

Sebaran potensi kekeringan meteorologis di Daerah Aliran Sungai Bengawan Solo bagian hulu dan upaya penanggulangannya

Diah Auliyani* dan Nining Wahyuningrum

Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPPTPDAS), Kartasura, Surakarta, Indonesia.

Direvisi: 2019-01-03. Diterima: 2019- 08-22
©2019 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

Abstrak Variabilitas hujan menyebabkan setiap wilayah berpotensi mengalami kekeringan. Waduk Gajah Mungkur telah berkontribusi menanggulangi kekeringan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Bengawan Solo, namun pengelolaannya menghadapi ancaman pendangkalan akibat erosi. Tujuan penelitian ini untuk mengidentifikasi potensi kekeringan di DAS Bengawan Solo bagian hulu, dan mengidentifikasi penyebab pendangkalan Waduk Gajah Mungkur untuk upaya penanggulangannya. *Standardized precipitation index* (SPI) dari 93 stasiun hujan menunjukkan nilai bervariasi mulai -2,621 (amat sangat kering) hingga 7,689 (amat sangat basah). Kekeringan meteorologis yang terjadi berdurasi antara 1-7 bulan. Wonogiri merupakan kabupaten yang paling sering terpapar kekeringan. Karena ancaman pendangkalan, pembangunan Waduk Gajah Mungkur menjadi kurang efektif dalam menanggulangi kekeringan yang terjadi. Berdasarkan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE), erosi yang terjadi di hulu berperan terhadap pengurangan volume waduk. Beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk menjaga daya tampung waduk adalah pengerukan secara berkala, revegetasi, dan pengolahan lahan yang tepat. Revegetasi dan pengolahan lahan yang tepat dapat dilakukan terutama di daerah dengan tingkat bahaya erosi berat dan sangat berat. Pencegahan pendangkalan waduk ini diharapkan dapat menjaga kontinuitas ketersediaan sumber daya air.

Kata kunci: kekeringan, erosi, Gajah Mungkur, Wonogiri

Abstract *Rainfall variability causes every region to experience drought. Gajah Mungkur Reservoir has contributed to the drought prevention in Bengawan Solo Watershed, but its management faces the threat of siltation for soil erosion. This study were aimed to identify potential droughts in the upstream Bengawan Solo Watershed and to identify the causes of siltation in the Gajah Mungkur Reservoir for its prevention efforts. Standardized precipitation index (SPI) of 93 rainfall stations varies from -2,621 (extremely drought) to 7,689 (extremely wet). The meteorological drought duration was between 1 to 7 month. Wonogiri is the most drought-exposed. For the threat of silting, the Gajah Mungkur Reservoir has become less effective in dealing with the drought. Based on the Universal Soil Loss Equation (USLE) method, soil erosion in the upstream contributes to the reduction in reservoir volume. Some efforts that should be done to maintain reservoir capacity are periodic dredging, revegetation, and proper land management. Revegetation and proper land management can be carried out in areas with severe and very severe erosion hazards. Prevention of silting of reservoirs is expected to maintain water resources availability.*

Keywords: drought, soil erosion, Gajah Mungkur, Wonogiri

PENDAHULUAN

Secara sederhana, kekeringan ditandai dengan jumlah curah hujan yang lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi normalnya (Mishra & Singh, 2010; Sönmez et al., 2005; Wilhite & Glantz, 1985). Mengacu pada pengertian tersebut, setiap daerah berpotensi untuk mengalami kekeringan. Banyak penelitian yang mengutarakan bahwa kekeringan menjadi bencana alami yang paling kompleks. Selain berdampak buruk pada sektor pertanian, kekeringan juga memberikan efek negatif pada sumberdaya air, kegiatan pariwisata, ekosistem, dan kesejahteraan manusia secara luas (Dai, 2011). Secara terperinci, Wilhite (2000) menyebutkan bahwa dampak buruk kekeringan tidak hanya bergantung pada durasi, intensitas, maupun lokasi geografisnya, namun

juga dipengaruhi oleh aktivitas manusia dan tumbuhan dalam memanfaatkan sumberdaya air.

