

Pemodelan Degradasi dan Agradasi Dasar Sungai dengan Beberapa Persamaan di Sungai Winongo Yogyakarta

Modelling of Riverbed Degradation and Aggradation Using Several Equations in The Winongo River Yogyakarta

Puji Harsanto^{1)*} Galuh Nanda Sutri²⁾ Shakti Rahadiansyah³⁾ Surya Budi Lesmana⁴⁾

^{1,2,4)} Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Kampus Terpadu UMY, Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta

³⁾ Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak

Jl. Solo Km. 6, Caturtunggal, Sleman, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

*Corresponding email: puji_hr@umy.ac.id

Accepted: 23 August 2023; Revised: 26 September 2023; Approved: 01 November 2024

ABSTRACT

Calculating riverbed degradation and aggradation is essential in designing riverbank protection structures, particularly for determining foundation depth. Excessive degradation can compromise foundation stability, significantly increasing the risk of structural failure. Numerous predictive models for egradation and aggradation have been developed by researchers, highlighting the importance of selecting an equation that closely aligns with the specific characteristics of the river to achieve optimal design accuracy. This study aims to determine the most suitable predictive model for riverbed degradation and aggradation. A case study was conducted along a 43.75 km of the Winongo River Yogyakarta. The simulation involved riverbed sediment data collected at 500 m intervals from upstream to downstream, and secondary discharge data comprising average daily discharge for both wet and dry months. The selected grainsize parameter follows standards in HEC-RAS 6.3.1, with the Meyer Peter Müller equation applied to d_{90} , Engelund Hansen to d_{50} , and Laursen Copeland to d_{84} . Simulation results of riverbed degradation were then compared against observed conditions of riverbank erosion. Riverbank steepness or protective structure failure indicates excessive riverbed degradation, while stable conditions suggest otherwise. Based on the simulations conducted on the Winongo River, the Engelund Hansen equation provided average degradation estimates more consistent with field conditions than the other two equations.

Keywords: degradation and aggradation, transport sediment equations, HEC-RAS, river bank

ABSTRAK

Perhitungan degradasi dan agradasi dasar sungai penting dalam perencanaan konstruksi pengaman tebing sungai terutama dalam menentukan kedalaman fondasi. Degradasi yang berlebih akan menjadikan tumpuan fondasi bangunan tidak stabil, sehingga potensi keruntuhan menjadi besar. Perhitungan untuk memprediksi degradasi dan agradasi sudah banyak dikembangkan oleh para ilmuwan, dengan demikian pemilihan persamaan yang sesuai karakter sungai menjadi hal penting agar mendapatkan hasil perencanaan optimal. Penelitian ini bertujuan untuk memilih persamaan yang sesuai dalam memprediksi degradasi dan agradasi dasar sungai. Studi kasus dilakukan di Sungai Winongo di Yogyakarta sepanjang ± 43,75 km. Simulasi menggunakan data material sedimen dari dasar sungai. Sampel diambil dari hulu sampai hilir dengan interval 500 m. Data aliran menggunakan debit harian rata-rata pada bulan basah dan kering. Pemilihan diameter butiran sesuai yang digunakan pada HEC-RAS 6.3.1. Diameter yang digunakan persamaan Meyer Peter Muller, Engelund Hansen dan Laursen Copeland berturut-turut adalah d_{90} , d_{50} , serta d_{84} . Hasil simulasi degradasi dasar sungai dibandingkan dengan kondisi nyata kerusakan tebing sungai. Kondisi tebing sungai yang curam atau pengaman tebing yang mengalami kerusakan mengindikasikan dasar sungai mengalami degradasi berlebih begitu pula sebaliknya. Berdasarkan hasil simulasi di Sungai Winongo, dari tiga persamaan yang digunakan menunjukkan bahwa persamaan Engelund Hansen menghasilkan rata - rata nilai degradasi sesuai dengan kondisi di lapangan dibandingkan dua persamaan lainnya.

Kata Kunci: degradasi dan agradasi, kerusakan tebing, persamaan transpor sedimen, HEC-RAS 6.3.1

PENDAHULUAN

Sungai Winongo merupakan salah satu dari beberapa sungai besar yang berhulu pada lereng Gunung Merapi dan alirannya melintasi Kota Yogyakarta. Seperti terlihat pada Gambar 1, sungai

yang memiliki panjang aliran ±43,75 km rata-rata mempunyai bangunan pelindung tebing. Hal ini karena alur sungai melintas kota Yogyakarta dan bermuara di Sungai Opak di Kabupaten Bantul (lihat Gambar 3). Debit aliran sungai relatif ada sepanjang

tahun (Jaya & Suhud, 2021). Hampir semua sungai yang melintas kota memiliki bangunan pelindung tebing untuk menjaga konstruksi di dekat sungai. Bangunan tersebut seperti bronjong, dan talud atau dinding penahan tebing (DPT) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Bangunan pelindung tebing dirancang untuk dapat menahan tekanan aktif dan atau pasif tanah dan tekanan hidrostatis dari samping (Sianturi, 2022). Pondasi bangunan harus stabil karena erosi pada kaki tebing sungai sangat berpengaruh pada kestabilan bangunan (Srimulatsih & Sundoro, 2011).



Gambar 1 Talud atau DPT yang melindungi rumah di kiri dan kanan sungai dari erosi tebing

Material dasar Sungai Winongo umumnya mengandung pasir yang berasal dari lahar hasil letusan Gunung Merapi. Material lahar awalnya mengendap di lereng gunung dan terbawa ke hilir saat musim hujan, (Wardhana, 2015) dan (Junaidi & Wigati, 2011). Dengan demikian material dasar sungai berupa material lepas yang berpotensi menjadi material transpor sedimen dasar (*bedload transport*) sungai. Hal ini menyebabkan elevasi dasar sungai mempunyai potensi berfluktuasi disebabkan angkutan sedimen. Material sedimen akan terdeposisi jika energi aliran tidak cukup untuk membawa dan disebut proses sedimentasi. Material sedimen akan terbawa aliran menjadi transpor sedimen jika energi aliran cukup untuk mengangkut butiran sedimen dan disebut proses transport sedimen.

