



Pengaruh Curah Hujan Rata-rata Tahunan terhadap Indeks Erosi dan Umur Waduk pada DAS Citarum Hulu

Bakhtiar

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gunadarma
Jl. Margonda Raya 100 Pondok Cina, Depok, Jawa Barat 16424
E-mail: bakhtiar_usb@yahoo.co.id

Joetata Hadihardaja

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang 50275

Iwan K. Hadihardaja

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan (FTSL) Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132
E-mail: hardaja@si.itb.ac.id

Abstract

The aim of this study is to find out the effect of annual rainfall on the erosion index and the life of a reservoir. The erosion index is defined as the total soil loss divided by the tolerable soil loss. The life of a reservoir is affected by the amount of sediment flowing into the reservoir and sediment trap, which is a function of the effective capacity of the reservoir and the inflowing water. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) version 2005 model was incorporated into this study to simulate hydrological processes taking place in the catchment. ArcSWAT (ArcGIS Interface for SWAT 2005) program was used as a preprocessing tool to write in input files to be executed by SWAT. SWAT model involves a great number of parameters. Hence, its reliability depends so much on the data availability and some parameter adjustments. From the calibration and validation results on annual data, the model is considerably of good performance. This was proven from the coefficient of correlation (r), coefficient of determination (R^2), model efficiency (ME), and index of agreement (IA) which are close to 1 except for the sediment inflow. The difference between the observed and simulated sediment inflow resulted because the SWAT model accounts for the annual variation in precipitation and mean inflow discharge which is not manifested in the observed data. The modeling results revealed that the average inflowing sediment into the reservoir is 5,102,000 ton/year resulting in 46.18 year effective life of the reservoir which corresponds to the critical degree of 1.15. The graph plotting the values of the sediment inflow and the critical degree of the reservoir life reveals a linear relationship.

Keywords: SWAT, HRU, Water yield, Surface flow, Base flow, Sediment inflow

Abstrak

Kajian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh curah hujan rata-rata tahunan terhadap indeks erosi dan umur waduk. Indeks erosi didefinisikan sebagai total kehilangan tanah dibagi dengan kehilangan tanah yang dapat ditoleransi. Umur waduk dipengaruhi oleh jumlah sedimen yang masuk ke waduk (inflow sedimen) dan sediment trap, yang merupakan fungsi dari kapasitas efektif waduk dan air yang masuk ke waduk (debit inflow). Model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) versi 2005 digunakan dalam penelitian ini untuk mensimulasikan proses-proses hidrologi yang terjadi di daerah tangkapan waduk. Program ArcSWAT (ArcGIS Interface for SWAT 2005) digunakan sebagai alat bantu pemrosesan awal untuk menuliskan file-file input yang akan dieksekusi oleh SWAT. Model SWAT melibatkan parameter-parameter yang sangat banyak, sehingga tingkat keandalannya sangat bergantung pada kelengkapan data dan penyesuaian terhadap beberapa parameter. Dari hasil kalibrasi dan validasi terhadap data bulanan,

kinerja model dinilai cukup baik. Hal ini dibuktikan dari nilai koefisien korelasi (r), koefisien determinasi (R^2), efisiensi model (ME), serta indeks kecocokan (IA) yang mendekati 1 kecuali untuk inflow sedimen. Perbedaan antara inflow sedimen hasil observasi dan simulasi terjadi karena model SWAT memperhitungkan variasi curah hujan dan debit inflow rata-rata tahunan yang tidak terlihat pada data observasi. Dari hasil simulasi diperoleh inflow sedimen rata-rata yang masuk ke waduk sebesar 5,102,000 ton/tahun yang menyebabkan umur efektif waduk menjadi 46.18 tahun dan tingkat kekritisan umur waduk sebesar 1.15. Grafik yang menghubungkan nilai-nilai inflow sedimen dan tingkat kekritisan umur waduk menunjukkan suatu hubungan yang bersifat linear.

Kata-kata Kunci: SWAT, HRU, Water yield, Surface flow, Base flow, Inflow sedimen

Pendahuluan

Laju sedimentasi di Daerah Tangkapan Waduk Saguling dalam dasawarsa terakhir dilaporkan meningkat hampir dua kali lipat. Hal tersebut diduga disebabkan oleh kerusakan ekosistem di sepanjang daerah tangkapan terutama berkurangnya luas hutan di bagian hulu. Kajian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh curah hujan rata-rata tahunan terhadap indeks erosi dan umur waduk.

Daerah Tangkapan Waduk Saguling mencakup mata air Sungai Citarum hingga Saguling dengan luas sekitar 1744,98 km² sebagai bagian dari DAS Citarum yang merupakan salah satu DAS terbesar di Jawa Barat. Curah hujan bulanan rata-rata yang diukur pada tahun 2008 sekitar 172 mm dengan nilai total curah hujan tahunan sebesar 2.070 mm. Kondisi topografi didominasi oleh pegunungan sepanjang batas DAS dan dataran yang luas di tengah DAS.

Metode Penelitian

Erosi adalah terangkatnya lapisan tanah atau sedimen karena tegangan yang yang ditimbulkan oleh gerakan angin atau air pada permukaan tanah atau saluran. Pada lingkungan DAS, laju erosi dikendalikan oleh kecepatan aliran air dan sifat sedimen (terutama ukuran butirnya). Tegangan yang bekerja pada permukaan tanah atau saluran sebanding dengan kecepatan aliran. Resistensi tanah atau sedimen untuk bergerak sebanding dengan ukuran butirnya. Gaya pembangkit eksternal yang menimbulkan erosi adalah curah hujan dan aliran air pada lereng DAS. Curah hujan yang tinggi dan lereng DAS yang miring merupakan faktor utama yang membangkitkan erosi. Pertahanan DAS terhadap erosi tergantung utamanya pada tutupan lahan. Penguatan pertahanan terhadap erosi dapat pula dilakukan dengan upaya-upaya kerekayasaan.

Laju Erosi Aktual

Dalam penelitian ini perilaku erosi dan sedimentasi dimodelkan dengan menggunakan alat bantu ArcSWAT (*Arc GIS Interface for*

SWAT Model). Model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) adalah suatu model DAS semi tersebar (*semi distributed*) dengan antarmuka ArcGIS yang menggambarkan sub DAS dan jaringan sungai dari Model Elevasi Digital (DEM) serta menghitung keseimbangan air harian dari data meteorologi, tanah dan tata guna lahan.

Pemodelan erosi dalam SWAT didasarkan pada persamaan MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) sebagai berikut:

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot Q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (1)$$

dimana:

sed = sediment yield (ton)

Q_{surf} = limpasan permukaan (mm/ha)

Q_{peak} = debit puncak limpasan (m³/s)

$area_{hru}$ = luas HRU (satuan respons hidrologi) (ha)

K_{USLE} = faktor erodibilitas tanah USLE (0,013 ton m² jam/[m³ ton cm])

C_{USLE} = faktor tutupan dan pengelolaan USLE

P_{USLE} = faktor praktik pendukung USLE

LS_{USLE} = faktor topografi USLE

$CFRG$ = faktor fragmen kasar

Batas Toleransi Erosi

Secara sederhana batas toleransi erosi (*tolerable soil loss, T*), dapat dinyatakan sebagai suatu laju erosi yang tidak boleh melebihi laju pembentukan tanah. Sedikitnya ada empat faktor utama yang mempengaruhi batas toleransi erosi tanpa kehilangan produktivitas tanah secara permanen. Keempat faktor tersebut adalah kedalaman tanah, tipe bahan induk, produktivitas relatif dari tanah lapisan atas (*top soil*) dan tanah lapisan bawah (*sub soil*), serta jumlah erosi terdahulu. Makin dalam tanah dan makin tebal bahan yang tembus oleh akar tumbuhan, makin cepat erosi yang terjadi tanpa kehilangan kapasitas produksi yang tidak dapat diperbaiki.

