



PEMODELAN POTENSI EROSI DAN SEDIMENTASI HULU DANAU LIMBOTO DENGAN WATEM/SEDEM

POTENTIAL EROSION AND SEDIMENTATION MODELING OF THE UPSTREAM LIMBOTO LAKE USING WATEM/SEDEM

Ardian Alfianto¹⁾* Shandy Cecilia²⁾ Banata Wachid Ridwan¹⁾

¹⁾ Balai Teknik Sabo, Jl. Sabo No. 1 Sopalán, Maguwoharjo, Depok, Sleman, Yogyakarta, Indonesia 55282

²⁾ Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsutacho, Midori Ward, Yokohama, Kanagawa 226-0026

*Corresponding Author: art.diean@gmail.com

Diterima: 17 Juni 2019; Direvisi: 15 Juli 2019; Disetujui: 27 Agustus 2020

ABSTRACT

Erosion and sedimentation caused 4,000-hectare siltation in Limboto. Experts predicted that Limboto will be extinct in 2031. Revitalization program 'Limboto Lake Revitalization' has been carried out since 2017, with sabo technology as the action carried out to restrain sedimentation rate and to save the lake from extinction. This study aims to measure erosion and sedimentation potential in upstream of Limboto including 12 rivers (sub-DAS), using WaTEM/SEDEM model. Two outputs resulted through this study are total sedimentation potential and identification of sedimentation zoning on each river. Based on soil type and other triggering factors, 5 of 20 rivers have the biggest sedimentation potential to deliver to Limboto, namely Batulayar 193.662 m³, Biyonga Baluta 123.095 m³, Alo1 120.273 m³, Alo 115.204 m³ and Molamahu 73.058 m³. The model was visually calibrated by considering the rivers' sedimentation volume collected by JICA and BWS Sulawesi II. The result shows different score depending on the soil type, slope, land cover and other parameters. Sabo dam has to be reviewed regularly and on-schedule, since its current data is not actual and upstream rivers have highly dynamic and fluctuative sediment as well.

Keywords: Erosion, sedimentation, WaTEM/SEDEM, Limboto Lake, revitalization

ABSTRAK

Akibat erosi dan sedimentasi, Danau Limboto mengalami pendangkalan mencapai 4.000 hektar sejak 1932. Para ahli memperkirakan Danau Limboto mungkin rata tanah pada tahun 2031. Program 'Revitalisasi Danau Limboto' telah dilakukan sejak 2017, salah satunya penerapan teknologi sabo yang diharapkan mampu menahan laju sedimentasi dan menyelamatkan danau. Kajian ini dilakukan untuk menghitung potensi erosi dan sedimentasi hulu Danau Limboto yang terdiri dari 12 Sub-DAS, dengan model WaTEM/SEDEM. Studi menghasilkan 2 (dua) keluaran yaitu besar potensi sedimentasi total dan masing-masing Sub-DAS, serta identifikasi sedimen zonasi sub-DAS. Berdasarkan parameter jenis tanah dan pemicu lain, 5 dari 20 Sub-DAS merupakan pembawa sedimen potensial terbesar ke Danau Limboto, yaitu Batulayar sebesar 193.662 m³, diikuti Biyonga Boluta yaitu 123.095 m³, Alo1 sebesar 120.273 m³, Alo sebesar 115.204 m³, dan Molamahu sebesar 73.058 m³. Hasil permodelan dikalibrasi visual dengan data sekunder, yaitu data sedimen sungai-sungai yang diperoleh dari JICA dan Balai Wilayah Sungai Sulawesi II. Hasil menunjukkan skor yang bervariasi tergantung jenis tanah, kemiringan tanah, tutupan lahan, serta parameter lainnya.

Kata kunci: Erosi, sedimentasi, WaTEM/SEDEM, Danau Limboto, revitalisasi

PENDAHULUAN

Danau Limboto sebagai muara 23 sungai, berperan mengendalikan banjir, sebagai penyedia air baku, habitat flora fauna, sarana transportasi, rekreasi dan olahraga (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, melalui Publikasi PUPR (2017), menyatakan Danau Limboto sebagai salah satu danau kritis dengan pendangkalan yang cukup besar, serta harus segera dilakukan revitalisasi.

Pendangkalan dasar danau yang berasal dari erosi serta sedimentasi, disebabkan oleh usaha budidaya serta kegiatan penebangan pohon dari hutan di hulu DAS Limboto. Hutan ini seharusnya bertindak sebagai daerah tangkapan air (Kementerian Lingkungan Hidup, 2015). Terhitung tahun 1991, penyempitan danau telah mencapai hampir 4.000 hektar, dari luas awal 7.000 hektar menjadi 3.644,5 hektar, dan semakin menyusut di 2017 dimana luas danau hanya mencapai 2,639 hektar (Umar dkk., 2018).

Menurut Bennet dalam Hakim (2015), berdasarkan proses terjadinya erosi tanah dan proses sedimentasi, maka proses terjadinya sedimentasi dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu:

- 1 Proses sedimentasi secara geologis, yaitu proses erosi tanah dan sedimentasi yang berjalan secara normal atau berlangsung secara geologi.
- 2 Proses sedimentasi dipercepat, yaitu proses terjadinya sedimentasi yang menyimpang dari proses secara geologi dan berlangsung dalam waktu yang cepat, bersifat merusak atau merugikan dan dapat mengganggu keseimbangan alam atau kelestarian lingkungan hidup. Kejadian tersebut biasanya disebabkan oleh kegiatan manusia dalam mengolah tanah. Cara mengolah tanah yang salah dapat menyebabkan erosi tanah dan sedimentasi yang tinggi.

Namun, dalam permasalahan sedimentasi, jenis angkutan sedimen biasanya didominasi sedimen suspensi dan sedimen dasar sedangkan angkutan sedimen lainnya akan terus terbawa aliran hingga ke muara sehingga tidak berkontribusi sebagai material penyebab sedimentasi (Singh dkk., 1996).

Pengelolaan komprehensif Danau Limboto membutuhkan identifikasi lokasi, volume erosi dan sedimen yang berpotensi menjadi sedimentasi. Danau Limboto terletak di Provinsi Gorontalo, di dua wilayah sekaligus yaitu Kabupaten Gorontalo dan Kota Gorontalo. Danau ini juga mencakup ke dalam 7 (tujuh) wilayah administrasi kecamatan dengan luas genangan mencapai 3.000 hektar

(Gambar 1). Menurut data sekunder dan survei lapangan, terdapat 9 (sembilan) sungai yang bermuara langsung ke danau, diantaranya Sungai Marisa, Pone, Biyonga Baluta, Talumelito, Tuladengi, Payunga, Pilolalenga dan Batulayar.

Kombinasi metode Sistem Informasi Geografi, data raster dan model WaTEM/SEDEM di DAS Rawapening, Jawa Tengah, (Alfianto dkk., 2016) dilakukan dengan tujuan serupa yakni analisis potensi erosi hulu danau. Studi di Sub-DAS Cirasea dan Citarum Hulu, Jawa Barat, (Hermawan dkk., 2016) dengan WaTEM/SEDEM dilakukan untuk evaluasi pengendalian sedimen berdasarkan analisis erosi lahan dengan pemodelan spasial. Data dikalibrasi dengan membandingkan sedimen export hasil model dengan data terukur debit sedimen Citarum pada pos Majalaya, sedangkan validasi diuji dengan parameter statistik koefisien efisiensi. Perbandingan antara kapasitas tampung cek dam dengan eksisting data erosi adalah evaluasi teknologi sabo dalam mengendalikan sedimen.

Daerah Aliran Sungai (DAS) Limboto merupakan bagian dari Satuan Wilayah Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (SWP-DAS) Bone-Bolango (Gambar 1). Danau Limboto merupakan muara dari banyak sungai (sub-DAS) yaitu Ritenga, Alo Puhu, Marisa, Meluopo, Biyonga, Bulot, Talubongo, Olilumayango, Ilopala, Huntu, Hutakiki dan Langigilo (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2015).

DAS Limboto mencapai 89.038 ha dengan Sub-DAS Batulayar, Sub-DAS Molamahu dan Sub-DAS Alo sebagai 3 (tiga) terluas dari 20 (dua puluh) bagian DAS yang bermuara ke badan air dengan luas masing-masing mencapai 15.028 ha, 12.766 ha dan 10.968 ha.

Tahun 2006 telah disusun Master Plan Pengelolaan Danau Limboto, hasil Kerjasama PSL Universitas Negeri Gorontalo, Balitbangpedalda Provinsi Gorontalo, dengan Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia. Untuk mengurangi pendangkalan waduk oleh sedimentasi yang berasal dari hulu, BWS Sulawesi II membangun 3 buah penangkap sedimen atau check dam di hulu DAS Danau Limboto.

Namun, *review* potensi erosi dan sedimentasi yang berasal dari hulu danau dengan WATEM/SEDEM belum pernah dilaksanakan oleh Balai Besar Wilayah Sungai Sulawesi II, sehingga kajian ini bertujuan untuk melakukan analisis terhadap potensi erosi dan sedimentasi yang berasal sepanjang hulu sampai hilir danau. Kajian ini juga bermaksud melakukan identifikasi zonasi sedimen yang mungkin menyebabkan pendangkalan di Danau Limboto.

Besarnya laju sedimentasi DAS Biyonga, yang dihitung menggunakan rumus USLE, dengan data lima tahun terakhir dari tahun 2012 sampai 2016, menghasilkan erosi sebesar 5.870.145,93 ton/ha/thn, serta menyumbang sedimentasi terbesar yaitu 1.402.507,01 ton/ha/thn (Moha dkk., 2020).