Agradasi dasar sungai adalah proses terjadinya kenaikan elevasi dasar akibat proses sedimentasi, sedangkan degradasi dasar sungai merupakan kejadian sebaliknya yaitu penurunan elevasi dasar sungai akibat proses transpor sedimen (Latif et al., 2019). Kenaikan elevasi dasar sungai akan memicu masalah pengurangan kapasitas tampung dan dapat menyebabkan kenaikan elevasi muka air saat banjir, lebih lanjut lagi dapat menyebabkan luapan air ke sempadan sungai. Sedangkan degradasi dasar sungai cenderung membuat ketinggian tebing sungai bertambah dan sudut kemiringan tebing bertambah curam seiring dengan penurunan

elevasi dasar sungai, sehingga memicu kondisi tebing sungai tidak stabil yaitu mudah terjadi keruntuhan (Deng et al., 2019).

Transpor sedimen pada dasar sungai disebut *bedload transport*. Perhitungan *bedload transport* menjadi parameter penting dalam memperkirakan perubahan dasar sungai baik aggradasi atau degradasi (Redolfi et al., 2018; Sidorchuk, 2015). Persamaan yang digunakan untuk memperkirakan transpor sedimen banyak dikembangkan oleh ilmuwan, sehingga memerlukan pemahaman dan penelitian agar dapat memilih persamaan yang sesuai dengan karakteristik sungai (Joshi et al., 2019).

Perangkat lunak yang secara luas di Indonesia digunakan untuk membantu memperkirakan perubahan elevasi dasar sungai akibat transpor sedimen adalah HEC-RAS 6.3.1. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh US ARMY dan bersifat *open source* (tidak berbayar). HEC-RAS 6.3.1 dilengkapi dengan *tools* perhitungan pemodelan transpor sedimen, dan sudah diaplikasikan oleh beberapa peneliti di Indonesia (Ibrahim et al., 2022b; Zainuddin et al., 2023; Zevri, 2020). Beberapa persamaan yang digunakan dalam HEC-RAS 6.3.1, antara lain yaitu, Meyer Peter Muller, Engelund Hansen, dan Laursen Copeland (Gibson et al., 2017a). Tujuan penelitian ini adalah melakukan analisis terhadap beberapa persamaan *bedload transport* dalam memprediksi perubahan elevasi dasar sungai. Hasilnya dibandingkan dengan kondisi lapangan dengan cara survei kondisi tebing sungai, yaitu dengan melihat kondisi tebing dan kerusakan bangunan pelindung tebing. Konsep yang digunakan adalah degradasi dasar sungai memicu terjadinya longsor pada tebing sungai. Manfaat penelitian adalah dapat menjadi acuan praktisi atau peneliti dalam memilih persamaan *bedload transport* yang sesuai agar hasil pemodelan mendekati kondisi nyata di lapangan.

METODOLOGI

Persamaan Angkutan Sedimen

Penelitian ini melakukan pemodelan degradasi dan aggradasi dasar sungai dengan menggunakan HEC-RAS versi 6.3.1. Persamaan yang dipilih adalah Meyer Peter Muller (MPM), Engelund Hansen, dan Laursen Copeland seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1, 2, dan 3. Ketiga persamaan ini dipilih karena sering digunakan oleh peneliti (Kuriqi et al., 2020; Naito et al., 2019; Noor & Talib, 2022)

Persamaan Meyer Peter Muller

Persamaan angkutan sedimen yang pertama adalah MPM seperti ditunjukkan pada Persamaan 1. Persamaan ini menggunakan parameter diameter butiran d_m dengan d_{90} .

$$\left(\frac{k_r}{k'_r}\right)^{3/2} \gamma R S = 0,047(\gamma_s - \gamma)d_m + \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{c_s}\right)^{2/3} g_s \quad (1)$$

Dimana:

g_s : laju angkutan sedimen (m³/s)
 k_r : koefisien kekasaran (m/s)
 k'_r : koefisien kekasaran butir (m/s)
 γ : berat jenis air (kg/m³)
 γ_s : berat jenis sedimen (kg/m³)
 g : percepatan gravitasi (m/s²)
 d_m : diameter partikel d_{90} (mm)
 R : radius hidraulik (m)
 S : kemiringan energi

Persamaan Engelund Hansen

Persamaan yang kedua adalah Engelund Hansen seperti ditunjukkan pada Persamaan 2. Persamaan ini menggunakan parameter d_m butiran sedimen dengan d_{50} .

$$g_s = V^2 \left(\frac{\tau_o}{\gamma_s - \gamma}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} = V^2 (\tau^*)^{3/2} \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} \quad (2)$$

Dimana:

g_s : laju angkutan sedimen (m³/s)
 V : kecepatan rata - rata (m/s)
 g : percepatan gravitasi (m/s²)
 γ : berat jenis air (kg/m³)
 γ_s : berat jenis sedimen (kg/m³)
 τ_b : tegangan geser dasar (kg/m²)
 τ^* : tegangan geser dasar (tidak berdimensi)
 d_{50} : diameter partikel 50 % lolos saringan (mm)

Persamaan Laursen Copeland

Persamaan yang ketiga adalah Laursen Copeland seperti ditunjukkan pada Persamaan 3. Persamaan ini menggunakan parameter d_m butiran sedimen dengan d_{84} .

$$C_m = 0,01\gamma \left(\frac{d_{si}}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_b}{\tau_{cr}} - 1\right) f \left(\frac{u_*}{\omega}\right) \quad (3)$$

Dimana:

