

MODEL ANALITIK DINAMIKA RESPON PELEPASAN AIR TERHADAP POLA SEDIMENTASI WADUK WONOGIRI

Dyah Ari Wulandari^{1*}, Djoko Legono², dan Suseno Darsono¹

¹ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Diponegoro

² Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gajahmada

*dyahariwulandari@yahoo.co.id

Intisari

Waduk tampungan sedimen dengan pelimpah baru akan dibangun di Waduk Wonogiri, sehingga diperlukan perubahan operasi Waduk Wonogiri untuk memfungsikan fasilitas *flushing/ sluicing*. Operasi waduk baru ini perlu dievaluasi dengan menganalisis distribusi sedimen yang terjadi untuk mengidentifikasi lokasi – lokasi terjadinya pengendapan sedimen akibat perubahan operasi waduk dan sistem waduk. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi endapan sedimen di waduk berdasarkan operasi waduk yang diterapkan dengan menggunakan model sedimentasi waduk 3D. Penelitian ini menggunakan prototipe Waduk Wonogiri pada kondisi sebelum dan sesudah dibangunnya waduk tampungan sedimen. Simulasi dilakukan selama 3 periode pengoperasian waduk (3 tahun). Penelitian dilakukan dengan menentukan skenario operasi waduknya kemudian menghitung distribusi sedimen di waduk untuk mengetahui pola pengendapan sedimen di waduk dengan model sedimentasi waduk 3D EFDC. Hasil yang didapat adalah yang lebih berpengaruh dari skenario waduk yang diterapkan terhadap pola pengendapan sedimen Waduk Wonogiri adalah elevasi muka air waduk yang dihasilkan selama dilakukan operasi waduk. Pada operasi waduk dengan elevasi muka air yang lebih rendah, sedimen dapat terbawa jauh ke dalam waduk dan diendapkan di bagian terdalam waduk (dapat mengisi tampungan mati). Sedangkan pada operasi waduk dengan elevasi muka air yang lebih tinggi, sedimen lebih banyak mengendap di bagian hulu (mengendap di tampungan efektif dan tampungan banjir).

Kata Kunci: Operasi Waduk, Penanganan Sedimentasi Waduk, Sedimentasi Waduk,

LATAR BELAKANG

Waduk Wonogiri terletak di Kabupaten Wonogiri Propinsi Jawa Tengah. Waduk Wonogiri merupakan salah satu waduk besar yang mengalami permasalahan sedimentasi. JICA (2007a) menyatakan bahwa permasalahan sedimentasi di Waduk Wonogiri adalah terjadinya sedimentasi yang lebih cepat dari rencana, penyumbatan intake karena pengendapan sedimen di sekitar intake dan pengurangan kapasitas efektif waduk. Berdasarkan penelitian tersebut, sedimentasi Waduk Wonogiri dapat diatasi dengan membuat waduk tampungan sedimen (*sediment storage reservoir*) yang dilengkapi pelimpah baru untuk keperluan *flushing/ sluicing* sedimen dari Sungai Keduang, konservasi daerah tangkapan air dan pengerukan rutin di sekitar intake. Untuk memfungsikan fasilitas *flushing/ sluicing* ini diperlukan operasi waduk yang baru.

