mewakili kondisi lapangan (Kumar, 2018). Data elevasi muka air yang digunakan pada kalibrasi ini diperoleh dari hasil survei hidrometri. Pengukuran debit sesaat dilaksanakan pada tanggal 13 September - 16 September 2021, dilakukan pada ruas sungai setelah pertemuan sungai Citarum dan sungai Cibeet. Lokasi pengukuran dapat dilihat pada Gambar 2 diatas, yaitu berada sekitar Jembatan Kedung Gede, Kabupaten Bekasi. Pemilihan metode perhitungan angkutan sedimen yang digunakan pada simulasi numerik dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan berbagai metode empiris dengan hasil pengukuran lapangan. Data sedimen yang digunakan merupakan data sekunder yang bersumber dari hasil pengukuran

yang dilakukan Balai Hidraulika dan Geoteknik Keairan pada tahun 2021. Pengambilan sampel sedimen melayang menerapkan metode EDI (*Equal Discharge Increment*). Pengambilan sample sedimen dasar menggunakan alat *Bedload Sampler*. Sedangkan sample material dasar sungai menggunakan alat *Grab Sampler*. Selanjutnya, dilakukan analisis potensi laju angkutan sedimen. Metode perhitungan laju angkutan sedimen yang digunakan yaitu *Meter-Peter-Muler* (MPM), *Engelund-Hansen* (E-H) dan *Ackers - White*. Kemudian dilakukan pemodelan hidrodinamik dan angkutan sedimen menggunakan perangkat lunak *Mike 11*.

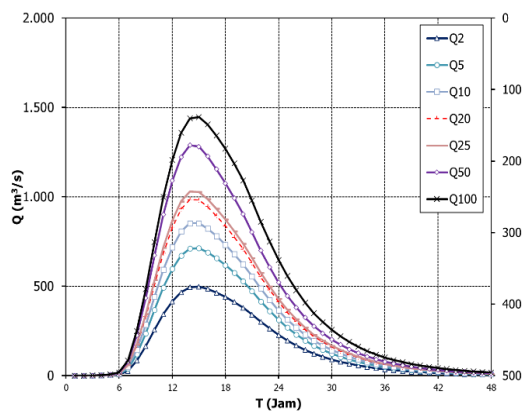
Input model numerik MIKE 11 Modul *Hydrodynamic* dan *Sediment Transport* berupa jaringan (*network*) sungai, penampang melintang sungai (*cross-section*) dengan parameter batas (*boundary*) hulu model berupa hidrograf banjir dan hilir model berupa lengkung debit (Q-h). Jaringan (*network*) sungai yang dimodelkan terdiri atas Sungai Citarum Hilir sepanjang 13,30 km dan Sungai Cibeet sepanjang 10,60 km. Sebanyak 4 titik di sekitar pertemuan sungai Citarum Hilir dan Cibeet dikaji pada penelitian ini, terdiri dari 2 titik di Sungai Citarum Hilir dan 2 titik di sungai Cibeet. Dari hasil tinjauan lapangan yang dilakukan, lokasi ke 4 titik ini berada merupakan daerah yang pernah terdampak banjir dan terdapat gerusan badan sungai. Lokasi di Sungai Citarum Hilir adalah STA 5900 (6°16'35,39"S dan 107°15'59,13"E) dan STA 6000 (6°16'32,96"S dan 107°15'57,65"E) sedang lokasi di Sungai Cibeet adalah STA 10544,67 (6°16'40,17"S dan 107°15'57,65"E) dan STA 10609(6°16'32,96"S dan 107°15'54,155"E). STA. 0 Sungai Citarum pada pemodelan ini berada pada koordinat 6°18'14,27"S dan 107°17'17,32"E, Kec. Karawang Barat, yang berjarak ±7,5 km dari STA. 5900 (pertemuan sungai). STA. 0 Sungai Cibeet pada pemodelan ini berada pada koordinat 6°18'17,88"S dan 107°13'58,83"E, Kec. Karawang Timur yang berjarak ±10,6 km dari STA. 5900 (pertemuan sungai). Input jaringan sungai bisa dilihat pada Gambar 2.



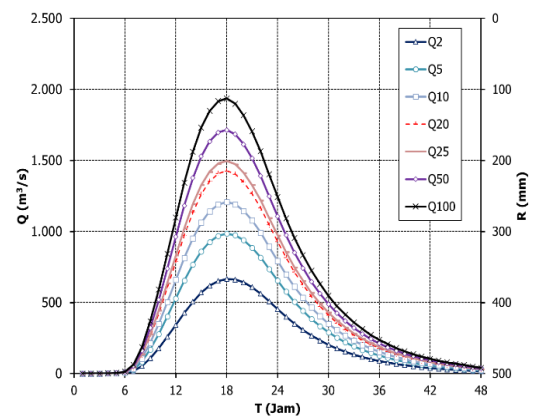
Gambar 2 Model Network Sungai Citarum – Sungai Cibeet (UTM Koordinat)

Hidrograf banjir yang digunakan dalam pemodelan numerik ini diperoleh dari hasil perhitungan debit banjir menggunakan data hujan untuk beberapa periode ulang. Debit banjir

rancangan ini diperoleh dari hasil studi Tesis yang dilakukan oleh penulis (Helena, 2023). Hidrograf debit banjir untuk Sungai Citarum dan Sungai Cibeet seperti terlihat pada Gambar 3.