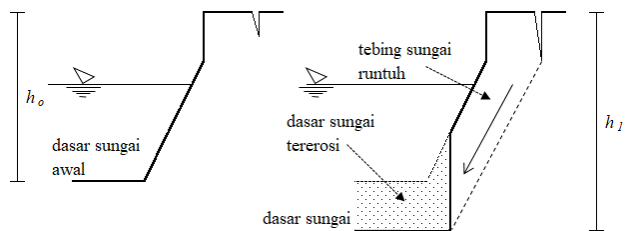
C_m : konsentrasi debit sedimen (mg/l) atau (g/m³)

γ : berat jenis air (kg/m³)
 d_{si} : diameter partikel d_{84} (mm)
 τ'_b : tegangan geser terhadap butir (kg/m²)
 τ_{cr} : tegangan geser kritis (kg/m²)
 f : fungsi pengendapan
 u_* : kecepatan geser (m/s)
 ω : partikel kecepatan jatuh
 D : kedalaman efektif (m)

Konsep *Instability* Tebing Sungai

Stabilitas tebing sungai merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan pada manajemen sungai karena terkait langsung dengan struktur yang dekat dengan sungai (Bigham, 2020). Erosi tebing sungai juga menyebabkan meningkatkan transpor sedimen yang mempengaruhi kapasitas tampungan sungai (Aldefae et al., 2019; Zuhri et al., 2023). Skema keruntuhan tebing sungai akibat erosi dasar sungai diperkenalkan oleh Thorne dan Abt 1993 seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**. Dari gambar tersebut terlihat bahwa erosi dasar sungai menyebabkan tinggi tebing semula h_o menjadi lebih tinggi, h_1 dan menyebabkan nilai kemiringan tebing bertambah dan potensi keruntuhan tebing menjadi lebih besar.

Erosi dasar sungai (mengalami degradasi) tepatnya di bagian kaki tebing menjadi penyebab utama terjadinya kegagalan struktur pelindung tebing sungai. Perkuatan bagian kaki tebing dapat menjadi salah satu alternatif solusi untuk melindungi tebing sungai dari bahaya keruntuhan (Recking et al., 2019; Udomchai et al., 2018).



Gambar 2 Skema *instability* tebing sungai (Thorne & Abt, 1993)

Hasil degradasi dan aggradasi yang diperoleh dari masing - masing persamaan tentunya tidak sama. Oleh karena itu, perlu dilakukan perbandingan hasil simulasi dari tiap persamaan tersebut dengan kondisi nyata di lapangan. Namun demikian membandingkan kondisi degradasi dan aggradasi di lapangan bukan suatu hal yang mudah. Sehingga dalam penelitian ini perbandingan dengan kondisi lapangan dilakukan dengan penilaian kualitatif kondisi tebing sungai.

Perlindungan tebing sungai yang umum diterapkan di Indonesia adalah *lining* yang berupa talud atau dinding penahan tebing (DPT) atau

bronjong. Dari konsep kestabilan tebing sungai dapat disimpulkan bahwa erosi dasar dibagian kaki tebing sungai dapat menyebabkan kondisi tebing sungai tidak dalam kondisi stabil. Sehingga kondisi degradasi diidentikkan dengan kondisi sebagai berikut (Bravikawati & Ziana, 2021):

- (1) kondisi tebing sungai tidak ada perlindungan, maka kondisi tebing ada keruntuhan material tebing sungai dan kemiringan tebing sungai terlihat curam.
- (2) kondisi tebing sungai ada konstruksi maka ada tanda-tanda kerusakan bangunan, seperti keretakan bangunan (disebabkan adanya *displacement* sebagian tubuh bangunan), dan keruntuhan bangunan.
- (3) kondisi tebing sungai ada konstruksi dan konstruksi kaki tebing sungai terlihat karena saat survei tidak ada air, maka tanda-tanda kerusakan bangunan dapat dilihat dengan adanya bangunan yang *overhang*.

Untuk kondisi agradasi atau dasar sungai yang tidak berubah diidentikkan dengan:

- (1) kondisi tebing sungai tidak ada perlindungan, maka kondisi tebing tidak ada keruntuhan material tebing sungai dan kemiringan tebing sungai terlihat tidak curam.
- (2) kondisi tebing sungai ada konstruksi maka tidak ada tanda-tanda kerusakan bangunan, seperti keretakan bangunan (disebabkan adanya *displacement* sebagian tubung bangunan), dan keruntuhan bangunan.

Sebagai catatan bahwa dalam penelitian ini tidak mengidentifikasi tingkat kerusakan bangunan atau panjang segemen sungai yang mengalami kerusakan bangunan pelindung tebing, namun survei kondisi tebing sungai dilakukan untuk mengidentifikasi ada atau tidak tanda-tanda kerusakan seperti dijelaskan di atas. Kondisi tebing yang diamati dengan melakukan survei sepanjang sungai ada 70 titik dengan lokasi seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**.

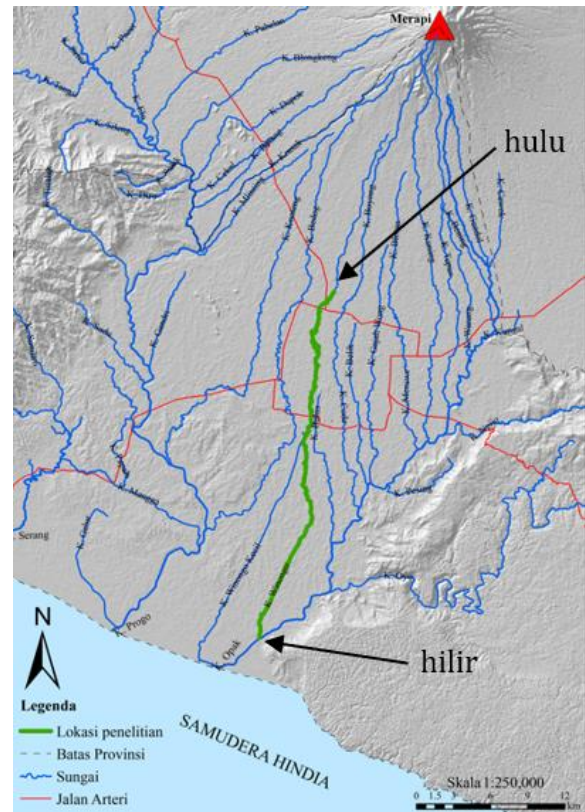
Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Yogyakarta dengan mengambil Sungai Winongo sebagai sampel. Sungai ini berhulu di lereng Gunung Merapi dan bermuara pada Sungai Opak (**Gambar 3**). Sungai ini dipilih karena ketersediaan data sekunder potongan melintang yang panjang dan data debit harian rata-rata dalam kurun waktu minimal satu tahun. Sungai mempunyai karakteristik tiga bagian, yaitu bagian hulu (pias kemiringan curam), tengah (pias yang melintas kota), dan hilir (pias dengan kemiringan landai).