Sebagai negara kepulauan dengan variabilitas iklim yang tinggi, Indonesia juga menghadapi ancaman kekeringan. Tingkat potensi kekeringan tertinggi di Indonesia berada di Pulau Jawa (Amri et al., 2016). Kekeringan memiliki dampak terburuk jika dibandingkan dengan bencana alami lainnya (Wilhite, 2000). Tercatat sebanyak lebih dari 130 juta jiwa yang terpapar kekeringan di Pulau Jawa, dengan kerugian finansial mencapai Rp.56 milyar dan kerusakan lingkungan seluas lebih dari 526 ribu ha (Amri et al., 2016).

Kekeringan meteorologis merupakan analisis kekeringan yang hanya berdasarkan pada variabilitas hujan. Dalam

lingkup Daerah Aliran Sungai (DAS), semakin luas suatu DAS maka variabilitas hujan juga akan semakin tinggi sehingga meningkatkan potensi kekeringan meteorologis. Untuk mengurangi resiko tersebut, diperlukan pengelolaan DAS yang tepat agar sumberdaya air tetap tersedia terutama pada musim kemarau.

DAS Bengawan Solo memiliki daerah pengaliran sekitar 16.100 km² (BBWS Bengawan Solo, 2019). Tujuan utama pemanfaatan sumberdaya air di DAS Bengawan Solo adalah mendukung sektor pertanian di wilayahnya. Oleh karena itu, kontinuitas ketersediaan air akan berdampak pada ketersediaan pangan bagi masyarakat setempat. Di bagian hulu DAS Bengawan Solo telah dibangun Waduk Gajah Mungkur pada seluas ± 8800 ha dengan daya tampung ± 730 juta m³ pada tahun 1981. Utami & Trilaksana (2015) menyebutkan bahwa selain pengendali banjir, waduk tersebut juga berperan dalam mengatasi kekeringan. Keberadaannya mampu mengairi 30.000 ha sawah di Kabupaten Sukoharjo, Klaten, Karanganyar, dan Sragen sepanjang tahun (BBWS Bengawan Solo, 2019). Namun demikian, pendangkalan waduk akibat sedimentasi dari wilayah hulu menjadi masalah utama dalam pengelolaannya. Sedimentasi di waduk ini dipengaruhi oleh laju erosi yang tinggi di daerah hulu (Purnama & Kusumandari, 2011; Santoso et al., 2017; Senawi, 2009). Erosi dan sedimentasi tersebut telah menyebabkan penurunan volume waduk menjadi ± 556 juta m³ pada tahun 2017 (BBWS Bengawan Solo, 2019).

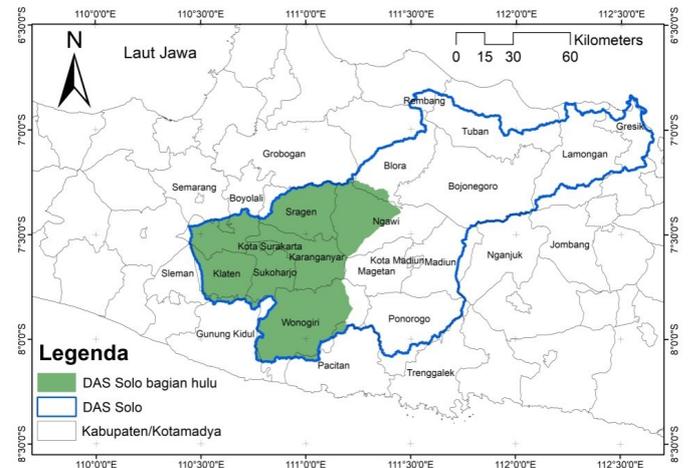
Penanggulangan kekeringan di DAS Bengawan Solo menjadi semakin kurang efektif seiring dengan adanya penurunan volume atau daya tampung Waduk Gajah Mungkur. Pramono & Savitri (2019) menyebutkan bahwa sampai saat ini Wonogiri sebagai daerah hulu DAS Bengawan Solo, merupakan daerah yang rentan terhadap kekeringan. Diperlukan upaya lain selain pembangunan waduk dalam mitigasi kekeringan di DAS Bengawan Solo. Rehabilitasi terutama di area lahan kritis sangat penting dilakukan sebagai solusinya. Sebaran lahan kritis di DAS Bengawan Solo dapat dilihat dari tingkat bahayanya. Diharapkan dengan upaya rehabilitasi ini akan meningkatkan infiltrasi dan mengurangi runoff sehingga mampu meningkatkan fungsi penyimpanan sumberdaya air dalam DAS, sekaligus juga mengurangi erosi yang menyebabkan pendangkalan waduk terutama pada musim hujan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi sebaran potensi kekeringan meteorologis di DAS Bengawan Solo bagian hulu, dan mengidentifikasi penyebab pendangkalan Waduk Gajah Mungkur untuk upaya penanggulangannya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di DAS Solo bagian hulu.

