

BAB 5 ANALISIS SEDIMENTASI WADUK

5.1 Model Analisis Sedimentasi Waduk

Tujuan utama permodelan, numerik dan fisik, adalah untuk menirukan atau menduplikasi fenomena dengan suatu skala yang tidak dapat atau sulit diamati di lapangan (*prototype*).

Metode numerik mempunyai kelebihan dalam mengevaluasi kondisi ekstrim dengan skala spasial dan temporal yang sama. Model numerik digunakan dalam studi ini untuk mengkaji kondisi aliran dan potensi sedimentasi di waduk Wonogiri.

- Pertama, model dikalibrasi dan divalidasi dengan data pengukuran lapangan.
- Kemudian, model digunakan untuk memprediksi aliran dan sedimentasi dengan kondisi aliran dan suplei sedimen.
- Terakhir, penanganan untuk mengurangi sedimentasi dan pengaruhnya di kawasan waduk dikaji dengan menggunakan model.

5.1.1 Deskripsi Model Numerik

Permukaan waduk Wonogiri $\pm 88 \text{ km}^a$ dengan kedalaman air waduk yang dangkal, yaitu maksimum kurang dari 18 m pada muka air normal (136 m).

Depth-averaged model sesuai untuk evaluasi kondisi aliran dan sedimentasi di waduk Wonogiri karena waduk luas dan dangkal.

Untuk itu, studi ini menggunakan model numerik dua dimensi yang disebut *depth-integrated two-dimensional numerical model*, model angkutan sedimen NKhydro2D yang dikembangkan oleh Nippon Koei Co., Ltd.

Di wilayah waduk Wonogiri, *suspended load* mendominasi dalam angkutan sedimen.

Evaluasi sedimentasi selanjutnya menggunakan *bed load* dan *suspended load*. Laju angkutan bed load dievaluasi dengan rumus *Ashida-Michiue's*¹ dengan mempertimbangkan arah aliran dan kemiringan dasar. Konsentrasi sedimen suspended diperoleh dengan persamaan *depth-integrated two-dimensional convection-diffusion*. Material *non-uniform* dikaji pula karena analisis terhadap sample material dasar dan *sediment suspended* menunjukkan bahwa sediment di waduk adalah tidak seragam dengan rentang diameter dari μm hingga cm.

Untuk deskripsi model lebih detil, dapat melihat Laporan Pendukung Lampiran No. 4

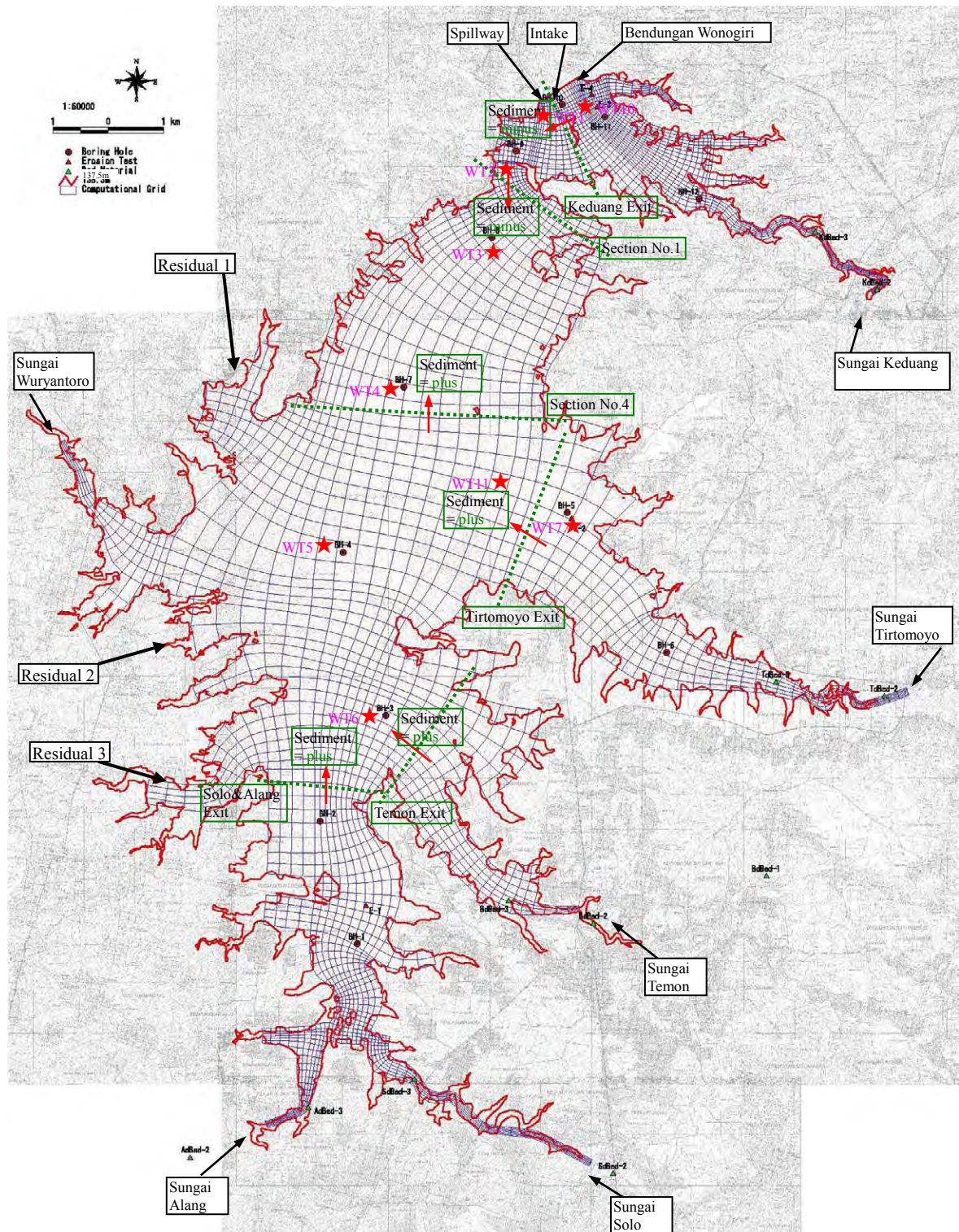
5.1.2 Perhitungan Wilayah (*Domain*) dan Grid

Karena bentuk waduk yang kompleks dengan 6 anak sungai besar, model dibuat berdasarkan sistim koordinat kurva linier orthogonal yang menghasilkan batasan numerik (*boundary-fitted numerically generated orthogonal curvilinear coordinate system*).

Area yang dimodelkan mencakup waduk dan 6 anak sungai dengan grids seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.1.1. Batas akhir anak sungai sebelah hulu adalah tempat efek *backwater* dari waduk Wonogiri dapat diabaikan.

Total grids adalah 3,700 dan ukuran grid sekitar 3 m – 330 m untuk simulasi yang akurat.

Grids tersebut dibuat lebih halus di area anak sungai dan yang dekat dengan bendungan Wonogiri, grids yang lebih besar dibuat di tengah waduk.



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.1.1 Waduk Wonogiri dan Kontur 137,5 m, Lokasi Lubang Boring (BH), Pengambilan Sampel Material Dasar (BD) dan Survei Kualitas Air (WT), dan Perhitungan Mesh

5.2 Kalibrasi Perhitungan Model Analisis Sedimentasi Waduk

Model yang disebutkan di atas digunakan untuk menganalisis sedimentasi di waduk Wonogiri. Pertama, model dikalibrasi dengan data pengukuran lapangan selama musim hujan tahun 2004-2005. Kemudian, model diverifikasi dengan data pengukuran tahun 1993-2004. Proses kalibrasi secara detil pada Annex No.4. Masalah utama hasil kalibrasi ditunjukkan sebagai berikut:

5.2.1 Kondisi Awal dan Batasan

Input simulasi selama musim hujan tahun 2004-2005 disajikan dalam Tabel 5.2.1.

Tabel 5.2.1 Data Input Simulasi selama Musim Hujan tahun 2004-2005

Item	Data	Catatan
Metodologi	Model Angkutan Sedimen <i>Depth-integrated 2-D - NKhydro2D model</i>	Berdasarkan <i>boundary-fitted</i> grid kurvilinear orthogonal
Peta topografi	Peta topografi skala 1:25,000	Terbitan tahun 1999
Data Bathymetri	Data penampang melintang diukur Oktober 2004	
Debit <i>Inflow</i>	Debit <i>temporal</i> (jam-jaman).	Puncak debit <i>total inflow</i> sekitar 1,330m ³ /det pada 3 Desember, 2004
Pelepasan Air (<i>Water Release</i>)	Rekaman data pada <i>spillway</i> dan <i>intake</i>	Hampir tidak ada pelepasan air melalui <i>spillway</i> dalam kurun waktu ini.
Tinggi Muka Air	Tinggi muka air awal adalah tinggi muka air waduk saat dimulainya simulasi	Mulai jam 0:00, 21 Nov, 2004 Kecepatan awal di set ke nol
Bahan di Dasar (<i>Bed Material</i>)	Data distribusi ukuran partikel di berbagai lokasi pengambilan sampel pada Oktober 2004. Sebagai material <i>non-uniform</i> (terdiri dari 9 kelas dalam simulasi)	Ukuran di tempat yang lebih dalam cukup halus.
Moda Angkutan Sedimen	kedua-duanya <i>bed load</i> dan <i>suspended load</i>	Sedimen <i>non-uniform</i> (terdiri dari 9 kelas dalam simulasi)
<i>Sediment Supply</i>	Laju angkutan sedimen <i>bed load</i> dihitung dengan formula Ashida dan Michiue. Konsentrasi <i>suspended sediment</i> merupakan fungsi debit sungai.	Dikaji distribusi ukuran partikel.
Pelepasan Sedimen (<i>Sediment Release</i>)	Dikaji pelepasan sedimen disertai pelepasan air melalui <i>spillway</i> dan <i>intake</i> .	Konsentrasi bawah <i>suspended sediment</i> sebagai konsentrasi yang dilepas dari <i>intake</i> .
Informasi Lainnya	Curah Hujan, Evaporasi, dll.-nya.	

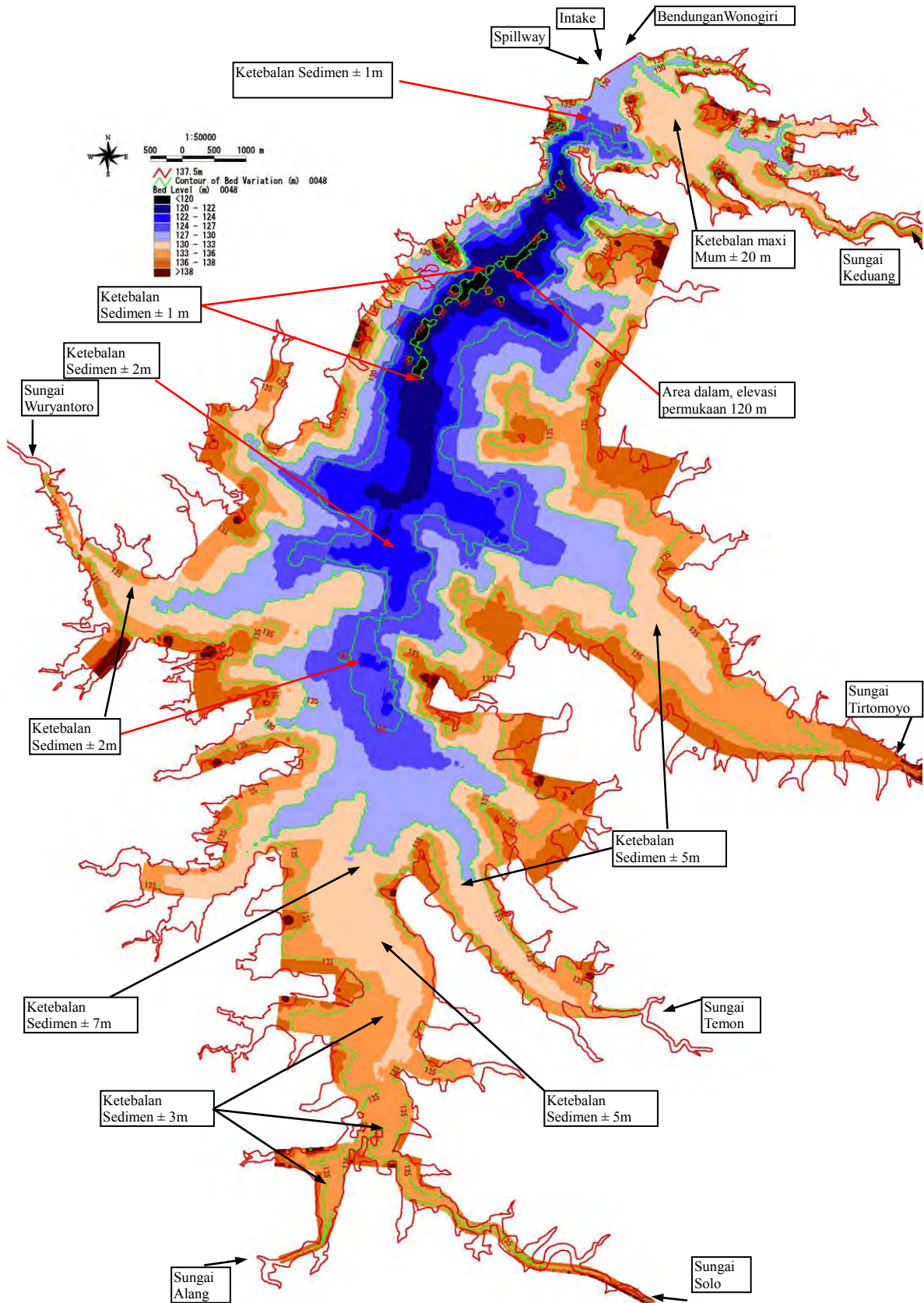
Sumber: Tim Studi JICA

(1) Permukaan Dasar Awal

Gambar 5.2.1 menunjukkan kontur permukaan dasar di waduk Wonogiri yang diukur pada bulan Oktober 2004. Ini ditetapkan sebagai awal permukaan dasar untuk simulasi selama musim hujan tahun 2004-2005.

Gambar 5.2.1 menunjukkan sedimentasi di waduk Wonogiri yang sangat parah.

Ketebalan maximum sedimentasi di wilayah S. Keduang telah mencapai sekitar 20 m dan di dekat intake lebih dari 10 m, sementara di tengah waduk sekitar 1 m. Di area S. Tirtomoyo dan Temon, ketebalan sedimentasi \pm 5 m. Di bagian hulu waduk, area Bengawan Solo dan S. Alang, ketebalan sedimentasi sekitar 3-7 m.

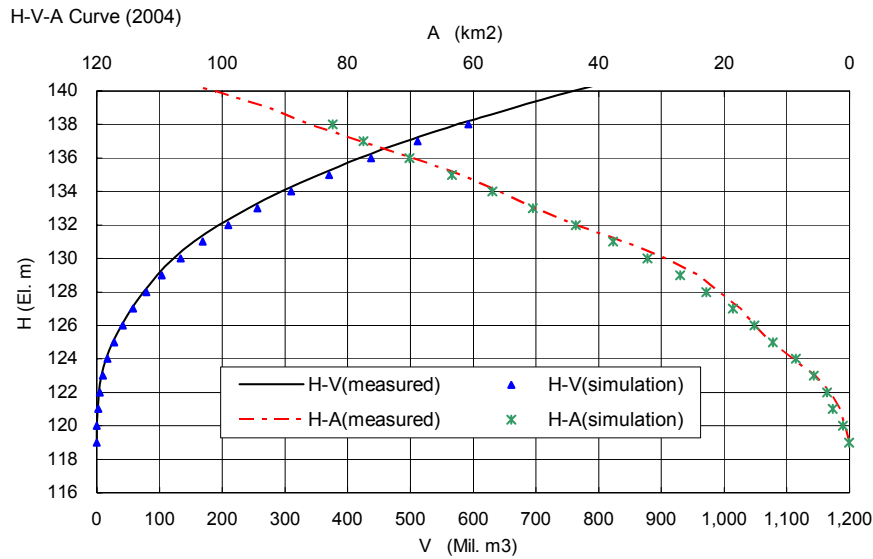


Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.1 Kontur Permukaan Dasar Waduk (pengukuran Oktober 2004, Satuan Kontur: m)

Gambar 5.2.1 menunjukkan pengukuran kurva H-A (muka air ~ area permukaan) dan H-V (muka air ~ kapasitas volume) di bulan Oktober 2004. Perbandingan antara perhitungan

dan simulasi kurva H-A dan H-V dengan permukaan dasar awal ditunjukkan dalam Gambar 5.2.2. Penetapan dasar awal di dalam simulasi sesuai dengan pengukuran.