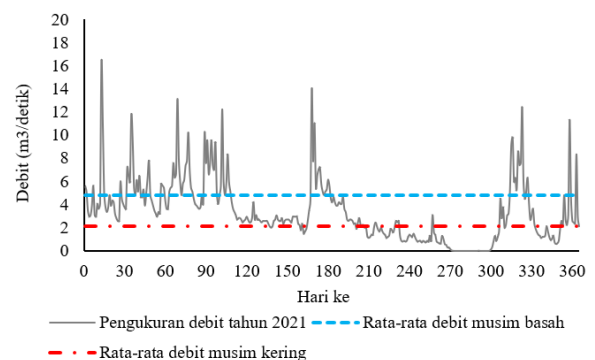
Data Penelitian

Data Debit Harian

Data debit simulasi adalah data sekunder hasil pengukuran tahun 2021 dari Dinas Pekerjaan Umum Perumahan dan Energi Sumber Daya Mineral (DPUPESDM) seperti yang ditunjukkan di **Gambar 4**. Untuk simulasi digunakan data debit rata-rata pada musim basah, yaitu sebesar $4,75 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan debit rata-rata pasca bulan kering yaitu sebesar $2,11 \text{ m}^3/\text{detik}$.



Gambar 3 Batas simulai hulu dan hilir Sungai Winongo

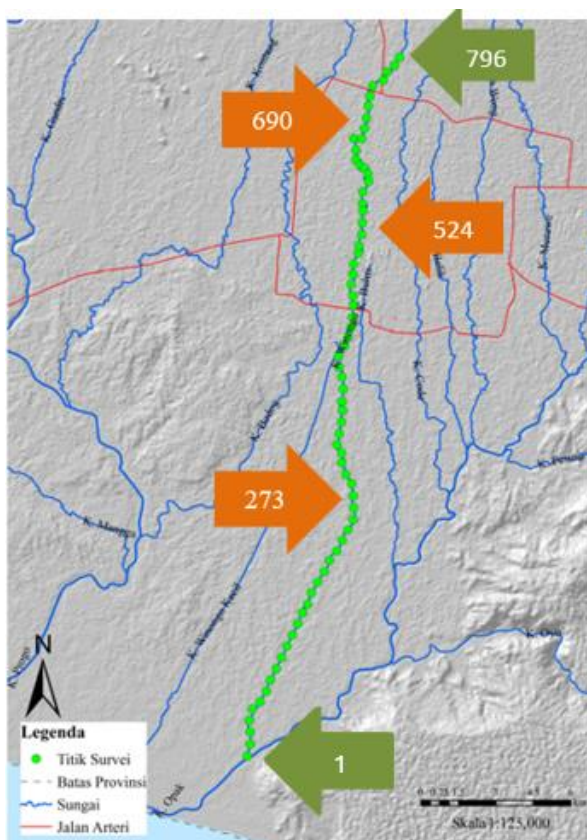


Gambar 4 Debit Sungai Winongo tahun 2021 dan debit rata-rata musim basah dan kering

Data Material Sedimen

Diameter butiran sedimen menjadi data penting dalam perhitungan dari persamaan empirik yang digunakan. Diameter butiran diperoleh dari pengambilan sampel di sungai. Pengambilan dilakukan dari hulu sampai hilir dengan cara mengambil sampel setiap interval jarak 500 m. Sehingga dalam pemodelan satu titik data sedimen mewakili panjang sungai 250 m kearah hulu dan hilir dari titik lokasi. Titik-titik pengambilan ditunjukkan pada **Gambar 5**. Material sedimen diuji gradasi dengan metode ASTM (SNI 03-1968-1990). Di lokasi pengambilan sampel juga dilakukan pengamatan kondisi tebing sungai. Pengamatan dengan mencatat jenis bangunan pelindung tebing, dan kerusakan yang terjadi.

Penggunaan variabel diameter butiran dalam penelitian ini untuk setiap potongan melintang sungai adalah diameter seragam yaitu d_{90} untuk persamaan MPM, d_{50} untuk persamaan Engelund Hansen, dan d_{84} untuk persamaan Laursen Copeland (Gibson et al., 2017b). **Tabel 3** menunjukkan nilai d_{50} , d_{84} dan d_{90} untuk tiap-tiap *cross section*. Data material sedimen ini digunakan pada simulasi *quasi-unsteady flow* pada HEC-RAS.