Morris and Fan (1997) menyatakan bahwa perubahan dari waduk yang umur pelayanannya dibatasi sedimentasi menjadi waduk yang dapat digunakan secara berkelanjutan memerlukan perubahan yang mendasar pada perencanaan dan pengoperasian waduk. Diperlukan perubahan konsep dari umur waduk yang dibatasi oleh sedimentasi menjadi pengaturan air dan sedimen untuk memperpanjang umur waduk. Menurut Nicklow & Mays (2000) studi pengelolaan waduk yang telah banyak dilakukan selama ini lebih difokuskan pada aplikasi metode riset operasi untuk menentukan kebijakan pengoperasian waduk, belum ada model yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan pengendalian sedimen. Diperlukan alternatif pendekatan untuk mengurangi efek merugikan dari sedimentasi. Iwan K. Hadihardaja (2009) melakukan penelitian model operasi waduk yang bertujuan meminimalisasi pengendapan sedimen dan memaksimalkan produksi energi. Model ini dapat diaplikasikan untuk operasi waduk pengendalian sedimentasi. Model ini hanya memprediksi volume sedimen yang terendap di waduk, tidak mempertimbangkan distribusi sedimen di waduk. Petkovsek & Roca (2014) melakukan studi dampak aturan operasi waduk terhadap sedimentasi waduk untuk waduk yang tidak mempunyai *flushing outlet* (waduk yang dibangun antara tahun 1960 – 1970). Pada studi ini didapat bila operasi semakin lama maka endapan semakin mendekati bendungan. Dengan tinggi muka air minimum yang berbeda maka pada tinggi muka air minimum yang paling rendah endapan lebih cepat mendekati bendungan, ketebalan endapan lebih rendah, sedimen banyak mengendap di tampungan tidak aktif, kehilangan kapasitas total lebih kecil tetapi kehilangan kapasitas total masih lebih besar dari kehilangan kapasitas aktif dan sedimen outflow lebih besar. Sedimen outflow naik dengan waktu operasi yang lebih lama, sedimen outflow turun dengan turunnya tinggi muka air minimum. Komposisi sedimen inflow dan outflow berbeda. Pada sedimen outflow, pasir mulai ada sesudah 30 tahun beroperasi dan semakin naik jumlahnya. Adanya pasir pada sedimen outflow harus dipertimbangkan terhadap abrasi outlet dan turbin.

JICA (2007b) mengembangkan model angkutan sedimen NKhydro2D yang merupakan model numerik *Depth-integrated Two Dimensional*. Model ini digunakan untuk memprediksi efek pengendalian sedimen dari Sungai Keduang yang dilakukan dengan pengalihan sedimen (*sediment bypass*), pelewatan sedimen (*sediment sluicing*) dan *Compartmented Reservoir with New Flushing Gates*. Simulasi dilakukan antara bulan Nopember – Mei pada tahun kering (tahun 2004-2005), tahun rata-rata (tahun 1995-1996) dan tahun basah (1998-1999). Pelepasan lewat intake sesuai dengan data debit bulanan rata-rata Bendung Colo dan elevasi muka air waduk awal +129,0 m. Dari model ini didapat lebar pelimpah baru dan elevasi pelimpah baru yang menghasilkan efisiensi pelepasan sedimen tinggi, sedimentasi di sekitar intake berkurang dan dengan *flushing* pada akhir musim hujan (Feb – 15 April) elevasi muka air waduk dapat dijaga lebih tinggi pada akhir musim hujan untuk semua tahun hidrologi. Pada pengendalian ini baru difokuskan pada pengendalian sedimen dari Sungai Keduang yang dianalisis menggunakan model matematik 2-D. Untuk mengetahui penyebaran sedimen dan efek dari operasi waduk yang diterapkan akan lebih tepat jika digunakan struktur aliran 3-D dengan menggunakan model 3-D selain itu inflow sedimen dari anak sungai lainnya yang menyumbang sekitar 60% juga harus dipertimbangkan. Penentuan waktu dan debit pelepasan belum dilakukan dengan optimasi.

