

**UJI KEANDALAN TEORI EMPIRIS DALAM MEMPREDIKSI LAJU
SEDIMENTASI WADUK (STUDI KASUS SEDIMENTASI WADUK
SALOMEKKO, SULAWESI SELATAN)**

Wahyudi

Program Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas
Diponegoro, UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia

wahyudi60@gmail.com

Dyah Ari Wulandari

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, UNDIP Tembalang,
Semarang, Indonesia

dyahariwulandari@yahoo.co.id

Suripin

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, UNDIP Tembalang,
Semarang, Indonesia

suripin@lecture.undip.ac.id

Abstrak

Bendungan merupakan infrastruktur sumber daya air yang berfungsi membendung aliran air sungai untuk dialirkan secara teratur guna memenuhi berbagai kebutuhan air untuk pertanian, air minum, pembangkit listrik tenaga air dan konservasi. Salah satu faktor yang menentukan dalam perencanaan bendungan adalah adanya volume sedimen yang akan tertampung di waduk dalam kurun waktu umur waduk, dimana elevasi bangunan pengambilan akan ditempatkan di atas elevasi akumulasi volume sedimen di waduk, atau yang dikenal dengan tanpungan mati (dead storage). Permasalahan yang terjadi pada bendungan yang telah dibangun di Indonesia adalah terjadi gap yang besar antara laju sedimentasi waduk rencana dengan realisasi hasil observasi yang dilakukan dengan pengukuran batimetri waduk. Tujuan penelitian adalah untuk menguji keandalan metode empiris USLE yang digunakan secara luas untuk perencanaan laju sedimentasi waduk di Indonesia, terhadap realisasi sedimen yang mengendap di waduk. Penelitian diadakan di bendungan Salomekko, yaitu suatu bendungan urugan yang terletak di Propinsi Sulawesi Selatan dengan luas DTA 12,92 Km² dan mulai beroperasi sejak tahun 1998. Hasil uji keandalan laju sedimentasi waduk teoritis terhadap hasil observasi menunjukkan nilai yang rendah, yaitu sebesar 41,92%. Kondisi tersebut mengakibatkan rencana umur operasi waduk berdasarkan faktor sedimentasi tidak akan tercapai. Berdasarkan hasil penelitian ini disimpulkan bahwa rumus empiris USLE perlu dilakukan modifikasi pada rumus faktor kemiringan lereng (LS) yang sesuai dengan kondisi kepulauan Indonesia yang berkontur terjal, sementara rumus empiris USLE dibuat dengan sampel Daerah Tangkapan Air yang landai.

Kata kunci: laju sedimentasi waduk, analisis observasi sedimentasi, analisis empiris sedimentasi, keandalan metode USLE

Abstract

Dams are water resource infrastructures that function to dam river water flow to be channeled regularly to meet various water needs for agriculture, drinking water, hydroelectric power generation and conservation. One of the determining factors in dam planning is the volume of sediment that will be accommodated in the reservoir during the reservoir's lifespan, where the elevation of the intake structure will be placed above the elevation of the cumulative volume of sediment in the reservoir, or what is known as dead storage. The problem that occurs in dams that have been built in Indonesia is that there is a large gap between the

planned reservoir sedimentation rate and the realization of the observation results carried out by measuring the reservoir bathymetry. The purpose of this study was to test the reliability of the USLE empirical method which is widely used for reservoir sedimentation rate planning in Indonesia, against the realization of sediment that settles in the reservoir. The study was conducted at the Salomekko dam, which is an embankment dam located in South Sulawesi Province with a catchment area of 12.92 km² and has been operating since 1998. The results of the reliability test of the theoretical reservoir sedimentation rate against the observation results showed a low value, which was 41.92%. This condition causes the planned operational life of the reservoir based on the sedimentation factor to not be achieved. Based on the results of this study, it is concluded that the USLE empirical formula needs to be modified in the slope factor formula (LS) that is in accordance with the conditions of the Indonesian archipelago which has a steep contour, while the USLE empirical formula is made with a sample of a gentle water catchment area.

Keywords: *reservoir sedimentation rate, sedimentation observation analysis, sedimentation empirical analysis, USLE method reliability*



© Author(s) 2024

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

PENDAHULUAN

Analisis sedimentasi waduk merupakan faktor yang sangat penting bagi perencanaan suatu bendungan. Kapasitas tampungan efektif waduk akan ditentukan oleh volume sedimen yang mengendap di waduk selama umur rencana yang ditetapkan. Namun kenyataan yang terjadi terhadap sejumlah bendungan yang dibangun di Indonesia menunjukkan adanya gap antara prediksi dengan realisasi sedimentasi waduk. Braben dalam makalahnya menyampaikan kondisi sedimentasi waduk, tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Prediksi dan Realisasi Laju Endapan Sedimen di Waduk