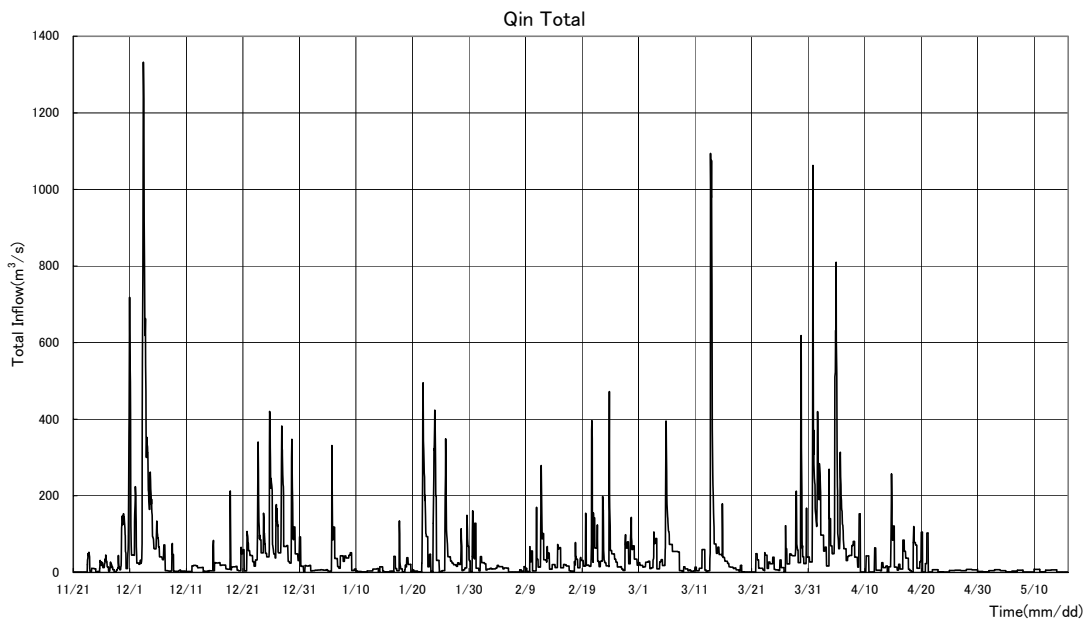


Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.2 Kurva H-A dan H-V berdasar Pengukuran dan Simulasi di Waduk (Oktober 2004)

(2) Aliran Masuk dan Aliran Keluar Waduk

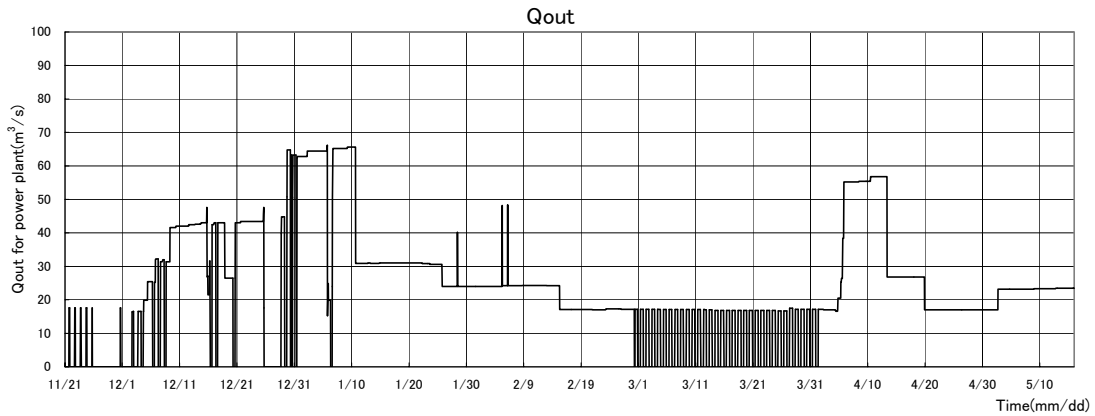
Hidrograf di anak-anak sungai ditetapkan sebagai kondisi inflow air. Gambar 5.2.3 menunjukkan hidrograf total inflow. Selama musim hujan tahun 2004-2005, banjir maximum terjadi pada 3 Desember 2004 dan debit puncak total inflow sekitar 1.330 m³/d.



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.3 Hidrograf Total Inflow selama November 2004 – Mei 2005

Pelepasan air melalui intake ditunjukkan dalam Gambar 5.2.4. Selama musim hujan tahun 2004-2005, hampir tidak ada air yang keluar lewat spillway karena inflow kurang dari rata-rata tahunan.



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.4 Pelepasan Air Lewat *Intake* selama November 2004-Mei 2005

(3) Aliran Masuk dan Aliran Keluar Sedimen

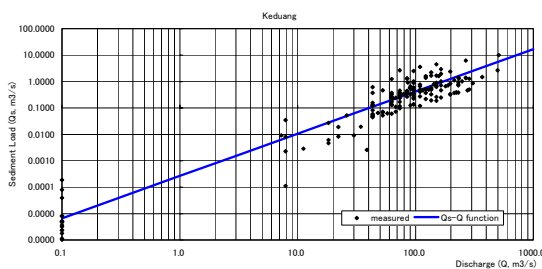
Sedimen dikeluarkan dari waduk Wonogiri oleh spillway dan intake PLTA. Dalam simulasi, volumenya diestimasi dengan outflow debit air dan perhitungan konsentrasi SS di dekat fasilitas. Perlu ditekankan bahwa perhitungan dasar konsentrasi digunakan untuk konsentrasi pelepasan dari intake. Pelepasan air melalui spillway hampir tidak ada selama musim hujan tahun 2004-2005, maka tidak ada sediment yang keluar dari spillway dalam musim ini.

Secara umum, konsentrasi sediment suspended load dalam inflow merupakan fungsi dari debit air. Maka, laju angkutan sediment suspended dalam inflow di tiap sungai didapat dengan persamaan berikut,

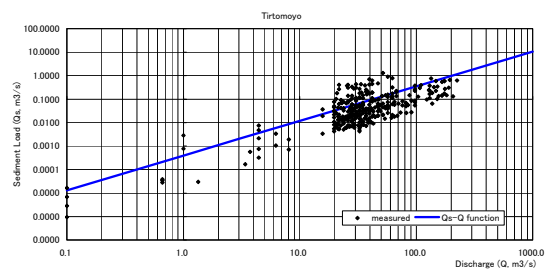
$$Q_s = a \cdot Q^b$$

dimana Q_s = laju angkutan sediment suspended (m^3/s , volume endapan), Q = debit (m^3/d) di sungai, a dan b adalah parameter. Distribusi butiran partikel suspended sedimen (SS) di dalam inflow dipertimbangkan dalam simulasi.

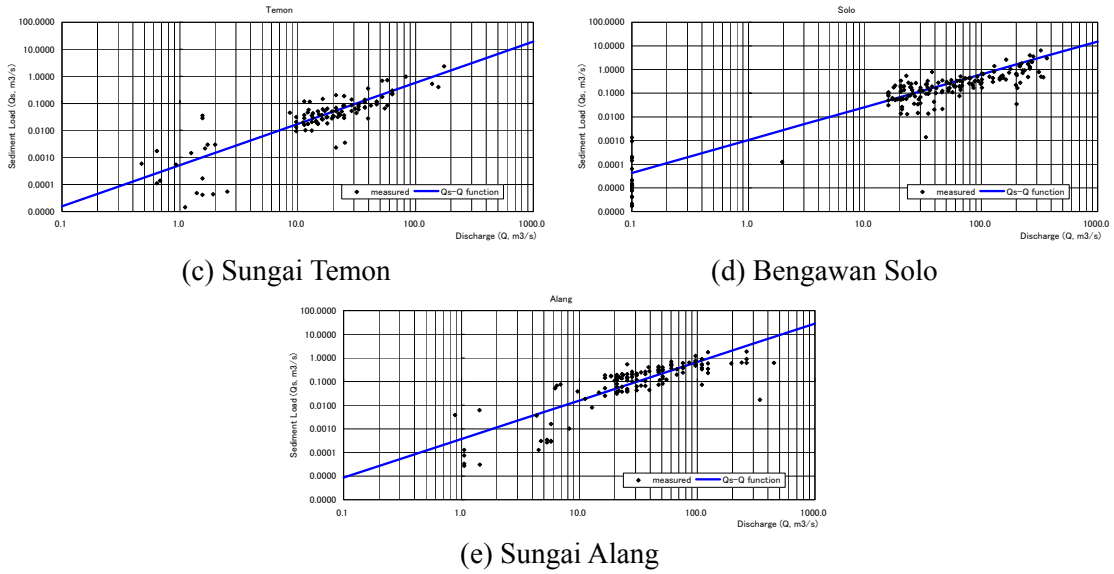
Berdasarkan pengukuran volume sedimentasi selama 2004-2005 dan analisis SS pada sample dalam musim hujan 2004-2005, parameter a dan b dapat ditetapkan sbb:



(a) Sungai Keduang



(b) Sungai Tirtomoyo



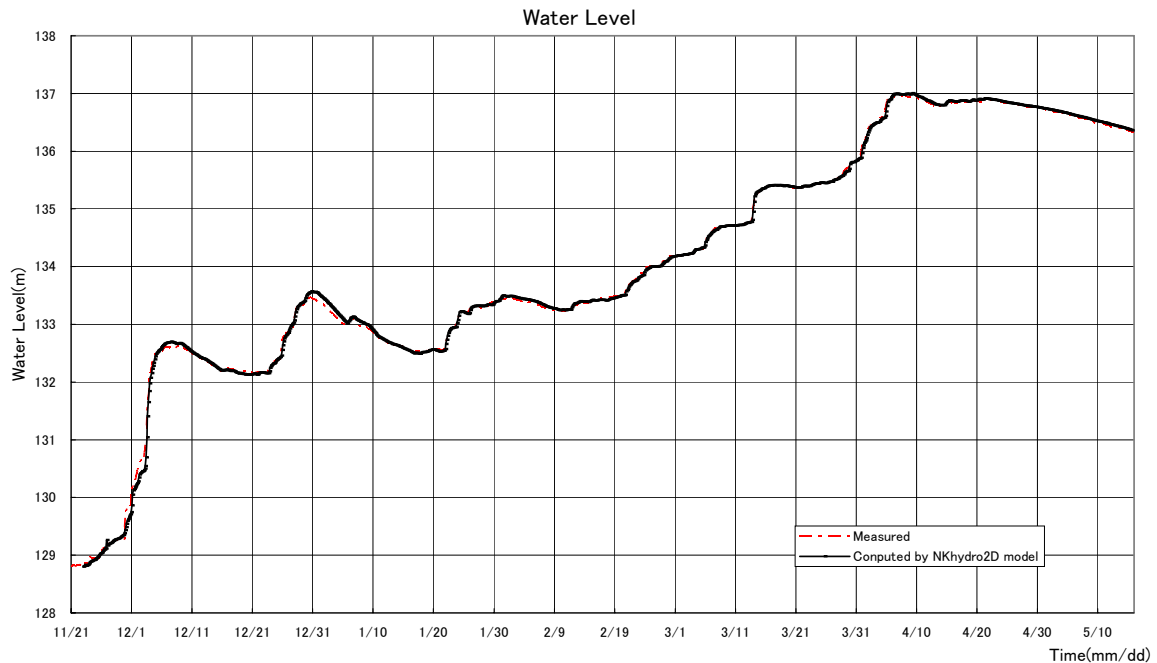
Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.5 Laju Angkutan Sedimen Q_s ~ Debit Air Sungai (2004.11~2005.5)

5.2.2 Hasil Perhitungan

(1) Muka Air

Pengukuran muka air (garis netral merah) di waduk dan hasil perhitungan muka air (garis hitam) dengan model NKhydro2D dibandingkan dalam Gambar 5.2.6. Gambar tersebut menunjukkan adanya kesesuaian antara pengukuran dan perhitungan dengan perbedaan maksimum sekitar 0.1 m. Perbedaan ini kurang dari 0.05 m menjelang akhir musim hujan.



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.6 Pengukuran dan Perhitungan Muka Air di Waduk (2004-2005)

(2) Kecepatan

Vektor kecepatan dan kontur pada puncak beberapa banjir besar ditunjukkan dalam Gambar 5.2.7 – 5.2.10. Puncak debit banjir besar dari inflow sungai ditulis dalam Tabel 5.2.2.

Tabel 5.2.2 Puncak Debit (m³/det) Banjir Besar selama Musim hujan tahun 2004-2005

Waktu Puncak Banjir	Sungai Keduang	Sungai Tirtomoyo	Sungai Temon	Sungai Solo	Sungai Alang	Residual	Total	Tinggi Muka Air
2004/12/03 /10:00	303.6	178.0	78.6	376.4	247.1	148.6	1332.2	131.0m
2005/03/13 /21:00	167.0	207.4	25.1	315.5	154.4	109.1	978.6	135.0m
2005/03/31 /20:00	113.3	219.0	59.7	303.4	248.9	118.5	1062.8	136.0m

Sumber: Tim Studi JICA

Kecepatan aliran, di alur sungai, tinggi selama banjir, sementara di tengah waduk sangat lambat yaitu sekitar 1 cm/dt atau lebih kecil. Kecepatan di tengah menjadi lebih lambat dengan kenaikan muka air. *Counter aliran* yang menuju ke tengah area bendungan terjadi akibat banjir di S. Keduang, khususnya ketika muka air waduk rendah. Hal ini mempengaruhi angkutan sediment dan proses pengendapan di area ini.

Arah aliran air berlumpur (*muddy current*) dekat bendungan ditunjukkan dalam foto berikut.

Dengan membandingkan arah kecepatan dalam Gambar 5.2.9 dan 5.2.10 dengan arah *muddy current* (foto) dapat dilihat bahwa pola aliran hasil simulasi konsisten dengan pengamatan lapangan.

