

PENENTUAN LAJU SEDIMEN PADA RENCANA WADUK JATIBARANG

Segel Ginting¹ Waluyo Hatmoko²

¹ Calon Peneliti Teknik Hidrologi, ² Peneliti Utama Konservasi dan Tata Air,
Pusat Litbang Sumber Daya Air, Jl. Ir. H. Juanda 193 Bandung
E-mail: hendrycus2000@yahoo.com

Diterima: 01 September 2009; Disetujui: 25 April 2010

ABSTRAK

Rencana Waduk Jatibarang yang berada di Sungai Kreo digunakan untuk tujuan pembangkit listrik, pengendalian banjir dan penyediaan air domestik. Dengan tujuan yang multiguna tersebut, maka perlu dilakukan desain secara seksama supaya waduk bisa bekerja dengan baik sesuai dengan perencanaan. Umumnya waduk sering mengalami masalah sedimentasi sehingga berdampak pada nilai ekonomis waduk bersangkutan. Untuk itu, maka pada rencana Waduk Jatibarang perlu melakukan suatu perencanaan awal untuk menentukan besarnya jumlah sedimen yang masuk. Berbagai metode pendekatan untuk menentukan jumlah sedimen yang masuk pada rencana Waduk Jatibarang digunakan, baik secara pengukuran langsung maupun secara tidak langsung. Ada lima metode yang digunakan untuk menentukan laju sedimen yang masuk ke waduk yaitu berdasarkan erosi lahan, empiris pengukuran sedimen, model statistik data pengukuran sedimen, aplikasi persamaan sedimen dan model matematis. Hasil dari berbagai pendekatan tersebut menunjukkan bahwa sedimen yang masuk ke rencana Waduk Jatibarang bervariasi tergantung dari setiap metode, namun secara kuantitas menunjukkan nilai sedimen berkisar antara 20.051 sampai 80.440 ton/tahun, namun laju sedimen yang dihasilkan berdasarkan konsep model statistik data pengukuran sebesar 39.754,9 ton/tahun atau 0,76 mm/tahun lebih dapat dipercaya dibandingkan dengan konsep yang lainnya.

Kata kunci: Laju sedimen, Waduk Jatibarang, Sungai Kreo, erosi lahan, model matematik.

ABSTRACT

Jatibarang reservoir which is located in Kreo River, is proposed for electricity power, flood control, and domestic demand uses. Consequently, this reservoir must be designed appropriately so that the operation of the reservoir is compatible with the planning of it. Sedimentation is the major problem in reservoirs effecting to life time of the reservoir. Therefore, the development of reservoir requires preliminary planning to define sedimentation rate that will flow into the reservoir. Various approaches and methods to calculate the sedimentation rate in Jatibarang reservoir are used with direct or indirect measurements. Five methods are used to determine sedimentation rate into the reservoir based on land erosion, empiric measurement of sediment, statistical model of data measurement, application of sedimentation equation, and mathematical model. Results of these approaches show that the sediment entering the planned Jatibarang reservoir varies according to each method applied. However, sediment rate into the reservoir between 20.051 to 80.440 tons/year. The varies sediment flow resulted by the statistical model, i.e. 39.754,9 tons/year or 0,76 mm/year is the most reliable one compared to other concepts.

Keywords: Sediment rate, Jatibarang Reservoir, Kreo River, soil erosion, mathematical model.

PENDAHULUAN

Rencana pembangunan Waduk Jatibarang di Sungai Kreo yang akan digunakan untuk pembangkit listrik, pengendalian banjir dan pemenuhan kebutuhan air domestik perlu didesain dengan baik. Rencana pembangunan waduk tidak terlepas dari permasalahan yang sering terjadi pada waduk, yaitu masalah sedimentasi. Beberapa waduk di Indonesia telah mencapai kondisi kritis, karena masalah sedimen yang menyebabkan pendangkalan, sehingga

kapasitas tampungan menjadi berkurang dan memperpendek umur ekonomisnya.

Dalam kaitan dengan rencana pembangunan waduk tersebut, maka perlu dilakukan kajian mengenai masalah sedimentasi. Sedimen yang terbawa aliran sungai dan masuk ke dalam waduk tergantung pada seberapa besar erosi lahan yang terjadi di daerah tangkapannya. Semakin besar tingkat erosi di lahan menyebabkan peningkatan sedimentasi di sungai. Perkiraan besarnya sedimen yang mengendap di dalam waduk telah banyak dilakukan

perhitungan dengan berbagai cara, baik pemodelan yang lebih sederhana, maupun pemodelan secara lebih detail. Pendekatan dengan cara sederhana biasanya dilakukan dengan menggunakan data erosi di daerah tangkapannya.

Perhitungan erosi yang sederhana, yaitu menggunakan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) dengan memanfaatkan sistem informasi geografis, yaitu dengan membagi daerah tangkapan menjadi lebih kecil, supaya parameter-parameternya menjadi lebih homogen dan terdistribusi secara spasial, seperti yang telah dilakukan oleh Jain dan Kothiyari (2000), Ma (2001) serta Ginting dan Putuhena (2005). Selain itu, penentuan besarnya erosi juga dilakukan oleh Sharma and Sharma (2003) berdasarkan hubungan empiris dengan faktor kandungan tanah liat, kemiringan lahan, tinggi curah hujan dan vegetasi serta telah memanfaatkan sistem informasi geografis (SIG) yang terintegrasi dengan model empiris tersebut (Amiri 2010). Secara lebih detail, perkiraan tersebut dilakukan dengan memanfaatkan komputer untuk pemodelan, yang mengadopsi proses-proses terjadinya sedimen. Pendekatan ini telah banyak menghasilkan berbagai program atau model yang berkaitan dengan erosi dan sedimentasi, yaitu ANSWERS, SWAT, Geo-WEPP, SHETRAN dan lain-lain (Bathurst 2002).

Daerah Aliran Sungai (DAS) Garang memiliki peranan yang cukup penting dan strategis karena melewati Kota Semarang sebagai kota besar yang memiliki aktivitas bisnis yang cukup tinggi. DAS Garang memiliki tiga anak sungai yang cukup potensial yaitu Sungai Garang, Sungai Kripik dan Sungai Kreo, yang mampu menghasilkan bencana hidrologis berupa banjir. Oleh karena itu, untuk mengurangi bencana yang akan terjadi di Kota Semarang tersebut, salah satunya adalah dengan melakukan pembangunan Waduk Jatibarang yang berada di Sungai Kreo. Dengan cara ini debit banjir di Kota Semarang dapat berkurang sekitar 31 % (Sutanto dan Ginting 2009). Untuk merencanakan Waduk Jatibarang, perlu dilakukan studi untuk menentukan besarnya sedimen yang masuk ke dalam waduk, karena hal itu akan mempengaruhi umur layanan waduk. Dalam prakteknya, laju sedimen dapat ditentukan jika, tersedia cukup data, sehingga dengan mudah dilakukan analisa. Apabila data terbatas, penentuan laju sedimen menjadi lebih rumit dan berbagai asumsi harus dibuat. Penelitian dimaksudkan untuk mendapatkan besarnya laju sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang.

KAJIAN PUSTAKA

Erosi merupakan suatu proses kehilangan tanah yang diakibatkan oleh tinggi curah hujan, kecepatan angin, aliran, gaya gravitasi, aktivitas organisme dan kegiatan manusia. Material tanah yang terbawa oleh faktor-faktor tersebut, akan bergerak menuju ke tempat yang lebih rendah, dan sebagian menuju ke sungai dan dibawa oleh arus sungai menuju ke tempat tertentu. Material yang terbawa oleh arus sungai ini disebut sebagai sedimen. *Sediment load* berhubungan dengan pergerakan material di sungai. Ada sekitar enam istilah yang ditemukan dalam literatur tentang sedimen, yaitu muatan melayang (*suspended load*), muatan dasar (*bed load*), muatan bilas (*wash load*), muatan material dasar (*bed materials load*), muatan tidak terukur (*unmeasured load*) dan muatan terukur (*measured load*). Istilah tersebut secara bersama merupakan total sedimen seperti yang terlihat pada persamaan di bawah ini (Thomas 1977):

$$\begin{aligned} \text{Sediment Load} &= \begin{bmatrix} \text{Suspended Load} \\ + \\ \text{Bed Load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Wash Load} \\ + \\ \text{Bed Materials Load} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \text{Unmeasured Load} \\ + \\ \text{Measured Load} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Penentuan besarnya sedimen dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan cara langsung maupun tidak langsung. Pengukuran dengan cara langsung dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran endapan sedimen di waduk apabila waduk telah dibangun. Jika waduk belum dibangun, maka yang dapat dikerjakan adalah melakukan pengukuran sedimen di sungai. Perhitungan sedimen dengan cara tidak langsung dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, seperti penerapan program komputer atau model yang banyak berkembang, baik yang sederhana seperti USLE maupun yang lebih detail. Perhitungan tidak langsung dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, misalnya melalui kajian erosi. Untuk erosi lahan umumnya menggunakan metode USLE atau *Revised USLE* (RUSLE), namun ada juga dipakai model matematika yang berkaitan dengan tinggi curah hujan, kemiringan lahan, kandungan tanah liat, dan vegetasi seperti persamaan yang dikemukakan oleh Sharma and Sharma (2003) berikut ini:

$$SE = 41.73 + 0.181S + 0.046R - 0.387C - 8.125V \dots (1)$$

SE adalah nilai erosi lahan, S merupakan nilai kemiringan lahan (%), R adalah tinggi curah hujan tahunan (cm), C adalah kandungan tanah

liat (%) dan V adalah tutupan vegetasi yang memiliki nilai 1 sampai dengan 5. Nilai untuk vegetasi pada persamaan di atas dikategorikan berdasarkan kriteria berikut:

