

PERENCANAAN LOKASI MINI SABODAM DENGAN METODE IMBANGAN SEDIMEN PADA AREA HULU DARI RENCANA WADUK CIAWI, CILIWUNG

MINI SABODAM PLACEMENT PLANNING BY SEDIMENT BALANCE METHOD IN THE UPSTREAM AREA OF THE PROPOSED CIAWI RESERVOIR, CILIWUNG

Santosa Sandy Putra^{a)}, Soewarno^{b)}, Dwi Kristianto^{c)}

^{a)}Peneliti Muda Bidang Teknik Sipil, ^{b)}Pensiunan Peneliti Utama Bidang Hidrologi, ^{c)}Kepala Balai
Balai Litbang Sabo, PUSAIR, Badan Litbang, Kementerian PUPR, Indonesia
e-mail: santosa.sandy@pu.go.id

ABSTRAK

Pengelolaan sedimen pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Ciliwung Hulu adalah salah satu kunci tercapainya fungsi tampungan air dari Rencana Waduk Ciawi secara maksimal. Sedimen yang berpotensi mengurangi kapasitas tampung waduk dapat ditahan sebelum masuk ke waduk dengan menggunakan konstruksi mini sabodam. Kapasitas tampung yang kecil dari mini sabodam membuat struktur tersebut mudah dibangun. Selain itu, mini sabodam tidak merubah profil dasar sungai secara ekstrim sehingga biota sungai tetap dapat bermigrasi dari hilir ke hulu. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan lokasi usulan pembangunan mini sabodam di DAS Ciliwung Hulu berdasarkan kajian imbalanced sedimen pada DAS. Analisis imbalanced sedimen pada DAS disimulasikan menggunakan model numerik Soil and Water Assessment Tool (SWAT) yang mengacu pada kondisi kelerengan, sifat fisik tanah, dan tutupan lahan. Pada pemodelan ini, kawasan DAS Ciliwung Hulu diklasifikasikan ke dalam beberapa HRU (Hydrological Response Unit). Masing-masing HRU merepresentasikan respon kawasan tersebut terhadap kejadian hujan. Setelah melalui proses validasi, model tersebut digunakan untuk mensimulasikan laju sedimentasi pada lokasi rencana mini sabodam. Penelitian ini menyajikan gambaran teknis terkait rencana tata letak, kapasitas tampung, dan skenario pengerukan sedimen mini sabodam yang harus dilakukan oleh masyarakat dan otoritas sungai. Hasil akhir penelitian ini merupakan referensi teknis bagi penyempurnaan rencana induk pengendalian sedimentasi Rencana Waduk Ciawi.

Kata kunci: Mini sabodam, sedimentasi, numerik, Waduk Ciawi, SWAT.

ABSTRACT

Sediment management in The Upstream Ciliwung Watershed is a key to the maximum storage function achievement of The Proposed Ciawi Reservoir. The sediment that is potentially decrease the reservoir storage can be detained before it enters the reservoir by the mini sabodam construction. The small storage capacity of the mini sabodam makes the structure easy to be build. Moreover, mini sabodam does not extremely change river bed's profile so that the river biota can still migrate from the downstream to upstream. This research was focused on the proposed location of the mini sabodam mapping in The Upstream Ciliwung Watershed based on sediment balance analysis in the watershed. The sediment balance analysis in the watershed was simulated by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) numeric model, which were based on the slope condition, the soil physical characteristics, and the land cover. The Upstream Ciliwung area was classified into several HRU (Hydrological Response Unit). Each of them represents the area response to any rain event. After passing through the validation process, the model was used for measuring the sedimentation rate at the projected mini sabodam location. This research resulted technical frameworks related to the arrangement, the storage capacity, and the sediment dredging scenarios of the mini sabodam that must be conducted by communities and the river authority. The final results of this research are technical references toward the Proposed Ciawi Reservoir sedimentation control masterplan improvement.

Keywords: Mini sabodam, sedimentation, numeric, Ciawi Reservoir, SWAT.

PENDAHULUAN

Pemerintah Republik Indonesia berupaya merealisasikan pembangunan Waduk Ciawi sebagai realisasi dari Nawacita, yakni program prioritas nasional. DAS Ciliwung Hulu memiliki potensi yang cukup besar dalam menyumbangkan volume air banjir ke daerah hilir, yakni Daerah Khusus Ibukota Jakarta (Zamroni, Sholichin, dan Primantyo 2015; Agus dan Hadihardaja 2011). Apabila terjadi hujan dengan intensitas tinggi di DAS Ciliwung Hulu (Narulita, Maria, dan Djuwansah 2010), volume limpasan permukaan yang menyatu menjadi aliran sungai saat ini tidak ditampung ke dalam waduk pengendali banjir. Aliran sungai akan langsung mengalir secara gravitasi ke daerah hilir yang sering disebut sebagai banjir kiriman untuk Jakarta (Ginting dan Putuhena 2014). DAS Ciliwung Hulu sendiri memiliki luas 148,76 km² dan terletak di lereng Gunung Gede dan Gunung Pangrango (Gambar 1).

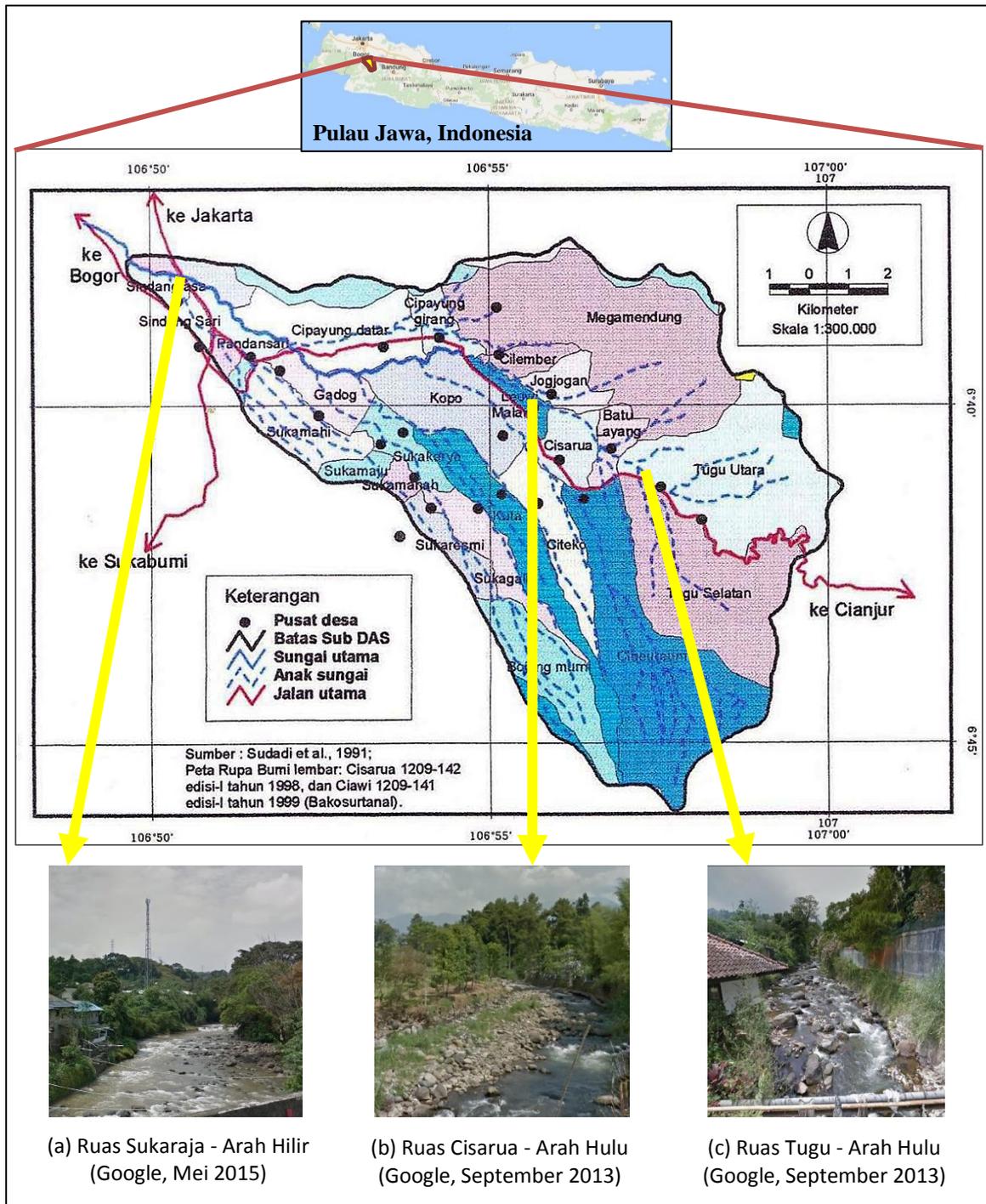
Selain alternatif solusi berupa pembuatan sudetan Sungai Ciliwung menuju kanal banjir timur di Kecamatan Jatinegara, DKI Jakarta yang saat ini masih dalam proses pembangunan (Parulian, Bisri, dan Solichin 2015; Pemerintah Provinsi DKI Jakarta 2015; PTUN Jakarta 2016), pembangunan waduk pengendali banjir di DAS Ciliwung Hulu tetap mendesak untuk dilakukan (Susanto dkk. 2013). Namun pembangunan Waduk Ciawi memiliki risiko laju sedimentasi yang cukup tinggi (Sutrisno dan Heryani 2013). Laju sedimentasi yang tinggi diakibatkan oleh perubahan tata guna lahan yang terjadi di daerah hulu Sungai Ciliwung (Nuraida, Rachman, dan Baskoro 2016). Perubahan tata guna lahan yang terjadi adalah perubahan wilayah hutan pribadi rakyat menjadi tegalan, vila, dan perumahan (data primer dari wawancara masyarakat). Perubahan ini menyebabkan lahan terekspose terhadap cuaca terutama hujan. Hujan yang jatuh pada tanah terbuka memiliki erosivitas yang lebih tinggi dibanding hujan yang tertahan oleh tutupan lahan (Fernández-Raga dkk. 2010; Ghahramani dkk. 2011).