Kajian ini dilakukan dengan cara review atau menghitung ulang potensi erosi dan sedimentasi hulu Danau Limboto yang terdiri atas 12 Sub-DAS dengan bantuan metode WaTEM/SEDEM. Hal ini dilakukan karena hasil dan data yang ada dari BWS belum dilakukan analisis dengan perangkat lunak ini, sehingga hasilnya belum detail untuk setiap lokasi.

METODOLOGI

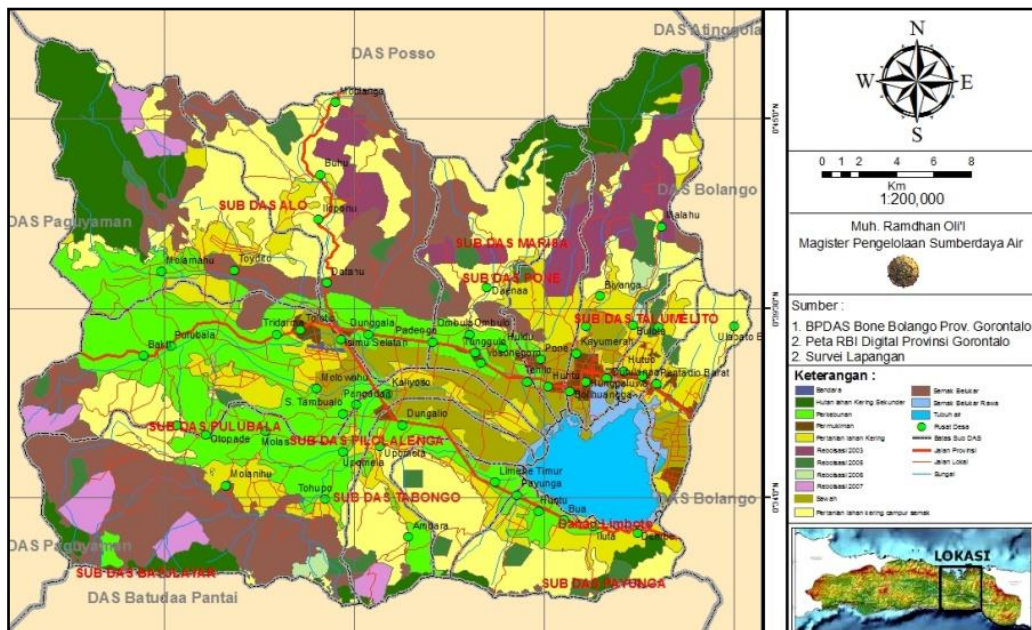
Penelitian ini menggunakan metodologi studi kasus, dengan pendekatan metode penelitian kuantitatif. Penelitian dilakukan dengan cara studi kasus tentang sedimentasi di danau limboto dengan analisis perangkat lunak WaTEM/SEDEM. Analisis ini dilakukan dengan cara mereview dan menghitung ulang untuk potensi sedimentasi yang berasal dari hulu danau Limboto. Review disini dilakukan terhadap potensi sedimentasi total serta identifikasi zonasi sedimen.

Penentuan Zonasi Sedimen

Identifikasi zona angkutan sedimen pada sungai di daerah vulkanik menurut Takahashi (2007) dibedakan menjadi 3 (tiga), yaitu: 1) daerah produksi sedimen, dengan kemiringan alur sungai $\geq 15^\circ$; 2) transportasi sedimen, dengan kemiringan alur sungai antara 10° dan 15° ; dan 3) sedimentasi/pengendapan sedimen $2^\circ \leq \theta < 10^\circ$. Yunita dan Gardiawan (2012), membagi daerah pengendalian aliran debris berdasarkan alur sungai menjadi 4 (empat) kategori berikut:

- 1 Daerah produksi dengan tingkat erosi sangat tinggi, terjadi pada lahan dengan kemiringan lebih dari 20° ;
- 2 Daerah produksi dan transportasi ada pada lereng $15^\circ < i < 20^\circ$, ditandai dengan pergerakan material dan erosi yang terjadi pada tingkat yang lebih rendah (aliran debris terjadi dan turun);
- 3 Pada lereng $10^\circ < i < 15^\circ$ atau daerah transport dan pengendapan, proses erosi dan pengendapan terjadi serta aliran debris mengendap;
- 4 Pengendapan boulders mulai terjadi serta aliran debris mengendap di daerah pengendapan dengan kelerengan $3^\circ < i < 10^\circ$. Daerah pengendapan dan perhentian terjadi pada kemiringan lahan kurang dari 3° dengan pengendapan material halus hingga aliran berhenti.

Data sekunder (Tabel 1) yang digunakan dalam kajian, diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai Sulawesi II.



Sumber: Oli'i, 2012
Gambar 1 Daerah Aliran Sungai Limboto

Tabel 1 Data sekunder terkait sungai-sungai di hulu Danau Limboto

Uraian	Jumlah	Tahun
A. Peta-Peta di DAS Limboto		
Peta Topografi DAS Limboto	1	2008
Peta Penggunaan Lahan DAS Limboto	1	2008
Peta Tanah DAS Limboto	1	2008
Peta Geomorfologi DAS Limboto	1	2008
Peta Erodibilitas DAS Limboto	1	2008
Peta Topografi dan Bathimetri Danau Limboto	1	2008
Peta Geologi	1	2010
Peta Master Plan Mitigasi Banjir Cekungan Limboto-Bone-Bolango	1	2010
Peta Rekomendasi Batas Daerah Sempadan Danau	1	2010
B. Data Teknis Perencanaan Sabo DAS Limboto		
Sungai Alo	3	2009
Sungai Ambara	1	2009
Sungai Bolangga	2	2009
Sungai Marisa	1	2009
Sungai Meluopo	1	2009
Sungai Molalahu	2	2009
Sungai Puhu	2	2009
Sungai Tololudu	1	2009
C. Data Hasil Pengukuran (Topografi)		
Bathimetri dan Debit Danau Limboto	1	2009
Laporan Survei dan Pengolahan Data Topografi dan Bathimetri	1	2009
Deskripsi BM dan CP	36	2009
Tabel Pengukuran	9	2009
D. Bahan Paparan/Presentasi		

Uraian	Jumlah	Tahun
Banjir Provinsi 2	1	2011
Danau Limboto	1	2011
Gubernur Bahan	1	2008
Isu Strategis Pengelolaan SDA Provinsi Gorontalo	1	2011
Konservasi Danau Limboto	1	2013
E. Laporan Perencanaan Konservasi Lingkungan Perairan Danau Limboto	1	2008
F. Laporan Perencanaan Bangunan Pengendali Sedimen DAS Limboto	1	2009
G. Laporan Detail Desain Bangunan Penangkap Sedimen Danau Limboto	1	2010
H. Laporan Perencanaan Sabuk Hijau Danau Limboto	1	2010
I. Laporan Model Fisik Danau Limboto	1	2015

Sumber: BWS Sumatra II

Model Perhitungan Erosi (WaTEM/SEDEM)

WaTEM/SEDEM digunakan untuk pemodelan erosi berbasis distribusi spasial. Model ini dikembangkan dengan rumus RUSLE (*Revised Universal Loss Equation*) untuk mensimulasikan kondisi lahan sehingga volume erosi dan hasil sedimen di DAS dapat diketahui.

$$A = R \times K \times Ls \times C \times P \dots\dots\dots(1)$$

Harian

$$R = 2.467Pd^2 \times 0.02727Pd + 0.72 \dots\dots\dots(2)$$

Bulanan

$$R = 6.199 \times P \times 1.21 \times HH - 0.47(Pmaks)^{0.53} \dots\dots\dots(3)$$

Tahunan

$$R = 237.4 + 2.61 \dots\dots\dots(4)$$

Perhitungan nilai K (Rumus RUSLE)

1 Metode Wischmeier dan Smith/USA Department of Agriculture (1978)

$$100K = 2.1 \times M1.14(10 - 4)(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \dots\dots\dots(5)$$

2 Metode Poesen dalam Notebaert et al (2009)

$$K = 0.0035 + 0.0038exp((\log Dg + 1.519) / 0.7584)^2 \dots\dots\dots(6)$$

$$Dg(mm) = e \sum f1.ln[(di + di + i)0.5] \dots\dots\dots(7)$$

Perhitungan nilai S (Rumus RUSLE)
 Metode Wischmeier dan Smith/Departemen Pertanian Amerika Serikat (1978)
 $S(i, j) = 65.41 \sin 2\theta_{i, j} + 4.56 \sin \theta_{i, j} + 0.065$ (8)
 A: Kehilangan Tanah/Erosi (Ton/Ha/Tahun)
 R: Erosivitas Hujan (MJ.mm/Ha.Tahun)
 K: Erodibilitas Tanah (Ton/HJ.mm)
 Ls: Faktor Kemiringan Dan Panjang Lereng
 L: Panjang Lereng
 S: Faktor S
 θ : Sudut Kemiringan Lereng
 C: Faktor Tanaman
 P: Faktor Pengolahan Lahan
 P_d: Curah Hujan Harian (mm)
 P: Curah Hujan Bulanan/Tahunan (mm)
 P_{maks}: Curah Hujan Harian Maksimum (mm)
 HH: Jumlah Hari Hujan
 M: Harkat Tekstur Tanah
 a: Persentase Kandungan Organik
 b: Harkat Struktur
 c: Harkat Permeabilitas Tanah
 Dg: Besar Butir Tanah Rata-Rata
 d: Besar Butir Tanah.