- 1) Permukaan tanah terbuka dengan kondisi tanah teraduk atau dibajak.
- 2) Semak belukar atau penutupan lahan efektif di bawah 25 %.
- 3) Permukaan tanah yang ditumbuhi rumput-rumputan atau penutupan lahan antara 25% sampai 50%.
- 4) Vegetasi hutan terbuka atau penutupan lahan antara 50% sampai 75%.
- 5) Vegetasi hutan padat termasuk semak-semak dan rumput-rumput atau tutupan lahan lebih besar dari 75%.

Dency and Bolten pada tahun 1976 mengusulkan persamaan untuk menghitung sedimen yang diperoleh berdasarkan data pengendapan 800 waduk di seluruh dunia dengan luas daerah aliran sungai (DAS) dan rata-rata limpasan tahunan dengan persamaan sebagai berikut (Ouyang and Bartholic 1997):

$$Q_s = 1280 Q^{0,46} (1,43 - 0,26 \text{ Log } A) \quad \text{untuk limpasan kurang dari 2 inci dan,}$$

$$Q_s = 1958 e^{-0,055 Q} (1,43 - 0,26 \text{ Log } A) \quad \text{untuk limpasan lebih dari 2 inci.}$$

Keterangan:

Q_s , sedimen (ton/mil²/tahun)

Q , limpasan (inchi)

A , luas DAS (mil²).

Karena persamaan di atas variabelnya masih dalam satuan Inggris, maka persamaannya diubah menjadi bentuk satuan metrik berikut ini:

$$Q_s = 38,71 Q^{0,46} (1,537 - 0,26 \text{ Log } A) \quad \text{untuk limpasan kurang dari 508 mm.}$$

$$Q_s = 2,977 e^{-0,055 Q} (1,537 - 0,26 \text{ Log } A) \quad \text{untuk limpasan lebih dari 508 mm.}$$

Keterangan:

S , sedimen (ton/km²/tahun)

Q , limpasan (mm)

A , luas DAS (km²)

Persamaan yang lebih sederhana lagi dihasilkan oleh Stigter, et al. (1989) dengan meregresikan data sedimen yang ada di waduk dengan luas daerah alirannya. Data sedimen waduk berasal dari iklim *semi arid* Amerika Serikat dan biasanya persamaan yang dihasilkan digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk menentukan jumlah sedimen pada rencana pembangunan waduk dengan persamaan berikut:

$$Q_s = 1098 A^{-0,24} \quad \dots (2)$$

Keterangan

Q_s , sedimen (m³/km²/tahun)

A , luas DAS (km²)

Berbagai pendekatan untuk menentukan besarnya sedimen pada sejumlah negara banyak dilakukan. Pada umumnya persamaan yang diperoleh dari negara-negara yang sudah maju, sehingga penerapan persamaan yang ada untuk kondisi Indonesia perlu dilakukan koreksi. Brown, et al. (1996) menyatakan telah membuat suatu pendekatan sedimen berdasarkan multi skala untuk mengkoreksi sedimen yang masuk ke dalam Waduk Masinga, Kenya. Pendekatan semacam ini dilakukan, karena terjadinya variasi iklim di DAS Hulu Tana yang merupakan daerah tangkapan Waduk Masinga. Variasi ini terjadi karena daerah aliran sungainya memiliki lebih dari satu tipe iklim. Pendekatan yang lainnya adalah dengan membandingkan beberapa metode untuk menghitung besarnya sedimen yang dihasilkan, seperti yang dilakukan oleh Guevara-Pérez and Márquez (2007) pada DAS Caroni di Venezuela dengan memakai tiga model, yaitu Langbein-Schumm, *Universal Soil Loss Equation* (USLE) dan model Poesen, maka model Poesen merupakan model yang memberikan hasil prediksi terbaik untuk DAS Caroni.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam menentukan besarnya laju sedimen pada kajian ini adalah dilakukan dengan berbagai pendekatan. Lokasi studi secara hidrologis belum memiliki data yang lengkap, sehingga analisa untuk menentukan sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang menjadi sulit. Lokasi studi berada di DAS Kreo yang mencakup daerah tangkapan Waduk Jatibarang di Provinsi Jawa Tengah seperti terlihat pada Gambar 1. Oleh karena secara hidrologi di lokasi studi ketersediaan data terbatas, maka digunakan beberapa pendekatan untuk menentukan besarnya sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang, yaitu: *analisa sedimen berdasarkan erosi lahan, analisa sedimen berdasarkan perbandingan matematis hasil sedimen, analisa sedimen berdasarkan model statistik data pengukuran sedimen, analisa sedimen berdasarkan aplikasi persamaan sedimen, dan analisa sedimen berdasarkan model matematis.*

1) Analisa sedimen berdasarkan erosi lahan

Besarnya sedimen yang masuk ke dalam waduk diperkirakan berdasarkan hasil erosi lahan. Untuk menentukan laju sedimen dari erosi lahan, diperlukan nilai *sediment delivery ratio* (SDR) pada lokasi studi, sehingga besarnya laju

sedimen yang terjadi dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_s = \text{Erosi Lahan} \times \text{SDR} \quad \dots (3)$$

Keterangan:

Q_s , sedimen yang terjadi di sungai (ton/tahun)

SDR , *sediment delivery ratio*

2) Analisa sedimen berdasarkan perbandingan matematis hasil sedimen

Besarnya sedimen yang mengendap di dalam waduk ditentukan berdasarkan pengukuran empiris pada hilir Waduk Jatibarang dan juga data pengukuran di hulu Waduk Jatibarang. Titik pengukuran di hulu waduk

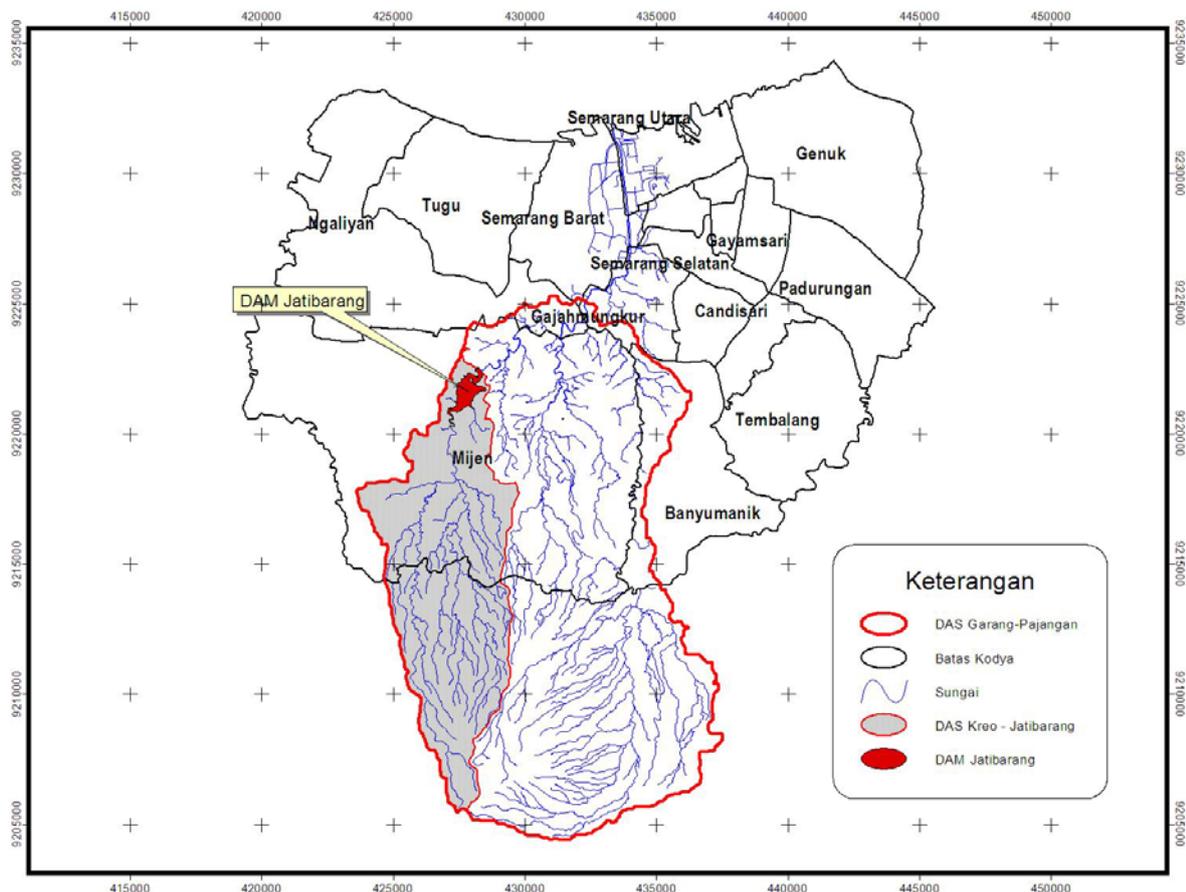
bukan merupakan *inflow* tunggal, sehingga masih belum dapat mewakili *inflow* secara menyeluruh yang masuk ke rencana waduk. Untuk menentukan besarnya sedimen pada lokasi yang tidak terukur, berdasarkan data sedimen yang terukur pada satu sistem jaringan sungai dapat dilakukan secara matematis dengan menggunakan persamaan berikut (Stigter, *et al.* 1989):