Secara geografis, DAS Solo bagian hulu membentang antara 110°26'27" – 111°02'21" BT dan 7°14'17" – 8°06'41" LS (Gambar 1). Prosedur penelitian ini meliputi 2 tahapan utama, yaitu (1) identifikasi tingkat kekeringan, serta (2) mengidentifikasi penyebab pendangkalan Waduk Gajah Mungkur untuk upaya penanggulangannya.



Gambar 1. Lokasi penelitian

Identifikasi tingkat kekeringan

Pada tahap ini digunakan data rata-rata curah hujan bulanan di 93 stasiun pengamatan hujan di dalam dan sekitar DAS Solo bagian hulu. Stasiun penakar tersebut terletak di 7 kabupaten yang berbeda, yaitu Karanganyar (8 stasiun), Boyolali (11 stasiun), Ngawi (10 stasiun), Sragen (19 stasiun), Klaten (7 stasiun), Sukoharjo (13 stasiun), dan Wonogiri (25 stasiun). Tingkat kekeringan diidentifikasi dengan menggunakan Standardized Precipitation Index (SPI) (Mckee et al., 1993). Nilai SPI atau disebut dengan nilai Z mencerminkan standar deviasi dari curah hujan yang ditentukan menggunakan persamaan 1. Dalam persamaan tersebut, x adalah curah hujan dan σ adalah simpangan baku, sedangkan i merupakan dimensi waktu. Klasifikasi tingkat kekeringan di DAS Solo bagian hulu mengacu pada Tabel 1. Hasil penghitungan SPI di 93 stasiun pengamatan hujan disajikan secara spasial untuk mendapatkan peta sebaran kekeringan di DAS Solo bagian hulu. Distribusi sebaran kekeringan tersebut berupa hasil interpolasi durasi kekeringan dari masing-masing stasiun hujan.

Tabel 1. Klasifikasi tingkat kekeringan berdasarkan SPI

Kategori	Nilai Indeks	Kelas
Bukan kekeringan	$SPI \geq 2,00$	Amat sangat basah
	$1,50 \leq SPI < 2,00$	Sangat basah
	$1,00 \leq SPI < 1,50$	Basah
	$-1,00 \leq SPI < 1,00$	Normal
Kekeringan	$-1,50 \leq SPI < -1,00$	Kering
	$-2,00 \leq SPI < -1,50$	Sangat kering
	$SPI < -2,00$	Amat sangat kering

Sumber : (Cancelliere et al., 2007; Mckee et al., 1993)

$$SPI = Z = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma} \quad (1)$$

Prediksi tingkat bahaya erosi dan distribusi spasialnya

Erosi yang terjadi di DAS Solo bagian hulu berpengaruh besar terhadap sedimentasi di Waduk Gajah Mungkur, yang pada akhirnya berimbas pada penurunan daya tampungnya. Selain data curah hujan, pada tahap ini juga digunakan data penutupan lahan, jenis tanah, dan kelas kemiringan lereng. Pendekatan USLE (Wischmeier & Smith, 1978) digunakan untuk menghitung erosi di DAS Solo bagian hulu (Persamaan 2). Dalam persamaan 2, A adalah laju erosi tanah (ton/ha), R adalah indeks erosivitas hujan, K adalah indeks erodibilitas tanah, L adalah indeks panjang lereng, S adalah indeks kemiringan lereng, C adalah indeks penutupan vegetasi, dan P adalah indeks pengolahan lahan atau tindakan konservasi tanah.