(a) Hidrograf Sungai Citarum Hilir

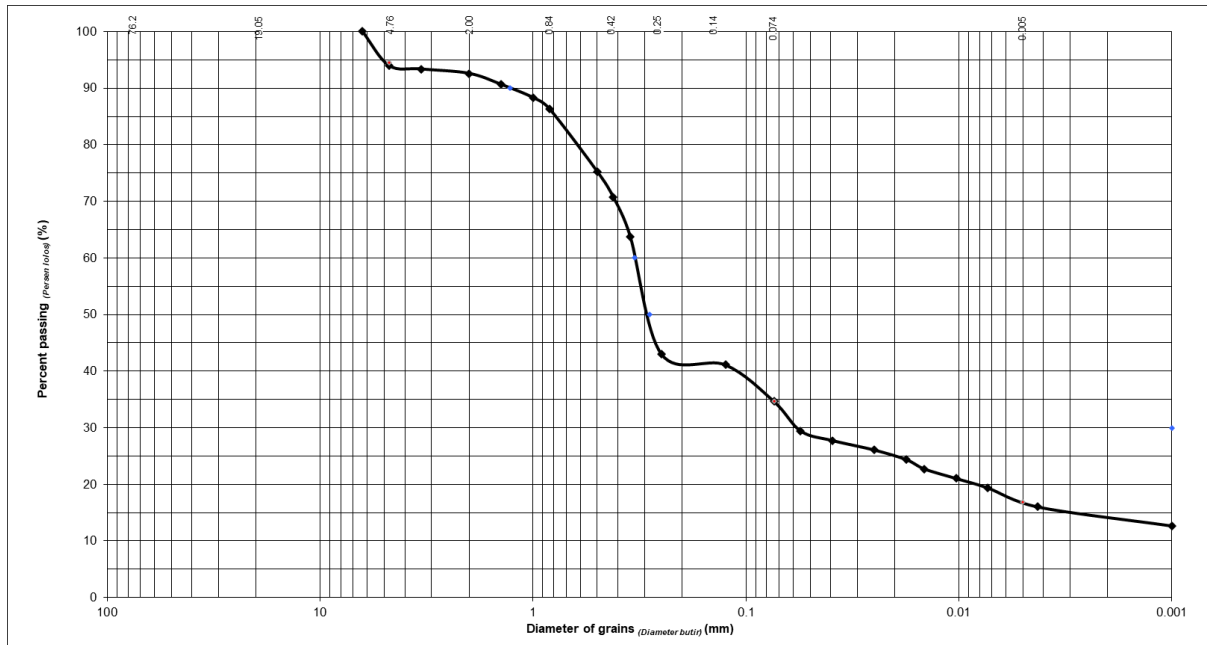


(b) Hidrograf Sungai Cibeet

Gambar 3 Hidrograf banjir Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet

Untuk menentukan persamaan angkutan sedimen dipilih dilakukan perhitungan angkutan sedimen menggunakan beberapa metode yang ada. Perhitungan tersebut menggunakan data sedimen yang diambil di sekitar Jembatan Kedung Gede ($6^{\circ}04'50.6''\text{S}$ dan $107^{\circ}10'30.8''\text{E}$) pada pengukuran hidrometri. Hasil pengujian di laboratorium Balai

Hidrolika dan Geoteknik Keairan menunjukkan sedimen Sungai Citarum termasuk dalam jenis pasir sedang dengan ukuran butir sedimen D_{50} sebesar 0,284 mm. Gradasi butir sedimen Sungai Citarum Hilir di sekitar Jembatan Kedung Gede bisa dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Gradasi butir material dasar Sungai Citarum (BHKG, 2021)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi Model

Kalibrasi dilakukan pada kondisi *steady flow* dimana hasil pengukuran debit sesaat sebagai inputan pada model. Berdasarkan hasil kalibrasi model diperoleh koefisien kekasaran saluran Chezy yaitu 30 dengan perbedaan tinggi muka air hasil perhitungan model dan muka air pengamatan sebesar 0,05 m. Dimana perbedaan hasil pengukuran dengan hasil simulasi (Δh) sebesar 0,05 m. Apabila dikonversi menjadi nilai kekasaran Manning (n), maka akan diperoleh nilai koefisien Manning sebesar 0,0333, dimana Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet termasuk jenis saluran tanah dengan alur sungai berkelok-kelok, landai dan berumput.

Dari hasil perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk ketiga metode tersebut maka metode perhitungan laju angkutan sedimen paling mendekati hasil pengukuran hidrometri adalah metode MPM dengan nilai RMSE sebesar 1,318. Namun metode MPM hanya dapat digunakan untuk

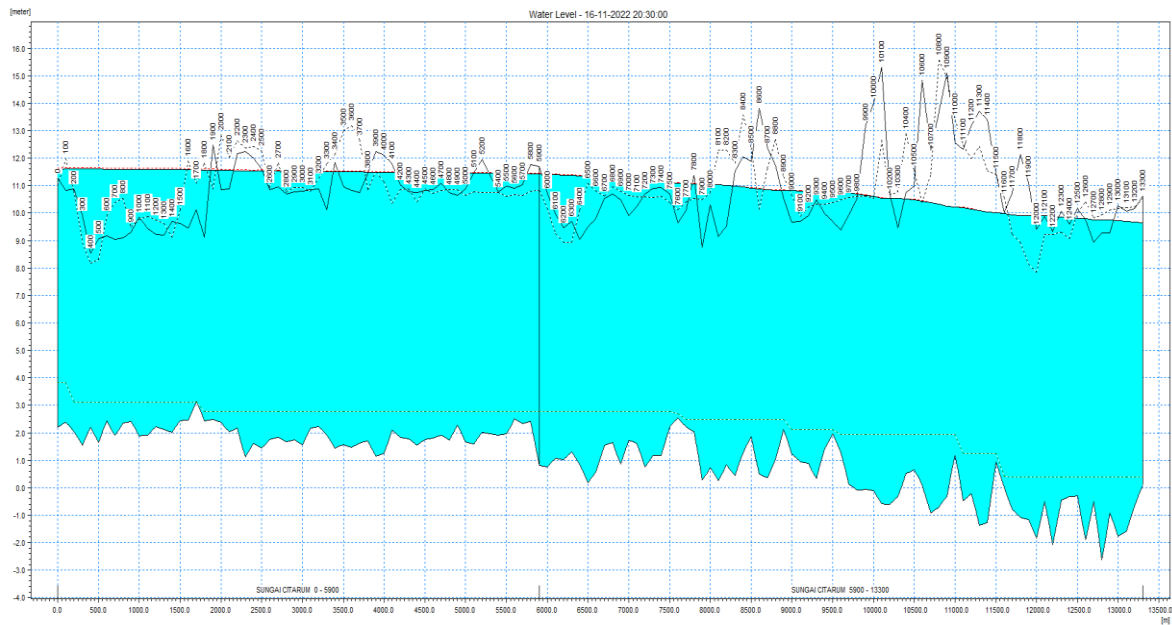
diameter butir sedimen $D_{50} > 5$ mm (Simons & Sentürk, 1992) dengan kedalaman aliran 0,1 m – 1,2 m (Garde, 2006). Adapun diameter butir sedimen D_{50} hasil pengukuran yaitu 0,284 mm, sehingga penggunaan rumus MPM tidak disarankan. Oleh karena itu dalam pemodelan numerik ini digunakan metode *Engleund-Hansen* dengan nilai RMSE sebesar 7,044. Hasil perhitungan Root Mean Square Error (RMSE) untuk ketiga metode dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai RMSE Perhitungan Laju Angkutan Sedimen

Nama Sungai	RMSE		
	E-H	Ackers -White	M-P-M
S. Citarum	7.04	9.23	1,31

Pemodelan Hidrodinamika Sungai Citarum Hilir

Hasil pemodelan hidrodinamika berupa elevasi muka air pada masing-masing penampang melintang sungai, seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Profil Muka Air Sungai Citarum untuk Q2 tahun hasil pemodelan hidrodinamika

Berdasarkan hasil pemodelan pada Gambar 5, khususnya pada lokasi pertemuan dengan Sungai Cibeet, terlihat bahwa secara kapasitas, Sungai Citarum Hilir tidak mampu mengalirkan debit banjir periode ulang 2 tahun. Kapasitas alur Sungai Citarum Hilir sebelum pertemuan yaitu sebesar 485 m³/s, sedangkan debit banjir periode ulang yang terjadi sebesar 498,20 m³/s maka terjadi limpasan sebesar 2,72%. Sungai Citarum Hilir setelah pertemuan memiliki kapasitas sebesar 935 m³/s sedangkan debit banjir periode ulang 2 tahun yang terjadi sebesar 1004,47 m³/s sehingga terjadi limpasan sebesar 7,42%.

