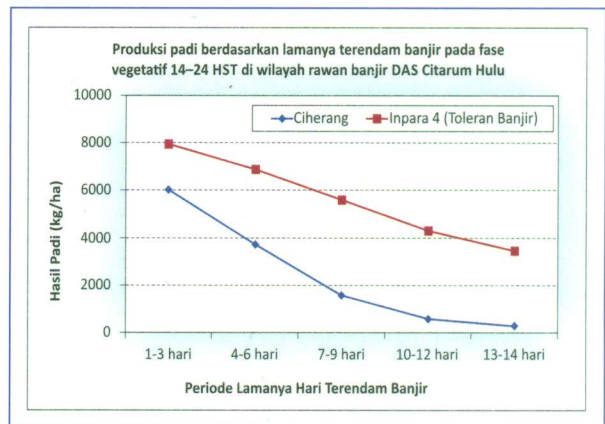
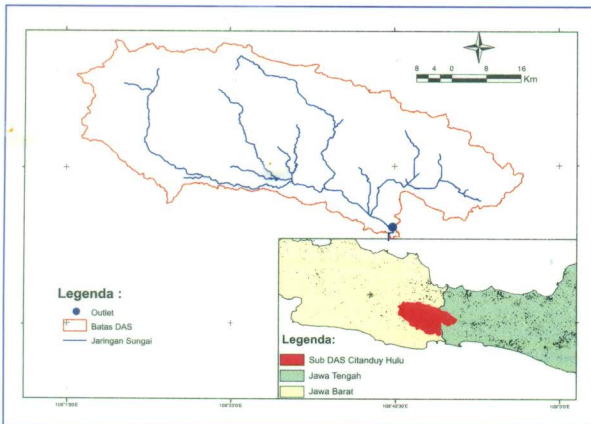
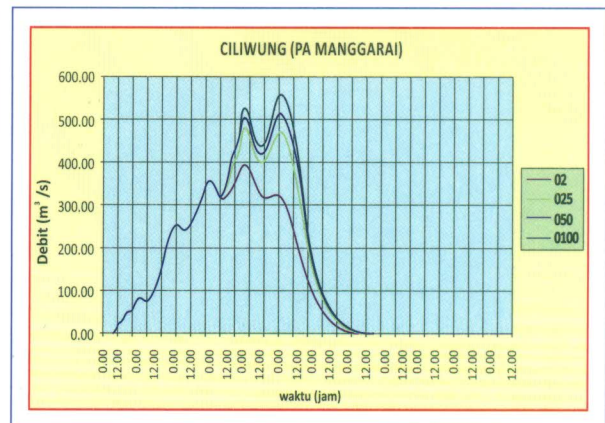
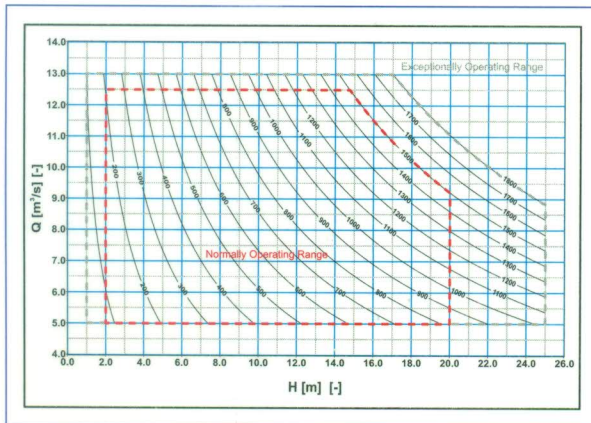


JURNAL

Teknik Hidraulik



JURNAL

Teknik Hidraulik

Jurnal Teknik Hidraulik kali terbit pada tahun 2010, Jurnal ini merupakan kelanjutan dari Buletin Pusair. Jurnal ini terbit 2 kali dalam satu tahun yaitu pada bulan Juni dan Desember. Naskah ilmiah berasal dari para pejabat fungsional peneliti baik di lingkungan Pusat Litbang Sumber Daya Air ataupun dari penulis yang berasal dari perguruan tinggi negeri/swasta serta instansi terkait di seluruh Indonesia yang mempunyai kegiatan di bidang sumber daya air. Jurnal Teknik Hidraulik mencakup berbagai bidang keilmuan antara lain: bidang teknik irigasi, teknik kualitas lingkungan dan tata air, teknik rawa, teknik pantai, teknik bangunan air, teknik persungai, bidang teknik hidrolika dan geoteknik keairan, bidang teknik hidrologi dan tata air, bidang teknik lingkungan keairan, bidang teknik pantai, bidang teknik persungai, dan bidang teknik sabo.

Pelindung

Ir. Waskito Pandu, M.Sc

Pembina

Dr. Ir. Suprpto, M.Eng

Penanggung Jawab

Mujiono, S.ST

Redaktur

Dra. Henny Maria

Ketua Dewan Penyunting

Dr. Ir. William Marcus Putuhena, M.Eng

Dewan Penyunting

Dr. (Eng) Nurlia Sadikin, S.Si., MT. (Ahli Bidang Geofisika)

Dr. Ir. Wanny K. Adidarma, M.Sc. (Ahli Bidang Teknik Hidrologi)

Ir. F. Yiniarti Eka Kumala, Dipl. HE. (Ahli Bidang Hidraulik dan Geoteknik Keairan)

Ir. Sri Hetty Susantin, M. Eng (Ahli Bidang Hidraulik dan Geoteknik Keairan)

Slamet Lestari, ST. MT. (Ahli Bidang Hidraulik dan Geoteknik Keairan)

Mitra Bestari

Prof. Dr. Ir. Hadi Utoyo Moeno, M.Sc., MIHT. (Ahli Bidang Geoteknik – USB)

Prof. Dr. Hidayat Pawitan, M.Sc (Ahli Bidang Hidrologi – IPB)

Dr. Ir. Bambang Soenarto, Dipl. H.E., Dipl. GR., M. Eng. (Ahli Bidang Hidrologi Aplikasi SDA – UTAMA JAGAKARSA)

Dr. Ir. Sri Legowo, M.Sc. (Ahli Bidang Teknik Sipil – ITB)

Doddi Yudianto, Ph. D (Ahli Bidang Teknik Sipil – UNPAR)

Sekretariat Redaksi:

Nurul Nurjanah, ST.

Komaridah

Alamat Redaksi/Penerbit :

**PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN SUMBER DAYA AIR
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM**

Jl. Ir. H. Juanda No. 193 Bandung 40135

Tlp.: (022) 2501083, 2504053, Fax: (022) 2500163, PO BOX: 841

E-mail: jurnal_th@pusair-pu.go.id; jurnalpusair@gmail.com

<http://www.pusair-pu.go.id>

JURNAL

Teknik Hidraulik

DAFTAR ISI

Kumpulan Abstrak Jurnal Teknik Hidraulik Vol. 5 No. 1 dan 2, Juni dan Desember 2014

Daftar Isi

Pengantar Redaksi

- Pemetaan Kondisi Bawah Permukaan Dengan Metode Geofisika (Studi Kasus: Bendung Pasarbaru, Tangerang) 99–110
Adang S. Soewaeli; Nurlia Sadikin
- Peluang Revitalisasi Pengelolaan Bendung Dalam Menjawab Tantangan Kebutuhan Energi Listrik (Studi Kasus Pengelolaan Bendung Perjaya) 111–124
Slamet Lestari
- Analisis Bangunan Pengendali Sedimen Dengan Menggunakan Model *Soil And Water Assessment Tool* Pada Sub-Daerah Aliran Sungai Citanduy Hulu, Jawa Barat 125–138
Said Karim; Nora H. Pandjaitan; Asep Sapei
- Penyempurnaan Desain Bangunan Pelimpah Ciluewueng Dengan Uji Model Hidraulik Fisik 139–150
Sarwono; Kirno
- Studi Longsoran Struktur Tanggul (Studi Kasus: Tanggul Banjir Kanal Barat, Jakarta) 151–164
Ahmad Taufiq; Diah Affandi
- Kriteria Material Konstruksi Untuk Bendungan Urugan (Studi Kasus Bendungan Sindangheula) 165–180
Diah Affandi
- Pendugaan Nilai Kelulusan Hidraulik Akuifer Dengan Uji Pemompaan Pada Sumur Filtrasi Di Bantaran Sungai Cihideung Bogor 181–192
Wahyu Gendam Prakoso; Roh Santoso B W; Meiske Widyarti

