



HIDRODINAMIKA DAN PRODUK SEDIMEN TERHADAP BENDUNG IRIGASI KEUMALA, SUNGAI KRUENG BARO, PROVINSI ACEH

HYDRODYNAMICS AND SEDIMENT PRODUCTS TOWARD KEUMALA IRRIGATION WEIR, IN KRUENG BARO RIVER, ACEH PROVINCE

Oleh:

Azmeri¹⁾✉, Hairul Basri²⁾, Devi Sundry¹⁾, Yusni Eva Cus Endang¹⁾, Faris Zahran Jemi³⁾

¹⁾ Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7
Darussalam - Banda Aceh 23111, Indonesia

²⁾ Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala, Jl. Hasan Krueng Kalee No. 3
Darussalam - Banda Aceh 23111, Indonesia

³⁾ Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7
Darussalam - Banda Aceh 23111, Indonesia

Korespondensi Penulis, email: ✉ azmeri@unsyiah.ac.id,

Naskah ini diterima pada 08 Januari 2020; revisi pada 26 Mei 2020;
disetujui untuk dipublikasikan pada 09 Juni 2020

ABSTRACT

Keumala Dam is built on Krueng Baro River which is one of the strategic rivers in Aceh Province to irrigates the farmland and supplies drinking water for the community downstream. However, this river has a considerable issues due to its long path and passing through various geological formations, causing a high concentration of sediments in the river. Therefore, this study aimed to analyze the river hydrodynamics employing the HEC-RAS 5.0 software. The results of the study revealed that the flow capacity of sediment transport along the riverbed varies directly with the difference between the shear stress at the bottom sediment and the critical shear stress allowed for moving particles. Sediment transport occurred in all sediment samples from the upstream and downstream of Keumala Dam. The flow reduction due to the damming changed the channel and flow regime, while the decrease in water release reduced the floating and bottom sediment transport to the the downstream. The total sediment around the weir area at the normal discharge is 6,325,698.93 tons/year. Sedimentation around the weir is a severe problem as it can affect the function and performance of the weir and irrigation channel. Siltation due to sedimentation also closed the intake of Keumala PDAM. Thus, periodical dredging and transporting sediments from the bottom of the weir are necessary to overcome this problem. Dredging and transporting sediments will improve the Keumala weir performance to irrigates the Krueng Baro Irrigation Area. Thus, the discharge capacity of othe weir intake can be maintained to irrigate the farmland following the planned area.

Keywords: irrigation, sediment yield, hydrodynamics, Krueng Baro River, HEC-RAS

ABSTRAK

Bendung Kumala dibangun di Sungai Krueng Baro yang merupakan salah satu sungai strategis di Provinsi Aceh untuk mengairi lahan irigasi dan air minum bagi masyarakat di hilirnya, namun sungai ini memiliki permasalahan yang cukup besar sehubungan dengan jalurnya yang panjang dan melewati berbagai formasi geologis. Kondisi ini menyebabkan konsentrasi sedimen yang tinggi pada sungai. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hidrodinamika sungai dengan menggunakan aplikasi HEC-RAS 5.0. Hasil penelitian memberikan informasi bahwa kapasitas aliran sedimen transport sepanjang dasar sungai bervariasi secara langsung dengan adanya perbedaan antara tegangan geser pada sedimen dasar dan tegangan geser kritis yang diizinkan untuk partikel yang bergerak. Semua sampel sedimen pada hulu dan hilir Bendung Keumala terjadi angkutan sedimen. Pengurangan aliran akibat adanya pembendungan menyebabkan perubahan pada saluran dan rezim alirannya, dan pengurangan pelepasan air telah menyebabkan terjadinya pengurangan angkutan sedimen melayang dan sedimen dasar ke arah hilir. Total sedimen yang terdapat di sekitar areal bendung pada saat debit normal sebesar 6.325.698,93 ton/tahun. Sedimentasi di sekitar bendung menjadi masalah yang serius karena dapat mempengaruhi fungsi dan kinerja bendung dan saluran irigasi. Selain itu pendangkalan akibat sedimentasi menyebabkan tertutupnya intake PDAM Keumala. Untuk mengatasi masalah ini, perlu dilakukan pengerukan dan pengangkutan sedimen dari dasar bendung secara berkala. Pengerukan dan pengangkutan sedimen akan meningkatkan kinerja Bendung Keumala untuk mengairi Daerah Irigasi Krueng Baro. Kapasitas pengaliran intake bendung dapat tetap terjaga untuk mengairi lahan irigasi sesuai dengan areal rencana.

Kata kunci: irigasi, produk sedimen, hidrodinamika, Sungai Krueng Baro, HEC-RAS

I. PENDAHULUAN

Semua sungai atau saluran yang mengangkut air mengandung sedimen dari hasil erosi. Meningkatnya erosi tanah karena degradasi Daerah Aliran Sungai (DAS) mengakibatkan pendangkalan di sungai (Onyando, Kisoyan, & Chemelil, 2005). McCully (2001) melaporkan bahwa sungai mengalirkan sedimen sebanyak air yang dialirkan. Ketika aliran berada lebih rendah dari kecepatan jatuh partikel sedimen, maka sedimen akan diendapkan. Proses pengangkutan dan pengendapan sedimen mengakibatkan terjadinya perubahan topografi dasar sungai (Zhang, Xu, Wang, & Peng, 2014).

Penumpukan sedimen secara bertahap mengakibatkan sungai kehilangan kemampuannya dalam pengalirannya dan menyebabkan volume yang berkurang di sungai (Kheder, Ahmed, Ghumman, Hashmi, & Ashraf, 2014). Sedimentasi pada sungai merupakan masalah besar yang mengandung sedimen besar (Depeweg & Méndez V, 2002; Omran & Jaber, 2017). Sementara itu sedimen yang diendapkan di sungai hanya dapat digelontor jika kapasitas transportasi aliran kanal meningkat. Sedimen yang diangkut melalui pembilasan harus dibuang pada kecepatan non-erosif di hilir (Ochiere, Onyando, & Kamau, 2015). Menurut Ochiere *et al.* (2015), kondisi ini merupakan masalah teknis paling banyak yang dihadapi sistem irigasi. Dengan demikian, diperlukan pengelolaan sedimen yang efektif di sungai menjadi semakin penting dari sudut pandang ekonomi, sosial dan lingkungan (International Sediment Initiative, 2011).

Kecepatan air di sungai akan berkurang akibat adanya sedimen, sehingga sedimen suspensi diendapkan. Selain itu ketika aliran memasuki bendung atau reservoir, kecepatan aliran dan energi berkurang yang menyebabkan sedimen terendapkan. Sebagai salah satu bangunan air, bendung dapat menaikkan elevasi muka air sungai yang bertujuan untuk memenuhi berbagai kebutuhan dihilirnya (Azmeri, Hadihardaja, Shaskia, & Admaja, 2017). Sedimen kasar biasanya diendapkan di awal bendung atau reservoir, sedangkan partikel halus diendapkan dalam arah aliran air di bendung atau reservoir (Mohammad, Al-Ansari, Issa, & Knutsson, 2016; Mohammad *et al.* 2016).

Sungai Krueng Baro merupakan salah satu sungai strategis di Indonesia yang merupakan sumber air untuk mengairi 11.950 ha lahan irigasi dan juga memenuhi kebutuhan air minum bagi masyarakat di hilirnya. Namun, Sungai Krueng Baro memiliki permasalahan yang cukup besar sehubungan

dengan jalurnya yang panjang. Selain itu, alur sungai juga melewati berbagai formasi geologis yang menghasilkan konsentrasi sedimen yang tinggi akibat erosi dari lapisan dasar dan dinding sungai. Akumulasi sedimen yang terjadi telah mengurangi kinerja saluran irigasi pada Daerah Irigasi Krueng Baro.