Gambar 5 Titik hijau menunjukkan lokasi pengambilan sampel sedimen dan pengamatan kondisi tebing sungai

Data Cross Section Sungai

Pada penelitian ini menggunakan penampang melintang (*cross section*) Sungai Winongo dengan jumlah 796 penampang, dengan jarak antar penampang melintang 25 – 50 m. Selanjutnya untuk keperluan pemodelan dengan HEC-RAS, penampang melintang diberi nomor 1 untuk paling hilir dan nomor 796 untuk data paling hulu (lihat **Gambar 5**). Data *cross section* merupakan data sekunder hasil pengukuran oleh Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak (BBWSO) Daerah Istimewa Yogyakarta pada tahun 2017.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi Angka Kekasaran Manning

Sebelum dilakukan simulasi, angka koefisien kekasaran *Manning*, n dikalibrasi dengan data pengukuran di lapangan. Kalibrasi dilakukan untuk menentukan angka koefisien kekasaran *Manning* yang sesuai dengan kondisi aliran Sungai Winongo. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan kondisi kecepatan aliran di lapangan dengan kondisi simulasi. Alat ukur kecepatan aliran dengan *flow meter* (**Gambar 6**). Hasil pengukuran kecepatan untuk kalibrasi diperoleh dari pengukuran di tiga lokasi dengan parameter yang diukur adalah tampang sungai, kecepatan aliran dan kedalaman aliran. Tiga titik terpilih yang masing-masing berlokasi (**Gambar 5**) pada *cross section* nomor 273 (hilir), *cross section* nomor 524 (tengah), dan *cross section* nomor 690 (hulu).



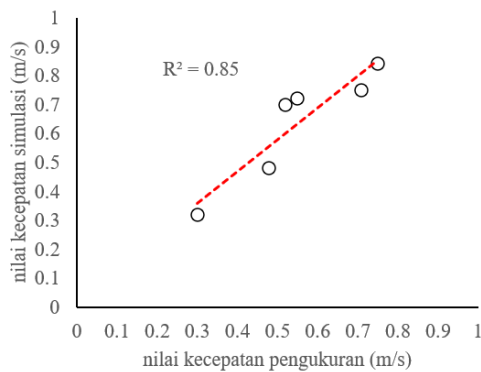
Gambar 6 Pengukuran kecepatan aliran dan alat ukur *flow meter*

Proses kalibrasi dilakukan dengan *trial and error* angka koefisien kekasaran *Manning*, n , sedemikian sehingga kecepatan antara simulasi dan kondisi pengukuran di lapangan nilainya hampir sama. Kesamaan parameter aliran dengan kondisi nyata di lapangan ditunjukkan angka korelasi pada **Gambar 7**. Angka korelasi hasil simulasi dan

pengukuran menunjukkan angka 0,85 dan menunjukkan korelasi yang kuat antara variabel pengukuran dan simulasi. Data hasil kalibrasi angka koefisien kekasaran *Manning* dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil menunjukkan angka koefisien kekasaran *Manning* rata-rata sebesar 0,025 sampai dengan 0,04 di bagian hulu, 0,03 sampai dengan 0,04 di bagian tengah, dan 0,022 sampai dengan 0,03 di bagian hilir. Dari hasil tersebut bahwa angka kekasaran *Manning* semakin ke hilir semakin kecil.

Tabel 1 Hasil kalibrasi angka koefisien kekasaran *Manning*, *n*

cross section	Kecepatan (m/s)		Angka kekasaran Manning, <i>n</i>		
	Model	Pengukuran	MPM	Engelund Hansen	Loursen Copeland
690	0,52	0,7	0,03	0,026	0,04
	0,48	0,48	0,025	0,025	0,03
524	0,75	0,84	0,03	0,04	0,035
	0,3	0,32	0,03	0,04	0,035
273	0,71	0,75	0,022	0,03	0,03
	0,55	0,72	0,03	0,03	0,03



Gambar 7 Koefisien korelasi kecepatan pengukuran dan simulasi

Pemodelan Quasi Unsteady Flow

Pemodelan menggunakan data debit terukur pada musim basah dan kering. Data debit harian yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Data debit menjadi data kondisi batas hulu dari model aliran sungai. Batasan skema sungai dalam simulasi ini adalah bahwa cabang sungai diabaikan. Kondisi batas hilir dengan menggunakan *normal depth* yang diambil dari nilai kemiringan rata-rata sungai di bagian hilir yaitu sebesar 0,0025. Kondisi batas hulu yaitu debit dan batas hilir (*normal depth*) adalah sama untuk masing-masing persamaan dalam pemodelan dan yang membedakan adalah angka kekasaran *Manning*, *n* yang diambil dari hasil kalibrasi. Karena

keterbatasan dalam HEC-RAS, maka waktu atau durasi simulasi hanya dalam 4 hari. Jumlah pemodelan yang dilakukan ada 6 (enam) macam, yaitu:

- 1) simulasi dengan Persamaan MPM pada kondisi musim basah;
- 2) simulasi dengan Persamaan Engelund Hansen pada kondisi musim basah;
- 3) simulasi dengan Persamaan Laursen Copeland pada kondisi musim basah;
- 4) simulasi dengan Persamaan MPM pada kondisi musim kering;
- 5) simulasi dengan Persamaan Engelund Hansen pada kondisi musim kering;
- 6) simulasi dengan Persamaan Laursen Copeland pada kondisi musim kering.

Pemodelan transpor sedimen dilakukan menggunakan *quasi unsteady flow*. Pada simulasi ini menggunakan data material sedimen terdistribusi secara longitudinal dan di-input-kan pada menu *sediment data* di HECRAS. Menggunakan diameter *d₉₀* untuk persamaan MPM, *d₅₀* untuk persamaan Engelund Hansen, dan *d₈₄* untuk persamaan Laursen Copeland. Data sedimen untuk setiap nomor *cross section* seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa butiran sedimen dari hulu ke hilir semakin kecil. Hal ini sesuai dengan hasil kalibrasi yang menunjukkan nilai angka kekasaran *Manning* semakin ke hilir semakin kecil.