Waduk	Laju Sedimentasi Tahunan (10 ⁶ m ³)		Sumber
	Prediksi	Realisasi	
Karangkates (Jawa Timur)	0,33	2,04	Brabben, 1982
Wlingi (Jawa Timur)	0,38	1,42	Fish, 1983
Bhakra (Punjab, India)	28,40	41,60	Patnaik, 1975
Panchet (DVD, Bihar, India)	2,50	11,80	Patnaik, 1975
Tungabhadra (Karnataka, India)	12,10	50,60	Patnaik, 1975
Nizam Sagar (Andhra Pradesh, India)	0,66	10,80	Patnaik, 1975
Ukai (Gujarat, India)	9,20	26,80	Patnaik, 1975
Magat (Luzon, Philippines)	5,50	11,00	Wooldridge, 1986
Kamburu (Kenya)	0,30	2,30	Wooldridge, 1984
Ambuklao (Luzon, Philippines)	2,72	4,98	Abernethy, 1984

Sumber : Braben (1982)

Dalam jurnalnya Susanti menyatakan realisasi usia guna sejumlah waduk tidak sesuai dengan prediksi awal.¹

¹ W.D. Susanti, "Perencanaan Bottom Outlet sebagai Alternatif Upaya Melestarikan Fungsi Waduk," *Journal Alami* 10, no. 1 (2005).

Tabel 2. Estimasi dan Realisasi Usia Guna Waduk

Bendungan	Usia Estimasi (Tahun)	Realisasi Usia Guna Waduk
Mangla (Pakistan)	100	57
Gobindsager (India)	600	150
Danau Chandigarh	26	13
Selorejo	100	30
Sermo	50	30

Sumber : Susanti, 2005²

Penelitian yang dilakukan pada Waduk Sermo oleh Annisa Wulandari dan Bambang Kun Cahyono menunjukkan adanya gap antara hasil perhitungan dengan metode empiris (RUSLE) dengan pengukuran bathimetri sebesar 0,897 mm/tahun (8,687 mm/tahun dan 7,790 mm/tahun).³ Dalam penelitian lain di Waduk Mrica, berdasarkan hasil pengukuran sedimen waduk tahun 2015, volume tampungan sedimen dalam kurun waktu 26 tahun (1989 – 2015) sudah mencapai 71,66% dari volume rencana.⁴ Penelitian sedimentasi waduk yang dilakukan pada waduk Cirata menunjukkan realisasi sedimentasi yang terjadi jauh lebih besar dibandingkan perkiraan awal. Realisasi laju sedimentasi waduk berdasarkan hasil pengukuran bathimetri oleh Badan Pengelola Waduk Cirata pada tahun 2012, mencapai 7,566 juta meter³/tahun, dibandingkan dengan rencana laju sedimentasi waduk sebesar 5,67 juta meter³/tahun.

Dengan latar belakang kondisi tersebut dilakukan penelitian berupa analisis laju sedimentasi waduk Salomekko yang telah beroperasi sejak tahun 1998, dengan tujuan untuk mendapatkan tingkat keandalan analisis sedimentasi waduk dengan menggunakan metode empiris USLE.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang akan dilakukan mengambil metode gabungan antara metode penelitian survei dan penelitian *expose facto*. Penelitian akan dilakukan dengan mengambil kasus pada Bendungan Salomekko mempunyai daerah tangkapan air dengan luas 12,92 km², volume tampungan normal 8,2 juta m³ dan volume tampungan mati 0,9 juta m³. Pengukuran bathimetri waduk terakhir dilakukan pada Tahun 2019 oleh PT Caturbina Guna Persada.⁵ Penelitian akan menggunakan metode analisis korelasional dan komparasi. Data yang digunakan adalah data

² Susanti.

³ Annisa Wulandari dan Bambang Kun Cahyono, “Estimasi Volume Sedimentasi Waduk Sermo Menggunakan Metode RUSLE, Batimetri, dan Angkutan Sedimen,” *JGISE* 3, no. 1 (2020).