Perhitungan nilai TC (Rumus RUSLE)
 Metode Perkiraan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Kironoto dalam Tunas, 2008). Sedangkan nilai erodibilitas tanah menurut jenis tanahnya dapat kita lihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Erodibilitas tanah menurut jenis

Jenis Tanah	Erodibilitas Tanah
Latosol Coklat Kemerahan dan Litosol	0,43
Latosol Kuning Kemerahan dan Litosol	0,36
Komplek Mediteran dan Litosol	0,46
Latosol Kuning Kemerahan	0,56
Grumusol	0,20
Aluvial	0,47
Regosol	0,4

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan dalam Hardiyatmo 2006

Perhitungan hasil sedimen dimulai dengan menghitung sedimen *transport* (Notebaert dkk., 2006).

$$TC = Ktc \times R \times K(Ls - 4.12 \times Sg \times 0.8) \dots\dots\dots (9)$$

TC: *Transport* Sedimen
 Ktc: Koefisien *Transport*

Sg: Kemiringan Lereng Setempat
 R: Erosivitas Hujan (MJ.mm/Ha.Tahun)
 K: Erodibilitas Tanah (Ton/HJ.mm)
 Ls: Faktor Kemiringan Dan Panjang Lereng.
 Selanjutnya, pengendalian sedimen dilakukan dengan mengelola sejumlah sedimen dengan menampung, mengontrol dan menahan sedimen dengan *sabo dam* pada alur sungai sehingga sejumlah sedimen sisa dapat melewati titik kontrol dengan aman.
 $VT = VSE + VSF + VRS + VR \dots\dots\dots (10)$
 VT: Jumlah Potensi Sedimen Terangkut (m³)
 VSE: *Slope Erosion* (m³)
 VSF: *Slope Failure* (m³)
 VRS: *Riverbank Erosion* (m³)
 VRB: *Sediment Amount in Riverbed* (m³).

Sheng & Fang (2014) menyebutkan bahwa walaupun input data bersifat standar dan struktur model WaTEM/SEDEM mudah dipahami, model ini mampu mengukur aliran air dan erosi akibat pemanfaatan tanah secara bersamaan. Selain itu, model ini juga mampu mensimulasikan erosi tanah, tingkat deposisi sedimen, pola redistribusi tanah, serta menggabungkan struktur lansekap atau organisasi spasial yang terdiri dari unit lahan dan konektivitas yang berbeda. Penggabungan struktur lansekap kemudian dapat mendelineasi area sumber sedimen dalam konteks lansekap pertanian serta mensimulasikan dampak berbagai skenario dalam manajemen tangkapan terintegrasi, termasuk jika pelepasan dan erosi sedimen berubah pola dan kecepatan.

Di sisi lain, berdasarkan beberapa studi di Cina, WaTEM/SEDEM dinilai tidak mampu memprediksi transportasi sedimen pada sungai, erosi pinggir sungai atau deposisi sedimen di dataran banjir. Kajian tentang pemodelan erosi tanah di Republik Ceko (Jakubínský dkk., 2019) menyimpulkan bahwa walaupun WaTEM/SEDEM mudah dipahami oleh pengguna, data yang digunakan harus berkualitas tinggi dan sebaiknya di proses terlebih dahulu sebelum dipakai pada proses inti untuk menyesuaikan dengan format data yang dibutuhkan oleh perangkat. Sheng dan Fang, menyanggah kritik terkait ketidakmampuan WaTem/SEDEM dalam memprediksi sedimen sungai karena kesulitan mengakses data yang berkualitas tinggi, mengatakan bahwa dibutuhkan penelitian lanjutan terkait prospek penggunaan WaTEM/SEDEM di daerah yang memiliki keterbatasan data.

Tahap Persiapan
- Studi literatur dari jurnal, prosiding, buku, laporan, serta informasi lain terkait.
Tahap Pengumpulan Data
- Dilakukan pengumpulan data sekunder. Data berupa data curah hujan, data jenis tanah, data kemiringan lereng, data penggunaan lahan, dan lainnya.
Tahap pengolahan Data
- Menggunakan model WaTEM/SEDEM untuk menduga potensi erosi dan sedimentasi lokasi penelitian
- Pengolahan data dilakukan dengan melihat factor-faktor yang mempengaruhi besarnya erosi seperti nilai R, K, penetapan SDR, sehingga dapat diperoleh nilai perkiraan erosi total (A) dan SDR (Sediment Delivery Ratio) untuk dapat menghitung hasil besarnya sedimen yang berasal dari erosi (Y) dengan memasukkan kedalam model WaTEM/SEDEM.

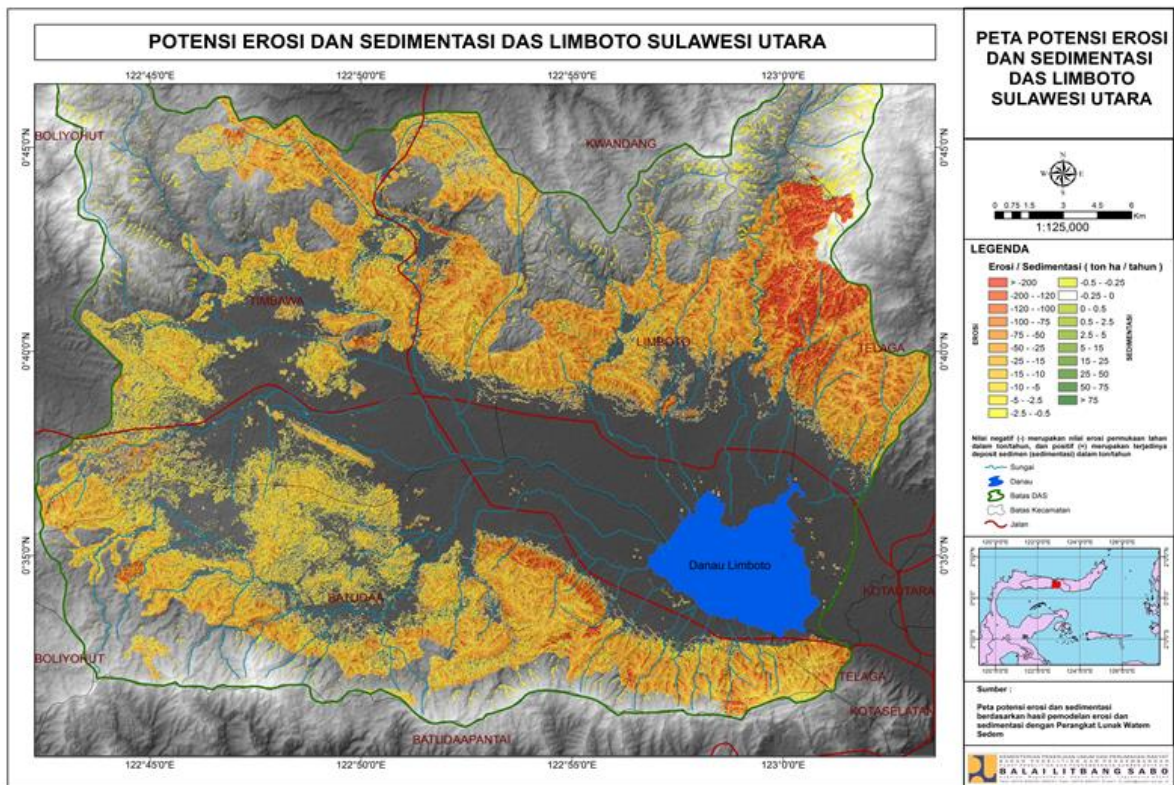
Gambar 2 Langkah kajian/penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan dalam penelitian ini akan dibahas dalam dua hal, yaitu potensi produksi sedimen Kawasan Danau Limboto dan zonasi sedimen.

Potensi Produksi Sedimen Kawasan Danau Limboto

Sungai Batulayar, Biyonga Boluta, serta Alo memiliki nilai potensi volume sedimen sasaran yang terbesar dibandingkan sungai lainnya. Sub-DAS Batulayar dibentuk oleh tutupan lahannya yang sebagian besar berupa semak-semak, memiliki kemiringan lereng lebih dari 45%, serta susunan batuan geologinya adalah batuan vulkanik, tektonik, karst, dan aluvial. Mayoritas Sub-DAS Biyonga Boluta ini terbentuk dengan kelas kemiringan lereng dominan yaitu di atas 45%, dengan batuan pembentuk yaitu batuan vulkanik dan aluvial. Sementara Sub-DAS Alo dibentuk dengan dominasi penutup lahan berupa semak-semak di daerah tengah, sedikit hutan di bagian hulu serta dominan sawah di bagian hilir. Batuan pembentuk Sub-DAS Alo didominasi oleh batuan gunungapi serta batu gamping. Untuk kemiringan lereng di bagian hulu didominasi oleh kelas lereng lebih dari 45%.