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (2)$$

Indeks erosivitas hujan dihitung menggunakan formulasi Lenvain. Mengacu pada Sulistyono (2011) dan Auliyani & Wijaya (2017), prediksi Lenvain menghasilkan nilai yang paling mendekati dengan hasil pengukuran di lapangan. Dalam persamaan 3 dikemukakan formulasi Lenvain, dimana R adalah indeks erosivitas hujan, sedangkan R_m adalah jumlah curah hujan.

$$R = 2,21 \cdot R_m^{1,36} \quad (3)$$

Nilai variabel K diperoleh dengan menggunakan rumus erodibilitas pada persamaan 4 dan 5 (Wischmeier & Smith, 1978). Pada persamaan tersebut, a merupakan kandungan bahan organik, b adalah kode struktur tanah, dan c merupakan kelas permeabilitas. Kode struktur tanah (b) dikelompokkan menjadi 4 macam, yaitu 1 untuk tanah granular sangat halus, 2 untuk granular halus, 3 untuk granular sedang sampai kasar, dan 4 untuk blok masif. Pengelompokan kelas permeabilitas yang disimbolkan dengan c pada persamaan 4 terbagi menjadi tiga, yaitu 1 untuk cepat, 2 untuk sedang hingga cepat, dan 3 untuk sedang.

$$100K = 2,1 \cdot M^{1,14}(10^{-4})(12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3) \quad (4)$$

$$M = (\%debu + \%pasir\ sangat\ halus) \cdot (100 - \%liat) \quad (5)$$

Penentuan indeks panjang dan kemiringan lereng (LS) maupun indeks penutupan vegetasi dan pengolahan lahan (CP) mengacu pada Peraturan Direktur Jenderal (Perdirjen) Bina Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Perhutanan Sosial (BPDASPS) Nomor P.7/DAS-V/2011 tentang petunjuk teknis Sistem Standar Operasi Prosedur (SSOP) penanggulangan banjir dan tanah longsor (Tabel 2). Kemiringan lereng yang digunakan dalam penelitian ini merupakan ekstraksi dari DEM SRTM yang telah dilakukan reklasifikasi menjadi beberapa kelas sesuai kebutuhan, sedangkan indeks CP bervariasi berdasarkan tipe penutupan

lahan dan kelas lerengnya. Prediksi erosi dilakukan secara spasial dengan menumpang-susun peta hujan, lereng, jenis penutupan lahan, dan tanah. Prosedur tersebut dilakukan dengan menggunakan ArcGIS 9.2. Tingkat Bahaya Erosi (TBE) disajikan secara spasial berdasarkan jumlah erosi pada setiap ketebalan solum tanah.

Tabel 2. Klasifikasi tingkat bahaya erosi

Solum Tanah (cm)	Kelas Erosi				
	I	II	III	IV	V
<15	<15 ton/ha/th	15-60 ton/ha/th	60-180 ton/ha/th	180-480 ton/ha/th	>480 ton/ha/th
>90	S	R	S	B	SB
60-90	R	S	B	SB	SB
30-60	S	B	SB	SB	SB
<30	B	SB	SB	SB	SB

Keterangan: SR = sangat rendah, R = rendah, S = sedang, B = berat, dan SB = sangat berat

Sumber: (BPDASPS, 2011)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tingkat Kekeringan Meteorologis

Potensi kekeringan di DAS Solo bagian hulu menggunakan Standardized Precipitation Index (SPI) menunjukkan nilai yang bervariasi. Nilai SPI tertinggi terjadi di Stasiun Musuk Kabupaten Boyolali pada Bulan Oktober dengan nilai 7,689 (amat sangat basah), sedangkan nilai terendah terjadi pada Bulan Januari di Stasiun Baturetno Kabupaten Wonogiri dengan nilai -2,621 (amat sangat kering). Semakin rendah nilai SPI berkorelasi dengan tingginya tingkat keparahan kekeringan (Hayes et al., 1999). Meskipun variasi nilai SPI dari 93 stasiun sangat tinggi, namun kejadian kekeringan kategori amat sangat kering hanya terjadi sebanyak 10 kali. Kejadian kekeringan kategori sangat kering dan amat sangat kering secara lengkap disajikan dalam Tabel 3.