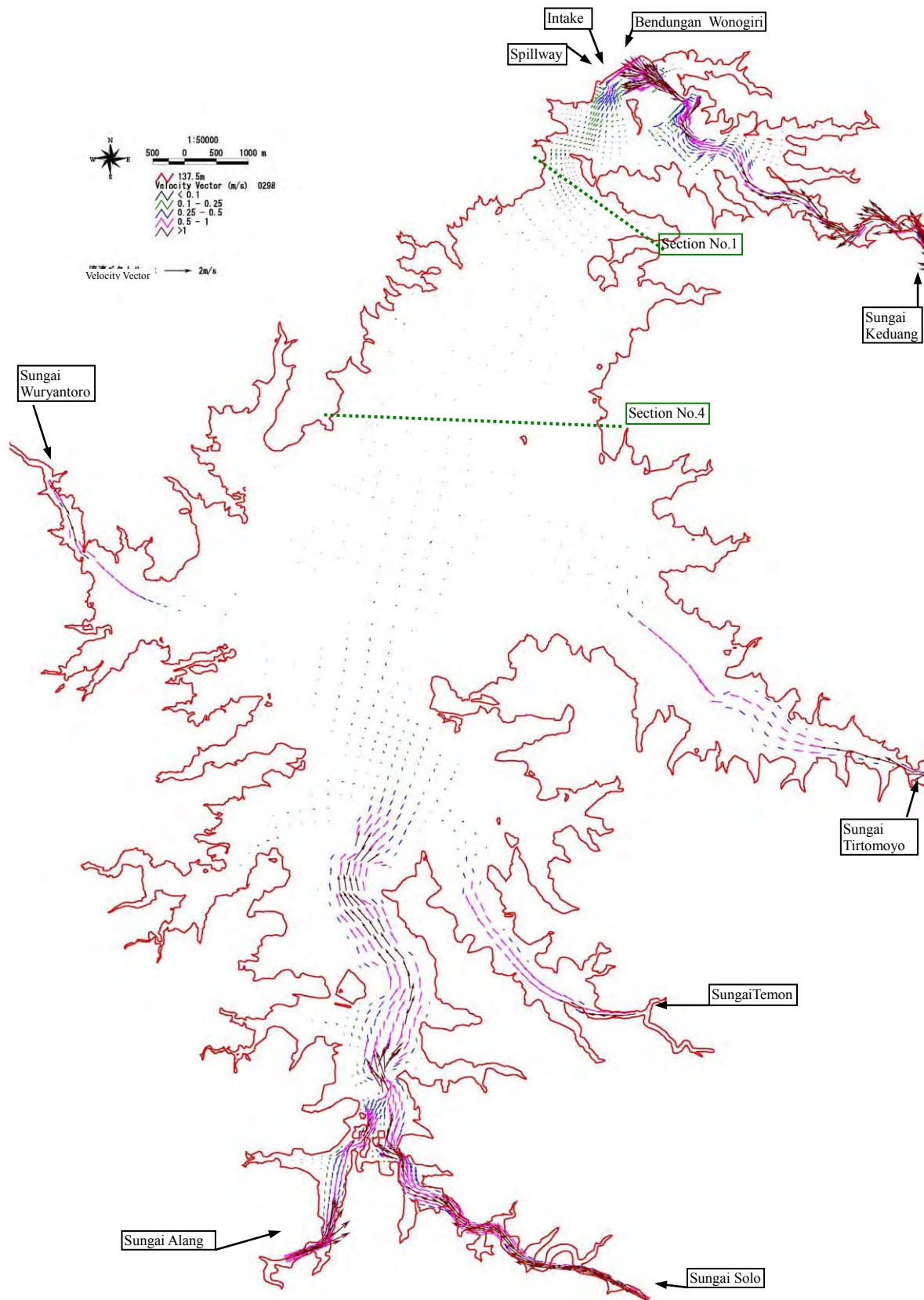


Foto: Arah Aliran Air Berlumpur dalam Waduk

(3) Konsentrasi SS

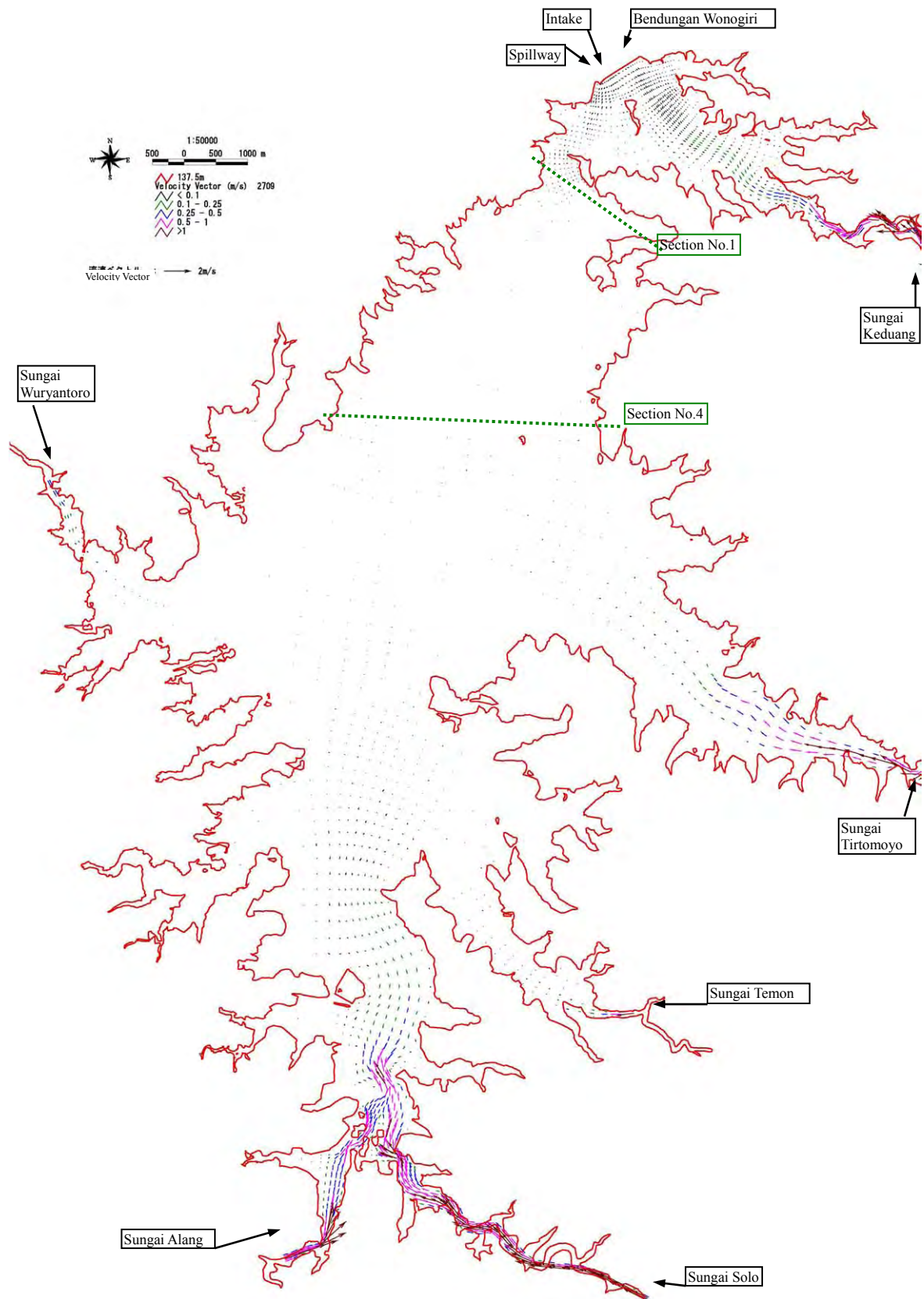
Konsentrasi sedimen tersuspensi (SS) saat debit puncak pada tanggal 3 Desember 2004 dan setelah 2 hari banjir di waduk dapat dilihat dalam Gambar 5.2.11 dan 5.2.12 yang menunjukkan bahwa konsentrasi di alur sungai selama banjir lebih besar dan muddy current dari S. Keduang kembali terangkut ke tengah waduk. Hal ini konsisten dengan arah arus aliran utama (foto diatas). Setelah banjir, konsentrasi SS ditengah meningkat sementara yang di alur sungai menurun.

Pengukuran dan perhitungan konsentrasi SS di intake selama periode 23 November 2004 – Mei 2005 ditunjukkan dalam Gambar 5.2.13. Meskipun terdapat deviasi dalam waktu, perhitungan konsentrasi SS hampir sama dengan pengamatan.