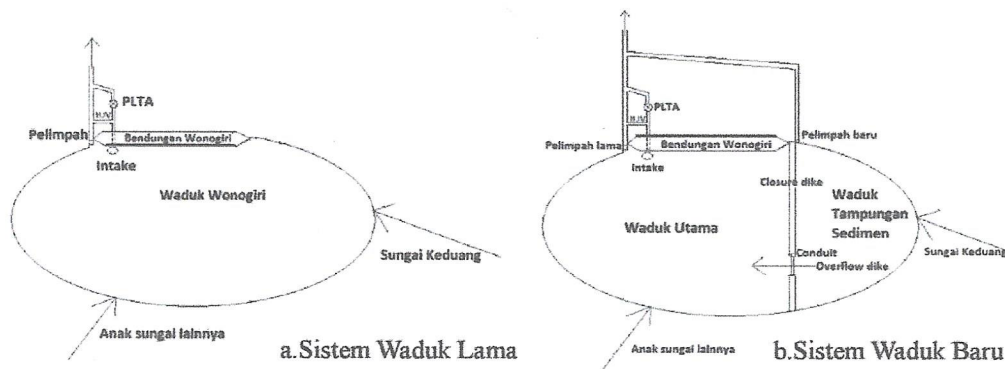
Sardi et al. (2008) melakukan penelitian untuk mengetahui besarnya pengurangan sedimen pada Bendungan Serbaguna Wonogiri apabila dilakukan penanganan berupa pembuatan waduk penampung sedimen pada muara Sungai Keduang. Penelitian dilakukan dengan membuat simulasi transpor sedimen 2D menggunakan bantuan software CCHE. Simulasi dilakukan pada kondisi tanpa ada waduk penampung sedimen (eksisting) dan kondisi ada waduk penampung sedimen dalam jangka waktu satu tahun. Data debit yang digunakan adalah data debit bulanan rata – rata yang diasumsikan sebagai debit jam-jaman, sehingga debit merata selama satu bulan. Penggelontoran dilakukan untuk mengurangi atau mengosongkan sedimen pada tampungan waduk penampung sedimen. Penggelontoran dilakukan pada bulan Januari sampai April ketika debit dari Sungai Keduang tinggi dan elevasi muka air waduk utama mencapai elevasi 136 m dengan debit konstan. Hasil simulasi menunjukkan aliran yang terjadi di muara Sungai Keduang pada kondisi tanpa adanya waduk penampung sedimen terjadi turbulensi dengan kecepatan yang relatif kecil sehingga memungkinkan terjadinya pengendapan. Pada kondisi adanya waduk penampung sedimen aliran mengarah ke pintu pelimpah baru dengan kecepatan yang relatif seragam sehingga sedimen suspensi belum terendapkan. Pengoperasian waduk penampung sedimen dapat mengurangi besarnya pengendapan sedimen. Penelitian ini belum memperhitungkan pengaruh fluktuasi debit, waktu simulasi pendek sehingga kecenderungan lokasi pengendapan belum terlihat secara signifikan dan penggelontoran yang optimum belum diketahui.

Dengan dibangunnya waduk tampungan sedimen diperlukan perubahan operasi Waduk Wonogiri untuk memfungsikan fasilitas *flushing/ sluicing* yang ada. Penentuan waktu dan debit pelepasan yang tepat harus dilakukan dengan optimasi sehingga resiko kekurangan air di musim kemarau dapat diminimalisir dan efektifitas penggelontoran yang dihasilkan dapat seoptimal mungkin. Operasi waduk baru ini perlu dievaluasi dengan menganalisis distribusi sedimen yang terjadi untuk mengidentifikasi lokasi – lokasi terjadinya pengendapan sedimen akibat perubahan operasi waduk dan sistem waduk. Model yang tepat untuk mengetahui penyebaran sedimen dan efek dari operasi waduk adalah model 3D. Oleh karena itu diperlukan penelitian yang bertujuan untuk menganalisis distribusi endapan sedimen di waduk berdasarkan operasi waduk yang diterapkan dengan menggunakan model sedimentasi waduk 3D. Manfaat dari penelitian ini adalah dapat mengetahui pengaruh perubahan operasi waduk dan sistem waduk terhadap pola pengendapan sedimen di waduk. Metode yang digunakan dapat digunakan sebagai acuan dalam penanganan sedimentasi waduk dengan menentukan pengoperasian waduk yang optimal dalam meminimalisasi selisih masukan dan keluaran sedimen.