Index Pengarang

Pedoman Penulisan Artikel Bagi Penulis

ANALISIS BANGUNAN PENGENDALI SEDIMEN DENGAN MENGGUNAKAN MODEL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL PADA SUB-DAERAH ALIRAN SUNGAI CITANDUY HULU, JAWA BARAT

SEDIMENT CONTROL STRUCTURES ANALYSIS USING SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL MODEL IN UPPER CITANDUY SUB-WATERSHED, WEST JAVA

Said Karim¹⁾, Nora H. Pandjaitan²⁾, Asep Sapei³⁾

¹⁾Mahasiswa Pascasarjana Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor (IPB);

^{2,3)}Staf Pengajar Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor (IPB);

Jl. Raya Darmaga, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

E-mail: saidkarimt@yahoo.co.id

Diterima: 20 Mei 2014; Disetujui : 18 November 2014

ABSTRAK

Daerah Aliran Sungai (DAS) Citanduy adalah salah satu dari enam DAS kritis dan prioritas penanganan yang terdapat di Provinsi Jawa Barat. Sub-DAS Citanduy Hulu dengan luas 270.918,26 ha terdapat permasalahan sedimen dan penurunan kualitas air yang semakin hari semakin meningkat, sehingga memicu permasalahan lain seperti banjir, kekeringan dan kekurangan air baku serta permasalahan kesehatan penduduk sekitar yang memanfaatkan aliran air Sungai Citanduy. Studi ini menerapkan Model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) dengan menggunakan data historis aliran dan meteorologi untuk mengevaluasi kondisi sedimentasi Sub-DAS Citanduy Hulu sekaligus menyusun strategi pengendalian sedimen dengan menggunakan bangunan pengendali sedimen. Kalibrasi model dilakukan secara manual dengan metode coba-coba. Hasil kalibrasi menunjukkan 13 parameter yang sensitif terhadap debit aliran dan sedimen. Berdasarkan hasil perhitungan model SWAT diperkirakan volume sedimen di outlet Sub-DAS Citanduy Hulu sebesar 81.351.783,23 ton/tahun. Sedimen di outlet Sub-DAS Citanduy Hulu ini dapat direduksi hingga mencapai 29.557.556 ton/tahun atau menurun lebih dari 64% dengan menggunakan check dam sebagai bangunan pengendali sedimen.

Kata kunci: Kualitas air, sedimentasi, kontrol sedimen, model SWAT, Sub-DAS Citanduy Hulu

ABSTRACT

Citanduy Watershed is one of the six Watershed critical and handling priority located in the West Java Province. Upper Citanduy Sub-Watershed area of 270.918,26 ha there are sedimentation and degradation of water quality are major problems in Upper Citanduy Watershed (UCW). So that triggered other problems such as flood, drought, raw water shortage and public health problems nearby residents who benefit from the Citanduy river. The SWAT model using historical flow and meteorological data was applied here to evaluate sediment yield and to get alternative strategies for sediment control in Upper Citanduy Sub-Watershed using a sediment control structures. The model Calibration process manually using trial-error method. Based on manual calibration, 13 parameters were identified sensitive to water discharge and sediment. The model simulation showed that sediment yield in the outlet Upper Citanduy Sub-Watershed was 81,351,783.23 tons per year. Sediment at Upper Citanduy Sub-Watershed could be reduced to 29,557,556 tons per year or reduced more than 64% using check dam as a sediment control structures.

Keywords: Water quality, sedimentation, sediment control, SWAT model, Upper Citanduy Sub-Watershed

PENDAHULUAN

Keberhasilan pengelolaan suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) terletak pada penataan dan pengelolaan bagian hulu DAS tersebut. Pengelolaan DAS yang baik dan benar akan menjamin ketersediaan air dalam

jangka waktu panjang. Kesalahan dalam penataan dan pengelolaan suatu DAS mengakibatkan penurunan kualitas DAS. Perubahan tataguna lahan dan intensitas pertanian yang terjadi pada suatu kawasan menyebabkan terjadinya perubahan kondisi daerah

tangkapan yang dapat mengakibatkan terjadinya erosi dan sedimentasi di bagian hulu sampai di bagian hilir DAS.

Kajian terhadap hasil sedimen (*sediment yield*) memerlukan penggunaan model analisis yang memadai agar penilaian terhadap proses hidrologi dan erosi tanah yang terjadi dapat akurat, serta analisis prediksi dalam jangka panjang dapat dijadikan sebagai salah satu pertimbangan dalam membuat perencanaan dan pelaksanaan yang tepat. Berdasarkan SK Menteri Kehutanan No. SK.328/Menhut-II/2009, tanggal 12 Juni 2009 ditetapkan 108 DAS kritis dengan prioritas penanganan dan 6 diantaranya terdapat di Provinsi Jawa Barat. Salah satu DAS kritis itu adalah DAS Citanduy. Sub-DAS Citanduy Hulu merupakan kawasan penyangga bagian daerah hilir dan tengah yang tetap terjaga kemampuan konservasinya. Salah satu model untuk menganalisis aliran permukaan dan sedimen adalah *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). SWAT dikembangkan untuk mengetahui pengaruh dari manajemen lahan terhadap siklus hidrologi, sedimen maupun residu kimia pertanian pada suatu DAS yang kompleks dengan berbagai variasi jenis tanah, penggunaan lahan pada suatu periode waktu tertentu (Neitsch *et al.* 2005). DAS Citanduy dengan tingkat sedimentasi yang tinggi memasok sedimen ke Segara Anakan sebanyak lima juta m³/tahun, atau 74% dari seluruh sedimen yang masuk ke Segara Anakan (Yunus 2005).

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan yang telah diuraikan di atas maka tujuan penelitian ini adalah (1) menganalisis sedimen Sub-DAS Citanduy Hulu dengan *model Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), (2) Menyusun strategi pengendalian sedimen Sub-DAS Citanduy Hulu dengan menggunakan pendekatan struktur bangunan pengendali sedimen (*check dam*).

KAJIAN PUSTAKA

1. Daerah Aliran Sungai (DAS)

Kegiatan perusakan wilayah konservasi di hulu seperti penebangan liar dan pembukaan area hutan akan menyebabkan dampak menurunnya jumlah air dan kualitas air serta meningkatnya erosi. Terjadinya erosi dan tanah longsor menjadi sumber utama *transport* sedimen. Sementara itu di bagian tengah DAS yang umumnya terdapat *reservoir* (tampung) air akan mengalami pendangkalan. Keterkaitan antara daerah hulu - hilir tersebut kemudian dijadikan landasan perencanaan DAS yang terpadu, meliputi wilayah kajian, lembaga dan program-program yang diimplementasikan.

Penggunaan lahan didefinisikan sebagai suatu bentuk campur tangan manusia yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Penggunaan lahan dibedakan menjadi dua golongan besar, yaitu kelompok penggunaan lahan pertanian dan *non* pertanian. Penggunaan lahan pertanian adalah yang berkaitan dalam hal penyediaan air dan komoditas pertanian yang diusahakan di atas lahan tersebut, misalnya ladang/tegalan, perkebunan, kebun campuran, sawah, padang rumput, hutan primer dan hutan sekunder. Penggunaan lahan *non* pertanian adalah kegiatan yang tidak berkaitan dengan penyediaan air dan tidak berhubungan dengan tanaman, misalnya pemukiman, transportasi, pertambangan, institusi dan kawasan komersial (Arsyad 2009).

Ada banyak komponen hidrologi yang terpengaruh oleh adanya alih fungsi penggunaan lahan dan kegiatan pembangunan di bagian hulu DAS. Namun hanya beberapa yang menjadi fokus utama dan perlu menjadi perhatian (Asdak 2007), yaitu:

- 1) Koefisien *runoff* (C), yang menunjukkan persentase besarnya air hujan yang menjadi *runoff*.
- 2) Koefisien Rejim Sungai (KRS), adalah koefisien yang menyatakan perbandingan debit harian rata-rata maksimum dan rata-rata minimum.
- 3) Nisbah/perbandingan antara debit maksimum (Q_{max}) dan debit minimum (Q_{min}) dari tahun ke tahun, dan diamati kecenderungan perubahannya. Evaluasi ini untuk melihat keadaan DAS secara makro.
- 4) Kadar muatan sedimen dalam aliran sungai, yang dinyatakan dalam satuan mg/liter air. Kurva ini berbentuk logaritmik dan dapat digunakan sebagai alat evaluasi.
- 5) Karakteristik air tanah, yang membedakan dari sisi pergerakan dan waktu tinggal yang sangat lama.
- 6) Frekuensi dan periode ulang banjir.