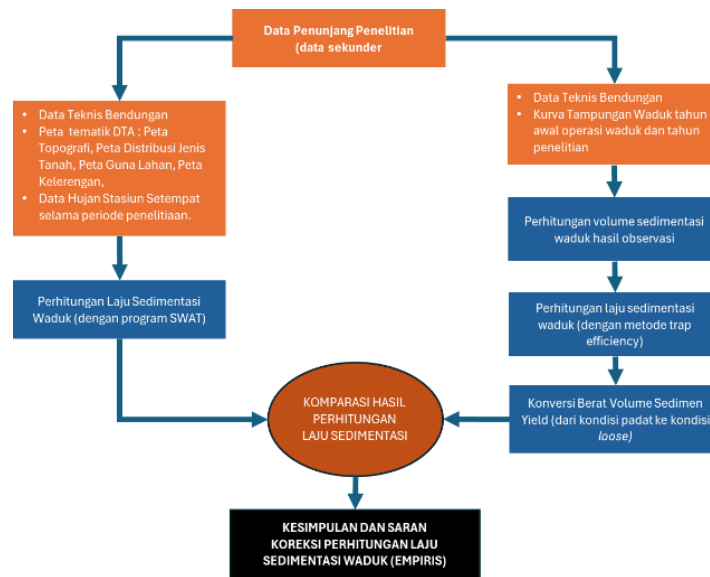
⁴ Teguh Marhendi dan Dewi Laras Sulastri Ningsih, “Prediksi Peningkatan Sedimentasi dengan Metode Angkutan Sedimen (Studi Kasus Sedimentasi di Waduk Mrica,” *Techno: Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto*, 2018.

⁵ P.T. Caturbina Guna Persada, *Proyek Fasilitasi Sertifikasi OP dan Rencana Tindak Darurat Bendungan Bili-Bili, Ponre-Ponre, Kalola, dan Salomekko* (Makassar: Caturbina Guna Persada, 2019).

kejadian masa lampau, dalam gap waktu pengukuran bathimetri waduk tahun 1998 dan tahun 2019.

Untuk analisis empiris laju sedimentasi waduk akan digunakan software *Soil and Water Assesment Tools (SWAT)*. Dalam penelitiannya tentang Perubahan Tata Guna Lahan Terhadap Limpasan Permukaan di Sub DAS Cimanuk Hulu Menggunakan Model *Soil and Water Assesment Tool (SWAT)*, Aji Tri Rahadi menyimpulkan penggunaan program SWAT menghasilkan kinerja yang baik.

Secara grafis metode penelitian diuraikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Metode Penelitian

Tahap 1: Pengumpulan Data

Data pendukung penelitian yang akan dikumpulkan meliputi :

- Data Teknis Bendungan Salomekko,
- Data Hujan dan klimatologi stasiun terkait selama periode penelitian, tahun 1998 – 2019 (digunakan data satelit TRMM)
- Peta Topografi Daerah Tangkapan Air (DTA) waduk Salomekko tahun 2019
- Peta Land Use, Daerah Tangkapan Air (DTA) waduk Salomekko Tahun 2019
- Peta Soil Daerah Tangkapan Air (DTA) waduk Salomekko tahun 2019
- Peta Bathimetri Waduk Salomekko, hasil pengukuran awal dan hasil pengukuran terakhir Tahun 2019

Tahap 2: Perhitungan Sedimentasi Waduk Hasil Observasi

Perhitungan volume sedimentasi waduk dengan menghitung gap data bathimetri antara dua pengukuran dengan selang waktu berbeda. Volume sediment inflow DTA (sediment yield)

dihitung dengan mengkonversikan volume sedimen terukur dengan nilai trap efficiency dan berat volume endapan sedimen di waduk

Tahap 3. Perhitungan Sedimentasi Waduk Dengan Rumus Empiris

Dengan parameter perencanaan yang telah dikumpulkan, selanjutnya dilakukan analisis laju sedimentasi waduk dengan menggunakan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) dan dalam pelaksanaannya menggunakan program aplikasi SWAT (*Soil and Water Assesment Tools*).

Tahap 4. Uji keandalan (komparasi) hasil hitungan dengan metode empiris dengan hasil observasi

Terhadap hasil akhir analisis secara teoritis, dilakukan komparasi terhadap hasil observasi, persentase gap antara kedua hitungan diatas merupakan nilai keandalan metode empiris analisis sedimentasi waduk.

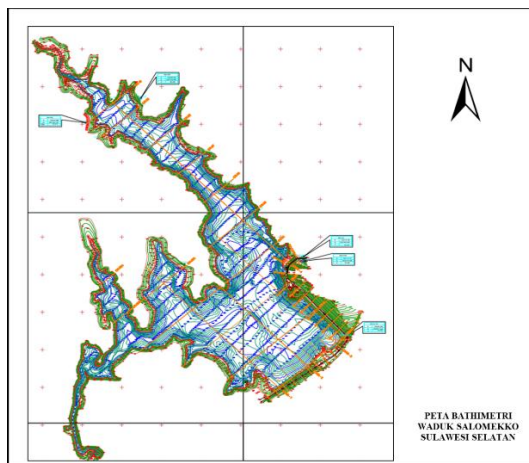
Tahap 5. Saran

Perlunya modifikasi terhadap rumus empiris USLE untuk karakteristik daerah tangkapan air di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