Pemanfaatan air Sungai Ciliwung antara lain untuk pertanian, drainase air hujan, sumber air baku domestik, air minum, dan sanitasi. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Purnama (2009) menunjukkan bahwa DAS Ciliwung Cisadane memiliki potensi sumber air yang terbesar di wilayah Banten dan Jawa Barat. Potensi yang dimiliki DAS Ciliwung Cisadane yang dihitung mencapai 3.119,81 juta m³/tahun (Purnama 2009). Berdasarkan pengamatan lapangan, air Sungai Ciliwung juga menjamin keberlangsungan hutan *riparian*

yang ada di kiri dan kanan sungai. debit Sungai Ciliwung untuk pertanian melalui saluran rigasi Kalibaru, Bendung Katulampa, mencapai 0,72 km² untuk wilayah Kota Depok (Pemerintah Kota Depok 2015) dan sekitar 3,39 hingga 3,77 km² di wilayah Bogor (Mustikasari 2011). Kebutuhan air baku domestik yang harus disediakan dari Sungai Ciliwung pada tahun 2018 bahkan diperkirakan mencapai 4,59 m³/s (Suprpto dkk. 2016). Air hujan yang jatuh di DAS Ciliwung Hulu juga cenderung menjadi limpasan permukaan yang akhirnya masuk ke badan sungai Ciliwung. Secara lebih spesifik, sekitar 54,8 % (secara rata-rata) dari hujan yang turun di DAS Ciliwung Hulu akan menjadi aliran limpasan permukaan (Tikno, Hariyanto, dan Anwar 2012). Hal ini menunjukkan bahwa penyimpanan air di DAS Ciliwung melalui proses infiltrasi tidak dapat optimal mengingat kondisi tutupan lahan yang ada.

Permasalahan yang disampaikan pada dua paragraf di atas, yakni banjir dan kebutuhan air, mendorong pemerintah untuk merencanakan pembangunan Waduk Ciawi. Ada dua pilihan terkait desain rencana Waduk Ciawi. Pilihan desain pertama adalah desain tertutup dimana waduk dilengkapi dengan fungsi tampungan air (ambang pelimpah tidak berada pada kaki bendungan). Selain itu, pilihan desain kedua adalah desain terbuka dimana waduk difungsikan untuk menampung debit puncak banjir sementara (ambang pelimpah pada kaki bendungan dan dilengkapi dengan pintu kontrol keluarnya air dari waduk). Apabila Waduk Ciawi dirancang untuk memiliki tampungan, maka masyarakat dapat menerima manfaat berupa ketersediaan air tambahan. Pada sisi yang lain, apabila Waduk Ciawi hanya berfungsi sebagai penahan sementara ketika terjadi banjir, maka air yang jatuh di DAS Ciliwung Hulu sebagian besar akan mengalir langsung ke hilir dan tidak dapat dimanfaatkan. Kondisi waduk tanpa tampungan juga berarti bahwa hampir tidak ada sedimen yang tertampung di dalam waduk. Kondisi sedimen yang tertampung di dalam waduk harus dihindari mengingat potensi sedimen di badan sungai yang sangat besar (Gambar 1).

Pengelolaan sedimen di lahan dan di hulu sungai relatif mudah dibanding dengan pengelolaan sedimen di dalam tampungan waduk ataupun danau. Metode pengelolaan sedimen di badan tampungan waduk adalah dengan pengerukan yang relatif sangat mahal dan tidak efisien, yakni sekitar Rp. 88.500,- hingga Rp. 104.600,- per m³ pada tahun 2016 (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2016).



Gambar 1 DAS Ciliwung Hulu beserta kenampakan visual pada beberapa ruas sungai (Sudadi dkk. 1991).

Beberapa solusi lain yang dapat menjadi alternatif penanganan sedimen adalah dengan teknologi sabodam (Achmad 2006; Mizuyama 2010) dan teknologi kolam tampungan banjir yang terinterkoneksi (Soewarno 2013; Putra dan Ridwan 2015). Hal yang menjadi hambatan penerapan teknologi sabodam adalah ketidaktersediaannya lahan di Sub DAS Ciliwung Hulu. Pembangunan sabodam secara konvensional membutuhkan area sempadan sungai yang cukup lebar, yakni minimal 20 m.

Akan tetapi, fakta di lapangan menunjukkan bahwa beberapa lahan di kiri dan kanan sungai telah diokupansi masyarakat untuk fungsi tertentu.

Tujuan penelitian ini adalah memperoleh rancangan sistem teknologi mini sabodam di DAS Ciliwung Hulu yang didasarkan pada keseimbangan neraca sedimen. Analisis keseimbangan sedimen sangat penting untuk mengendalikan laju sedimentasi pada Rencana Waduk Ciawi. Penelitian ini memproyeksikan

dampak keberadaan mini sabodam terhadap pola sedimentasi. Secara khusus, penelitian ini akan melihat perubahan angkutan sedimen dengan adanya rencana pembangunan mini sabodam dan tanpa mini sabodam. Mini sabodam sendiri dapat didefinisikan sebagai bangunan melintang sungai yang dapat menahan sedimen. Tinggi mercu mini sabodam dibatasi hingga maksimal 2 meter dari dasar sungai normal.

KAJIAN PUSTAKA

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa potensi erosi di DAS Ciliwung Hulu sangatlah masif (Sa'ad 2002; Yustika, Tarigan, dan Sudadi 2012). Sa'ad (2002) juga telah melakukan pengukuran erosi pada 7 sub DAS di Ciliwung Hulu dengan karakteristik penggunaan lahan yang berbeda untuk memahami proses erosi yang terjadi. Karakteristik sub DAS yang diteliti adalah Sub DAS 1 (hutan, tanaman teh, dan pemukiman), Sub DAS 2 (tanaman pangan, hutan, dan pemukiman), Sub DAS 3 (kebun campuran, tanaman pangan, dan pemukiman), Sub DAS 4 (tanaman pangan, sayuran, hutan, dan lahan terbuka), Sub DAS 5 (kebun campur, tanaman pangan, hutan, dan pemukiman), Sub DAS 6 (kebun campur, tanaman pangan, kebun teh, dan pemukiman), Sub DAS 7 (kebun teh, sayuran, kebun campur, tanaman pangan, lahan terbuka, dan pemukiman) (Sutrisno dan Heryani 2013). Penelitian tersebut juga memperhitungkan Index Erosifitas Hujan (EI_{30}) yang merupakan hasil perkalian antara efek energy kinetik hujan (E) dan curah hujan maksimum dalam 30 menit (I_{30}). Laju erosi yang pernah diteliti dalam skala sub DAS di daerah Tugu, hulu Sungai Ciliwung, dapat dicermati pada Tabel 1. Data sedimen tererosi yang diukur dari 10 kejadian hujan dalam 10 hari, dengan curah hujan 210,40 mm, digunakan dalam penghitungan nilai $SraO$ pada Tabel 1. Nilai Index Erosivitas Hujan (EI_{30}) pada periode tersebut adalah 105,96 ($Ek = 10^{-3} \text{ kg m m}^{-2} \text{ m}^{-1}$). Hampir serupa dengan itu, $YSRaO$ dikalkulasi dengan memperhitungkan jumlah curah hujan pada tahun 2001, yakni sebesar 3294,20 mm. Sebagai informasi tambahan, nilai Index Erosivitas Hujan (EI_{30}) pada tahun 2001 adalah $1,546 \times 10^3$ ($Ek = 10^{-3} \text{ kg m m}^{-2} \text{ m}^{-1}$). Sedimen yang terbawa hingga ke sungai sendiri telah mencapai 24.59×10^{-4} hingga $212.92 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2$ (Sutrisno dan Heryani 2013).

Kondisi laju angkutan sedimen pada paragraf di atas semakin memperjelas urgensi akan desain Rencana Waduk Ciawi yang minim dengan resiko sedimentasi. Terdapat dua desain

utama Rencana Waduk Ciawi yang potensial untuk diterapkan, yakni desain waduk dengan kapasitas tampungan air minimal (desain tahun 2013) dan desan waduk tanpa tampungan air sama sekali (desain tahun 2014). Desain ini dikembangkan menjadi desain tahun 2015 (Gambar 2) dengan perbedaan utama pada saluran pengelak. Desain tahun 2015 itu sendiri dilengkapi dengan dua alternatif tipe saluran pengelak, yakni tipe *Box Culvert* 4m x 4m yang dilengkapi 1 jalur terowongan pengendali banjir diameter 3,8m dan tipe terowongan diameter 4,2 m yang setelah selesai pembangunan dapat dimanfaatkan sebagai saluran pengendali banjir.

Lokasi mercu Rencana Waduk Ciawi ditentukan berdasarkan studi pendahuluan BBWS Ciliwung Cisadane sejak tahun 2011 (Balai Besar Wilayah Sungai Ciliwung Cisadane 2015). Oleh karena memiliki desain tipe terbuka, desain tahun 2014 rentan terhadap masalah gerusan pada terowongan penguras waduk apabila sedimen konsentrasi tinggi mengalir melalui terowongan tersebut (KANTOUSH, SUMI, dan MURASAKI 2011; Auel 2011). Pada sisi lain, desain tahun 2013 memiliki tampungan air yang dapat dimanfaatkan, namun memiliki risiko sedimentasi yang dapat mengurangi umur layan waduk.

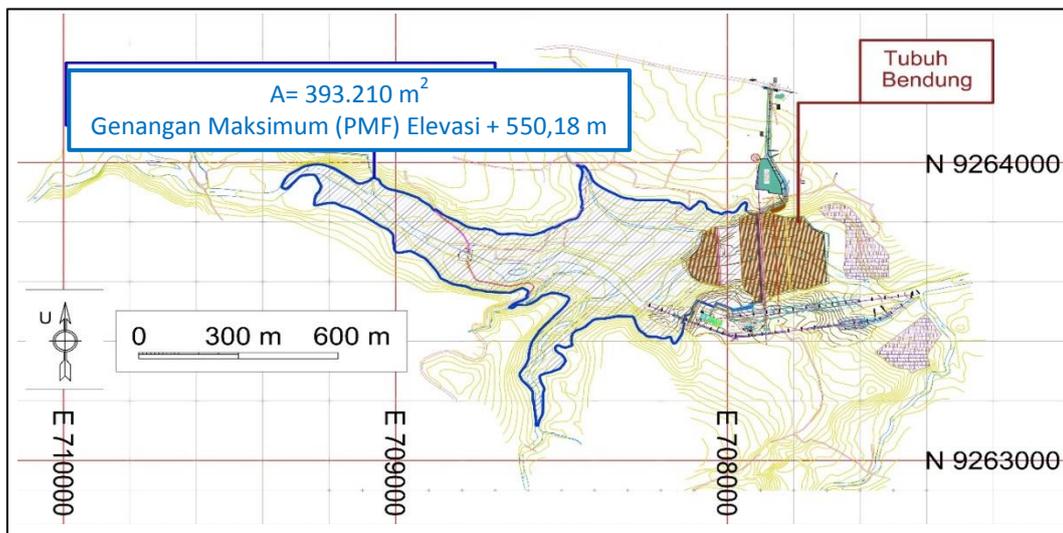
Desain Rencana Waduk Ciawi tahun 2013 adalah desain waduk tipe tertutup (dengan tampungan jangka panjang) sedangkan desain tahun 2014 menggunakan konsep desain waduk tipe terbuka (tanpa tampungan jangka panjang)). Secara spesifik, konsep desain waduk tipe terbuka dilengkapi dengan pintu air pada kaki bendungan. Pintu ini akan ditutup saat terjadi banjir sehingga volume aliran banjir dapat ditampung di dalam waduk. Setelah debit sungai berangsur-angsur menurun, maka tampungan waduk dialirkan ke hilir dengan membuka pintu air yang ada di kaki bendungan tersebut. Pada desain waduk tipe tertutup, disain tidak dilengkapi dengan pintu air di kaki bendungan.