Nilai T pada masing-masing HRU dapat ditentukan dengan cara merujuk pada penetapan nilai T untuk tanah-tanah di Indonesia yang disajikan pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Pedoman Penetapan Nilai Batas Toleransi Erosi untuk Tanah-tanah di Indonesia

No.	Sifat Tanah dan Substratum	Batas Toleransi Erosi (T) (ton/ha/tahun)
1.	Tanah sangat dangkal (< 25 cm) di atas batuan.	0,0
2.	Tanah sangat dangkal (< 25 cm) di atas bahan telah melapuk (tidak terkonsolidasi).	4,8
3.	Tanah dangkal (25 – 50 cm) di atas bahan telah melapuk.	9,6
4.	Tanah dengan kedalaman sedang (50 – 90 cm) di atas bahan telah melapuk.	14,4
5.	Tanah yang dalam (> 90 cm) dengan lapisan bawah yang kedap air di atas substrata yang telah melapuk.	16,8
6.	Tanah yang dalam (> 90 cm) dengan lapisan bawah berpermeabilitas lambat, di atas substrata telah melapuk.	19,2
7.	Tanah yang dalam (> 90 cm) dengan lapisan bawah berpermeabilitas sedang, di atas substrata telah melapuk.	24,0
8.	Tanah yang dalam (> 90 cm) dengan lapisan bawah yang permeabel, di atas substrata telah melapuk.	30,0

Sumber: Arsyad (1989)

Indeks Erosi

Indeks erosi (*IE*) dari suatu DAS diperoleh dengan cara membagi besaran laju erosi aktual (*E*) pada DAS tersebut dengan batas toleransi erosi (*T*). Setelah laju erosi aktual (*E*) dan batas toleransi erosi (*T*) diketahui maka dapat ditentukan indeks erosi (*IE*) dengan rumus:

$$IE = \frac{E}{T} \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

- IE* = indeks erosi,
- E* = laju erosi aktual (ton/ha/tahun),
- T* = batas toleransi erosi (ton/ha/tahun)

Nilai indeks erosi yang telah diketahui selanjutnya klasifikasikan berdasarkan kriteria standar evaluasi kinerja DAS sebagaimana Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Kriteria Penilaian Indeks Erosi (IE) DAS

No.	Indeks Erosi (IE)	Kategori
1.	$IE \leq 1,0$	Rendah
2.	$1,0 < IE \leq 4,0$	Sedang
3.	$4,0 < IE \leq 10,0$	Tinggi
4.	$IE > 10,0$	Sangat Tinggi

Sumber: Hammer (1981)

Umur Efektif Waduk

Umur efektif dari suatu waduk diprediksi dengan metode *sediment trap*. Gunner Brune (Bureau of Reclamation, 2006) mengemukakan bahwa *sediment trap* tergantung pada perbandingan antara kapasitas tampungan waduk (*C*) dan inflow tahunan (*I_w*) dari waduk yang bersangkutan. *Sediment trap* waduk akan berkurang sejalan dengan umurnya, karena kapasitas waduk akan berkurang oleh akumulasi sedimen. Untuk menentukan *sediment trap* digunakan persamaan:

$$TE = 0,96^{0,251 \log C / I_w} \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

- TE* = *sediment trap* (%)
- C* = kapasitas efektif waduk (m³)
- I_w* = inflow rata-rata tahunan (m³)

Selanjutnya volume *dead storage* waduk pada tahun ke-*t* dapat ditentukan dengan persamaan:

$$DEAD_{t=n} = \int_1^n \frac{sed_{out}}{\gamma_{sed}} \cdot TE(t) \cdot dt \dots\dots\dots (4)$$

dimana:

- DEAD_{t=n}* = Volume tampungan mati setelah *n* tahun (m³)
- TE(t)* = *sediment trap* sebagai fungsi dari waktu
- sed_{out}* = inflow sedimen, jumlah sedimen yang keluar dari daerah tangkapan dan masuk ke waduk, merupakan salah satu output dari model SWAT (ton/tahun)
- γ_{sed}* = berat jenis sedimen yang masuk ke waduk (ton/m³)

Dengan mensubstitusikan Persamaan 2 ke dalam Persamaan 3, diperoleh:

$$DEAD_{t=n} = \frac{sed_{out}}{\gamma_{sed}} \cdot \int_1^n 0,96^{0,251 \log \left(\frac{C(t)}{I_w} \right)} \cdot dt \dots\dots (5)$$

dimana:

- C(t)* = kapasitas efektif waduk sebagai fungsi dari waktu (m³)

Mengingat $C(t) = C_o - DEAD_{t-1}$, maka:

$$DEAD_{t=n} = \frac{sed_{out}}{\gamma_{sed}} \cdot \int_1^n 0,96^{0,25 \log \left(\frac{C_o - DEAD_{t-1}}{I_w} \right)} \cdot dt \quad \dots (6)$$

dimana:

Co = kapasitas total waduk (m3)
 DEADt-1 = volume dead storage pada tahun sebelumnya (m3).

Persamaan di atas akan sulit jika diselesaikan secara analitis. Sebagai alternatif kita dapat menuliskannya dalam bentuk diskrit:

$$DEAD_{t=n} = \frac{sed_{out}}{\gamma_{sed}} \cdot \sum_{t=0}^n 0,96^{0,25 \log \left(\frac{C_o - DEAD_{t-1}}{I_w} \right)} \cdot \Delta t \quad \dots (7)$$

atau:

$$DEAD_{t=n} = \frac{sed_{out}}{\gamma_{sed}} \cdot \Delta t \cdot \sum_{t=0}^n 0,96^{0,25 \log \left(\frac{C_o - DEAD_{t-1}}{I_w} \right)} \quad \dots (8)$$

dimana:

Δt = langkah waktu (tahun)

Persamaan 7 di atas dapat diselesaikan secara numerik:

- Untuk mendesain volume dead storage, maka nilai $DEAD_{t=n}$ dapat ditentukan secara eksplisit dengan menetapkan nilai n sama dengan umur rencana waduk (U_r),
- Sedangkan untuk mendapatkan umur efektif waduk (U_e), maka nilai n dapat ditentukan secara implisit dengan menetapkan nilai $DEAD_{t=n}$ sama dengan volume total *dead storage*.

Tingkat Kekritisan Umur Waduk

Dalam penelitian ini, tingkat kekritisan waduk ditinjau dari aspek fungsionalitasnya, dimana suatu waduk dinyatakan kritis bila umur efektif waduk sama dengan umur rencananya. Umur efektif waduk adalah waktu penuhnya *dead storage* sejak waduk dioperasikan, yang nilainya dapat lebih besar atau lebih kecil dari umur rencana. Umur efektif waduk diperoleh secara implisit dengan menggunakan Persamaan 7 sebagaimana dijelaskan di atas. Secara umum, tingkat kekritisan umur waduk dapat didefinisikan sebagai:

$$c = \frac{U_r}{U_e} \quad \dots (9)$$

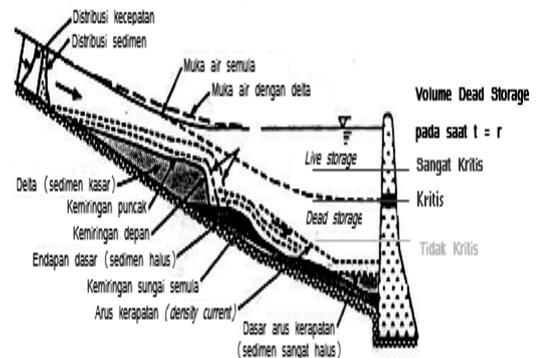
dimana:

c = faktor tingkat kekritisan umur waduk,
 U_e = umur efektif waduk berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh secara implisit dari Persamaan 7,

U_r = umur rencana waduk.
 Kondisi kritis terlampaui jika $U_e = U_r$ atau:

$$c = \frac{U_r}{U_e} = 1 \quad \dots (10)$$

Jadi waduk berada dalam kondisi kritis jika nilai $c \geq 1$. Secara skematik, tingkat kekritisian waduk diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konsep tingkat kekritisian umur waduk secara skematik

Penyusunan Model Dengan Arcswat

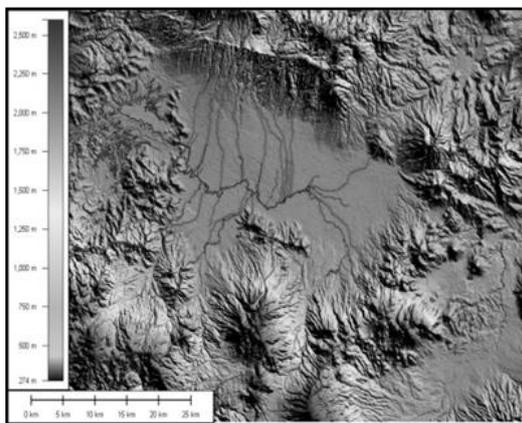
Sistem Informasi Geografi (SIG) memainkan peran yang penting dalam pemodelan sumberdaya alam dan merupakan alat bantu yang efektif yang membantu dalam kajian pemodelan hidrologi/kualitas air serta analisis terhadap berbagai skenario pengelolaan. Antarmuka SWAT dan SIG membantu dalam mengintegrasikan informasi spasial mengenai topografi, tanah, dan tata guna lahan dengan pemodelan hidrologi. Antarmuka ini memungkinkan suatu DAS yang besar didelineasi ke dalam ratusan sub DAS atau *grid cell* sehingga membantu mempertahankan sifat parameter model yang tersebar di seluruh luasan DAS dan karakteristiknya yang homogen dalam suatu sub DAS. Antarmuka ArcGIS untuk SWAT 2005 digunakan untuk pemrosesan awal dan simulasi hidrologi dalam penelitian ini.