$$Q_{sA} = \frac{\text{water yield A}}{\text{water yield B}} * Q_{sB} \quad \dots (4)$$

Keterangan:

Q_{sA} , sedimen di lokasi A (ton/tahun)

Q_{sB} , sedimen di lokasi B (ton/tahun)



Gambar 1 Daerah lokasi penelitian DAS Waduk Jatibarang

3) Analisa sedimen berdasarkan model statistik data pengukuran sedimen

Rencana Waduk Jatibarang berada di DAS Kreo yang merupakan bagian dari DAS Garang. Perkiraan laju sedimentasi dengan pendekatan ini menggunakan data pengukuran yang ada di seluruh DAS Garang. Data sedimen diperoleh dari berbagai pengukuran pada lokasi pada DAS tertentu dan dengan berbagai variasi aliran yang

ada di seluruh DAS Garang. Berdasarkan data pengukuran sedimen, maka dibentuk suatu persamaan dengan meregresikan hubungan antara debit dengan sedimen beserta karakteristik daerah aliran sungainya. Persamaan yang dihasilkan diharapkan dapat memberikan nilai sedimen pada rencana Waduk Jatibarang yang belum memiliki instrumentasi dan data hidrologi yang lengkap, dengan hanya diketahui karakteristik daerah aliran sungainya.

4) Analisa sedimen berdasarkan aplikasi persamaan sedimen

Penentuan sedimen dapat juga dilakukan berdasarkan persamaan aplikasi lain yang telah dilakukan oleh beberapa ahli di daerahnya masing-masing. Dengan berbagai persamaan yang ada dan dengan mempertimbangkan kondisi daerah asal dari pembentukan persamaan serta dihubungkan dengan kondisi iklim daerah lokasi, maka diharapkan dari persamaan-persamaan yang ada dapat memberikan gambaran kondisi sedimen yang masuk ke rencana Waduk Jatibarang.

5) Analisa sedimen berdasarkan model matematis

Model matematis yang diterapkan adalah persamaan yang diadopsi dari model *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation* (ANSWERS). Model ANSWERS merupakan model deterministik untuk melakukan perhitungan aliran permukaan dan sedimen pada suatu DAS berbasis segmen-segmen atau grid. Konsep model ANSWERS menggunakan limpasan permukaan dan energi kinetik hujan sebagai faktor yang menentukan besarnya jumlah sedimen yang terjadi. Proses dari pembentukan sedimen tersebut mulai dari adanya energi kinetik hujan yang melakukan penghancuran (*detachment*) terhadap partikel tanah dan selanjutnya dengan adanya hujan yang menyebabkan terjadinya limpasan permukaan yang akan membawa (*transport*) partikel tanah tersebut ke sungai. Perhitungan dari setiap proses yang terjadi dilakukan secara terdistribusi berdasarkan ruang dan waktu.

Untuk menghitung jumlah sedimen di lokasi studi tidak sekompleks dari penggunaan model ANSWERS, namun hanya ditentukan berdasarkan aliran permukaan untuk membawa partikel tanah (*transport*) yang dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini (Beasley and Huggins 1982):

$$T = 0.90 * C * K * A_i * S * Q \quad \dots (5)$$

Keterangan:

T, kehilangan partikel tanah akibat limpasan (kg/menit)

C, faktor tanaman dan manajemen lahan

K, faktor erodibilitas tanah

A, luas lahan

S, kemiringan lahan (derajat)

Q, laju aliran per satuan panjang (m²/menit)

Aliran permukaan yang digunakan dalam studi memakai debit yang terukur. Namun besarnya partikel tanah yang dapat berpindah dari elemen satu ke elemen yang lainnya sangat dipengaruhi oleh kemampuan limpasan untuk memindahkan partikel tanah atau kapasitas *transport* sedimen (TF). Jadi besarnya partikel tanah yang dapat berpindah dihitung dengan persamaan berikut ini (Beasley and Huggins 1982):

$$TF = 161 * S * Q^{0.5} \quad \text{jika } Q \leq 0.046 \text{ m}^2 / \text{menit}$$

$$TF = 16,320 * S * Q^2 \quad \text{jika } Q > 0.046 \text{ m}^2 / \text{menit}$$

Besarnya sedimen yang akan terjadi apabila nilai $T > TF$ maka nilai sedimen adalah TF dan, apabila nilai $T < TF$ maka nilai sedimen adalah T .

a) Kemiringan dan arah aliran

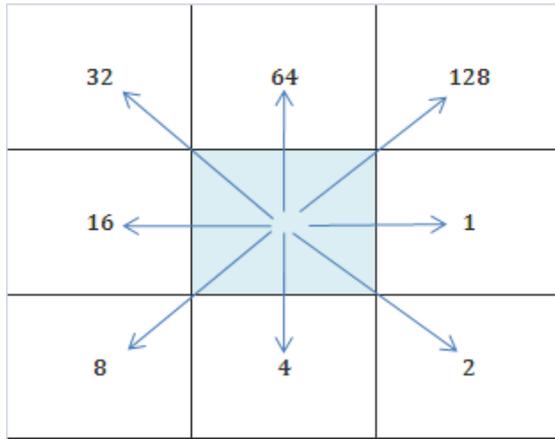
Kemiringan lereng suatu tempat sebenarnya merupakan perbandingan antara beda tinggi dua titik dengan jarak mendatarnya. Persamaan yang digunakan untuk menghitung kemiringan adalah sebagai berikut (Meijerink, et al. 1994, Hengl, et al. 2003):

$$\text{Slope (s)} = \sqrt{dy^2 + dx^2} \quad \dots (6)$$

yang mana, $dy = \text{Gradien } y = \frac{\partial z}{\partial y}$ $dx = \text{Gradien } x = \frac{\partial z}{\partial x}$.

Kemiringan dapat diturunkan dari *Digital Elevation Model* (DEM) dan digunakan sebagai pertimbangan arah aliran air pada suatu titik dengan membandingkan keseluruhan kemiringan di sekitar titik tersebut seperti diilustrasikan pada Gambar 2. Titik yang dinyatakan dalam satu sel grid dalam DEM mempunyai delapan tetangga sel grid lain. Oleh karena itu hanya ada delapan pilihan kemiringan dan terpilih satu sebagai arah aliran yang kemudian disebut arah aliran. Berdasarkan gambar ilustrasi tersebut, maka dapat ditentukan bahwa arah aliran akan menuju pada kemiringan yang lebih rendah.