Untuk itu, penelitian dilakukan dalam bentuk studi kasus untuk menganalisis hidrodinamika produk sedimen pada Bendung Keumala. Penelitian dilakukan melalui analisis hidrodinamika menggunakan program HEC-RAS 5.0. Kalibrasi terhadap hasil simulasi model dilakukan dengan survei hidrometri di Sungai Krueng Baro untuk selanjutnya dilakukan analisis produk sedimen (*bed load* dan *suspended load*). Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk analisis hidrodinamika sedimen pada bendung yang terletak pada aliran sungai yang memiliki beban sedimen yang cukup besar. Selain itu, hasil penelitian diharapkan juga dapat memberikan informasi penanganan yang tepat terhadap sedimentasi yang terjadi di Sungai Krueng Baro untuk operasional daerah irigasi yang dilayaninya.

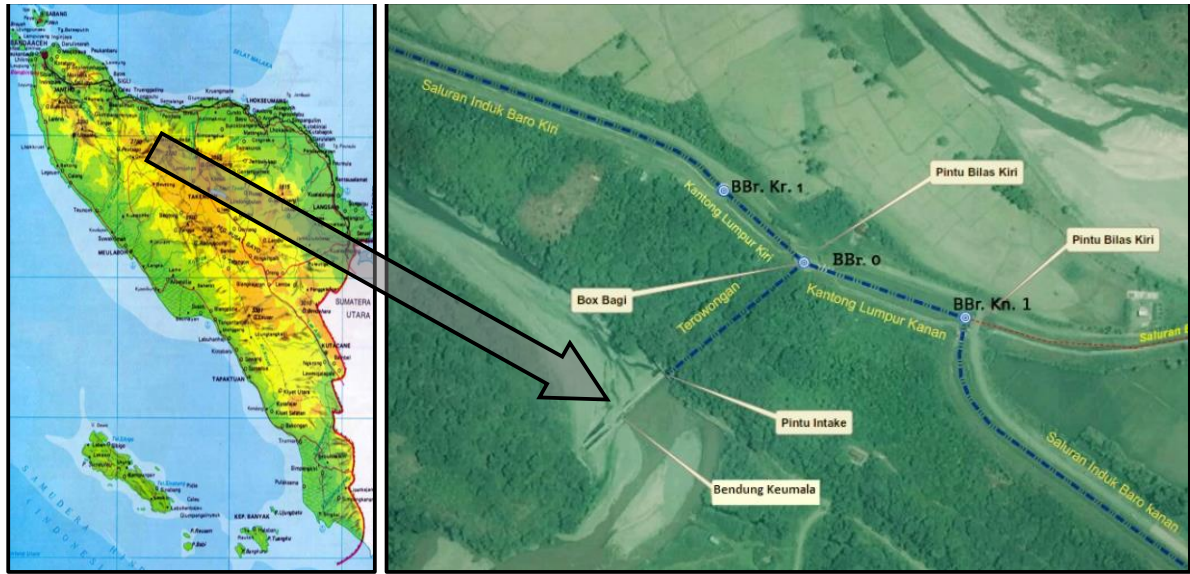
II. METODOLOGI

2.1. Lokasi Studi

Daerah Irigasi (DI) Krueng Baro merupakan daerah irigasi teknis yang terletak pada Kecamatan Keumala, Kabupaten Pidie, Aceh. Daerah irigasi ini melayani areal irigasi seluas 11.950 ha (Azmeri, Yulianur, Zahрати, & Faudli, 2019). Sumber air utamanya berasal dari Sungai Krueng Baro, tepatnya pada koordinat 5°13'10.2" LU and 95° 51'38.8" BT (Gambar 1). Lokasi penelitian tepatnya dari hulu sampai hilir Bendung Keumala dengan panjang sungai tinjauan 1 kilometer.

2.2. Analisis Hidrodinamika

Analisis hidrodinamika diawali dengan survey hidrometri untuk mengukur debit sungai. Pengukuran debit dilakukan menggunakan *current meter* digital dengan diameter propeler 80 mm dan *pitch* 125 mm. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan pada pias melintang sungai yang juga merupakan lokasi pengambilan sampel sedimen. Hasil pengukuran ini digunakan sebagai kalibrasi pemodelan hidrodinamik. Hidrometri diawali melalui pengukuran lebar total sungai, selanjutnya dibagi antar pias dengan jarak 4 meter. Hasil pengukuran topografi sungai sebagai penampang melintang diperoleh dari Balai Wilayah Sungai Sumatera I (2017). Terdapat 20 titik pengukuran penampang melintang sungai dari hulu ke hilir (inisial KB-0 sampai KB-19).



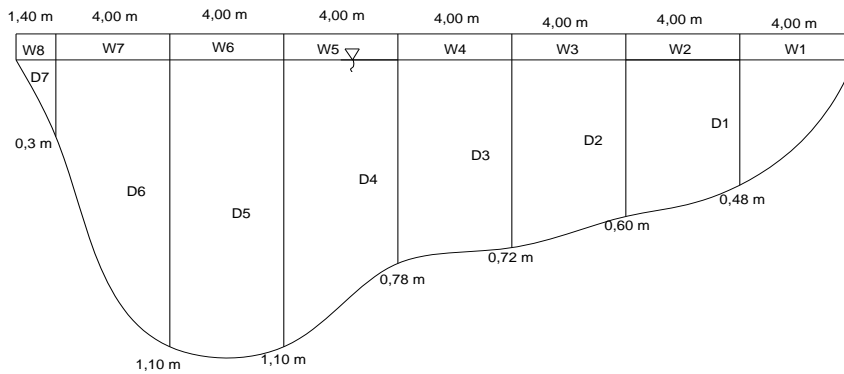
Gambar 1 Lokasi Studi (Bendung Keumala)



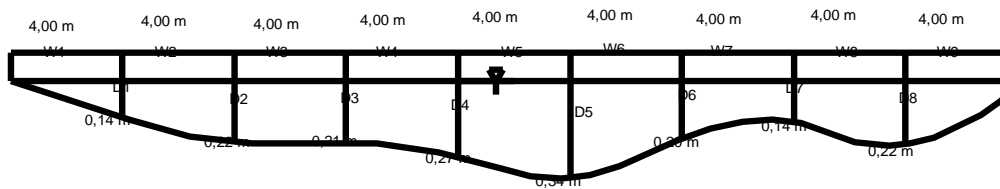
Gambar 2 Lokasi hidrometri di Hulu dan Hilir Bendung Keumala

Gambar 2 memperlihatkan lokasi hidrometri pada Sungai Krueng Baru pada titik KB-0 (hulu) dan KB-18 (hilir). Selanjutnya, berdasarkan hasil hidrometri debit aliran sungai dihitung menggunakan metode tampang tengah (*mid method*) seperti pada Gambar 3 dan Gambar 4. Aliran sungai mengalirkan debit yang sangat bervariasi dalam ruang dan waktu dengan membawa muatan sedimen. Adanya variasi pada aliran sungai sepanjang tahun menyebabkan para peneliti mulai berpikir untuk menentukan debit

yang mewakili karakteristik aliran sungai. Pada akhirnya beberapa peneliti mengusulkan debit rata-rata sebagai nilai yang mewakili debit sepanjang tahun (Garde & Rangga Raju, 2000). Pada penelitian ini, debit aliran yang diperoleh dari pengukuran hidrometri hanya pada bulan Mei dinilai tidak mewakili debit aliran sepanjang tahun. Oleh karena itu pemodelan hidrodinamik dilakukan untuk mengidentifikasi debit rata-rata yang kemudian akan digunakan untuk menganalisis debit sedimen dasar.