ArcSWAT merupakan lingkungan pemodelan tunggal dan khas yang akrab dengan pengguna berdasarkan beberapa alat bantu antarmuka dengan pengguna (*user interface tool*). ArcSWAT versi terbaru adalah ArcSWAT 2.3 yang dirilis oleh Blackland Research Center – Temple, TX dalam bulan Mei 2009 untuk SWAT2005.

Data input untuk penyusunan model berasal dari berbagai sumber (Tabel 3).

Tabel 3. Sumber Data Input

Jenis Data	Skala	Sumber	Keterangan
Model Elevasi Digital	Resolusi 90 m Proyeksi: UTM/WGS84 zone 48 S	Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)	Elevasi, panjang dan kemiringan lahan dan saluran
Jaringan Sungai (Hydrography)	1:250.000 Proyeksi: UTM/WGS84 zone 48 S	Dinas PSDA Provinsi Jawa Barat	
Geologi	1:250.000 Proyeksi: UTM/WGS84 zone 48 S	Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat	Parameter fisik tanah (bulk density, tekstur, materi organik, konduktivitas hidraulik, dll.)
Tata Guna Lahan/ Tutupan Lahan	1:250.000 Proyeksi: UTM/WGS84 zone 48 S	Dinas Tata Ruang dan Permukiman Provinsi Jawa Barat	Klasifikasi tata guna lahan
Curah Hujan	8 stasiun 1987-2004	PT. Indonesia Power UBP Saguling	
Debit Sungai dan Sedimen	1 stasiun 1987-2004	PT. Indonesia Power UBP Saguling	



Gambar 2. Model Elevasi Digital DAS Citarum Hulu

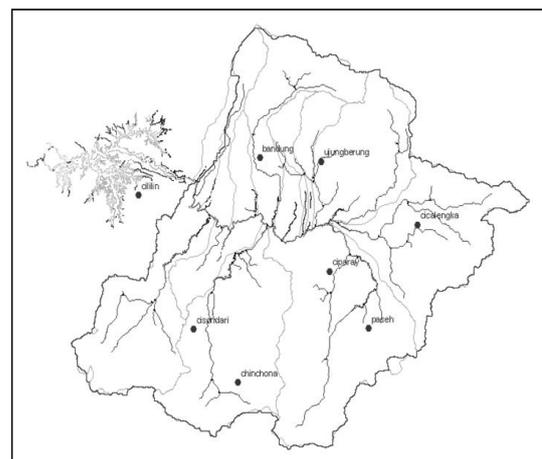
Data klimatologi diperoleh dari 8 stasiun klimatologi yang tersebar pada DAS Citarum Hulu. Lokasi dari masing-masing stasiun ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 3.

Tabel 4. Lokasi Stasiun Klimatologi pada DAS Citarum Hulu

No.	Stasiun	Xpr	Ypr	Lat	Long	Elevasi
1	Bandung	788962,199	9235110,381	-6,913	107,615	946
2	Ujungberung	797444,988	9234628,404	-6,917	107,692	680
3	Cicalengka	810651,148	9226627,592	-6,988	107,811	673
4	Ciparay	798601,732	9220747,477	-7,042	107,703	689
5	Paseh	803999,871	9213517,827	-7,107	107,752	878
6	Cililin	772285,807	9230387,010	-6,956	107,464	686
7	Cisondari	779804,643	9213421,432	-7,109	107,533	1150
8	Chinchona	785973,944	9206673,759	-7,170	107,589	1458

Curah hujan harian dari tahun 1987 sampai dengan tahun 2008 diperoleh dari delapan stasiun klimatologi yang berada di DAS Citarum Hulu. Data hujan harian yang diperoleh selanjutnya diproses dengan menggunakan program pcpSTAT

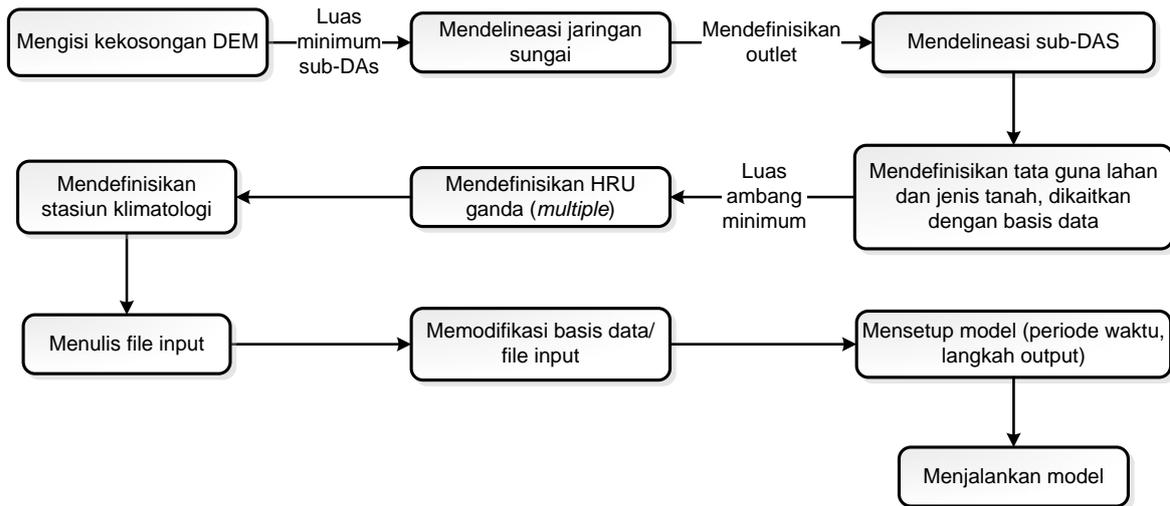
untuk mendapatkan parameter statistik yang diperlukan sebagai input model SWAT.



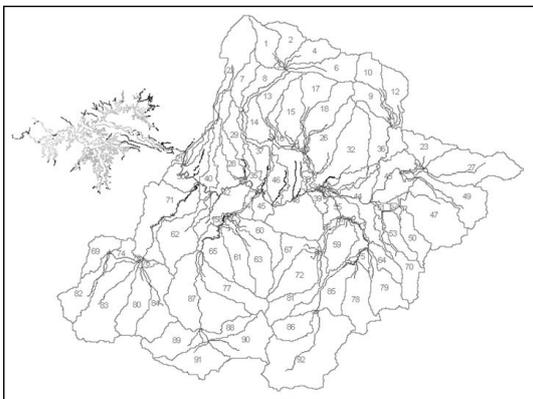
Gambar 3. Lokasi stasiun klimatologi

Setelah semua data input disiapkan dan ditambahkan ke dalam basis data SWAT, proyek SWAT yang baru dibuat dengan Antarmuka (Interface) ArcGIS. Langkah-langkah utama dari prosedur SWAT meliputi mendelineasi sub-DAS dan HRU serta menulis semua file input (Gambar 4).