Akumulasi aliran adalah bertambah besarnya aliran pada tiap-tiap segmen yang dilaluinya. Apabila dalam bentuk spasial, dalam hal ini pembagian wilayah berdasarkan ukuran yang sama atau grid, maka akumulasi aliran adalah jumlah dari setiap grid yang melaluinya. Akumulasi aliran dihitung sebagai akumulasi banyak grid yang mengalir menuju ke grid yang paling rendah ketinggiannya. Jika bobot tiap grid dinyatakan sebagai 1 satuan, maka akumulasi aliran tiap grid merupakan daerah kontribusi aliran grid tersebut. Sebagai contoh akumulasi aliran pada suatu *outlet* DAS, mewakili luas DAS tersebut (luas tangkapan). Grid yang mempunyai



Gambar 2 Kodifikasi arah aliran

akumulasi aliran 1 berarti tidak ada aliran yang masuk ke grid tersebut dan berhubungan dengan puncak bukit (Meijerink, et. al. 1994).

b) Penentuan bobot limpasan

Untuk menentukan besarnya limpasan yang terjadi pada setiap grid berdasarkan data pengamatan di pos *Automatic Water Level Recorder* (AWLR), maka dilakukan penentuan besarnya bobot atau daya limpasan dari grid tersebut dengan ilustrasi seperti pada Gambar 3. Untuk menduga nilai $q_{i,j}$ dengan fungsi parameter tersebut, maka digunakan persamaan yang dikeluarkan oleh *Soil Conservation Service* (SCS) yang telah berubah nama menjadi *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) adalah sebagai berikut:

$$q_{i,j} = \frac{(P_{i,j} - 0.2S_{i,j})^2}{P_{i,j} + 0.8S_{i,j}}, \quad \dots (7)$$

$$S_{i,j} = \frac{25400}{CN_{i,j}} - 254 \quad \dots (8)$$

$q_{i,j}$, daya limpasan dari setiap grid

$q_{1,2} \neq q_{2,1} \neq q_{3,4} \dots dst$

$S_{i,j}$, tampungan saat jenuh pada setiap grid

$P_{i,j}$, tinggi curah hujan pada grid

$CN_{i,j}$, curve number setiap grid.

Persamaan di atas telah mengadopsi ketiga unsur yang mempengaruhi daya limpasan. Nilai curve number (CN) pada setiap grid ditentukan berdasarkan kombinasi antara jenis tanah dan juga penutupan lahannya. Apabila debit pengamatan berada pada grid $q_{12,8}$ maka dapat dituliskan bahwa nilainya adalah sebagai berikut:

$$Q = q_{1,1} + q_{1,2} + \dots + q_{2,1} + q_{2,2} + \dots + q_{3,1} + q_{3,2} + \dots + q_{12,1} + q_{12,2} + \dots \quad \dots (9)$$

atau dapat dituliskan seperti berikut ini:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} q_{i,j} \quad \dots (10)$$

Jika debit pengamatan pada lokasi *Automatic Water Level Recorder* (AWLR) adalah Q_{os} , maka rekonstruksi kembali nilai limpasan aktual pada setiap grid berdasarkan debit pengamatan tersebut adalah sebagai berikut:

$$Q_{i,j} = \frac{Q_{os}}{Q} * q_{i,j} \quad \dots (11)$$

Nilai limpasan aktual, $Q_{i,j}$, yang digunakan selanjutnya sebagai data perhitungan untuk menentukan besarnya partikel tanah yang terbawa oleh limpasan permukaan.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	q1,1	q1,2	q1,3	q1,4	q1,5	q1,6	q1,7	q1,8	q1,9	q1,10	q1,11	q1,12
2	q2,1	q2,2	q2,3	q2,4	q2,5	q2,6	q2,7	q2,8	q2,9	q2,10	q2,11	q2,12
3	q3,1	q3,2	q3,3	q3,4	q3,5	q3,6	q3,7	q3,8	q3,9	q3,10	q3,11	q3,12
4	q4,1	q4,2	q4,3	q4,4	q4,5	q4,6	q4,7	q4,8	q4,9	q4,10	q4,11	q4,12
5	q5,1	q5,2	q5,3	q5,4	q5,5	q5,6	q5,7	q5,8	q5,9	q5,10	q5,11	q5,12
6	q6,1	q6,2	q6,3	q6,4	q6,5	q6,6	q6,7	q6,8	q6,9	q6,10	q6,11	q6,12
7	q7,1	q7,2	q7,3	q7,4	q7,5	q7,6	q7,7	q7,8	q7,9	q7,10	q7,11	q7,12
8	q8,1	q8,2	q8,3	q8,4	q8,5	q8,6	q8,7	q8,8	q8,9	q8,10	q8,11	q8,12
9	q9,1	q9,2	q9,3	q9,4	q9,5	q9,6	q9,7	q9,8	q9,9	q9,10	q9,11	q9,12
10	q10,1	q10,2	q10,3	q10,4	q10,5	q10,6	q10,7	q10,8	q10,9	q10,10	q10,11	q10,12
11	q11,1	q11,2	q11,3	q11,4	q11,5	q11,6	q11,7	q11,8	q11,9	q11,10	q11,11	q11,12
12	q12,1	q12,2	q12,3	q12,4	q12,5	q12,6	q12,7	q12,8	q12,9	q12,10	q12,11	q12,12