Pada daerah pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet, yaitu STA 5900, dengan elevasi tebing sungai sisi kiri El. + 10,828 m dan elevasi tebing sisi kanan El. + 11,700 m maka banjir akan melimpas pada tebing sungai sisi kiri. Secara administrasi STA 5900 merupakan Desa Laban Sari, termasuk wilayah Kecamatan Cikarang Timur, Kabupaten Bekasi. Berdasarkan data pemerintah daerah dan menurut keterangan warga setempat, lokasi ini termasuk dalam daerah langganan banjir dan hampir setiap tahun banjir menggenangi desa ini.

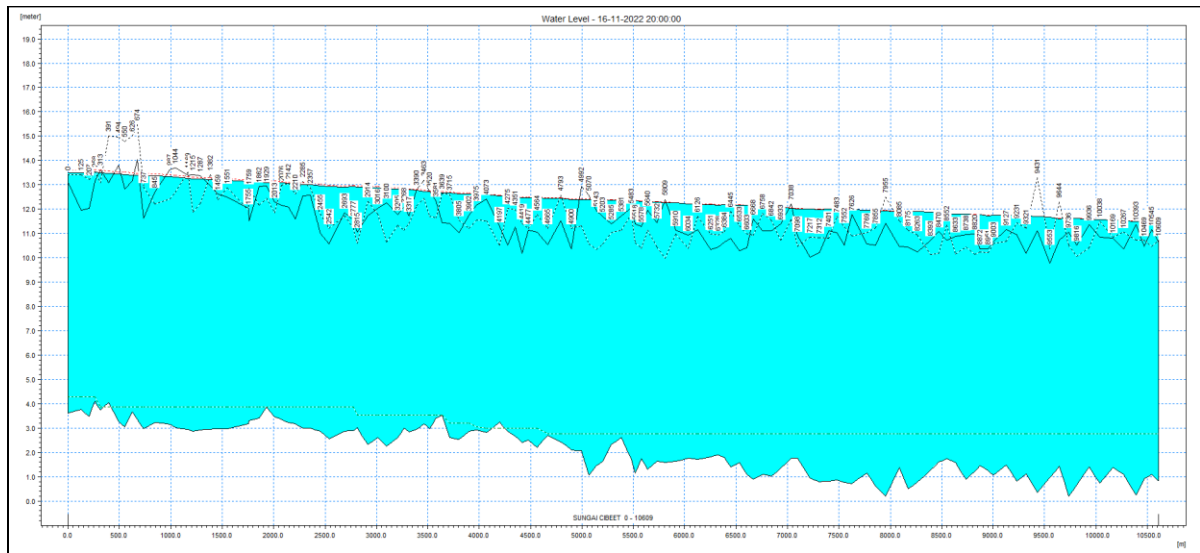
Dari keseluruhan penampang Sungai Citarum yang dimodelkan pada kajian ini, untuk debit banjir dengan periode ulang 2 tahun, sebanyak 61,65% tanggul kiri limpas dan 36,84% tanggul kanan terlampaui banjir. Elevasi muka air dan debit banjir maksimum hasil pemodelan hidrodinamika pada lokasi pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet untuk berbagai periode ulang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Elevasi dan debit pada STA 5900 (Pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Cibeet)

Tr (tahun)	Elevasi Muka Air (m)	Debit (m ³ /s)
2	11,46	1004,47
5	12,90	1486,02
10	13,76	1816,54
25	15,65	2692,17

Pemodelan Hidrodinamika Sungai Cibeet

Hasil pemodelan hidrodinamika Sungai Cibeet pada banjir dengan kala ulang 2 tahun seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Profil muka air Sungai Cibeet untuk Q_2 tahun hasil pemodelan hidrodinamika

Berdasarkan hasil pemodelan pada Gambar 6, terlihat bahwa Sungai Cibeet tidak mampu mengalirkan debit banjir periode ulang 2 tahun. Dari keseluruhan penampang Sungai Cibeet yang dimodelkan pada kajian ini pada debit banjir periode ulang 2 tahun, air melimpas lebih dari 80% penampang, baik dari tanggul kiri maupun tanggul kanan. Kapasitas penampang Sungai Cibeet pada STA 10608 sebesar $579 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan debit banjir pada periode ulang 2 sebesar $666,20 \text{ m}^3/\text{s}$, sehingga terjadi limpasan sebesar 15,06%. Apabila elevasi tebing sungai Cibeet pada STA 10609 sisi kiri adalah El. + 10,73 m dan sisi kanan El.+ 10,65 m maka akan terjadi limpasan pada kedua sisi tebing Sungai Cibeet. Elevasi muka air dan debit maksimum yang dihasilkan pemodelan hidrodinamika pada penampang paling hilir Sungai Cibeet untuk banjir pada berbagai periode ulang dapat dilihat pada Tabel 3.