2. Sedimentasi

Sudah menjadi pengetahuan umum, bahwa hanya sebagian, atau bahkan hanya sebagian kecil material sedimen yang tererosi di lahan DAS mencapai *outlet* DAS tersebut. Hasil erosi yang mencapai saluran outlet biasa disebut dengan *sediment yield*. Asdak (2007), mendefinisikan *sediment yield* (hasil sedimentasi) sebagai banyaknya sedimen yang dihasilkan dari proses erosi di daerah tangkapan air pada suatu tempat dan waktu tertentu. Konsentrasi sedimen dalam suatu sungai menentukan kualitas fisik perairan. Ada dua elemen terkandung dalam muatan sedimen total, yaitu; (1) sedimen di dasar (*bedload*);

dan (2) sedimen melayang (*suspended sediment*). Dengan mengasumsikan konsentrasi sedimen di semua bagian penampang melintang sama, maka Asdak (2007) menyatakan:

$$Q_s = 0,0864 \times C \times Q \quad 1)$$

Keterangan:

Q_s , debit sedimen (ton/hari); C , konsentrasi sedimen; dan Q , debit sungai (m^3/det).

Menurut ukurannya, sedimen dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis seperti pada Tabel 1 (Dunne & Leopold 1978 dalam Asdak 2007).

Tabel 1 Klasifikasi ukuran partikel sedimen

Jenis Sedimen	Ukuran Partikel (mm)
Liat	< 0.0039
Debu	0.0039 – 0.0625
Pasir	0.0625 – 2.00
Pasir Besar	2.00 – 64

Sumber: Asdak, 2007

Besarnya perkiraan hasil sedimen menurut Asdak (2007) dapat ditentukan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$Y = E (NPS) W_s \quad 2)$$

Keterangan:

Y , Hasil sedimen per satuan luas (ton/ha)

E , Jumlah erosi (ton)

W_s , Luas Daerah Aliran Sungai (ha).

NPS , Nisbah Pelepasan Sedimen (%)

Besarnya nilai SDR dalam perhitungan hasil sedimen suatu daerah aliran sungai umumnya ditentukan dengan menggunakan tabel hubungan antara luas DAS dan besarnya SDR. Model-model erosi seperti USLE dan RUSLE menduga laju tanah tererosi di skala plot, tetapi seringkali perkiraan tersebut memberikan hasil yang lebih tinggi nilainya dari nilai yang terukur di titik *outlet* sungai. Peran SDR adalah berfungsi untuk mengoreksi ketidakakuratan hasil prediksi tersebut (Benedict dan Klik 2006).

Pada luasan daerah tangkapan air tertentu, metode yang umum digunakan untuk mengestimasi SDR adalah melalui persamaan fungsi SDR sebagai berikut:

$$SDR = \alpha A^\beta \quad 3)$$

Keterangan:

A , *catchment area* (Km^2); α , konstanta; serta β , eksponen skala (*scaling exponent*), dan α dan β merupakan parameter-parameter empiris (Walling 1983, Richards 1993). Nilai SDR akan berkurang dengan meningkatnya luas area yang digunakan dalam persamaan tersebut.

3. Bangunan Pengendali Sedimen

Salah satu cara untuk mengendalikan sedimen adalah membuat bangunan pengendali sedimen (*check dam*). *Check dam* adalah bangunan yang dibuat melintang sungai yang berfungsi untuk menghambat kecepatan aliran permukaan dan menangkap sedimen yang dibawa aliran air sehingga kedalaman dan kemiringan sungai berkurang (Suripin, 2001). Sistem pengendali sedimen dengan pendekatan struktural (bangunan) sangat efektif dalam penangkapan serta pengurangan sedimen dan juga mengurangi banjir pada musim hujan (Van Liew *et al.* 2003).

Menurut Mishra *et al.* (2006), melalui aplikasi model SWAT dengan menggunakan *check dam* sebagai bangunan pengendali sedimen dapat mengurangi sedimentasi pada suatu DAS lebih dari 64%. *Check dam* sangat efektif dalam mengelola dan mengendalikan sedimentasi ke bagian hilir suatu DAS. Bendung-bendung penahan dibangun di sebelah hulu DAS yang berfungsi memperlambat gerakan dan berangsur-angsur mengurangi volume banjir lahar. Untuk menghadapi gaya-gaya yang terdapat pada banjir lahar maka diperlukan bendung penahan yang cukup kuat. Selain itu untuk menampung benturan batu-batu besar, maka mercu dan sayap bendung harus dibuat dari beton atau pasangan yang cukup tebal dan dianjurkan sama dengan diameter maksimum batu-batu yang diperkirakan akan melintasi. Walaupun terdapat sedikit perbedaan perilaku gerakan sedimen, tetapi metode pembuatan desain untuk pengendaliannya hampir sama, kecuali perbedaan pada konstruksi sayap mercu serta ukuran pelimpah dan bahan tubuh bendung. Persyaratan dan informasi dalam perencanaan teknis bangunan penahan sedimen adalah sebagai berikut:

- 1) Parameter desain meliputi parameter desain topografi, hidrologi, dan geoteknik;
- 2) Data lain yang diperlukan seperti bahan bangunan tersedia, pemukiman, sarana prasarana, serta tenaga kerja.

Tata letak bendung penahan harus memenuhi ketentuan sebagai berikut (SNI 03-2851-1991):

- 1) Lokasi *check dam* harus direncanakan pada tempat yang dasar sungainya dikhawatirkan akan turun;
- 2) Penentuan lokasi agar dapat menghasilkan bangunan paling ekonomis sehingga biaya pembuatan perdaya tamungnya menghasilkan nilai paling kecil;
- 3) Di sekitar titik pertemuan kedua sungai dengan lokasi disebelah hilirnya;
- 4) Sumbu bendung penahan sedimen harus tegak lurus arah aliran di bagian hilirnya;

- 5) Apabila lokasi bendung penahan pada tikungan sungai, harus dilakukan tinjauan hidraulik terhadap kemungkinan limpasan dan gerusan pada tebing luar baik di hulu maupun hilir bangunan.

4. Model Soil and Water Assessment Tools (SWAT)

SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) merupakan model kejadian kontinyu skala DAS yang beroperasi secara harian dan dirancang untuk memprediksi dampak pengelolaan DAS terhadap debit, sedimen, dan residu kimia pertanian. Model SWAT berbasis fisik, efisien secara komputersasi, dan mampu membuat simulasi untuk jangka waktu yang panjang. Keluaran dari SWAT adalah informasi-informasi mengenai respon hidrologi di DAS, sub-DAS, dan sungai utama.

Model SWAT berdasarkan pada perhitungan neraca air sebagai berikut (Neitsch *et al.* 2002):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=j}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad 4)$$

Keterangan:

- SW_t , kandungan akhir air tanah (mm H₂O);
 SW_0 , kandungan air tanah awal pada hari ke-i (mm H₂O);
 R_{day} , jumlah presipitasi pada hari ke-i (mm H₂O);
 Q_{surf} , jumlah *surface runoff* pada hari ke-i (mm H₂O);
 E_a , jumlah evapotranspirasi pada hari ke-i (mm H₂O);
 W_{seep} , jumlah air yang memasuki *vadose zone* pada profil tanah hari ke-i (mm H₂O);
 Q_{gw} , jumlah air yang kembali pada hari ke-i (mm H₂O).

Erosi dan hasil sedimentasi dihitung untuk setiap unit respon hidrologi dengan menggunakan model MUSLE sebagai berikut (Neitsch *et al.* 2002):

$$sed = 11,8 (Q_{surf} q_{peak} area_{HRU})^{0,56} \times K_{USLE} C_{USLE} P_{USLE} LS_{USLE} CFRG \quad 5)$$

Keterangan:

- sed, beban sedimentasi (ton);
 Q_{surf} volume aliran permukaan (mm H₂O/ha); q_{peak} tingkat puncak aliran permukaan (m³/dtk); $area_{HRU}$ luas area dari unit respon hidrologi (ha); K_{USLE} faktor erodibilitas tanah USLE; C_{USLE} faktor penutupan dan manajemen USLE; P_{USLE} faktor konservasi lahan USLE; LS_{USLE} faktor topografi USLE; dan CFRG, faktor pecahan batuan.

Total jumlah sedimen yang ditransportasikan keluar dari bagian aliran sungai dihitung berdasarkan:

$$sed_{out} = sed_{ch} \times \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad 6)$$

Keterangan:

- sed_{out} , total jumlah sedimen yang ditransportasikan keluar (ton); sed_{ch} , jumlah sedimen tersuspensi pada aliran sungai (ton); V_{out} , volume air yang meninggalkan segmen aliran (m³) setiap waktunya; V_{ch} , volume air pada segmen aliran sungai (m³) setiap waktunya.