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 3 Hasil analisis WaTEM/SEDEM

Tabel 3 Estimasi potensi sedimen total per Sub-DAS Limboto yang mengalir pada *inlet*

No	Sub-DAS	Vd hitungan (m ³)	V Watem/Sedem (m ³)	Vd total (m ³)
1	Batulayar	147.567	46.095	193.662
2	Biyonga Boluta	70.049	53.046	123.095
3	Alo1	78.966	41.307	120.273
4	Alo	73.618	41.586	115.204
5	Molamahu	59.099	13.959	73.058
6	Marisa	37.133	19.942	57.075
7	Pulubala	40.778	12.668	53.446
8	Pone	24.626	15.628	40.254
9	Molamahu1	35.840	3.745	39.585
10	Pilolalenga	26.780	5.526	32.306
11	Talumelito	18.091	14.157	32.248
12	Pulubala2	28.713	2.553	31.266
13	Tuladengi	14.530	14.378	28.908
14	Pone1	11.679	15.626	27.305
15	Payunga	8.905	17.841	26.746
16	Biyonga Boluta1	14.010	11.885	25.895
17	Pilolalenga1	16.506	5.335	21.841
18	Tabongo	10.782	9.369	20.151
19	Pulubala1	8.329	9.413	17.742
20	Tabongo1	7.236	3.795	11.031

Sumber: Hasil Analisis

Urutan sub-DAS dengan hasil perhitungan awal potensi pembawa sedimen terbesar pada inlet menuju Danau Limboto yaitu: Batulayar sebesar 193.662 m³, Biyonga Bolutayaitu sebesar 123.095 m³, Alo1 sebesar 120.273 m³, Alo sebesar 115.204 m³, Molamahu sebesar 73.058 m³, Marisa sebesar 57.075 m³, Pulubala sebesar 53.445 m³, Pone sebesar 40.254 m³, Molamahu1 sebesar 39.585 m³, Pilolalenga sebesar 32.306 m³, Talumelito sebesar 32.247 m³, Pulubala2 sebesar 31.267 m³, Tuladengi sebesar 28.908 m³, Pone1 sebesar 27.306 m³, Payunga sebesar 26.746 m³, Biyonga boluta1 sebesar 25.895 m³, Pilolalenga1 sebesar 21.841 m³, Tabongo sebesar 20.151 m³, Pulubala1 sebesar 17.741 m³, serta Tabongo1 sebesar 11.031 m³. Lebih jelasnya bisa dilihat pada Tabel 3.

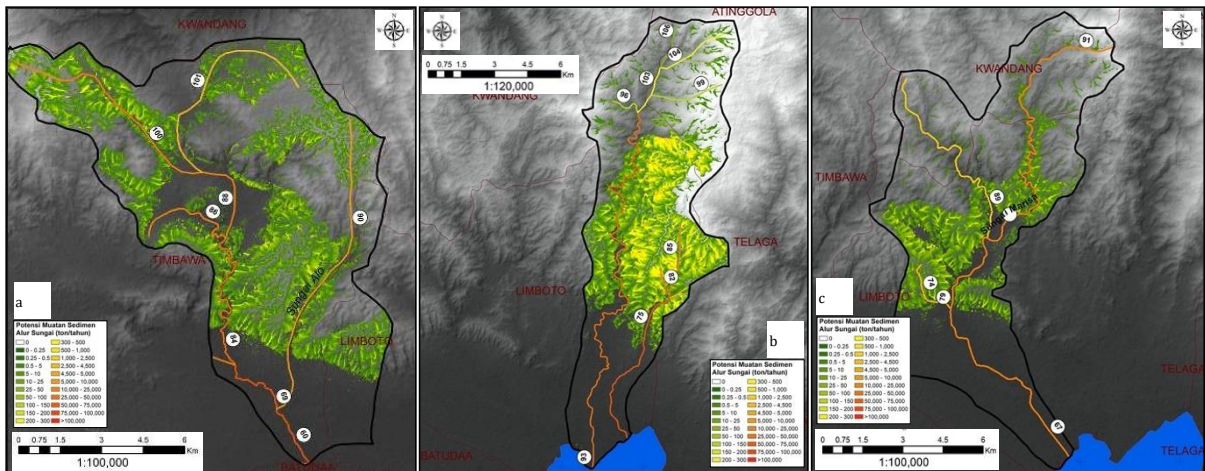
Perhitungan awal potensi sedimen (VSF pada Tabel 3) ditambah potensi aliran sedimen di ruas

sungai (VRB), potensi longsoran (VRS), dan potensi erosi dasar sungai (VSE) menghasilkan volume sedimen terangkut (VT pada table 4). Perhitungan volume sedimen terangkut dilakukan untuk 1 (satu) kali kejadian banjir dalam 1 (satu) tahun dan dilakukan pada periode ulang, yaitu 50 tahun dan pada setiap sabodam pada kedua puluh sungai di kawasan Danau Limboto. Data hujan yang digunakan dalam perhitungan volume sedimen terangkut menggunakan hasil analisis dari BWS Sulawesi II untuk berbagai periode ulang. Periode ulang yang digunakan dalam perencanaan sabo di kawasan Danau Limboto adalah 50 tahunan dengan asumsi bahwa setidaknya 1 kali dalam kurun waktu 50 tahun atau 1/50 kali setiap tahunnya, akan terjadi volume sedimen yang sama atau lebih besar dari nilai yang telah dihitung.

Tabel 4 Nilai volume sedimen terangkut (VT) masing-masing sungai di Kawasan Danau Limboto

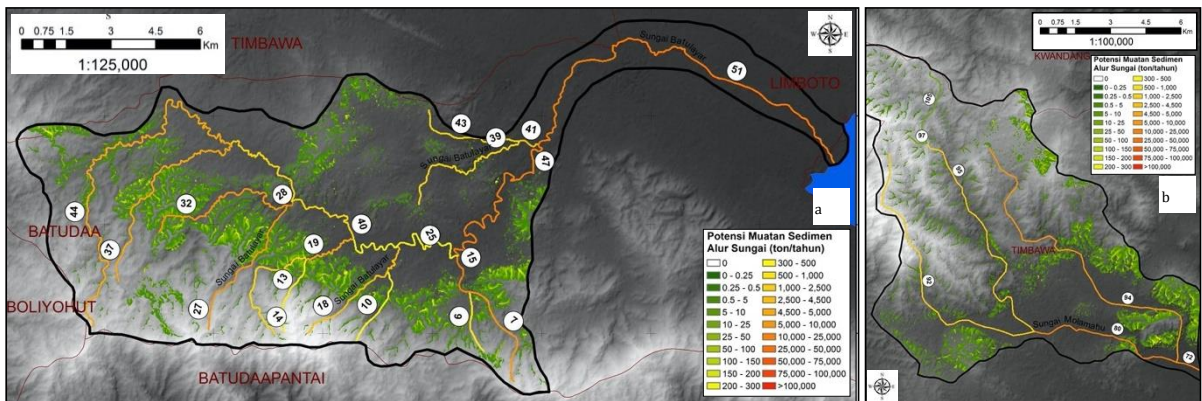
Sungai	Volume Sedimen Terangkut (m ³)	Sungai	Volume Sedimen Terangkut (m ³)
Alo	2.989.311	Pilolalenga1	6.941.057
Alo1	2.794.365	Pone	4.339.843
Batulayar	2.699.257	Pone1	5.687.244
Biyonga Boluta	3.307.456	Pulubala	3.320.308
Biyonga Boluta1	5.674.881	Pulubala1	6.996.444
Marisa	3.484.120	Pulubala2	4.113.984
Molamahu	3.391.470	Tabongo	5.364.176
Molamahu1	3.998.487	Tabongo1	6.778.902
Payunga	6.298.995	Talumelito	5.367.197
Pilolalenga	3.923.889	Tuladengi	5.316.255

Sumber: Hasil Analisis



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 4 Potensi erosi dan muatan sedimen Sub-DAS Alo (a), Biyonga Baluta (b) dan Marisa (c)



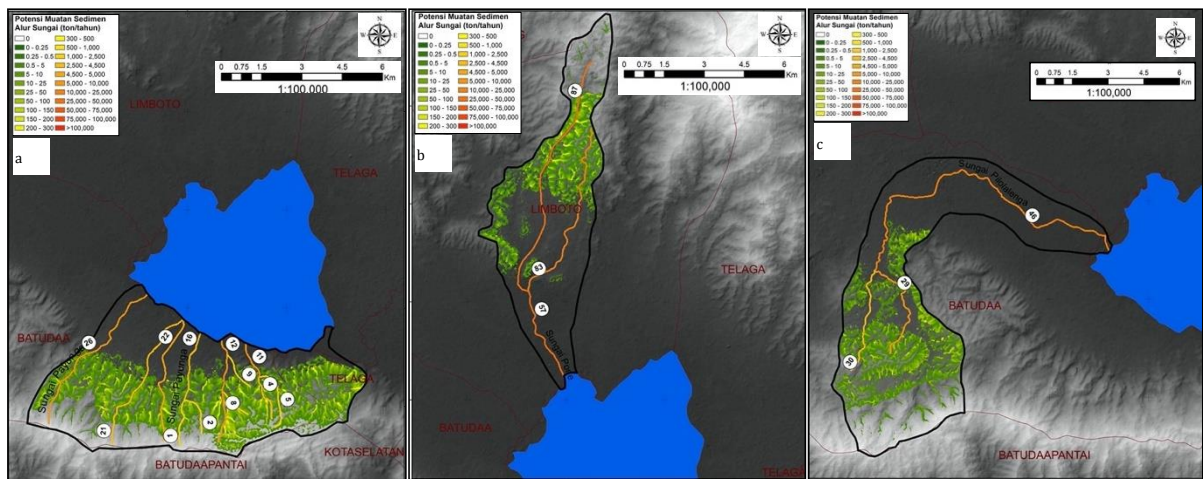
Sumber: Hasil Analisis

Gambar 5 Potensi erosi dan muatan sedimen Sub-DAS Batulayar (a) dan Molamahu (b)