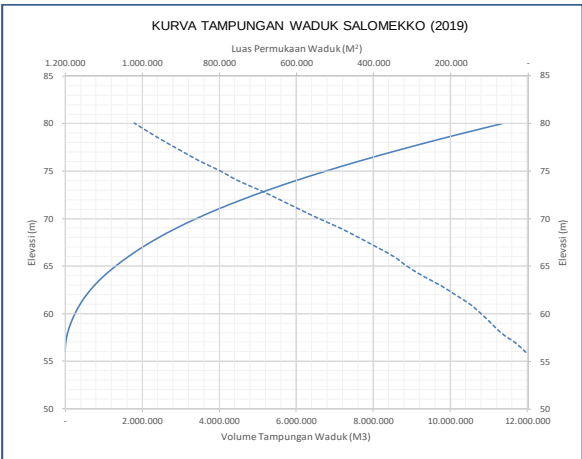
Peta bathimetri waduk Salomekko hasil pengukuran tahun 2019 pada Fasilitas Sertifikasi Ijin Operasi Bendungan Salomekko disajikan pada Gambar 2.

Kurva hubungan antara elevasi dengan luas permukaan tampungan dan volume tampungan waduk, hasil pengukuran bathimetri tahun 2019 dapat dilihat pada Gambar 3 dan Tabel 3. yang menunjukkan luas areal dan volume tampungan pada setiap elevasi. Dasar waduk Salomekko, , selama kurun waktu 22 tahun telah mengalami kenaikan sebesar 6,0 m, dari elevasi +50 menjadi elevasi + 56 dengan volume tampungan normal berkurang dari 7,920 juta m³ menjadi 7,518 juta m³.



Gambar 2. Peta Bathimetri Waduk Salomekko Tahun 2019

Sumber : PT Caturbina Guna Persada, 2019⁶



Gambar 3. Kurva Tampungan Waduk Salomekko Tahun 2019

Sumber : PT Caturbina Guna Persada, 2019⁷

Analisis Sedimentasi Waduk Hasil Observasi

Dengan menggunakan kurva tampungan tahun 1998 dan 2019, dihitung volume *sediment yield* yang terendapkan di waduk. Tabel tampungan waduk untuk tahun 1998 dan 2019 disajikan dalam Tabel 4.

Analisis Sedimentasi

Pada elevasi +50 sampai dengan + 70 terjadi pengurangan volume waduk akibat sedimentasi. Pada elevasi + 70 sampai +76 dan seterusnya terjadi penambahan luas areal waduk akibat longsoran tebing yang masuk ke waduk, sehingga jumlah sedimentasi waduk akibat erosi lahan di DTA Salomekko dihitung sampai dengan elevasi + 70, dikurangi volume sedimen akibat longsoran tebing. Kumulatif volume sedimentasi waduk Salomekko sampai dengan tahun 2019 = 406.568 m³ (Tabel 4)

Tabel 3. Hubungan Elevasi – Luas – Volume Tampungan Waduk Salomekko

Elevasi	Luas (m ²)	Volume (m ³)	Volume Kumulatif (m ³)
54	0	0	0
55	0	0	0
56	5.701	1.906	1.906
57	33.314	17.599	19.505
58	69.008	50.09	69.594
59	94.731	81.531	151.125
60	120.764	107.484	258.61

⁶ P.T. Caturbina Guna Persada.

⁷ P.T. Caturbina Guna Persada.

Elevasi	Luas (m ²)	Volume (m ³)	Volume Kumulatif (m ³)
61	149.404	134.83	393.44
62	187.738	168.207	561.646
63	226.936	207.028	769.674
64	273.349	249.783	1.018.457
65	313.335	293.115	1.311.572
66	347.138	330.092	1.641.664
67	391.785	369.236	2.010.900
68	438.462	414.905	2.425.805
69	487.032	462.534	2.888.339
70	542.291	514.414	3.402.753
71	594.232	568.064	3.970.817
72	644.771	619.33	4.590.147
73	696.925	670.679	5.260.826
74	753.894	725.223	5.986.049
75	798.372	776.027	6.762.075
76	850.695	824.395	7.586.471
77	895.241	872.873	8.459.344
78	939.73	917.396	9.376.739
79	981.139	960.36	10.337.100
80	1.021.038	1.001.022	11.338.122