Salah satu solusi yang ditawarkan adalah penerapan teknologi mini sabodam. Teknologi mini sabodam merupakan teknologi dam parit (Susanto dkk. 2013), tahanan batang pohon melintang sungai (Eaton, Hassan, dan Davidson 2012; Sear dkk. 2010), dan tahanan susunan batu sungai (Hassan dkk. 2007), yang memiliki fungsi menahan sedimen pada alur sungai bagian hulu. Teknologi mini sabodam menyerupai chekdam namun memiliki dimensi dan elevasi mercu yang lebih kecil (Boix-Fayos dkk. 2008).

Tabel 1 Laju Sedimentasi di Das Ciliwung Hulu dalam lingkup sub DAS (Sa'ad 2002).

ID Sub DAS	A (10 ⁴ m ²)	S (%)	L (m)	n	LE (10 ⁻⁴ kg/m ²)	SaO (10 ⁻⁴ kg/m ²)	TSaO (kg)	Qav (m ³ /s)	SRaO (kg per mm hujan erosi)	YSRaO (kg per tahun)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]=[2]x[7]	[9]	[10]=[8]/I _{10d}	[11]=[10] x I _{yr}
1	42,87	45,03	281,67	0,24	71,14	24,59	1.054,17	0,153	5,01	16.505,03
2	6,12	33,73	281,93	0,08	786,75	502,67	3.076,34	0,104	14,62	48.165,78
3	5,25	42,21	280,85	0,09	618,17	186,39	978,55	0,219	4,65	15.320,97
4	13,50	46,48	342,22	0,08	1.285,57	671,88	9.070,38	0,171	43,11	142.013,53
5	91,00	38,41	265,14	0,05	262,50	60,28	5.485,48	0,167	26,07	85.885,31
6	104,75	38,19	273,03	0,19	244,48	47,48	4.973,53	0,151	23,64	77.869,78
7	158,89	39,54	344,11	0,15	444,78	212,92	33.830,86	0,366	160,79	529.684,48

Keterangan: Simbol-simbol yang digunakan dalam Tabel 1 adalah A (luas sub DAS), S (rata-rata kemiringan lereng sub DAS), L (rata-rata panjang lereng sub DAS), n (rata-rata koefisien kekasaran Manning sub DAS), LE (sedimen lahan yang tererosi, yang diukur dengan panci erosi, selama 10 hari), SaO (sedimen yang melewati outlet sub DAS, selama 10 hari), TSaO (sedimen total yang melewati outlet selama periode hujan yang diukur, yakni 10 hari), Qav (rata-rata debit selama periode pengamatan, yakni 10 hari), SRaO (rata-rata sedimen yang melintasi outlet sub DAS tiap mm hujan yang menyebabkan erosi pada sub DAS), YSRaO (prediksi jumlah sedimen yang melewati outlet per tahun, khususnya pada tahun 2001), I_{10d} (210,4 mm yang adalah curah hujan selama periode pengamatan, yakni 10 hari), dan I_{yr} (3294,2 mm yang adalah jumlah curah hujan pada tahun 2001).



Keterangan: Koordinat peta disajikan dalam Universal Transverse Mercator dan simbol PMF berarti kondisi elevasi banjir maksimal yang mungkin terjadi (Balai Besar Wilayah Sungai Ciliwung Cisadane 2015).

Gambar 2 Desain rencana luas genangan Rencana Waduk Ciawi tahun 2015

Informasi tersebut dapat disandingkan dengan kondisi di lapangan yang menunjukkan bahwa tampungan mini sabodam akan penuh dalam periode 2-4 minggu periode musim hujan. Namun demikian, masyarakat menambang material sedimen pada mini sabodam, terutama paska kejadian banjir. Selain untuk mencegah gerusan tebing akibat penurunan dasar sungai, tujuan tambahan masyarakat untuk membangun mini sabodam adalah untuk mengarahkan aliran air yang dapat digunakan untuk mensuplai kebutuhan air domestik. Detail desain dari mini sabodam

akan dijelaskan lebih lanjut pada bagian metodologi.

Pemodelan hidrologis dan pola erosi DAS Ciliwung telah banyak dilakukan, terutama terkait debit banjir (Yustika, Tarigan, dan Sudadi 2012; Suprpto dkk. 2016). Namun demikian, belum ada penelitian menggunakan model hidrologis yang dilakukan terkait efektifitas penempatan infrastruktur pengendali sedimen. Secara khusus, diperlukan solusi pengendalian sedimen jenis pasir berlumpur yang terdapat pada aliran anak Sungai Ciliwung (Sa'ad 2002).

Model SWAT adalah model hidrologi yang didasarkan pada persamaan fisik dari siklus air (*physical based model*). Detail persamaan fisik yang digunakan dalam model SWAT telah dibahas secara detail oleh Krysanova dan White (2015). Model SWAT digunakan dalam penelitian ini karena dapat mensimulasikan hubungan antara hujan, erosi, dan sedimentasi pada suatu DAS. Model SWAT juga memiliki fitur pemodelan waduk yang sangat bermanfaat untuk memodelkan sedimentasi Rencana Waduk Ciawi. Model SWAT membagi suatu DAS ke dalam unit-unit hidrologis. *Hydrological Response Unit* (HRU) dapat dipahami sebagai suatu himpunan beberapa pias pemodelan spasial yang memiliki respon hidrologis yang sama. Setiap pias pemodelan spasial yang tergabung dalam suatu HRU memiliki karakteristik tutupan lahan, jenis tanah, dan kelerengan yang serupa ataupun sepadan.

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di DAS Ciliwung Hulu, meliputi wilayah Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat, Indonesia, yang dapat dilihat pada Gambar 1. Pengamatan dilakukan pada anak-anak sungai Ciliwung yang berpotensi untuk dibangun mini sabodam untuk mengendalikan angkutan sedimen. Pada beberapa lokasi, ditemukan bangunan mini sabodam yang dibangun secara swadaya, antara lain di Desa Tugu Utara, Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor (Gambar 3). Data topografi yang digunakan untuk memodelkan DAS adalah data *Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model* (SRTM DEM) versi 4.1 yang diperoleh dari Organisasi CGIAR CSI (Jarvis dkk. 2008). Resolusi horizontal dari DEM yang digunakan adalah 90 m yang kemudian dipecah menjadi 30 m agar selaras dengan ukuran data raster lain yang digunakan. Topografi yang diperoleh dari SRTM adalah topografi tahun 2000 saat misi SRTM dilaksanakan. Sumber data tanah yang akan digunakan untuk analisis adalah data tanah dari *FAO Digital Soil Map of The World* (The International Union of Soil

Science 2007). Data hujan dan iklim yang digunakan bersumber dari *The National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) (Saha dkk. 2014). Data tutupan lahan diperoleh dari NASA MODIS LC tahun 2012 (Broxton dkk. 2014) dan diverifikasi dengan Peta Tutupan Lahan dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) tahun 2014. Dilakukan penyesuaian data raster tutupan lahan MODIS jika terjadi perbedaan lebih dari 10 km² dibanding dengan data tutupan lahan dari KLHK. Data KLHK menggunakan toponimi (sistem penamaan) standar Indonesia yang tidak dapat digunakan secara langsung pada piranti SWAT.

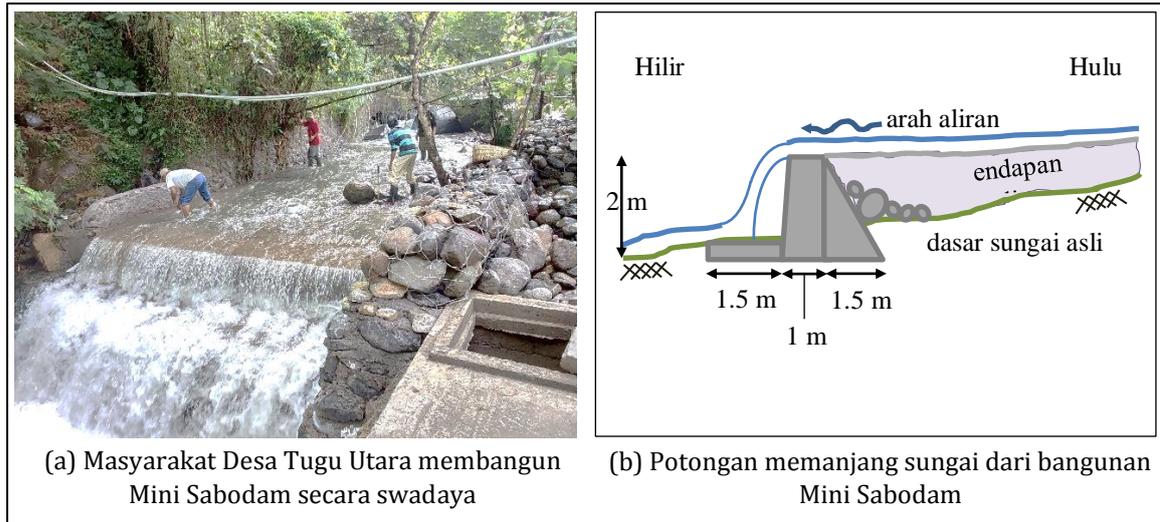
Data-data pada paragraf sebelumnya digunakan untuk membentuk *Hydrological Response Unit* (HRU) pada DAS Ciliwung Hulu (Gambar 4). Berdasarkan input data yang digunakan, dapat dibuat antara 76 hingga 445 HRU pada DAS Ciliwung Hulu. Kalibrasi pengaruh data tata guna lahan pada hasil pemodelan wajib dilakukan dengan menyesuaikan parameter CN2 (delta CN pada persamaan *Soil Conservation Service*) dan USLE_K (*soil erodibility factor*) pada model SWAT (van Griensven dkk. 2006; Mukundan, Radcliffe, dan Risse 2010). Pemodelan dilakukan dalam periode 2000-2014 sehingga hasilnya dapat dibandingkan dengan data kalibrasi, yakni data yang telah diverifikasi dan disajikan dalam web institusi penyedia data.

