

Optimalisasi Kegiatan Pemeliharaan Pada Waduk Gondang, Kabupaten Karanganyar Terhadap Sedimentasi

¹Dhanang Samatha Putra, ²Pranoto S.A., ³Dyah Ari Wulandari

Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: ¹dhanangsamatha@students.undip.ac.id, ²pranotosa2001@yahoo.com, ³dyah@lecturer.undip.ac.id

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima pada 10 Maret 2020
Disetujui pada 16 April 2020
Dipublikasikan pada 30 Mei 2020
Hal. 394-409

Kata Kunci:

Distribusi Sedimen; Erosi;
Sedimentasi; Waduk Gondang

DOI:

<http://dx.doi.org/10.28926/briliant.v3i4.447>

Abstrak: Waduk Gondang berada di Kabupaten Karanganyar merupakan salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN). Waduk Gondang dibangun dalam rangka mendukung ketahanan pangan sebagai infrastruktur penyedia air irigasi dan memenuhi kebutuhan air baku di wilayah Kabupaten Sragen. Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi sedimen yang mengendap di waduk dan pola distribusi sedimen, sehingga dapat digunakan sebagai acuan kegiatan pemeliharaan yang optimal untuk menjaga keberlanjutan fungsi waduk. Dalam studi ini dilakukan perhitungan sedimen berdasarkan erosi lahan yang terjadi dengan metode USLE (*Universal Soil Loss Equation*) dan perhitungan distribusi sedimen dengan Metode Empiris Pengurangan Luas (*Empirical Area Reduction Method*). Skenario pengelolaan sedimentasi yang dilakukan adalah dengan cara konservasi, pembuatan cek dam dan *dredging*. Pemilihan alternatif pengelolaan

sedimen ditinjau berdasarkan kapasitas tampungan pada akhir umur rencana waduk. Dari hasil skenario pengelolaan sedimentasi, didapatkan hasil bahwa skenario yang paling optimal adalah dengan pembangunan cek dam yang dapat mengurangi laju sedimentasi sebesar 104.023,21 m³/tahun. Sisa tampungan efektif pada akhir umur rencana sebesar 91,99% sedangkan skenario lainnya berupa konservasi dan *dredging* menghasilkan sisa tampungan efektif sebesar 86,93% dan 85,55%.

PENDAHULUAN

Pembelajaran Perencanaan suatu bendungan tidak pernah lepas dari rencana umur layanan waduk. Dalam setiap perencanaan waduk selalu diperhitungkan volume tampungan mati (*dead storage*) yang disediakan untuk menampung sedimen yang masuk ke waduk selama umur layanan waduk. Beberapa kajian tentang sedimentasi waduk menghasilkan bahwa 70% waduk memiliki permasalahan sedimentasi, sehingga umur efektif waduk akan berakhir sebelum umur rencana tercapai (Asrib, 2012). Pengelolaan dan pemeliharaan waduk yang ramah terhadap sedimen, dalam arti memperhatikan dan mencermati pola dan perilaku sedimen yang masuk dan mengendap di waduk masih sangat kurang. Sedimen dari hasil erosi lahan yang terjadi akan diendapkan keseluruhan permukaan waduk berdasarkan suatu pola yang dipengaruhi oleh bentuk waduk,

jenis operasi dan jenis sedimen yang terbawa (Morris & Fan, 2009). Pengelolaan waduk selama ini hanya terfokus pada bagaimana upaya penyediaan air dan bagaimana menjaga waduk tetap aman dari segi stabilitasnya. Hal inilah yang selalu menjadi masalah bagi sebagian besar waduk saat ini, dari segi fisik waduk masih berdiri dengan kokoh, akan tetapi sudah sangat berkurang dari segi manfaat karena permasalahan sedimentasi yang terlanjur masif.

Waduk Gondang yang berada di Kabupaten Karanganyar merupakan salah satu waduk yang termasuk dalam salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN) dengan kapasitas tampungan bruto 9,15 juta m³ dan berada pada aliran Sungai Garuda. Sungai Garuda mengalir dari hulu yang berada di Gunung Lawu dan bermuara ke Sungai Bengawan Solo di Kabupaten Sragen. Waduk Gondang dibangun dalam rangka mendukung ketahanan pangan sebagai infrastruktur penyedia air irigasi dengan daerah layanan seluas 4.800 Ha, untuk memenuhi kebutuhan air baku di wilayah Kabupaten Sragen sebesar 200 l/dt, dan mereduksi banjir dari 639 m³/dt menjadi 137,3 m³/dt (Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, 2012).

Waduk Gondang merupakan waduk pertama yang selesai dibangun dari 6 waduk baru yang merupakan Proyek Strategis Nasional (PSN) yang berada dalam pengelolaan Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. Waduk Gondang mulai digenangi pada bulan mei tahun 2019 dan direncanakan akan mulai beroperasi tahun 2020. Waduk Gondang dapat diibaratkan sebagai generasi baru waduk yang ada di BBWS Bengawan Solo, sehingga dalam pengelolaan perlu disiapkan pedoman dan langkah-langkah pemeliharaan yang optimal terkait sedimentasi. Pedoman pengelolaan sedimentasi yang optimal pada Waduk Gondang dianggap sangat penting agar fungsi dan manfaat waduk dapat terus berlanjut selama umur layanan. Berkurangnya kapasitas tampungan efektif waduk akibat sedimentasi berpengaruh terhadap kapasitas manfaat waduk terhadap pengendalian banjir, produksi listrik dan pangan (Soewarno & Syariman, 2008).

Analisis prediksi besarnya sedimentasi yang akan terjadi pada Waduk Gondang dan distribusi pengendapannya pada waduk akan sangat berguna dalam penentuan upaya pemeliharaan dan pengelolaan sedimen waduk yang optimal selama waduk beroperasi. Kriteria pengelolaan sedimen yang optimal, didasarkan pada kapasitas tampungan pada akhir umur rencana waduk dari masing-masing alternatif upaya pengelolaan sedimen yang dilakukan. Pengelolaan sedimen yang optimal menjadi hal yang sangat diperlukan agar umur layanan waduk dapat tercapai dan fungsi pelayanan selama waduk beroperasi dapat terjaga.