Gambar 3 Posisi Hidrometri pada Hulu Bendung Keumala (KB-0)



Gambar 4 Posisi Hidrometri pada Hilir Bendung Keumala (KB-18)

Analisis hidrodinamika menggunakan software HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centre-the River Analysis System*) dari US Army Corps of Engineers. Software 1 dimensi ini dapat menganalisis data hidraulika di sungai (Brunner, 2010), diantaranya simulasi aliran tunak dan tidak tunak, kualitas air, dan transport sedimen. Pada sedimen transport HEC-RAS dapat mensimulasikan perubahan dasar sungai dalam waktu yang cukup panjang baik yang disebabkan oleh gerusan atau deposisi.

Program HEC-RAS 5.0 menggunakan pengaturan data geometri terdiri dari layout permodelan disertai penampang melintang (*cross section*) untuk model sungai. Profil muka air dari satu penampang ke penampang berikutnya menggunakan persamaan energi dengan prosedur iterasi sebagai berikut:

$$y_2 + z_2 + \frac{a_2 v_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{a_1 v_1^2}{2g} + h_e \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- y1 dan y2 = kedalaman air (m);
- z1 dan z2 = jarak dari garis referensi (m);
- a1 dan a2 = koefisien kecepatan (m/det);
- v1 dan v2 = kecepatan aliran (m/det);
- g = percepatan gravitasi (m/det²);
- he = tinggi kehilangan energi (m).

Sebelum digunakan dalam analisis lanjutan, model hidrodinamika dikalibrasi berdasarkan data yang didapatkan dari survey hidrometri. Kalibrasi dilakukan untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning (n) yang sesuai. Model

terkalibrasi kemudian digunakan untuk menghitung debit rerata dan kedalaman air untuk analisis sedimen.

2.3. Analisis Sedimen

Analisis sedimen diawali dengan pengambilan sampel sedimen. Sampel sedimen melayang diambil menggunakan botol sampel air (PONOT-BSA). Pengambilan sampel dilakukan dengan *Grab Sampler* pada 3 titik yaitu kanan, tengah, dan bagian kiri sungai. Prosedur pengambilan sedimen melayang dan sedimen dasar merujuk pada pedoman survei sedimentasi yang telah disusun oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (2009).

Pengujian sampel sedimen berupa uji berat jenis tanah (*specific gravity test*) dan analisis saringan (*grain size analysis*). Pengujian kecepatan jatuh partikel (*fall velocity*) untuk menghitung angkutan sedimen melayang di sungai. Masing-masing uji ini untuk mengetahui berat jenis dan sifat-sifat tanah. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala, sedangkan pengujian sampel *suspended load (total suspended solid, TSS)* dilakukan di Laboratorium Instrumentasi dan Analisis pada Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala, yang bertujuan untuk memperoleh konsentrasi sedimen dalam aliran sungai.

Analisis angkutan sedimen akan menilai tegangan geser (τ), angkutan sedimen dasar dan sedimen

melayang untuk kemudian digunakan dalam analisis dimensi untuk menentukan beberapa parameter tak berdimensi dan ditetapkan dalam bentuk diagram pergerakan awal/*incipient motion* (Breusers & Raudkivi, 1991). Melalui grafik *Shield* (Gambar 5), dengan angka Reynold (Re) dan diameter butiran (d), maka diperoleh nilai tegangan geser kritis (τ_c). Kriteria pergerakan sedimen dasar sungai dapat berbagai kondisi yaitu $\tau_0 < \tau_c$ berarti butiran sedimen dasar tidak bergerak, $\tau_0 = \tau_c$ berarti butiran sedimen dasar mulai akan bergerak; dan $\tau_0 > \tau_c$ dimaknai sebagai butiran sedimen dasar bergerak.

Metode Lane dan Kalinske digunakan untuk merumuskan distribusi konsentrasi muatan sedimen layang untuk setiap kedalaman aliran y dengan mengasumsikan bahwa pancaran energi hidraulik sama dengan pancaran energi sedimen. Pancaran energi tersebut dianggap konstan untuk setiap kedalaman aliran sehingga diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$q_{sw} = q \text{ Ca PL e}^{15 \frac{w}{D u^*}} \dots \dots \dots (2)$$

$$U^* = \sqrt{gds} \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

- q_{sw} = debit sedimen layang per satuan waktu (ton/hari);
- q = debit aliran (ft^3/s);
- Ca = konsentrasi sedimen layang (lb/gl);
- ω = kecepatan jatuh rata-rata sedimen untuk d_{50} atau d_{35} (in/s);
- a = titik referensi dari dasar $2d_{65}$ (in);
- D = kedalaman aliran (in);
- U^* = kecepatan geser (in/s);
- s = kemiringan dasar sungai;
- d = kedalaman sungai (in);
- PL = rasio rata-rata konsentrasi sedimen (Gambar 5); fungsi dari w/U^* dan $n/D^{1/6}$, dimana n adalah koefisien Manning.

Sedimen dasar merupakan partikel yang berat dan dengan mudah dapat mengendap. Pendekatan empirik Meyer-Peter Muller lebih unggul dibandingkan dengan persamaan-persamaan yang lainnya karena rentang data yang digunakan sangat besar (Sattar & Raslan, 2014). Menurut Marhendi & Ningsih (2018), besarnya sedimen dasar dapat dihitung menggunakan formula Meyer-Peter-Muler sebagai berikut:

$$\gamma x \left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} x R x S = 0,047 (\gamma_s - \gamma) d_{50} + 0,25 \rho^3 x q_b^{2/3} \quad (4)$$

$$K_r = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

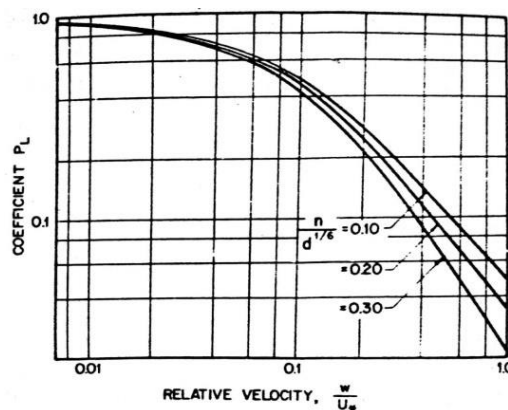
- d_{50} = diameter rata-rata sedimen (m);
- d_{90} = diameter sedimen persentase lolos 90% (m);
- ρ = massa jenis (kg/m^3);
- γ = berat jenis air (kg/m^3);
- q_b = laju angkutan sedimen dasar per satuan waktu dan lebar ($kg/s/m$);
- S_s = kemiringan dasar sungai;
- K_s = koefisien kekasaran dasar sungai;
- g = percepatan gravitasi (m/s^2); dan
- R = jari-jari hidraulik (m)

Sehingga debit sedimen dasar adalah sebagai berikut:

$$Q_b = q_b x B \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

- Q_b = debit sedimen dasar per satuan waktu (kg/s)
- B = lebar sungai (m)



Gambar 5 Hubungan Antara Faktor PL pada Metode Lane dan Kalinske (Simons & Şentürk, 1992)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Penyusunan dan Kalibrasi Model Hidrodinamik

Analisis hidrodinamika diawali dengan input data berupa data potongan memanjang dan melintang sungai, koefisien manning, penentuan posisi tanggul kiri dan tanggul kanan sungai, data debit rerata sungai dan debit dari pengukuran hidrometri sungai Krueng Baro (Gambar 6). Selanjutnya model HECRAS dijalankan untuk aliran tunak untuk memperoleh hasil analisis hidrodinamika berupa kedalaman aliran.