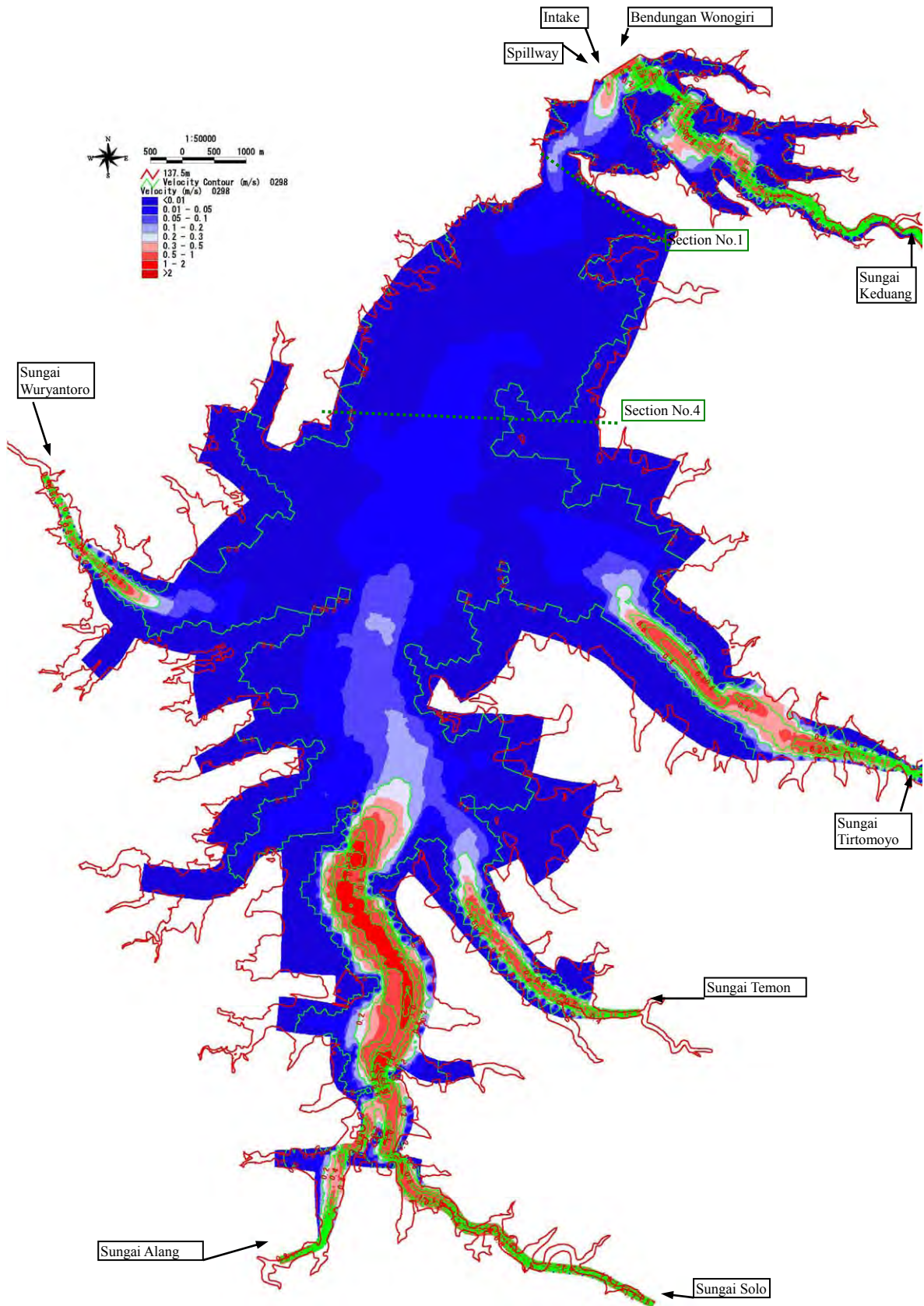
Sumber: Tim Studi JICA

**Gambar 5.2.7 Perhitungan Vektor Kecepatan di Waduk saat Puncak Banjir 3 December 2004
(Muka air = 131m)**



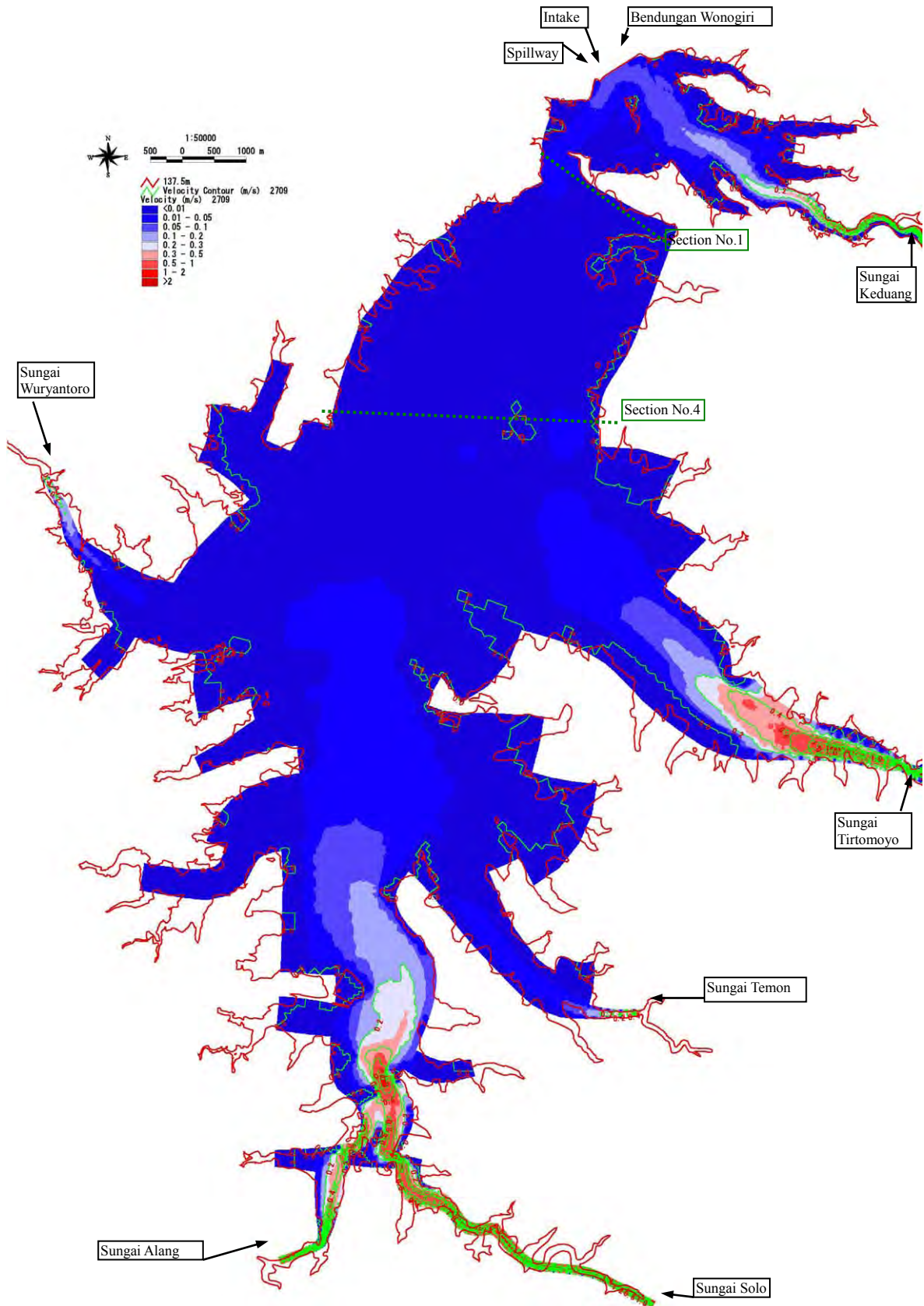
Sumber: Tim Studi JICA

**Gambar 5.2.8 Perhitungan Vektor Kecepatan di Waduk saat Puncak Banjir
13 Maret 2005 (Muka air = 135m)**



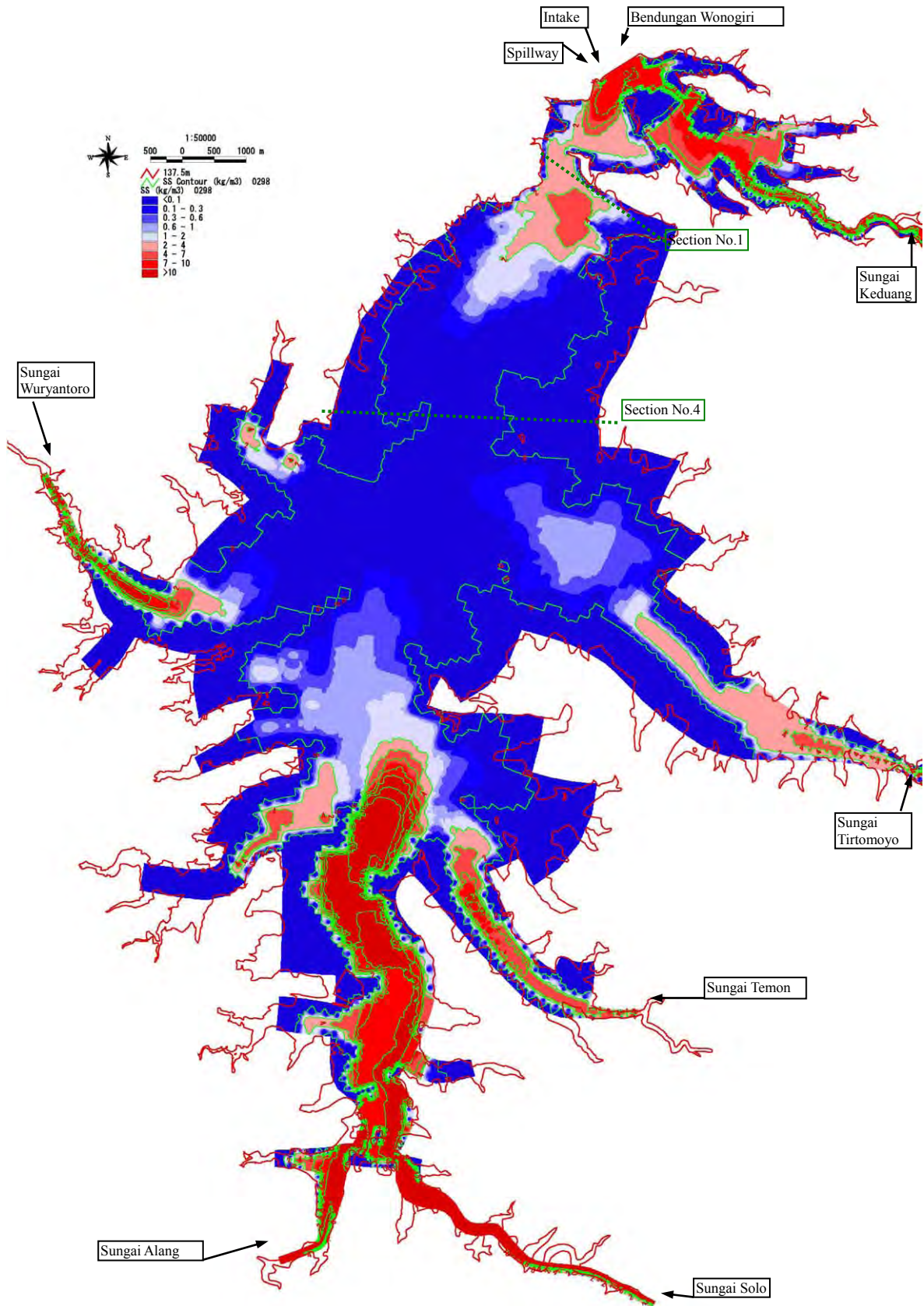
Sumber: Tim Studi JICA

**Gambar 5.2.9 Perhitungan Garis Kontur Kecepatan di Waduk saat Puncak Banjir
3 Desember 2004 (Muka air = 131m, Satuan kontur: m/det)**



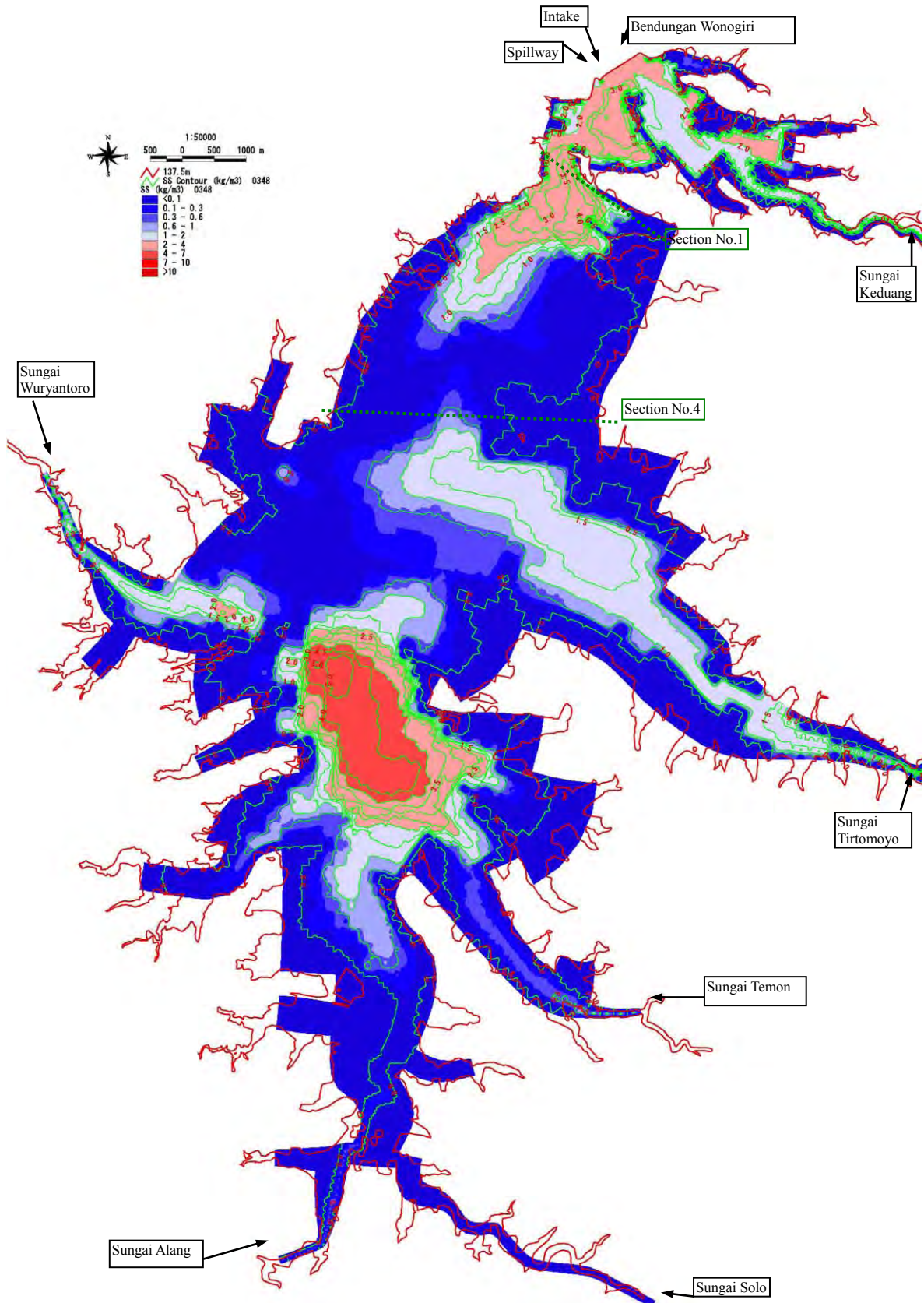
Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.10 Perhitungan Garis Kontur Kecepatan di Waduk saat Puncak Banjir 13 Maret 2005 (Muka air = 135m, Satuan kontur: m/det)



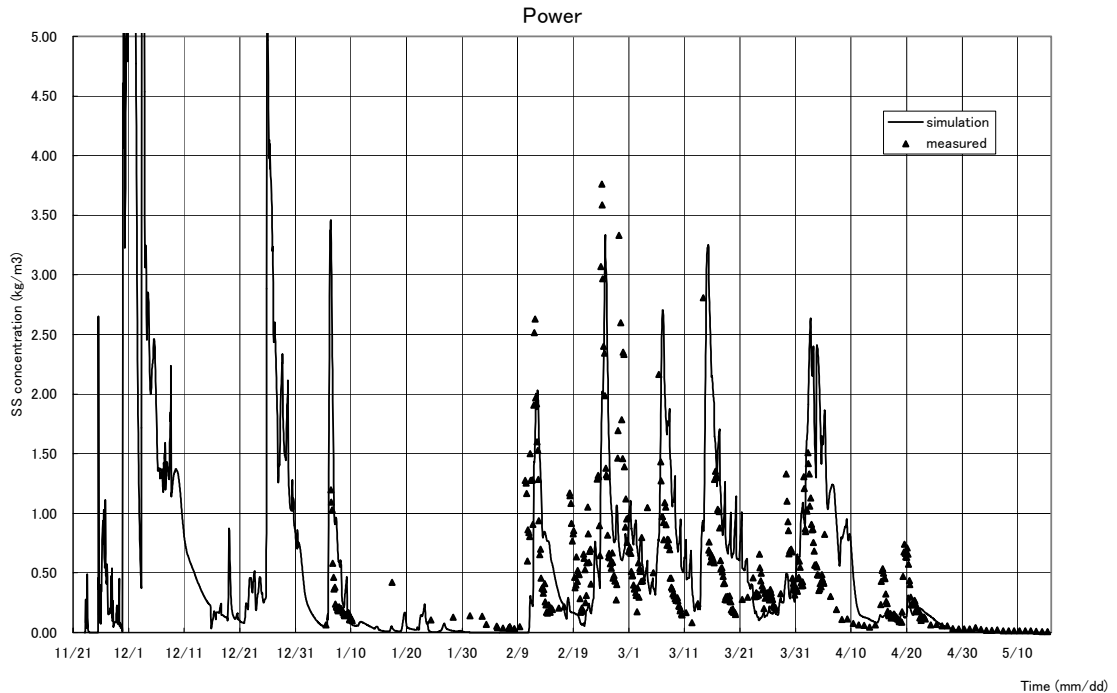
Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.11 Perhitungan Konsentrasi Sedimen *Suspended* di Waduk saat Puncak Banjir 3 December 2004 (Muka air =131 m, Satuan kontur: kg/m³)



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.12 Perhitungan Konsentrasi Sedimen *Suspended* di Waduk pada 5 Desember 2004 (setelah 2 hari banjir pada 3 Desember 2004, Muka air =132.5m, Satuan kontur: kg/m³)



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.13 Hasil Pengukuran dan Perhitungan Konsentrasi SS pada Intake selama Nov.23, 2004 – Mei 15, 2005

(4) Sedimentasi dan Rasio Tangkapan Waduk

Variasi perhitungan material dasar pada waduk selama bulan November 2004-Mei 2005 ditunjukkan pada Gambar 5.2.14. Selama musim hujan dari 2004-2005, sedimentasi di sungai (fore-set bed) sekitar 0.1 ~ 0.3 m, sementara ditengah waduk lebih kecil dari 0.02 m. Dari hasil, ini dapat dimengerti bahwa sedimentasi banyak terjadi pada sungai (top-set and fore-set bed) dan sedimentasi mengalami kemajuan secara berkala ketengah waduk (bottom-set bed) dari area sungai.

Perhitungan sedimen yang lolos lewat intake pembangkit listrik adalah 141.000 m³, hampir kesemuanya lempung (ukuran butiran < 0.005 mm), terendapkan pada saat air waduk rendah. Sedimen yang lolos antara 5 Januari – 15 Mei sebesar 86.000 m³ dimana hampir mendekati hasil pengamatan (71.300 m³).

Inflow dan outflow sedimen dari waduk menunjukkan bahwa inflow sedimen paling banyak berupa material halus yang disebut lempung dengan ukuran butiran < 0.005 mm. Hanya sekitar 10% saja berupa sedimen kasar dengan ukuran butiran > 0.075 mm. Perbandingan antara sedimen yang tertangkap dengan waduk 94% dimana 91% berupa lempung lengkap dengan lanau dan material yang lebih kasar hampir semuanya tertangkap.

Untuk itu, analisis diatas menunjukkan bahwa hanya sedikit sedimen, disuplai dari daerah "hulu" waduk, diterima diarea waduk. Hal ini lebih baik untuk menghitung rasio tangkapan sedimen yang dikirim hanya dari K. Keduang.

Dengan basis sedimen dari K. Keduang rasio tangkapan lempung menjadi 74~76%, meskipun hampir semua lanau dan material kasar tertangkap (Gambar 5.2.3).

Didapat dengan jumlah besar sedimen dari K. Keduang lolos ke hilir melalui intake. Ini penting untuk evaluasi pengukuran akibat sedimentasi.

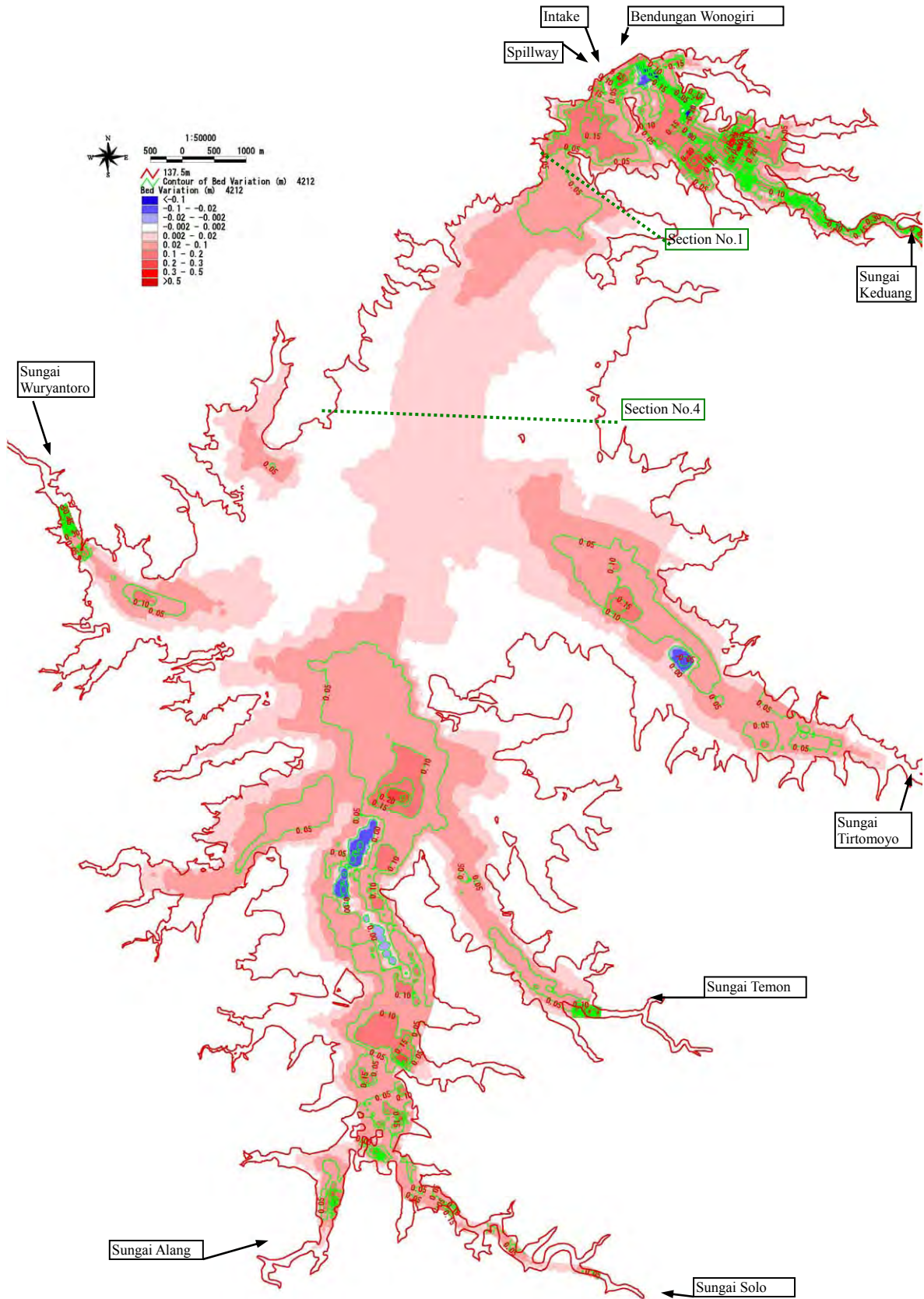
Tabel 5.2.3 Perhitungan Keseimbangan Angkutan Sedimen dan Rasio Penangkapan selama musim hujan 2004-2005 (berdasarkan aliran sedimen dari Sungai Keduang)