Desain dari Mini Sabodam disesuaikan dengan ketentuan SNI 2851:2015 tentang desain bangunan penahan sedimen (Badan Standardisasi Nasional 2015) serta Desain Protopipe Bangunan Pengendali Sedimen PUSAIR (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2015). Namun demikian, elevasi mercu dari dasar sungai dibatasi maksimal 2-4 m (Gambar 3). Desain mini sabodam merupakan sabodam tipe tertutup. Warga masyarakat berharap apabila tinggi mini sabodam lebih dari 2 m, mini sabodam dapat dilengkapi dengan saluran untuk ikan (*fish way*).

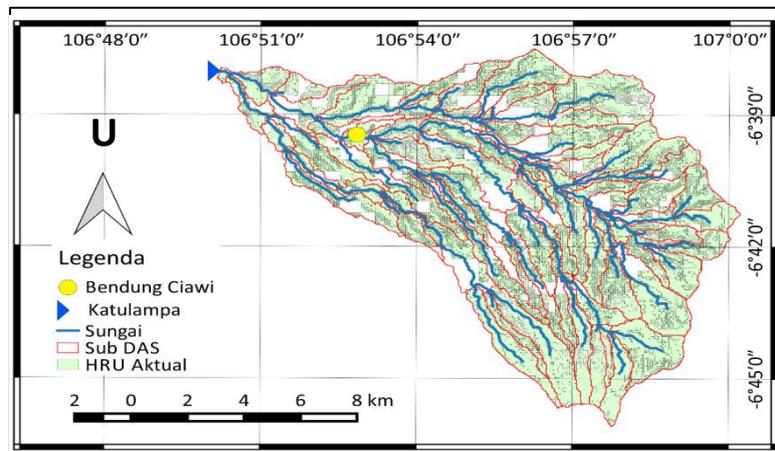
Tabel 2 Perbedaan Desain Rencana Waduk Ciawi Tahun 2013 dan Tahun 2014.

Parameter Desain [1]	Desain Tahun 2013 [2]	Desain Tahun 2014 [3]	Satuan [4]
Tinggi Bendungan dari dasar sungai (m)	67,80	51,00	m
Volume tampungan efektif	11,80	5,03	10 ⁶ m ³
Volume tampungan sedimen	0,0059	0	10 ⁶ m ³
Cakupan luasan DAS	84,86	88,50	km ²
Luasan genangan pada banjir maksimal	790.000	385.600	m ²
Kapasitas reduksi debit puncak banjir	81,93	159,84	m ³ /s

Keterangan: Sumber data Laporan Desain Tahun 2015 (Balai Besar Wilayah Sungai Ciliwung Cisadane 2015).



Gambar 3 Gambaran dan desain terkait definisi teknis mini sabodam.



Gambar 4 Hydrological Response Unit berdasarkan tata guna lahan, jenis tanah, dan kelerengan.

Usulan lokasi mini sabodam juga diseleksi berdasarkan suplai angkutan sedimen yang dihasilkan dari sub DAS. Angkutan sedimen pada titik lokasi usulan mini sabodam disimulasikan menggunakan model hidrologi *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).

Kapasitas dari mini sabodam dalam menampung sedimen dihitung berdasarkan metode yang digunakan oleh *Georgia Department of Transport*, Atlanta, Georgia, USA (Griffith dan Eagleton 2013). Volume tampungan statis dari mini sabodam adalah 40 m³, dengan spesifikasi standar (tinggi mercu 2 m, lebar dasar sungai 2 m, lebar permukaan sungai 4 m, dan kemiringan dasar sungai asli 8.5°). Penelitian ini menggunakan acuan volume tampungan statis dari mini sabodam (*dead storage*) dengan pertimbangan bahwa pengerukan dijadwalkan untuk dilakukan jika volume statis terpenuhi. Berat sedimen yang tertampung pada mini sabodam dapat dihitung pada kisaran 7,34 x 10⁴ kg, dengan acuan volume tampungan 40 m³ dan berat jenis jenuh

air (*saturated*) sebesar 1.834 kg/m³ (Belkhatir dkk. 2014).

Model SWAT untuk DAS Ciliwung Hulu dioperasikan untuk mensimulasikan beberapa skenario keberadaan infrastruktur pada DAS. Skenario yang disimulasikan pada penelitian ini adalah skenario 1 (tanpa Rencana Waduk Ciawi dan tanpa mini sabodam), skenario 2 (tanpa Rencana Waduk Ciawi dan dengan mini sabodam), skenario 3 (dengan Rencana Waduk Ciawi tipe tanpa tampungan dan tanpa mini sabodam), skenario 4 (dengan Rencana Waduk Ciawi tipe dengan tampungan dan tanpa mini sabodam), skenario 5 (dengan Rencana Waduk Ciawi tipe tanpa tampungan dan dengan mini sabodam), serta skenario 6 (dengan Rencana Waduk Ciawi tipe tampungan dan dengan mini sabodam). Pemodelan ini akan memberikan indikasi efektifitas dari mini sabodam dalam mengendalikan sedimen.

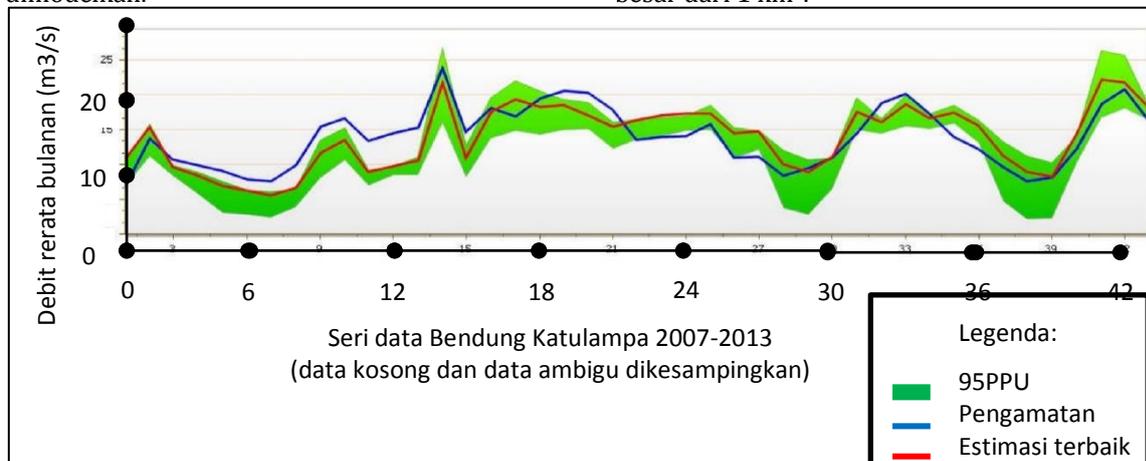
Pemodelan angkutan sedimen menggunakan model SWAT juga akan memberikan gambaran mengenai pemeliharaan

mini sabodam. Mini sabodam perlu dipelihara dengan cara pengerukan material sedimen yang tertampung pada hulu mini sabodam. Pengerukan sedimen ini perlu dijadwalkan agar pengerukan tidak berlebihan maupun terlalu sedikit. Pengerukan sedimen yang berlebihan dapat menyebabkan gerusan pada fondasi mini sabodam. Pengerukan yang terlalu sedikit atau tidak dilakukan secara rutin akan menyebabkan efektifitas fungsi mini sabodam menjadi berkurang. Model juga akan menjawab apakah lokasi penempatan mini sabodam optimum bagi tujuan penangkapan sedimen.

Kalibrasi Model Hidrologi SWAT untuk DAS Ciliwung Hulu dilakukan menggunakan data debit Bendung Katulampa periode Tahun 2007-2013. Simulasi yang dilakukan adalah simulasi bulanan dari sistem tata air di DAS Ciliwung Hulu (Gambar 5). Perlu diingat bahwa data debit yang dicatat oleh petugas lapangan mengandung ketidakpastian akibat kesalahan pengamatan dan ketidakpastian operasi alat. Kondisi ini ditanggulangi dengan menyaring data debit ekstrim dan data yang ambigu (Sabo dkk. 2010). Data ambigu dapat didefinisikan sebagai data yang tidak sesuai dengan pola data sebelum dan sesudahnya, ataupun data dengan nilai simpangan yang besar. Pada sisi yang lain, data filter juga perlu dilakukan pada data hujan yang digunakan sebagai input model SWAT. Hal ini dilatarbelakangi oleh suatu fakta bahwa penggunaan data simulasi dari CFSR yang dikombinasikan dengan data pengamatan stasiun hujan yang kurang merata penyebarannya terkadang memberikan total tinggi hujan yang terlalu tinggi. Namun demikian, data hujan dari CFSR secara umum tetap dapat menggambarkan pola hujan yang terjadi (Wang dkk. 2012). Oleh sebab itu, data hujan pada penelitian ini disesuaikan dengan volume total hujan maksimum tahunan pada DAS Ciliwung Hulu, khususnya pada tahun yang dimodelkan.

Parameter hidrologi yang dikalibrasi adalah parameter model yang sensitif terhadap debit pada outlet sub DAS. Parameter tersebut adalah ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, ESCO, dan SOL_AWC. Parameter-parameter ini terkait erat dengan data karakteristik tanah dari sub DAS yang dimodelkan. Parameter lain yang juga perlu dikalibrasi adalah parameter CN2 dan OV_N yang dapat diperoleh dari data tata guna dan tutupan lahan. Selain itu, parameter SLSUBBSN dan HRU_SLP juga perlu dipertimbangkan karena merefleksikan kondisi kelerengan dari sub DAS. Penjelasan detail terkait masing-masing abreviasi parameter tersebut tercantum dalam buku panduan SWAT (Arnold dkk. 2012). Tindakan kalibrasi dilakukan hingga nilai koefisien efisiensi model Nash-Sutcliffe (NSF) dan koefisien determinasi (R2) dari hasil model mencapai standar minimum yakni pada nilai 0,6. Persamaan untuk menghitung nilai NSF dan R2 dapat dicermati lebih lanjut dalam buku panduan SWAT (Arnold dkk. 2012). Proses kalibrasi juga dilakukan agar nilai P-value dari masing-masing parameter berada di atas ambang batas nilai 0.1 dan nilai t-stat didalam jangkauan nilai -2 dan 2. Situasi ini berarti perubahan pada nilai parameter tidak lagi dapat memberi pengaruh pada hasil akhir model dalam hal ini debit pada sub DAS.

Proses kalibrasi model pada periode 2007-2013 memberikan hasil simulasi debit dengan nilai R2 sebesar 0,67 dan nilai NSF sebesar 0,62, sehingga dapat digunakan untuk analisis hidrologi selanjutnya. Informasi tentang karakteristik detail dari tutupan lahan yang dimaksud dengan kode tersebut dapat dicermati pada *Global Land Cover Catalog* (Channan, Collins, dan Emanuel 2014). Perlu diperhatikan juga bahwa dimensi mini sabodam ini tidak dapat mengakomodasi debit pada sungai dengan luas tangkapan hujan yang lebih besar dari 1 km².