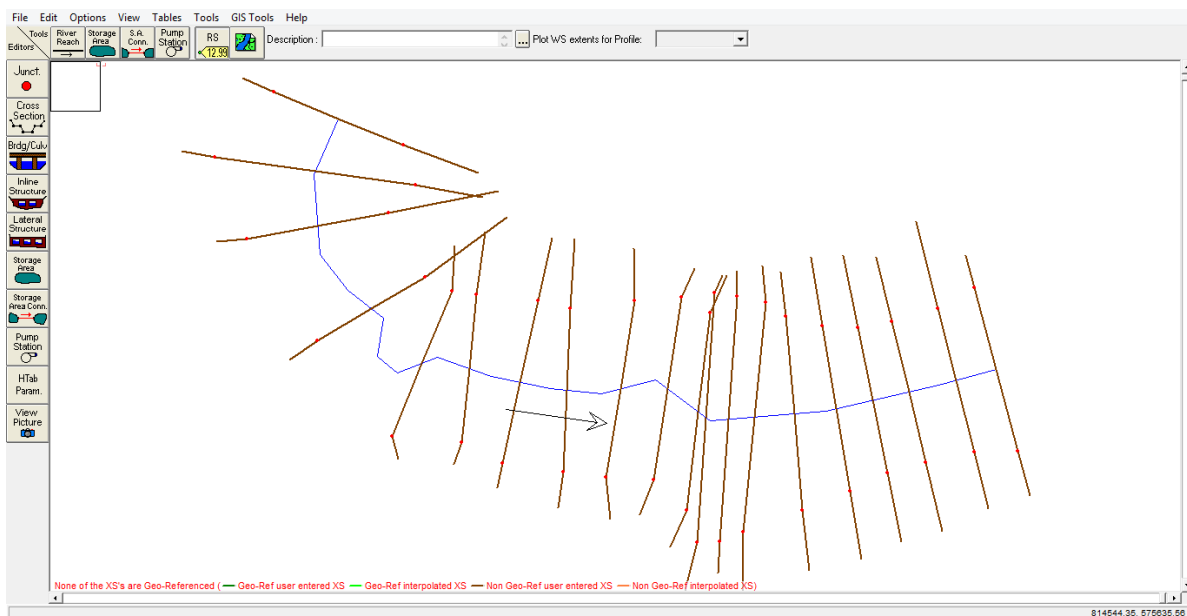
Koefisien manning merupakan parameter kalibrasi dalam pemodelan ini. Sesuai dengan penelitian (Hameed & Ali, 2013) kalibrasi dilakukan dengan memilih nilai koefisien kekasaran Manning (n) yang sesuai. Kesesuaian nilai antara model dan hidrometri dengan akurasi yang dapat dipercaya memberikan koefisien manning. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan pada bulan Mei di bagian hulu dan hilir Bendung Keumala. Berdasarkan pengukuran hidrometri diperoleh kecepatan aliran pada bagian hulu sebesar 0,97 m/s dan di bagian hilir sebesar 0,70 m/s. Selanjutnya berdasarkan kecepatan dan dimensi sungai terukur, diperoleh debit aliran sungai sebesar 20,74 m³/s. Analisis hidrodinamika dengan menggunakan HEC-RAS

pada penampang melintang KB-0 dilakukan input dengan data debit hidrometri. Gambar 7 merupakan contoh salah satu geometri penampang melintang Sungai Krueng Baro.

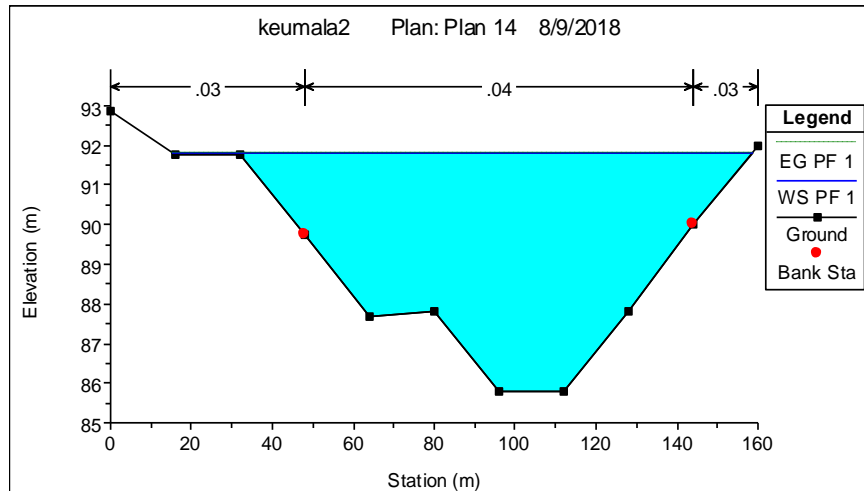
Model dijalankan hingga memperoleh kedalaman aliran yang sesuai dengan hasil survey hidrometri. Model ini dijalankan untuk persamaan aliran tunak menggunakan konsep keseimbangan energi aliran dengan ketinggian permukaan air yang diketahui di hilir sungai. Nilai awal n sepanjang sungai diambil sebesar 0,038 seperti yang direkomendasikan oleh Chow, Maidment, & Mays (1988) untuk sungai alami. Nilai kalibrasi terakhir dari n bernilai sebesar 0,04. Berdasarkan hasil *running model* diperoleh tinggi air sebesar 0,31 m (Gambar 8).

Informasi debit diperlukan dalam perhitungan laju sedimentasi. Menurut Mokonio, Mananoma, Tanudjaja, & Binilang (2013) proses sedimentasi dipengaruhi oleh debit aliran. Angkutan sedimen akan rendah pada saat debit rendah, demikian juga sebaliknya.

Setelah mendapatkan model yang akurat, model dijalankan dengan input koefisien manning 0,04 dan debit rerata sungai sebesar 12,99 m³/s. Hasil model HEC-RAS pada KB-0 diperoleh kedalaman air sebesar 0,29 m (Gambar 9), yang merupakan kedalaman air rata-rata pada Sungai Krueng Baro.



Gambar 6 Skematisasi Penampang Sungai Krueng Baro pada Model HEC-RAS



Gambar 7 Geometri Penampang Melintang Sungai Krueng Baro

File Type Options Help

River: Krueng Baro Profile: PF 1

Reach utama RS: 0 Plan: hidraulika

Plan: hidraulika Krueng Baro utama RS: 0 Profile: PF 1

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	91.61	Wt. n-Val.		0.040	
Vel Head (m)	0.16	Reach Len. (m)			
W.S. Elev (m)	91.45	Flow Area (m ²)		11.77	
Crit W.S. (m)	91.45	Area (m ²)		11.77	
E.G. Slope (m/m)	0.023507	Flow (m ³ /s)		20.74	
Q Total (m ³ /s)	20.74	Top Width (m)		37.48	
Top Width (m)	37.48	Avg. Vel. (m/s)		1.76	
Vel Total (m/s)	1.76	Hydr. Depth (m)		0.31	
Max Chl Dpth (m)	0.67	Conv. (m ³ /s)		135.3	
Conv. Total (m ³ /s)	135.3	Wetted Per. (m)		37.76	
Length Wtd. (m)		Shear (N/m ²)		71.85	
Min Ch El (m)	90.79	Stream Power (N/m s)	6695.25	0.00	0.00
Alpha	1.00	Cum Volume (1000 m ³)			
Frctn Loss (m)		Cum SA (1000 m ²)			
C & E Loss (m)					