Model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) merupakan suatu model hidrologi yang dibangun oleh Dr. Jeff Arnold untuk *USDA Agricultural Research Services* (ARS) yang digunakan untuk mengevaluasi dan menilai kualitas suatu DAS dengan berbagai luasan di Amerika. Saat ini model SWAT telah digunakan untuk mengidentifikasi, menilai dan mengevaluasi berbagai permasalahan DAS yang ada di Asia seperti Tiongkok, India, Jepang, Vietnam, Thailand, Malaysia dan Indonesia. Penerapan model SWAT di Indonesia belum banyak dilakukan dan tergolong masih baru. SWAT dikembangkan untuk memprediksi dampak praktik-praktik manajemen lahan terhadap debit, sedimen maupun residu kimia pertanian pada suatu DAS yang kompleks dengan berbagai variasi jenis tanah, penggunaan lahan pada suatu periode waktu tertentu. Model ini dapat digunakan sebagai alat untuk memilih tindakan yang tepat guna menyelesaikan permasalahan di DAS tersebut.

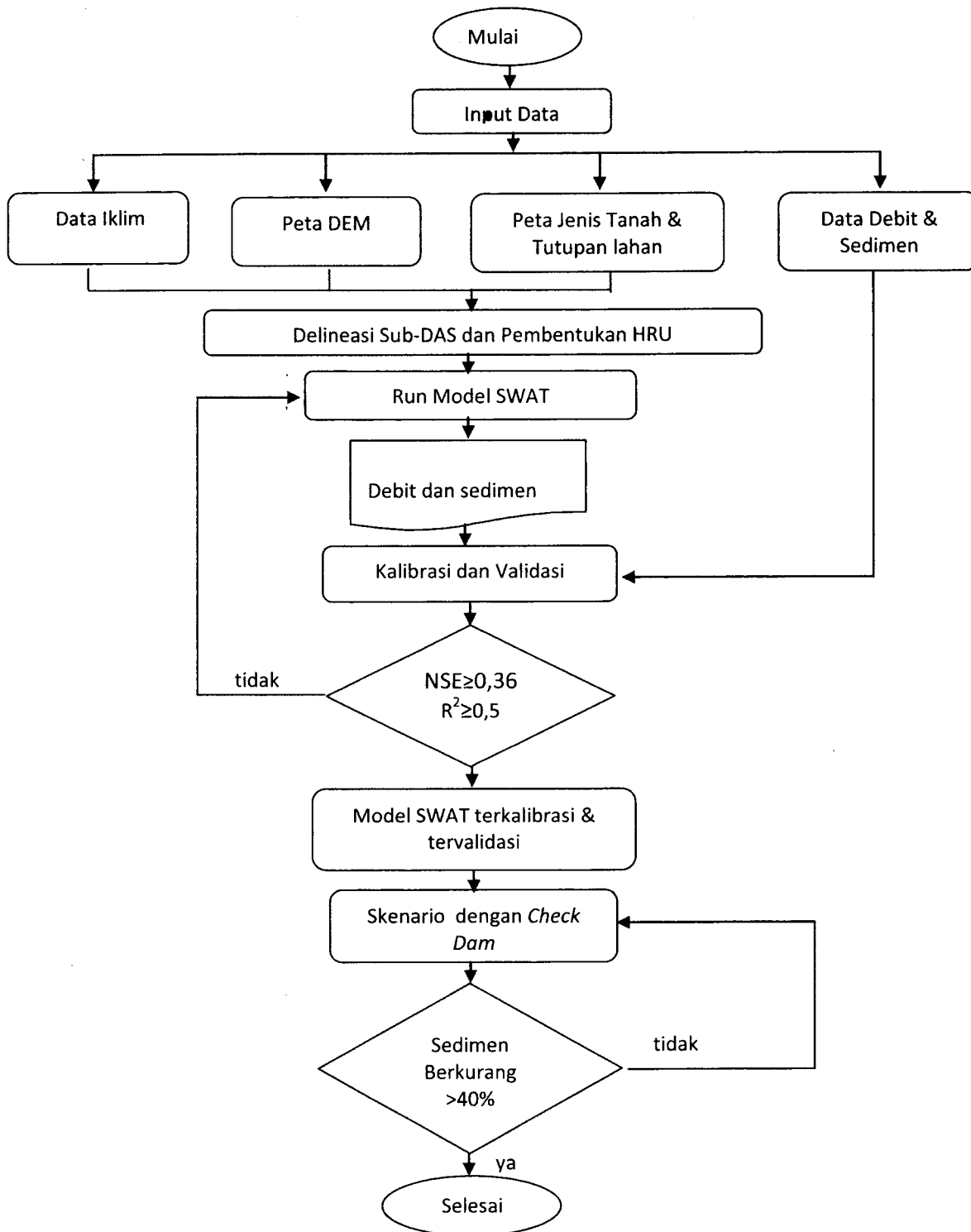
METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Juni 2013-Februari 2014 di wilayah hulu DAS Citanduy, Jawa Barat dengan Bendung Manganti sebagai outletnya (lihat Gambar 1). Penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan. Secara umum tahapan-tahapan tersebut disajikan pada Gambar 2.

Adapun metode penelitian ini dilaksanakan dalam empat tahap yaitu (1) tahap pengumpulan data (2) tahap pengolahan data input, (3) tahap penggunaan model SWAT, dan (4) tahap analisis dan penyajian data.

1. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data-data yang dibutuhkan dari instansi-instansi terkait. Data yang diperoleh berupa data sekunder yaitu peta *Digital Elevation Map* (DEM), peta tutupan lahan, peta tanah dan karakteristiknya, data curah hujan, data iklim seperti suhu udara minimum dan maksimum, kelembaban, radiasi sinar matahari, dan kecepatan angin.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Proses tersebut dilakukan secara berurutan. Langkah visualisasi bersifat pilihan karena hasil simulasi SWAT dapat dilihat pada *folder TxtInOut* berdasarkan kriteria penggolongan tertentu.

- 1) Penentuan Batas DAS Secara Otomatis (*Automatic Watershed Delineation*) Pertama, SWAT mendelineasi batas DAS yang diobservasi dengan menggunakan *outlet* sungai sebagai

bagian paling hilir DAS. Delineasi dilakukan terhadap peta DEM yang telah diproyeksi sistem UTM zona 49S - datum WGS84. Garis batas DAS diperoleh berdasarkan titik-titik tertinggi punggung topografi. Proses delineasi merupakan langkah awal untuk menentukan *catchment area* DAS. Proses delineasi melalui tiga tahap, (1) *Setup and Preprocessing*, yang menggunakan satuan ketinggian dalam meter dan DEM yang

telah dikonversi ke dalam format ASCII (.asc), (2) *Network Delineation by Threshold Method*, delineasi jaringan sungai menggunakan *threshold* (ambang batas) pada angka 5000 dalam satuan hektar, sedangkan jumlah *grid cells* yang terbentuk berdasarkan angka ambang batas yang ditetapkan, dan (3) *Custom Outlet/ Inlet Definition and Delineation Completion*.

2) Pembentukan HRU

HRU merupakan unit-unit dalam suatu DAS yang turut menentukan respon sistem siklus hidrologi pada suatu areal tertentu. HRU merupakan karakter bagian DAS yang unik dan dibentuk dari unsur area batas sub-DAS, karakteristik tanah, penggunaan lahan dan kemiringan lereng.

3) *SWAT Setup and Run*

Langkah ketiga adalah *setup* model SWAT dan menjalankannya.

4) Visualisasi *Output*

SWAT memberikan keleluasaan penyajian visualisasi hasil *running* model dengan diberikannya pilihan visualisasi data statik dan animasi.

5) Kalibrasi dan Validasi

Langkah kalibrasi dilakukan dengan cara membandingkan secara statistik sedimen data angkutan sedimen hasil prediksi menggunakan model SWAT dengan data angkutan sedimen sungai hasil observasi. Hal ini dilakukan untuk menilai sampai sejauh mana performa model dalam merepresentasikan keadaan aktual.