Langkah pertama yang diperlukan untuk membangun suatu model SWAT adalah mendefinisikan parameter yang terkait dengan elevasi seperti: elevasi di atas permukaan laut, aspek kemiringan, jaringan aliran sungai, jarak ke sungai terdekat, serta membagi DAS ke dalam sub-sub DAS. Data DEM dengan resolusi 90 m dari Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) digunakan dalam tahapan ini.



Gambar 4. Langkah-langkah untuk menyusun model SWAT dengan ArcGIS



Gambar 5. Hasil delineasi DAS dengan ArcSWAT

Pemisahan *Baseflow*

Untuk mengetahui fraksi komponen debit dalam total aliran hasil observasi, digunakan teknik penyaringan digital (*digital filter technique*). Metode ini awalnya digunakan dalam analisis dan pemrosesan sinyal. Persamaannya adalah:

$$Q_{surf}(t) = \beta \cdot Q_{surf}(t-1) + \frac{(1+\beta)}{2} \cdot (Q_{tot}(t) - Q_{tot}(t-1)) \quad \dots\dots (11)$$

dimana:

Q_{surf} = limpasan permukaan yang disaring (respons cepat)

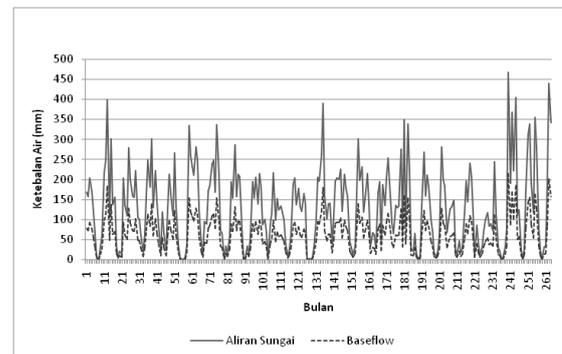
Q_{tot} = aliran sungai total

β = parameter filter (ditetapkan hingga 0,925)

t = langkah waktu (*time step*)

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil penyaringan baseflow secara digital memiliki kesamaan dengan teknik pemisahan baseflow secara manual (Arnold & Allen, 1999). Program filter memberikan tiga lengkung baseflow untuk zone iklim yang berbeda. Lengkung yang kedua sangat cocok untuk daerah yang basah. Dalam

penelitian ini digunakan baseflow filter program untuk memisahkan baseflow dari aliran sungai (Gambar 6).



Gambar 6. Pemisahan baseflow dari aliran sungai

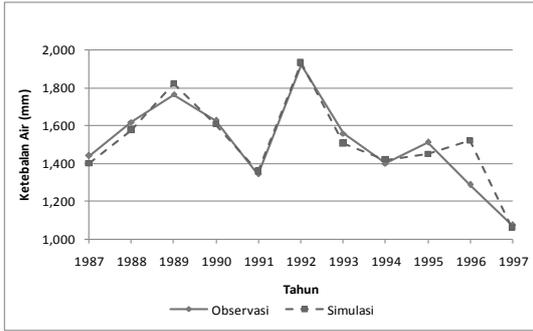
Kalibrasi Model

Kalibrasi dilakukan terhadap data hasil observasi pada outlet DAS (pos duga air Nanjung) selama 11 tahun, yaitu dari tahun 1987 sampai dengan tahun 1997. Selanjutnya kinerja model dievaluasi berdasarkan parameter-parameter statistik seperti koefisien korelasi (r), koefisien determinasi (R^2), efisiensi model (ME), dan indeks kecocokan (IA) (Spiegel, 1961).

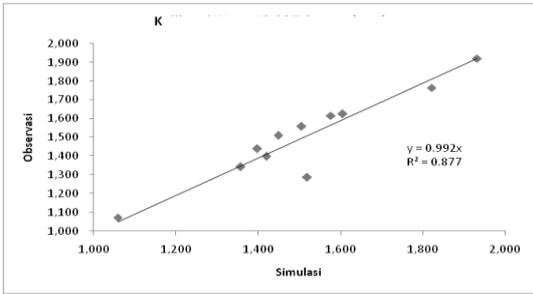
Hasil dan Pembahasan

Water Yield

Berdasarkan perbandingan antara total water yield tahunan hasil simulasi dan observasi diperoleh nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,938, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,876, efisiensi model (ME) sebesar 0,874 dan indeks kecocokan (IA) sebesar 0,968 (Gambar 7 dan Gambar 8).



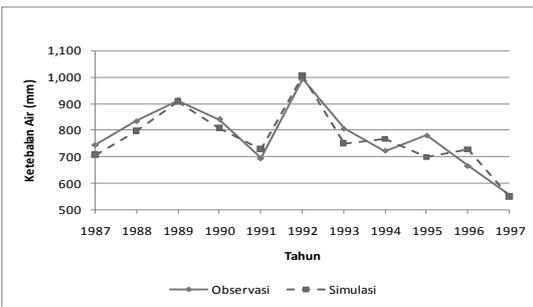
Gambar 7. Hasil kalibrasi *water yield*



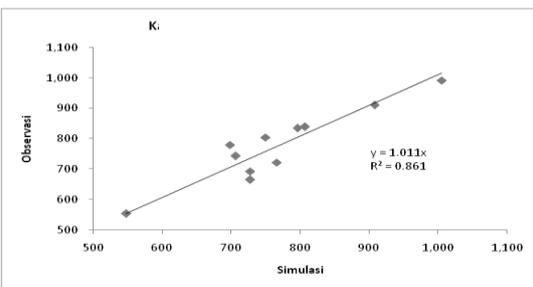
Gambar 8. Hubungan antara *Water Yield* Hasil Simulasi dan Observasi

Surface Flow

Berdasarkan perbandingan antara *surface flow* tahunan hasil simulasi dan observasi diperoleh nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,930, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,861, efisiensi model (ME) sebesar 0,856 dan indeks kecocokan (IA) sebesar 0,962 sebagai ditunjukkan Gambar 9 dan Gambar 10.



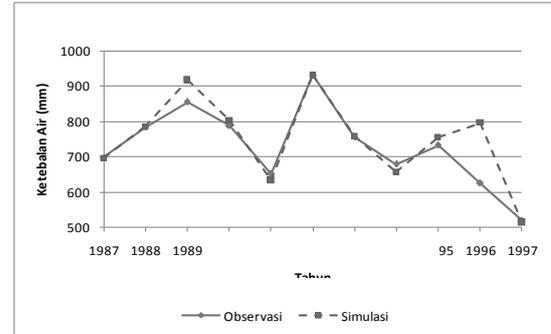
Gambar 9. Hasil kalibrasi *surface flow*



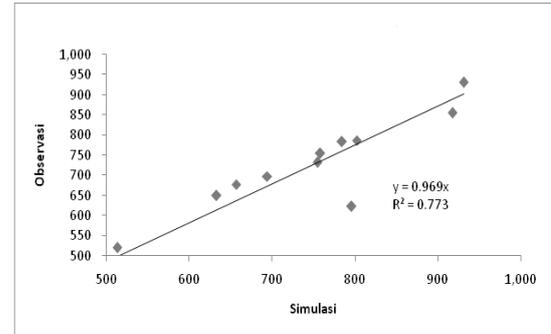
Gambar 10. Hubungan antara *surface flow* hasil simulasi dan observasi

Base Flow

Berdasarkan perbandingan antara *base-flow* tahunan hasil simulasi dan observasi diperoleh nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,893, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,773, efisiensi model (ME) sebesar 0,727 dan indeks kecocokan (IA) sebesar 0,937.