Analisis WaTEM/SEDEM menunjukkan bahwa dari 10 (sepuluh) alur sungai dari Sub-DAS Alo, sedimen hasil erosi lahan yang berpotensi mengalir menuju Danau Limboto terbesar dialirkan oleh alur 100 yang mencapai 12,848 ton per tahun, diikuti dengan alur 86 sebesar 12 ton per tahun. Potensi sedimen hulu terbesar dimiliki oleh alur 60 dan 69 yang masing-masing mencapai 58,36 ton dan 51,014 ton per tahun. Sehingga alur 60 dan 69 pada Sub-DAS Alo bermuatan sedimen terbesar dan mengalirkan sekitar 58,448 ton dan 51,016 ton per tahun (Gambar 5). Pada Sub-DAS Biyonga Baluta dan Marisa, potensi sedimen yang terbawa akibat hasil erosi lahan yaitu alur 93 (33,038 ton) dan 75 (14,462 ton) serta alur 91 (10,412 ton) dan 79 (5,502 ton). Potensi sedimen dari hulu sungai serta yang keluar dari sungai paling banyak dibawa oleh alur 75 (52,374 ton) dan 76 (34,054 ton) Sub-DAS

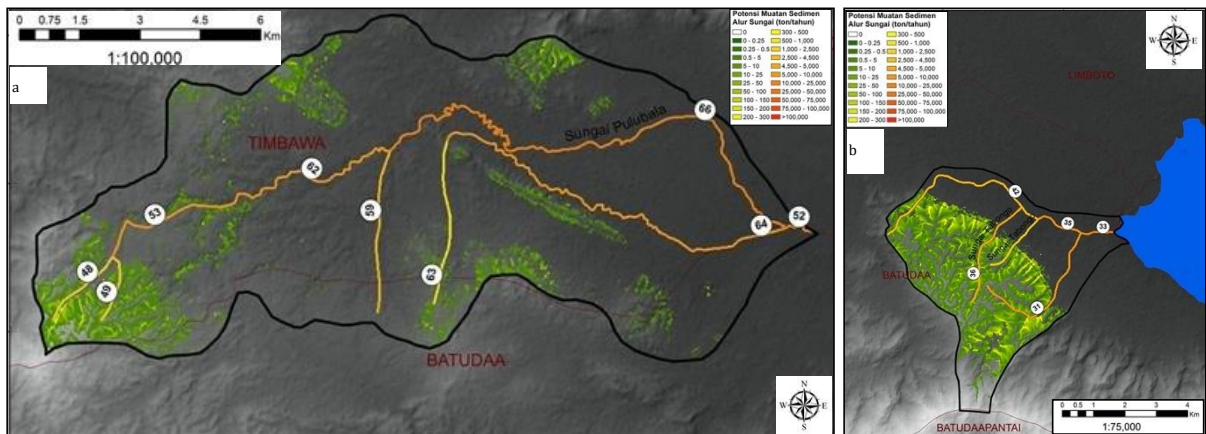
Biyonga Baluta serta alur 67 (20,663 ton) dan 79 (17,405 ton) Sub-DAS Marisa (Gambar 3).

Pada Sub-DAS Batulayar, dari 21 (dua puluh satu) anak sungai, alur 27 dan 32 berpotensi menghasilkan sedimen sebesar 6,979 ton dan 6,849 ton per tahun sebagai hasil erosi lahan. Sementara itu, alur 80 dan 94 pada Sub-DAS Molamahu merupakan anak sungai dengan potensi sedimen erosi lahan terbesar selama setahun, yaitu mencapai 11,403 ton dan 5,607 ton (Gambar 5a). Hasil analisis menunjukkan bahwa alur 51 dan 47 yang berpotensi mengalirkan sedimen sebesar 17,466 ton dan 17,449 ton per tahun dari Sub-DAS Batulayar ke danau. Dari 7 (tujuh) alur di Sub-DAS Molamahu (Gambar 5b), keluaran sedimen terbesar dibawa oleh alur 72 (21,311 ton per tahun) dan alur 80 (15,681 ton per tahun).



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 6 Potensi erosi dan muatan sedimen Sub-DAS Payunga (a), Pilolenga (b) dan Pone (c)



Sumber: Hasil Analisis

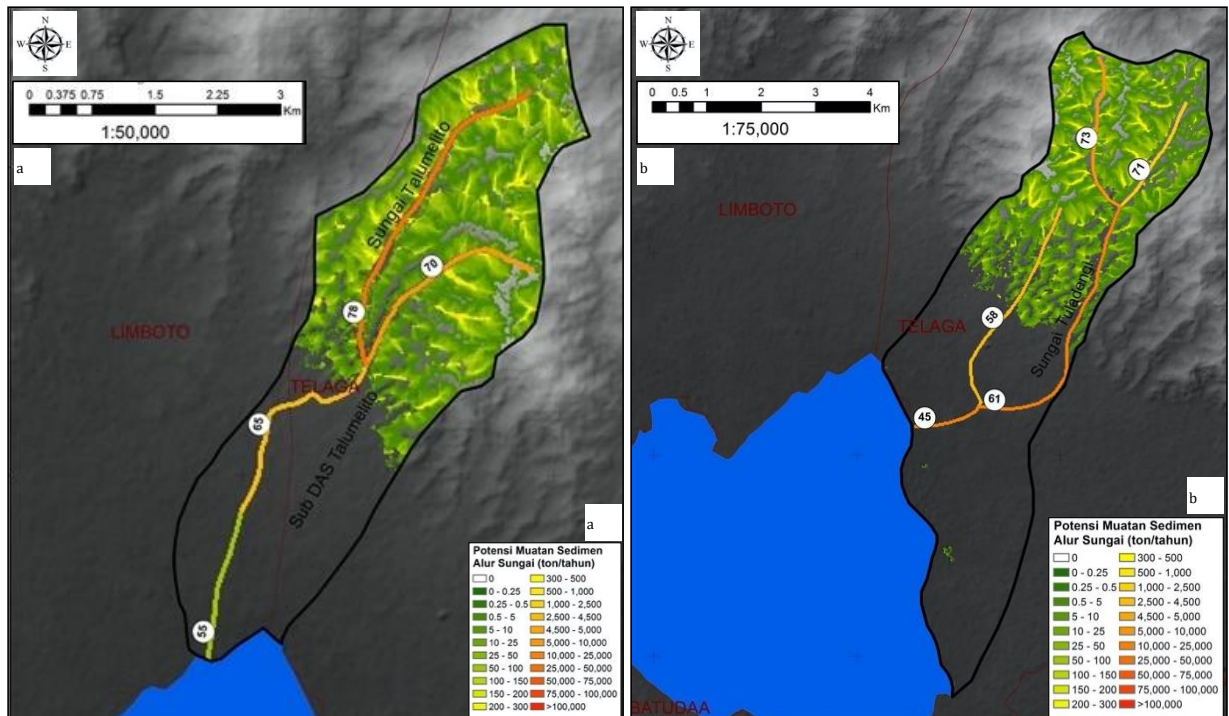
Gambar 7 Potensi erosi dan muatan sedimen Sub-DAS Pulubala (a) dan Tabongo (b)

Pada Sub-DAS Payunga, alur 8 dan 26 memiliki potensi sedimen dari hasil erosi lahan terbesar di antara 13 (tiga belas) alur yang ada di Sub-DAS ini yang mencapai 6,313 ton dan 5,156 ton per tahun. Sedimen input dari Sub-DAS paling banyak dialirkan oleh alur 12 dan 11 dengan muatan mencapai 7,387 ton dan 4,810 ton per tahun. Dari Sub-DAS Pilolalenga dan Pone, hasil erosi lahan yang berpotensi menjadi sedimen danau paling banyak dibawa oleh alur 29 (9,919 ton) dan 30 (4,218 ton) serta alur 87 (25,272 ton) dan 83 (16,138 ton) dalam setahun. Masukan sedimen terbesar pada masing-masing Sub-DAS secara berurutan adalah alur 11 (7,387 ton) dan 12 (4,810 ton), alur 46 (14,137 ton) dan alur 57 (41,410 ton). Dengan demikian, alur 12 (7,404 ton) dan 8 (6,313 ton), alur 46 (14,644 ton) dan 29 (9,919 ton) dan alur 57 (41,413 ton) dan 87 (25,272 ton) berpotensi membawa sedimen terbanyak keluar dari Sub-DAS Payunga, Pilolalenga dan Pone secara berurutan (Gambar 6).

Sebanyak 9 (sembilan) alur termasuk ke dalam Sub-DAS Pulubala dan 6 (enam) alur ke Sub-DAS Tabongo, dengan alur 52 (12,817 ton) dan 66 (12,817 ton) serta alur 33 (12,415 ton) dan 31

(6,911 ton) berpotensi membawa sedimen terbanyak keluar dari sungai. Potensi sedimen dari hulu sungai terbesar ke Sub-DAS Pulubala dan Tabongo masing-masing dialirkan melalui alur 66 (20,752 ton) dan 52 (12,468 ton) serta alur 33 (12,411 ton) dan 35 (5,501 ton) per tahun. Sementara masukan sedimen dari hasil erosi lahan terbanyak dibawa oleh alur 64 (7,417 ton) dan 53 (5,495 ton) serta alur 31 (6,911 ton) dan 36 (4,557 ton) di Sub-DAS Pulubala dan Tabongo secara berurutan (Gambar 7).