METODOLOGI STUDI

Penelitian ini dibagi menjadi 4 tahap. Tahap I penelitian ini adalah menentukan besarnya tampungan waduk dan pelepasan air berdasarkan skenario operasi waduk. Skenario operasi waduk ditentukan berdasarkan awal waktu penggelontoran, lama waktu penggelontoran, fungsi tujuan operasi waduk dan sistem waduk yang berbeda. Tahap II adalah melakukan kalibrasi dan verifikasi model sedimentasi waduk 3D. Tahap III adalah menghitung distribusi sedimen di waduk untuk mengetahui

pola pengendapan sedimen di waduk berdasarkan skenario operasi waduk yang diterapkan dengan model sedimentasi waduk 3D. Tahap IV adalah menganalisis pengaruh perubahan operasi waduk dan sistem waduk terhadap pola pengendapan sedimen di waduk. Penelitian ini menggunakan prototipe Waduk Wonogiri pada kondisi sebelum dan sesudah dibangunnya waduk tampungan sedimen (Gambar 1). Sistem Waduk Lama adalah Waduk Wonogiri pada kondisi sebelum dibangunnya waduk tampungan sedimen. Sistem Waduk Baru adalah Waduk Wonogiri pada kondisi sesudah dibangunnya waduk tampungan sedimen. Optimasi operasi waduk dilakukan menggunakan software CSUDP dengan skenario awal waktu penggelontoran, lama waktu penggelontoran, fungsi tujuan dan sistem waduk yang berbeda. Simulasi sedimentasi waduk dilakukan selama 3 periode pengoperasian waduk (Tabel 1) menggunakan software EFDC.



Gambar 1. Sketsa Waduk Wonogiri

Pada Sistem Waduk Lama fungsi tujuannya dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Min } Z = Ax \sum_{i=1}^N |V_{si} - V_{so}| + Bx \sum_{i=1}^N |BT_i - BU_i| \dots\dots\dots (1)$$

dengan keterangan :

- A : koefisien pengendalian sedimen di Waduk Wonogiri, jika ada pengendalian sedimen A = 1 dan jika tidak ada pengendalian sedimen A = 0
- B : koefisien target pemenuhan kebutuhan air

Pada Sistem Waduk Baru fungsi tujuannya dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & Ax \sum_{i=1}^N |V_{si,2,i} - V_{so,2,i}| + Bx \sum_{i=1}^N |T_{2,i} - U_{2,i}| \\ & + Cx \sum_{i=1}^N |V_{si,1,i} - V_{so,1,i}| \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

dengan keterangan :

- A : koefisien pengendalian sedimen di Waduk Utama, jika ada pengendalian sedimen di Waduk Utama A = 1 dan jika tidak ada pengendalian sedimen di Waduk Utama A = 0
- C : koefisien pengendalian sedimen di Waduk Keduang, jika ada pengendalian sedimen di Waduk Tampungan Sedimen C = 1 dan jika tidak ada pengendalian sedimen di Waduk Keduang C = 0
- B : koefisien target pemenuhan kebutuhan air

- Z : fungsi tujuan
 i : urutan periode (*stage*) operasi waduk
 N : banyaknya periode yang ditinjau
 BU_i : Pelepasan waduk pada periode i (ton)
 U_i : U_i x massa jenis air
 BT_i : Target kebutuhan air pada periode i (ton)
 T_i : T_i x massa jenis air
 V_{si} : sedimen inflow (ton)
 V_{si} : Volume sedimen yang masuk waduk x massa jenis sedimen
 V_{so} : sedimen outflow (ton)
 V_{so} : Volume sedimen yang keluar waduk x massa jenis sedimen