Gambar 5 Grafik kalibrasi debit DAS Ciliwung Hulu pada outlet Bendung Katulampa tahun 2007-2013.

Batasan ini digunakan untuk menghindari risiko kegagalan mercu, *back water effect*, ataupun situasi tertimbunnya mercu akibat sedimen yang berlebihan. Mini sabodam juga ditempatkan pada sub DAS yang tidak menerima suplai debit dari sub DAS disekitarnya. Karakteristik transpor sedimen pada sub DAS kemudian dimodelkan dengan parameter hidrologis yang telah dikalibrasi. Model yang telah dikalibrasi terhadap data debit secara umum dapat mempresentasikan pola angkutan sedimen pada DAS (Saghafian dkk. 2012).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja mini sabodam

Pemodelan kinerja mini sabodam dilakukan dengan mengukur laju angkutan sedimen yang keluar dari outlet sub DAS. Sedimen yang terbawa oleh aliran air pada alur sungai dan keluar dari outlet sub DAS merepresentasikan sedimen yang harus dikelola. Apabila sedimen ini dibiarkan terus mengalir ke hilir, maka sedimen ini berpotensi untuk tertahan pada tampungan dan Sub DAS Rencana Waduk Ciawi. Pengamatan sedimen dikhususkan pada sepanjang periode Tahun 2011, baik pada musim kering (bulan ke-5 hingga bulan ke-10) dan pada musim basah (bulan ke-1 hingga bulan ke-4, serta bulan ke-11 dan bulan ke-12). Pemisahan periode musim ini didasarkan pada dua batas puncak debit bulanan tertinggi, yakni yang terjadi pada bulan April dan November (Gambar 6).

Hasil pemodelan sedimen menunjukkan bahwa ada kesamaan pola antara debit dan angkutan sedimen yang keluar dari outlet sub DAS. Laju debit bulanan yang tinggi diikuti pula dengan laju angkutan sedimen bulanan yang tinggi, demikian pula sebaliknya (Gambar 6).

Sebagai contoh, debit kumulatif bulan November 2011 sebesar 15,37 m³/s diikuti oleh berat sedimen terangkut pada outlet sebesar 14,65 x 10⁶ kg. Nilai ini sangat kontras dengan nilai debit kumulatif dan berat sedimen terangkut pada bulan September 2011, yang berturut-turut sebesar 1,4 m³/s dan 2,9 x 10⁶ kg. Kondisi tingkat kekeruhan aliran juga dapat direpresentasikan dari grafik hubungan debit dan laju angkutan sedimen ini. Pada tingkatan debit aliran yang tinggi, kondisi aliran cenderung keruh. Hal ini selaras dengan proporsi debit terhadap angkutan sedimen yang terjadi pada musim basah, terutama terlihat jelas pada proporsi bulan November. Hal ini sangat kontras jika dibandingkan dengan proporsi bulan Agustus dan September, dimana kondisi aliran cenderung jernih.

Hasil pemodelan menunjukkan pula bahwa terdapat kisaran ambang batas hujan minimal yang dapat menyebabkan erosi lahan secara signifikan. Sebagai contoh, pada bulan Agustus dan September tahun 2011, hujan bulanan sebesar 20 hingga 50 mm tidak mampu menghasilkan erosi lahan yang dapat diamati. Pola ini juga mengindikasikan bahwa akumulasi hujan pada bulan sebelumnya (*monthly antecedent rainfall*), memberikan pengaruh pada laju erosi lahan pada bulan yang dicermati (Gambar 7).

Pada musim kering, tidak terjadi erosi lahan yang signifikan (Gambar 7). Oleh sebab itu, erosi yang keluar dari outlet diindikasikan berasal dari erosi alur sungai (Gambar 6). Erosi pada alur sungai terjadi untuk membentuk kemiringan sungai statis. Kemiringan sungai statis terbentuk ketika terjadi kesetimbangan antara jumlah sedimen yang memasuki suatu ruas sungai dan jumlah sedimen yang terbawa ke hilir (Eaton, Hassan, dan Davidson 2012). Fakta-fakta ini juga memperkuat gagasan mengenai keterkaitan antara erosi lahan dengan pola hujan yang terjadi pada sub DAS.

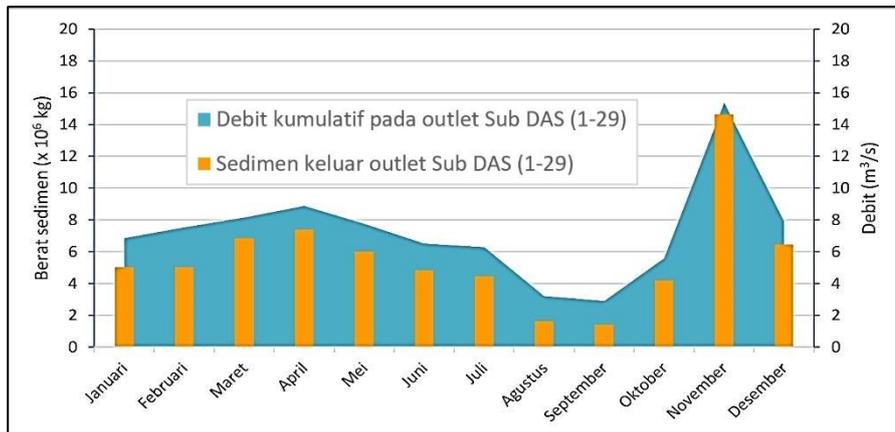
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa mini sabodam rencana pada Tabel 3 tidak mampu menampung semua total sedimen yang dihasilkan dari tiap-tiap sub DAS. Mini sabodam hanya akan menampung pasir berlanau, namun tidak dengan material halus ataupun liat yang tersuspensi. Sa'ad (2002) melalui penelitiannya mendapatkan data rerata proporsi material tererosi pada Sub DAS Ciliwung Hulu bagian utara yang mana berupa pasir sebesar 62,07 % dan material halus sebesar 37,93 %. Maka dari itu, dapat dirumuskan bahwa efisiensi mini sabodam dalam menangkap pasir berlanau adalah sekitar 65%.

Proporsi lain dari sedimen yang tidak tertangkap oleh mini sabodam akan mengalir ke hilir, seperti hasil analisis pada Tabel 4. Hasil model dapat menunjukkan siklus penambangan pada musim basah yang lebih besar dibandingkan pada musim kering. Hal yang menarik adalah melihat rasio penambangan sedimen selama setahun (SMR) yang mencakup pola musim basah dan musim kering. Koefisien ini menunjukkan keberlanjutan dari sistem penambangan pada mini sabodam. Apabila nilai SMR kurang dari 12, maka perletakan mini sabodam perlu dikaji ulang. Secara ringkas dapat dikatakan bahwa sedimentasi pada mini sabodam tidak signifikan untuk ditambang. Urgensi pembangunan ke 29 mini sabodam untuk mengurangi angkutan sedimen terlihat dari nilai rasio SMR yang melebihi batas minimal.

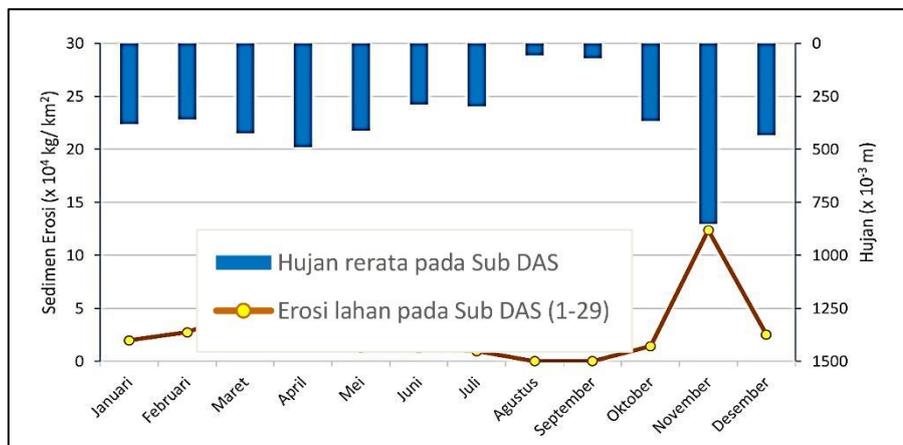
Tabel 3 Kondisi tiap-tiap sub DAS yang diusulkan untuk dibangun mini sabodam.

Mini Sabodam	Kode LULC	Tutupan lahan	Jenis tanah	Lereng lahan (°)	Kriteria lereng	Area (km ²)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
SD1	FODN/FOEN	Hutan pinus/ hutan tropis	Af14-3c-1	32,88	sangat curam	1,63
SD2	CRDY	Lahan terbuka/ padang pertanian	Af14-3c-1/ Af17-1-2a-2	42,20	terjal	3,59
SD3-5,7,9,10	CRDY	Lahan terbuka/ padang pertanian	Af17-1-2a-2	38,58	sangat curam	11,65
SD6,15,22	CRDY/FOEN	Lahan terbuka/ hutan tropis	Af17-1-2a-2	42,34	Terjal	4,73
SD8 dan SD14	FOEB/FOEN	Hutan tropis heterogen	Af17-1-2a-2	26,96	curam	3,57
SD11,16,18,19	FOEN	Hutan Tropis	Af17-1-2a-2	35,76	sangat curam	8,02
SD12,17,20,23–29	CRDY	Lahan terbuka/ pertanian/ padang	Af17-1-2a-2	42,35	terjal	23,84
SD13	FOEN	Hutan Tropis	Af14-3c-1/ Af17-1-2a-2	37,41	sangat curam	1,89
SD21	CRDY/FOEN	Lahan terbuka/ hutan tropis	Af14-3c-1/ Af17-1-2a-2	39,04	sangat curam	3,32

Keterangan: Simbol-simbol yang digunakan dalam Tabel 3 adalah SD (sub DAS), LULC (tata guna dan tutupan lahan), dan Af (kode jenis tanah Ferric Acrisol). Kode jenis tutupan lahan yang diacu merupakan sistem GLC (Channan, Collins, dan Emanuel 2014), dimana karakteristik dari kode tutupan lahan dijelaskan pada kolom 3. Klasifikasi tanah pada model didasarkan pada sistem FAO (FAO dan UNESCO 1979). Ada 2 jenis tanah utama, terkhusus pada sub DAS yang akan dibangun sabodam, yakni tanah Af14-3c-1 (tanah seri lapisan: basalt, phonolite, nephelinite, trachyte, rhyolite, pyroclastics) serta tanah Af17-1-2a-2 (tanah precambrian: granitic gneiss, migmatite, schist, Quartzite, syenite, dolerte; granitic batholiths; tanah sandstone, shale, dan marl yang tidak terkonsolidasi dengan baik). Lokasi usulan masing-masing mini sabodam ditampilkan dalam Gambar 8.