Di Indonesia, tingkat keparahan kekeringan seringkali berkurang seiring dengan datangnya musim hujan. Puncak musim hujan biasa terjadi pada Desember hingga Februari (Aldrian & Djamil, 2008), sehingga pada bulan tersebut akan sangat kecil kemungkinan untuk terjadi kekeringan. Berdasarkan Tabel 3, diketahui bahwa kejadian kekeringan juga terjadi bahkan pada puncak musim hujan. Analisis SPI pada tulisan ini menggunakan rata-rata curah hujan, dengan kata lain kejadian kekeringan mengindikasikan bahwa hujan pada stasiun tersebut lebih rendah dibandingkan dengan stasiun lainnya. Rendahnya curah hujan dapat diartikan bahwa input bagi sumberdaya air di lokasi tersebut juga berkurang. Jika hal ini terus menerus terjadi maka kekeringan tidak dapat terelakkan.

Nilai SPI yang rendah (<-1) dalam periode tertentu secara berturut-turut dianggap bahwa lokasi tersebut mengalami bencana kekeringan. Pertanian merupakan sektor pertama

Tabel 3. Kejadian sangat kering dan amat sangat kering di lokasi penelitian

Kabupaten	No	Stasiun Penangkar Hujan	Periode Kekeringan	
			Sangat Kering	Amat Sangat Kering
Boyolali	1	Mojosongo	Jul	
Ngawi	1	Mantingan	Feb	
	2	Tretes	Des	
	3	Kedung Galar	Jan	
Sukoharjo	1	Bulu	Feb, Mar, Nov, Des	Apr
	2	Gatak	Feb	
Wonogiri	1	Nguntoronadi		Apr
	2	Giriwoyo	Feb, Mar	
	3	Slogohimo	Mei	
	4	Baturetno	Feb, Mei	Jan, Mar, Apr, Nov, Des
	5	Batuwarno	Apr, Nov	
	6	Kismantoro	Apr	
	7	Puhpelem	Jan	
	8	Tirtomoyo	Feb, Jun, Jul	Jan, Nov, Des

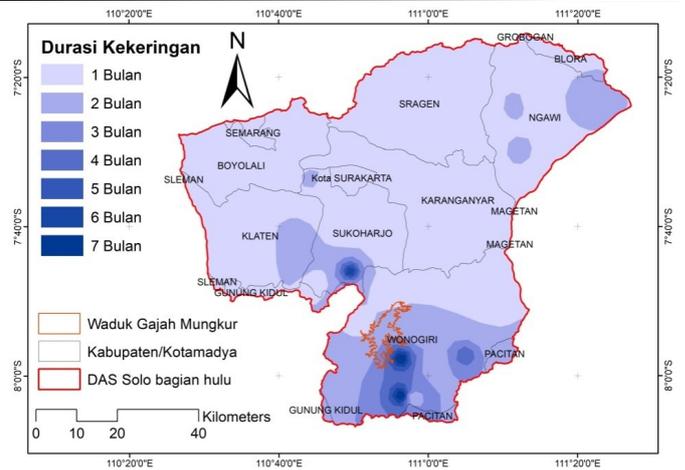
Sumber: Analisis data (2019)

yang akan menerima dampak negatif dari kekeringan (Okpara et al., 2017). Spinoni et al. (2014) menjelaskan bahwa rendahnya curah hujan yang terjadi selama 3 bulan berturut-turut mengakibatkan berkurangnya kelembaban tanah, sehingga berpengaruh pada tanaman yang tumbuh di daerah tersebut. Tabel 4 menjelaskan secara rinci lokasi yang mengalami kekeringan selama 3 bulan berturut-turut atau lebih. Durasi kekeringan terlama adalah 7 bulan yang terjadi pada Bulan Januari-Juli di Stasiun Giriwoyo dan Baturetno. Berdasarkan durasi tersebut, maka dapat diperoleh peta sebaran kekeringan di lokasi penelitian yang disajikan pada Gambar 2.