Sumber : PT Caturbina Guna Persada, 2019⁸

Perhitungan Berat Volume Sedimen

Komposisi sedimen waduk

Clay 46,70%

Silt 27,30%

Sand 26,00%

Tabel 4. Data Tampang Waduk Salomekko Tahun 1998 dan 2019

Pengukuran Topografi Waduk 1998				Pengukuran Bathimetri 2019			Sedimentasi	
Elevasi	Area (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Kumulatif Volume (10 ⁶ m ³)	Area (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Kumulatif Volume (10 ⁶ m ³)	Volume Sedimen (10 ⁶ m ³)	Kumulatif Volume Sedimen (10 ⁶ m ³)
50	0.000		0.000	0.000		0.000		0.000
55	0,016	0,027	0,027	0,000	0,000	0,000	0,027	0,027
60	0,159	0,376	0,402	0,121	0,201	0,201	0,174	0,201
65	0,337	1,212	1,615	0,313	1,048	1,249	0,165	0,366
70	0,550	2,196	3,811	0,542	2,113	3,362	0,083	0,449
75	0,778	3,304	7,114	0,798	3,331	6,693	-0,028	0,421
76	0,842	0,810	7,924	0,851	0,824	7,518	-0,015	0,407

⁸ P.T. Caturbina Guna Persada.

Estimasi berat volume sedimen dirumuskan sebagai berikut:⁹

$$W1 = Wc \cdot Pc + Wm \cdot Pm + Ws \cdot Ps$$

Dengan :

W1 = Berat volume sedimen awal (kg/m³)

Wc = Berat volume awal lempung (kg/m³)

Wm = Berat volume awal lanau (kg/m³)

Ws = Berat volume awal pasir (kg/m³)

Pc, Pm, Ps = persentase dari lempung, lanau dan pasir

Tabel 5. Berat Volume Awal Berdasarkan Jenis Material Butiran

Operasi Waduk	Berat Volume Awal/m ³		
	Wc	Wm	Ws
Sedimen Selalu Terendam	416	1120	1554
Secara Periodik Surut	561	1140	1554
Waduk Sering Kosong	641	1150	1554
Sedimen Dasar Sungai	961	1170	1554

Sumber : Morris and Fan, 2010¹⁰

Operasi Waduk secara periodik surut.

$$W1 = 561 \times 46,70\% + 1140 \times 27,30\% + 1554 \times 26,00\% = \mathbf{977 \text{ Kg/m}^3}$$

Berat Volume sedimen di waduk setelah t tahun mengendap dirumuskan sebagai berikut:¹¹

$$Wt = W_1 + 0,4343 B \left[\frac{t}{t-1} (\ln t) - 1 \right]$$

$$B = Ps \cdot Bs + Pm \cdot Bm + Pc \cdot Bc$$

Tabel 6. Nilai Koefisien B

Operasi Waduk	B (kg/m ³)		
	Pasir	Lanau	Lempung
Selalu Tenggelam	0	91	256
Normal, Secara Periodik Surut	0	29	135
Waduk Kering	0	0	0

Sumber : Morris dan Fan, 2010¹²

Kondisi operasional waduk secara periodik surut

$$B = 26,00\% \times 0 + 27,30\% \times 29 + 46,70\% \times 135 = 70,962 \text{ kg/m}^3$$

Periode 22 tahun

⁹ G.L. Morris dan J. Fan, *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use* (New York: McGraw-Hill, 2010).

¹⁰ Morris dan Fan.

¹¹ Morris dan Fan.

¹² Morris dan Fan.

$$Wt = W_1 + 0,4343 B \left[\frac{t}{t-1} (\ln t) - 1 \right]$$

$$Wt = 0,977 + 0,4343 \times 70,962 \times \left[\frac{22}{22-1} \times (\ln 22) - 1 \right] = 1046 \text{ kg/m}^3 = 1,046 \text{ ton/m}^3$$

Berat volume sedimen setelah 22 tahun

$$We = 0,5 (W_1 + Wt) = 0,5 \times (0,977 + 1,046) = \mathbf{1,012 \text{ ton/m}^3}$$

Perhitungan Sediment Trap

Kapasitas awal Waduk Salomekko

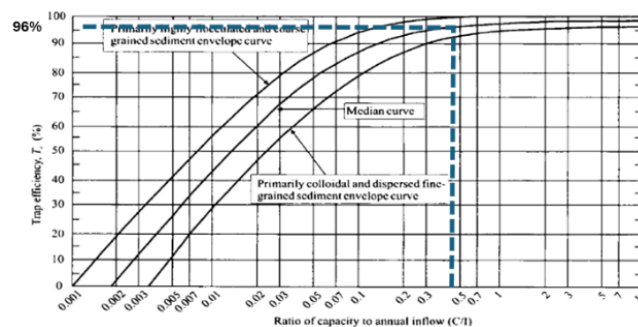
$$C = 8.200.000 \text{ m}^3$$

Inflow Rata-rata tahunan,

$$I = 17.343.936 \text{ m}^3$$

$$\text{Ratio } C/I = 0,47$$

$$\text{Trap Efficiency awal (Kurva Brune)} = \mathbf{96,0\%}$$



Gambar 4. Grafik Brune Untuk Waduk Salomekko

Volume sedimen terendapkan di Waduk Salomekko

Kumulatif berat sedimen selama 22 tahun ($406.568 \times 1,012$) = 411.340 ton. Berdasarkan bentuk dan operasi waduk ditetapkan *trap efficiency* sebesar = 96% *Sediment yield* DTA Waduk Salomekko selama 22 tahun.