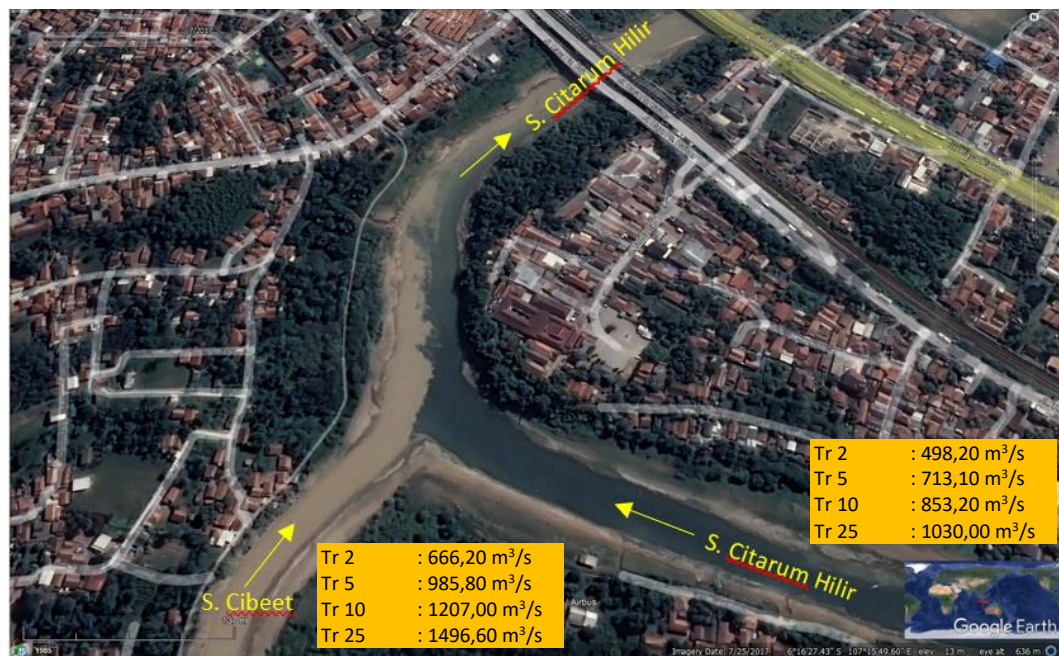
Tabel 3 Elevasi dan debit Sungai Cibeet STA 10609

Tr (tahun)	Elevasi (m)	Debit (m^3/s)
2	11,46	636,69
5	12,90	949,96
10	13,76	1169,96
25	15,65	1690,48

Ketika aliran Sungai Cibeet bertemu dengan Sungai Citarum Hilir pada STA 106906, aliran sungai Cibeet akan cenderung melambat sehingga

kapasitas sungai dalam mengalirkan debit menjadi berkurang. Stagnansi atau perlambatan aliran terjadi di sudut persimpangan hulu di tempat bertemunya dua aliran karena terjadi kenaikan elevasi muka air (Biron et al., 2002). Ketika aliran bertemu dengan gradien tekanan yang berlawanan akibat kenaikan elevasi muka air ini, aliran maju terhambat dan mengalami penurunan kecepatan. Jika gradien tekanan yang berlawanan kuat, aliran akan berhenti sepenuhnya, dan menghasilkan daerah resirkulasi aliran. Seringkali sebuah lapisan dengan kecepatan rendah memisahkan bagian atas dan bawah dari setiap aliran yang masuk ke arah hilir dari zona stagnasi, terutama ketika dua aliran yang masuk memiliki fluks momentum yang sama (Lewis & Rhoads, 2018). Setelah melewati area ini, aliran semakin cepat bergerak ke arah hilir (Konsoer & Rhoads, 2014).

Di dalam pertemuan sungai, aliran anak sungai sungai dan sungai utama saling membelokkan satu sama lain. Pembelokan ini diakibatkan oleh gradien tekanan yang dihasilkan oleh pola spasial elevasi muka air yang mengarahkan aliran anak sungai ke saluran penerima. Pencampuran dimulai di sepanjang permukaan aliran yang mungkin terlihat jika aliran mengangkut jumlah dan jenis material tersuspensi yang berbeda seperti terlihat pada Gambar 7. Batas pencampuran juga menunjukkan terjadinya perbedaan kecepatan antara aliran anak sungai dengan sungai utama atau disebut juga sebagai lapisan geser (Rhoads, 2020).



sumber: google earth, Juli 2017

Gambar 7 Percampuran aliran pada pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Cibeet

Pemodelan Angkutan Sedimen

Hasil pemodelan angkutan sedimen pada ruas Sungai Citarum Hilir menunjukkan, sebelum pertemuan dengan Sungai Cibeet yaitu STA 0 – STA 5800 cenderung stabil, tidak terjadi perubahan elevasi dasar sungai yang signifikan seperti terlihat

pada Gambar 8. Nilai kemiringan dasar sungai secara berurut pada lokasi sebelum dan sesudah pertemuan Sungai Citarum dan Sungai Cibeet dari hulu ke hilir dapat dilihat pada **Tabel 4**.

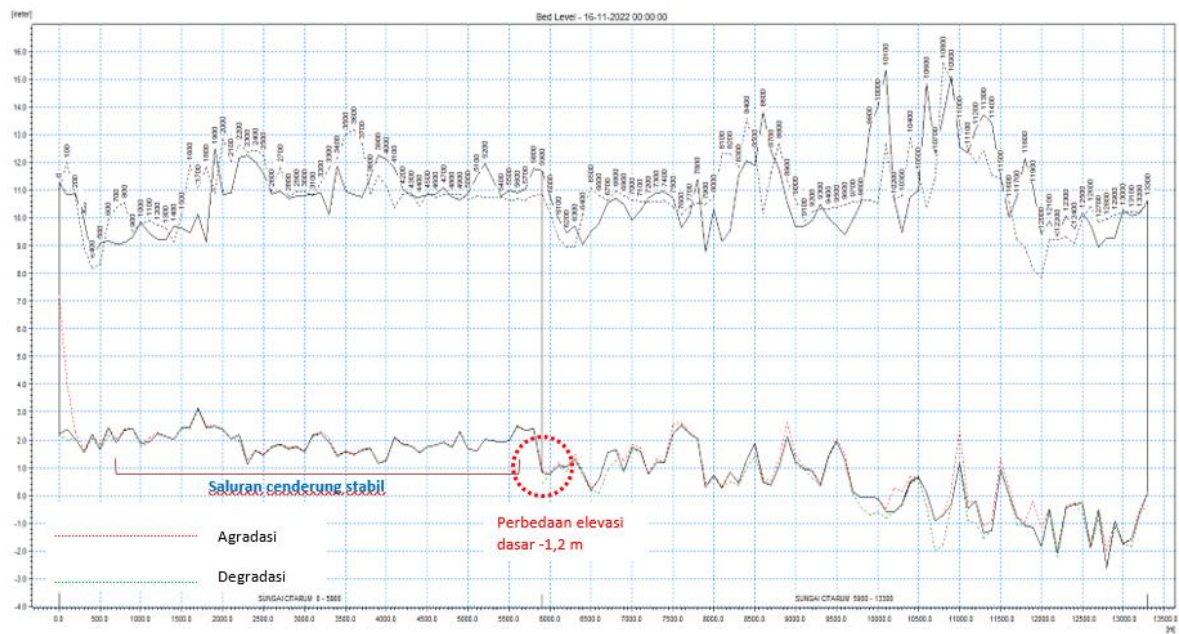
Tabel 4 Nilai Kemiringan Dasar Sungai Citarum dan Sungai Cibeet