Tabel 4. Durasi kekeringan di lokasi penelitian

Stasiun	Durasi kekeringan				
	3 bulan	4 bulan	5 bulan	6 bulan	7 bulan
Bulu, Sukoharjo	Okt-Des	-	-	Feb-Jul	-
Giriwoyo, Wonogiri	-	-	-	-	Jan-Jul
Baturetno, Wonogiri	Okt-Des	-	-	-	Jan-Jul
Giritontro, Wonogiri	Jan-Mar	-	-	-	-
Tirtomoyo, Wonogiri	Jan-Mar	Sep-Des	-	-	-

Sumber: Analisis data (2019)

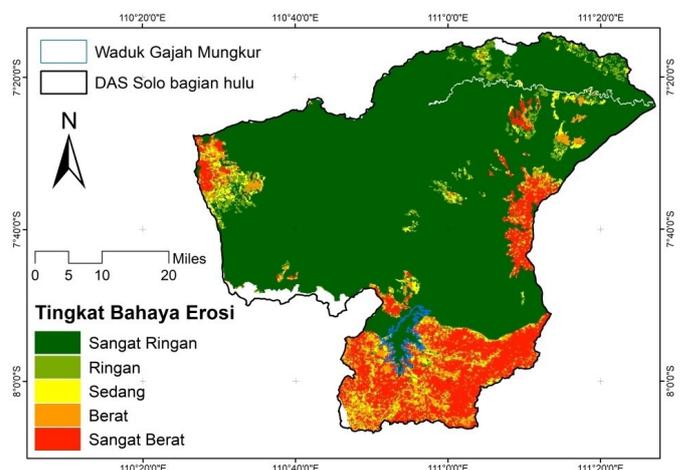


Gambar 2. Sebaran kekeringan di DAS Solo bagian hulu (Pengolahan data, 2019)

Pendangkalan Waduk dan Upaya Penanganannya

Untuk mengatasi kekeringan, pemerintah telah membangun Waduk Gajah Mungkur. Pengelolaan waduk ini menghadapi ancaman berupa pendangkalan atau sedimentasi (Sudarsono et al., 2018). Pembahasan mengenai pendangkalan akibat sedimentasi di Waduk Gajah Mungkur tidak terlepas dari erosi yang terjadi di wilayah hulu. Untuk mengetahui lokasi-lokasi potensial penyebab erosi, maka diperlukan sebaran spasial tingkat bahaya erosi terutama di bagian hulu dari waduk.

Tabel 5 menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah DAS Solo bagian hulu merupakan daerah bahaya erosi yang sangat rendah. Di lain pihak, daerah dengan TBE kategori sangat tinggi menempati urutan kedua terluas. Lebih lanjut terlihat bahwa sebagian besar hutan produksi justru malah menjadi area penyumbang erosi. Hutan memang mampu memperkecil erosivitas hujan dengan adanya penutupan tajuk, namun tumbuhan bawah di lantai hutan lebih berperan dalam pengendalian erosi (Junaidi & Tarigan, 2011). Dengan adanya tumbuhan bawah di lantai hutan, akan memperkecil daya pukulan titik hujan ke tanah, sehingga memperkecil potensi erosi yang dapat terjadi. Distribusi spasial tingkat bahaya erosi di DAS Solo bagian



Gambar 3. Sebaran spasial tingkat bahaya erosi di DAS Solo bagian hulu (Pengolahan data, 2019)

Tabel 5. Tingkat bahaya erosi di DAS Solo bagian hulu

Jenis Penutupan Lahan	Tingkat Bahaya Erosi (Ha)					Jumlah
	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Berat	Sangat Berat	
Hutan produksi	9471,6	9.724,3	13.745,1	10.159,5	17.344,6	60.445,1
Perkebunan	993,5	373,5	2.025,8	887,5	681,0	4.961,4
Permukiman	77.143,1	129,7	75,3	162,5	0,0	77.510,6
Permukiman perkotaan	11.656,2	0,0	0,0	0,0	0,0	11.656,2
Sawah	191.407,0	789,1	547,8	1.085,0		193.829,0
Semak/belukar	2.091,7	0,0	0,0	0,0	0,0	2.091,7
Tanah terbuka	780,8	0,0	0,0	0,0	0,0	780,8
Tegal	140.268,2	16.671,7	1.930,1	10.577,0	53.084,1	222.531,1
Tubuh air	7.070,5	0,0	0,0	0,0	0,0	7070,5
Total	440.882,6 (76%)	27688,4 (5%)	18324,2 (3%)	22871,5 (4%)	71109,7 (12%)	580876,3 (100%)