METODE

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis prediksi sebaran (distribusi) sedimen pada Waduk Gondang sepanjang umur efektif dengan beberapa skenario pemeliharaan. Skenario yang dilakukan adalah dengan konservasi, pembangunan cek dam dan *dredging*. Laju sedimen didapatkan dari analisis erosi dengan metode USLE pada DTA Waduk.

Metode USLE memiliki beberapa kelebihan diantaranya mampu memprediksi erosi lahan dengan analisis penginderaan jauh, sehingga dapat dijadikan acuan dan prediksi awal dalam menganalisis erosi lahan secara lebih

mudah dan cepat. Dari hasil erosi yang didapatkan dilakukan perhitungan laju sedimen pada waduk dengan memperhitungkan nilai *sediment delivery ratio* dan *trap efficiency* waduk. Laju sedimen yang dihasilkan didistribusikan menggunakan metode empiris pengurangan luas untuk mengetahui sebaran sedimen pada tiap elevasi waduk.

Pengumpulan Data Sekunder

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data hujan harian STA Tawangmangu tahun 2002 – 2018 (sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo).
2. Peta vektor (shp) Tutupan Lahan Kab Karanganyar tahun 2017 skala 1: 25.000 (sumber : Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan).
3. Peta Topografi Kab. Karanganyar berupa raster (sumber : Digital Elevation Model Nasional).
4. Data hubungan elevasi-luas-tampungan awal Waduk Gondang (sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo).
5. Data Teknis Waduk Gondang (sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo).
6. Peta vektor (shp) Jenis Tanah Kab. Karanganyar tahun 2015 (sumber : Kementerian Pertanian)

Erosi Lahan

Erosi adalah hilangnya atau terkikisnya tanah atau bagian bagian tanah dari tempat yang diangkut oleh air atau angin dan selanjutnya akan diendapkan di tempat lain (Arsyad, 2006). Menurut Asdak (2014), proses erosi terdiri atas tiga bagian yang berurutan yaitu pengelupasan (detachment), pengangkutan (transportation) dan pengendapan (sedimentation). Laju erosi di daerah tangkapan waduk dapat diprediksi dengan rumus pendekatan Universal Soil Loss Equation (USLE):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Dimana laju erosi (A) menurut Asrib (2012) dipengaruhi oleh :

1. Faktor hujan dan aliran permukaan (erosivitas hujan) (R), dinyatakan dalam persamaan:

$$EI_{30} = 6,119 \times P_b^{1,211} \times N^{-0,474} \times P_{max}^{0,526}$$
 dimana:
 EI_{30} = indeks erosi hujan bulanan (KJ/ha);
 P_b = curah hujan bulanan (cm);
 N = jumlah hari hujan per bulan;
 P_{max} = hujan maksimum harian (24 jam) dalam bulan yang bersangkutan
2. Erodibilitas tanah (K), dinyatakan berdasarkan jenis tanah dalam Tabel 1:

Tabel 1. Jenis Tanah dan nilai K (Tunas, 2008)

Jenis Tanah	Nilai K
Latosol coklat dan kemerahan dan litosol	0,43
Latosol kuning kemerahan dan litosol	0,36
Komplek mediteran dan litosol	0,46
Latasol kuning kemerahan	0,56
Grumasal	0,20
Alluvial	0,47
Regasol	0,40
Latosol	0,31

3. Faktor kemiringan lereng (LS), Menurut Kironoto (2000) besarnya nilai LS tergantung dari prosentase kemiringan lereng, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai LS untuk tiap kelas lereng

Kelas Lereng	Kemiringan Lereng	Nilai LS
I	0 – 8%	0,40
II	8 – 15%	1,40
III	15 – 25%	3,10
IV	25 – 40%	6,80
V	>40%	9,50

4. Faktor vegetasi penutup tanah (C), Faktor tanaman merupakan rasio dari tanah pada tanaman tertentu dengan tanah gundul. Tabel 3 merupakan nilai C untuk berbagai tanaman dan pengelolaan tanaman menurut Suripin (2004).

Tabel 3. Nilai faktor C

No.	Jenis Pertanaman	Nilai C
1	Tanah terbuka tanpa tanaman	1
2	Sawah	0,01
3	Tegalan tidak dispesifikasi	0,7
4	Jagung	0,7
5	Hutan alam :	
	Serasah banyak	0,001
	Serasah sedikit	0,005
6	Hutan Produksi :	
	Tebang habis	0,5
	Tebang pilih	0,2
7	Semak belukar, padang rumput	0,3

5. Faktor tindakan konservasi tanah (P), Tanpa konservasi tanah nilai P = 1 (petak baku). Bila diteraskan, nilai P dianggap sama dengan P untuk *strip cropping*, sedang nilai LS didapat dengan menganggap panjang lereng sebagai jarak horizontal dari masing-masing teras. Menurut Harmayanti et al. (2015) nilai P pada beberapa teknik konservasi tanah dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai P pada beberapa Teknik konservasi tanah

No.	Jenis Teknik	Nilai P
1	Teras bangku :	
	> Standart desain dan bangunan baik	0.04
	> Standart desain dan bangunan sedang	0.15
	> Standart desain dan bangunan rendah	0.35
2	Teras Tradisional	0.40
3	Penanaman menurut <i>kontur</i> lereng :	
	> 0 - 8 %	0.50
	> 9 - 20 %	0.75
	> 20 %	0.90
4	Strip tanaman rumput Bahia	0.40
5	Tanpa tindakan konservasi	1.00

Laju Sedimentasi di Waduk

Nisbah Pelepasan Sedimen (*Sediment Delivery Ratio*) atau cukup dikenal dengan SDR adalah perhitungan untuk memperkirakan besarnya hasil sedimen dari suatu daerah tangkapan air. Variabilitas angka SDR dari suatu DAS ditentukan antara lain oleh sumber sedimen, jumlah sedimen, sistem transpor, Tekstur partikel-partikel tanah yang tererosi, lokasi deposisi sedimen dan karakteristik DAS (Asdak, 2014). Menurut *SCS National Engineering Handbook* (Soil Conservation Service, 1983) besarnya prakiraan hasil sedimen dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut ini:

$$SY = (Ea \times SDR) WS$$

dimana :