Nama Sungai	Nilai Slope Hulu ke Hilir Sebelum dan Sesudah Pertemuan										
	STA. 5300	STA. 5400	STA. 5500	STA. 5600	STA. 5700	STA. 5800	STA. 5900	STA. 6000	STA. 6100	STA. 6200	STA. 6300
Sungai Citarum	0,00064	0,00086	0,00145	0,00316	0,00371	0,01419	0,0002	0,00046	0,00071	0,00015	0,00067

Nama Sungai	Nilai Slope Hulu ke Hilir Sebelum Pertemuan										
	STA. 9643.69	STA. 9736.1	STA. 9816.44	STA. 9935.98	STA. 10037.90	STA. 10169.20	STA. 10267.10	STA. 10392.70	STA. 10469	STA. 10544.70	STA. 10609
Sungai Cibeet	0,00158	0,00649	0,00079	0,00121	0,00389	0,00113	0,00373	0,00075	0,00039	0,00091	0,00602

Pada STA 5900 (pertemuan sungai Citarum dan Cibeet) dimulai dari sebelum dan sesudah lokasi pertemuan kedua sungai terjadi degradasi ke arah hilir sampai STA 6300. Degradasi yang terjadi pada ruas ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan elevasi dasar saluran yang cukup curam ($\pm 1,2$ m)

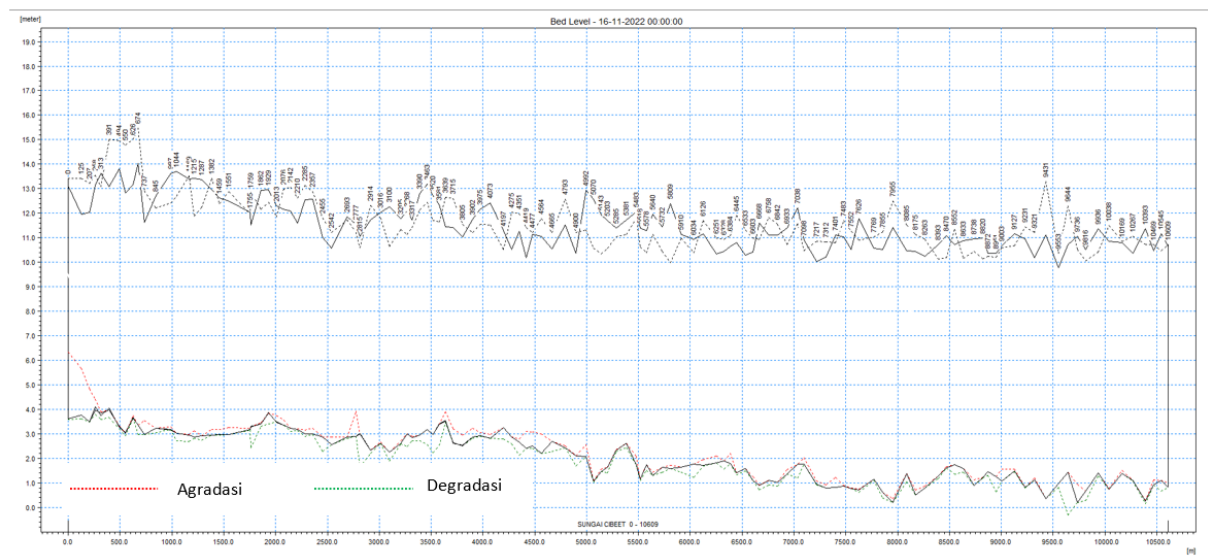
antara ruas Sungai Citarum sebelum dan sesudah pertemuan dengan Sungai Cibeet. Semakin besar debit banjir sungai Citarum Hilir maka semakin besar potensi penurunan dasar yang terjadi. (**Tabel 5**)



Gambar 8 Perubahan elevasi dasar Sungai Citarum akibat banjir Q₂ tahun

Hasil pemodelan angkutan sedimen Sungai Cibeet untuk banjir dengan kala ulang 2 tahun ditampilkan pada Gambar 9. Hasil pemodelan menunjukkan dasar Sungai Cibeet cenderung tidak stabil. Terjadi aggradasi dan degradasi sepanjang

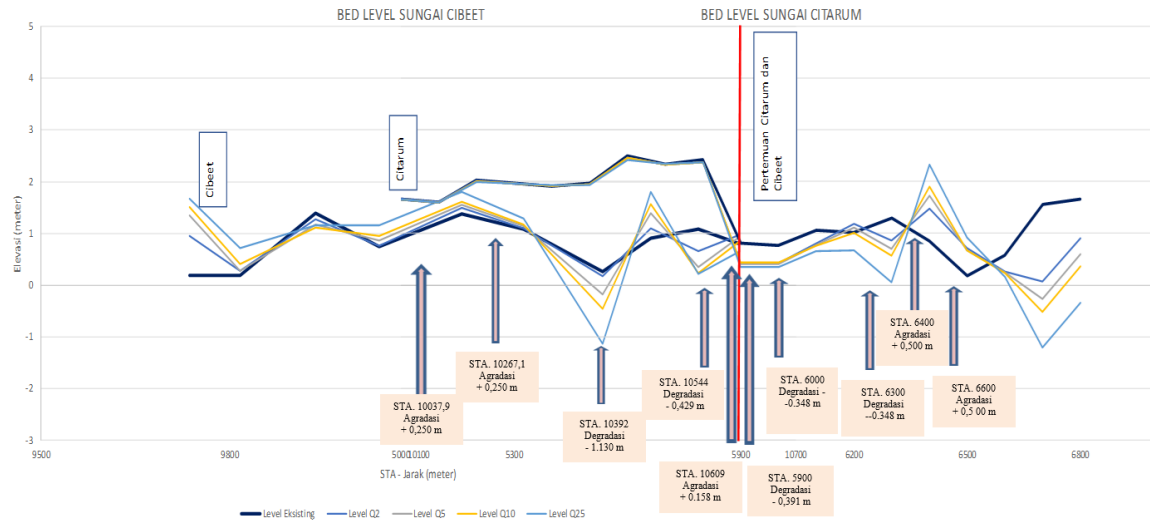
Sungai Cibeet yang dimodelkan. Pada hilir Sungai Cibeet sebelum pertemuan sungai dengan Citarum Hilir, pada STA. 10544 terjadi degradasi dasar sungai. (Tabel 5)



Gambar 9 Perubahan elevasi dasar Sungai Cibeet akibat banjir Q₂ tahun

Perubahan elevasi dasar sungai di sekitar lokasi pertemuan Sungai Cibeet dan Sungai Citarum Hilir pada banjir berbagai periode ulang dapat dilihat pada Gambar 10. Hasil pemodelan angkutan sedimen dengan debit banjir berbeda-beda

menunjukkan sungai ruas Citarum – Cibeet mengalami degradasi sebelum dan sesudah pertemuan. Di ruas pertemuan, dasar Sungai Cibeet pada STA 10609 terjadi aggradasi dan Sungai Citarum pada STA 5900 mengalami degradasi.