Gambar 3 Proses penentuan bobot limpasan dari masing-masing grid

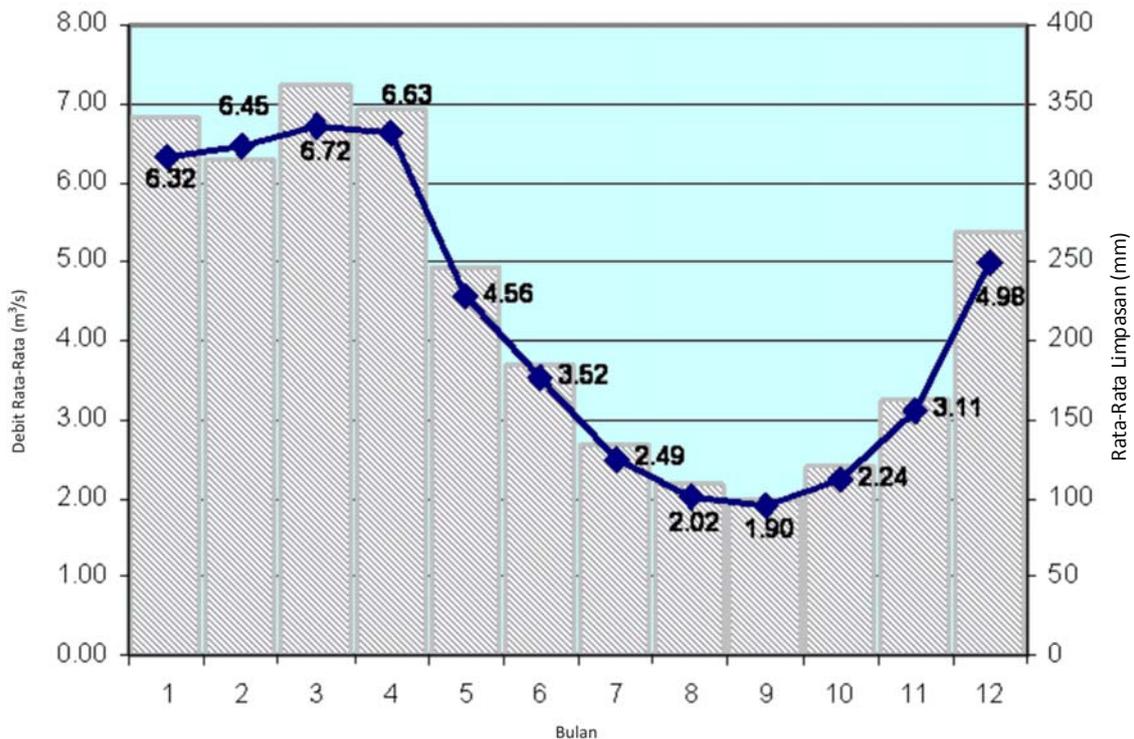
HASIL DAN PEMBAHASAN

1 Kondisi hidrologi DAS Kreo - Jatibarang

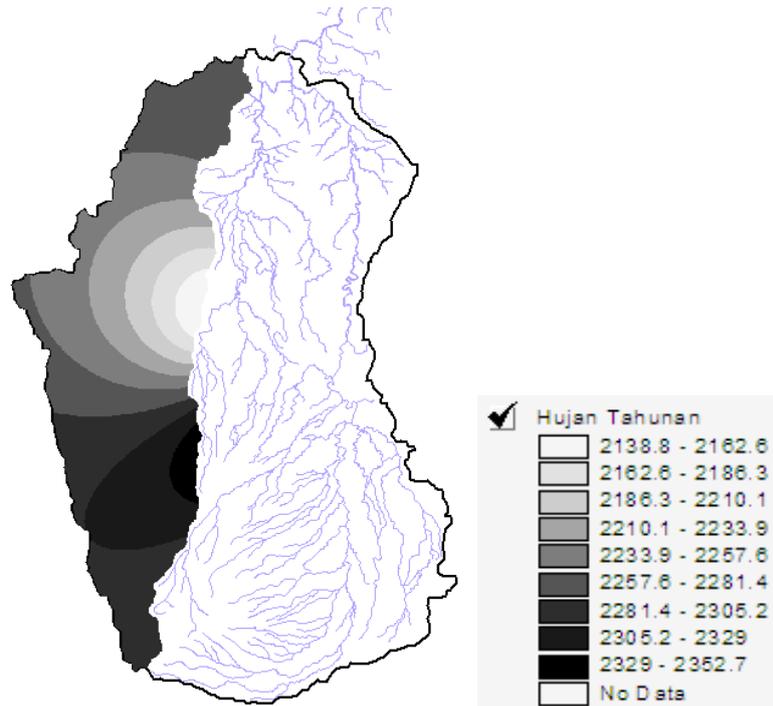
Untuk mengetahui kondisi hidrologis daerah tangkapan Waduk Jatibarang, maka dilakukan pengumpulan data yang berkaitan dengan data hidrologi yang meliputi data hujan dan debit aliran. Selain data tersebut juga dilakukan pengumpulan data pengukuran sedimen yang pernah dilakukan. Data debit yang berhasil dikumpulkan meliputi data debit di Sungai Kreo-Kalipancur selama 4 tahun mulai dari 1995 sampai dengan 1998. Pos ini terletak di bagian hilir dari Waduk Jatibarang. Selain pos di atas, juga dikumpulkan data debit di Sungai Garang-Pajangan yang berada di bagian hilir Sungai Kreo, dari tahun 1995 sampai dengan 2006. Data debit aliran yang terpantau pada kedua lokasi tersebut selanjutnya digunakan untuk memperkirakan besarnya debit aliran yang masuk ke dalam Waduk Jatibarang dengan melakukan penyesuaian dengan suatu faktor koreksi. Faktor koreksi dilakukan dengan melibatkan beberapa unsur seperti luas daerah aliran, tinggi curah hujan, penutupan lahan, dan jenis tanah. Dengan diperolehnya faktor koreksi tersebut, maka dapat ditentukan besarnya debit aliran yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang. Adapun debit aliran rata-rata yang masuk ke rencana waduk dari seluruh data

diperoleh sekitar $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$ atau sekitar 2690 mm dan untuk setiap bulannya dapat dilihat pada Gambar 4.

Selain data debit, juga dikumpulkan data hujan di lokasi studi, khususnya di daerah tangkapan rencana waduk. Data hujan yang digunakan berupa data hujan tahunan dari beberapa pos hujan dan hasilnya telah dibuat dalam bentuk isohyet hujan tahunan di DAS Kreo seperti dapat dilihat pada Gambar 5. Data lain yang dikumpulkan adalah data sedimen di lapangan, yang merupakan data kunci untuk menentukan laju sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang. Data sedimen yang diperoleh di lapangan yang berada di Sungai Kreo terdapat pada satu lokasi, yaitu di Sungai Kreo - Kalipancur, yang tidak disertai dengan data debit pengukuran langsung, namun hanya diperoleh informasi konsentrasi sedimen dengan muka air. Agar dapat digunakan, maka debit diperkirakan berdasarkan persamaan lengkung debit pada waktu dan lokasi dari masing-masing sungai. Selain data tersebut juga diperoleh data dari pengukuran langsung di lapangan pada beberapa lokasi di DAS Garang (Ginting 2009). Hasil pengumpulan data sedimen dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 4 Grafik debit rata-rata dan limpasan bulanan



Gambar 5 Peta isohyet di DAS Kreo

Tabel 1 Data sedimen suspensi di Sungai Kreo-Kalipancur.

Tanggal	Muka air (m)	Debit* (m ³ /s)	Sedimen (mg/l)
24-Nov-07	0.25	9.69	34.0
24-Nov-07	0.25	9.69	38.5
24-Nov-07	0.25	9.69	29.7
28-Nov-07	0.28	10.73	38.7
28-Nov-07	0.28	10.73	33.3
28-Nov-07	0.28	10.73	37.0
2-Dec-07	0.34	12.97	92.9
2-Dec-07	0.34	12.97	102.0
2-Dec-07	0.34	12.97	72.4
8-Dec-07	0.46	18.13	67.6
8-Dec-07	0.46	18.13	78.9
8-Dec-07	0.46	18.13	89.0

* Berdasarkan lengkung debit

2 Kondisi topografi DAS Kreo - Jatibarang

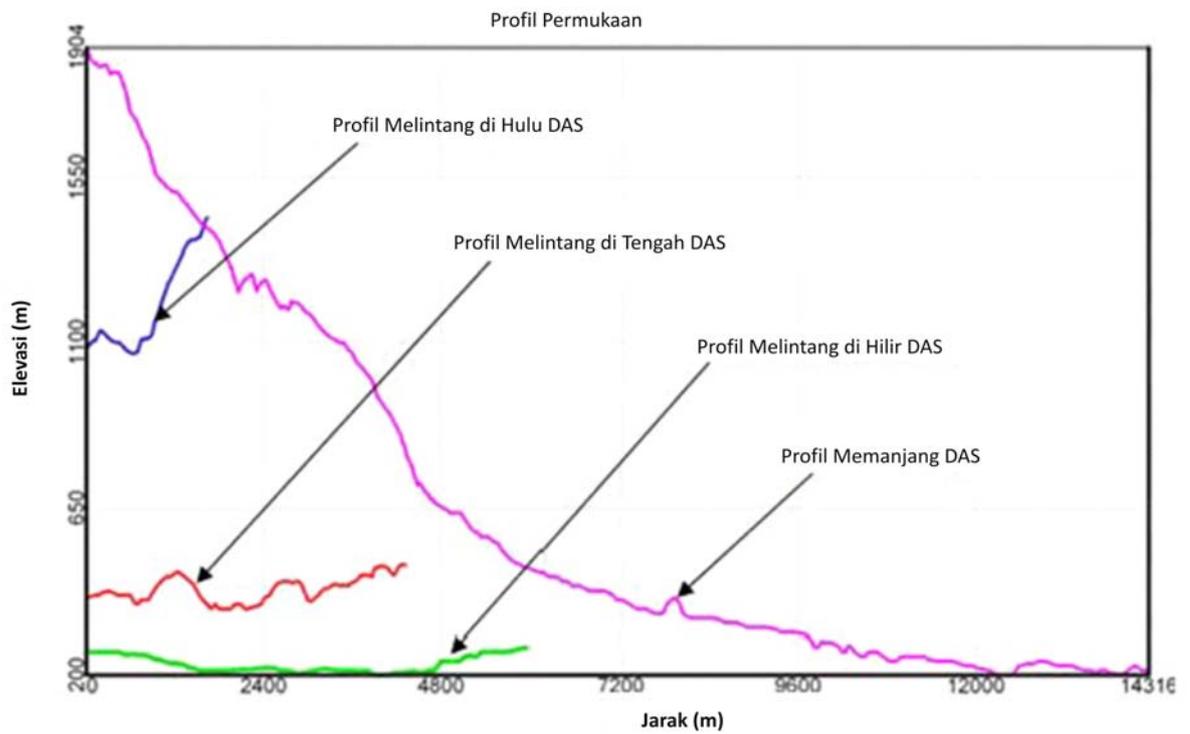
1) Topografi

Berdasarkan data DEM yang telah dibentuk, maka dapat dilihat kondisi topografi secara memanjang maupun melintang mulai dari hulu sampai di bagian hilir daerah aliran sungai (DAS) seperti terlihat pada Gambar 6. Dari gambar ini terlihat bahwa profil memanjang DAS dari hulu sampai hilir memiliki dua bentuk