$$= 411.340 / 96\% = 428.479 \text{ ton (padat)}$$

$$= 0,977/1,012 \times 428.479 =$$

$$= 413.872 \text{ ton (loose)}$$

Luas DTA Waduk Salomekko

$$= 12,92 \text{ Km}^2$$

Sediment yield rate per tahun

$$= 413.872 / (12,92 \times 22)$$

$$= \mathbf{1457 \text{ ton/ km}^2/\text{tahun}}$$

$$= 1457 / (0,977 \times 1000) =$$

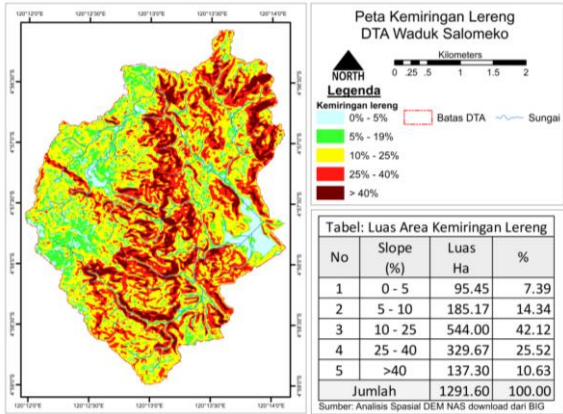
$$= \mathbf{1,490 \text{ mm/tahun}}$$

Analisis Empiris Sedimentasi Waduk Salomekko

Untuk analisis Empiris digunakan program aplikasi *Soil and Water Assesment Tools* (SWAT), dengan input berupa parameter analisis sedimentasi yield berupa peta dan informasi

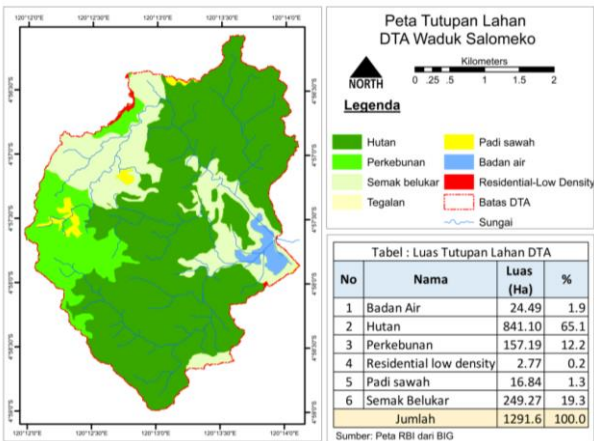
dalam format SHP, meliputi: (a) peta kemiringan lereng; (b) peta guna lahan (tutupan lahan) tahun 2019; (c) peta *soil*; (d) peta topografi DTA waduk Salomekko dan (e) data hujan dan klimatologi DTA waduk Salomekko tahun 1998 sampai dengan 2019.

a. Peta Kemiringan Lereng (Gambar 5.)

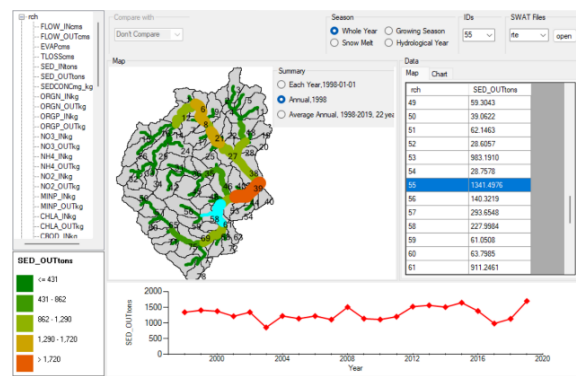


Gambar 5 Peta Kemiringan Lereng DTA Waduk Salomekko (Sumber : BIG, 2022)

b. Tata Guna Lahan (Gambar 6)



Gambar 6. Peta Guna Lahan DTA Waduk Salomekko (Sumber: BIG, 2022)



Gambar 9. Peta Sediment Reach Waduk Salomekko Node 55

Sedimen yield DTA Salomekko
Luas DTA Salomekko = 12,92 km²
Berat Volume Sedimen = 0,977 ton/m³
Periode = 22 tahun
Sedimen yield DTA Salomekko =
= 173.490 ton
173.490 / 0,977 = 177.524 m³
Sedimen yield rata2 per tahun =
177522/22 = 8071 m³/tahun
8071 / (12,92 x1000) = 0,625mm/tahun
173.490/(12,92 x 22) =**610,55 ton/km²/th**