Gambar 6 Hubungan antara angkutan sedimen dan debit yang keluar pada outlet sub DAS dalam periode Tahun 2011, yakni sub DAS yang dilengkapi dengan mini sabodam



Gambar 7 Pola erosi lahan pada sub DAS yang dilengkapi dengan mini sabodam dengan pola hujan rerata yang terjadi pada periode Tahun 2011 pada area tersebut.

Tabel 4 Skema penjadwalan pemeliharaan mini sabodam berdasarkan suplai sedimen pada Tahun 2011.

Mini Sabodam	WSM (siklus)	DSM (siklus)	SMR	Sedimen sub DAS (x 10 ⁴ kg)	Sedimen tertambang (x 10 ⁴ kg)	Sedimen lolos (x 10 ⁴ kg)	Area (km ²)	TSRR (musim basah) (kg/mm)	TSRR (musim kering) (kg/mm)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
SD1	10	5	15	186,564	110,1	76,464	1,63	173,25	86,62
SD2	22	9	31	393,209	227,54	165,669	3,59	399,58	163,46
SD3-5,7,9,10	80	37	19,5	1.369,65	858,78	510,8743	11,65	1.187,18	549,07
SD6,15,22	19	9	9,33	342,767	205,52	137,247	4,73	316,52	149,93
SD8 dan SD14	18	12	15	383,12	220,2	162,92	3,57	332,22	221,48
SD11,16,18, dan SD19	35	21	14	668,62	411,04	257,58	8,02	547,13	328,28
SD12,17,20, dan SD23-29	179	80	25,9	2.957,03	1.901,06	1.055,97	23,84	2.480,29	1.108,51
SD13	8	4	12	163,856	88,08	75,776	1,89	171,69	85,84
SD21	17	10	27	324,31	198,18	126,13	3,32	269,90	158,76
	Jumlah			6.789,13	4.220,50	2.568,63	62.24	-	-

Keterangan: Simbol-simbol yang digunakan dalam Tabel 4 adalah SD (sub DAS), LULC (tata guna dan tutupan lahan), Af (kode jenis tanah Ferric Acrisol), WSM (jumlah siklus penambangan dalam musim basah, yakni November hingga April), DSM (siklus penambangan dalam musim kering, yakni Mei hingga Oktober), SMR (rasio jumlah siklus penambangan terhadap jumlah mini sabodam), dan TSRR (laju sedimen terangkut keluar outlet sub DAS tiap milimeter hujan, dengan adanya mini sabodam). Suatu siklus penambangan berarti periode dimana mini sabodam terisi hingga kapasitas tampungan statis terpenuhi dan kemudian ditambang.

Hasil penelitian juga menunjukkan kinerja mini sabodam dalam menampung sedimen yang dihasilkan dari setiap mm hujan yang jatuh pada sub DAS, yang secara detail dijabarkan pada Tabel 4. Sebagai contoh, mini sabodam yang memiliki SMR 25,9, seperti mini sabodam pada SD 12, dapat menampung sedimen sebesar 2.480,29 kg per mm hujan yang jatuh di sub DAS tersebut pada musim basah dan 1.108,51 kg per mm pada musim kering.

Pola endapan sedimen pada mini sabodam dapat diimbangi dengan upaya penambangan. Masyarakat termotivasi untuk menambang pasir karena dapat dijual dengan harga kisaran Rp. 160.000,- per m³ (hasil survey lapangan pada 2016, kondisi SSD (saturated surface dry), berat jenis 2,67 gr/cm³ (Rifky 2011)). Tiap siklus tampungan mini sabodam menghasilkan 27,5 m³ pasir siap jual. Tiap mini sabodam dapat ditambang oleh 2 orang pekerja. Secara ekonomis, suatu siklus tampungan dapat diselesaikan dalam 1 bulan (22 hari kerja) dengan imbalan masing-masing Rp. 100.000,- per orang hari. Oleh karena itu, suatu mini sabodam minimal harus memiliki 12 siklus tampungan dalam 1 tahun. Apabila SMR lebih besar dari 24, maka pada lokasi tersebut perlu dipertimbangkan untuk dibangun mini sabodam tambahan. Mini sabodam tambahan diperlukan agar mekanisme pengerukan sedimen yang tertampung dapat berjalan secara layak bagi masyarakat. Penambangan pada mini sabodam harus dilakukan tanpa alat berat untuk mencegah eksploitasi sedimen yang berlebihan.

Merujuk kepada hasil perhitungan SMR pada Tabel 4, dapat disampaikan bahwa masih diperlukan satu sabodam tambahan pada masing-masing sub DAS dengan laju angkutan sedimen yang tinggi. sub DAS tersebut adalah sub DAS dengan tutupan lahan CRDY dan kemiringan lahan terjal (SD2, 12, 17, 20, dan SD23-29) serta sub DAS dengan tutupan lahan CRDY/ FOEN dan kemiringan lahan sangat curam (SD21). Lokasi mini sabodam tambahan diharapkan masih berada dalam sub DAS yang dikaji, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8. Tidak direkomendasikan untuk membangun di sub DAS bagian hilir dari sub DAS yang dikaji, kecuali diikuti dengan desain mini sabodam yang lebih tinggi dan yang aman terhadap debit yang lebih besar.

Kapasitas tampung Rencana Waduk Ciawi

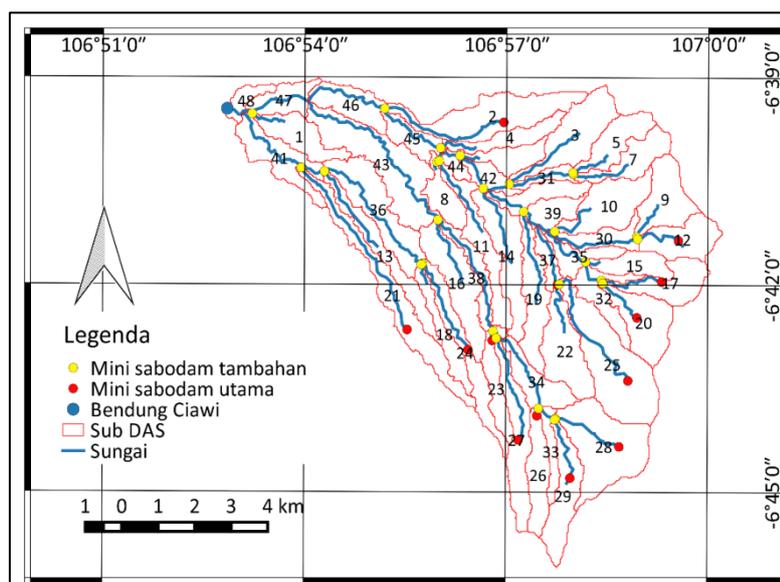
Hasil pemodelan tampungan dan sedimentasi pada Rencana Waduk Ciawi mencakup dua skenario utama, yakni Rencana Waduk Ciawi Tipe A (Tipe Terbuka) dan Rencana Waduk Ciawi Tipe B (Tipe Tertutup). Rencana Waduk Ciawi tipe terbuka memiliki tampungan maksimum banjir 5,03 juta m³ dan luas genangan maksimum 385,6 ribu m². Selain itu, Rencana Waduk Ciawi tipe terbuka memiliki tampungan normal sebesar 50 ribu m³ dan luas genangan normal 39 ribu m² (mendekati tanpa tampungan). Walaupun memiliki luas tampungan banjir yang sama, Rencana Waduk Ciawi tipe tertutup memiliki tampungan dan genangan normal yang lebih besar. Rencana Waduk Tipe B didesain dengan tampungan normal 3,85 juta m³ dan luas genangan normal

257,07 ribu m² (Balai Besar Wilayah Sungai Ciliwung Cisadane 2015). Pemodelan sedimen pada Calon Waduk Ciawi menggunakan fungsi *reservoir* yang tersedia pada model SWAT. Rencana Waduk Ciawi diskenariokan dibangun pada tahun 2006 dan dikaji angkutan sedimennya pada tahun 2011. Mini sabodam juga diasumsikan terbangun pada awal tahun 2006. Fokus pengamatan angkutan sedimen dilakukan pada periode tahun 2011. Sedimen Rencana Waduk Ciawi pada skenario operasi mini sabodam adalah sedimen pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi dikurangi volume penambangan di mini sabodam. Volume penambangan adalah volume tampung mini sabodam dikalikan kala ulang pengerukannya. Strategi ini digunakan sebagai pendekatan pengganti fungsi jadwal pengerukan mini sabodam. Volume sedimen pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi dihitung sebagai selisih antara sedimen yang masuk ke sub DAS tersebut dan sedimen yang masuk ke sub DAS hilir dari Rencana Waduk Ciawi. Volume pengerukan pada hulu sungai secara linier dapat mengurangi volume sedimen yang terendapkan di sub DAS waduk, berdasarkan prinsip keseimbangan transpor sedimen (Hassan dkk. 2007).

Sedimen di dalam tampungan basah Rencana Waduk Ciawi dimodelkan secara matematis (Tabel 5). Namun demikian, volume sedimen pada waduk sangat sensitif terhadap parameter RES_SED dan RES_NSED, yakni parameter konsentrasi sedimen pada waduk (Arnold dkk. 2012). Sedimen yang tertinggal di dalam waduk dihitung dengan mengurangi sedimen yang masuk pada waduk terhadap

sedimen yang keluar. Dampak keberadaan mini sabodam pada sedimentasi dalam tampungan basah dari waduk dianggap linear dengan dampak pengurangan sedimen yang ada pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi. Pola ini juga dibandingkan dengan kondisi angkutan sedimen dimana Waduk Ciawi tidak dibangun. Kondisi pada musim basah dan pada musim kering dipisahkan agar analisis sedimen dapat lebih jelas dilakukan. Sedimentasi pada tampungan waduk juga sangat dipengaruhi oleh kondisi volume tampungan air dari waduk. Semakin lama waduk menampung air, maka akan ada waktu yang lebih lama pula bagi sedimen yang terangkut oleh aliran air untuk mengendap (Auel 2011).

Penelitian ini menyajikan prediksi sedimentasi pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi pada beberapa skenario, sesuai dengan apa yang ditampilkan pada Tabel 5. Skenario tanpa adanya mini sabodam dan Rencana Waduk Ciawi (SID 6) menunjukkan bahwa jumlah sedimen teralirkan melalui outlet sub DAS waduk mencapai $42,37 \times 10^3 \text{ m}^3$ pada Tahun 2011. Jika pada titik tersebut dibangun bendungan, maka akan terjadi sedimentasi yang cukup besar, seperti yang digambarkan oleh nilai SCW untuk SID 1 dan 2. Walau demikian, proses sedimentasi tersebut bersifat dinamis. Sebagai gambaran, pada musim kering, laju sedimentasi pada tampungan rencana waduk lebih kecil dibanding pada musim basah. Laju sedimentasi ini bahkan kadang bernilai negatif. Nilai negatif ini berarti jumlah sedimen yang masuk ke tampungan waduk lebih kecil dibandingkan dengan jumlah sedimen yang mengalir ke luar dari waduk.