Untuk validasi dengan menggunakan periode tahun yang berbeda dari periode kalibrasi. Model dikatakan valid jika nilai koefisien *Nash sutcliffe efficiency* (NSE) lebih besar atau sama dengan 0,36 dan koefisien determinasi (R^2) lebih besar sama dengan 0,50 (Nash and Sutcliffe 1970). Nilai koefisien NSE dan R^2 di hitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad 7)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right]^{0,5}} \right\} \quad 8)$$

Keterangan:

n, jumlah data; O_i , nilai data observasi; S_i , nilai data simulasi; \bar{S} , rata-rata data observasi; \bar{O} , nilai rata-rata data simulasi.

Menurut Van Liew *et al.* (2005), dalam Stehr *et al.* (2009), nilai NSE dikategorikan ke dalam tiga kriteria hasil penilaian, antara lain:

- a) Jika $NSE \geq 0,75$ maka dikategorikan baik
- b) Jika $0,75 \geq NSE \geq 0,36$ maka dikategorikan memuaskan
- c) Jika $NSE < 0,36$ maka dikategorikan kurang memuaskan

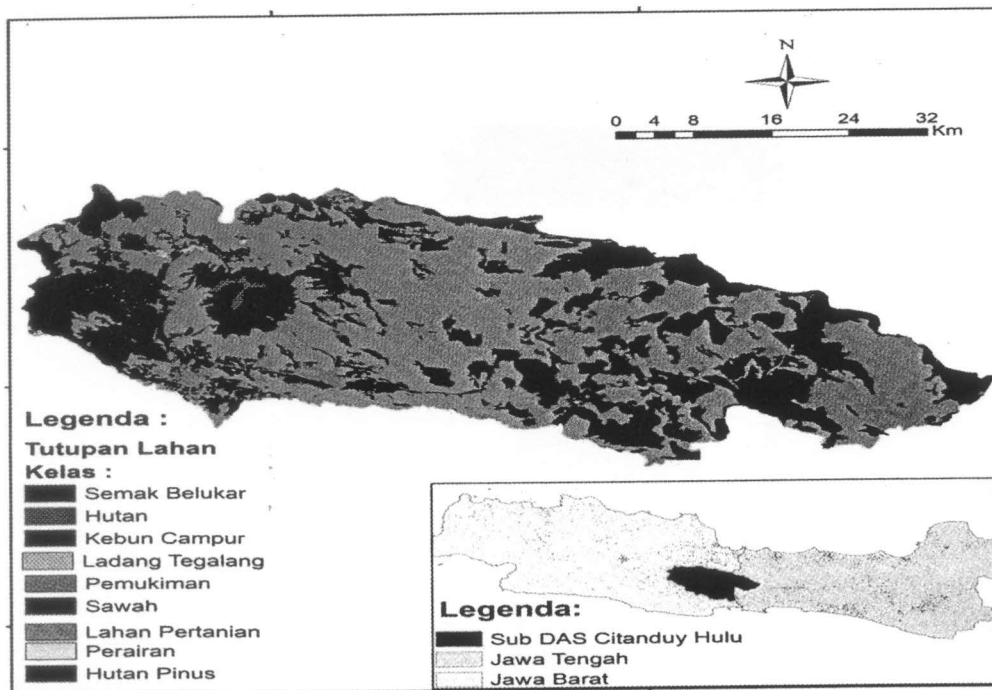
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kondisi Umum Sub-DAS Citanduy Hulu

DAS Citanduy adalah salah satu dari enam DAS kritis dan prioritas yang ada di Provinsi Jawa Barat yang teridentifikasi oleh Balai Pengelolaan DAS Cimanuk-Citanduy. Secara geografis Sub-DAS Citanduy Hulu terletak pada koordinat $07^{\circ} 39' 30'' - 07^{\circ} 58' 30''$ LS dan $108^{\circ} 01' 30'' - 109^{\circ} 03' 00''$ BT dengan luas wilayah kurang lebih 270.918,26 ha. Terletak pada ketinggian antara 16 - 2192 m dpl mengalir dari hulu ke daerah hilir melalui daerah Tasikmalaya, Ciamis, dan Banjar (Jawa Barat) serta bermuara di hilir Segara Anakan Cilacap Provinsi Jawa Tengah.

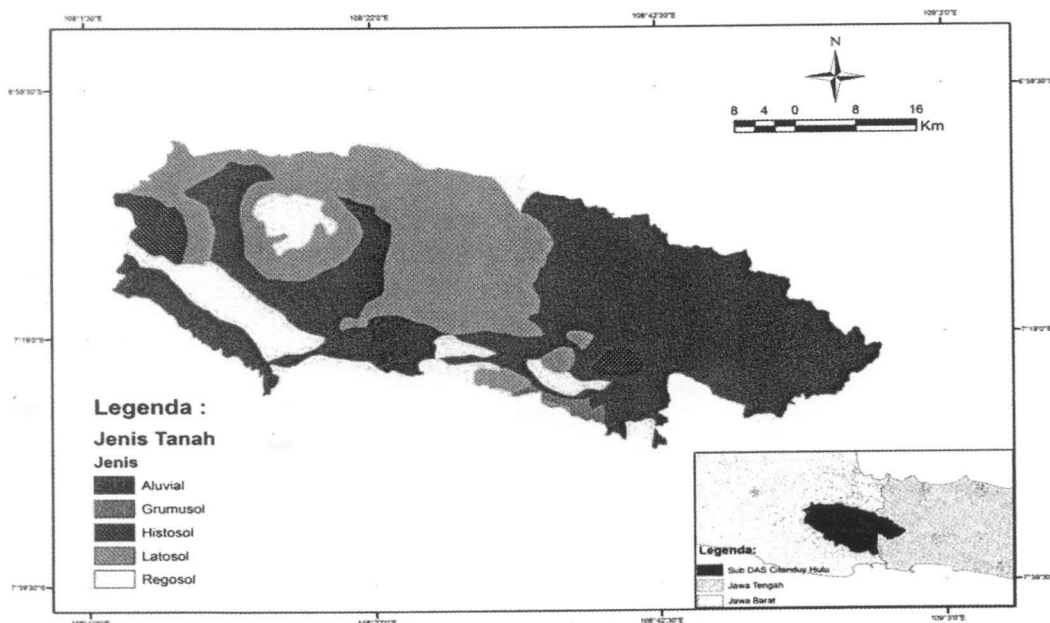
Iklim pada daerah penelitian ini dipengaruhi oleh dua musim, yaitu musim kemarau dan musim penghujan. Berdasarkan data curah hujan lima tahun terakhir (2008-2012) dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air Bandung diperoleh informasi bahwa pada musim hujan, curah hujan tertinggi pada DAS bagian hulu bisa mencapai 507,38 mm/bulan pada tahun 2010 dan terendah mencapai 0,44 mm/bulan pada tahun 2008. Temperatur udara di wilayah DAS Citanduy bervariasi antara $19,4^{\circ}\text{C} - 32,65^{\circ}\text{C}$, dengan temperatur maksimum mencapai $32,65^{\circ}\text{C}$ pada tahun 2010 dan temperatur minimum $19,4^{\circ}\text{C}$.

Topografi wilayah DAS Citanduy meliputi daerah pegunungan di bagian Utara dan pantai di bagian Selatan yang berbatasan dengan Samudera Indonesia. Pada bagian tengah merupakan daerah perbukitan. Ketinggian topografi bervariasi dari 16 m-2192 m dpl dengan kemiringan lahan bervariasi mulai dari datar (0-7%), berombak (8-15%), bergelombang (16-30%), berbukit dan bergunung (31-45%), serta bergunung curam (>45%). Kelerengan merupakan faktor yang mempengaruhi karakteristik aliran air karena dapat menentukan besar dan kecepatan volume *run-off*.



Sumber: BP DAS Cimanuk-Citanduy

Gambar 3 Peta Tutupan Lahan Sub-DAS Citanduy Hulu (Tahun 2011)



Sumber: Puslit Tanah & Agroklimat, Deptan 1992

Gambar 4 Peta Jenis Tanah Sub-DAS Citanduy Hulu Jawa Barat

Jenis tutupan lahan dikelompokkan menjadi sawah, lahan pertanian, hutan, perkebunan campuran dan pemukiman (Gambar 3). Tutupan lahan sawah, hutan dan lahan pertanian mendominasi wilayah ini. Adapun keadaan umum penutupan lahan, karakteristik tanah dan kemiringan lereng pada DAS Citanduy Hulu dapat dilihat pada Gambar 4.

Pada umumnya jenis tanah di bagian DAS Citanduy Hulu bertekstur lempung, lempung berpasir, lempung berliat, liat berdebu, dan lempung berdebu

dengan kedalaman solum tanah dari sedang sampai dalam.