Tabel 2 Diameter butiran dari hulu ke hilir

Cross section	<i>d₉₀</i> (mm)	<i>d₅₀</i> (mm)	<i>d₈₄</i> (mm)
796 - 794	0,29	0,21	0,27
793 - 775	8,60	5,80	8,00
774 - 746	7,99	1,90	7,00
745 - 709	5,10	0,61	1,80
708 - 672	8,70	6,00	8,10
671 - 628	0,84	0,47	0,75
627 - 594	6,70	0,28	6,30
593 - 560	6,80	0,52	5,60
559 - 526	1,90	0,70	0,86
525 - 502	0,85	0,53	0,82
501 - 478	0,39	0,26	0,37
477 - 455	0,28	0,21	0,27
454 - 434	0,31	0,22	0,28
433 - 404	0,50	0,24	0,39
403 - 369	0,60	0,23	0,41
368 - 341	0,29	0,21	0,28
340 - 320	0,35	0,23	0,30
319 - 298	0,30	0,21	0,29
297 - 273	1,17	0,26	0,50
272 - 249	0,29	0,21	0,27
248 - 227	0,85	0,23	0,51
226 - 185	0,29	0,19	0,26
184 - 123	0,29	0,22	0,27
122 - 65	0,75	0,27	0,59
64 - 1	5,00	0,26	1,20

Degradasi-Agradasi Dasar Sungai

Pemodelan *quasi unsteady flow* telah diaplikasikan di Sungai Winongo. Hasil rata-rata degradasi dan agradasi disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4 dengan nilai negatif menunjukkan degradasi. Dari tabel-tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa proses degradasi dan agradasi dasar sungai terjadi baik di musim basah atau di musim kering dengan besaran yang relatif tidak jauh berbeda namun rata-rata degradasi pada musim basah cenderung lebih besar dibanding musim kering. Hal ini disebabkan pada musim basah debit aliran cenderung lebih besar, sehingga menghasilkan tegangan geser dasar sungai yang lebih besar pula, sehingga material dasar sungai yang tererosi jadi lebih besar (Yan et al., 2022).

Tabel 3 Degradasi dan agradasi rata-rata sepanjang sungai pada musim basah

Morfologi	Persamaan	Besaran (m)
Agradasi	Engelund Hansen	0,48
	Laursen Copeland	0,41
	MPM	0,26
Degradasi	Engelund Hansen	-0,62
	Laursen Copeland	-0,47
	MPM	-0,32

Tabel 4 Degradasi dan agradasi rata-rata sepanjang sungai pada musim kering

Morfologi	Persamaan	Besaran (m)
Agradasi	Engelund Hansen	0,43
	Laursen Copeland	0,32
	MPM	0,20
Degradasi	Engelund Hansen	-0,53
	Laursen Copeland	-0,40
	MPM	-0,27

Persamaan Engelund Hansen menunjukkan nilai rata-rata agradasi yang cenderung lebih besar (0,48 m pada musim basah dan 0,43 m pada musim kering) dibanding persamaan Laursen Copeland dan MPM. Berturut-turut besaran agradasi musim basah dan kering untuk persamaan Laursen Copeland yaitu 0,41 m dan 0,32 m. Degradasi yang terjadi pada persamaan MPM adalah 0,26 m pada musim basah dan 0,20 m pada musim kering.

Hasil survei kondisi bangunan pelindung tebing sungai menunjukkan tipikal kerusakan adalah adanya penurunan struktur bronjong, retak atau

patah pada talud, serta beberapa titik terlihat fondasi sudah dalam kondisi menggantung. **Gambar 8** adalah contoh talud yang fondasi sudah menggantung dan **Gambar 9** adalah contoh DPT yang mengalami retak. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan tersebut dominan oleh akibat tidak stabilnya fondasi bangunan akibat adanya degradasi dasar sungai.



Gambar 8 Contoh talud sungai dengan fondasi yang sudah menggantung



Gambar 9 Contoh DPT yang mengalami retak

Hasil yang serupa bahwa persamaan Engelund Hansen menghasilkan besaran degradasi dasar sungai yang paling besar, yaitu -0,62 m pada musim basah dan -0,53 m pada musim kering. Penggunaan tanda negatif untuk menunjukkan degradasi. Rata-rata degradasi dari persamaan MPM cenderung paling kecil dibanding dari kedua persamaan yang lain, berturut-turut nilai degradasi adalah -0,32 pada musim basah dan -0,27 m pada musim kering. Pada persamaan Laursen Copeland menghasilkan rata-rata degradasi sebesar -0,47 m pada musim basah dan -0,40 pada musim kering.

Penggunaan diameter rata-rata yaitu d_{50} pada Persamaan Engelund Hansen memberikan dampak volume angkutan *bedload* menjadi lebih besar. Hal ini menunjukkan kecepatan rata-rata yang dihasilkan dalam simulasi dapat mengangkut

material dasar (d_{50}) lebih banyak, namun kurang mampu mengangkut material dasar (d_{84} dan d_{90}).

Proses degradasi dasar Sungai Winongo lebih dominan dibanding dengan aggradasi dasar sungai menunjukkan bahwa material sedimen yang hilang lebih besar dibanding dengan sedimen suplai. Sungai Winongo yang berhulu di lereng Gunung Merapi bukan berarti menjadi area pengendapan lahar saat terjadi letusan (BNPB 2010). Pemodelan morfologi Sungai Winongo juga pernah dilakukan oleh (Ibrahim et al., 2022). Penelitian tersebut menggunakan debit kala ulang dengan durasi simulasi yang lebih pendek. Hasilnya menunjukkan bahwa aggradasi lebih dominan dibanding dengan degradasi. Hal ini mengindikasikan bahwa menggunakan debit rata-rata tahunan seperti yang dilakukan dalam penelitian ini memberikan hasil morfologi sungai yang lebih sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

Kondisi ini juga memberi indikasi bahwa penambangan pasir oleh masyarakat lokal di sekitar sungai sangat berpengaruh pada proses degradasi dasar sungai (Saputra et al., 2021; Sukatja & Alfianto, 2017).

Untuk membandingkan hasil simulasi dengan kondisi nyata di lapangan. Persen perkiraan titik lokasi sungai yang mengalami tanda-tanda kerusakan tebing dihitung berdasar jumlah *cross section* yang mengalami degradasi. Sedangkan persen segmen yang tidak ada tanda kerusakan tebing diidentifikasi pada segmen mengalami aggradasi atau tetap.