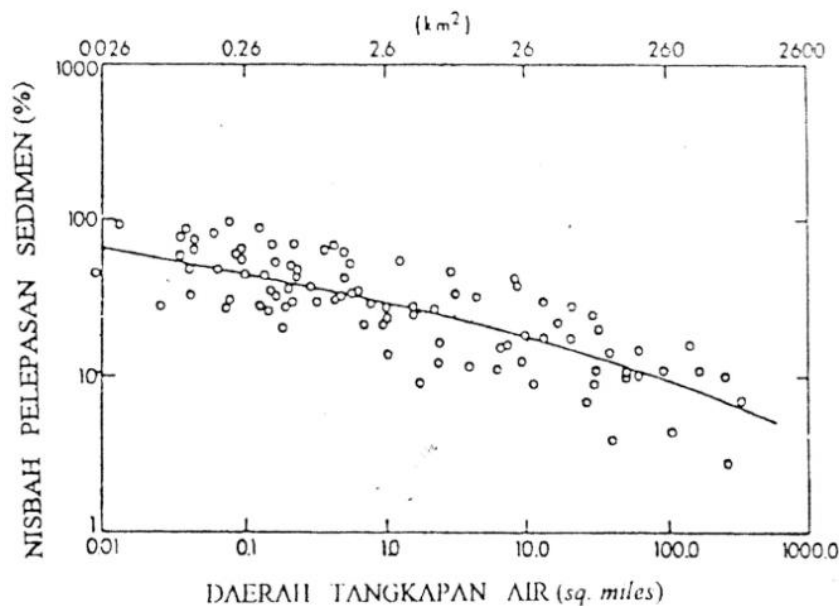
SY = jumlah sedimen per satuan luas (ton/tahun)

SDR = *sediment delivery ratio*

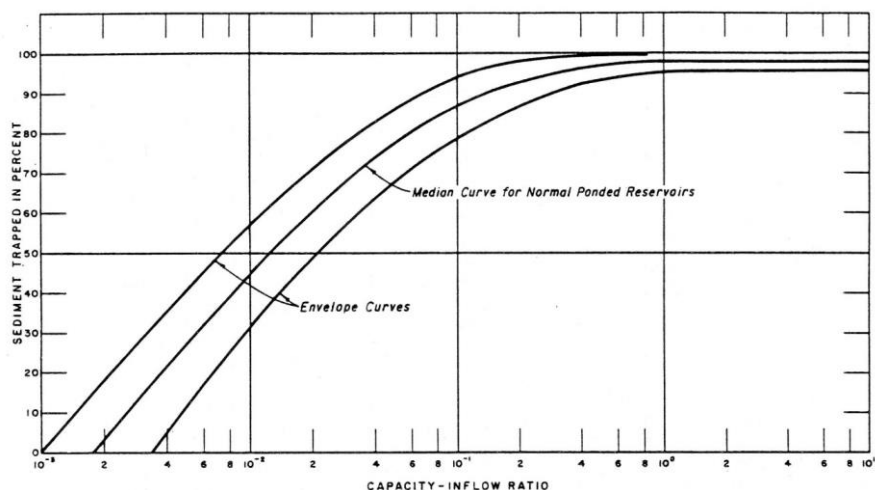
Ea = erosi total (ton/ha/tahun)

WS = luas DAS (ha)

Nilai SDR dapat ditentukan dari nomograf SDR seperti terlihat pada Gambar 1. Kemampuan waduk untuk menahan dan mengendapkan sedimen tersebut disebut koefisien penangkap atau *trap efficiency*, yang dinyatakan terhadap persen terhadap banyaknya sedimen yang terbawa aliran masuk. Efisiensi penangkap sedimen tergantung pada kapasitas waduk dan besarnya inflow tahunan ke dalam waduk. Hubungan empiris untuk memperkirakan nilai efisiensi tangkapan waduk dinyatakan dalam grafik hubungan kapasitas dan inflow tahunan waduk seperti pada Gambar 2 yang dikembangkan oleh Brune (1953).



Gambar 1. Nomograf untuk menghitung nilai SDR (Asdak, 2014)



Gambar 2. Kurva Brune untuk memperkirakan prosentase sedimen mengendap di waduk

Distribusi Sedimen di Waduk

Analisis distribusi sedimen dalam penelitian ini menggunakan Metode Empiris Pengurangan Luas (*Empirical Area Reduction Method*), metode ini memiliki tingkat kesalahan yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan metode empiris penambahan luas (Tukaram, 2016). Pada dasarnya kedua metode tersebut dapat diselesaikan dengan langkah-langkah berikut ini (Morris and Fan, 2009):

- a. Menentukan volume sedimen yang mengendap di waduk.
- b. Memilih kurva untuk memplotkan titik hubungan antara nilai F dan kedalaman relatif (p). Tipe kurva ditentukan berdasarkan:
 - 1) Bentuk waduk, ditentukan menurut dalam Tabel 5, penentuan nilai m (nilai hubungan kedalaman dan kapasitas waduk) didasarkan pada

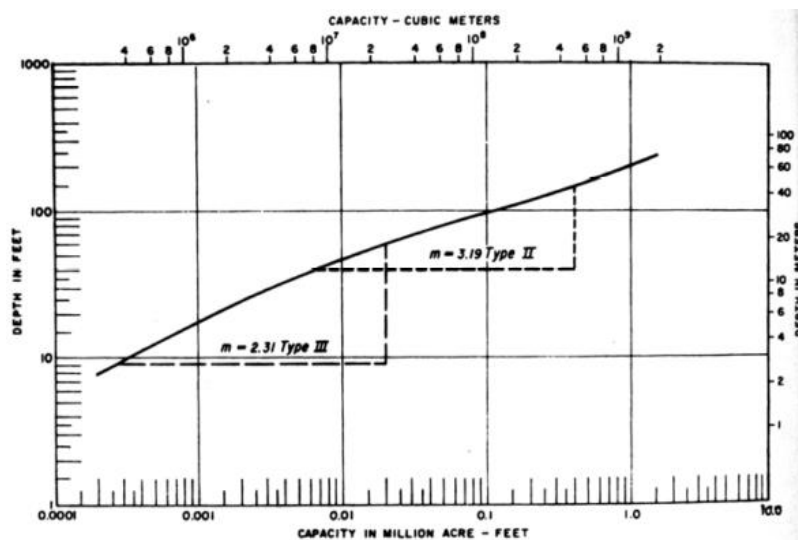
- hubungan kedalaman dan tampungan waduk seperti pada Gambar 3. jika nilai m bervariasi maka dapat diambil nilai m yang paling dominan
- 2) Sistem operasi waduk, ditentukan menurut Tabel 6,
 - 3) Ukuran butiran sedimen, ditentukan menurut Tabel 7.