Gambar 8 Lokasi usulan mini sabodam pada sub DAS sungai-sungai yang mengalir ke Rencana Waduk Ciawi.

Kondisi sedimentasi pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi tergolong tinggi jika dibandingkan dengan sedimentasi pada sub DAS lainnya di DAS Ciliwung hulu. Lokasi Rencana Waduk Ciawi ditempatkan pada pertemuan dua sub DAS besar dan satu sub DAS kecil yang tujuan mula-mulanya untuk menampung air banjir dengan proporsi yang besar.

Namun demikian, lokasi pertemuan tiga sub DAS ini juga rentan terhadap pengendapan sedimen akibat morfologi lereng yang relatif datar. Data pada kolom 4, Tabel 5, menunjukkan bahwa tanpa adanya Rencana Waduk Ciawi (skenario ID 6), sedimentasi pada lokasi tersebut sudah cukup besar. Dengan adanya Rencana Waduk Ciawi, maka aliran pada sub DAS tersebut menjadi semakin lambat dan menyebabkan sedimentasi yang lebih besar, baik untuk Rencana Waduk Ciawi tipe terbuka maupun tertutup (skenario ID 1 dan 2). Keberadaan mini sabodam dapat mengurangi laju sedimentasi pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi. Hal tersebut dibuktikan dengan volume sedimentasi yang lebih kecil pada skenario ID 3, 4, dan 5.

Hal yang serupa dapat diamati pada kondisi sedimentasi di dalam tampungan calon waduk. Pada calon waduk tipe terbuka, pada kondisi musim kering, justru terjadi erosi yang mampu mengangkut sedimen keluar dari tampungan waduk. Kondisi yang perlu ditangani adalah pada saat musim basah, dimana terjadi sedimentasi sebesar $0,10 \times 10^3 \text{ m}^3$ pada calon waduk tipe terbuka. Keberadaan mini sabodam terbukti dapat menghindarkan calon waduk tipe terbuka dari bahaya sedimentasi (skenario ID 3, kolom 7, Tabel 5).

Pada calon waduk tipe tertutup, sedimentasi pada tampungan waduk tetap terjadi baik dengan dan tanpa adanya mini

sabodam. Sedimentasi tersebut dapat dikurangi dengan tetap mengeluarkan air dari waduk pada saat menampung banjir dalam jumlah yang optimum melalui pintu limpasan utama.

Terdapat perbedaan yang sangat mencolok pada kapasitas tampungan air pada calon waduk tipe terbuka dan calon waduk tipe tertutup. Pada musim kering, kapasitas tampung calon waduk tipe terbuka dapat dikatakan sangat minim. Hal ini berarti sebagian badan tampungan waduk akan kering dan berupa tanah lapang pada musim kemarau. Hal yang kontras terjadi pada musim hujan, dimana waduk akan tetap terisi oleh air banjir yang ditampung. Secara rerata, calon waduk tipe terbuka akan terisi oleh $2,08 \times 10^6 \text{ m}^3$ air pada musim banjir. Pada calon waduk tipe tertutup, secara rerata waduk akan terisi oleh tampungan air baik pada musim kering ($3,94 \times 10^6 \text{ m}^3$) maupun pada musim basah ($3,96 \times 10^6 \text{ m}^3$).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pembangunan mini sabodam besar pengaruhnya terhadap pengurangan laju sedimentasi Rencana Waduk Ciawi. Mini sabodam yang ditempatkan pada sub DAS bagian hulu akan menampung sedimen yang dihasilkan dari erosi lahan maupun erosi alur sungai. Penempatan mini sabodam juga harus diikuti dengan skenario penambangan sedimen yang tertangkap pada mini sabodam. Selain itu, keberadaan mini sabodam juga merupakan tindakan men-dislokasi-kan sebagian proses sedimentasi. Sebagian sedimen yang akan masuk ke dalam badan tampungan Rencana Waduk Ciawi dapat ditangkap pada tampungan mini sabodam.

Tabel 5 Hasil pemodelan sedimentasi pada berbagai skenario keberadaan mini sabodam dan Rencana Waduk Ciawi dalam periode Tahun 2011.

SID	MS	CR A	CR B	SCW ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	SCS musim kering ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	MACS musim kering ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	SCS musim basah ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	MACS musim basah ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
[1]	[2]	[4]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
1	-	V	-	53,19	-0,51	0,739	0,10	2,080
2	-	-	V	58,31	1,73	3,941	2,97	3,963
3	V	V	-	30,18	-1,53	0,7395	-1,69	2,082
4	V	-	V	35,30	0,80	3,9419	1,34	3,964
5	V	-	-	19,36	-	-	-	-
6	-	-	-	42,37	-	-	-	-

Keterangan: Simbol-simbol yang digunakan dalam Tabel 5 adalah SID (indeks skenario), MS (ada tidaknya mini sabodam), CR A (ada tidaknya Rencana Waduk Ciawi tipe tampungan terbuka), CR B (ada tidaknya Rencana Waduk Ciawi tipe tampungan tertutup), SCW (sedimentasi pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi), SCS (sedimentasi pada tampungan Rencana Waduk Ciawi), dan MACS (rerata volume tampungan bulanan Rencana Waduk Ciawi). Volume sedimen dihitung dengan faktor pengali berat jenis pasir jenuh air sebesar 1.834 kg/m^3 . (Belkhatir dkk. 2014).

Pada penelitian ini telah dilakukan analisis terhadap 6 (enam) skenario pengelolaan sedimen pada Sub DAS Rencana Waduk Ciawi. Penggunaan skenario desain waduk tipe terbuka bukan berarti tidak ada sedimentasi di dalam tampungan waduk sama sekali. Sedimentasi tahunan pada calon waduk tipe terbuka lebih rendah dibandingkan dengan sedimentasi pada calon waduk tipe tertutup. Pembangunan mini sabodam akan sangat membantu dalam mengurangi laju sedimen pada masing-masing skenario desain Rencana Waduk Ciawi.

Pembangunan mini sabodam juga dapat memberikan material galian C bagi masyarakat lokal. Dengan skenario ini, waduk Ciawi dapat berfungsi ganda, yakni sebagai pengendali banjir bagi masyarakat di bagian hilir dan sumber mata pencaharian masyarakat di sekitarnya sebagai penambang material golongan C.

Keterbatasan ketersediaan data hidrologi runtut waktu yang terverifikasi menjadi salah satu kendala dalam analisis hasil penelitian ini. Oleh karena itu, sebagai upaya penajaman, sinkronisasi, serta tindak lanjut dari hasil penelitian ini, diperlukan suatu sistem pengamatan debit dan pengamatan sedimen yang lebih handal di DAS Ciliwung Hulu. Keberadaan stasiun pengamatan debit dan sedimen sangat penting bagi upaya validasi model Waduk Ciawi pada masa yang akan datang. Selain itu, penelitian dasar mengenai ambang batas minimal debit sungai yang tidak menyebabkan adanya angkutan sedimen layang maupun sedimen terlarut juga sangat potensial untuk dilakukan pada masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menghaturkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan perumahan Rakyat yang telah memberikan dukungan finansial sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada Dr. Ir. Arie Setiadi Moerwanto, M.Sc., Dr. Ir. William Marcus Putuhena, M.Eng., dan Ir. Tety Mulyati, M.T. selaku pembina kelompok riset National Capital Integrated Coastal Development. Akhir kata, tidak lupa disampaikan terima kasih kepada Dr. Samuel Jonson Sutanto, S.T., M.Sc., Dr. Hatma Suryatmojo, Mr. Faris, BBWS Ciliwung Cisadane, Mr. Andi Siswandi, Dinas Pengairan Bogor, Angga B. Wibisono (berserta rekan-rekan mahasiswa Fakultas Kehutanan UGM yang terlibat dalam penelitian ini), dan segenap keluarga besar Balai Sabo atas dukungan teknis

sehingga penelitian ini dapat menghadirkan hasil yang bermanfaat.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, Fauzi Bachtiar. 2006. "Kajian Pengendalian Sedimentasi Waduk Panglima Besar Soedirman Dengan Teknologi Sabo." Universitas Gadjah Mada.
- Agus, Indra, and Iwan K. Hadihardaja. 2011. "Perbandingan Hidrograf Satuan Teoritis Terhadap Hidrograf Satuan Observasi DAS Ciliwung Hulu." *Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil* 18 (1): 55–70.
- Arnold, J.G., J.R. Kiniry, R. Srinivasan, J.R. Williams, E.B. Haney, and S.L. Neitsch. 2012. *SWAT Input/ Output Documentation Version 2012*. 2012thed. Texas: Texas Water Resources Institute. <http://swat.tamu.edu/documentation/2012-io/>.
- Auel, C. 2011. "Sediment Bypass Tunnel Design-Review and Outlook." In *Dams and Reservoirs under Changing Challenges*, 403–12. CRC Press. doi:doi:10.1201/b11669-53.
- Badan Standardisasi Nasional. 2015. *SN 2851:2015 Tentang Desain Bangunan Penahan Sedimen*. Indonesia.
- Balai Besar Wilayah Sungai Ciliwung Cisadane. 2015. "Laporan Pekerjaan Detail Desain Bendungan Ciawi Dan Bendungan Sukamahi." Jakarta.
- Belkhatir, Mostefa, Ahmed Arab, Nouredine Della, and Tom Schanz. 2014. "Laboratory Study on the Hydraulic Conductivity and Pore Pressure of Sand-Silt Mixtures." *Marine Georesources & Geotechnology* 32 (2): 106–22. doi:10.1080/1064119X.2012.710712.
- Boix-Fayos, Carolina, Joris de Vente, María Martínez-Mena, Gonzalo G. Barberá, and Víctor Castillo. 2008. "The Impact of Land Use Change and Check-Dams on Catchment Sediment Yield." *Hydrological Processes* 22 (25): 4922–35. doi:10.1002/hyp.7115.
- Broxton, Patrick D., Xubin Zeng, Damien Sulla-Menashe, and Peter A. Troch. 2014. "A Global Land Cover Climatology Using MODIS Data." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 53 (6): 1593–1605. doi:10.1175/JAMC-D-13-0270.1.
- Channan, S., K. Collins, and W. R. Emanuel. 2014. "Global Mosaics of the Standard MODIS Land Cover Type Data." College Park, Maryland, USA.