Hasil survei dari 70 titik dari hulu sampai hilir, titik sungai yang mengalami degradasi dasar sungai ada 68% lokasi. Degradasi diindikasikan oleh 1) adanya kerusakan baik ringan atau berat dari bangunan pelindung tebing atau DPT; 2) longsor tebing sungai untuk segmen yang tidak ada bangunan pelindung tebing. Sedangkan 32% titik yang tidak mengalami degradasi. Hal ini diindikasikan dengan: 1) kondisi bangunan pelindung tebing yang baik (contoh lihat **Gambar 10**); 2) tebing sungai yang tidak mengalami longsor untuk tebing sungai yang tidak ada bangunan pelindung tebing.

Potensi kerusakan oleh masing-masing persamaan ditunjukkan pada Tabel 5. Hal ini berbanding lurus dengan proses degradasi sungai yang lebih dominan terjadi dibandingkan dengan aggradasi sungai (Harsanto et al., 2021; Recking et al., 2019; Udomchai et al., 2018). Tabel 6 menunjukkan perbedaan persen degradasi dengan aggradasi jika dibandingkan dengan persen kerusakan kondisi nyata di lapangan. Dari Tabel 6 diperoleh bahwa Persamaan Engelund Hansen memberikan

kemiripan dengan kondisi lapangan. Persentase perbedaan untuk kejadian degradasi adalah -8% sedangkan persen kesalahan untuk kejadian tetap atau aggradasi sebesar 8%. Hasil positif menunjukkan prediksi hasil pemodelan lebih besar dibanding kondisi nyata di lapangan. Sedangkan nilai negatif menunjukkan prediksi hasil pemodelan lebih kecil dibanding dengan kondisi nyata di lapangan. Persamaan Loursen Copeland memberikan perbedaan degradasi sebesar -16 % dan 16% untuk aggradasi. Sedangkan untuk persamaan MPM memberikan perbedaan sebesar 18% untuk aggradasi dan -18% untuk degradasi.



Gambar 10 Contoh pelindung tebing dengan bronjong yang dalam kondisi baik

Tabel 5 Persentase perkiraan titik yang mengalami degradasi dan aggradasi

Musim	Morfologi	Persamaan		
		Engelund Hansen	Laursen Copeland	MPM
Basah	Agradasi	40%	48%	50%
	Degradasi	60%	52%	50%
Kering	Agradasi	48%	49%	51%
	Degradasi	52%	51%	49%

Tabel 6 Persentase perbedaan dengan kondisi nyata di lapangan

Musim	Morfologi	Persamaan		
		Engelund Hansen	Laursen Copeland	MPM
Basah	Agradasi	8%	16%	18%
	Degradasi	-8%	-16%	-18%
Kering	Agradasi	16%	17%	19%
	Degradasi	-16%	-17%	-19%

KESIMPULAN

Simulasi transpor sedimen (*quasi unsteady flow*) telah dilakukan pada penelitian ini dengan perangkat lunak HEC-RAS 6.3.1 dan menggunakan Persamaan MPM, Engelund Hansen dan Laursen Copeland. Dari hasil simulasi dengan Persamaan MPM, Engelund Hasen dan Laursen Copeland menunjukkan degradasi sungai lebih dominan dengan agradasi dasar sungai. Kondisi nyata di lapangan menunjukkan titik-titik pengamatan tebing sungai yang mengalami longsor atau bangunan pelindung tebing yang ada kerusakan baik ringan atau berat juga lebih banyak dibanding titik-titik pengamatan yang kondisi tebing aman terhadap longsor atau yang bangunan pelindung tebing dalam kondisi baik. Hal ini menunjukkan adanya hubungan antara kerusakan tebing dengan proses degradasi dasar sungai. Penggunaan diameter butiran yang dirujuk dari HEC-RAS 6.3.1, menunjukkan Persamaan Engelund Hansen memberikan hasil yang paling mendekati dengan kondisi lapangan, dengan catatan bahwa penggunaan material sedimen pada simulasi adalah MPM dengan d_{90} , Engelund Hansen dengan d_{50} dan Laursen dengan d_{84} .