Tabel 5. Bentuk waduk dan tipe kurva

Bentuk waduk	Tipe kurva	m
Danau	I	3,5 - 4,5
Dataran – kaki bukit	II	2,5 – 3,5
Bukit - pegunungan	III	1,5 – 2,5
Pegunungan	IV	1,0 – 1,5

Tabel 6. Sistem operasi waduk dan tipe kurva

Operasi waduk	Tingkat operasional	Tipe	Tipe Kurva
Sedimen terendam di waduk	I	I	I
		II	I atau II
		III	II
Surutan muka air waduk sedang	II	I	I atau II
		II	II
		III	II atau III
Surutan muka air waduk cukup besar	III	I	II
		II	II atau III
		III	III
Dalam keadaan normal waduk kosong	IV		IV



Gambar 3. Contoh penentuan nilai m (Nilai Hubungan Kedalaman dan Kapasitas Waduk)

Tabel 7. Ukuran butiran sedimen waduk dan tipe kurva

Ukuran butiran sedimen yang dominan	Tipe
Pasir atau material kasar	I
Lanau	II
Lempung	III

Salah satu cara pemilihan tipe kurva distribusi sedimen dapat menggunakan acuan pada Tabel 7. Model distribusi sedimen salah satunya dipengaruhi oleh jenis sedimen dominan yang ada. Material kasar dan lebih kasar akan didistribusikan dan mengendap di daerah hulu waduk sementara material yang lebih halus akan diendapkan di dekat as bendungan atau dihilir waduk.

- a. Menentukan kedalaman nol baru pada waduk dengan menentukan Fungsi tak berdimensi (F) tiap-tiap elevasi dengan persamaan (Morris and Fan, 2009) :

$$F = \frac{S - V_h}{H A_h}$$

dengan S = total sedimen yang mengendap (m^3), H = kedalaman waduk mula-mula (m), V_h = volume total waduk pada kedalaman elevasi H (m^3), A_h = luas total waduk pada kedalaman elevasi H (m^2). Nilai p (kedalaman relatif) dapat dihitung dengan persamaan (Morris and Fan, 2009) :

$$p = \frac{h}{H}$$

dengan h = kedalaman pada elevasi H (m) dan H = kedalaman total mula-mula (m). Nilai F dan p di plot kedalam grafik seperti pada Gambar 4 untuk dicari perpotongannya dengan kurva yang ditentukan sebagai dasar penentuan elevasi nol waduk yang baru setelah T-tahun.

- b. Mendistribusikan sedimen pada setiap kedalaman waduk berdasarkan kurva tipe waduk yang ditentukan dengan menghitung luas relatif (a) berdasarkan kedalaman relatif (p) menggunakan persamaan (Morris and Fan, 2009) :

$$\text{tipe I: } a = 5,047p^{1,85} (1-p)^{0,36}$$

$$\text{tipe II: } a = 2,487p^{0,57} (1-p)^{0,41}$$

$$\text{tipe III: } a = 16,967p^{1,15} (1-p)^{2,32}$$

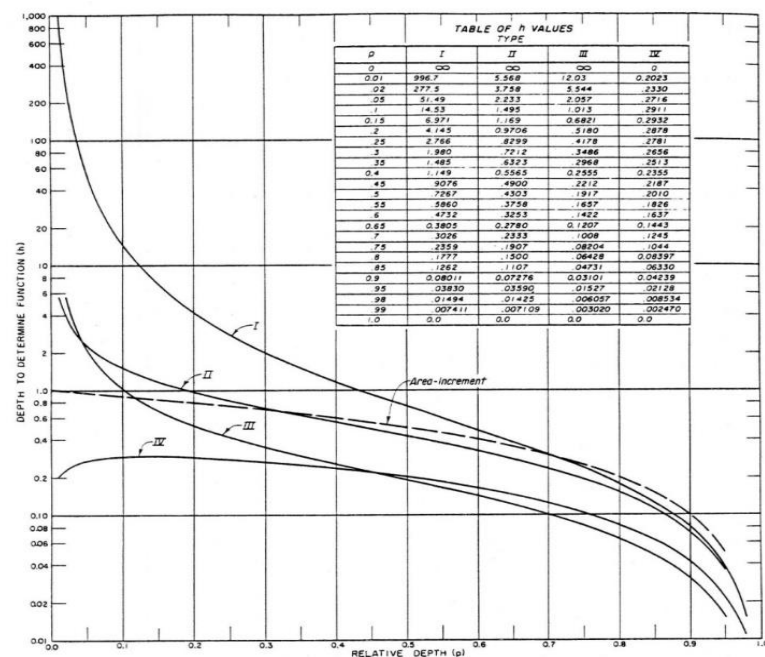
$$\text{tipe IV: } a = 1,486p^{-0,25} (1-p)^{1,34}$$

- c. Menghitung luas terkoreksi dengan membagi luas tampungan awal pada elevasi nol baru dengan luas relatifnya.
- d. Menghitung luas terdistribusi pada tiap elevasi dengan mengkalikan luas tampungan awal dengan luas terkoreksi pada point (e) untuk elevasi diatas nol baru.
- e. Menghitung distribusi sedimen pada tiap-tiap elevasi dengan Persamaan (Morris and Fan, 2009):

$$V_{sh} = \frac{a_h + a_{h-1}}{2} \cdot \Delta h$$

dengan V_{sh} = volume sedimen pada kedalaman h (m^3), a_h = luas terdistribusi pada kedalaman h (m^2), a_{h-1} = luas terdistribusi pada kedalaman h-1 (m^2), Δh = selisih kedalaman (m).

Menghitung tampungan aktual waduk setelah T-Tahun dengan mengurangi tampungan awal dengan distribusi sedimen pada tiap-tiap elevasi pada point (g).