Gambar 8 Data Output Model HEC-RAS (KB-0) dengan Input Debit Hidrometri

File Type Options Help

River: Krueng Baro Profile: PF 1

Reach utama RS: 0 Plan: hidraulika

Plan: hidraulika Krueng Baro utama RS: 0 Profile: PF 1

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	91.47	Wt. n-Val.		0.040	
Vel Head (m)	0.14	Reach Len. (m)			
W.S. Elev (m)	91.33	Flow Area (m ²)		7.73	
Crit W.S. (m)	91.33	Area (m ²)		7.73	
E.G. Slope (m/m)	0.023958	Flow (m ³ /s)		12.99	
Q Total (m ³ /s)	12.99	Top Width (m)		26.80	
Top Width (m)	26.80	Avg. Vel. (m/s)		1.68	
Vel Total (m/s)	1.68	Hydr. Depth (m)		0.29	
Max Chl Dpth (m)	0.54	Conv. (m ³ /s)		83.9	
Conv. Total (m ³ /s)	83.9	Wetted Per. (m)		27.03	
Length Wtd. (m)		Shear (N/m ²)		67.21	
Min Ch El (m)	90.79	Stream Power (N/m s)	6695.25	0.00	0.00
Alpha	1.00	Cum Volume (1000 m ³)			
Frctn Loss (m)		Cum SA (1000 m ²)			
C & E Loss (m)					

Gambar 9 Data Output dari Model HEC-RAS (KB-0) pada Input Debit Rerata

3.2. Analisis Karakteristik Sedimen

Sampel sedimen dari lokasi penelitian dan selanjutnya diuji di laboratorium yang memberikan informasi kerapatan massa dan ukuran butiran sedimen, seperti pada Tabel 1.

Berdasarkan hasil pengujian didapat informasi jenis tanah pada hulu Bendung Keumala berupa kerikil dengan massa jenis rata-rata sebesar 2,706 g/cm³ dan pada hilir Bendung Keumala berupa kerikil dengan massa jenis rata-rata sebesar 2,659 g/cm³. Ukuran butiran sedimen diperoleh melalui analisis saringan. Selanjutnya ukuran beberapa butiran (yaitu D35, D50, dan D90) diplot pada grafik berikut (Gambar 10).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada hulu dan hilir Bendung Keumala mengandung sedimen dengan rata-rata ukuran partikel sebesar 4,51 mm dan 9,25 mm.

3.3. Laju Angkutan Sedimen

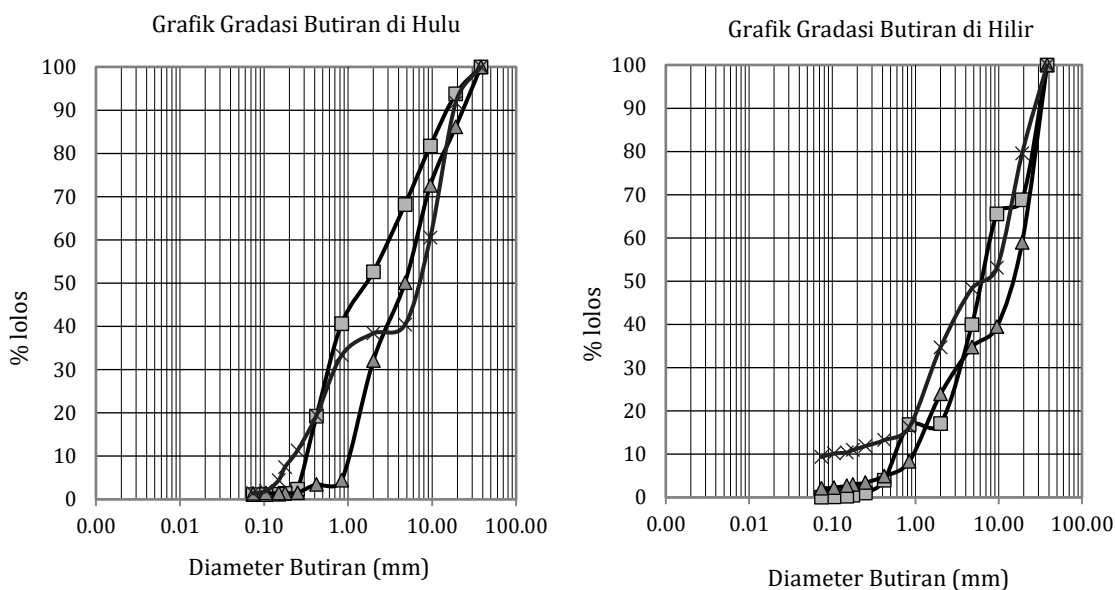
Berdasarkan grafik *Shield* maka Angka Reynold (Re) dan diameter butiran (d) pada nilai tegangan

geser kritis (τ_c) dapat diketahui. Bila tegangan geser dasar aliran berada diatas nilai kritiknya maka butiran sedimen bergerak (Tabel 2).

Berdasarkan tegangan geser, diperoleh informasi bahwa untuk semua sampel sedimen pada hulu dan hilir Bendung Keumala terjadi angkutan sedimen. Pendekatan DuBoys' dan Shield merupakan salah satu formulasi untuk menganalisis transportasi angkutan dasar (Bella, 2014). Dalam pendekatan tersebut, sedimen bergerak secara lapis per lapis (*series of layers*) dalam arah sejajar dasar sungai/saluran. Terdapat variasi kecepatan pada tiap lapis, dimana pada lapisan paling atas (permukaan dasar aliran) terjadi kecepatan maksimum, sedangkan pada lapisan paling bawah (pada kedalaman tertentu di bawah dasar) terjadi kecepatan minimum (mendekati nol). Berdasarkan konsep tegangan geser inilah kemudian terdapat formula-formula lain untuk memperkirakan angkutan sedimen dasar. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Ikhsan, Raharjo, Legono, & Kironoto (2016).

Tabel 1 Kerapatan Masa Sampel Sedimen Dasar

No	Sampel Sedimen	Nilai Kerapatan Massa γ_s (gr/cm ³)	Rata-rata (gr/cm ³)
1.	Sampel Sedimen Hulu 1	2,702	2,706
2.	Sampel Sedimen Hulu 2	2,676	
3.	Sampel Sedimen Hulu 3	2,741	
4.	Sampel Sedimen Hilir 1	2,689	2,659
5.	Sampel Sedimen Hilir 2	2,610	
6.	Sampel Sedimen Hilir 3	2,679	



Gambar 10 Gradasi Butiran di Hulu dan Hilir Bendung Keumala

3.4. Produk Sedimen layang

Berdasarkan pengujian sampel sedimen layang yang dilakukan pada Laboratorium Instrumentasi dan Analisis, diperoleh konsentrasi sedimen layang (C). Lokasi hulu Bendung Keumala mengandung konsentrasi sedimen layang rata-rata sebesar 5,06 mg/l dan pada hilir Bendung Keumala sebesar 4,83 mg/l. Selanjutnya besarnya angkutan sedimen layang menggunakan persamaan Lane dan Kalienske untuk masing-masing sampel yang telah dilakukan pengambilan di lapangan (Tabel 3).

Berdasarkan Tabel 3, sedimen melayang pada hulu lebih besar dibandingkan dengan lokasi di hilir. Hal ini disebabkan karena terdapatnya bangunan bendung yang menyebabkan terjadinya pengurangan kecepatan aliran pada hulu bendung. Kondisi ini memberikan potensi sedimen melayang tertahan di hulu bendung. Selain itu pengukuran kecepatan dan pengambilan sedimen dilakukan pada bulan Mei dimana kecepatan aliran yang lebih kecil dibandingkan bulan lainnya pada lokasi studi. Muatan sedimen merupakan fungsi dari debit aliran sungai. Muatan sedimen akan mengecil pada debit sungai yang kecil, demikian juga sebaliknya. Sebaliknya debit sungai dipengaruhi oleh adanya peningkatan muatan sedimen. Penumpukan sedimen dalam jumlah besar di dasar sungai umumnya dapat mengakibatkan

terjadinya penurunan debit sungai. Semakin tingginya akumulasi sedimen berpotensi mengurangi kapasitas tampung sungai bila terjadi pada saat musim hujan. Kondisi ini berpotensi banjir pada bagian hilir DAS. Hal ini sesuai dengan hasil studi Azinfar (2010) yang menyatakan bahwa daya dukung sedimen sungai berkurang karena penurunan gradien hidrolik dan energi yang menyebabkan sedimen diendapkan di hulu. Endapan sedimen memiliki efek serius pada efisiensi struktur air dalam mengendalikan debit yang mengalir di sepanjang sungai dan saluran air (Chen, 2015).