Sumber: Analisis data (2019)

hulu disajikan dalam Gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan bahwa daerah bahaya erosi kategori berat dan sangat berat malah terjadi di bagian hulu dari waduk. Daerah-daerah tersebutlah yang mempercepat pendangkalan karena menyuplai tanah tererosi untuk masuk ke badan waduk. Pendangkalan akibat sedimentasi telah terjadi pada awal pengoperasian Waduk Gajah Mungkur. Saat ini, rata-rata sedimentasinya mencapai 822,53 ton/ha/tahun yang menyebabkan pendangkalan setebal 6 cm/tahun (Utomo et al., 2012). Apabila kondisi ini tidak dilakukan pengelolaan dengan baik maka fungsi waduk sebagai penampung air guna pengendali kekeringan juga akan semakin menurun.

Untuk mengatasi masalah pendangkalan Waduk Gajah Mungkur, pihak pengelola telah melakukan pengerukan sedimen secara berkala. Tercatat bahwa pada tahun 2016, BBWS Bengawan Solo telah melakukan pengerukan sedimen sebanyak 1,5 juta m³, dan masih ditargetkan sebesar 2,2 juta m³ lagi pada tahun 2017 (Muchus, 2016). Upaya lain yang tidak kalah penting adalah revegetasi dan pengelolaan lahan yang tepat terutama di daerah hulu dari waduk yang merupakan daerah bahaya erosi kategori berat dan sangat berat. Langkah ini dapat mengendalikan jumlah partikel tanah tererosi yang masuk ke badan waduk, sehingga laju sedimentasi/pendangkalan waduk dapat ditekan. Dibandingkan dengan pengerukan secara berkala, upaya ini akan lebih efektif meskipun memerlukan berbagai proses yang cukup panjang. Keberhasilannya membutuhkan partisipasi aktif baik dari pemerintah, masyarakat, maupun stakeholder terkait lainnya.

KESIMPULAN

Standardized precipitation index dapat digunakan untuk menganalisis kekeringan dengan berdasarkan pada rata-rata curah hujan. Durasi kekeringan di DAS Solo bagian hulu bervariasi mulai 1 hingga 7 bulan. Wonogiri merupakan kabupaten paling sering terpapar kekeringan dibandingkan

kabupaten lain di DAS Bengawan Solo bagian hulu.. Tingkat bahaya erosi yang berat dan sangat berat di kawasan hulu menyebabkan pendangkalan Waduk Gajah Mungkur. Selain upaya pengerukan secara berkala, revegetasi dan pengolahan lahan yang tepat di daerah hulu juga penting dilakukan untuk menghambat tanah tererosi mencapai badan waduk.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terselenggara atas dana dari DIPA Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPPTPDAS) Surakarta. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada semua pihak peneliti maupun teknisi BPPTPDAS Surakarta yang telah terlibat dalam penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama berkontribusi dalam analisis kekeringan sedangkan penulis kedua berkontribusi dalam analisis tingkat bahaya erosi. Naskah ini melibatkan kedua belah pihak dalam penulisannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldrian, E., & Djamil, Y. S. (2008). Spatio-temporal climatic change of rainfall in East Java. *International Journal of Climatology*, 28, 435–448. <https://doi.org/10.1002/joc.1543>
- Amri, M. R., Yulianti, G., Yunus, R., Wiguna, S., Adi, A. ., Ichwana, A. ., ... Septian, R. . (2016). *Risiko bencana Indonesia*. (R. Jati & M. . Amri, Eds.). Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Auliyani, D., & Wijaya, W. W. (2017). Perbandingan prediksi hasil sedimen menggunakan pendekatan model universal soil loss equation dengan pengukuran langsung. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (Journal of Watershed Management Research)*, 1(1), 61–71. Retrieved from <http://ejournal.forda-mof.org/ejournal-litbang/index.php/JPPDAS/article/view/2570/2078>
- BBWS Bengawan Solo. (2019). Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. Retrieved March 19, 2019, from <http://sda.pu.go.id/bbwsbengawansolo/portal/>
- BPDASPS. (2011). Peraturan Direktur Jenderal (Perdirjen) Bina Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Perhutanan Sosial (BPDASPS) Nomor P.7/DAS-V/2011 tentang Petunjuk