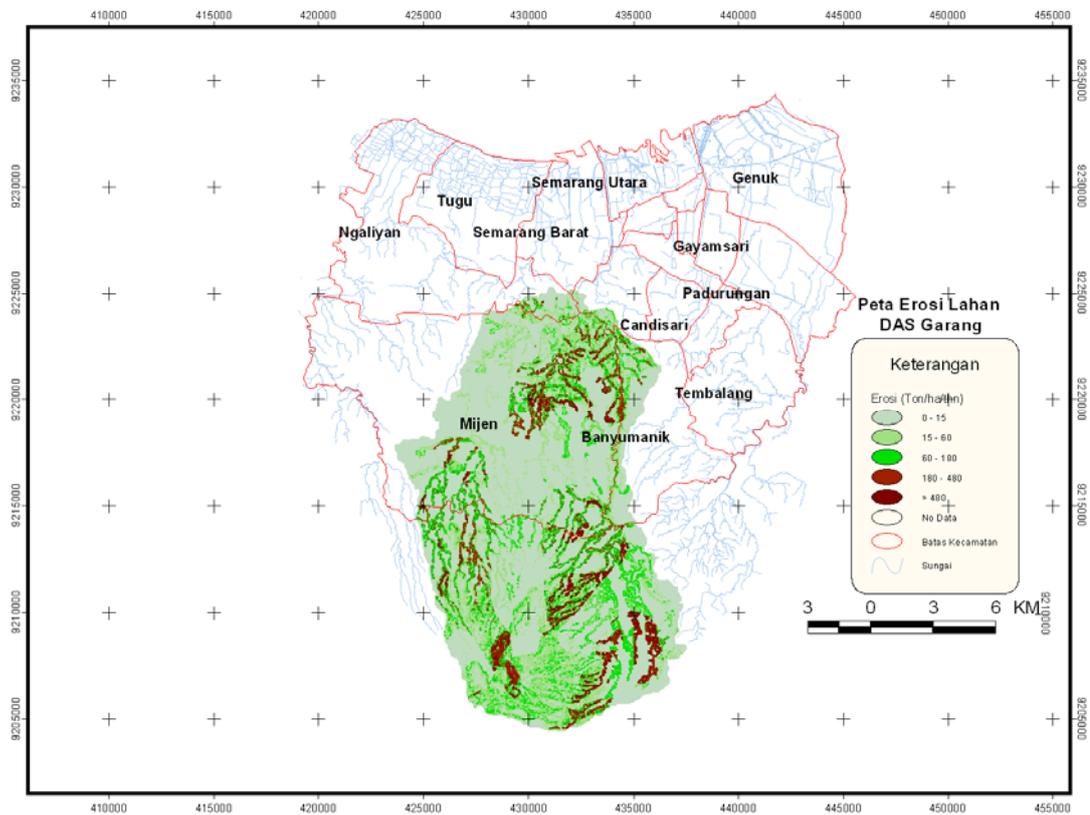
kemiringan yang berbeda, yaitu dari hulu sampai dengan jarak sekitar 5 km ke hilir DAS memiliki kemiringan permukaan yang sangat curam, sementara jarak lebih besar dari 5 km dari hulu memiliki permukaan yang landai. Jika dilihat dari profil melintang DAS, maka daerah yang berada di hulu DAS memiliki permukaan yang lebih bergelombang atau perbedaan elevasi tinggi dengan yang rendah sangat tinggi, untuk penampang melintang yang berada di tengah DAS memiliki profil permukaan yang tidak terlalu bergelombang. Dengan kata lain perbedaan elevasi tinggi dengan rendah tidak terlalu besar, sementara untuk daerah yang berada di hilir DAS memiliki profil permukaan yang lebih datar.

2) Kemiringan lahan

Kemiringan lahan dapat diturunkan dari DEM dan digunakan sebagai pertimbangan untuk menentukan arah aliran air pada suatu grid dengan membandingkan seluruh kemiringan lahan di sekitar grid tersebut. Jumlah grid yang berada di sekitarnya terdiri dari delapan grid. Untuk lokasi studi, telah dilakukan perhitungan kemiringan lahan berdasarkan data DEM. Hasil perhitungan dapat diklasifikasikan menjadi 5 kelas seperti terlihat pada Tabel 2.



Gambar 6 Bentuk profil permukaan di lokasi studi



Gambar 7 Klasifikasi nilai erosi lahan di lokasi studi (Ginting 2009)

Tabel 2 Klasifikasi kemiringan di lokasi studi

Kelas	Kemiringan (%)	Luas (km ²)	% terhadap total luas
1	< 10	19,70	40
2	10 - 20	11,14	22
3	20 - 30	6,79	14
4	30 - 45	6,01	12
5	> 45	5,89	12

3 Pengukuran debit dan sedimen

Selain data sedimen yang telah dikumpulkan, juga dilakukan pengukuran debit dan sedimen dengan tujuan untuk menambah jumlah data dan juga lokasi pengukuran. Pengukuran ini dilakukan pada dua lokasi, yaitu di hulu Sungai Kreo tepatnya di Sungai Kuranji – Skopek dan di hilir Sungai Kreo, tepatnya Sungai Kreo - Kalipancur. Hasil pengukuran debit dan sedimen di lokasi studi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil pengukuran debit dan sedimen di Kalipancur dan Skopek.

Tanggal	S. Kreo - Kalipancur		S. Kuranji - Skopek	
	Debit (m ³ /s)	Sedimen (mg/l)	Debit (m ³ /s)	Sedimen (mg/l)
Apr-08	2,84	10,33	-	-
Juni-08	1,35	21,33	0,27	48,67
Juni-08	1,23	18,33	0,28	24,00
Agus-08	0,80	14,80	0,12	20,33
Okt-08	3,39	77,33	0,50	26,00

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran debit dan sedimen tidak memiliki kondisi aliran yang ekstrim atau pada saat kejadian banjir, namun diperoleh dari data sekunder yang telah dilakukan pada tahun sebelumnya.

4 Analisa laju sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang

1) Analisa sedimen berdasarkan erosi lahan

Besarnya sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang dapat diperkirakan berdasarkan erosi yang terjadi pada suatu lahan. Perhitungan besarnya erosi lahan menggunakan persamaan USLE dengan memanfaatkan data DEM agar hasil yang diperoleh terdistribusi secara spasial. Berdasarkan hasil studi erosi dan

sedimentasi di DAS Garang seperti terlihat pada Gambar 7 yang dilakukan oleh Ginting (2009), diperoleh besarnya nilai erosi di seluruh DAS Garang. Total erosi yang terjadi di daerah tangkapan Waduk Jatibarang sekitar 212.218,2 ton/tahun. Dari hasil studi tersebut, juga diketahui besarnya nilai SDR untuk Sungai Kreo sekitar 11%. Dengan demikian, maka diperoleh jumlah sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang sekitar 23.344,037 ton/tahun.

2) Analisa sedimen berdasarkan model statistik data pengukuran sedimen

Persamaan empiris yang digunakan adalah persamaan yang dibentuk berdasarkan data pengukuran di seluruh DAS Garang yang meliputi Sungai Garang, Sungai Gribik, Sungai Kreo, Sungai Pronasan dan Sungai Kuranji. Perhitungan besarnya sedimen ditentukan berdasarkan luas DAS dan juga debit yang terjadi. Persamaan ini dibentuk berdasarkan *trial and error* dengan melihat nilai koefisien korelasi yang paling tinggi. Persamaan yang dibentuk dengan membuat hubungan antara debit sedimen dan luas daerah aliran sungai pada sisi y (ordinat) dengan debit aliran sungai dan logaritma luas daerah aliran sungai di sisi x (absis). Persamaan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 8, yaitu:

$$Q_s = \frac{885,76 \left[Q_w (\text{Log}(A))^{1,5} \right]^{2,105}}{A^{1,8}} \dots (12)$$

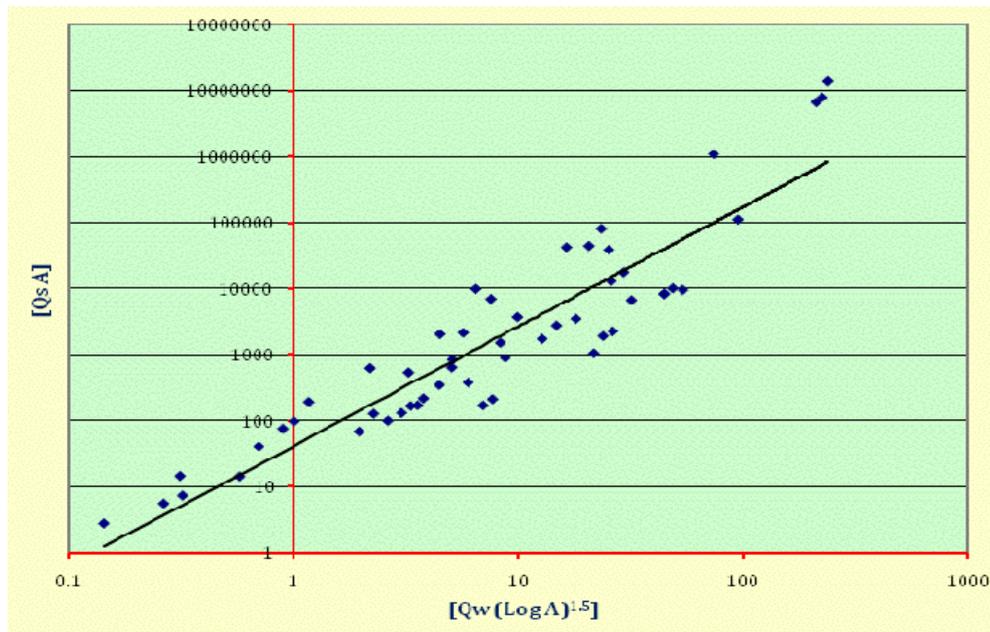
Keterangan :

Q_s , sedimen melayang (ton/hari)

Q_w , debit aliran sungai (m³/s)

A , luas daerah aliran sungai (km²)

Dengan memakai persamaan di atas, maka dapat diduga besarnya sedimen pada daerah yang tidak dilakukan pengukuran. Untuk memperkirakan besarnya sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang, terlebih dahulu harus diketahui luas daerah tangkapan Waduk Jatibarang. Luas daerah tangkapan Waduk Jatibarang sekitar 49,6 km², dengan debit aliran yang telah dihitung pada bab sebelumnya, maka dapat diketahui besarnya sedimen yang masuk ke dalam rencana waduk. Perhitungan sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang dilakukan berdasarkan data debit harian selama kurang lebih 9 tahun. Hasil rekap setiap tahun dan juga perkiraan rata – rata sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 8 Hubungan Qs.A dan Qw.Log A

Tabel 4 Sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang.