Gambar 10 Perubahan morfologi sungai pada lokasi pertemuan Sungai Citarum dan Cibeet

Tabel 5 memperlihatkan hasil simulasi angkutan sedimen Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet pada 4 titik yang ditinjau. Dari 2 titik yang ditinjau pada sungai Citarum Hilir (STA 5900 dan STA 6000) dan 2 titik pada Sungai Cibeet (STA 10544.7 dan STA 10609), secara umum terlihat semakin besar debit maka semakin dalam gerusan dasar sungai yang terjadi. Tepat pada lokasi

pertemuan sungai, Sungai Cibeet STA 10609, pada debit bajir Q_2 tahun sampai Q_{10} tahun terjadi aggradasi sedangkan pada debit banjir Q_{25} terjadi penurunan dasar sungai atau degradasi. Hal ini kemungkinan diakibatkan pada debit banjir Q_2 tahun sampai Q_{10} tahun aliran sungai Citarum Hilir lebih dominan, sehingga aliran Sungai Cibeet mengalami penurunan kecepatan akibat stagnasi.

Tabel 5 Perubahan Dasar Sungai Lokasi Pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet (Geomerti Sungai Tahun 2022)

Debit banjir	S. Citarum STA 5900 Eksisting (m) = 0,8111		S. Citarum STA 6000 Eksisting (m) = 0,768		S. Cibeet STA 10544.7 Eksisting (m) = 1,089		S. Cibeet STA 10609 Eksisting (m) = 0,808	
	Model (m)	Δh (m)	Model (m)	Δh (m)	Model (m)	Δh (m)	Model (m)	Δh (m)
Q_2	0,420	(-) 0,391	0,420	(-) 0,348	0,660	(-) 0,429	0,966	(+) 0,158
Q_5	0,404	(-) 0,407	0,404	(-) 0,364	0,344	(-) 0,745	0,924	(+) 0,116
Q_{10}	0,427	(-) 0,384	0,427	(-) 0,341	0,227	(-) 0,862	0,837	(+) 0,029
Q_{25}	0,349	(-) 0,462	0,349	(-) 0,419	0,223	(-) 0,866	0,639	(-) 0,169

Keterangan : (-) degradasi, (+) aggradasi

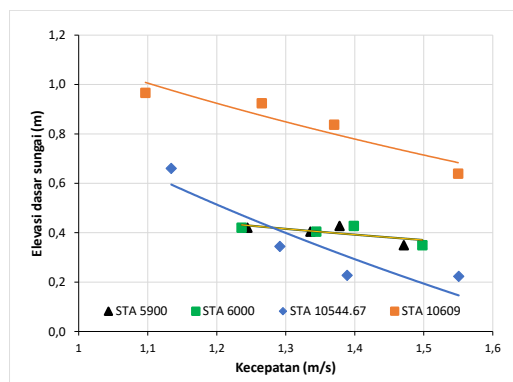
Dari Gambar 10 terlihat elevasi dasar Sungai Citarum Hilir sebelum pertemuan cenderung stabil, tetapi mengalami degradasi setelah pertemuan khususnya STA. 5900 dan STA. 6000. Pada Tabel 5 terlihat Sungai Citarum Hilir setelah pertemuan, pada STA. 5900 terjadi degradasi dasar sungai dengan perubahan elevasi dasar sungai terjadi karena STA. 5900 merupakan zona kecepatan maksimum dimana pada area ini terjadi turbulensi -0,38 m sampai -0,46 m untuk debit banjir periode ulang 2 tahun sampai 5 tahun. Hal ini aliran dan kenaikan tegangan geser sehingga dasar saluran menjadi mudah tergerus. Saat memasuki STA. 6000 yang merupakan zona pemulihan aliran, kecepatan

aliran akan berangsur berkurang sehingga degradasi dasar sungai tidak sebesar STA. 5900 (Leite Ribeiro et al., 2012).

Dari **Tabel 5** terlihat, Sungai Cibeet STA 10544.7 (± 100 m sebelum pertemuan) mengalami degradasi dasar sungai sebesar -0,429 m sampai -0,866 m untuk pemodelan dengan debit banjir dengan periode ulang 2 tahun sampai 5 tahun. Hal ini dikarenakan alur sungai Cibeet yang menikung sebelum bertemu dengan Sungai Citarum. Kecepatan aliran yang tinggi terjadi pada tikungan luar Sungai Cibeet sehingga menyebabkan degradasi dan keruntuhan tebing sungai sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1(c) di atas.

Kejadian tersebut menyebabkan penampang pada daerah tikungan menjadi semakin lebar, dan lama-kelamaan akan mengubah arah aliran. Kecepatan aliran yang terjadi pada lokasi ini sebesar 1,177 m/s.

Selain untuk mengetahui elevasi muka air, MIKE 11 modul *Hydrodynamic* menyediakan *output* kecepatan pada setiap penampang yang ditinjau. Berdasarkan hasil analisis pemodelan pada lokasi sekitar pertemuan sungai, diperoleh hasil semakin besar nilai kecepatan yang terjadi maka akan semakin besar perubahan elevasi dasar saluran. Grafik hubungan antara kecepatan dan perubahan dasar saluran pada lokasi sekitar pertemuan sungai dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Grafik Hubungan Kecepatan dan Perubahan Elevasi Dasar

Dari hasil pengukuran topografi, secara umum terjadi perubahan geometri saluran pada Sungai Citarum Hilir sebelum dan setelah pertemuan dengan Sungai Cibeet. Penampang saluran membesar setelah terjadi pertemuan untuk menampung perubahan debit yang mendadak dari Sungai Citarum dan Sungai Cibeet. Lebar dan kedalaman saluran bertambah setelah pertemuan sungai yang diikuti dengan perubahan kemiringan saluran. Geometri sungai pada lokasi pertemuan anak sungai dan sungai utama sangat tidak stabil.