2. Kalibrasi Model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

Hasil simulasi awal model SWAT sebelum kalibrasi dengan data hasil pengukuran harian diperoleh nilai koefisien determinasinya (R^2) sebesar 0,49 dan NSE 0,23. Agar model dapat sesuai dengan data pengukuran, maka sebelumnya dilakukan

kalibrasi parameter-parameter dalam model SWAT. Berdasarkan ketersediaan data yang ada maka tidak semua parameter dari 500 parameter di dalam SWAT dapat digunakan. Kalibrasi parameter dilakukan berdasarkan literatur dan hasil-hasil penelitian sebelumnya. Prosedur dalam mengkalibrasi model mengacu pada analisis *water balance* (neraca air), total aliran dan sedimen pada model SWAT. Dari semua parameter tersebut, dilakukan kalibrasi pada 13 parameter yang signifikan mempengaruhi hasil simulasi dan *output*/keluaran model. Penentuan parameter sensitif ini berdasarkan parameter yang mempunyai nilai *t-Stat* yang lebih besar dari *p-Value*. *P-Value* yang mendekati 0 berarti lebih signifikan (Abbaspour 2011). Adapun 13 parameter yang signifikan tersebut antara lain: ALPHA_BF (faktor alpha aliran dasar), GW_REVAP (batas kedalaman air di *shallow aquifer* untuk revap atau perkolasi ke akuifer dalam), GWQMN (kedalaman minimum air pada perairan dangkal), GW_DELAY (lama penundaan air bawah tanah), CH_N1 (nilai manning untuk saluran tributary), CH_N2 (nilai manning untuk saluran utama), CH_K1 (konduktivitas hidrolis efektif pada saluran tributari), CH_K2 (konduktivitas hidrolis efektif pada saluran utama), CN2 (bilangan kurva), ALPHA_BNK (faktor alpha aliran dasar untuk "bank storage"), USLE_P (faktor pengelolaan persamaan USLE), SLSUBBSN (panjang lereng), HRU_SLP (kemiringan aliran permukaan DAS rata-rata). Parameter yang digunakan dalam kalibrasi disajikan pada Tabel 3.

Nilai bilangan kurva (CN) pada tutupan lahan di seluruh DAS terdiri dari tutupan lahan sawah sebesar 38,7, lahan pertanian 37,92, kebun campur 36, hutan pinus 36,6, pemukiman 68,39 dan perairan 73,6. Tahap kalibrasi model dilakukan dengan menggunakan data bulanan observasi dan simulasi pada bulan Januari-Desember tahun 2011 sampai dengan 2012 (Gambar 5). Nilai koefisien determinasi (R^2) dan nilai NSE (*Nash and Sutcliffe Efficiency*) menjadi indikator penilaian baik buruknya model hasil kalibrasi yang menggunakan metode coba-coba (*trial-error*). Parameter yang digunakan dalam proses kalibrasi merupakan parameter yang sensitif terhadap kondisi hidrologi DAS Citanduy Hulu. Dari hasil kalibrasi diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,75 dan nilai NSE sebesar 0,68.

3. Validasi Model

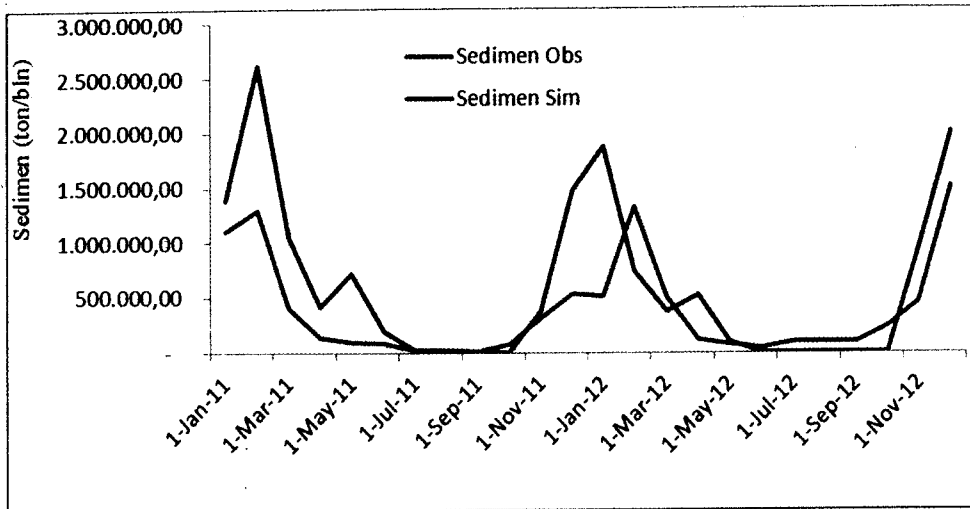
Dalam proses validasi yang dilakukan simulasi dengan mengkombinasikan nilai parameter terbaik pada saat kalibrasi. Validasi model SWAT terkalibrasi dilakukan dengan menggunakan data sedimen pada periode tahun yang berbeda dengan tahun kalibrasi. Adanya keterbatasan waktu dan data pendukung yang ketersediaan dilokasi penelitian sehingga proses validasi dengan menggunakan data sedimen bulan Januari sampai dengan Desember 2008.

Dari proses validasi diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,72 dan nilai NSE sebesar 0,61, sehingga model dikatakan memuaskan (Nash dan Sutcliffe 1970). Hidrograf sedimen yang diperoleh disajikan pada Gambar 6.

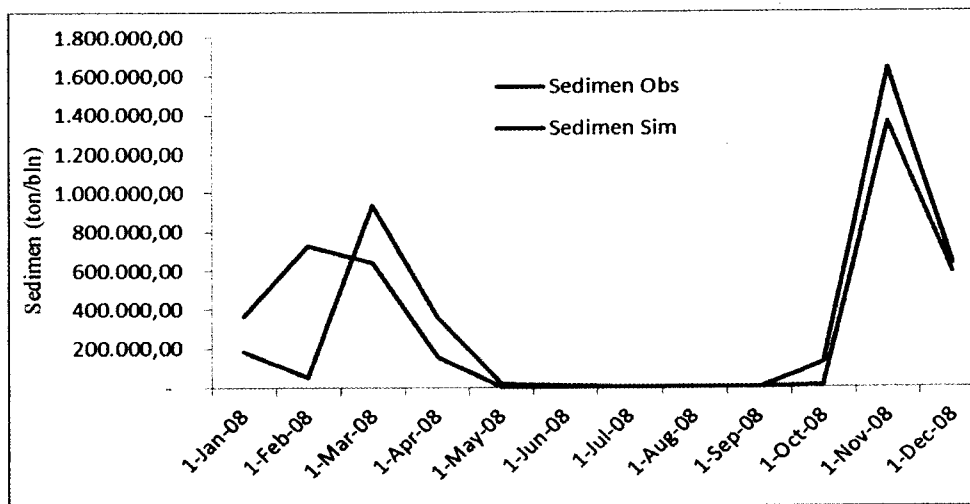
Tabel 3 Parameter Yang Digunakan Dalam Proses Kalibrasi

Parameter	Keterangan	Nilai	
		Kisaran	Akhir
CH_K1	konduktivitas hidrolis efektif pada saluran tributary	0-300	0,65
CH_K2	Konduktivitas hidraulik efektif pada saluran utama	0-300	112,25
CH_N1	nilai manning untuk saluran tributary	0-0,50	0,27
CH_N2	Nilai manning untuk saluran utama	0-0,30	0,14
ALPHA_BANK	faktor alpha aliran dasar untuk 'bank storage	0,02-0,20	0,45
ALPHA_BF	faktor alpha aliran dasar	0-1	0,60
GW_DELAY	lama penundaan air bawah tanah	0-500	35
GWQMIN	kedalaman minimum air pada perairan dangkal	0-5000	0,70
GW_REVAP	perkolasi ke akuifer dalam	0,02-0,20	0,02
CN2	bilangan kurva	0-100	(x 0,85)*
USLE_P	faktor pengelolaan untuk persamaan USLE	0-1	0,95
SLSUBBSN	panjang lereng rata-rata	10-150	91,46
HRU_SLP	kemiringan aliran permukaan DAS	0-1	0,03

* Kalibrasi manual (coba-coba) untuk merubah semua nilai parameter CN2 diseluruh DAS dengan dikalikan bilangan pengali 0,85 agar hasil simulasi model saat kalibrasi mendekati data observasi di lapangan (Neitsch et al. 2005)



Gambar 5 Kurva Sedimen Hasil Kalibrasi



Gambar 6 Kurva Sedimen Hasil Validasi

Gambar 6 menunjukkan bahwa sedimen observasi rata-rata dari bulan Januari sampai dengan Desember 2008 yang terdapat di *outlet* Sub-DAS Citanduy Hulu sebesar 416.494,57 ton/bulan. Sedangkan sedimen simulasi rata-ratanya sebesar 426.364,41 ton/bulan. Berdasarkan data tersebut menunjukkan adanya tingkat sedimen yang tinggi di Sub-DAS Citanduy Hulu sehingga perlu dilakukan strategi penanggulangan sedimen.