3.5. Produk Sedimen dasar

Muatan sedimen dasar (*bed load*) merupakan partikel kasar di sepanjang dasar sungai, yang diperlihatkan berupa gerakan partikel-partikel dasar sungai. Pergerakan partikel tersebut dapat bergeser, menggelinding, atau meloncat namun tidak terlepas dari dasar sungai. Terkadang gerakan tersebut berlangsung sampai jarak tertentu. Hal ini ditandai dengan bercampurnya butiran partikel tersebut ke arah hilir (Chen, 2015). Perhitungan angkutan sedimen dasar dengan menggunakan persamaan Meyer-Peter Muller. Angkutan sedimen dasar ini dihitung untuk masing-masing sampel yang telah dilakukan pengambilan di lapangan. Hasil angkutan sampel sedimen dasar didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.

Tabel 2 Rekapitulasi Nilai τ_0 dan τ_c

No	Sampel Sedimen	τ_0 (N/m ²)	τ_c (N/m ²)	Keterangan
1	Sampel Hulu 1	3,453	1,255	$\tau_0 > \tau_c$
2	Sampel Hulu 2	5,707	5,070	$\tau_0 > \tau_c$
3	Sampel Hulu 3	19,352	3,607	$\tau_0 > \tau_c$
4	Sampel Hilir 1	3,519	0,109	$\tau_0 > \tau_c$
5	Sampel Hilir 2	3,440	0,564	$\tau_0 > \tau_c$
6	Sampel Hilir 3	1,861	0,743	$\tau_0 > \tau_c$

Tabel 3 Angkutan Sampel Sedimen Layang (Qs)

No	Sampel Sedimen	Qs (ton/hari)	Qs rata-rata (ton/hari)
1	Sampel Hulu 1	6,32	26,11
2	Sampel Hulu 2	45,08	
3	Sampel Hulu 3	26,92	
4	Sampel Hilir 1	4,75	7,22
5	Sampel Hilir 2	11,82	
6	Sampel Hilir 3	5,09	

Tabel 4 Angkutan Sampel Sedimen Dasar (Qb)

No	Keterangan	Qb (ton/hari)	Qs rata-rata (ton/hari)
1	Sampel Hulu 1	90,58	465,99
2.	Sampel Hulu 2	702,95	
3	Sampel Hulu 3	604,46	
4	Sampel Hilir 1	82,55	162,67
5	Sampel Hilir 2	282,56	
6	Sampel Hilir 3	122,89	

Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa angkutan sedimen di hulu dan hilir bendung, pada proses pemisahan sedimen dasar terkait erat dengan kemiringan longitudinal. Tipe Bendung Keumala berupa bendung *Thyroll* dengan intake irigasi berupa *bottom outlet*. Dampak ini dinyatakan dalam variabilitas bentuk, tingkat dan intensitas proses pemisahan. Bendung Keumala dengan kemiringan longitudinal 1,2% memiliki tipe segregasi negatif. Untuk bendung ini, kecepatan aliran air yang tinggi, yang dihasilkan dari kemiringan konstruksi, menyebabkan peningkatan partikel halus dari bagian bendung bawah dan pengangkutannya ke sungai.

Adanya bendung mempengaruhi pola debit air dan debit sedimen. Debit air keluar dari bendung dapat lebih kecil atau sama dengan debit sungai semula, tetapi debit sedimen yang keluar dari bendung dapat dikatakan mendekati nol. Setiap perubahan aliran dan dimensi karena rekayasa akan merubah keseimbangan, karena akan memicu terjadinya gerusan dan pengendapan menuju ke kondisi sungai yang baru. Gerusan terjadi jika gaya gesek (*tractive force*) yang terjadi lebih besar dari *shear stress* yang diizinkan. Gerusan akan terus terjadi sampai *sediment transport capacity* tercapai. Ketika debit mengecil sedimen mulai dilepas dan mengendap di suatu tempat di hilir.

Posisi pengukuran hidrometri dan pengambilan sampel sedimen pada hulu Bendung Keumala dilakukan pada daerah setelah adanya belokan. Akibat dari belokan tersebut menyebabkan terjadinya tumpukan sedimen yang cukup besar pada posisi pengambilan sampel sedimen. Kedalaman aliran yang terdapat pada posisi pengambilan sampel sedimen 2 dan 3 adalah yang paling dalam sehingga kecepatan yang terjadi juga besar. Akibat dari kecepatan tersebut maka terjadilah gerusan pada tebing sisi kiri aliran sungai yang kemudian terbawa oleh aliran air dan menumpuk menjadi sedimentasi. Berdasarkan hasil perhitungan angkutan sedimen yang disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4, nilai angkutan sedimen untuk sampel sedimen hulu 2 dan hulu 3 lebih besar dari pada sampel sedimen hulu 1,

sedangkan pada hilir bentuk aliran sungai cenderung lurus, sehingga total angkutan sedimen lebih besar pada posisi tengah aliran sungai.

Mempertimbangkan hasil model HEC-RAS, pengamatan lapangan, dan pengukuran dapat disimpulkan bahwa di sebagian besar wilayah yang diteliti terutama di jangkauan Bendung Keumala, karena kemiringan rendah (1,2%) dan kecepatan aliran yang sangat rendah. Total sedimen yang terdapat di sekitar areal bendung pada saat debit normal sebesar 6.325.698,93 ton/tahun. Permasalahan sedimentasi di daerah sekitar tubuh bendung menjadi masalah yang serius karena sebagian dari sedimentasi yang ada dapat mempengaruhi fungsi dan kinerja bendung. Pendangkalan yang terjadi di hulu Bendung Keumala juga menjadi permasalahan yang serius bagi intake PDAM Keumala akibat tertutup sedimen. Analisis tingkat sedimentasi pada mulut intake ini diperlukan untuk keberlanjutan operasional PDAM.

3.6. Operasi dan Pemeliharaan Bendung untuk Irigasi

Masalah sedimentasi yang tinggi merupakan kendala yang dihadapi pengelola DI Krueng Baro. Tanpa pengelolaan yang tepat, maka endapan sedimen yang tinggi menyebabkan kerusakan bendung akibat desakan bangunan tanggul yang memicu terjadinya guling. Sedimentasi juga menyebabkan terjadinya pendangkalan sungai di sekitar bendung dan berpotensi terjadi luapan di kiri kanan sungai pada debit air tinggi. Selain itu sedimentasi pada dasar bendung mengakibatkan berkurangnya volume air efektif pada bendung. Selanjutnya akan mempengaruhi umur operasional bendung dan fasilitas-fasilitas irigasi di hilirnya. Volume sedimen mempengaruhi kinerja dan fungsi bangunan air tersebut, diantaranya pengoperasian pintu dan terganggunya kecepatan air yang menuju ke saluran irigasi.