Pertemuan aliran anak sungai pada sungai utama menciptakan variasi pola aliran yang kompleks yang menciptakan lubang gerusan pada dasar saluran yang mempercepat laju erosi tebing sungai (Rhoads & Sukhodolov, 2008). Dampak positif degradasi dasar sungai secara tidak langsung akan menambah kedalaman dari penampang sungai, sehingga penambahan kedalaman tersebut juga meningkatkan kapasitas tampung dari penampang sungai. Akan tetapi dampak negatif yang ditimbulkan jauh lebih besar yaitu mengakibatkan longsor tebing sungai, serta jebolnya tanggul sungai yang menyebabkan air sungai melimpas dan terjadi banjir. Banjir dan angkutan sedimen adalah faktor yang mengubah

morfologi sungai pada bentuk penampang aliran. Sungai alami tidak mempunyai bentuk geometri yang permanen, karena penampang melintangnya selalu berubah. (PUSDIKLAT-SDAK, 2017)

KESIMPULAN

Hasil pemodelan numerik 1D menggunakan MIKE 11 menunjukkan sebelum dan sesudah pertemuan sungai, Sungai Citarum Hilir dan Sungai Cibeet tidak mampu mengalirkan banjir Q_2 tahun. Kapasitas Sungai Citarum sebelum pertemuan sungai sebesar $485 \text{ m}^3/\text{s}$ sedangkan banjir Q_2 tahun sebesar $498 \text{ m}^3/\text{s}$. Kapasitas Sungai Cibeet sebesar $579 \text{ m}^3/\text{s}$ dimana banjir Q_2 tahun sebesar $666,20 \text{ m}^3/\text{s}$. Kapasitas Sungai Citarum setelah pertemuan sebesar $935 \text{ m}^3/\text{s}$, sementara banjir Q_2 sebesar $1.004 \text{ m}^3/\text{s}$. Hasil pemodelan angkutan sedimen menunjukkan tidak ada perubahan signifikan elevasi dasar saluran ruas Sungai Citarum Hilir sebelum pertemuan sungai, akan tetapi setelah pertemuan sungai pada STA. 5900 terjadi degradasi dasar sungai dengan perubahan elevasi $0,38 \text{ m} - 0,46 \text{ m}$. Fenomena ini terjadi pada semua skenario kala ulang. Hal ini disebabkan karena STA. 5900 merupakan zona kecepatan maksimum dimana pada area ini terjadi turbulensi aliran dan kenaikan tegangan geser sehingga dasar saluran menjadi mudah tergerus. Hasil pemodelan angkutan sedimen pada Sungai Cibeet menunjukkan terjadi degradasi sebesar $-0,429 \text{ m}$ sampai $-0,866 \text{ m}$ pada penampang Sungai Cibeet, sebelum pertemuan sungai pada STA 10544.7 Hal ini dikarenakan alur sungai Cibeet yang menikung sebelum bertemu dengan Sungai Citarum. Kecepatan aliran yang tinggi terjadi pada tikungan luar Sungai Cibeet sehingga menyebabkan degradasi dan keruntuhan tebing sungai, yang menyebabkan terjadi perubahan lebar penampang pada daerah tikungan.

Banjir dan angkutan sedimen merupakan faktor alami yang mengubah bentuk penampang aliran yang akhirnya akan mengubah morfologi Sungai Cibeet dan Citarum Hilir. Pada saat banjir terjadi peningkatan kecepatan pada anak sungai dan sungai utama. Hasil analisis pemodelan hidrodinamika pada lokasi sekitar pertemuan Sungai Citarum Hilir dan Cibeet menunjukkan semakin besar nilai kecepatan yang terjadi maka akan semakin besar perubahan elevasi dasar saluran. Dasar Citarum Hilir sebagai sungai utama sebelum pertemuan sungai cenderung stabil tetapi mengalami degradasi setelah pertemuan sungai. Sebaliknya anak sungai, dalam hal ini Sungai Cibeet cenderung mengalami degradasi dan mensuplai sedimen pada sungai utama. Pada pertemuan sungai terjadi interaksi yang kuat di antara berbagai proses hidrodinamika, angkutan sedimen dan morfologi. Penampang melintang saluran saluran dan rasio debit mempengaruhi dinamika aliran,

terutama gerak heliks. Gerakan heliks di dekat CHZ berdampak pada transportasi sedimen dengan demikian terjadi perubahan morfologi sungai (Yuan et al., 2021). Untuk mengurangi limpasan banjir yang terjadi, dibutuhkan penangan seperti pembangunan/peninggian tanggul sungai, perkuatan tanggul sungai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Besar Wilayah Sungai Citarum, Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan, Balai Teknik Sungai, Perum Jasa Tirta II serta semua pihak yang telah membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alizadeh, L., & Fernandes, J. (2021). Turbulent flow structure in a confluence: influence of tributaries width and discharge ratios. *Water (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040465>
- Bahmanpouri, F., Barbetta, S., Gualtieri, C., Ianniruberto, M., Filizola, N., Termini, D., & Moramarco, T. (2022). Prediction of river discharges at confluences based on Entropy theory and surface-velocity measurements. *Journal of Hydrology*, 606, 127404. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127404>
- Best, J. L. (1987). Flow Dynamics at River Channel Confluences: Implications for Sediment Transport and Bed Morphology. In *Recent Developments in Fluvial Sedimentology* (pp. 27–35). SEPM (Society for Sedimentary Geology). <https://doi.org/10.2110/pec.87.39.0027>
- BHGK. (2021). *Gradasi Butir Material Dasar Sungai Citarum - 2021*.
- Biron, P. M., Richer, A., Kirkbride, A. D., Roy, A. G., & Han, S. (2002). Spatial patterns of water surface topography at a river confluence. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(9), 913–928. <https://doi.org/10.1002/esp.359>
- Collick, A. S., Easton, Z. M., Ashagrie, T., Biruk, B., Tilahun, S., & Adgo, E. (2009). A simple semi-distributed water balance model for the Ethiopian highlands. *HYDROLOGICAL PROCESSES* 23.3718-3727, 23(1 December 2009), 3718–3727. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Deng, C., Ge, H., Long, R., & Yuan, Y. (2020). Analysis of the Influence of Bridge Piers on River Flow-Scouring Calculation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 560(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/560/1/012053>
- DHI. (2017). Mike 11. *A Modelling System for Rivers and Channels - User Guide*, 510.
- Dixon, S. J., Sambrook Smith, G. H., Best, J. L., Nicholas, A. P., Bull, J. M., Vardy, M. E., Sarker, M. H., & Goodbred, S. (2018). The planform mobility of river channel confluences: Insights from analysis of remotely sensed imagery. *Earth-Science Reviews*, 176, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.009>
- Dyhouse, G. R. (1985). Stage-Frequency Analysis at a Major River Junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4), 565–583. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:4\(565\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:4(565))
- Gualtieri, C., Ianniruberto, M., & Filizola, N. (2019). On the mixing of rivers with a difference in density: The case of the Negro/Solimões confluence, Brazil. *Journal of Hydrology*, 578, 124029. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124029>
- Helena, R. (2023). *Kajian banjir dan morfologi sungai pada lokasi pertemuan sungai citarum dan sungai cibeet*.
- Hui, C., Li, Y., Liao, Z., Zhang, W., Zhang, H., Niu, L., & Wang, L. (2022). Confluences characteristics determine the influence scope of microbial community from confluence hydrodynamic zone on river network. *Journal of Hydrology*, 612, 128288. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128288>
- Imansyah, M. F. (2012). Studi Umum Permasalahan dan Solusi DAS Citarum serta Analisis Kebijakan Pemerintah. *Jurnal Sositologi*, 25(April), 18–33.
- Jahandideh-Tehrani, M., Helfer, F., Zhang, H., Jenkins, G., & Yu, Y. (2020). Hydrodynamic modelling of a flood-prone tidal river using the 1D model MIKE HYDRO River: calibration and sensitivity analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8049-0>
- Kenworthy, S. T., & Rhoads, B. L. (1995). Hydrologic control of spatial patterns of suspended sediment concentration at a stream confluence. *Journal of Hydrology*, 168(1–4), 251–263. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02644-Q](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02644-Q)
- Kompas.com. (2021). *Dikebut, Perbaikan 14 Titik Tanggul Kritis di Citarum Hilir*.
- Konsoer, K. M., & Rhoads, B. L. (2014). Spatial-temporal structure of mixing interface turbulence at two large river confluences. *Environmental Fluid Mechanics*, 14(5), 1043–1070. <https://doi.org/10.1007/s10652-013-9304-5>
- Kumar, M. (2018). River flow simulation using MIKE11 and SRTM DEM data: Case of Mahanadi Delta region in India. *Annals of Plant and Soil Research*,