Location	Sediment Transport Volume (m ³)	Sediment Transport Volume with Different Size (m ³)								
		d= 0.0013mm	0.0013-0.005mm	0.005-0.016mm	0.016-0.031mm	0.031-0.075mm	0.075-0.25mm	0.25-0.85mm	0.85-2.0mm	2.0-19.0mm
Keduang River	811,000	527,100	50,500	72,800	56,800	46,800	42,400	13,700	1,000	0
PowerPlant (release)	-141,000	-125,600	-13,300	-2,000	-100	0	0	0	0	0
Trap Ratio	0.83	0.76	0.74	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

5.2.3 Kesimpulan Simulasi Untuk Kalibrasi

Analisis diatas menunjukkan perkiraan inflow sedimen dan alokasinya ke sungai selama musim hujan dari 2004-2005 masuk akal, dan model Nkhydro2D dapat digunakan untuk mensimulasi sedimentasi di waduk Wonogiri. Kesimpulannya berikut ini :

- Aliran masuk sedimen adalah 2.452.000 m³ (deposit base), dimana selama musim hujan sedimentasi sebesar 2.317.000 m³. Laju angkutan sedimen sungai dapat diperkirakan seba gai fungsi dari debit.
- Kecepatan aliran sungai sangat cepat selama banjir, sementara ditengah waduk sangat lambat.
- Terjadi aliran balik ke arah tengah yang diakibatkan banjir K. Keduang. Ciri-ciri ini kon sisten dengan pengamatan jalur aliran air berlumpur (*muddy current*) dekat bendungan.
- Konsentrasi SS pada sungai selama banjir lebih tinggi dan aliran lumpur terangkut dari K. Keduang kearah tengah waduk.
- Banyak sedimentasi terjadi pada muara sungai dan sedimentasi tersebut bergerak lang sung kearah tengah waduk. Selama musim hujan 2004-2005, sedimentasi pada sungai sekitar 0.1-0.3m, sementara ditengah waduk kurang dari 0.02 m.
- Disana hanya terdapat sedikit sedimen, volume endapan sekitar 1.400 m³, akan terangkut dari Keduang (dalam area waduk) ke tengah. Ini berarti disana hampir tidak ada perubahan antara area Keduang dan area hulu dalam semusim.
- Perhitungan sedimen yang lolos selama musim hujan 2004-2005 melalui intake sekitar 141.000 m³, hampir hanya lempung (ukuran butiran < 0.005mm). Material lolos yang terukur sekitar 135.000 m³.
- Dengan berdasarkan pada sedimen dari K. Keduang, rasio penangkapan lempung oleh waduk 74-76%, walaupun lanau dan material kasar hampir semua tertangkap.



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.2.14 Perhitungan Variasi Elevasi Dasar Waduk pada akhir Musim Hujan 2004 - 2005
(Satuan kontur: m)

5.3 Verifikasi Sedimentasi Waduk selama 1993-2004

Penggunaan parameter konsentrasi sedimen tersuspensi (lihat Gambar 5.2.5) untuk aliran masuk sedimen tahun 2004-2005 ke tahun 1993-2004, sedimentasi pada waduk selang tahun 1993-2004 (11 tahun) juga disimulasi dengan model NKhydro2D. Untuk memperpendek waktu perhitungan, simulasi diutamakan dilakukan pada musim hujan dari periode tersebut. Inflow sediment sebesar 150.000 m³ (total 35.200.000 m³, 0.5%) hilang karena simulasi mengabaikan musim kemarau.

5.3.1 Kondisi Awal dan Batasan

Input kondisi untuk simulasi selama 1993-2004 disajikan dalam Tabel 5.3.1.

Tabel 5.3.1 Input Data Simulasi selama 1993-2004

Item	Data	Catatan
Metodologi	Model angkutan sedimen <i>depth-integrated</i> 2D - NKhydro2D	Berdasarkan <i>boundary-fitted grid orthogonal curvilinear</i>
Peta Topografi	Peta Topografi Bakosurtanal 1:25,000	Buatan 1999
Data Bathymetri	Data penampang diukur tahun 1993	Selang penampang sangat jauh
Debit Aliran Mauk	Digunakan debit temporal (jam-jaman)	Tahun 1996 = tahun kering Tahun 1998 = tahun banjir
Pelepasan Air	Rekaman data di <i>spillway</i> dan <i>intake</i>	
Tinggi Muka Air	TMA awal ditentukan berdasarkan ukuran TMA waduk saat simulasi dimulai.	Kecepatan awal di set nol.
<i>Bed Material</i>	Data distribusi ukuran partikel pada beberapa lokasi contoh diambil Oktober 2004. Sebagai material <i>non-uniform</i> (terdiri 9 klas dalam simulasi)	Tidak ada data dianalisis pada tahun 1993.
Model Angkutan Sedimen	<i>Bed load</i> dan <i>suspended load</i>	Sedimen non-uniform (terdiri 9 klas dalam simulasi)
Suplai Sedimen	Laju angkutan sedimen <i>bed load</i> dihitung menggunakan rumus Ashida & Michiue. Konsentrasi <i>suspended sediment</i> ditentukan sebagai fungsi debit sungai.	Diperhatikan distribusi ukuran partikel.
Pelepasan Sedimen	Pelepasan sedimen bersama-sama dengan pelepasan air melalui <i>spillway</i> dan <i>intake</i> .	Konsentrasi bawah <i>suspended sediment</i> digunakan sebagai konsentrasi yang dilepas melalui <i>intake</i> .
Informasi Lainnya	Curah hujan, Evaporasi, dll-nya.	

Sumber: Tim Studi JICA

(1) Permukaan Dasar dan Material Dasar Awal

Kontur permukaan dasar hasil pengukuran tahun 1993 digunakan sebagai permukaan dasar awal untuk simulasi tahun 1993-2004. Distribusi butiran dari sample bulan Oktober 2004 digunakan sebagai distribusi awal material dasar tahun 1993 karena tidak ada analisis ditahun 1993. Sedimen yang tidak seragam, terdiri dari 9 kelas digunakan dalam simulasi. Permukaan dasar pada tahun 1993 lebih dalam karena sedimentasi saat itu sedikit.

(2) Aliran Masuk dan Aliran Keluar Air

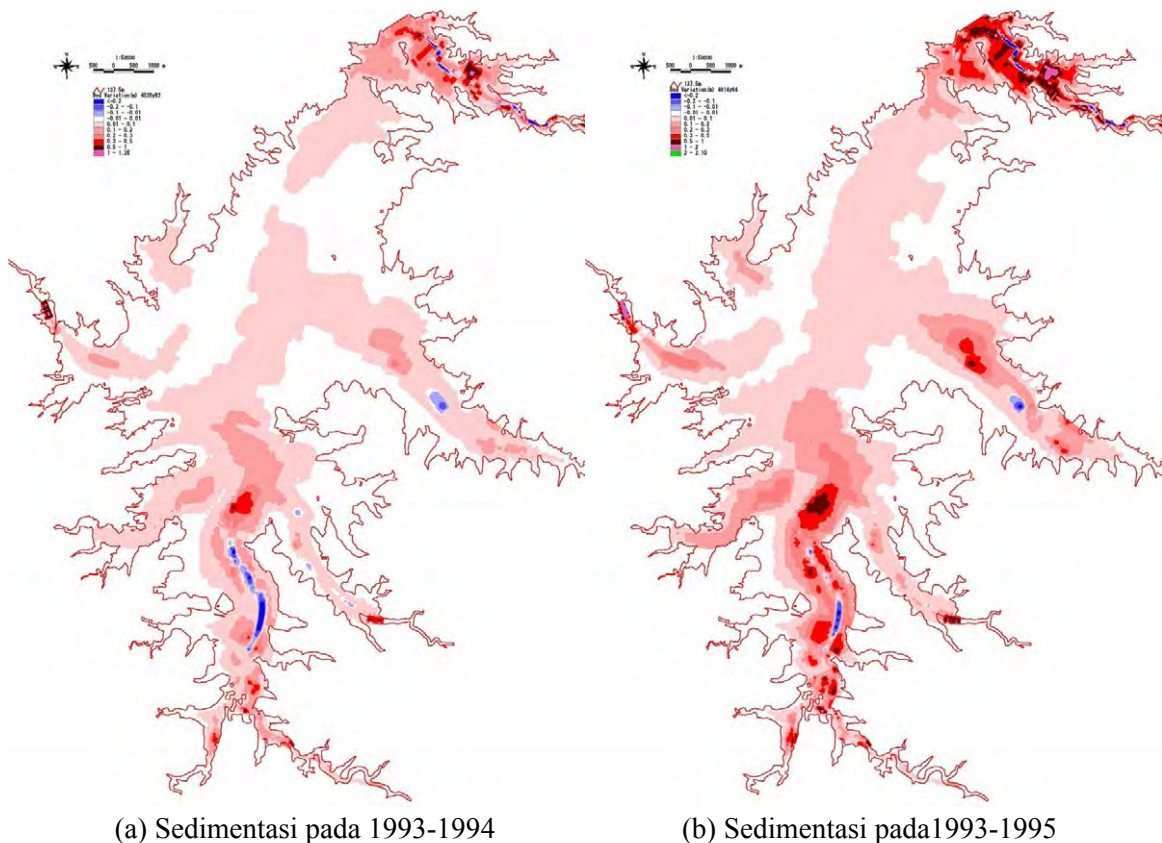
Hidrograf selang waktu tahun 1993-2004 di sungai Keduang, Tirtomoyo, Temon, Bengawan Solo, Alang dan Wuryantoro yang diestimasi dengan model hidrologi berdasarkan curah hujan, evaporasi, tinggi muka air di waduk, pelepasan air dari intake dan *spillway*. Kesalahan pengamatan dan kurangnya informasi, ini menyebabkan rendahnya keyakinan terhadap keakuratan hidrograf. Untuk mempercepat waktu perhitungan, simulasi diutamakan dilakukan pada periode musim hujan.

Selama tahun 1993-2004, inflow maksimum, sekitar 1.5 milyar m³, terjadi pada 1998 dan inflow minimum, sekitar 0.8 milyar m³, terjadi pada tahun 1996. Perbedaan inflow air dalam satu tahun sangat besar. Outflow air adalah air yang keluar dari intake dan spillway, dan keduanya spesifik menurut pengamatan waduk.

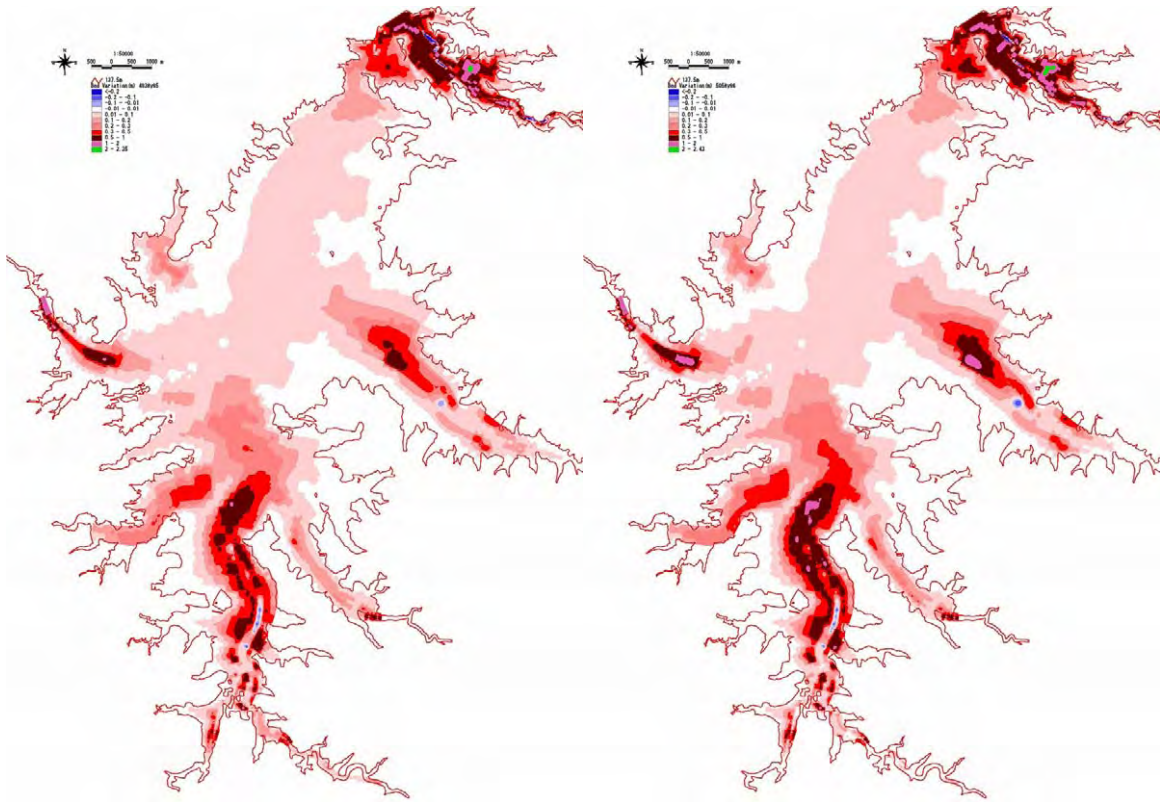
5.3.2 Hasil Perhitungan

Akumulasi penurunan permukaan (sedimentasi) dasar pada tahun 1993 ditunjukkan pada Gambar 5.3.1, Gambar 5.3.2 dan 5.3.3 menunjukkan berturut-turut profil memanjang bagian terdalam di Sungai Bengawan Solo (Solo-Bendungan) dan di Sungai Keduang (Keduang-Bendungan).

Sebagai hasil perhitungan dalam pengujian, simulasi dari tahun 1993 hingga 1994 juga menunjukkan bahwa di Sungai Bengawan Solo, sedimentasi mengalami kemajuan secara berangsur-angsur ke tengah Waduk dari wilayah sungai. Bagian terdepan endapan sedimen telah menjangkau ke area Sungai Temon dan kedalaman sedimentasi sekitar 2 meter di bagian depan selama periode tersebut. Di tengah waduk, ketebalan sedimentasi sekitar 0,1 – 0.3 meter. Di area Keduang, sedimentasi lebih hebat dan ketebalan maksimum sedimentasi sekitar 4 meter. Kenaikan tingkat dasar terdalam sekitar 2 meter dalam 11 tahun. Bagian terdepan endapan bergerak menuju ke tengah waduk dari sungai Keduang dan sedimentasi di area waduk (dekat intake) sekitar 2 meter.