Tabel 7. Sedimen Yang Masuk Ke Waduk Salomekko

No	Tahun	Sedimen Out (ton) untuk Reach Number					Total (ton)
		21	22	25	27(in)	28	
1	1998	1.488	34	47	1.025	906	3.501
2	1999	1.958	43	57	1.143	1.159	4.360
3	2000	1.945	42	56	1.256	1.174	4472
4	2001	1.625	38	50	1.05	1.011	3.773
5	2002	1.841	40	52	1.204	1.101	4.238
6	2003	1.212	26	35	717	726	2.716
7	2004	1.59	36	49	1.008	740	3.423
8	2005	1.576	34	46	993	720	3.369
9	2006	1.782	37	49	1.097	881	3.847
10	2007	1.561	33	43	994	768	3.399
11	2008	2.125	44	59	1.256	920	4.404
12	2009	1.727	35	46	1.031	759	3.598
13	2010	1.507	34	45	886	620	3.098
14	2011	1.609	37	50	1.043	803	3.542
15	2012	2.18	45	61	1.245	894	4.426
16	2013	2.281	47	61	1.345	1.027	4.761
17	2014	2.098	46	61	1.177	829	4.211
18	2015	2.404	51	67	1.424	1.092	5.038

No	Tahun	Sedimen Out (ton) untuk Reach Number					Total (ton)
		21	22	25	27(in)	28	
19	2016	1.942	43	55	1.137	801	3.978
20	2017	1.423	30	41	824	578	2.896
21	2018	1.619	35	47	1.014	641	3.356
22	2019	2.336	52	70	1.442	888	4.788
Jumlah 1							85.187

No	Tahun	Sedimen Out (ton) untuk Reach Number				Total (ton)
		30	35	38 (in)	43	
1	1998	30	692	550	23	1.295
2	1999	40	881	524	32	1.477
3	2000	38	875	667	30	1.610
4	2001	35	751	581	27	1.394
5	2002	37	827	633	30	1.527
6	2003	24	550	357	18	949
7	2004	34	717	476	26	1.253
8	2005	33	517	531	27	1.108
9	2006	37	597	646	29	1.309
10	2007	31	511	565	24	1.131
11	2008	42	660	620	32	1.354
12	2009	34	520	557	26	1.137
13	2010	32	446	391	23	892
14	2011	34	558	562	27	1.181
15	2012	43	637	592	34	1.306
16	2013	45	714	764	38	1.561
17	2014	42	622	491	33	1.188
18	2015	51	749	796	41	1.637
19	2016	40	585	549	32	1.206
20	2017	29	414	393	22	858
21	2018	31	505	549	26	1.111
22	2019	49	731	758	41	1.579
Jumlah 2						28.063

No	Tahun	Sedimen Out (ton) untuk Reach Number				Total (ton)
		46 (in)	47 (in)	48	49	
1	1998	568	178	47	59	852
2	1999	646	8	56	69	779
3	2000	667	287	54	72	1.080
4	2001	572	187	47	60	866
5	2002	635	209	51	68	963
6	2003	394	85	34	43	556
7	2004	569	10	49	63	691
8	2005	560	243	45	56	904

9	2006	606	374	48	61	1.089
10	2007	538	372	42	54	1.006
11	2008	718	202	60	74	1.054
12	2009	572	346	46	61	1.025
13	2010	532	89	44	57	722
14	2011	588	274	46	61	969
15	2012	730	173	61	77	1.041
16	2013	759	334	61	78	1.232
17	2014	708	7	59	80	854
18	2015	798	338	66	82	1.284
19	2016	672	153	54	71	950
20	2017	483	143	40	51	717
21	2018	577	318	46	61	1.002
22	2019	816	236	68	87	1.207
Jumlah 2						20.842

No	Tahun	Sedimen Out (ton) untuk Reach Number				Total (ton)
		51	53 (in)	54	55	
1	1998	62	276	29	1.341	1.709
2	1999	85	390	39	1.404	1.918
3	2000	77	488	36	1.373	1974
4	2001	71	425	34	1.213	1.743
5	2002	76	442	36	1.342	1.896
6	2003	48	229	22	855	1.153
7	2004	71	270	32	1.221	1.595
8	2005	69	351	32	1.137	1.589
9	2006	47	485	35	1.22	1.814
10	2007	64	384	30	1.107	1.584
11	2008	86	413	39	1.505	2.043
12	2009	68	373	31	1.137	1.609
13	2010	64	240	30	1.109	1.443
14	2011	70	406	32	1.199	1.707
15	2012	86	372	40	1.521	2.018
16	2013	93	523	44	1.562	2.222
17	2014	85	303	40	1.505	1.933
18	2015	104	563	49	1.646	2.362
19	2016	82	346	38	1.38	1.847
20	2017	58	246	27	981	1.312
21	2018	64	368	30	1.13	1.593
22	2019	102	486	47	1.698	2.333
Jumlah 4						39.396
Total						173490