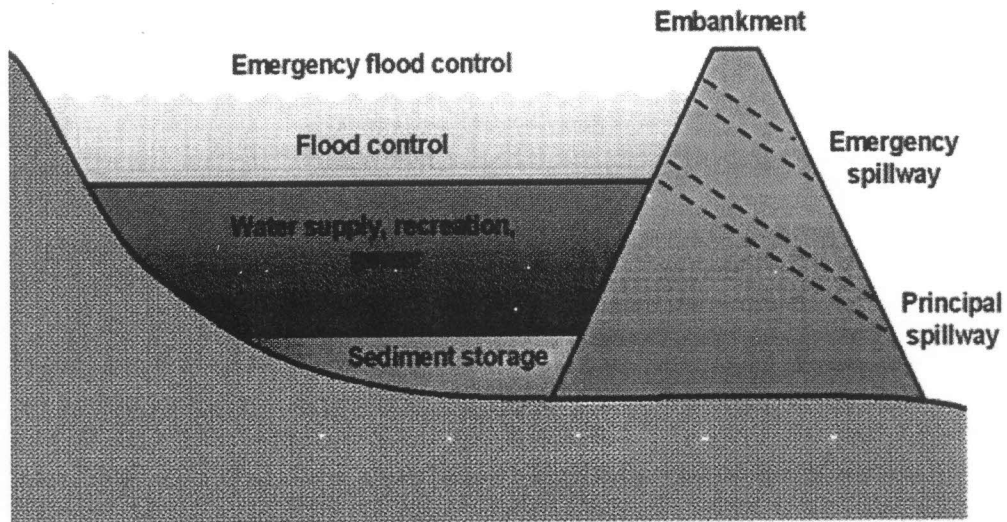
4. Analisis Bangunan Pengendali Sedimen

Bentuk tindakan yang dilakukan untuk menurunkan sedimen di *outlet* DAS adalah dengan membangun bangunan pengendali sedimen di saluran utama DAS yang berfungsi untuk menghambat kecepatan aliran dan menangkap sedimen yang dibawa aliran menuju *outlet* sub DAS. Oleh karena itu perlu dilakukan skenario model SWAT dengan menggunakan *check dam*.

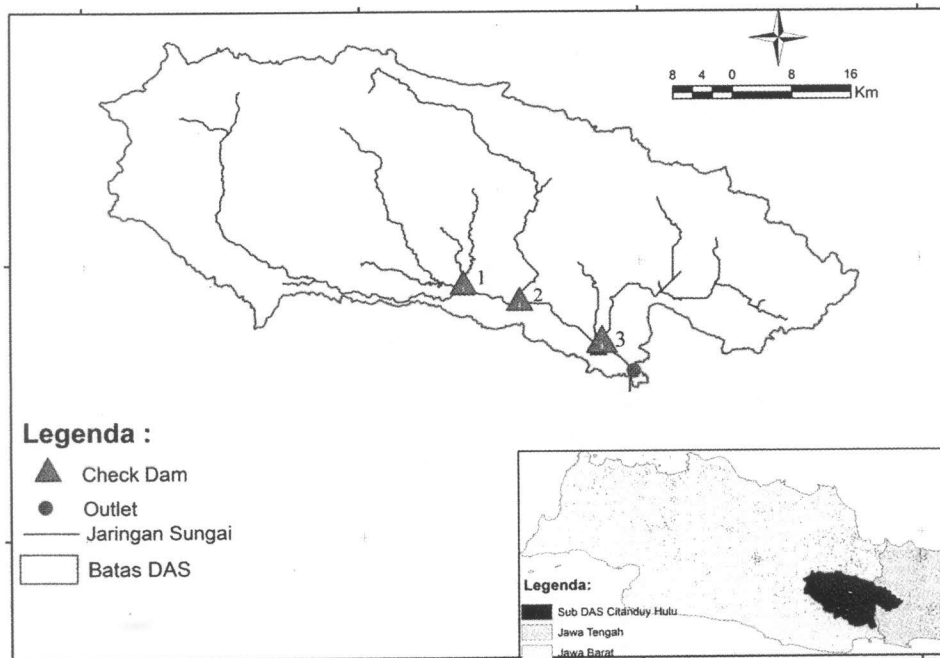
5. Strategi Penurunan Sedimen

Salah satu strategi yang dapat dilakukan untuk menurunkan sedimen adalah dengan membangun dam penghambat (*check dam*) di saluran utama DAS. Strategi yang dilakukan untuk menurunkan sedimen di *outlet* Sub-DAS Citanduy Hulu adalah dengan membangun 3 unit *check dam* dengan kapasitas berbeda pada saluran utama Sungai Citanduy bagian hulu (Gambar 8 dan Tabel 4). Selain jaringan utama aliran sungai, pertimbangan penempatan lokasi *check dam* harus diperhatikan dari sisi topografi dan pemukiman yang ada agar pembangunan *check dam* benar-benar efektif dan efisien sesuai dengan fungsinya.

Check dam sebagai bangunan pengendali sedimen dilengkapi dengan bangunan *intake* yang terletak di dasar bendungan, serta saluran pelimpah air (*spillway*) dan alat pengatur debit untuk melimpahkan kelebihan air pada saat mencapai ketinggian tertentu. Pada saat debit air meningkat dan melewati ketinggian air yang diijinkan maka air disalurkan melalui saluran pelimpah (Gambar 7).



Gambar 7 Ilustrasi Distribusi Air Pada Check Dam Reservoir



Gambar 8 Lokasi Penempatan Check Dam

Tabel 4 Spesifikasi Check Dam

Check Dam	Lokasi (Koordinat)	Luas Genangan (ha)	Tinggi Spillway (m)	Kapasitas (m ³)
1	7020'41"S -108025'42"E	17,89	5	447.000
2	7021'41"S -108032'49"E	12,44	5	311.000
3	7025'47"S -108039'56"E	6,94	5	173.500

Tabel 4 menunjukkan bahwa luas genangan air dan kapasitas masing-masing *check dam* berbeda. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan topografi yang mempengaruhi penentuan lokasi masing-masing *check dam* dan luas dam yang dapat dibangun sesuai dengan kondisi di lapangan.

Hasil analisis pengaruh *check dam* terhadap penurunan sedimen berdasarkan hasil simulasi model 3 tahun terakhir (dari tahun 2010-2012) diperoleh penurunan sedimen rata-rata di *outlet* DAS sebesar 29.557.556,67 ton/tahun atau 64,99% dari 81.351.783,23 ton/tahun (Gambar 9). Selain

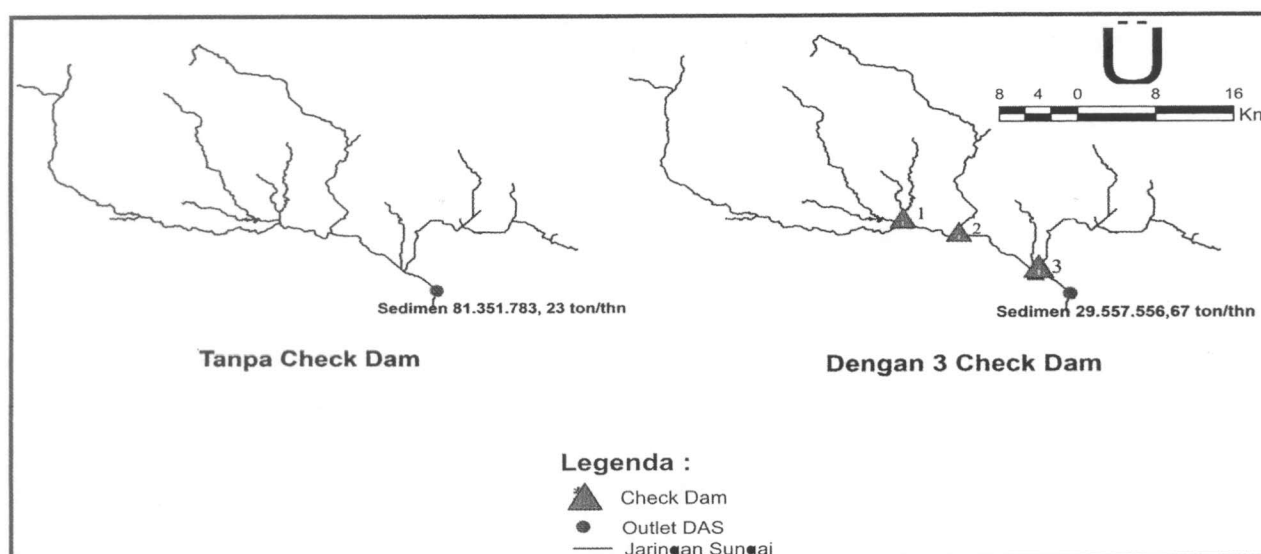
meminimalisir sedimen dan banjir, langkah-langkah struktural seperti membangun *check dam* juga merupakan hal yang sangat dianjurkan karena dam dapat berfungsi untuk menyimpan dan menampung