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung dana dari kemendikbud melalui skema Penelitian Dasar DRPTM tahun 2022 dengan nomor kontrak 071/E5/PG.02.00.PT /2022. Peneliti juga mengucapkan banyak terimakasih kepada BBWS Serayu Opak dan DPUPESDM Yogyakarta yang membantu data penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldefae, A. H., Alkhafaji, R. A., Shamkhi, M. S., & Kumer, H. Q. (2019). Design and manufacturing of flume apparatus to investigate the failure mechanism of riverbanks. *Cogent Engineering*, 6(1), 1655234. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1655234>
- Bigham, K. A. (2020). Streambank stabilization design, research, and monitoring: The current state and future needs. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 351–387. <https://doi.org/10.13031/trans.13647>
- Bravikawati, M., & Ziana, Z. (2021). Penanganan Degradasi Dasar Sungai Krueng Jantho dengan Perencanaan Groundsill. *Journal of The Civil Engineering Student*, 3(2), 141–147. <https://doi.org/10.24815/journalces.v3i2.17983>
- Deng, S., Xia, J., Zhou, M., & Lin, F. (2019). Coupled modeling of bed deformation and bank erosion in the Jingjiang Reach of the middle Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 568, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.065>
- Gibson, S., Sánchez, A., Piper, S., & Brunner, G. (2017a). New One-Dimensional Sediment Features in HEC-RAS 5.0 and 5.1. *World Environmental and Water Resources Congress 2017: Hydraulics and Waterways and Water Distribution Systems Analysis - Selected Papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2017*, 192–206. <https://doi.org/10.1061/9780784480625.018>
- Harsanto, P., Kamiel, B. P., & Cahyani, I. (2021). Riverbed Erosion Analysis of Winongo River Using HEC-RAS 5.0. 7. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 933(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/933/1/012026>
- Ibrahim, I. M., Harsanto, P., & Wisnulingga, B. K. (2022b). Evaluasi Morfologi Dasar Sungai Winongo dengan HEC-RAS 5.0.7. *Jurnal Teknik Sipil*, 17(1), 45–50. <https://doi.org/10.24002/jts.v17i1.6390>
- Jaya, P. H. I., & Suhud, Moh. A. (2021). Model Suaka Ikan Untuk Pengelolaan Sungai di Jawa: Studi di Sungai Winongo Yogyakarta. *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*, 11(2), 169. <https://doi.org/10.15578/jksekp.v11i2.9996>
- Joshi, N., Lamichhane, G. R., Rahaman, M. M., Kalra, A., & Ahmad, S. (2019). Application of HEC-RAS to study the sediment transport characteristics of Maumee River in Ohio. *World Environmental and Water Resources Congress 2019*, 257–267. <https://doi.org/10.1061/9780784482353.024>
- Junaidi, & Wigati, R. (2011). Analisis Parameter Statistik Butiran Sedimen. *WahanaTeknik Sipil*, 16(2), 46–57. <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/wahana/issue/view/33>
- Kuriqi, A., Koçileri, G., & Ardiçliöğlü, M. (2020). Potential of Meyer-Peter and Müller approach for estimation of bed-load sediment transport under different hydraulic regimes. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 129–137. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00665-0>
- Latif, F., Said, M., & Amalia, A. R. (2019). Studi Pergerakan Sedimen Akibat Fluktuasi Debit pada Saluran Terbuka (Uji Laboratorium). *Teknik Hidro*, 12(1), 34–44. <https://doi.org/10.26618/th.v12i1.2465>
- Naito, K., Ma, H., Nittrouer, J. A., Zhang, Y., Wu, B., Wang, Y., Fu, X., & Parker, G. (2019). Extended Engelund–Hansen type sediment transport relation for mixtures based on the sand-silt-bed Lower Yellow River, China. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1555554>

- Noor, D. M., & Talib, S. H. A. (2022). Application of HEC-RAS to Estimate the Sediment Transport in Cameron Highlands, Pahang, Malaysia. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*, 3(1), 872–883.
- Recking, A., Piton, G., Montabonnet, L., Posi, S., & Evette, A. (2019). Design of fascines for riverbank protection in alpine rivers: Insight from flume experiments. *Ecological Engineering*, 138, 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.019>
- Redolfi, M., Bertoldi, W., Tubino, M., & Welber, M. (2018). Bed load variability and morphology of gravel bed rivers subject to unsteady flow: A laboratory investigation. *Water Resources Research*, 54(2), 842–862. <https://doi.org/10.1002/2017WR021143>
- Saputra, R., Ikhsan, J., & Prayuda, H. (2021). Pengaruh Penambangan Pasir terhadap Laju Degradasi Agradasi Dasar Sungai Progo. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 109–120. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v1i2.24>
- Sianturi, N. M. (2022). Analisis Perlindungan Tebing Sungai Bah Bolon Sumatera Utara Menggunakan Blok Beton Segmental dengan Perkuatan Geosintetik. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 13(2), 113–126. <https://doi.org/10.32679/jth.v13i2.691>
- Sidorchuk, A. Y. (2015). Evaluating bedload transport rate in a river bed taking into account data on the active and passive bed-forms dynamics. *Water Resources*, 42, 38–51. <https://doi.org/10.1134/S009780781501011X>
- Srimulatsih, U., & Sundoro, G. H. (2011). Teknologi batu curah (dump stones) sebagai pengaman tebing sungai. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 2(1), 81–96.
- Sukatja, C. B., & Alfianto, A. (2017). Revitalisasi sabodam sebagai pengendali aliran lahar (studi kasus di daerah Gunungapi Merapi). *Jurnal Teknik Hidraulik*, 8(1), 29–42.
- Thorne, C. R., & Abt, S. R. (1993). Analysis of riverbank instability due to toe scour and lateral erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18(9), 835–843. <https://doi.org/10.1002/esp.3290180908>
- Udomchai, A., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., & Arulrajah, A. (2018). Failure of riverbank protection structure and remedial approach: A case study in Suraburi province, Thailand. *Engineering Failure Analysis*, 91, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.040>
- Wang, L., Cuthbertson, A., Pender, G., & Zhong, D. (2019). Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs. *Water Resources Research*, 55(7), an <https://doi.org/10.1029/2018WR024413>
- Wardhana, P. N. (2015). Analisis Transpor Sedimen Sungai Opak dengan Menggunakan Program HEC-RAS 4.1.0. *Teknisia*, 20(1), 22–31. <https://journal.uui.ac.id/teknisia/article/view/3620>
- Yan, X., Duan, H., Yang, Q., Liu, T., Sun, Y., & Wang, X. (2022). Numerical assessments of bed morphological evolution in mountain river confluences under effects of hydro-morphological factors. *Hydrological Processes*, 36(2), e14488. <https://doi.org/10.1002/hyp.14488>
- Zainuddin, M. T. M., Irmanto, I., Nugroho, J., & Hatmoko, W. (2023). Pemodelan Sedimentasi Menggunakan HEC-RAS 6.1 untuk Menganalisis Perubahan Elevasi Dasar Sungai Tondano, Sulawesi Utara. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(1), 41–54. <https://doi.org/10.32679/jth.v14i1.721>
- Zevri, A. (2020). Analisis Rencana Tinggi Tanggul Banjir DAS Bangkatan Sebagai Alternatif Pengendalian Banjir Kota Binjai. *Jurnal Sumber Daya Air*, 16(2), 63–76. <https://doi.org/10.32679/jsda.v16i2.613>
- Zuhri, M. I. S., Sisinggih, D., & Asmaranto, R. (2023). Analisis Angkutan Sedimen Sungai Welang Pasuruan Menggunakan Aplikasi HEC-RAS. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 3(1), 57–66. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2023.003.01.06>