Tabel 1. Skenario Simulasi Sedimentasi Waduk

Sistem Waduk	Penelitian	Periode Penggelontoran	ID	Fungsi Tujuan	Simulasi Sedimentasi Waduk	
Sistem waduk lama	Berdasarkan lama waktu penggelontoran	Des I – Peb II	SL1	A=1, B=0	simulasi dilakukan selama 3 tahun berdasarkan periode penggelontoran dan operasi waduk	
		Des I – Peb I	SL2			
		Des I – Jan II	SL3			
		Des I – Jan I	SL4			
	Berdasarkan awal waktu penggelontoran	Des I – Jan II	SL3	A=1, B=0		
		Jan I – Peb II	SL5			
		Peb I – Mar II	SL6			
	Berdasarkan fungsi tujuan operasi waduk	-	Mar I – Apr II	SL7		A=1, B=0
			Des I – Peb II	SL1		
Sistem waduk baru	Berdasarkan lama waktu penggelontoran	-	SL8	A=1, B=1		
		-	SL9	A=0, B=1		
		Des I – Peb II	SB1	A=1, B=0, C=1		
		Des I – Peb I	SB2			
	Des I – Jan II	SB3				
	Des I – Jan I	SB4				
	Berdasarkan awal waktu penggelontoran	Des I – Jan II	SB3	A=1, B=0, C=1		
		Jan I – Peb II	SB5			
		Peb I – Mar II	SB6			
Berdasarkan fungsi tujuan operasi waduk	-	Mar I – Apr II	SB7	A=1, B=0, C=1		
		Des I – Peb II	SB1		A=1, B=0, C=1	
-	-	Des I – Peb II	SB8	A=1, B=1, C=1		
		Des I – Peb II	SB9	A=0, B=1, C=1		

Keterangan : A, B, C = koefisien fungsi tujuan

HASIL STUDI DAN PEMBAHASAN

Hasil pola pengendapan sedimen berdasarkan skenario operasi waduk dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil yang didapat adalah pada tiap – tiap bagian anak sungai yang masuk ke waduk, material sedimen berbutir kasar akan mengendap terlebih dahulu dan membentuk delta. Endapan ini terbentuk ke arah hulu dan ke arah hilir. Material sedimen dengan butiran yang lebih halus dibawa masuk lebih jauh ke kolam waduk. Pada sistem waduk lama aliran sedimen dari Sungai Keduang akan berbelok ke arah hulu menuju intake dan kolam waduk hingga akhirnya mengendap (Gambar 3). Sedangkan pada sistem waduk baru aliran sedimen dari

Sungai Keduang tertahan oleh bangunan *closure dike* sehingga kenaikan dasar terjadi di muara Sungai Keduang hingga ke pelimpah baru. Pengaruh *closure dike* menyebabkan inflow sedimen ke Tampungan Utama berkurang dan sedimentasi di intake dan sekitarnya berkurang. Semakin lama endapan sedimen yang semakin tinggi adalah di bagian hulu (sekitar muara tiap anak sungai).