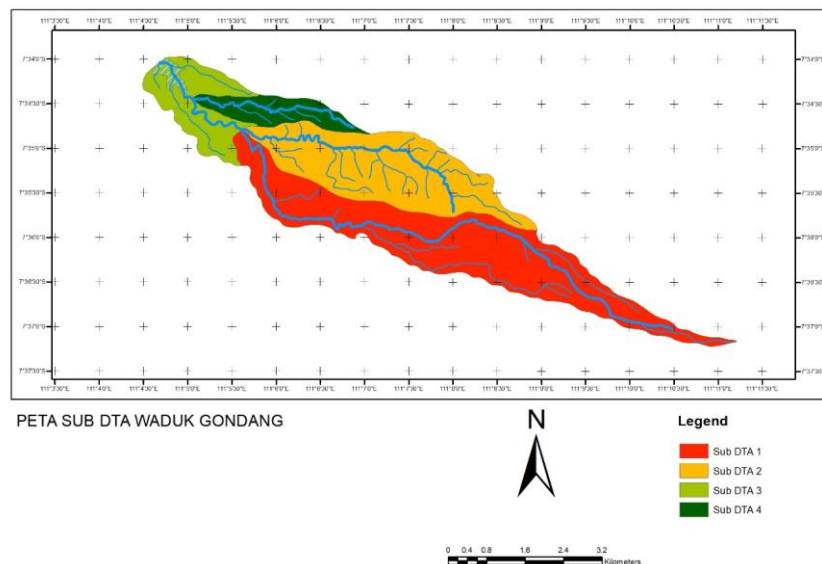
Gambar 4. Grafik Hubungan Kedalaman Relatif dan Nilai F (Morris and Fan, 2009)

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan hubungan antara kedalaman relative dan nilai F. dalam analisis distribusi sedimen kurva tipe terpilih digunakan untuk menentukan elevasi dasar waduk yang baru akibat deposisi swdimen. Dari keempat kurva pada Gambar 4 dipilih tipe kurva sesuai dengan bentuk dan karakteristik waduk.

HASIL

Erosi DTA Waduk

Laju erosi merupakan besarnya erosi lahan yang terjadi pada DTA waduk yang berpotensi menjadi sumber terjadinya sedimentasi pada waduk. Besarnya erosi aktual dihitung dari perkalian faktor-faktor yang mempengaruhi. Rekapitulasi perhitungan erosi aktual tiap sub DTA Waduk dapat dilihat pada Tabel 8. Pembagian sub DTA waduk dapat dilihat pada Gambar 5. Dari perhitungan pada Tabel 8, erosi aktual yang terjadi pada DTA Waduk Gondang sebesar 490.868,02 Ton/Th. Dengan DTA Waduk seluas 2.095,337 Ha, didapatkan total erosi aktual rata-rata yang terjadi adalah sebesar 234,27 Ton/Ha/Th.. Erosiaktual yang terjadi pada Waduk Gondang dalam analisis ini mengalami peningkatan dari analisis dari Detai Desain Waduk. Perbedaan yang cukup signifikan ini dikarenakan perbedaan penentuan parameter USLE.



Gambar 5. Pembagian Sub DTA Waduk Gondang

Daerah Tangkapan Air Waduk Gondang (DTA) terbagi menjadi 4 Sub DTA yang pada masing-masing Sub DTA mengalir sungai utama yang bermuara ke Waduk Gondang. Sub DTA dengan luasan paling besar adalah Sub DTA 1 dengan luas 910,684 ha atau sebesar 43,5% dari total luas DTA Waduk Gondang.

Nama Sub DTA	Luas (Ha)	Luas (km ²)	R (KJ/Ha/th)	K (Ton/KJ)	LS	C	P	Ea (Ton/Th)
Sub DTA 1	910,684	9,10684	3.034,703	0,4343	0.485	0,430	0,787	198.643,77
Sub DTA 2	626,532	6,26532	3.034,703	0,5533	0.338	0,660	0,812	191.939,23
Sub DTA 3	405,092	4,05092	3.034,703	0,4674	0.257	0,660	0,722	70.959,56
Sub DTA 4	153,029	1,53029	3.034,703	0,5600	0.265	0,581	0,728	29.325,46
Total	2095,337	20,95337						490.868,02

Distribusi Sedimentasi di Waduk

Prediksi laju sedimentasi di Waduk Gondang dihitung berdasarkan hasil erosi lahan dikali faktor SDR dan nilai *trap efficiency*. Dengan luasan daerah tangkapan (A) 20,95 km² didapatkan nilai SDR sebesar 0,4047. Hasil sedimen pada Waduk Gondang dihitung dari perkalian antara erosi aktual yang terjadi pada DTA waduk dengan nisbah pelepasan sedimen. Sedimen potensial yang diperkirakan terjadi sebesar 198.671,79 Ton/Th. Dengan berat jenis sedimen 1,7 Ton/m³, didapatkan total hasil sedimen sebesar 116.865,76 m³/tahun. Nilai total sedimen potensial tadi harus dikalikan nilai *trap efficiency* agar diperoleh sedimen yang terdeposisi. Nilai *trap efficiency* dipengaruhi oleh *capacity-inflow ratio* (C/I) waduk kemudian diplot ke dalam grafik pada Gambar 6. *Capacity-inflow ratio* pada Waduk Gondang sebesar 4,24 sehingga nilai *trap efficiency* adalah sebesar 99% dan diperoleh total sedimen terdeposisi di waduk sebesar 115.697,10

m³/tahun. Sedimen terdistribusi tidak hanya pada tampungan matinya saja tapi juga pada tampungan efektifnya. Selama 30 tahun sedimen yang terdeposisi sebesar 3.470.913,09 m³. Sedimen ini terdistribusi pada tampungan mati sebesar 1.760.891,38 m³, pada tampungan efektif sebesar 1.570.563,27 m³ dan pada tampungan banjir sebesar 107.164,74 m³. Perbandingan kapasitas tampungan awal (T₀) dan akhir (T₃₀) pada Waduk Gondang dapat dilihat pada Tabel 9.