- 20(2), 130–138.
- Lancaster, S. T., Underwood, E. F., & Frueh, W. T. (2010). Sediment reservoirs at mountain stream confluences: Dynamics and effects of tributaries dominated by debris-flow and fluvial processes. *Geological Society of America Bulletin*, 122(11–12), 1775–1786. <https://doi.org/10.1130/B30175.1>
- Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Roy, A. G., & Schleiss, A. J. (2012). Flow and sediment dynamics in channel confluences. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JF002171>
- Lestari, S. (2015). Pencegahan Gerusan Tebing Pada Jembatan Di Sungai Luk Ulo, Kebumen–Jawa Tengah the Prevention of Bank Scour At Luk Ulo *Jurnal Teknik Hidraulik Vol*, 163–176.
- Lewis, Q., Rhoads, B., Sukhodolov, A., & Constantinescu, G. (2020). Advective Lateral Transport of Streamwise Momentum Governs Mixing at Small River Confluences. *Water Resources Research*, 56(9), 0–3. <https://doi.org/10.1029/2019WR026817>
- Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L. (2018). LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems: 2. Hydrodynamic Mapping at River Confluences. *Water Resources Research*, 54(10), 7981–7999. <https://doi.org/10.1029/2018WR022551>
- Luo, H. (2017). *NUMERICAL INVESTIGATIONS OF FLOW BEHAVIOR AND ENERGY LOSSES* (Issues 2017-04–07) [University of Illinois at Urbana-Champaign]. <http://hdl.handle.net/2142/97549>
- Neary, V. S., Wright, S. A., & Bereciartua, P. (2001). Case Study: Sediment Transport in Proposed Geomorphic Channel for Napa River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11), 901–910. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2001\)127:11\(901\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2001)127:11(901))
- Osawa, T., Mitsunashi, H., & Ushimaru, A. (2010). River confluences enhance riparian plant species diversity. *Plant Ecology*, 209(1), 95–108. <https://doi.org/10.1007/s11258-010-9726-9>
- Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Kostaschuk, R. A., Hardy, R. J., Orfeo, O., Amsler, M. L., & Szupiany, R. N. (2008). Large River Channel Confluences. *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*, 73–91. <https://doi.org/10.1002/9780470760383.ch5>
- PUSDIKLAT-SDAK. (2017). Modul 6. Morfologi Sungai: Pelatihan Perencanaan Teknik Sungai. Kementerian Pekerjaan Umum, 1–44.
- Ramos, P. X. (2022). *Flow Dynamics at T-Shaped Open-Channel Confluences: Effects of Bed Elevation Discordance* (Issue May).
- Rhoads, B. L. (2020). *River Dynamics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108164108>
- Rhoads, B. L., & Sukhodolov, A. N. (2004). Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence. *Water Resources Research*, 40(6), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2003WR002811>
- Rhoads, B. L., & Sukhodolov, A. N. (2008). Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface. *Water Resources Research*, 44(8). <https://doi.org/10.1029/2007WR006634>
- Rice, S. P. (2017). Tributary connectivity, confluence aggradation and network biodiversity. *Geomorphology*, 277, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.027>
- Roslani, D., Zulfan, J., & Kumala, Y. E. (2013). Kajian OPTimasi Desain Saluran Dalam Rangka Pengendalian Banjir di Citarum Hulu. 2013, 4(1), 13–24.
- Shen, X., Hodges, B. R., Li, R., Li, Z., Fan, J. L., Cui, N. B., & Cai, H. J. (2021). Factors Influencing Distribution Characteristics of Total Dissolved Gas Supersaturation at Confluences. *Water Resources Research*, 57(6). <https://doi.org/10.1029/2020WR028760>
- Shen, X., Li, R., Cai, H., Feng, J., & Wan, H. (2022). Characteristics of secondary flow and separation zone with different junction angle and flow ratio at river confluences. *Journal of Hydrology*, 614, Part(November 2022), 128537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128537>
- Simons, D., & Sentürk, F. (1992). *Sediment-Transport-Technology-By-Daryl-B-Simons-Fuat-Enturkpdf[1]* (p. 889).
- Sukhodolov, A. N., Schnauder, I., & Uijttewaall, W. S. J. (2010). Dynamics of shallow lateral shear layers: Experimental study in a river with a sandy bed. *Water Resources Research*, 46(11), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2010WR009245>
- Xiao, Y., Xia, Y., Yuan, S. yu, & Tang, H. wu. (2017). Flow structure and phosphorus adsorption in bed sediment at a 90° channel confluence. *Journal of Hydrodynamics*, 29(5), 902–905. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60804-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60804-1)
- Yuan, S., Tang, H., Li, K., Xu, L., Xiao, Y., Gualtieri, C., Rennie, C., & Melville, B. (2021). Hydrodynamics, Sediment Transport and Morphological Features at the Confluence Between the Yangtze River and the Poyang Lake. *Water Resources Research*, 57(3). <https://doi.org/10.1029/2020WR028284>