- Eaton, B. C., M. A. Hassan, and S. L. Davidson. 2012. "Modeling Wood Dynamics, Jam Formation, and Sediment Storage in a Gravel-Bed Stream." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117 (F4): n/a-n/a. doi:10.1029/2012JF002385.
- FAO, and UNESCO. 1979. "Soil Map of The World: South East Asia." In *Soil Map of The World*, 1sted., 179. paros: FAO - UNESCO.
- Fernández-Raga, María, Roberto Fraile, Jan Jacob Keizer, María Eufemia Varela Teijeiro, Amaya Castro, Covadonga Palencia, Ana I. Calvo, Joost Koenders, and Renata Liliana Da Costa Marques. 2010. "The Kinetic Energy of Rain Measured with an Optical Disdrometer: An Application to Splash Erosion." *Atmospheric Research* 96 (2–3): 225–40. doi:10.1016/j.atmosres.2009.07.013.
- Ghahramani, Afshin, Yoshiharu Ishikawa, Takashi Gomi, Katsushige Shiraki, and Shusuke Miyata. 2011. "Effect of Ground Cover on Splash and Sheetwash Erosion over a Steep Forested Hillslope: A Plot-Scale Study." *CATENA* 85 (1): 34–47. doi:10.1016/j.catena.2010.11.005.
- Ginting, Segel, and William M Putuhena. 2014. "Sistem Peringatan Dini Banjir Jakarta Jakarta-Flood Early Warning System (J-Fews)." *Sumber Daya Air* 10 (1): 71–84.
- Griffith, Jon, and Dylan Eagleton. 2013. "Storage Volume Calculation for Rock Filter Dams and Stone Check Dams." Atlanta, GA. [http://www.dot.ga.gov/PartnerSmart/DesignManuals/NPDES/Storage Volume Calculation for Rock Filter Dams and Stone Check Dams.pdf](http://www.dot.ga.gov/PartnerSmart/DesignManuals/NPDES/StorageVolumeCalculationforRockFilterDamsandStoneCheckDams.pdf).
- Hassan, Marwan A., Bonnie J. Smith, Dan L. Hogan, David S. Luzi, Andre E. Zimmermann, and Brett C. Eaton. 2007. "18 Sediment Storage and Transport in Coarse Bed Streams: Scale Considerations." In , 473–96. doi:10.1016/S0928-2025(07)11137-8.
- Jarvis, Andy, Hannes Isaak Reuter, Andrew Nelson, and Edward Guevara. 2008. "Hole-Filled SRTM for the Globe Version 4." *Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (Http://srtm.Csi.Cgiar.Org)*.
- KANTOUSH, Sameh, Tetsuya SUMI, and Mitsuhiro MURASAKI. 2011. "Evaluation of Sediment Bypass Efficiency by Flow Field and Sediment Concentration Monitoring Techniques." *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)* 67 (4): I_169-I_174. doi:10.2208/jscejhe.67.I_169.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2016. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor:28/PRT/M/2016 Tentang Analisis Harga Satuan Pekerjaan Bidang Pekerjaan Umum*. Indonesia.
- Kryanova, Valentina, and Mike White. 2015. "Advances in Water Resources Assessment with SWAT—an Overview." *Hydrological Sciences Journal*, April, 1–13. doi:10.1080/02626667.2015.1029482.
- Ministry of Public Works and Housing. 2015. "Laporan Kinerja Instansi Pemerintah." Jakarta. www.pu.go.id/uploads/info-anggaran/lakip/LaKIP_Kementerian_PUPR_2015.pdf.
- Mizuyama, Takahisa. 2010. "Recent Developments in Sabo Technology in Japan." *International Journal of Erosion Control Engineering* 3 (1): 1–3. doi:10.13101/ijece.3.1.
- Mukundan, R., D.E. Radcliffe, and L.M. Risse. 2010. "Spatial Resolution of Soil Data and Channel Erosion Effects on SWAT Model Predictions of Flow and Sediment." *Journal of Soil and Water Conservation* 65 (2): 92–104. doi:10.2489/jswc.65.2.92.
- Mustikasari, Rita. 2011. "Saluran Irigasi Katulampa." *Komunitas Peduli Ciliwung Bogor*, May 18. <https://tjiliwoeng.blogspot.co.id/2011/05/saluran-irigasi-katulampa.html>.
- Narulita, Ida, Rizka Maria, and M. Rahman Djuwansah. 2010. "Karakteristik Curah Hujan Di Wilayah Pengaliran Sungai (WPS) Ciliwung Cisadane." *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan* 20 (2): 95–110.
- Nuraida, Nuraida, Latief Mahir Rachman, and Dwi Putro Tejo Baskoro. 2016. "Analysis of High Conservation Value Aspect Erosion and Sedimentation Control (HCV 4.2) in Ciliwung Hulu Watershed." *Journal of Natural Resources and Environmental Management* 6 (2): 151–58. doi:10.19081/jpsl.2016.6.2.151.
- Parulian, Roganda, Mohammad Bisri, and Mohammad Solichin. 2015. "Analisis Profil Muka Air Dan Luasan Genangan Di Lahan Akibat Variasi Posisi Sudetan Sungai Ciliwung." *Jurnal Pengairan* 6 (2).
- Pemerintah Kota Depok. 2015. *Peraturan Daerah Kota Depok No.1 Tahun 2015 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Depok Tahun 2012 – 2032*. Indonesia: Pemerintah Kota Depok.

- Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. 2015. *Keputusan Gubernur Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta No. 2789 Tahun 2015*.
- PTUN Jakarta. 2016. *Putusan Pengadilan Tata Usaha Negara Jakarta Nomor 59/G/2016/PTUN-JKT*.
- Purnama, Ig Setyawan. 2009. "Evaluasi Potensi Sumberdaya Air Sungai Untuk Pengairan Di Provinsi Jawa Barat Dan Banten." *Jurnal Rekayasa Lingkungan* 5 (1): 61–67.
- Putra, Santosa Sandy, and Banata Wachid Ridwan. 2015. "Interconnected Ponds Operation for Flood Hazard Distribution." In *Procedia of Earth and Planetary Science*, edited by Irwan Meilano; and Phil Cummins, 1–8. Bandung: Elsevier B.V.
- Rifky, Muhammad. 2011. "Tinjauan Kuat Tekan Dan Modulus Elastisitas Pada Beton Menggunakan Pasir Normal Dan Pasir Merapi Serta Penambahan Pozzolan Lumpur Lapindo." Universitas Sebelas Maret. <http://eprints.uns.ac.id/8262/1/197881511201101431.pdf>.
- Sa'ad, Nono Sutrisno. 2002. "Pendugaan Erosi Skala Daerah Aliran Sungai Berdasarkan Erosi Pada Lahan." Institut Pertanian bogor.
- Sabo, J. L., J. C. Finlay, T. Kennedy, and D. M. Post. 2010. "The Role of Discharge Variation in Scaling of Drainage Area and Food Chain Length in Rivers." *Science* 330 (6006): 965–67. doi:10.1126/science.1196005.
- Saghafian, Bahram, Somayeh Sima, Sajjad Sadeghi, and Farzin Jeirani. 2012. "Application of Unit Response Approach for Spatial Prioritization of Runoff and Sediment Sources." *Agricultural Water Management* 109 (June): 36–45. doi:10.1016/j.agwat.2012.02.004.
- Saha, Suranjana, Shrinivas Moorthi, Xingren Wu, Jiande Wang, Sudhir Nadiga, Patrick Tripp, David Behringer, et al. 2014. "The NCEP Climate Forecast System Version 2." *Journal of Climate* 27 (6): 2185–2208. doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- Sear, D.A., C.E. Millington, D.R. Kitts, and R. Jeffries. 2010. "Logjam Controls on Channel:floodplain Interactions in Wooded Catchments and Their Role in the Formation of Multi-Channel Patterns." *Geomorphology* 116 (3–4): 305–19. doi:10.1016/j.geomorph.2009.11.022.
- Soewarno, APU. 2013. *Hidrometri Dan Aplikasi Teknosabo Dalam Pengelolaan Sumber Daya Air*. Edited by Graha Ilmu. Pertama. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Sudadi, P. T. Baskoro. S. D., K. Munibah., B. Barus, and Darmawan. 1991. "Peta DAS Ciliwung Hulu." Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Suprpto, Mamok, Yohana Baptista, Nidia Putri, and Siti Qomariyah. 2016. "Prediksi Pasok Dan Kebutuhan Air Sungai Ciliwung Pada Ruas Jembatan Panus Sampai Manggarai." *Matriks Teknik Sipil* 4 (2): 381–89.
- Susanto, Agus, Djati Kerami, Bambang Deliyanto, and Gatot Pramuhadi. 2013. "Analisis Kebutuhan Tampungan Dan Waduk Untuk Pengendalian Banjir Dan Penyediaan Air Bersih Yang Berkelanjutan (Studi Kasus DAS Ciliwung Hulu)." Tangerang.
- Sutrisno, Nono, and Nani Heryani. 2013. "Teknologi Konservasi Tanah Dan Air Untuk Mencegah Degradasi Lahan Pertanian Berlereng." *Jurnal Litbang Pertanian* 32 (2): 122–30.
- The International Union of Soil Science. 2007. "Digital Soil Map of the World v.3.6." FAO. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps>.
- Tikno, Sunu, Teguh Hariyanto, and Nadjadji Anwar. 2012. "Aplikasi Metode Curve Number Untuk Hujan Dan Aliran Permukaan Di Das Ciliwung Hulu – Jawa Barat." *Teknologi Lingkungan* 13 (1): 25–36.
- van Griensven, A., T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, M. Diluzio, and R. Srinivasan. 2006. "A Global Sensitivity Analysis Tool for the Parameters of Multi-Variable Catchment Models." *Journal of Hydrology* 324 (1–4): 10–23. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.09.008.
- Wang, Jiande, Wanqiu Wang, Xiouhua Fu, and Kyong-Hwan Seo. 2012. "Tropical Intraseasonal Rainfall Variability in the CFSR." *Climate Dynamics* 38 (11–12): 2191–2207. doi:10.1007/s00382-011-1087-0.
- Yustika, Rahmah Dewi, Suria Darma Tarigan, and Untung Sudadi. 2012. "Simulasi Manajemen Lahan Di DAS Ciliwung Hulu Menggunakan Model SWAT." *Informatika Pertanian* 21 (2): 69–76. doi:10.21082/ip.v21n2.
- Zamroni, Fahmi, Moh Sholichin, and Andre Primantyo. 2015. "Analisa Pengendalian Banjir Kali Ciliwung Ruas Jembatan MT. Haryono – Pintu Air Manggarai." *Jurnal Teknik Pengairan* 6 (1): 1–13.