Tahun	Sedimen (ton/tahun)
1995	36.570,9
1996	39.117,0
1997	77.808,7
1998	23.032,3
2001	10.489,7
2002	36.220,3
2004	38.954,5
2005	34.427,6
2006	28.646,4
Rata Sedimen	36.140,8
Total Sedimen	39.754,9
Berat Jenis (ton/m ³)	1,056
Tebal Sedimen (mm/tahun)	0,76

Berdasarkan metode ini, jumlah sedimen yang masuk ke dalam rencana waduk sekitar 39.755 ton/tahun dengan tebal sedimen sekitar 0,76 mm/tahun.

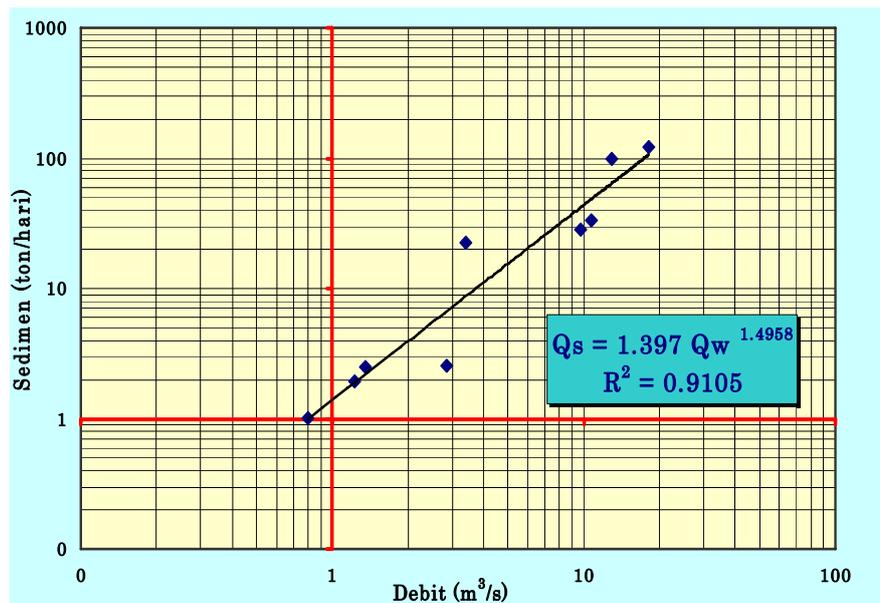
3) Analisa sedimen berdasarkan aplikasi persamaan sedimen

Persamaan lain yang digunakan untuk menghitung sedimen diperoleh dari hasil studi di negara lain. Persamaan tersebut dikemukakan oleh Dency and Bolten pada tahun 1976 (Ouyang and Bartholic 1997) dan Stigter, *et al.* (1989). Dari persamaan tersebut maka dapat dihitung besarnya sedimen berdasarkan informasi data luas DAS dan limpasan yang diperoleh di lokasi studi. Luas daerah tangkapan rencana Waduk Jatibarang sekitar 49,6 km² dan limpasan

tahunan yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang sekitar 2690 mm. Dengan demikian, maka besarnya sedimen dengan menggunakan persamaan Stigter adalah sekitar 25.606 ton/tahun atau setara dengan 0,433 mm/tahun, sedangkan menurut persamaan Dency dan Bolten diperoleh hasil sedimen sekitar 79.592 ton/tahun atau setara dengan 1,34 mm/tahun untuk kategori limpasan dibawah 508 mm, sementara untuk kategori limpasan lebih besar dari 508 mm diperoleh hasil sedimen sekitar 412.103,59 ton/tahun atau setara dengan 6,9 mm/tahun. Dari kedua persamaan di atas, hasil perhitungan sedimen menurut Stigter, *et al.* (1989) dan Dency and Bolten memberikan hasil yang sangat bervariasi. Hal ini disebabkan karena kondisi iklim maupun kondisi DAS dari masing-masing negara asal pembuat persamaan tersebut berbeda, sehingga memberikan hasil prediksi sedimen yang berbeda pula.

4) Analisa sedimen berdasarkan perbandingan matematis hasil sedimen

Pengukuran sedimen dilakukan pada Sungai Kreo tepatnya di Kalipancur di sebelah hilir dari rencana Waduk Jatibarang. Idealnya pengukuran sedimen dilakukan pada lokasi dimana sungai tersebut masuk ke rencana waduk. Namun karena tidak tersedia pos pemantauan debit di lokasi yang diharapkan, maka dilakukan pengukuran sedimen di hilir rencana waduk yang memiliki pos pemantauan muka air. Lokasi yang telah diukur selanjutnya data yang dihasilkan dibentuk persamaan lengkung sedimen. Persamaan lengkung sedimen



Gambar 9 Lengkung sedimen di Sungai Kreo – Kalipancur.

yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 9, yaitu:

$$Q_s = 1,397 Q_w^{1,4958} \quad \dots (13)$$

Berdasarkan persamaan lengkung sedimen dan data debit, maka dapat dihitung besarnya sedimen melayang yang terjadi di Sungai Kreo untuk titik pemantauan di pos AWLR Kalipancur. Besarnya sedimen melayang yang dihasilkan adalah sekitar 24.850 ton/tahun dan total sedimen dengan memperhitungkan *bed load* sekitar 10% menjadi 27.335 ton/tahun. Dengan luas Sungai Kreo – Kalipancur sekitar 66,95 km² dan dengan berat jenis tanah 1,2 ton/m³, maka rata-rata sedimen yang terjadi di lahan menjadi 4,08 ton/ha/tahun dengan tebal sedimen sekitar 0,340 mm/tahun. Untuk lebih detailnya dapat dilihat pada Tabel 5. Jumlah sedimen di Sungai Kreo-Kalipancur merupakan jumlah sedimen yang akan melewati di rencana Waduk Jatibarang, karena lokasi yang diukur berada di hilir rencana waduk. Namun secara kasar bahwa jumlah sedimen yang masuk ke rencana waduk secara logika lebih kecil ataupun paling tidak sama dengan yang terjadi di Kreo-Kalipancur. Namun untuk menghitung secara pasti dengan melakukan perhitungan secara matematis yang masuk ke rencana waduk, harus dilakukan koreksi. Koreksi ini berkaitan dengan air yang mengalir pada lokasi pengukuran dengan air yang mengalir di rencana waduk. Berdasarkan konsep tersebut, maka jumlah sedimen yang diperoleh yang masuk ke rencana Waduk Jatibarang adalah sekitar 20.051 ton/tahun.

Tabel 5 Hasil perkiraan sedimen di Sungai Kreo-Kalipancur (dalam ton)

Tahun	Lokasi
	Sungai Kreo-Kalipancur
1995	7.271,84
1996	8.960,25
1997	12.560,09
1998	5.616,82
2001	89.842,47
Rata-Rata	24.850,29
Total	27.335,32
Erosi (ton/ha)	4,10
Volume (m ³)	22.779,44
Tebal (mm)	0,340

5) Analisa sedimen berdasarkan model matematis

Persamaan model matematis yang digunakan di sini adalah dengan melakukan pendekatan secara deterministik, di mana dilakukan dengan cara konsep terjadinya erosi melalui limpasan di lahan. Konsep yang digunakan adalah mulai dari proses terjadi erosi yang diakibatkan oleh penghancuran tanah melalui hujan dan memindahkan material tersebut ke lebih rendah melalui limpasan yang terjadi di lahan. Konsep ini utamanya sudah diadopsi oleh model ANSWERS. Namun untuk kajian kali ini, pendekatan yang dilakukan hanya melalui limpasan, data limpasan yang digunakan bukan merupakan hasil dari model namun berdasarkan pada data lapangan yang direkonstruksi kembali untuk mengetahui limpasan yang terjadi pada setiap gridnya.