Alur 78 (27,930 ton) dan 70 (5,372 ton) serta alur 45 (16,378 ton) dan 61 (11,455 ton) memiliki potensi sedimen terbesar, di antara 3 alur dan 5 alur, yang mengalir keluar dari Sub-DAS Talumelito dan Tuladengi secara berturut-turut. Potensi sedimen hasil erosi lahan terbesar dialirkan oleh alur 78 (18,410 ton) dan 70 (5,372 ton) di Sub-DAS Talumelito dan alur 73 (6,037 ton) dan 61 (4,212 ton) di Sub-DAS Tuladengi. Sementara potensi sedimen *input* dari hulu sungai di Sub-DAS Taluemelito paling banyak dialirkan oleh alur 78 (9,521 ton), di Sub-DAS Tuladengi oleh alur 45 (14,480 ton) dan 61 (11,455 ton) selama setahun.



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 8 Potensi erosi dan muatan sedimen Sub-DAS Talumelito (a) dan Tuladengi (b)

Setelah analisis pemodelan selesai, dilakukan kalibrasi hasil pemodelan erosi dari WaTEM/SEDEM dengan membandingkan hasil pemodelan (*Sediment Production*) dengan data pengukuran sedimentasi pada danau. Data hasil pengukuran sedimentasi pada waduk yang digunakan dalam proses kalibrasi model, diperoleh berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan oleh JICA tahun 2002. Berdasarkan hasil JICA didapatkan rata-rata volume sedimentasi dari Danau Limboto sebesar 10^6 sampai dengan 2×10^6 m³/tahun. Seluruh analisis potensi erosi dan sedimentasi dikalibrasikan dengan pengukuran sedimen selama musim kemarau dan musim hujan. Sebagai tambahan, verifikasi dilakukan melalui perbandingan antara data sekunder BWS Sulawesi II dengan hasil lapangan.

Proses kalibrasi pada model WaTEM/SEDEM adalah penyesuaian nilai *K_{Tc} High* dan *K_{Tc} Low* dengan syarat perbandingan *K_{Tc} High* dan *Low* adalah 1:3.333. Nilai *K_{Tc}* adalah nilai koefisien *Transport* Sedimen pada lahan yang diwakili dalam 1 piksel data spasial. Berdasarkan hasil model yang terdistribusi, kita dapat menentukan identifikasi *K_{Tc}* pada skala DAS dalam berbagai skala kondisi topografi. Faktor luas, faktor K, dan rasio luas lahan pertanian merupakan yang paling terpengaruh. Nilai *K_{Tc}* sebanding dengan luas, faktor K, serta peruntukan lahan pertanian.

Hasil pemodelan menghasilkan nilai potensi produksi sedimen Kawasan Danau Limboto sebesar 1.500.000 m³/tahun. Produksi sedimen mencapai 1.472.832 m³ dengan produksi deposisi mencapai 694.563 m³, ekspor sedimen mencapai 778.268 m³ dan ekspor sungai sebesar 388.735 m³.

Zonasi Angkutan Sedimen Sungai Inlet Danau Limboto

Sungai Alo memiliki zona transportasi yang lebih pendek dibandingkan dengan zona pengendapan dan keseluruhan alur sungai zona produksi. Panjang Sungai Alo di hulu sampai pada batas zona produksi adalah 4.445,8 m dengan lebar rata-rata 9 m, dan beda tinggi hulu dan hilir akhir zona produksi adalah 90,4 m. Panjang sungai pada zona transportasi sebesar 11.879,4 m, lebar rata-rata adalah 18 m, sedang beda tinggi 67,34 m. Sementara zona pengendapan mempunyai panjang 20.483,7 m, lebar rata-rata 18,5 m, dan beda tinggi 20,99 m. Selebihnya bisa dilihat pada Gambar 9 (a).

Sungai Biyonga Boluta memiliki zona transportasi yang lebih pendek dibandingkan

dengan zona pengendapan, apalagi bila dibandingkan dengan zona produksi (Gambar 9b). Zona produksi Sungai Biyonga Boluta memiliki panjang sungai 15.298,1 m, lebar sungai rata-rata 11 m, dan beda tinggi 344,5 m. Zona transportasi memiliki panjang sungai 1.900,5 m, lebar sungai rata-rata 32 m, beda tinggi 20,15 m. Zona pengendapan memiliki panjang sungai 10.271,71 m, lebar sungai rata-rata 30,5 m, dan beda tinggi 45 m.

Sungai Marisa memiliki 2 (dua) bangunan sabo yang direncanakan/eksisting, satu masuk dalam zona transportasi dan satu lagi masuk zona pengendapan. Zona produksi memiliki panjang sungai sebesar 9.618,74 m, lebar sungai rata-rata 6,5 m, dan beda tinggi 503,35 m. Zona transportasi memiliki panjang sungai 6.003,24 m, lebar sungai rata-rata 23,4 m, beda tinggi 71,06 m. Sementara zona pengendapan memiliki panjang sungai 8.334,93 m, lebar sungai rata-rata 10,4 m, serta beda tinggi 17,31 m (Gambar 9c).

Sungai Batulayar memiliki zona transportasi yang lebih pendek dibandingkan dengan zona pengendapan dan keseluruhan alur sungai. Zona produksi mempunyai panjang sungai sebesar 4.745,48 m, lebar rata-rata sungai 6 m, serta beda tinggi 326,36 m. Zona transportasi memiliki panjang sungai 26.305,42 m, lebar sungai rata-rata 29 m, serta beda tinggi 216,02 m. Sementara zona pengendapan memiliki panjang sungai 22.609,86 m, lebar sungai rata-rata 70 m, serta beda tinggi 48,08 m (Gambar 10a).

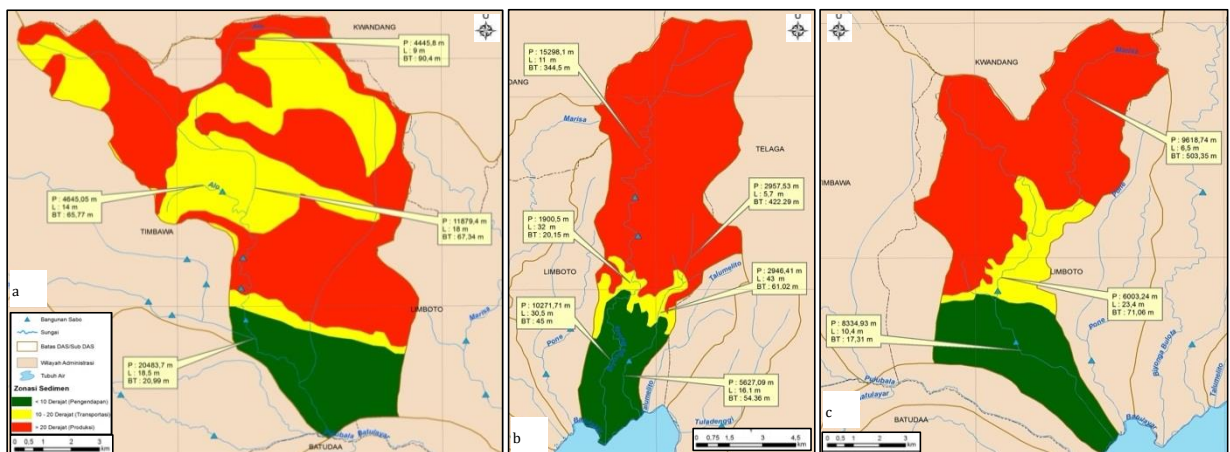
Sungai Molamahu (Gambar 10b) memiliki zona produksi sepanjang 14.647,2 m, lebar sungai rata-rata 12 m, beda tinggi 458,69 m. Zona transportasi memiliki panjang sungai 553,41 m, lebar sungai rata-rata 18 m, beda tinggi 19,05 m. Sementara zona pengendapan memiliki panjang sungai 10.494,63 m, lebar sungai rata-rata 25,8 m, serta beda tinggi 51,16 m.

Keseluruhan alur Sungai Payunga memiliki zona transportasi yang pendek, dibandingkan zona produksi dan zona pengendapan. Zona produksi memiliki panjang sungai 2.870,31 m, lebar sungai rata-rata sebesar 11,1 m, serta beda tinggi 495,01 m. Zona transportasi memiliki panjang sungai 664,39 m, lebar sungai rata-rata 7,1 m, serta beda tinggi sebesar 26,7 m. Sementara zona pengendapan memiliki panjang sungai 2.402,2 m, lebar sungai rata-rata 8,2 m, serta beda tinggi 39,89 m (Gambar 11a).