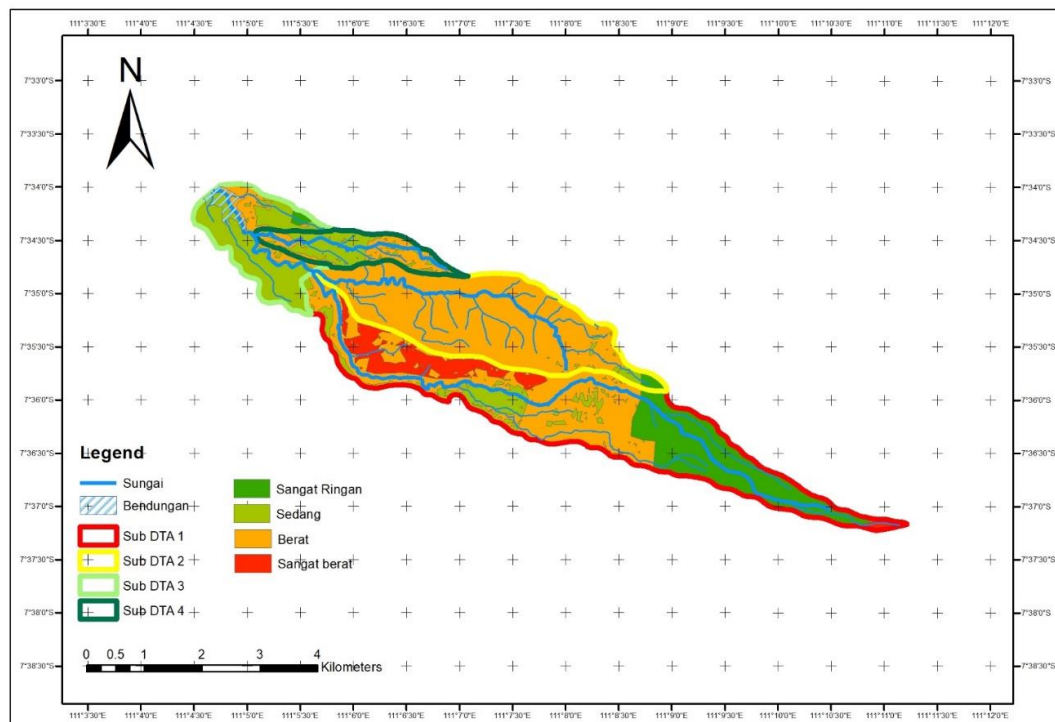
Tabel 9. Perbandingan kapasitas tampungan Waduk Gondang

Tampungan	Awal (m ³)	Sedimen (m ³)	Sisa (m ³)
Banjir	1.177.431,06	107.164,74	1.070.266,32
	100%	9,10%	90,90%
Efektif	5.029.130,61	1.570.563,27	3.458.567,34
	100%	31,23%	68,77%
Mati	2.035.468,68	1.760.891,38	274.577,30
	100%	86,51%	13,49%

Optimalisasi Pemeliharaan Sedimen

Optimalisasi kegiatan pemeliharaan waduk dilakukan dengan 3 alternatif yaitu Perbaikan DTA (Konservasi), pembuatan cek dam dan *dredging*. Penilaian tingkat optimal dilakukan dengan membandingkan sisa kapasitas tampungan pada waduk di akhir usia gunanya dari masing-masing alternatif. Perbaikan DTA yang dilakukan diutamakan pada sub DTA 1 dan sub DTA 2 dimana memiliki tingkat bahaya erosi dominan berat dan sangat berat terluas. Perbaikan DTA dilakukan dengan pembuatan teras bangku pada lahan dengan tingkat bahaya erosi berat dan sangat berat dengan kemiringan > 8% dengan tutupan lahan berupa lahan pertanian kering, pertanian kering semak dan perkebunan. Teras bangku dilakukan pada sub DTA 1 seluas 484,28 Ha dan pada sub DTA 2 seluas 555,13 Ha. Luas lahan tersebut merupakan luasan lahan yang memiliki TBE berat dan sangat berat (Gambar 6).

Perbaikan lahan dengan teras bangku akan mempengaruhi salah satu parameter USLE yaitu parameter P atau parameter pencegahan erosi dengan usaha konservasi. Sedimen potensial yang terjadi pada waduk setelah dilakukan upaya konservasi berupa pembuatan teras bangku mengalami penurunan sebesar 64.878,48 m³/th. Dari penurunan nilai sedimen potensial tahunan tersebut akan berpengaruh terhadap distribusi sedimen selama waduk beroperasi. Perbandingan kapasitas tampungan awal (T₀) dan akhir (T₃₀) setelah dilakukan konservasi pada Waduk Gondang. Pembuatan cek dam direncanakan pada sub DTA 1, sub DTA 2, dan sub DTA 3. Analisis dilakukan dengan menggunakan pemrograman linier *solver* dengan memaksimalkan kapasitas tampungan cek dam dengan batasan biaya maksimal sebesar biaya pelaksanaan konservasi dan batasan kesesuaian tinggi cek dam pada potongan sungai setempat.