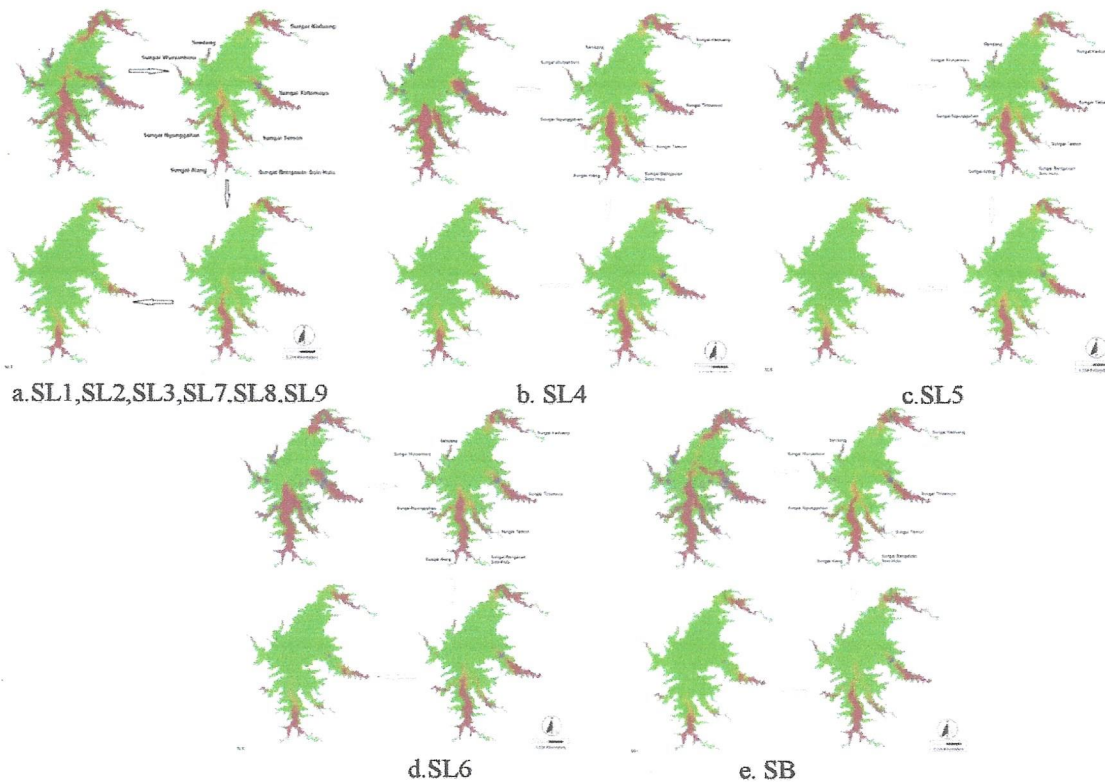
Inflow Waduk Wonogiri berasal dari anak sungai yang melingkar di sekitar badan waduk sehingga pola sedimentasinya berbeda dengan waduk-waduk pada umumnya dimana anak sungai ada di bagian hulu waduk. Pada umumnya pola sedimentasi membentuk bagian terdalam waduk ada di muka bendungan sedangkan pada Waduk Wonogiri bagian terdalam ada ditengah waduk.

Berdasarkan Tabel 2 yang lebih berpengaruh dari skenario waduk yang diterapkan terhadap pola pengendapan sedimen Waduk Wonogiri adalah elevasi muka air waduk yang dihasilkan selama dilakukan operasi waduk Sesuai dengan hasil penelitian dari Petkovsek & Roca (2014) pada operasi waduk dengan elevasi muka air yang lebih rendah, sedimen dapat terbawa jauh ke dalam waduk dan diendapkan di bagian terdalam waduk (dapat mengisi tampungan mati). Sedangkan pada operasi waduk dengan elevasi muka air yang lebih tinggi, sedimen lebih banyak mengendap di bagian hulu (mengendap di tampungan efektif dan tampungan banjir). Pada perubahan sistem waduk juga berpengaruh pada pola pengendapan sedimen di sekitar muara anak sungai.