Tabel 5 Zonasi Angkutan Sedimen Sungai di DAS Limboto

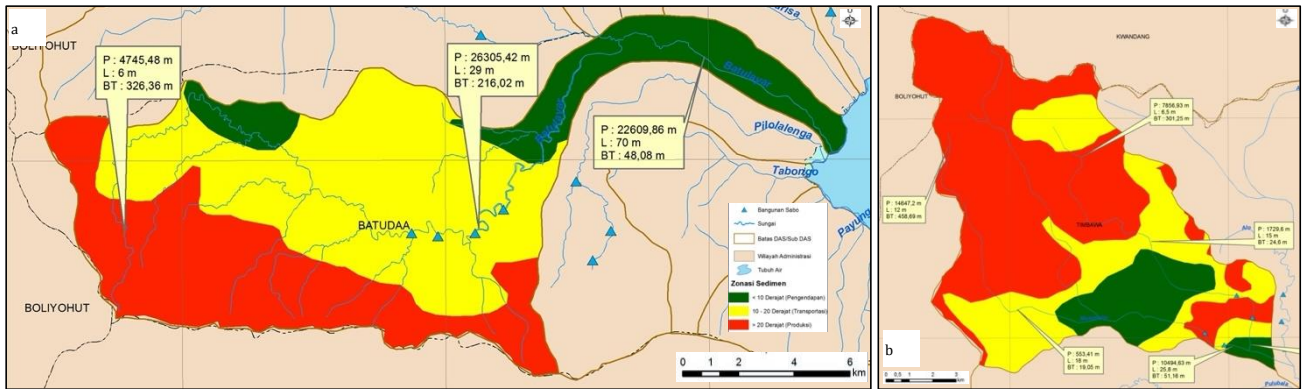
Sungai	Zona Produksi			Zona Transportasi			Zona Pengendapan		
	P (m)	L (m)	Beda tinggi (m)	P (m)	L (m)	Beda tinggi (m)	P (m)	L (m)	Beda tinggi (m)
Alo	4.445,8	9	90,4	11.879,4	18	67,34	20.483,7	18,5	20,99
Biyonga Baluta	15.298,1	11	344,5	1.900,5	32	20,15	10.271,71	30,5	45
Marisa	9.618,74	6,5	503,35	6.003,24	23,4	71,06	8.334,93	10,4	17,31
Batulayar	4.745,48	6	326,36	26.305,42	29	216,02	22.609,86	70	48,08
Molamahu	14.647,2	12	458,69	553,41	18	19,05	10.494,63	25,8	51,16
Payunga	2.870,31	11,1	495,01	664,39	7,1	26,7	2.402,2	8,2	39,89
Pilolalenga	1.649,5	7,8	192,47	1.906,54	4	36,85	14.297,34	10	69,86
Pone	3.915,62	5,9	182,61	1.597,8	12	55,63	8.558,8	14,7	75,65
Pulubala	1.928,09	6	151,4	7.519,08	7	120,33	17.737,9	10	52,24
Tabongo	1.746,85	7,6	97,04	-	-	-	6.878,98	4,4	47,37
Talumelito	2.435,13	4,8	107,3	1.927,41	20	73,53	4.252,09	22	73,61
Tuladengi	2.731,1	5	126	2.752,5	7	60,35	3.322,62	13	39,06

Sumber: Analisis, 2017



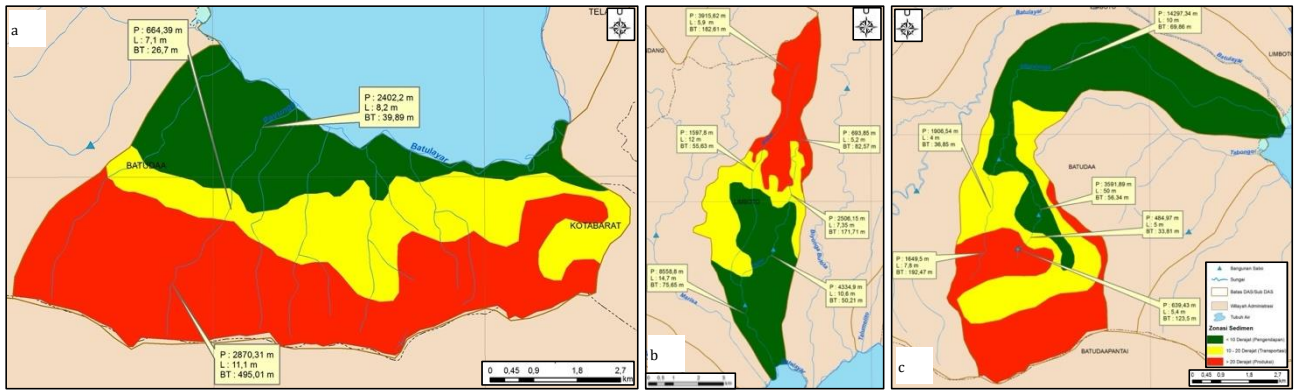
Sumber: Hasil Analisis

Gambar 9 Peta zonasi angkutan sedimen Sub-DAS Alo (a), Biyonga Baluta (b) dan Marisa (c)



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 10 Peta zonasi angkutan sedimen Sub-DAS Batulayar (a) dan Molamahu (b)



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 11 Peta zonasi angkutan sedimen Sub-DAS Payunga (a), Pilolalenga (b) dan Pone (c)

Zona produksi Sungai Pilolalenga (Gambar 11b) mempunyai panjang 1.649,5 m, lebar sungai rata-rata 7,8 m, beda tinggi 192,47 m, zona transportasi memiliki panjang sungai 1.906,54 m, lebar rata-rata sungai 4 m, serta beda tinggi 36,85 m, sedangkan zona pengendapan memiliki panjang sungai 14.297,34 m, lebar sungai rata-rata 10 m, beda tinggi 69,86 m.

Zona produksi Sungai Pone (Gambar 11c) memiliki panjang sungai 3.915,62 m, lebar sungai rata-rata 5,9 m, beda tinggi 182,61 m, zona transportasi panjang sungai 1.597,8 m, lebar sungai rata-rata 12 m, beda tinggi 55,63 m, zona pengendapan panjang sungai 8.558,8 m, lebar sungai rata-rata 14,7 m, beda tinggi 75,65 m.

Zona produksi Sungai Pulubala memiliki panjang 1.928,09 m, lebar sungai rata-rata 6 m, beda tinggi 151,4 m, zona transportasi memiliki panjang 7.519,08 m, lebar 7m, serta beda tinggi 120,33 m, sedangkan zona pengendapan memiliki panjang 17.737,9 m, lebar 10 m, beda tinggi 52,24 m. Sungai Pulubala1 pada zona pengendapan daerah hulu memiliki panjang sungai 156,33 m,

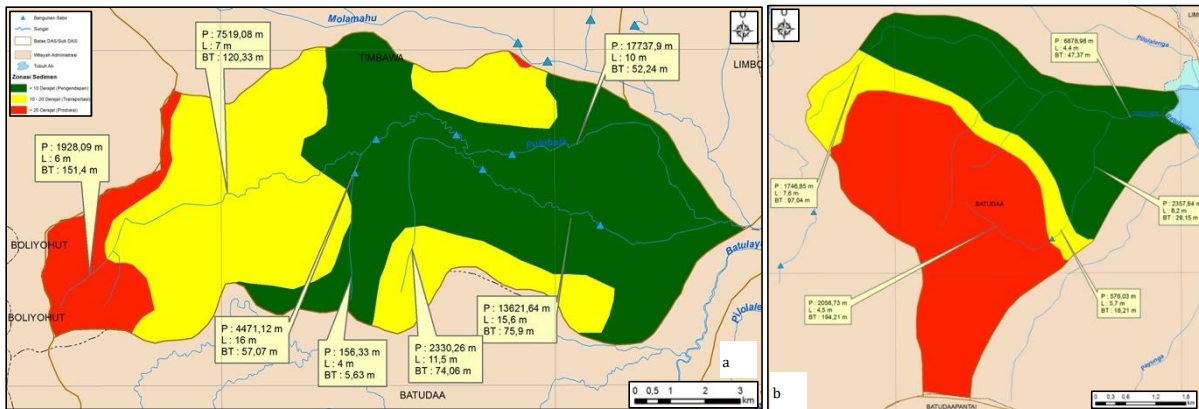
lebar rata-rata sungai 4 m, beda tinggi 5,63 m, di daerah hilir panjang sungai 4.471,12 m, lebar sungai rata-rata 16 m, beda tinggi 57,07 m. Sementara pada sungai Pulubala2 panjang sungai di daerah hulu/transportasi sebesar 2.330,26 m, lebar sungai 11,5 m, beda tinggi 74,06 m, daerah pengendapan/hilir memiliki panjang sungai 13.621,64 m, lebar rata-rata 15,6 m, beda tinggi 75,9 m (Gambar 12a).

Sungai Tabongo pada daerah hulu memiliki panjang sungai 1.746,85 m, lebar rata-rata 7,6 m, beda tinggi 97,04 m, daerah hilir/zona pengendapan memiliki panjang sungai 6.878,98 m, lebar rata-rata 4,4 m, beda tinggi 47,37 m. Sementara Sungai Tabongo1 pada zona produksi memiliki panjang sungai 2.056,73, lebar rata-rata 4,5 m, beda tinggi 194,21 m, zona transportasi panjang sungainya 576,03 m, lebar sungai rata-rata 5,7 m, beda tinggi 18,21 m, sedang zona pengendapan memiliki panjang sungai 2.357,64 m, lebar rata-rata 8,2 m, dan beda tinggi 29,15 m (Gambar 12b).

Zona produksi Sungai Talumelito di daerah hulu memiliki panjang sungai 2.435,13 m, lebar sungai rata-rata 4,8 m, beda tinggi 107,3 m, zona transportasi memiliki panjang sungai 1.927,41 m, lebar 20 m, beda tinggi 73,53 m. Sementara pada zona pengendapan memiliki panjang sungai 4.252,09 m, lebar 22 m, beda tinggi 73,61 m (Gambar 13a).