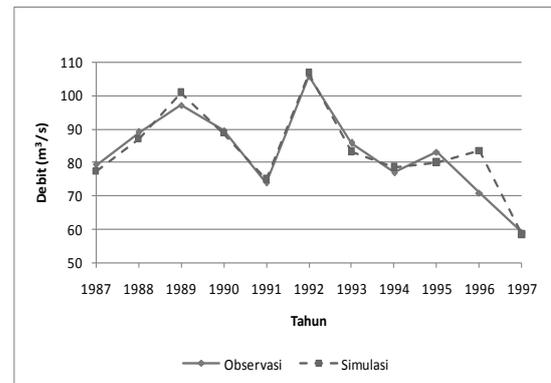
Gambar 11. Hasil kalibrasi *base flow*



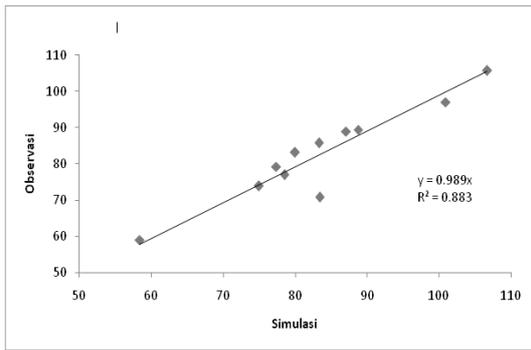
Gambar 12. Hubungan antara *base flow* hasil simulasi dan observasi

Debit Inflow

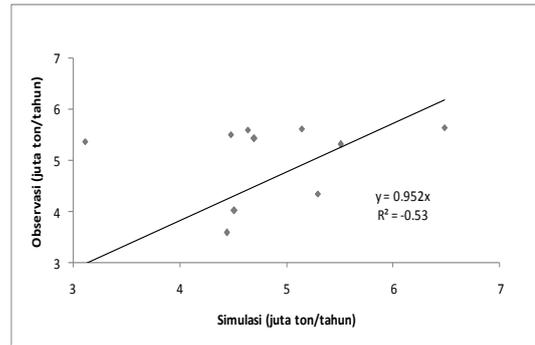
Berdasarkan perbandingan antara debit *inflow* rata-rata tahunan hasil simulasi dan observasi diperoleh nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,941, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,883, efisiensi model (ME) sebesar 0,878 dan indeks kecocokan (IA) is 0,969 (Gambar 13 dan Gambar 14).



Gambar 13. Hasil Kalibrasi Debit *Inflow*



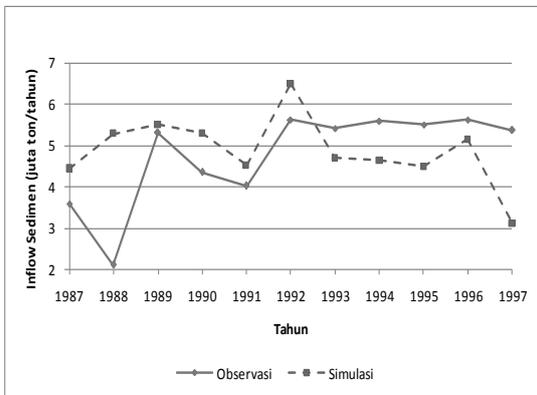
Gambar 14. Hubungan antara debit inflow hasil simulasi dan observasi



Gambar 16. Hubungan antara sedimen inflow hasil simulasi dan observasi

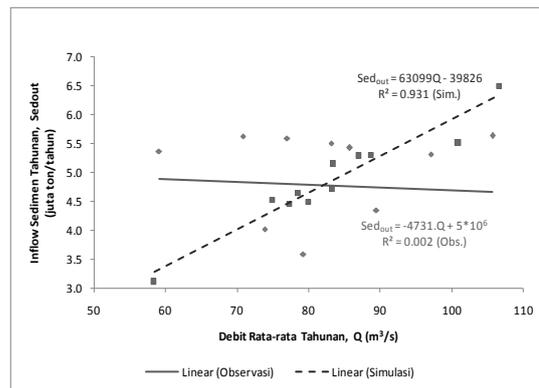
Sedimen Inflow

Berdasarkan perbandingan antara sedimen inflow rata-rata tahunan hasil simulasi dan observasi diperoleh nilai koefisien korelasi (r) sebesar -0,018, koefisien determinasi (R^2) sebesar -0,530, efisiensi model (ME) sebesar -0,581 dan indeks kecocokan (IA) sebesar 0,350. Nilai negatif terjadi karena inflow sedimen tahunan hasil observasi relatif konstan meskipun curah hujan dan debit rata-rata tahunan bervariasi, sedangkan inflow sedimen tahunan hasil simulasi bervariasi sesuai dengan curah hujan dan debit rata-rata tahunan (Gambar 15 dan Gambar 16).



Gambar 15. Hasil kalibrasi sedimen inflow

Hubungan antara debit inflow rata-rata tahunan dan inflow sedimen diplot pada Gambar 17. Deviasi antara garis interpolasi terhadap data observasi dan simulasi terjadi karena model SWAT memperhitungkan variasi curah hujan dan debit inflow rata-rata tahunan yang tidak terlihat pada data observasi. Inflow sedimen tahunan hasil observasi relatif konstan meskipun curah hujan dan debit inflow rata-rata tahunan bervariasi setiap tahun.



Gambar 17. Hubungan antara debit rata-rata tahunan dan sedimen inflow

Tabel 5 berikut merangkum nilai rata-rata tahunan dari water yield, surface flow, baseflow, debit inflow dan inflow sedimen beserta parameter-parameter statistiknya.

Tabel 5. Rekapitulasi nilai rata-rata tahunan hasil simulasi

No.	Parameter	Satuan	Nilai Rata ² Tahunan		r	R^2	ME	IA
			Observasi	Simulasi				
1.	Water Yield	mm	1,503	1,513	0.938	0.876	0.874	0.968
2.	Surface Flow	mm	777	767	0.930	0.861	0.856	0.962
3.	Baseflow	mm	710	731	0.893	0.773	0.727	0.937
4.	Debit Inflow	m ³ /s	85.14	86.09	0.941	0.883	0.878	0.969
5.	Inflow Sedimen	ton	4,773,374	4,875,182	-0.018	-0.530	-0.581	0.350

Tabel 6. Rekapitulasi hasil validasi model dengan data bulanan

No.	Parameter	Satuan	Nilai Rata ² Tahunan		<i>r</i>	<i>R</i> ²	<i>ME</i>	<i>IA</i>
			Observasi	Simulasi				
1.	Water Yield	mm	1,628	1,626	0.987	0.974	0.974	0.993
2.	Surface Flow	mm	841	851	0.967	0.920	0.914	0.980
3.	Baseflow	mm	789	779	0.958	0.913	0.909	0.974
4.	Debit Inflow	m ³ /s	89.61	89.74	0.988	0.975	0.976	0.994
5.	Inflow Sedimen	ton	5,668,783	5,328,818	0.742	-70.500	-70.565	0.272

Dari hasil kalibrasi terhadap data tahunan terlihat bahwa kinerja model (*model performance*) cukup baik. Hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien korelasi (*r*), koefisien determinasi (*R*²), efisiensi model (*ME*), dan indeks kecocokan (*IA*) yang mendekati 1 kecuali untuk sedimen *inflow* dengan alasan yang telah disebutkan sebelumnya.

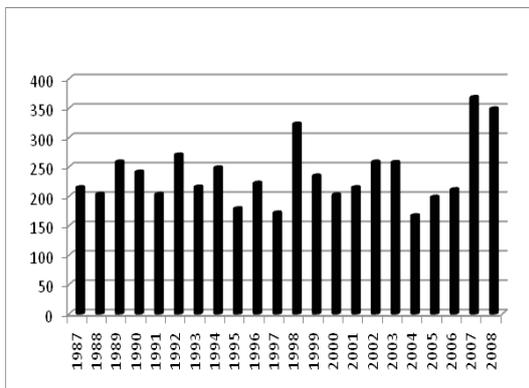
Validasi Model

Validasi dilakukan terhadap model yang telah dikalibrasi dengan menggunakan data pada 11 tahun berikutnya, yaitu dari tahun 1998 sampai dengan tahun 2008 (Tabel 6).

Dari hasil validasi terhadap data tahunan terlihat bahwa kinerja model (*model performance*) cukup baik (Tabel 6). Hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien korelasi (*r*), koefisien determinasi (*R*²), efisiensi model (*ME*), dan indeks kecocokan (*IA*) yang mendekati 1 kecuali untuk *inflow* sedimen dengan alasan yang sama dengan kasus kalibrasi *inflow* sedimen.