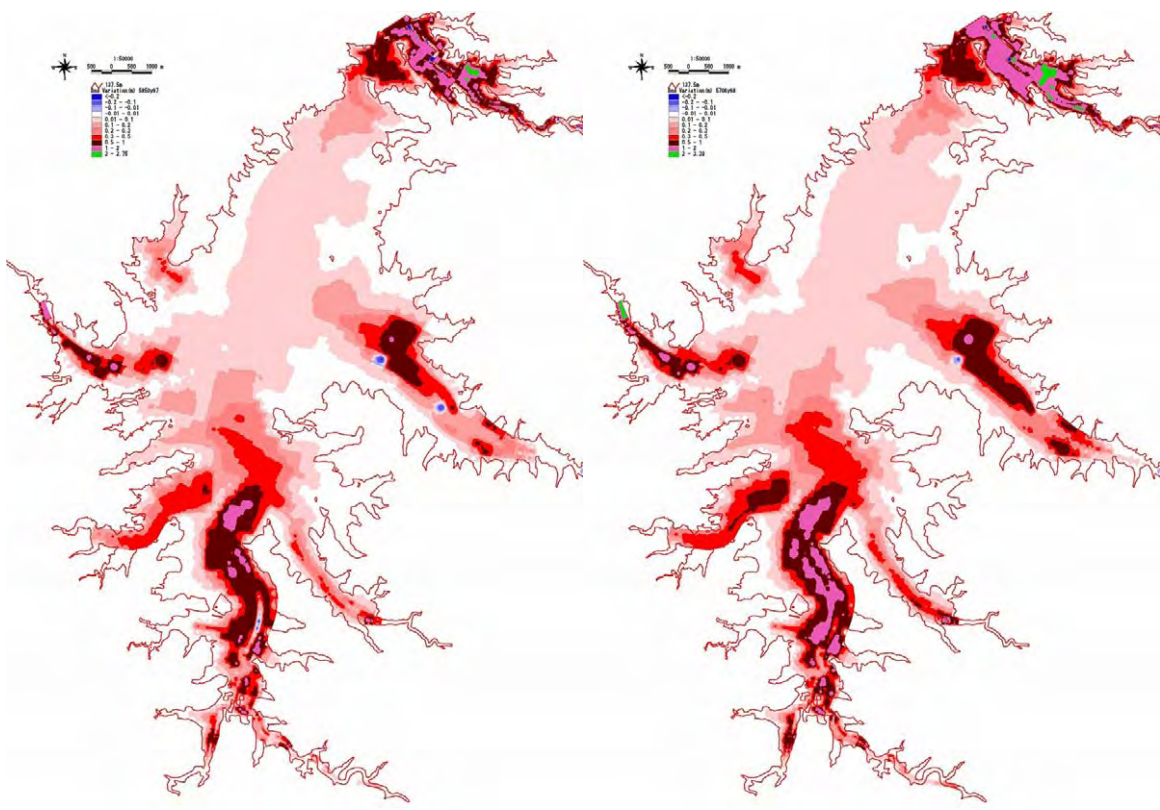


Gambar 5.3.1 Variasi Dasar (Sedimentasi) di Waduk dari Tahun 1993 (1/2)



(c) Sedimentasi pada 1993-1996

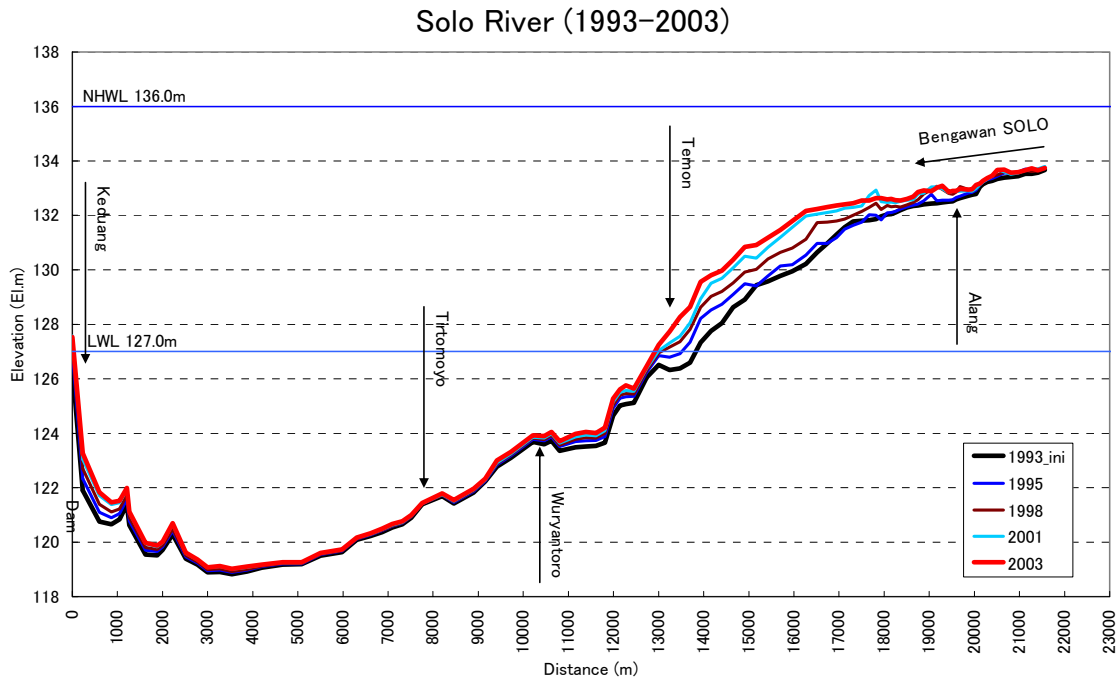
(d) Sedimentasi pada 1993-1997



(e) Sedimentasi pada 1993-1998

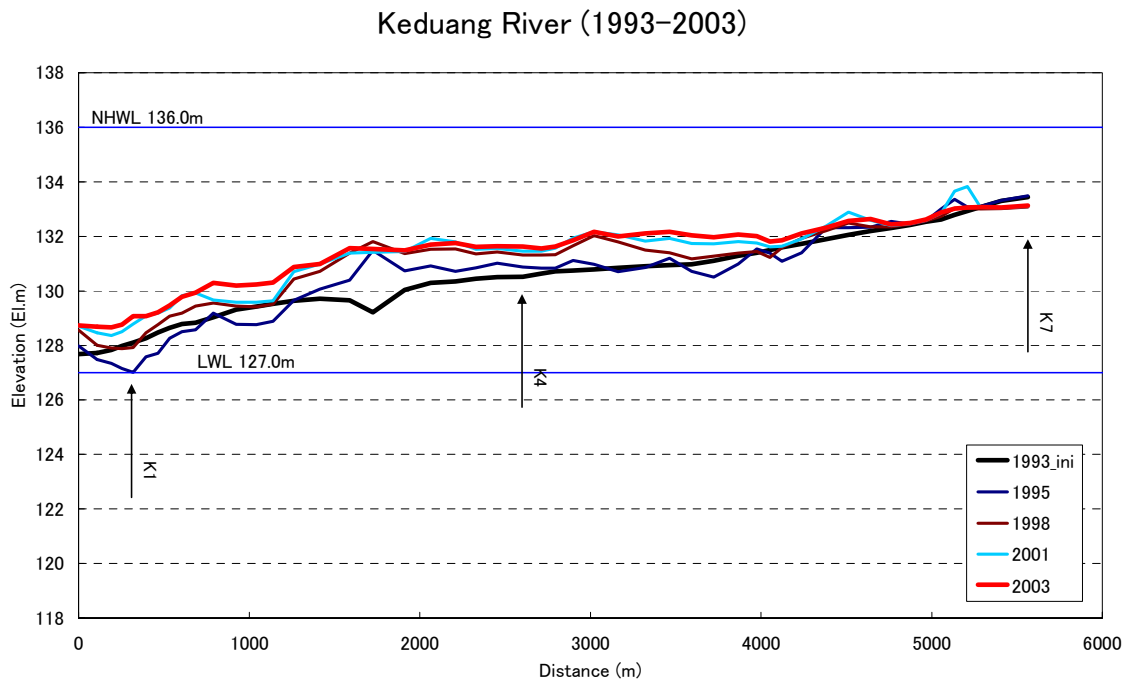
(f) Sedimentasi pada 1993-1999

Gambar 5.3.1 Variasi Dasar (Sedimentasi) di Waduk dari Tahun 1993 (2/2)



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.3.2 Penampang Memanjang Dasar Terdalam Sungai Bengawan Solo (Bengawan Solo ~ Kiri Bendungan) selama 1993-2004



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.3.3 Penampang Memanjang Dasar Terdalam Sungai Keduang (Keduang ~ Kanan Bendungan) selama 1993-2004

5.4 Kesimpulan

Seperti dianalisis di depan, disimpulkan bahwa estimasi aliran sedimen dan alokasinya pada sungai-sungai selama 12 tahun terakhir (1993~2005) adalah beralasan, dan model NKhydro2D dapat dipakai untuk mensimulasi keduanya, sedimentasi di waduk Wonogiri dan pelepasan sedimen dari waduk.

Estimasi aliran sedimen, sedimentasi di waduk Wonogiri dan pelepasan sedimen dari waduk, selama 12 tahun terakhir (1993~2005) disimpulkan pada Tabel 5.4.1.

Tabel 5.4.1 Aliran Sedimen, Sedimentasi di Waduk dan Pelepasan Sedimen selama Tahun 1993 ~ 2005

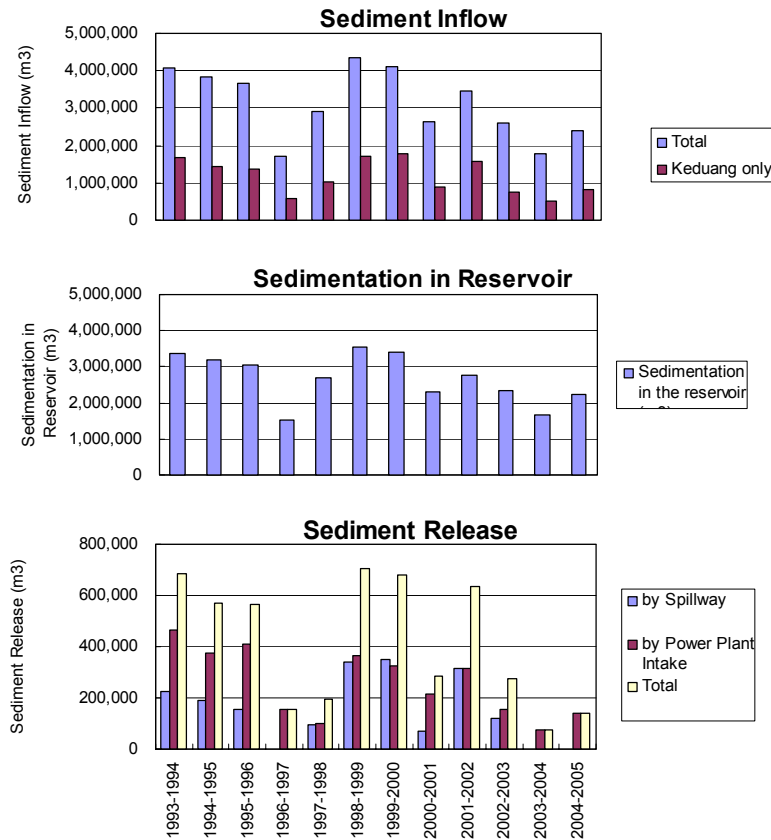
Tahun	Aliran Masuk Sedimen (m3)		Sedimentasi Di Waduk (m3)	Pelepasan Sedimen (m3)			Reservoir Sediment Trap Ratio
	Total	Hanya Keduang		dengan Spillway	dengan Power Plant Intake	Total	
1993-1994	4.063.000	1.665.000	3.353.000	223.000	463.000	686.000	0.825
1994-1995	3.825.000	1.435.000	3.186.000	192.000	376.000	568.000	0.833
1995-1996	3.651.000	1.362.000	3.064.000	155.000	412.000	567.000	0.839
1996-1997	1.698.000	579.000	1.520.000	0	156.000	156.000	0.895
1997-1998	2.907.000	1.016.000	2.704.000	94.000	100.000	194.000	0.930
1998-1999	4.355.000	1.721.000	3.561.000	338.000	365.000	703.000	0.818
1999-2000	4.124.000	1.774.000	3.393.000	351.000	327.000	678.000	0.823
2000-2001	2.643.000	902.000	2.315.000	70.000	214.000	284.000	0.876
2001-2002	3.450.000	1.566.000	2.749.000	317.000	317.000	634.000	0.797
2002-2003	2.607.000	769.000	2.324.000	120.000	154.000	274.000	0.891
2003-2004	1.765.000	504.000	1.672.000	0	73.000	73.000	0.947
2004-2005	2.392.000	811.000	2.250.000	0	140.000	140.000	0.941
Total (1993-2005)	37.480.000	14.104.000	32.091.000	1.860.000	3.097.000	4.957.000	0.856
Rata-rata Tahunan	3.124.000	1.176.000	2.675.000	155.000	259.000	414.000	0.856

Catatan: volume pengendapan dasar, termasuk *void*
Sumber: Tim Studi JICA

Hubungan antara aliran sedimen, sedimentasi di waduk dan pelepasan sedimen di atas diilustrasikan pada Gambar 5.4.1 berikut.

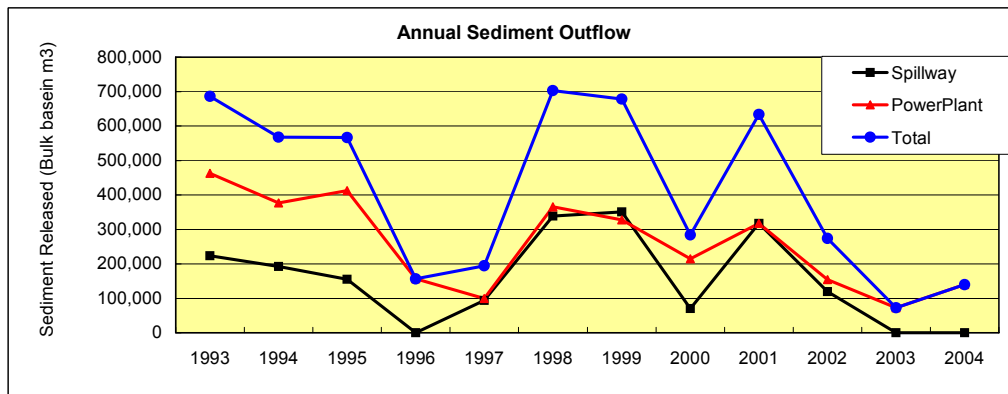
Dalam 12 tahun terakhir (1993~2005), rerata tahunan aliran sedimen menuju waduk Wonogiri sekitar 3,120,000m³, dengan aliran sedimen dari Sungai Keduang sekitar 1,180,000m³ (sekitar 38% dari total).

Gambar 5.4.2 menampilkan variasi tahunan pelepasan sedimen oleh keduanya, yaitu melalui spillway dan intake PLTA. Rerata tahunan dari pelepasan sedimen (*outflow*) adalah sekitar 414,000m³, dimana 155,000m³ melalui *spillway* dan 259,000m³ melalui intake PLTA. Karenanya, rerata tahunan sedimentasi di waduk Wonogiri sekitar 2,680,000m³, dan rasio sedimen yang terhenti di waduk sekitar 0.856 (85.6%).