Azmeri, Jemi, & Amalia (2019) menyatakan bahwa pada saluran primer Irigasi Baro Kanan Bendung Keumala terjadi sedimentasi yang cukup tinggi walaupun saluran tersusun dari pasangan batu,

selain itu disebutkan juga bahwa efisiensi pengendapan sedimen Bendung Keumala sebesar 75%. Pembatasan kecepatan di bangunan pengatur sampai $\pm 1,5$ m/s bermanfaat untuk mengurangi masuknya sedimen ke saluran. Ketelitian operasional intake saluran primer diperlukan untuk mendapatkan kecepatan yang sesuai. Penelitian ini juga melakukan evaluasi terhadap performa kantong lumpur, dan diindikasikan bahwa endapan sedimen tersebut akan terus tergerus ketika kantong lumpur dalam keadaan penuh. Hal ini mengakibatkan sedimen ikut terbawa bersama aliran ke saluran primer. Kondisi ini terjadi akibat operasional intake saluran primer yang kurang teliti. Beberapa parameter yang mempengaruhi efisiensi pengendapan kantong lumpur diantaranya kontrol proses sedimentasi dan jumlah deposit sedimen. Jumlah deposit sedimen tergantung dari karakteristik *inflow* sedimen (Nindito, Istiarto, & Kironoto, 2008).

Kondisi sedimentasi semakin diperparah karena berdasarkan (S. L. Azmeri, Rezkyana, & Jemi, in press) nilai sebaran erosi lahan di DAS Krueng Baro dengan menggunakan metode USLE sebesar 3,31 ton/ha/tahun sampai dengan 815,23 ton/ha/tahun. Menurut Arsyad (2012), secara empiris berdasarkan hubungan antara luas DAS dan *Sediment Delivery Ratio* (SDR), DAS Bendung Keumala seluas 21,075.43 ha menghasilkan SDR sebesar 11% ke arah Bendung Keumala. Namun ditinjau dari potensi sedimen, maka SDR yang terjadi lebih besar dari kondisi empirik.

Sedimen dengan jumlah yang besar pada hulu Bendung Keumala, menyebabkan potensi terjadinya akumulasi sedimen pada kantong lumpur karena terbawa melalui intake irigasi. Hal ini memberikan informasi bahwa sedimentasi lebih dari 6 juta ton/tahun di hulu bendung perlu dikelola dengan lebih baik, agar pengoperasian saluran irigasi menjadi lebih baik.

Untuk menanggulangi sedimentasi pada hulu Bendung Keumala, secara struktural perlu segera direncanakan bangunan pengendali sedimen di bagian hulu Bendung Keumala berupa *check dam* pada beberapa titik rentan akumulasi sedimen. Selain itu diperlukan upaya non struktural pengurangan laju sedimentasi pada Sungai Krueng Baro melalui pembenahan hulu DAS berupa reboisasi pada subDAS Beungga yang merupakan DAS paling rentan terjadinya erosi (S. L. Azmeri *et al.*, in press). Upaya ini perlu kerjasama dan komitmen berbagai pihak termasuk pemerintah pusat, pemerintah daerah dan masyarakat, karena DAS Krueng Baro merupakan DAS strategis nasional.

Selain upaya preventif di atas, diperlukan usaha-usaha dalam operasi dan pemeliharaan, agar jaringan irigasi yang telah dibangun dapat berfungsi dan memberikan pelayanan sebagaimana mestinya, untuk jangka waktu yang telah direncanakan. Berdasarkan kondisi sedimen yang tinggi pada hulu Bendung Keumala maka operasi dan pemeliharaan yang diperlukan adalah:

1. Operasi dan pemeliharaan di bendung dan pintu pengambilan irigasi

Dengan jumlah sedimen yang besar pada hulu Bendung Keumala, penting untuk segera dan rutin dilakukan pengerukan dan pengangkutan sedimen dari dasar bendung. Kegiatan ini perlu dianggarkan sebagai perawatan rutin dalam Angka Kebutuhan Nyata Operasi dan Pemeliharaan (AKNOP) Bendung Keumala setiap tahunnya. Selain pemeliharaan rutin, pengerukan dan pengangkutan sedimen di hulu Bendung Keumala juga perlu dianggarkan dalam pemeliharaan berkala setiap 2 tahun sampai dengan 5 tahun.

Apabila pelaksanaan pemeliharaan ini tidak dilakukan, maka akan memperpendek umur operasional bendung dan fasilitas-fasilitas irigasi dihilirnya. Pengerukan dan pengangkutan sedimen akan meningkatkan kinerja Bendung Keumala sebagai sumber air pada DI Krueng Baro. Kapasitas air pada bendung dapat tetap terjaga untuk mengairi lahan irigasi sesuai dengan areal rencana awal.

Setelah dilakukan kegiatan pemeliharaan rutin dan berkala terhadap sedimen di hulu Bendung Keumala, maka pengoperasian bendung dapat mengikuti peraturan yang berlaku. Pada musim kemarau atau debit normal, pintu pengambilan dapat dibuka untuk memperoleh debit pengambilan sesuai dengan kebutuhan rencana tanam. Umumnya kandungan endapan pada musim kemarau kecil dan debit normal. Cara pengoperasian bendung melalui pengaliran debit sisa dari intake yang dialirkan ke sungai.

Namun pada saat banjir dan tingginya kandungan sedimen di sungai, pintu pengambilan ditutup dan pengaliran air di saluran irigasi dihentikan. Pada saat banjir telah surut dan kandungan sedimen dalam air sesuai toleransi, maka pintu pengambilan dioperasikan kembali sesuai dengan keadaan pada saat debit normal. Endapan sedimen di hulu Bendung Keumala dalam jangka waktu tertentu harus dibilas.

2. Operasi dan pemeliharaan di kantong lumpur

Pada manual OP Bendung Keumala, telah ditetapkan bahwa pengoperasian kantong lumpurnya berupa pengurasan berkala selama 7 hari. Menurut A. Azmeri, Jemi, *et al.* (2019) berdasarkan volume kantong lumpur eksisting, kapasitas kantong lumpur lebih kecil dibandingkan dengan akumulasi sedimen yang terendap selama 7 hari. Kondisi ini menyebabkan perlunya percepatan jangka waktu pembilasan menjadi setiap hari, agar terkontrolnya kapasitas kantong lumpur. Hal ini sesuai dengan penelitian Faqih & Azizi (2018) yang menyebutkan perlunya penjadwalan yang tepat untuk periode pembilasan, agar kantong lumpur dapat berfungsi dengan efektif dan efisien.

Pembilasan setiap hari merupakan pembilasan yang terus menerus. Pengoperasian tipe ini bahwa endapan pada kantong lumpur tidak dibiarkan mengendap, melainkan dikuras terus menerus melalui pintu penguras yang dipasang di ujung kantong lumpur. Oleh karena itu debit air yang masuk melalui pintu pengambilan harus lebih besar, sebanyak debit saluran (Q_s) ditambah debit pengurasan (Q_p) dari dasar. Namun operasi semacam ini dilakukan hanya pada saat banjir ketika kandungan endapan dalam air sungai cukup tinggi, sedangkan di musim kemarau dapat diadakan pengurasan berkala.

IV. KESIMPULAN

Model HEC-RAS telah menunjukkan kinerja yang baik pada Sungai Krueng Baro. Input nilai koefisien manning sebesar 0,04 dan data debit hidrometri sebesar 20,74 m³/s menghasilkan kedalaman aliran sebesar 0,31 m. Hal ini mendekati kedalaman air hasil survey hidrometri (0,30 m). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien manning 0,04 sudah sesuai untuk model Sungai Krueng Baro. Berdasarkan hasil model HEC-RAS, debit rerata Sungai Krueng Baro adalah sebesar 12,99 m³/s dengan kedalaman air sebesar 0,29 m.

Kapasitas aliran sediment transport sepanjang dasar Sungai Krueng Baro bervariasi secara langsung dengan adanya perbedaan antara tegangan geser pada sedimen dasar dan tegangan geser kritis yang diizinkan untuk partikel yang bergerak. Semua sampel sedimen pada hulu dan hilir Bendung Keumala menunjukkan terjadinya angkutan sedimen. Pengurangan aliran akibat adanya pembendungan menyebabkan perubahan pada morfologi sungainya, dan pengurangan pelepasan air telah menyebabkan terjadinya

pengurangan angkutan sedimen melayang dan sedimen dasar ke arah hilir. Total sedimen yang terdapat di sekitar areal bendung pada saat debit normal sebesar 6.325.698,93 ton/tahun.