Indeks Erosi DAS

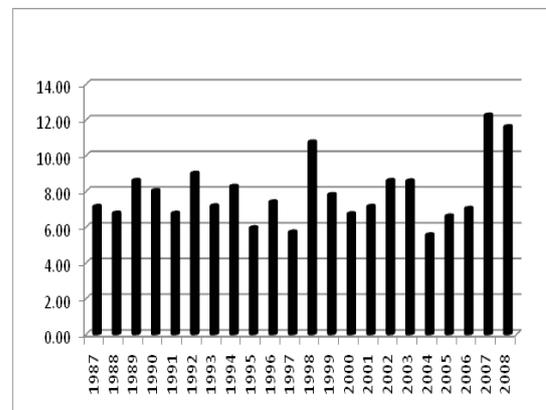
Indeks erosi rata-rata pada DAS Citarum Hulu termasuk tinggi, yaitu sebesar 7,86.



Gambar 18. Sediment Yield Tahunan (ton/ha)

Tabel 7. Indeks Erosi DAS Citarum Hulu

Tahun	Sediment Yield (t/ha)	Indeks Erosi	Kategori
1987	213.64	7.12	Tinggi
1988	202.33	6.74	Tinggi
1989	257.27	8.58	Tinggi
1990	240.17	8.01	Tinggi
1991	202.14	6.74	Tinggi
1992	269.28	8.98	Tinggi
1993	214.64	7.15	Tinggi
1994	247.35	8.25	Tinggi
1995	177.75	5.93	Tinggi
1996	221.22	7.37	Tinggi
1997	170.66	5.69	Tinggi
1998	321.84	10.73	Sangat Tinggi
1999	233.51	7.78	Tinggi
2000	201.44	6.71	Tinggi
2001	213.71	7.12	Tinggi
2002	257.19	8.57	Tinggi
2003	256.51	8.55	Tinggi
2004	165.9	5.53	Tinggi
2005	197.45	6.58	Tinggi
2006	210.23	7.01	Tinggi
2007	367.03	12.23	Sangat Tinggi
2008	347.57	11.59	Sangat Tinggi
Rata²	235.86	7.86	Tinggi



Gambar 19. Indeks Erosi Rata-Rata DAS Citarum Hulu

Umur Efektif Waduk

Umur efektif waduk dicapai apabila volume *dead storage* telah penuh oleh sedimen yang menyebabkan pintu pengambilan tertutup sedimen. Berdasarkan simulasi dengan ArcSWAT, diperoleh besarnya sedimen inflow Waduk Saguling pada tahun 1987 adalah 4,444,000 ton/tahun. Sehingga apabila berat jenis sedimen diasumsikan sebesar 1.33 ton/m³, maka volume sedimen yang masuk ke waduk adalah:

$$Q_s = \frac{4,444,000 \text{ ton / tahun}}{1.330 \text{ ton / tahun}} = 3,342,052 \text{ m}^3 / \text{tahun}$$

Dari hasil simulasi dengan ArcSWAT, diperoleh debit *inflow* rata-rata yang masuk ke waduk pada tahun 1987 sebesar 77.38 m³/s.

Sehingga volume *inflow* rata-rata tahunan:

$$I_w = 77,38 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 2,440,255,680 \text{ m}^3 / \text{tahun}$$

Berdasarkan perhitungan untuk kondisi eksisting pada tahun 1987, umur waduk adalah 50.15 tahun.

Dengan cara yang sama, kita dapat menentukan umur efektif waduk untuk berbagai kondisi *inflow* air dan *inflow* sedimen sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 8 berikut ini.

Tabel 8. Umur Efektif Waduk (Ue)

Inflow Air (I _w) m ³ /tahun	Inflow Sedimen (sed _{out}) ton/tahun	Umur Efektif Waduk (U _e) tahun
1,841,387,040	3,112,000	71.69
1,750,878,720	3,257,000	68.51
2,020,196,160	3,319,000	67.19
2,140,663,680	3,808,000	58.55
2,440,255,680	4,444,000	50.02
2,521,618,560	4,482,000	49.71
2,476,206,720	4,642,000	48.00
2,626,633,440	4,703,000	47.36
2,630,733,120	5,148,000	43.27
2,745,208,800	5,287,000	42.13
2,798,189,280	5,298,000	42.03
2,618,434,080	5,329,000	41.80
2,903,519,520	5,409,000	41.17
3,181,982,400	5,510,000	40.40
2,998,442,880	5,611,000	39.68
2,845,493,280	5,706,000	39.03
3,364,891,200	6,487,000	34.31
3,819,009,600	6,701,000	33.19
3,573,028,800	7,052,000	31.55
3,872,620,800	7,850,000	28.34

Tingkat Kekritisan Umur Waduk

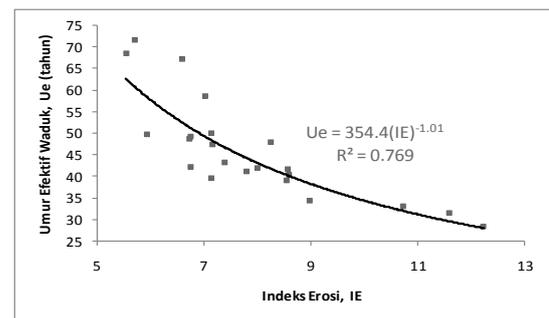
Tingkat kekritisan umur waduk diperoleh dengan membandingkan umur efektif waduk dengan

umur rencananya. Dalam kasus ini, umur rencana waduk adalah 50 tahun. Umur efektif waduk yang diperoleh dalam perhitungan sebelumnya selanjutnya digunakan untuk menentukan tingkat kekritisan waduk sebagaimana terlihat pada Tabel 9 berikut ini.

Tabel 9. Tingkat Kekritisan Umur Waduk (c)

Umur Efektif Waduk (U _e) tahun	Tingkat Kekritisan Umur Waduk (c)	Kategori
71.69	0.697	Tidak Kritis
68.51	0.730	Tidak Kritis
67.19	0.744	Tidak Kritis
58.55	0.854	Tidak Kritis
50.02	1.000	Kritis
49.71	1.006	Sangat Kritis
49.37	1.013	Sangat Kritis
48.69	1.027	Sangat Kritis
48.00	1.042	Sangat Kritis
47.36	1.056	Sangat Kritis
43.27	1.156	Sangat Kritis
42.13	1.187	Sangat Kritis
42.03	1.190	Sangat Kritis
41.80	1.196	Sangat Kritis
41.17	1.214	Sangat Kritis
40.40	1.238	Sangat Kritis
39.68	1.260	Sangat Kritis
39.03	1.281	Sangat Kritis
34.31	1.457	Sangat Kritis
33.19	1.506	Sangat Kritis
31.55	1.585	Sangat Kritis
28.34	1.764	Sangat Kritis

Apabila kita hubungkan antara nilai indeks erosi dengan umur efektif waduk, maka kita akan mendapatkan suatu hubungan seperti pada Gambar 20.



Gambar 20. Hubungan antara Indeks Erosi (IE) dan Umur Efektif Waduk (Ue)

Berdasarkan grafik pada Gambar 20 dapat dirumuskan hubungan antara indeks erosi dengan tingkat kekritisan umur waduk sebagai berikut:

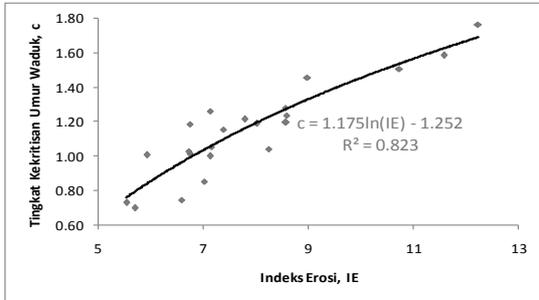
$$U_e = 354.4(IE)^{-1.01} \dots\dots\dots(12)$$

dimana:

- U_e = umur efektif waduk (tahun)
- IE = indeks erosi

Hubungan Antara Indeks Erosi dan Tingkat Kekritisan Umur Waduk

Jika kita hubungkan antara nilai indeks erosi dengan tingkat kekritisan umur waduk, kita akan memperoleh suatu hubungan yang berbentuk logaritmik seperti pada Gambar 21 berikut ini.