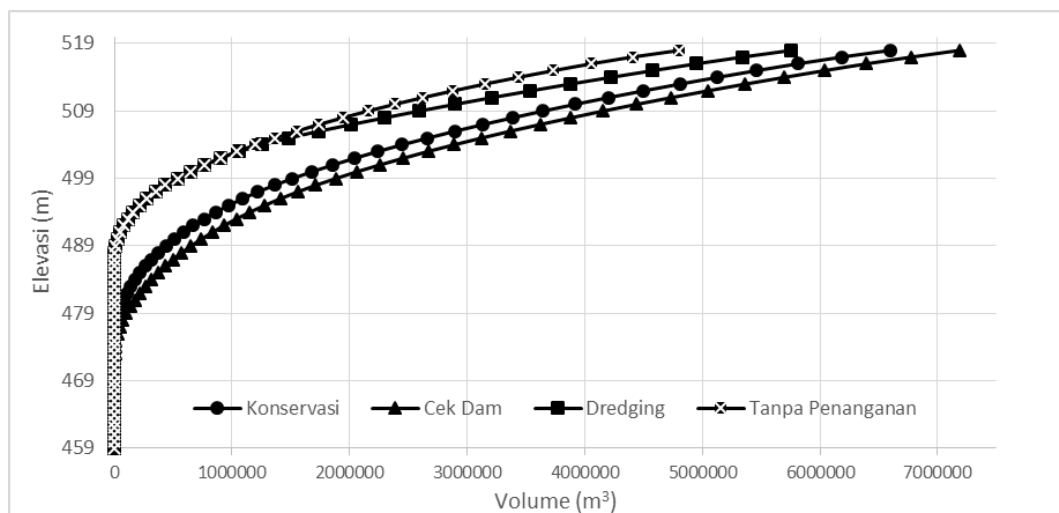


Gambar 6. Peta TBE (Tingkat Bahaya Erosi) DTA Waduk Gondang

Berdasarkan analisis pemrograman linier diperoleh hasil, cek dam yang dibangun untuk sungai sub DTA 1 sebanyak 4 buah dengan tinggi 3 m untuk sub DTA 2 sebanyak 4 buah dengan tinggi 4 m, sedangkan ada sub DTA 3 sebanyak 1 buah cek dam dengan tinggi 3 m. Total kemampuan cek dam untuk mengurangi laju sedimentasi sebesar 104.023,21 m³/tahun. Laju sedimentasi pada DTA Waduk Gondang setelah dibangunnya cek dam menjadi 29.548,46 m³. *Dredging* dilakukan pada kapasitas tampung efektif dan tampungan banjir. Kapasitas *dredging* tiap tahun sebesar 35.126,97 m³ yang diperoleh dari biaya maksimal untuk ketiga skenario dan analisa harga satuan pekerjaan *dredging* (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2016). Dari ketiga skenario diatas didapatkan hasil distribusi sedimentasi Waduk Gondang selama umur efektifnya dapat dilihat pada Tabel 10. Perbandingan kurva lengkung kapasitas Waduk Gondang setelah 30 tahun (umur efektif) dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 10. Sisa kapasitas tiap tampungan

Tampungan	Awal	Konservasi		Cek dam		Dredging	
	Juta m ³	Juta m ³	%	Juta m ³	%	Juta m ³	%
Banjir	1,177	1,132	96,19%	1,149	97,67%	1,177	100,00%
Efektif	5,029	4,371	86,93%	4,626	91,99%	4,302	85,55%
Mati	2,035	1,088	53,49%	1,410	69,29%	0,274	13,49%
Total	8,242	6,593		7,186		5,754	



Gambar 7. Perbandingan kurva lengkung kapasitas Waduk Gondang setelah 30 tahun

Berdasarkan Gambar 7 dengan dilakukan pemeliharaan pembangunan cek dam, kapasitas waduk pada akhir umur layanannya memberikan kapasitas paling besar yaitu sebesar 7,186 juta m^3 . Skenario pemeliharaan lainnya berupa konservasi memberikan sisa kapasitas tampungan sebesar 6,593 juta m^3 dan dengan dredging memberikan sisa kapasitas tampungan sebesar 5,754 juta m^3 .

PEMBAHASAN

Erosi DTA Waduk

Erosi lahan yang terjadi pada Waduk gondang sebesar 490.868,02 Ton/Th mengalami peningkatan hampir 2 kali lipat dari perhitungan erosi sebelumnya (Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, 2012). Hal ini dipengaruhi oleh pengambilan parameter USLE seperti nilai R, P, LS, K, dan C juga berbeda dari penelitian sebelumnya. Pada penelitian sebelumnya parameter USLE tidak dijelaskan secara rinci proses pengambilan nilai dan factor nya sehingga tidak dapat digunakan sebagai perbandingan hasil erosi yang didapatkan dengan enelitian ini. Hasil erosi yang mengalami peningkatan mengindikasikan bahwa laju sedimen potensial yang terjadi pada Waduk Gondang akan mengalami peningkatan dari rencana.

Distribusi Sedimentasi Waduk

Prediksi laju sedimentasi pada waduk gondang sebesar 115.697,10 m^3 /tahun. Laju sedimentasi ini dipengaruhi oleh laju erosi aktual yang terjadi dan faktor pengurang yaitu *sedimen delivery ratio* dan *trap efficiency*. Sediment delivery ratio merupakan prosentase kemungkinan erosi aktual yang terjadi akan mengalir melalui sungai kemudian masuk ke dalam waduk. Nilai SDR dipengaruhi oleh luas Daerah Tangkapan Air (Asdak, 2014). Pada Gondang nilai SDR tiap sub DTA bernilai antara 0,4 – 0,6 yang berarti bahwa rata-rata 50% hasil erosi dialirkan melalui sungai menuju ke waduk. Volume sedimen yang mengalir ke dalam waduk tidak semua diendapkan ke waduk, sebagian lain akan mengalir keluar waduk melalui *outflow* dan *spillout* waduk. *Outflow* waduk

merupakan pengeluaran dari waduk untuk memenuhi kebutuhan irigasi dan air baku, sementara *spillout* berupa kelebihan air yang dibuang melalui *spillway*. Besarnya sedimen yang terdeposisi ini ditentukan oleh prosentase *trap efficiency* yang ditentukan berdasarkan perbandingan volume inflow dan kapasitas waduk (Brune, 1953). Pada Waduk Gondang didapatkan nilai *trap efficiency* sebesar 99% yang berarti bahwa 99% sedimen yang masuk akan mengendap sementara 1% lainnya akan keluar melalui *outflow* dan atau *spillout*

Optimalisasi Pemeliharaan Sedimen

Skenario pengelolaan sedimentasi pada Waduk Gondang menggunakan 3 skenario yaitu konservasi lahan dengan pembuatan teras bangku, pembuatan cek dam dan *dredging*. Konservasi yang dilakukan berupa pembuatan teras bangku untuk lahan dengan tingkat bahaya erosi berat dan sangat berat pada sub DTA 1 dan sub DTA 2 Waduk Gondang. Dengan pembuatan teras bangku pada lokasi tersebut laju sedimentasi yang terjadi mengalami penurunan sebesar 64.878,48 m³/tahun. Distribusi sedimentasi setelah dilakukan konservasi DTA waduk menunjukkan hasil bahwa setelah umur efektif waduk berakhir sisa tampungan efektif waduk sebesar 86,93% atau sebesar 4.371.781,55 m³. Pembangunan cek dam sebanyak 9 buah pada sungai sub DTA 1 (4 buah), sungai sub DTA 2 (4 buah), dan sungai Sub DTA 3 (1 buah) dengan kapasitas total tampungan sebesar 104.023,21 m³, sehingga laju sedimentasi berkurang menjadi 29.548,46 m³/th. Distribusi sedimentasi setelah dilakukan pembangunan cek dam menunjukkan hasil bahwa setelah umur efektif berakhir sisa tampungan efektif waduk sebesar 91,99 % atau sebesar 4.626.246,31 m³, tampungan banjir sebesar 97,67 % atau sebesar 1.149.940,93 m³ dan tampungan mati sebesar 69,29 % atau sebesar 1.410.288,52 m³. *Dredging* yang dilakukan pada Waduk Gondang dengan kapasitas 35.126,97 m³/th. Distribusi sedimentasi setelah dilakukan *dredging* menunjukkan hasil bahwa setelah umur efektif waduk berakhir sisa tampungan efektif sebesar 85,55% atau sebesar 4.302.664,21 m³, tampungan banjir sebesar 100% atau 1.77.431,06 m³ dan tampungan mati sebesar 13,49 % atau 274.577,30 m³.