Sedimentasi di daerah sekitar tubuh bendung menjadi masalah yang serius karena sebagian dari sedimentasi yang ada dapat mempengaruhi fungsi dan kinerja bendung. Dengan jumlah sedimen yang besar pada hulu Bendung Keumala, penting untuk segera dan rutin dilakukan pengerukan dan pengangkutan sedimen dari dasar bendung. Kegiatan ini dapat berupa pemeliharaan rutin secara tahunan dan berkala setiap 2 tahun sampai dengan 5 tahun. Tanpa pelaksanaan pemeliharaan ini, maka akan memperpendek umur operasional bendung dan fasilitas irigasi lainnya dihilir.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Syiah Kuala untuk dana yang diberikan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, S. (2012). *Konservasi Tanah dan Air*. (H. Siregar, Ed.) (2 ed.). Bogor, Indonesia: IPB Press.
- Azinfar, H. (2010, Februari). *Flow Resistance and Associated Backwater Effect Due to Spur Dikes in Open Channels* (Disertasi). Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada. Diperoleh dari <https://harvest.usask.ca/handle/10388/etd-03012010-130940>
- Azmeri, A., Jemi, F. Z., & Amalia, N. A. (2019). Evaluation of the settling basin of Keumala Weir, Krueng Baro River, Aceh, Indonesia. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 8(2), 95-105.
- Azmeri, Hadihardaja, I. K., Shaskia, N., & Admaja, K. S. (2017). Completion of potential conflicts of interest through optimization of Rukoh reservoir operation in Pidie District, Aceh Province, Indonesia (hlm. 100001). Dipresentasikan pada Proceedings of The 3rd International Conference on Construction and Building Engineering (ICONBUILD), Palembang, Indonesia. <https://doi.org/10.1063/1.5011611>
- Azmeri, S. L., Rezkyana, N., & Jemi, F. Z. (in press). GIS-USLE interphase modelling of soil erosion hazard for Krueng Baro Watershed in Indonesia. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*.
- Azmeri, Yulianur, A., Zahrati, U., & Faudli, I. (2019). Effects of irrigation performance on water balance: Krueng Baro Irrigation Scheme (Aceh-Indonesia) as a case study. *Journal of Water and Land Development*, 42(1), 12-20. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0040>

- Balai Wilayah Sungai Sumatera I. (2017). *Penyusunan Penilaian Kinerja dan AKNOP Jaringan Irigasi Kewenangan Pemerintah Pusat (D.I. Krueng Baro)* (Laporan akhir). Aceh, Indonesia: Balai Wilayah Sungai Sumatera I.
- Bella, R. (2014). Analisis perhitungan muatan sedimen (bed load) pada Muara Sungai Lilin Kabupaten Musi –Banyuasin. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2(1), 125–130.
- Breusers, H. N. C., & Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring: Hydraulic Structures Design Manual Series* (Vol. 2). Rotterdam, Holland: Balkema.
- Brunner, G. W. (2010). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. California, USA: US Army Corps of Engineers.
- Chen, S.-H. (2015). *Hydraulic Structures*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47331-3>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Depeweg, H., & Méndez V, N. (2002). Sediment transport applications in irrigation canals. *Irrigation and Drainage*, 51(2), 167–179. <https://doi.org/10.1002/ird.49>
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. (2009). *Pedoman Konstruksi dan Bangunan Sipil Survei dan Monitoring Sedimentasi Waduk*. Jakarta, Indonesia: Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Departemen Pekerjaan Umum.
- Faqih, N., & Azizi, F. N. (2018). Pengaruh Interval Pembilasan terhadap Efektivitas Kantong Lumpur Bendung Slinga Kabupaten Purbalingga. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Fisika FITK UNSIQ* (Vol. 1). Wonosobo, Indonesia.
- Garde, R. J., & Rangga Raju, K. G. (2000). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems* (3rd ed). New Delhi, India: New Age International.
- Hameed, L. K., & Ali, S. T. (2013). Estimating of Manning's Roughness Coefficient for Hilla River through calibration using HEC-RAS model. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 159(701), 1–10. <https://doi.org/10.12816/0000543>
- Ikhsan, C., Raharjo, A. P., Legono, D., & Kironoto, B. A. (2016). Efek tegangan geser dasar yang terjadi pada lapisan pelindung terhadap karakteristik kemiringan dasar saluran. *Jurnal Teknik Sipil*, 23(3), 197–202. <https://doi.org/10.5614/jts.2016.23.3.4>
- International Sediment Initiative. (2011). *Sediment Issues & Sediment Management in Large River Basins Interim Case Study Synthesis Report*. Beijing, China: UNESCO & IRTCES.
- Kheder, K., Ahmed, A., Ghumman, A. R., Hashmi, H. N., & Ashraf, M. (2014). Sediment transport investigations using three dimensional numerical modeling in a large canal: Marala Ravi Link Canal (Pakistan). *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(3), 1–13.
- Marhendi, T., & Ningsih, D. Iaras S. (2018). Prediksi peningkatan sedimentasi dengan metode angkutan sedimen (studi kasus sedimentasi di Waduk Mrica). *Techno*, 19(2), 87–94–94. <https://doi.org/10.30595/techno.v19i2.3006>
- McCully, P. (2001). *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*. London, UK: Zed Books. Diperoleh dari <https://www.internationalrivers.org/resources/silenced-rivers-the-ecology-and-politics-of-large-dams-4043>
- Mohammad, M. E., Al-Ansari, N., Issa, I. E., & Knutsson, S. (2016). Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 21(3), 235–244. <https://doi.org/10.1111/lre.12142>
- Mokonio, O., Mananoma, T., Tanudjaja, L., & Binilang, A. (2013). Analisis sedimentasi di muara Sungai Saluwangko di Desa Tounalet Kecamatan Kakas Kabupaten Minahasa. *Jurnal Sipil Statik*, 1(6), 452–458.
- Nindito, D. A., Istiarto, & Kironoto, B. A. (2008). Simulasi numeris tiga dimensi kantong lumpur Bendung Sapon. *Civil Engineering Forum Teknik Sipil*, 18(1), 712–724.
- Ochiero, H. O., Onyando, J. O., & Kamau, D. N. (2015). Simulation of sediment transport in the canal using the HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre–River Analysis System) in an underground canal in Southwest Kano Irrigation Scheme–Kenya. *International Journal of Engineering Science Invention*, 4(9), 15–31.
- Omran, Z. A., & Jaber, W. S. (2017). Simulation of sediment transport in Al- Hilla River in Iraq using the HEC-RAS Software. *Journal of Kerbala University*, 15(4), 8–18.
- Onyando, J. O., Kisoyan, P., & Chemelil, M. C. (2005). Estimation of potential soil erosion for River Perkerra Catchment in Kenya. *Water Resources Management*, 19(2), 133–143. <https://doi.org/10.1007/s11269-005-2706-5>
- Sattar, A. M. A., & Raslan, Y. M. (2014). Predicting morphological changes DS New Naga-Hammadi Barrage for extreme Nile flood flows: A Monte Carlo analysis. *Journal of Advanced Research*, 5(1), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2012.12.004>

Simons, D. B., & Şentürk, F. (1992). *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics*. Colorado, USA: Water Resources Publication.

Zhang, W., Xu, Y., Wang, Y., & Peng, H. (2014). Modeling sediment transport and river bed evolution in river system. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(2), 175-179. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2014.V2.117>