Gambar 21. Hubungan antara Indeks Erosi (IE) dan Tingkat Kekritisan Umur Waduk (c)

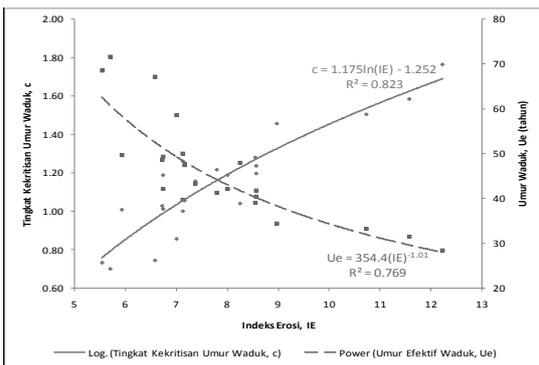
Dari persamaan garis regresi pada Gambar 21 di atas, kita dapat menentukan hubungan antara nilai indeks erosi dengan tingkat kekritisan umur waduk dengan persamaan berikut:

$$c = 1.175 \ln(IE) - 1.252 \quad \dots\dots\dots (13)$$

dimana:

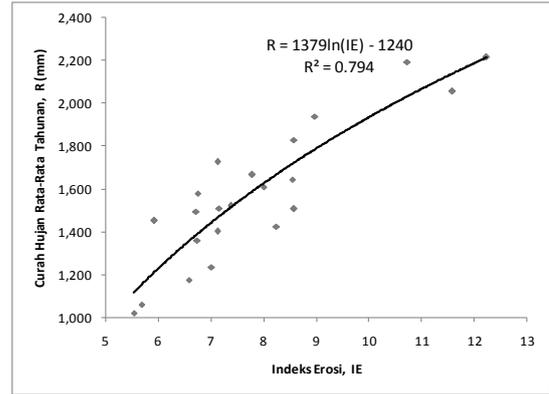
- c = tingkat kekritisan umur waduk
- IE = indeks erosi

Grafik pada Gambar 20 dan Gambar 21 dapat kita gabungkan sehingga kita dapat menentukan tingkat kekritisan umur waduk dan umur efektif waduk dari indeks erosi secara simultan (lihat Gambar 22).



Gambar 22. Hubungan antara Indeks Erosi (IE), Tingkat Kekritisan Umur Waduk (c) dan Umur Efektif Waduk (Ue)

Lebih lanjut, jika kita hubungkan curah hujan rata-rata tahunan dengan nilai indeks erosi, kita akan mendapatkan hubungan yang bersifat logaritmik seperti pada Gambar 23.



Gambar 23. Hubungan antara Curah Hujan Rata-rata Tahunan (R) dengan Indeks Erosi (IE)

Berdasarkan grafik pada Gambar 23, diperoleh hubungan antara indeks erosi dengan curah hujan rata-rata tahunan sebagai berikut:

$$R = 1379 \ln(IE) - 1240 \quad \dots\dots\dots (14)$$

atau:

$$IE = e^{\left(\frac{R+1240}{1379}\right)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

dimana:

- IE = indeks erosi
- R = curah hujan rata-rata tahunan (mm)

Dengan mensubstitusikan Persamaan 13 ke dalam Persamaan 11, akan diperoleh hubungan antara curah hujan rata-rata tahunan dengan tingkat kekritisan umur waduk sebagai berikut:

$$c = 1.175 \ln\left(e^{\left(\frac{R+1240}{1379}\right)}\right) - 1.252 \quad \dots\dots\dots (16)$$

atau:

$$c = 1.175 \cdot \left(\frac{R + 1240}{1379}\right) - 1.252 \quad \dots\dots\dots (17)$$

dimana:

- c = tingkat kekritisan umur waduk
- R = curah hujan rata-rata tahunan (mm)

Demikian pula jika kita mensubstitusikan Persamaan 13 ke dalam Persamaan 10, akan diperoleh hubungan antara curah hujan rata-rata tahunan dengan umur efektif waduk sebagai berikut:

$$U_e = 354.4 \cdot \left(e^{\left(\frac{R+1240}{1379}\right)}\right)^{-1.01} \quad \dots\dots\dots (18)$$

dimana:

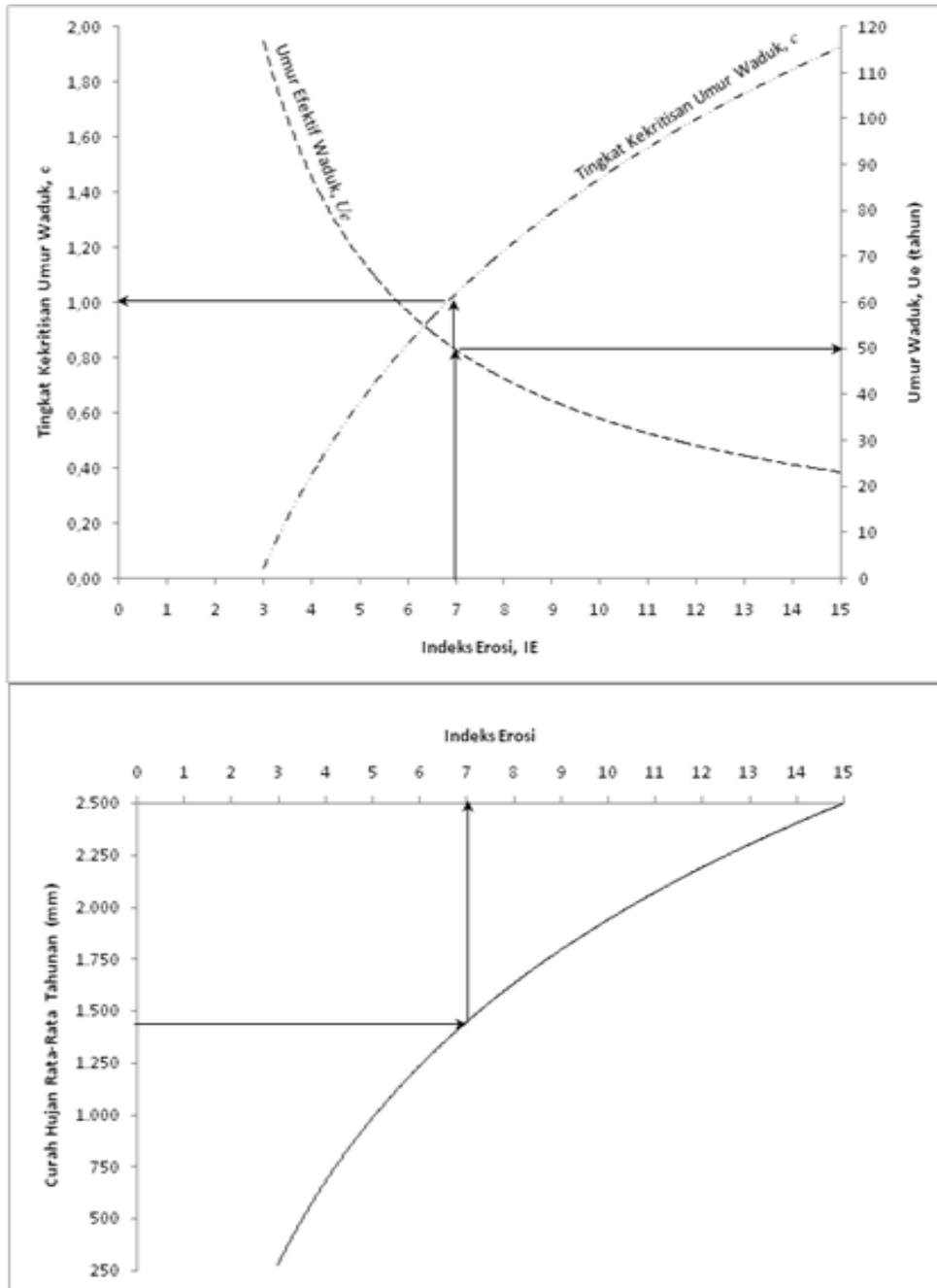
- U_e = umur efektif waduk (tahun)
- R = curah hujan rata-rata tahunan (mm)

Persamaan 13, 14 dan 15 selanjutnya dapat dibuat suatu nomogram yang menghubungkan nilai curah hujan rata-rata tahunan dengan indeks erosi,