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.4.1 Aliran Sedimen, Sedimentasi di Waduk dan Pelepasan Sedimen selama Tahun 1993 ~ 2005



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 5.4.2 Perkiraan Pelepasan Sedimen dari Waduk selama Tahun 1993~2005

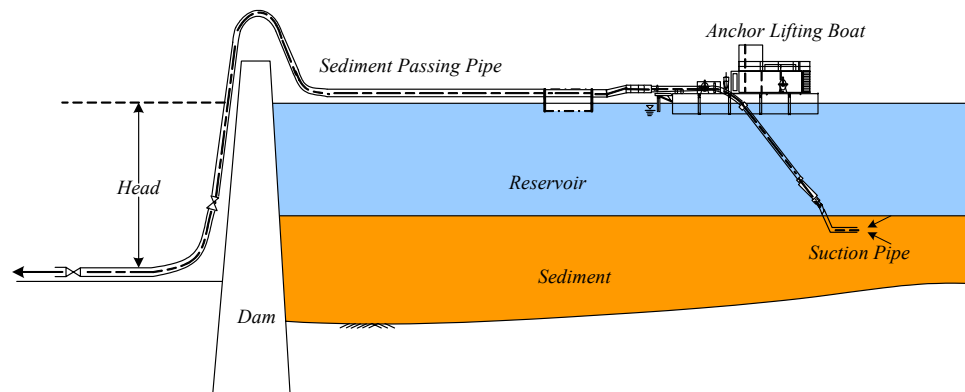
BAB 6 HASIL UJI VERIFIKASI DENGAN SISTEM HYDRO-SUCTION UNTUK PEMBUANGAN SEDIMEN

6.1 Latar Belakang Uji Verifikasi

Masalah sedimentasi di bangunan pengambilan (*intake*) Waduk Wonogiri, dianggap sebagai sesuatu yang perlu segera diselesaikan di pintu masuk (*inlet*) yang sudah tertutup oleh sedimen. Sebab, hal tersebut memberi akibat yang merugikan pada PLTA dan suplai air irigasi ke daerah hilir. Adalah tepat untuk memperkenalkan sistem pembuangan sedimen, yang dapat dioperasikan pada kondisi yang berkelanjutan dalam pembuangan sedimen di dalam maupun di sekitar bangunan intake di waduk.

Pengerukan telah banyak dilakukan berbagai negara di dunia untuk membuang sedimen waduk. Dan, hal tersebut merupakan metode yang sesuai dibandingkan dengan penanganan struktural lainnya dilihat dari segi mobilitas dan fleksibilitasnya. Di sisi lain, biaya yang ditanggung oleh pemerintah lebih murah untuk melaksanakan secara periodik untuk jangka waktu yang panjang. Untuk kasus pengerukan (*dredging*), dibutuhkan keamanan pada lokasi pembuangan sedimen untuk membuang material hasil pengerukan, sebagai satu masalah dalam mengadopsi model *dredging*.

Dari titik pandang secara ekonomis dan keberlanjutan, model system *hydro-suction* diharapkan menjadi salah satu metode baru yang menjanjikan dalam pembuangan sedimen dari waduk. Untuk membuang sedimen dari waduk, hal tersebut mempergunakan perbedaan tinggi muka air antara permukaan air waduk dan titik pembuangan sedimen melalui pipa, yang ditempatkan tepat di hilir bendung seperti terilustrasi di bawah ini:



Gambar 6.1.1 Skema Penampang Sistem *Hydro-Suction*.

Di sisi lain, teknologi dalam Sistem *Hydro-suction* masih dalam pengembangan perusahaan swasta dan lembaga pemerintah serta pengoperasian sistem baru belum dipraktekan pada keberadaan waduk sebagai penanganan permanen di Jepang. Tambahan pula, terdapat beberapa resiko dalam pengaplikasiannya di Waduk Wonogiri untuk pada tahap ini. Salah satu resiko adalah besarnya kuantitas sisa-sisa tumbuhan dan sampah yang hanyut ke bagian depan intake setelah banjir dan banyak dari sampah itu akhirnya terakumulasi di dasar waduk. Oleh karena itu, sistem baru yang diminta uji verifikasi untuk menerangkan apakah itu dengan efektif dipraktekan untuk memindah kandungan sedimen yang terdiri dari perpaduan lumpur, pasir, tanah liat yang bercampur sisa-sisa tumbuhan dan sampah di Waduk Wonogiri. Pengambilan material sedimen dengan sistem ini masuk aspek pertimbangan untuk menentukan bahwa penanganan akumulasi sedimen pada dan sekitar intake di seleksi berdasarkan hasil uji verifikasi di lapangan.



6.2 Garis Besar Uji Verifikasi

6.2.1 Tujuan

Tujuan uji verifikasi adalah sebagai berikut:

- i) Untuk mengkonfirmasi dapat tidaknya sistem pembuangan sedimen dengan *hydro-suction* diterapkan untuk material sedimen yang sudah bercampur dengan aliran sisa tanaman dan sampah di waduk Wonogiri,
- ii) Pengumpulan data tentang penggunaan system *hydro-suction*, dan
- iii) Menguji dan mengembangkan suatu system pembuangan sedimen *hydro-suction* yang hemat energi dimana menjadi stabil pada biaya yang murah.

6.2.2 Jadwal Keseluruhan

Dalam Studi ini, uji verifikasi dilakukan dengan mempercayakannya pada sub-kontraktor dari Jepang yang qualified, yaitu Damdre Co., Ltd. Uji verifikasi dilaksanakan di lapangan selama periode dari 12 September sampai 31 October 2005. Jadwal keseluruhan uji verifikasi ditampilkan dalam Tabel 6.2.1 berikut:

Tabel 6.2.1 Jadwal Keseluruhan Uji Verifikasi

Work Item	Agustus	September	Oktober	Nov.	Des.
Perencanaan dan Rancangan Uji			
Produksi dan Mobilisasi		————			
Transportasi dan Instalasi		————			
Uji-pendahuluan.		————			
Test Final			————		
Demobilisasi				————	
Evaluasi dan Pelaporan			

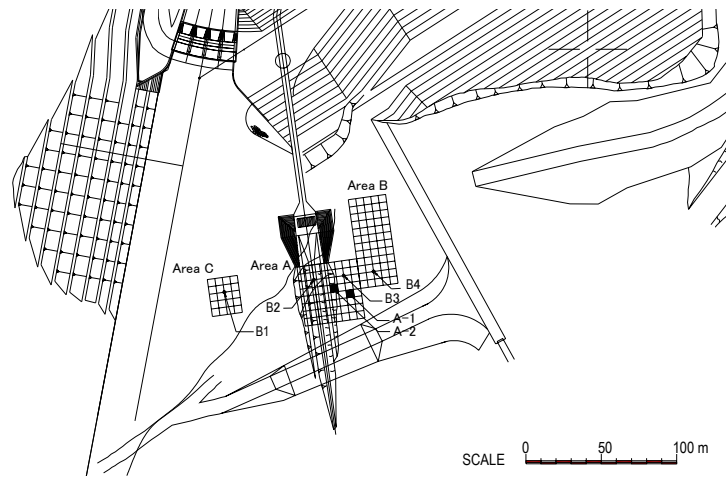
..... Pekerjaan di Jepang ————— Pekerjaan di Indonesia

Sumber: Tim Studi JICA

Seperti nampak pada Tabel di atas, uji verifikasi dilaksanakan dua (2) tahap, yaitu uji-pendahuluan dan uji-final. Uji pendahuluan bertujuan sebagai konfirmasi pendahuluan dari berfungsinya peralatan dan piranti *system hydro-suction* dan untuk memastikan system yang aplikatif untuk uji final. Setelah uji-pendahuluan, uji final dilakukan untuk mengumpulkan data operasional secara detail dengan mempergunakan system aplikatif.

6.2.3 Lokasi

Lokasi-lokasi uji verifikasi di seleksi pada dan sekitar intake seperti yang terlihat pada Gambar 6.2.1 di bawah. Uji-pendahuluan dan uji final dilaksanakan pada A-1 dan A-2 poin, secara berturut-turut.



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 6.2.1 Lokasi Uji Verifikasi

6.2.4 Seleksi Tipe Sistem *Hydro-Suction*

The hydro-suction system dibagi dalam 2 (dua) tipe, yaitu tipe yang bergerak dan tipe yang menetap. Jika fixed type, pipa penyedotan tertanam di dasar waduk, sedang tipe yang bergerak dapat di pindah ke berbagai posisi di waduk. Dalam hal ini, daerah akumulasi sedimen yang dapat dijangkau oleh fixed type adalah terbatas sebagai pembandingan daripada mobile type. Mempertimbangan aspek ini, tipe yang bergerak diseleksi untuk uji verifikasi di Waduk Wonogiri.

6.2.5 Metode Pengerukan

(1) Awal Pekerjaan

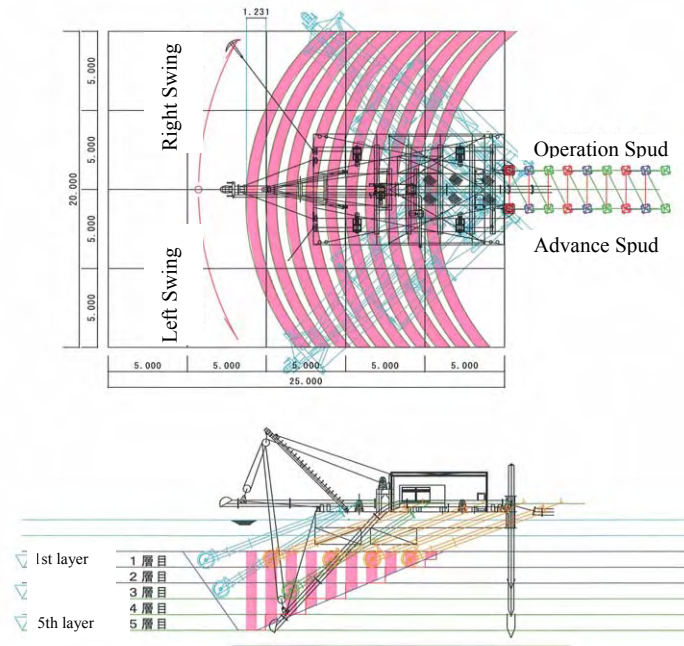
Sebelum memulai dredging dengan mobile type hydro-suction system, pipa lintasan sedimen diisi oleh air untuk menyebabkan the siphon phenomenon dengan menggunakan pompa air dan pompa udara.

(2) Pengerukan

Untuk keberhasilan awal pekerjaan di atas, dipastikan bahwa pipa penyedotan dalam kapal dapat dipindah ke atas dan ke bawah dan ke kiri dan ke kanan dengan mesin dan kapal dapat dipindah ke belakang dan ke depan menggunakan mesin derek untuk jangkar di pinggir perahu dan spuds. Daerah dan kedalaman dredging dikontrol dengan pengendalian alat-alat seperti tampak pada gambar 6.2.2 di bawah:

(3) Lintasan Pipa

Pipa lintasan pasir di perpanjang sampai arah hilir dari kapal melalui puncak beton di waduk pada saluran pembuang. Pipa *polyethylene* dengan densitas tinggi, diameter sekitar 400 mm dipergunakan sebagai saluran pipa utama.



Sumber: Tim Studi JICA

Gambar 6.2.2 Pola Pengerukan

(4) Pembuangan

Dengan mempertimbangkan aspek lingkungan, penggunaan air dalam pengerukan dilepaskan ke dalam bak penerima yang ditempatkan ditengah saluran pembuangan *spillway* dengan maksud menjaganya agar tidak terbuang ke hilir. Bak penerima dirancang sedemikian rupa sehingga hanya air permukaan yang melimpas dari pintu bak dan mengalir menuju bak penampung. Selanjutnya, air di bak penampung dikembalikan ke waduk dengan mengoperasikan pompa pengembalian.

6.2.6 Peralatan Utama dalam Uji Final

Peralatan untuk uji final terutama tergabung dalam ponton, pipa pembuangan pasir ($\Phi 400\text{mm}$, *High-density polyethylene*), bak penerima (Panjang 4.0m x lebar 5.0m x Tinggi 4.0m), bak penampung (Panjang 8.0m x lebar 9.0m x Tinggi 2.0m) dan pengembalian ke waduk melalui pipa (termasuk Pompa).

			
Ponton dan Pipa pembuangan pasir	Pipa Pembuangan Pasir di Spillway	Pipa Pengembalian (Dihubungkan menuju Waduk)	Bak enampung

6.3 Kondisi Geoteknik Sedimentasi di Waduk Wonogiri

Dalam Studi ini, kondisi geoteknik kandungan sedimentasi di dalam sekitar bangunan intake dikaji dengan *core drilling* dan Uji Mekanika Tanah. *Core drilling* dilakukan (lihat Gambar 6.2.1) untuk kedalaman 5.5 m. Hasil uji mekanika tanah ditampilkan pada Tabel 6.3.1 berikut.

Tabel 6.3.1 Hasil Uji Mekanika Tanah

Point	B-1			B-2			B-3			B-4		
	Soil	Specific gravity	Void ratio (%)	Soil	Specific gravity	Void ratio (%)	Soil	Specific gravity	Porosity (%)	Soil	Specific gravity	Void ratio (%)
0.0 – 0.5	Clay silt	2.658	63.63	Clay silt	2.690	60.92	Clay	2.616	61.47	Silty clay	2.604	60.36
1.0 – 1.5	Sandy clayey silt	2.620	62.55	Clay	2.640	57.84	Sandy silt	2.653	56.13	Clay	2.619	59.83
2.0 – 2.5	Sandy clayey silt	2.597	61.69	Clay	2.589	52.29	Sandy silt	2.692	56.32	Clay	2.681	60.81
3.0 – 3.5	Sandy clayey silt	2.610	59.67	Sandy clayey silt	2.706	55.98	Silt	2.588	56.53	Sandy clayey silt	2.652	57.47
4.0 – 4.5	Sandy silt	2.661	59.59	Clay	2.655	54.72	Sandy clayey silt	2.587	59.00	Sandy clayey silt	2.634	55.46
5.0 – 5.5	Sandy silt	2.620	53.12	Clay	2.590	53.32	Clay	2.600	52.26	Sandy clayey silt	2.616	53.32

Catatan: *Void ratio* (P) dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P = (1 - \gamma_d/\gamma_s) \times 100 (\%)$$

γ_d : *Specific gravity in dry condition* (g/cm³)

γ_s : *Specific gravity of soil particle* (g/cm³)

Sumber: Tim Studi JICA

Sedimen yang terkumpul di dan sekitar bangunan intake berisi *clay, silt, sandy clayey silt, dan sandy silt*. *Void ratio* dari penampang permukaan (pada kedalaman 0-1m) adalah sekitar 60% atau lebih tinggi, menjadi lebih kecil dari kedalaman. Karenanya, terdapat kecenderungan bahwa sediment di waduk Wonogiri terkonsolidasi pada bagian yang lebih dalam.

6.4 Uji-Pendahuluan

6.4.1 Kondisi Uji-Pendahuluan

Uji-pendahuluan dilakukan untuk membuktikan berfungsi dan kesesuaian dalam penerapan dari semua peralatan dan perangkatnya dan untuk menentukan aplikasi system *hydro-suction* untuk uji final. Kondisi uji-pendahuluan ditampilkan pada Tabel 6.4.1.