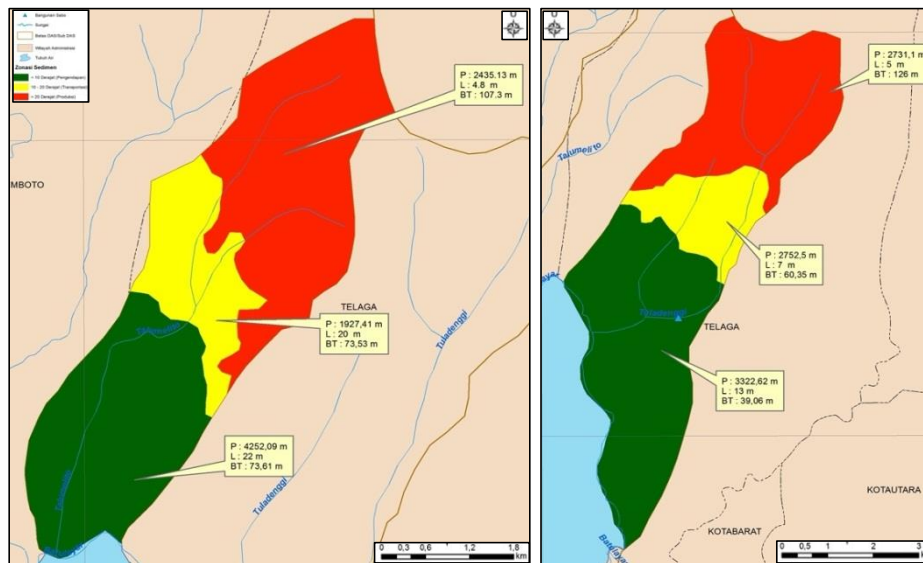
Zona produksi Sungai Tuladengi memiliki panjang sungai 2.731,1 m, lebar rata-rata 5 m, beda tinggi 126 m. Zona transportasi mempunyai panjang sungai 2.752,5 m, lebar rata-rata 7 m, serta beda tinggi 60,35 m. Sementara zona pengendapan memiliki panjang sungai 3.322,62 m, lebar sungai rata-rata 13 m, serta beda tinggi 39,06 m (Gambar 13b).

Berdasarkan hasil analisis, kapasitas tampung sabodam dan potensi produksi sedimentasi di tiap Sub-DAS memiliki selisih yang cukup besar. Untuk itu, peninjauan ulang rutin dalam upaya pengendalian sedimentasi perlu dilakukan terutama terhadap sabodam yang sudah ada. Di sisi lain perlu adanya reboisasi di bagian hulu daerah tangkapan danau, serta pengendalian pemanfaatan ruang di kawasan lindung. Dengan mengembalikan fungsi lahan kepada fungsi semula, menanam kembali vegetasi alami di bagian hulu, serta pencegahan alih fungsi lahan menjadi kawasan budidaya, maka revitalisasi danau akan dapat cepat terwujud.



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 12 Peta zonasi angkutan sedimen Sub-DAS Pulubala (a) dan Tabongo (b)



Sumber: Hasil Analisis

Gambar 13 Peta zonasi angkutan sedimen Sub-DAS Talumelito (a) dan Tuladengi (b)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dari 12 sungai hulu Danau Limboto, urutan Sub-DAS dengan potensi pembawa sedimen terbesar menuju Danau Limboto yaitu: Batulayar sebanyak 193.662 m³, Biyonga Boluta sebanyak 123.095 m³, Alo1 sebanyak 120.273 m³, Alo sebanyak 115.204 m³, Molamahu sebanyak 73.058 m³, Marisa sebanyak 57.075 m³, Pulubala sebanyak 53.445 m³, Pone sebanyak 40.254 m³, Molamahu1 sebanyak 39.585 m³, Pilolalenga sebanyak 32.306 m³, Talumelito sebanyak 32.247 m³, Pulubala2 sebanyak 31.267 m³, Tuladengi sebanyak 28.908 m³, Pone1 sebanyak 27.306 m³, Payunga sebanyak 26.746 m³, Biyonga boluta1 sebanyak 25.895 m³, Pilolalenga1 sebanyak 21.841 m³, Tabongo sebanyak 20.151 m³, Pulubala1 sebanyak 17.741 m³, serta Tabongo1 sebanyak 11.031 m³.

Alur 60 merupakan alur di Sub-DAS Alo yang berpotensi terbesar untuk mengalirkan sedimentasi dari hulu dan menuju Danau Limboto. Sementara alur 93 di Sub-DAS Biyonga Baluta memiliki potensi paling besar untuk membawa sedimen hasil erosi lahan. Adanya pembaruan data dan analisis rutin secara tahunan krusial mengingat dinamika alur sungai serta keterbatasan data, khususnya gambar potongan melintang maupun memanjang tiap sungai.

Diharapkan adanya studi lebih lanjut dan rutin melakukan pengambilan data sedimen sungai-sungai di hulu Danau Limboto pada Sungai Alo, Batulayar, dan Biyonga Boluta dengan pertimbangan bahwa ketiga sungai tersebut memiliki potensi erosi serta sedimentasi terbesar yang bisa masuk ke Danau Limboto.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kapuslitbang SDA, kepala Balai Litbang Sabo beserta strukturalnya, kepala Balai BHGK beserta strukturalnya, BWS Sulawesi II Gorontalo, serta semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu, yang telah mendukung hingga makalah ini dapat tersusun dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

Alfianto, A., Hanafi, F., Ridwan, B.W., Mulyana, A.R., & Yuniawan, R.A. (2016). Aplikasi WaTEM/SEDEM Dalam Analisis Potensi Erosi Hulu Daerah Aliran Danau Rawapening. *Prosiding Seminar Hasil Litbang TA 2016*, 81-93.

Hardiyatmo, H. (2006). *Penanganan tanah longsor dan erosi*. Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Hakim, S. (2015). *Studi Laju Sedimentasi Waduk Bili-Bili Pasca Pengembangan Bangunan Penahan Sedimen* (Unpublished master's thesis). Makassar: Universitas Hasanuddin. Retrieved August 26th, 2020, from <https://core.ac.uk/download/pdf/77622876.pdf>

Hermawan, A., Pamudji, A.P., & Kironoto, B. A. (2016). *Kajian Erosi Lahan Pada Sub-Das Cirasea, Das Citarum Hulu, Jawa Barat Dengan Perangkat Lunak Watem Sedem* (Unpublished master's thesis). Sleman: Universitas Gadjah Mada. Retrieved August 25, 2020, from http://etd.repository.ugm.ac.id/home/detail_pencarian/103233

Jakubínský, J., Pechanec, V., Procházka, J., & Cudlín, P. (2019). Modelling of Soil Erosion and Accumulation in an Agricultural Landscape—A Comparison of Selected Approaches Applied at the Small Stream Basin Level in the Czech Republic. *Water*, 11(3), 404. [doi:10.3390/w11030404](https://doi.org/10.3390/w11030404).

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2014). *Gerakan Penyelamatan Danau (GERMADAN) Limboto*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). Kementerian PUPR Revitalisasi Danau Limboto. (diakses 26 Februari 2017). <https://www.pu.go.id/berita/view/10818/kementerian-pupr-revitalisasi-danau-limboto>

Moha, S., Taslim, I., & Jaya, R. (2020). Pendugaan Laju Sedimentasi dengan Menggunakan Model USLE di Sub DAS Biyonga. *Jurnal Sains Informasi Geografi JSIG*, 3(1), 53-64. [Doi:http://dx.doi.org/10.31314/jsig.v3i1.559](https://doi.org/10.31314/jsig.v3i1.559)

Notebaert, B., Vaes, B., Verstraeten, G. & Govers, G. (2006). PDF [Manual]. Flanders: KU Leuven

Oli'i, M. (2012). Peta Tata Guna Lahan DAS Limboto [Digital image]. Retrieved August 23, 2018, from <https://kakarandhanolii.wordpress.com/2012/09/27/peta-daerah-aliran-sungai-das-gorontalo/>

Sheng, M., & Fang, H. (2014). Research progress in WaTEM/SEDEM model and its application prospect [Abstract]. *Progress in Geography*, 33(1), 85-91. [doi:https://doi.org/10.11820/dlkxjz.2014.01.010](https://doi.org/10.11820/dlkxjz.2014.01.010)

Singh, V. P. (1996). *Dam breach modeling technology*. Springer: 154-160.

- Soewarno.(1991). *Hidrologi: Pengukuran dan pengolahan data aliran sungai (hidrometri)*. Bandung, Jawa Barat: Penerbit Nova.
- Takahashi, T. (2007). *Debris flow: Mechanics, prediction, and countermeasures*. London, United Kingdom: Taylor and Francis.
- Tunas, I. (2008). Pengaruh Prosedur Perkiraan Laju Erosi Terhadap Konsistensi Nisbah Pengangkutan Sedimen. *SMARTek*, 6(3), 135-143.
- Umar, I., Marsoyo, A., & Setiawan, B. (2018). ANALISIS PERUBAHAN PENGGUNAAN LAHAN SEKITAR DANAU LIMBOTO DI KABUPATEN GORONTALO. *Jurnal Tata Kota Dan Daerah*, 10(2), 77-89. Retrieved December 23rd, 2020, from <https://repository.ugm.ac.id/275664/1/258-544-1-PB.pdf>
- United States of America Department of Agriculture. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning*. (retrieved 26th Agustus 2019). <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>.
- Yunita, F., & Rizal Gardiawan, G. (2012). Kajian Rencana Penanggulangan Banjir Lahar dengan Saluran Pengelak Kali Putih. *Jurnal Sabo*, 3(1): 45-46. https://repository.ugm.ac.id/35123/1/Jurnal_Sabo_%282%29.pdf