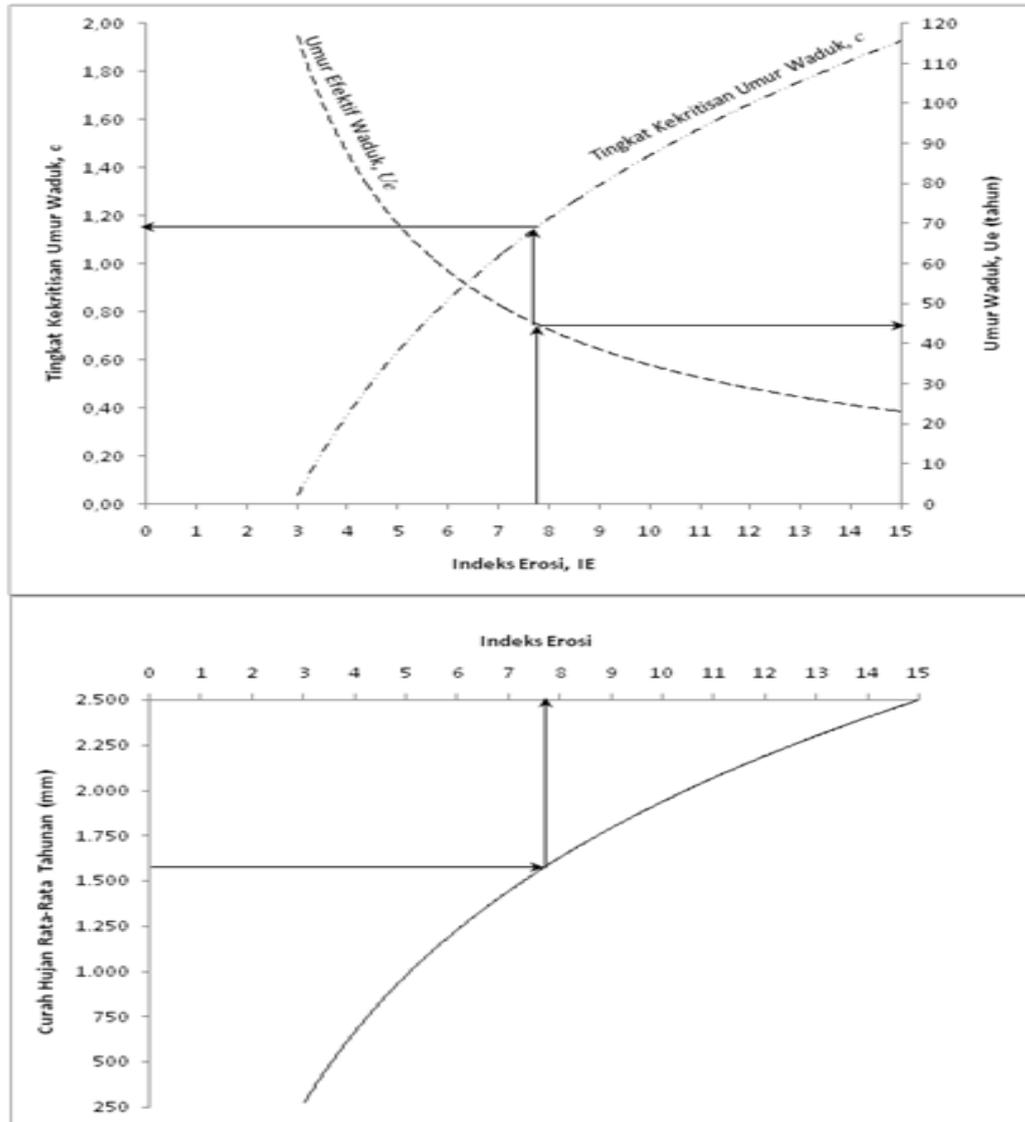
tingkat kekritisitas umur waduk dan umur efektif waduk seperti pada Gambar 24.

Sebagai contoh, untuk curah hujan rata-rata tahunan 1,459 mm per tahun, kita mendapatkan nilai indeks erosi sebesar 7,05 yang berkorespondensi dengan tingkat kekritisitas umur waduk sebesar 1,0 dan umur efektif waduk sebesar 50 tahun sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 24.

Prosedur yang sama dapat kita terapkan untuk DAS Citarum Hulu yang memiliki curah hujan tahunan sebesar 1,573 mm per tahun. Dari grafik diperoleh nilai indeks erosi sebesar 7,86, yang sesuai dengan nilai indeks erosi rata-rata DAS Citarum Hulu pada Tabel 7, dan berkorespondensi dengan tingkat kekritisitas umur waduk sebesar 1,17 dan umur efektif waduk sebesar 44,61 tahun sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Nomogram untuk menentukan tingkat kekritisitas waduk dan umur efektif waduk dari curah hujan tahunan



Gambar 25. Penggunaan nomogram untuk menentukan tingkat kekritisian waduk dan umur efektif waduk dari curah hujan tahunan pada DAS Citarum Hulu

Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian di atas, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan kalibrasi selama tahun 1987-1997 dan validasi selama tahun 1998-2008 terhadap data hasil observasi, dapat disimpulkan bahwa kinerja model dinilai cukup baik. Hal ini dibuktikan dengan nilai rata-rata error yang relatif kecil serta nilai koefisien korelasi (r) dan koefisien determinasi (R^2) yang sama-sama mendekati angka 1.
2. Dari hasil simulasi diperoleh debit inflow rata-rata sebesar $86,09 \text{ m}^3/\text{s}$ atau $2.732.752.080 \text{ m}^3/\text{tahun}$.
3. Dari hasil simulasi diperoleh *sediment yield* rata-rata sebesar $235.86 \text{ ton/ha/tahun}$.
4. Dari hasil simulasi diperoleh *inflow* sedimen rata-rata sebesar $5,102,000 \text{ ton/tahun}$ dan umur efektif rata-rata sebesar 46.18 tahun serta tingkat kekritisian umur waduk sebesar 1.1 .
5. Dari grafik hubungan antara inflow sedimen dengan tingkat kekritisian umur waduk terdapat hubungan yang bersifat linear.
6. Pengaruh curah hujan rata-rata tahunan terhadap indeks erosi dan umur waduk bersifat eksponensial.

Saran

1. Mengingat sangat banyaknya parameter yang digunakan dalam pemodelan, disarankan agar dilakukan penelitian yang lebih mendalam terhadap parameter-parameter tersebut sehingga diperoleh nilai yang tepat agar diperoleh hasil yang memuaskan.
2. Pemodelan dengan model SWAT di Indonesia masih tergolong baru dan langka, sehingga penerapan model SWAT dalam penelitian di masa depan sangat dinantikan.
3. Untuk memperpanjang umur manfaat waduk, perlu dilakukan berbagai upaya untuk mengurangi akumulasi sedimen di waduk, misalnya dengan mengalirkan sedimen keluar waduk sebelum terjadi pengendapan, membangun sarana pengendali sedimen ataupun dengan melakukan rehabilitasi daerah tangkapan.
4. Perlu dilakukan analisis pola operasi dengan mempertimbangkan jumlah sedimen yang masuk dan akan mengendap, sehingga diperoleh pola pelepasan air (*water release*) untuk pembilasan dan penggelontoran yang optimal dengan tetap memperhitungkan pemenuhan kebutuhan di hilir waduk dan produksi energi.

Daftar Pustaka

Arnold, J.G. dan P. M. Allen, 1999. Validation of Automated Methods for Estimating Baseflow and

Groundwater Recharge from Streamflow Records, *Journal of the American Water Resources Association* 35 (2): 411-424.

Arsyad, S., 1989. *Konservasi Tanah dan Air*. Penerbit IPB. Bogor.

Bureau of Reclamation, 2006. *Erosion and Sedimentation Manual*. Denver, Colorado: Sedimentation and River Hydraulics Group.

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan, dan J.R. Williams, 2005. *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version 2005*, Blackland Research Center, Texas.

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan, dan J.R. Williams, 2004. *Soil and Water Assessment Tool: Input/ Output File Documentation Version 2005*, Blackland Research Center, Texas.

Spiegel, M. R., 1961. *Theory and Problems of Statistics*. McGraw-Hill International Book Company, New York.

UBP Saguling, 2008. *Laporan Pemantauan Sedimentasi Waduk PLTA Saguling*. Divisi Geoteknik, PT Indonesia Power.

Winchell, M., R. Srinivasan, dan M. Di Luzio, J. Arnold, 2009. *ArcSWAT 2.3 Interface for SWAT2005: User's Guide*, Blackland Research Center, Texas.