- Sistem Standar Operasi Prosedur (SSOP) penanggulangan banjir dan tanah longsor. Jakarta: Kementerian Kehutanan.
- Cancelliere, A., Mauro, G. Di, Bonaccorso, B., & Rossi, G. (2007). Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water Resources Management*, 21, 801–819. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9062-y>
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 45–65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of The American Meteorological Society*, 80(3), 429–438. Retrieved from <http://enso.unl.edu/ndmc/watch/>
- Junaidi, E., & Tarigan, S. D. (2011). Pengaruh hutan dalam pengaturan tata air dan proses sedimentasi Daerah Aliran Sungai (DAS): Studi kasus di DAS Cisadane. *Jurnal Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam*, 8(2), 155–176. <https://doi.org/10.20886/jphka.2011.8.2.155-176>
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Eighth Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). Anaheim, CA, Amer. Retrieved from <https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Muchus, B. R. (2016). Sedimentasi parah, lumpur di Waduk Gajah Mungkur capai 6 juta meter kubik. Retrieved March 26, 2019, from <https://news.detik.com/berita/d-3372323/sedimentasi-parah-lumpur-di-waduk-gajah-mungkur-capai-6-juta-meter-kubik>
- Okpara, J. N., Afiesimama, E. A., Anuforom, A. C., Owino, A., & Ogunjobi, K. O. (2017). The applicability of standardized precipitation index: Drought characterization for early warning system and weather index insurance in West Africa. *Natural Hazards*, 89(2), 555–583. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2980-6>
- Pramono, I. B., & Savitri, E. (2019). Modification method of drought vulnerability at Wonogiri District, Central Java, Indonesia. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(6S3), 551–555. Retrieved from <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i6s3/F11080486S319.pdf>
- Purnama, E. Y. S., & Kusumandari, A. (2011). *Model USLE untuk pendugaan erosi dan sedimentasi di Sub DAS Keduang*. Skripsi. Fakultas Kehutanan. Universitas Gadjah Mada. Retrieved from http://etd.repository.ugm.ac.id/home/detail_pencarian/166227
- Santoso, A. A., Sudarsono, B., & Sukmono, A. (2017). Analisis pengaruh tingkat bahaya erosi Daerah Aliran Sungai (DAS) Bengawan Solo terhadap Total Suspended Sediment (TSS) di perairan Waduk Gajah Mungkur. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(4), 463–473. Retrieved from <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/18179>
- Senawi, S. (2009). Arahan penggunaan lahan untuk pengendalian erosi tanah di Sub-DAS Wuryantoro DTA Waduk Gajah Mungkur Wonogiri Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 3(2), 95–107. <https://doi.org/10.22146/jik.1511>
- Sönmez, F. K., Kömüscü, A. Ü., Erkan, A., & Turgu, E. (2005). An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Natural Hazards*, 35, 243–264. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-5704-7>
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J. (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology*, 34, 2792–2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
- Sudarsono, B., Sukmono, A., & Santoso, A. A. (2018). Analysis of vegetation density effect in Bengawan Solo Watershed to the Total Suspended Solid (TSS) in Gajah Mungkur Reservoir. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (pp. 1–12). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/165/1/012033>
- Sulistyo, B. (2011). Pengaruh erosivitas hujan yang diperoleh dari rumus yang berbeda terhadap pemodelan erosi berbasis raster (Studi kasus di DAS Merawu, Banjar Negara, Jawa Tengah). *Agritech*, 31(3), 250–259. <https://doi.org/10.22146/agritech.9751>
- Utami, S., & Trilaksana, A. (2015). Pembangunan Waduk Gajah Mungkur tahun 1976-1986. *Avatara E-Journal Pendidikan Sejarah*, 3, 82–90. Retrieved from <https://jurnalmahasiswa.unesa.ac.id/index.php/avatara/article/view/10727/10327>
- Utomo, A. D., Ridho, M. R., Putranto, D. DA, & Saleh, E. (2012). Sedimentation rate in Gajah Mungkur Reservoir, Central Java, Indonesia. In *Strengthening Sustainable Management of Indonesian Inland Waters Biodiversity and Fisheries* (pp. 43–49). Palembang.
- Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. *Drought: A Global Assessment*, 1, 3–18. Retrieved from <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpubhttp://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69>
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Washington DC: US Department of Agriculture.