Skenario pengelolaan sedimentasi pada Waduk Gondang yang optimal didasarkan pada kemampuannya dalam menjaga kapasitas tampungan waduk. Prioritas utama yang dinilai adalah kapasitas tampungan efektif waduk pada akhir umur efektifnya. Prioritas berikutnya adalah kapasitas tampungan banjir dan kapasitas tampungan mati. Dari hasil penilaian masing-masing skenario didapatkan skenario yang paling optimal adalah dengan pembuatan cek dam.

KESIMPULAN

Sedimentasi yang terjadi pada Waduk Gondang diprediksi berdasarkan hasil erosi lahan yang terjadi pada DTA waduk. Erosi aktual yang terjadi pada DTA Waduk Gondang sebesar 234,27 Ton/Th/Ha. Dengan luas DTA Waduk sebesar 2.095,337 Ha, didapatkan total erosi aktual yang terjadi adalah sebesar 490.868,02 Ton/Th. Sedimentasi yang terjadi pada waduk dihitung berdasarkan hasil erosi aktual dikali *sediment delivery ratio* sebesar 0,4047 dan nilai *trap efficiency* waduk sebesar 99%. Sehingga total sedimen terdeposisi di waduk sebesar 115.697,10 m³/tahun. Untuk jangka waktu 30 tahun (umur efektif waduk)

diperoleh sedimen yang mengendap sebesar 3.470.913,09 m³. Dari hasil analisis skenario pemeliharaan waduk yang paling optimal didapatkan pengelolaan dengan konservasi setelah umur efektif waduk berakhir sisa tampungan efektif waduk sebesar 86,93% atau sebesar 4.371.781,55 m³, tampungan banjir sebesar 96,19% atau sebesar 1.132.577,95 m³ dan tampungan mati sebesar 53,49% atau sebesar 1.088.775,16 m³. Skenario pengelolaan sedimen dengan pembangunan cek dam menghasilkan sisa kapasitas tampungan efektif sebesar 91,99% atau sebesar 4.626.246,31 m³, tampungan banjir sebesar 97,67 % atau sebesar 1.149.940,93 m³ dan tampungan mati sebesar 69,29 % atau sebesar 1.410.288,52 m³. Skenario pengelolaan sedimen dengan *dredging* menghasilkan sisa tampungan efektif sebesar 85,55% atau sebesar 4.302.664,21 m³, tampungan banjir sebesar 100% atau 1.177.431,06 m³ dan tampungan mati sebesar 13,49 % atau 274.577,30 m³. Skenario yang paling optimal adalah dengan pembangunan cek dam karena menghasilkan sisa kapasitas tampungan efektif yang paling besar diantara skenario yang lain. Kapasitas tampungan efektif inilah yang digunakan dalam pemenuhan kebutuhan air oleh waduk selama waduk beroperasi.

SARAN

Sedimentasi pada Waduk Gondang terdistribusi pada *dead storage* dan *effective storage*. Hasil yang didapatkan merupakan hasil berdasarkan analisis teori karena Waduk Gondang belum dilakukan operasi secara penuh. Untuk mendapatkan laju sedimentasi actual perlu dilakukan monitoring sedimentasi setiap satu tahun sekali untuk awal masa operasi Waduk Gondang. Jika hasil monitoring yang dihasilkan tidak menunjukkan peningkatan laju sedimentasi yang signifikan, kegiatan monitoring dapat diperpanjang menjadi 3 tahun sekali. Untuk keberlanjutan fungsi waduk sepanjang umur efektif perlu disusun kegiatan pemeliharaan terkait sedimentasi khususnya pada tampungan efektif Waduk Gondang agar waduk dapat memiliki nilai manfaat tetap.

DAFTAR RUJUKAN

- Arsyad. 2006. *Konservasi Tanah dan Air*. Institut Pertanian Bogor.
- Asdak, C. 2014. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Asrib, A.R. 2012. Model Pengendalian Sedimentasi Waduk Akibat Erosi Lahan Dan Longsoran Di Waduk Bili-Bili Sulawesi Selatan. Desertation. Institut Pertanian Bogor.
- Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. 2012. Detail Desain Bendungan Gondang kabupaten Karanganyar. Sukoharjo.
- Brune, G.M. 1953. Trap efficiency of reservoirs. Eos, Trans. Am. Geophys. Union 34, 407–418. <https://doi.org/10.1029/TR034i003p00407>
- Harmayanti, K.D., Konsukartha, G.M., Permana, ida B.D. 2015. Analisis Tingkat Erosi dan Sedimentasi di Danau Buyan. Pros. Konf. Nas. Tek. Sipil 9.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2016. Permen PUPR No 28 Tahun 2016 Tentang AHSP.

- Kironoto, B.A., Yulistiyanoto, B. 2000. Konservasi Lahan. Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Morris, G.L., Fan, J. 2009. *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: McGraw Hill
- Soil Conservation Service. 1983. National Engineering, in: National Engineering Handbook Section 3 : Sedimentation. United States Departement of Agriculture, Washington DC.
- Suripin. 2004. *Sistem Drainase Perkotaan Yang Berkelanjutan*. Yogyakarta: Andi Offset
- Tukaram, S., Civil, S.M.E., Engineering, H. 2016. Comparison of area reduction method and area increment method for reservoir sedimentation distribution - Case study Ujjani dam 2, 108–111.