Tabel 6.4.1 Kondisi dan Butir-butir Pengukuran pada Uji-pendahuluan

Pengeruk	<i>Water jet nozzle</i>	<i>Side rotary</i>	<i>Side rotary (no power)</i>
Pengaliran (<i>flow</i>)	8 – 14 m ³ /menit.	Sekitar 10 m ³ /menit.	
Dalam penggalian	Sekitar 0 m – 1 m		

Sumber: Tim Studi JICA

6.4.2 Hasil Uji-Pendahuluan

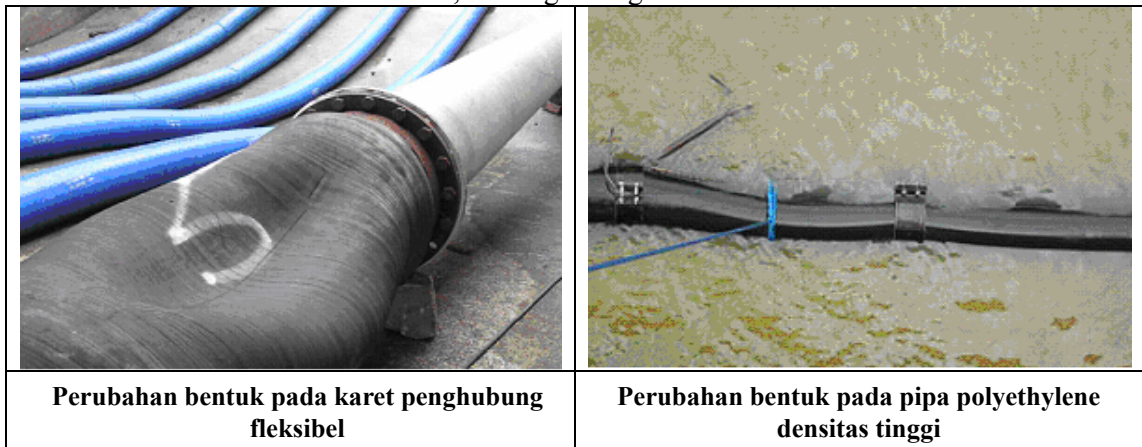
(1) Kondisi Pelaksanaan

Kondisi pelaksanaan system *hydro-suction* dalam uji-pendahuluan adalah seperti berikut:

- i) Waktu yang diperlukan untuk mewujudkan fenomena siphon 10-15 menit. Fenomena siphon berlanjut dengan kondisi stabil bahkan setelah melewati 15 menit.
- ii) Tidak terjadi getaran pada pipa selama uji-pendahuluan. Situasi ini diperoleh dengan menghindari pengoperasian katub (*valve*) secara mendadak.
- iii) Sedimen hendaknya dikeruk dan dibuang dengan lembut menggunakan efek siphon.
- iv) Pengoperasian bargas (*barge*) dengan kondisi stabil bisa dilaksanakan oleh (4) staf (kapten: 1, *deckhands*: 2, *anchor ship operator*: 1).
- v) Diperoleh pengalaman selama uji-pendahuluan bahwa deformasi pada *rubber flexible*

joint dan *high density polyethylene pipe* terjadi pada titik-titik seperti ditunjukkan dalam foto-foto berikut, ketika tekanan internal pada pintu of -2.4 m to -2.8 m, laju pengaliran of 14.5 m³/menit dan kecepatan alir of 1.9 m/s teramati. Diperkirakan deformasi disebabkan oleh tekanan negatif yang berlebihan pada pipa pelepasan pasir (*sand passing pipe*). Memperhatikan penyebab deformasi pipa, pengujian dilaksanakan dengan mengoperasikan sistem pada tekanan internal lebih dari -2.4 m.

- vi) Piranti dan perangkat lainnya, kecuali pipa dan sambungan yang mengalami deformasi disebutkan di atas, berfungsi dengan baik.



(2) Kinerja *Excavator*

Penampilan dari tiga (3) tipe excavator dikaji dalam uji-pendahuluan. Foto-foto berikut menunjukkan excavator *jet nozzle* dan *side rotary*.

i) Jet Nozzle

Empat *nozzles* ditempatkan pada ujung lubang suction. Arah *nozzle* ditetapkan sedemikian rupa sehingga mampu mencapai sudut suction yang optimum yaitu sekitar 40°. Diameter dalam *nozzle* adalah 50 mm dan *jet velocity* adalah 20 m/dtk.

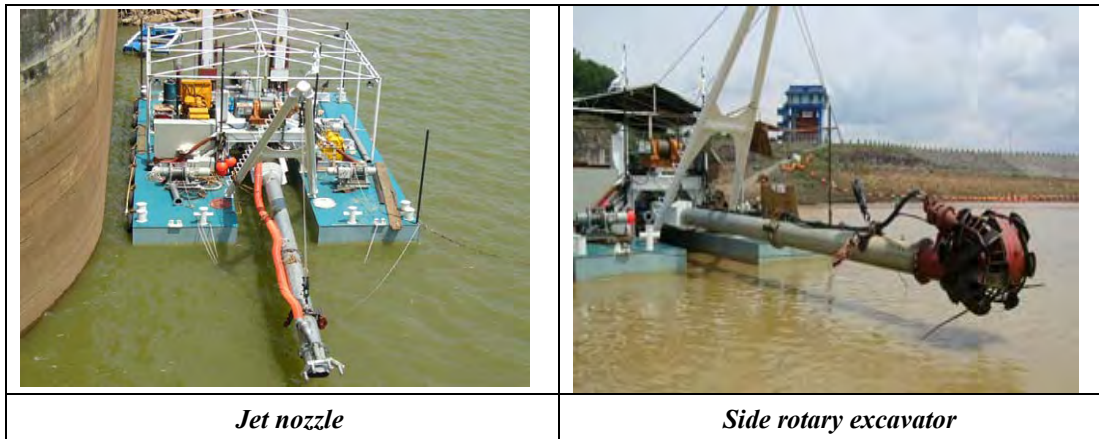
ii) Side Rotary

Dua (2) pisau (*blade*) dengan diameter 600 mm ditempatkan pada kedua sisi ujung lubang suction. Tipe pisau dipilih untuk mendapatkan perubahan yang linear dalam rotasi/perputaran pada pengerukan sedimen yang terkonsolidasi dengan kecepatan rendah sehingga dapat menghindari menyebarnya partikel-partikel halus selama pengerukan.

iii) *Side Rotary without Power*

Metode ini ditampilkan tanpa menjalankan perlengkapan *side rotary*. Karenanya, tingkat suction yang besar tidak dicapai selama uji-pendahuluan.

Volumetric sediment concentration diukur sampai pada 4.72 - 9.27% untuk *jet nozzle*, 3.66 - 8.48% untuk *side rotary* dan 3.95 - 7.02% untuk *side rotary* tanpa daya.



Pada kasus *jet nozzle*, kinerjanya adalah yang terburuk diantara tiga (3) tipe, karena pada jenis ini tidak mungkin menentukan sudut yang optimal antara *nozzles* dan permukaan sedimen pada kedalaman pengerukan yang lebih dangkal dan pelaksanaan di air. Sudut *nozzles* yang secara relatif tergantung pada sudut pipa *suction* merupakan masalah utama untuk dipecahkan di kemudian hari.

Metode *side rotary* memiliki fungsi ganda yakni penggalian sedimen dan pengangkutan sedimen hasil pengerukan menuju lubang *suction*. Diharapkan bahwa *volumetric sediment concentration* yang tinggi dapat dicapai, karenanya *side rotary* dapat diadaptasi untuk perubahan topografi dasar waduk. Secara komparatif sampah-sampah kecil juga dapat dihancurkan secara mudah dengan mempergunakan fungsi pemutar rotor pisau untuk sampah yang terkandung dalam debris vegetasi seperti semak, bambu pada dasar waduk.

Metode tanpa daya tidak dapat memenuhi tingkat *suction* yang besar, karena cara ini tidak mungkin untuk melakukan pengerukan pada hamparan sedimen yang telah sangat terkonsolidasi. Lobang *suction* tanpa daya perlu diuji sejak saat ini juga.

Dalam pertimbangan berdasarkan hasil evaluasi, excavator *side rotary* dipilih untuk uji final.

(3) Evaluasi terhadap Pipa

Meski perubahan bentuk terjadi pada pipa pengaliran sedimen yang terbuat dari pipa *polyethylene* yang berdensitas tinggi dan karet fleksible penghubung karena dengan tekanan yang negative, masalah ini dihilangkan dengan mempergunakan pipe *polyethylene* dan karet fleksible penghubung, yang memiliki kekuatan dan densitas yang lebih tinggi. Pipa *polyethylene* berdensitas tinggi dipertimbangkan merupakan bahan yang lebih memadai untuk pipa, ringan, kapabilitas kerja yang sangat baik, mempergunakan *resistance*, *durability*, dan rendahnya *head loss* jika dibandingkan dengan pipa besi.

6.5 Uji final

Untuk deskripsi secara rinci dari hasil uji final, dapat merujuk pada Laporan Pendukung Lampiran No. 5.

6.5.1 Kondisi Uji final

Uji final dengan mempergunakan excavator *side rotary* dilakukan sebanyak enambelas kali (16) pada kondisi-kondisi yang berbeda-beda yang mendasarkan pada perubahan kedalaman dan tingkat arus seperti nampak pada Tabel 6.5.1.

Tabel 6.5.1 Kondisi Uji Verifikasi

Excavator	Side rotary		
<i>Flow</i> (m ³ /menit)	9.5,9.9,10.0,10.3,10.9, 11.0	10.3,11.0,11.8,12.0, 12.5	11.3,11.5,11.6,11.7, 12.0
Kedalaman penggalian	1 m	2 m	3 m
Jumlah kondisi	6	5	5

Sumber: Tim Studi JICA

6.5.2 Kedalaman Pengerukan

Berdasarkan pada pengukuran dengan *sounding rod* sebelum dan sesudah pengoperasian pengerukan, diperkirakan pipa (*suction*) mampu mencapai kedalaman sekitar 4.0 m dari permukaan kandungan sedimen. Meski ada kecenderungan konsolidasi ditemukan sebagai hasil dari *core drilling*, tidak ada masalah yang serious yang mempersulit pengerukan. Dengan metode ini, dimungkinkan mengeruk sedimen sampai kedalaman 4 m dari sedimen yang terdiri dari *clay*, *silt*, *sandy silt*, dan *sandy clayey silt*.

6.5.3 Jumlah Sedimen yang Dibuang

(1) Survei Pemeruman

Berdasarkan survei pemeruman dengan mempergunakan *sounding rod* sebelum dan sesudah pengoperasian, diperkirakan jumlah sedimen yang dibuang sekitar 146 m³ seperti nampak pada Tabel 6.5.2.

Tabel 6.5.2 Hasil Pengerukan Jumlah Sedimen yang Terbuang

Area	Excavator	Volume Sedimen Dibuang (m³)
A-1	Water jet nozzle	3.8
A-1	Side rotary	8.1
A-1	Side rotary (No power)	4.9
A-2	Side rotary	122.2
I-1	Side rotary	7.3
Total		146.2

Sumber: Tim Studi JICA

(2) Jumlah Sedimen di Bak Penerima dan Bak Penampungan

Jumlah sedimen yang terkumpul di bak penerima dan penampung adalah sekitar 69 m³ seperti ditampilkan pada Tabel 6.5.3. Dipertimbangkan bahwa semua komponen pasir pada hasil pengerukan sedimen yang terakumulasi pada bak penerima, sementara silt dan clay dikembalikan ke waduk. Volume tanah yang terakhir dikalkulasikan sekitar 77 m³ (= 146 m³ - 69 m³).

Tabel 6.5.3 Jumlah Sedimen di Bak Penerima

Bak	Jumlah Terakumulasi (m³)
Bak Penerima	5.6
Bak Penampung	63.5
Total	69.1

Sumber: Tim Studi JICA

(3) Jumlah sedimen berdasarkan nilai pengukuran dengan *density meter* dan *flow meter*

Volume sedimen hasil pengerukan dikalkulasi mempergunakan persamaan berikut dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 6.5.4 di bawah:

$$V = \Sigma Q t \times \Delta t \times ((\gamma - 1) / (\gamma_s - 1) / (1 - P/100)) \times 100$$

dengan;

V: Jumlah hasil pengerukan (m³)

Qt: Laju pengaliran (m^3/det)
 Δt : Waktu (13.1 jam)
 γ : *Specific gravity* dari aliran sedimen (g/cm^3)
 γ_s : *Specific gravity* dari partikel tanah (g/cm^3)
P: Tekanan partikel tanah (%)

Tabel 6.5.4 Hitungan Jumlah Sedimen Hasil Pengerukan

Area	Excavator	Volume of Sediment Volume (m^3)
A-1	Water jet nozzle	2.4
A-1	Side rotary	5.4
A-1	Side rotary (No power)	3.9
A-2	Side rotary	134.8
I-1	Side rotary	15.4
Total		161.9

Sumber: Tim Studi JICA

Seperti nampak pada Tabel-tabel di atas, volume sedimen hasil pengerukan didasarkan pada hasil data *sounding* adalah hampir sama dengan nilai hasil kalkulasi yang didasarkan pada rekaman *density meter* dan *flow meter*. Karenanya, secara ringkas diestimasi bahwa pengerukan/*dredging* sekitar 140 sampai 160 m^3 dimungkinkan dengan mempergunakan perbedaan TMA yang ditemukan dalam uji verifikasi ini.

6.5.4 Debris dan Sampah

Pada uji final, sampah yang nampak pada Tabel 6.5.5 dan Foto-foto dibawah terangkut melalui pipa pengaliran dan akhirnya mencapai bak penerima. System ini bebas dari penguncian setelah sampah mampu sekali melalui mulut *suction*. Karenanya, system ini memiliki reliabilitas yang tinggi dalam pembuangan secara efektif untuk sedimen yang tercampur dengan debris dan sampah vegetasi di depan bangunan intake, meski hal ini merupakan masalah awal dalam system *hydro-suction* untuk diklarifikasi dalam uji verifikasi.

Jika hambatan pada mulut *suction* seperti lembaran saringan dapat dihilangkan, *excavator* mampu mengeruk kandungan dalam waduk yang ukurannya sedikit lebih kecil dari diameter lingkaran pipa. Kerananya, dimungkinkan untuk melakukan pembuangan *debris* dan sampah secara lebih efektif dari dasar waduk dengan mengembangkan system ini di masa depan.

Tabel 6.5.5 Sampah dan Kerikil yang Dipindahkan oleh Sistem *Hydro-Suction*

Rincian	Dimensi
Kerikil	Diameter maksimum sekitar 130 mm
Bambu, Tangkai	Panjang maksimum sekitar 600 mm x lebar sekitar 50 mm
Plastik	Hancuran dengan ukuran 150 mm x 150 mm

Sumber: Tim Studi JICA

	
Kerikil dan sampah terbang	Kerikil, sampah dan pasir terbang
	
Penutupan oleh sampah pada pompa pengembalian	Penutupan katup oleh sampah

6.6 Kemampuan Penerapan untuk Pengelolaan Sedimen Waduk Wonogiri

Hasil utama dari uji verifikasi diringkas dibawah ini:

- (1) uji verifikasi memperjelas bahwa system pembuangan sedimen dengan mempergunakan perbedaan TMA dapat diterapkan untuk *dredging* sedimen di depan bangunan *intake* pada waduk Wonogiri.
- (2) Jika tingkat aliran sedimen yang melalui pipa sekitar $12 \text{ m}^3/\text{min}$, densitas dan *volumetric sediment concentration* yang dibawa oleh system ini diperkirakan sekitar $1.09 \text{ g}/\text{cm}^3$ dan 13%.
- (3) Kapasitas system ini terdiri dari tipe *side rotary*, tipe perlengkapan untuk pengerukan adalah sebagai berikut:
 - a) Tingkat *pengerukan* per satuan waktu sekitar $30 \text{ m}^3/\text{jam}$.
 - b) Tingkat *pengerukan* per satuan daya adalah sekitar $8 \text{ m}^3/\text{kWh}$.
 - c) Penggunaan air pada *unit sedimen* yang dikeruk sekitar $19 \text{ m}^3/\text{menit}$.
 - d) Kedalaman *pengerukan* sekitar 4 m.
- (4) Sampah yang juga meliputi batuan kecil dengan diameter maksimum sekitar 130 mm, bambu dengan panjang maksimum sekitar 600 mm, dan vinil dengan ukuran sekitar 150mm x 150mm terangkut melalui sistem *siphon*.

Karenanya, system *hydro-suction* dapat diterapkan untuk pembuangan sedimen di intake waduk Wonogiri dalam upaya menjaga keberlanjutan fungsi bangunan intake. Pada studi selanjutnya, perlu dikaji penanganan yang aman terhadap banjir, karena uji verifikasi dilaksanakan pada musim kemarau ketika tidak terjadi banjir.