air pada musim hujan yang dapat dimanfaatkan pada musim kemarau (Patel dan Dholakia 2010). Pengaruh *check dam* terhadap penurunan sedimen disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Pengaruh Check Dam Terhadap Penurunan Sedimen di Outlet DAS (ton)*

Tahun Simulasi	Jumlah Sedimen		Penurunan %
	Tanpa check dam	Dengan 3 check dam	
2010	119.190.000,00	46.552.300,00	60,94
2011	72.613.970,69	27.277.720,00	62,43
2012	52.251.379,00	14.842.650,00	71,59
Rata-rata	81.351.783,23	29.557.556,67	64,99

*Dengan asumsi tidak ada perubahan tutupan lahan dan tidak dilakukan simulasi terhadap tutupan lahan



Gambar 9 Peta Distribusi Sedimen

Hasil analisis model SWAT sebelum dibangun 3 *check dam* diperoleh sedimen total rata-rata yang dihasilkan di outlet sebesar 81.351.783,23 ton/tahun. Pada Tabel 5 menunjukkan bahwa adanya kecenderungan penurunan sedimen dari tahun 2010 sampai dengan tahun 2012. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan jumlah curah hujan yang turun dan jumlah aliran permukaan pada masing-masing tahun yang menyebabkan terjadinya erosi. Apabila dilihat dari jumlah curah hujan yang turun di Sub DAS Citanduy Hulu pada tahun 2010 (4159,20 mm/tahun) maka sebanyak 51,13% berubah menjadi aliran permukaan (*surface runoff*) dan tingkat erosi yang terjadi di lahan sebesar 122,91 ton/ha. Pada tahun 2011 jumlah curah hujan yang turun di sub DAS Citanduy Hulu sebesar 2784,47 mm/tahun dan 47,24% berubah menjadi aliran permukaan. Hal ini menyebabkan erosi di lahan sebesar 56,98 ton/ha. Sementara pada tahun 2012 jumlah curah hujan yang turun sebesar 2.443,85 mm/tahun dan

sebanyak 37,73% berubah menjadi aliran permukaan. Kondisi ini menyebabkan erosi yang terjadi di lahan sebesar 46,30 ton/ha. Salah satu faktor dari penyebab terjadinya erosi adalah berkurangnya area hutan dan meningkatnya lahan terbuka yang minim tanaman pelindung terhadap erosi. Kurangnya tanaman pelindung di area terbuka menyebabkan hilangnya penahan air dan menurunkan kemampuan tanah meresapkan air sehingga menyebabkan besarnya aliran permukaan dan erosi yang kemudian membawa sedimen masuk ke aliran sungai sampai terendapkan di *outlet* DAS (Wahdani, 2011).

Penentuan umur masing-masing *check dam* diperoleh dari hasil pembagian kapasitas *check dam* dengan muatan sedimen yang terdapat pada setiap lokasi masing-masing *check dam* (Tabel 6), dengan asumsi dam tidak pernah dikeruk atau dibersihkan dan kapasitas terisi penuh sedimen. Berdasarkan hasil analisis model maka diperkirakan *check dam* no 1 akan penuh setelah 4, 82 tahun, *check dam* no 2 akan penuh

setelah 31,70 tahun dan *check dam* no 3 akan penuh setelah 48,50 tahun. Untuk menjaga performen *check dam* agar terus berfungsi maka setiap periode 5 tahun dam perlu di lakukan pemeliharaan dan pembersihan

kecuali *check dam* no 1 dengan tingkat laju erosi yang tinggi perlu dilakukan pembersihan dan pemeliharaan sebelum usia beroperasi 5 tahun.

Tabel 6 Daya Tampung dan Usia *Check dam*

Check Dam	Luas Genangan (ha)	Jumlah Sedimen (m ³ /thn)	Kapasitas (m ³)	Dam akan penuh (thn)
1	17,89	92.725,22	447.250	4,82
2	12,44	9.810,57	311.000	31,70
3	6,94	3.577,15	173.500	48,50

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

Selama tiga tahun terakhir jumlah sedimen rata-rata di *outlet* Sub-DAS Citanduy Hulu sebesar 81.351.783,23 ton/tahun.

Penggunaan 3 unit *check dam* sebagai bangunan pengendali sedimen di Sub-DAS Citanduy Hulu dapat menurunkan sedimen dari 81.351.783,23 ton/tahun menjadi 29.557.556,67 ton/tahun atau menurun sebesar 64,99%.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaspour K.C. 2011. *SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual*. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Swiss
- Arnold J.G, Williams J.R, Nicks A.D, Sammons N.B. 1990. *SWRRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resource Management*. Texas A&M Univ. Press, College Station. Texas.
- Arsyad, S. 2009. *Konservasi Tanah dan Air*. IPB Press. Bogor.
- Asdak, C. 2007, *Hidrologi dan Pengendalian Daerah Aliran Sungai*, Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Benedict, M.M., Klik A. 2006. Estimating Spatial Sediment Delivery Ratio on A Large Rural Catchment. *Journal of Spatial Hydrology*, Vol.6 No. 1. Halaman 64-80.
- Mishra A., Froebrich J., Gassman P. W. 2006. *Evaluation Of The SWAT Model For Assessing Sediment Control Structures In A Small Watershed In India*. *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 50 No. 2. Halaman 469-477.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. *River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. and King K.W. 2002a. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, versi 2000*. Tersedia di <http://www.brc.tamus.edu/swatdownloads/doc/swat2000theory.pdf>.
- Neitsch, S. L. J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R., Williams. 2005. *Soil And Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Grassland Soil and Water Laboratory*. Agricultural Research Service. Backland Research Center – Texas Agricultural Experiment Station. USA. 476 pages.
- Patel P. D., Dholakia M.B. 2010. *Feasible Structural and Non-Structural Measures to Minimize Effect of Flood in lower Tapi Basin*. *Journal of Spatial Hydrology*, Vol.5 No.3 Halaman 104-121.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Departemen Pertanian 1992. *Laporan Identifikasi dan Karakteristik Lahan Kritis Daerah Priyangan Selatan Provinsi Jawa Barat*. Bogor.
- Stehr, A., Debels P., Romero F., Alcagaya H. 2009. *Hydrological Modelling with SWAT under Conditions of Limited Data Availability: Evaluation of Result from a Chilean Case Study*. *Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Global Application*. Special Publication – 4th Ed. World Association of Soil and Water Conservation. Bangkok
- Suripin, 2001. *Pelestarian Sumber Daya Tanah dan Air*, Penerbit ANDI, Yogyakarta.
- Van Liew M.W., Garbecht J.D., Arnold J.G. 2003. *Simulation of the impacts of flood retarding structures on streamflow for a watershed in southwestern Oklahoma under dry, average, and wet climatic conditions*. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol.58 No.6. Halaman 340-348.
- Wahdani, K. D. 2011. *Perkiraan Debit Sungai dan Sedimentasi Dengan Model MWSWAT Di Sub-DAS Citarum Hulu, Provinsi Jawa Barat*. Tesis. Sekolah Pascasarjana. IPB. Bogor.

Williams, J. R., H. D. Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE* 20(6): 1100-1104.

'unus, L. 2005. *Evaluasi Kerusakan DAS Citanduy Hulu dan Akibatnya di Hilir (Studi Valuasi Ekonomi Kerusakan DAS di Sub DAS Citanduy Hulu dan Sub DAS Segara Anakan Jawa Barat)*. Tesis. Sekolah Pascasarjana IPB. Bogor.