Evaluasi Keandalan Analisis Empiris Sedimentasi Waduk Salomekko

Berdasarkan hasil observasi diperoleh nilai *sediment yield rate* sebesar 1457 ton/km²/tahun atau 1,490 mm/tahun. Sedangkan berdasarkan hasil hitungan empiris diperoleh hasil sebesar 610,55 ton/ km²/tahun atau 0,625 mm/tahun. Nilai keandalan empiris terhadap observasi sebesar:

$$Z = \left(1 - \frac{|1457 - 610,55|}{1457}\right) \times 100\% \\ = 41,92\%$$

PEMBAHASAN

Pada hasil penelitian di waduk Salomeko didapat gap sedimen yield antara perhitungan empiris dan obsevasi yang sangat besar, Perbedaan (gap) antara perhitungan observasi dengan empiris 1457 ton/km²/tahun sangat besar dibandingkan hasil uji keandalan metode USLE yang dilakukan oleh Wischmeier dan Smith, terhadap 2300 sampel dengan gap < 2 ton/km²/tahun sebanyak 84%. Salah satu faktor yang menyebabkan keandalan yang rendah dari metode empiris USLE adalah dalam mengestimasi faktor kemiringan lereng LS.¹³ Dalam USLE rumus LS didasarkan pada Daerah Tangkapan Air (DTA) dengan kemiringan antara 3% sampai dengan 18%, dengan besaran Ls dirumuskan sebagai berikut:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{72,6}\right)^m \times (65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065)$$

Dengan:

LS = Faktor kemiringan lereng

λ = panjang lereng (feet)

θ = sudut kemiringan lereng

m = konstanta, dengan nilai

= 0,5 jika kemiringan lereng $\geq 5\%$

= 0,4 jika kemiringan lereng 3,5% - 4,5%

= 0,3 jika kemiringan lereng 1% - 3%

= 0,2 jika kemiringan lereng < 1%

Penetapan konstanta m sebesar 0,5 untuk kemiringan lereng sama dengan atau lebih besar dari 5% perlu dilakukan koreksi, mengingat kontur DTA di Indonesia yang berupa pulau memiliki kemiringan lereng yang terjal, seperti di DTA waduk Salomekko, 78,27% mempunyai kemiringan diatas 10%.

¹³ W.H. Wischmeier dan D.D. Smith, "Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning," *U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook*, no. 537 (1978).

KESIMPULAN

Pada hasil penelitian di Bendungan Salomekko didapat perbedaan sedimen yield antara observasi dan perhitungan empiris yang sangat besar, yaitu gap observasi - empiris 1457 ton/km²/tahun, tingkat keandalan 41,92%.

Salah satu faktor rendahnya keandalan hasil estimasi laju sedimentasi waduk adalah adanya karakteristik DTA yaitu kemiringan lereng yang berada diatas batas toleransi dalam metode empiris USLE.

SARAN dan REKOMENDASI

Perlu dilakukan penelitian penetapan nilai konstanta m dalam rumus $LS = \left(\frac{\lambda}{72,6}\right)^m \times (65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065)$ dari Wischmeier dan Smith, dengan mengambil sampel dari sejumlah waduk yang sudah beroperasi Indonesia.¹⁴

DAFTAR PUSTAKA

- Marhendi, Teguh, dan Dewi Laras Sulastris Ningsih. "Prediksi Peningkatan Sedimentasi dengan Metode Angkutan Sedimen (Studi Kasus Sedimentasi di Waduk Mrica." *Techno: Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto*, 2018.
- Morris, G.L., dan J. Fan. *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*. New York: McGraw-Hill, 2010.
- P.T. Caturbina Guna Persada. *Proyek Fasilitasi Sertifikasi OP dan Rencana Tindak Darurat Bendungan Bili-Bili, Ponre-Ponre, Kalola, dan Salomekko*. Makassar: Caturbina Guna Persada, 2019.
- Susanti, W.D. "Perencanaan Bottom Outlet sebagai Alternatif Upaya Melestarikan Fungsi Waduk." *Journal Alami* 10, no. 1 (2005).
- Wischmeier, W.H., dan D.D. Smith. "Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning." *U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook*, no. 537 (1978).
- Wulandari, Annisa, dan Bambang Kun Cahyono. "Estimasi Volume Sedimentasi Waduk Sermo Menggunakan Metode RUSLE, Batimetri, dan Angkutan Sedimen." *JGISE* 3, no. 1 (2020).

¹⁴ Wischmeier dan Smith.