Berdasarkan hasil keluaran model, maka diperoleh hasil sedimen yang masuk ke rencana

Waduk Jatibarang adalah sekitar 0,4193 kg/menit. Dengan demikian, besarnya sedimen selama satu tahun adalah sekitar 80.440,19 ton/tahun atau setara dengan 1,35 mm/tahun. Nilai ini lebih besar dari perhitungan dari metode yang lainnya.

5 Evaluasi laju sedimen ke dalam rencana Waduk Jatibarang

Dari lima konsep yang telah digunakan dalam memperkirakan besarnya sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang, diperoleh hasil yang sangat bervariasi, seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil laju sedimen dari beberapa metode

No	Metode Pendekatan	Hasil (ton/tahun)
1	Sedimen berdasarkan erosi lahan	23.344
2	Sedimen berdasarkan model statistik data pengukuran sedimen	39.755
3	Sedimen berdasarkan aplikasi persamaan sedimen	25.606 (Stigter) 412.103 (Dency & Bolten)
4	Sedimen berdasarkan perbandingan matematis hasil sedimen	20.051
5	Sedimen berdasarkan model matematis	80.440

Konsep pertama berdasarkan *erosi lahan* memiliki hasil yang hampir sama dengan menggunakan konsep keempat, *perbandingan matematis hasil sedimen*. Hal ini terjadi karena kedua konsep tersebut menggunakan data pengukuran sedimen yang sama sebagai dasar untuk perhitungannya. Namun data pengukuran tersebut belum termasuk untuk muka air yang tinggi, sehingga hasilnya belum menunjukkan kondisi yang sebenarnya. Sementara berdasarkan konsep *model matematis* menghasilkan laju sedimen yang sangat tinggi. Konsep *model matematis* memang cukup detail dalam proses perhitungannya dan terdistribusi berdasarkan ruang, namun tidak dilakukan kalibrasi terhadap persamaan yang digunakan, sehingga hasilnya kurang dapat dipercaya. Hal yang sama terjadi juga pada konsep perhitungan berdasarkan *persamaan aplikasi sedimen* yang dihasilkan dari negara lain, dimana menghasilkan laju sedimen yang tinggi untuk persamaan Dency & Bolten dan sangat rendah untuk persamaan Stigter, hal ini terjadi karena kedua persamaan di atas diperoleh dari kondisi daerah yang berbeda.

Konsep terakhir, yaitu *model statistik data pengukuran sedimen*, dibentuk berdasarkan data pengukuran di lokasi studi. Pengukuran dilakukan di seluruh lokasi anak sungai di DAS Garang mulai dari muka air rendah sampai muka

air yang tinggi. Dengan demikian, kelemahan pada konsep sebelumnya yang hanya memiliki muka air rendah dapat diatasi. Data pengukuran yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk membuat persamaan berdasarkan data aliran dan juga luas DAS, sehingga dengan mudah dapat diprediksi besarnya laju sedimen pada lokasi tertentu tanpa memiliki pos duga air (*ungauged*). Oleh karena itu, prediksi laju sedimen di lokasi studi dapat menggunakan konsep *model statistik data pengukuran sedimen* yang telah dihasilkan.

KESIMPULAN

Dari hasil analisa laju sedimen yang telah dilakukan diperoleh hasil yang sangat bervariasi. Hal ini terjadi karena keterbatasan dari setiap metode yang diterapkan berbeda-beda. Beberapa metode memang dikembangkan pada kondisi yang berbeda dengan kondisi di Indonesia, sehingga diperoleh hasil yang tidak sesuai. Besarnya jumlah sedimen yang masuk ke dalam rencana Waduk Jatibarang diperoleh hasil yang berkisar antara 20.051 sampai 80.440 ton/tahun. Namun, laju sedimen yang dihasilkan berdasarkan konsep *model statistik data pengukuran* sebesar 39.754,9 ton/tahun atau 0,76 mm/tahun lebih dapat dipercaya dibandingkan dengan konsep yang lainnya karena menggunakan data di lokasi studi. Pendekatan metode lain yang berkaitan dengan perolehan data di lokasi studi dengan menggunakan analisa *perbandingan matematis hasil sedimen*, memberikan hasil yang lebih rendah karena data yang digunakan belum mewakili untuk kondisi ekstrim (banjir), sedangkan dengan menggunakan *model matematis* diperoleh hasil yang sangat tinggi, disebabkan parameter yang digunakan tidak dikalibrasi dengan kondisi setempat. Untuk menduga besarnya sedimen yang ada di lokasi lainnya pada DAS Garang dapat digunakan persamaan yang telah dibentuk dari *model statistik data pengukuran*, yaitu :

$$Q_s = \frac{885,76 \left[Q_w (\text{Log}(A))^{1,5} \right]^{2,105}}{A^{1,8}}$$

Hasil kajian ini, dapat menjadi pertimbangan bagi perencana Waduk Jatibarang dalam menduga umur layanan waduk tersebut, sebelum dilakukan pengukuran laju sedimen yang masuk ke dalam waduk secara lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Amiri, Fazel. 2010. Estimate of Erosion and Sedimentation in Semi-arid Basin Using Empirical Models of Erosion Potential

- within a geographic information system. *Air, Soil and Water Research* 3: 37–44.
- Bathurst, J.C. 2002. Technical Documents in Hydrology. No. 60: *Physically-based Erosion and Sediment yield Modeling, the SHETRAN Concept*. Paris: UNESCO.
- Beasley, D.B. and, L.F. Huggins. 1982. *User's Manual: ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)*. Chicago: U.S. Environmental Protection Agency.
- Brown, T., H. Schneider, and D. Harper. 1996. Multi-scale Estimates of Erosion and Sediment yields in the Upper Tana basin, Kenya. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium, July*. IAHS Publ. no. 236.
- Ginting, Segel, dan William Putuhena. 2005. Estimasi Erosi Lahan di Daerah Aliran Danau Tondano menggunakan Geographic Information System (GIS). *Jurnal Sumber Daya Air*. Volume 1 (1).
- Ginting, Segel. 2009. Kajian Erosi dan Sedimentasi di DAS Garang. *Prosiding Kolokium Pusat Litbang Sumber Daya Air*. 22-23 April, Bekasi, Indonesia.
- Guevara-Pérez, Edilberto, and Adriana M. Márquez. 2007. Comparison of Three Models to Predict Annual Sediment Yield in Caroni River Basin, Venezuela. *Journal of Urban and Environmental Engineering* 1(1):10–17.
- Hengl, T., S. Gruber, and D.P. Shrestha. 2003. Lecture Notes and User Guide: *Digital Terrain Analysis in ILWIS*. The Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede.
- Jain, S.K. and U.C. Kothyari. 2000. Estimation of soil Erosion and Sediment Yield using GIS. *Hydrological Sciences – Journal - des Sciences Hydrologiques*.
- Ma, J. 2001. Slide Presentation: Combining the USLE and GIS/Arc View for Soil Erosion Estimation in Fall Creek Watershed in Ithaca, New York.
- Meijerink, A.M.J., H.A.M. de Brower, C.M. Mannaerts, and C.R. Valenzuela. 1994. *Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology*. Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Ouyang, D. and J. Bartholic. 1997. Predicting Sediment Delivery Ratio in Saginaw Bay Watershed. *The 22nd National Association of Environmental Professionals Conference Proceedings*. May 19-23, Orlando. <http://www.iwr.msu.edu/~ouyangda/sdr/sag-sdr.htm> (diakses November 2009).
- Sharma, U.C. and V. Sharma. 2003. Mathematical Model for Predicting Soil Erosion by Flowing Water in Ungauged Watersheds. Erosion Prediction in Ungauged Basins: Integrating Methods and Techniques. *Proceedings of symposium HS01 held during IUGG2003 at Sapporo, July*. IAHS Publ. no. 279, 2003.
- Stigter, C., G.R. Post, D.J. Keyser, and R.I. Strand. 1989. *Sedimentation Control of Reservoirs. Guidelines 90. Buletin 67*. Paris: Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB)-ICOLD.
- Sutanto, J.S. dan Segel Ginting. 2009. Use of Proposed Reservoirs to Reduce Flood in Semarang City. International Seminar on Climate Change Impacts on Water Resources and Coastal Management in Developing Countries, May 11-13, Manado, Indonesia.
- Thomas, W.A. 1977. *Sediment Transport*. Vol.12. Hydrological Engineering Methods for Water Resources Development. Unated State: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center.