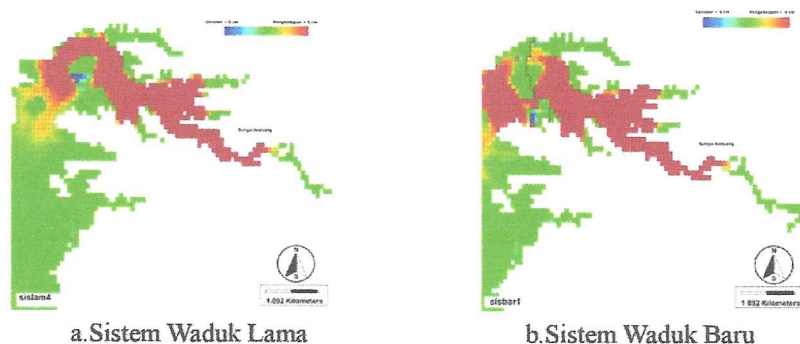
Tabel 2. Pola Sedimentasi

Sistem Waduk	Penelitian	Periode Penggelontoran	ID	Pola Sedimentasi	
Sistem waduk lama	Berdasarkan lama waktu penggelontoran	Des I – Peb II	SL1	Pada SL4 menghasilkan pola sedimentasi yang berbeda, sedimen halus tidak bisa terbawa jauh ke dalam kolam waduk, operasi waduk pada SL4 menghasilkan muka air waduk yang lebih tinggi	
		Des I – Peb I	SL2		
		Des I – Jan II	SL3		
		Des I – Jan I	SL4		
	Berdasarkan awal waktu penggelontoran	Des I – Jan II	SL3	Pada SL3 dan SL7 sedimen halus dapat terbawa jauh ke dalam kolam waduk, pada SL5 dan SL6 sedimen halus tidak dapat terbawa jauh ke dalam kolam waduk, sedimen lebih banyak mengendap di bagian hulu operasi waduk pada SL5 dan SL6 menghasilkan muka air waduk yang lebih tinggi	
		Jan I – Peb II	SL5		
		Peb I – Mar II	SL6		
Berdasarkan fungsi tujuan operasi waduk	-	Mar I – Apr II	SL7		
		Des I – Peb II	SL1	Menghasilkan pola yang sama, sedimen halus dapat terbawa jauh ke dalam kolam waduk dengan porsi yang berbeda	
Sistem waduk baru	Berdasarkan lama waktu penggelontoran	Des I – Peb II	SL8	Menghasilkan pola yang sama, sedimen halus dapat terbawa jauh ke dalam kolam waduk dengan porsi yang berbeda	
		Des I – Peb I	SL9		
		Des I – Jan II	SB1		
		Des I – Jan I	SB2		
	Berdasarkan awal waktu penggelontoran	-	Des I – Jan II	SB3	Menghasilkan pola yang sama, sedimen halus dapat terbawa jauh ke dalam kolam waduk dengan porsi yang berbeda
			Jan I – Peb II	SB5	
			Peb I – Mar II	SB6	
	Berdasarkan fungsi tujuan operasi waduk	-	Mar I – Apr II	SB7	
			Des I – Peb II	SB1	Pada SB8 terjadi pola pengendapan yang berbeda, sedimen lebih banyak mengendap di bagian hulu waduk, operasi waduk pada SB8 menghasilkan muka air waduk yang lebih tinggi
				SB8	
	SB9				

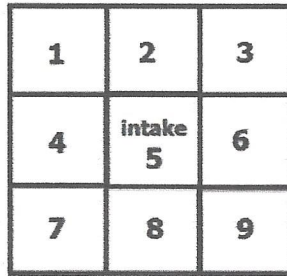
Dengan melihat lokasi sel (Gambar 4), perubahan lama waktu penggelontoran, awal waktu penggelontoran dan fungsi tujuan waduk pada Sistem Waduk Lama tidak berpengaruh pada pengendapan sedimen disekitar intake (Gambar 5). Perubahan lama waktu penggelontoran dan awal waktu penggelontoran pada Sistem Waduk Baru tidak berpengaruh pada pengendapan sedimen disekitar intake (Gambar 6), sedangkan perubahan fungsi tujuan pada Sistem Waduk Baru berpengaruh pada pengendapan sedimen di sekitar intake, pada SB9 pengendapan sedimen di sekitar intake lebih tinggi daripada SB1 dan SB8. Pengendapan sedimen di intake dan sekitar intake (Gambar 7 dan Gambar 8) pada Sistem Waduk Lama lebih tinggi dari pada pengendapan sedimen pada Sistem Waduk Baru. Seperti halnya hasil penelitian dari JICA (2007b) dan Sardi (2008) bahwa dengan dibangunnya Waduk Tampungan Sedimen maka sedimentasi di sekitar intake berkurang.



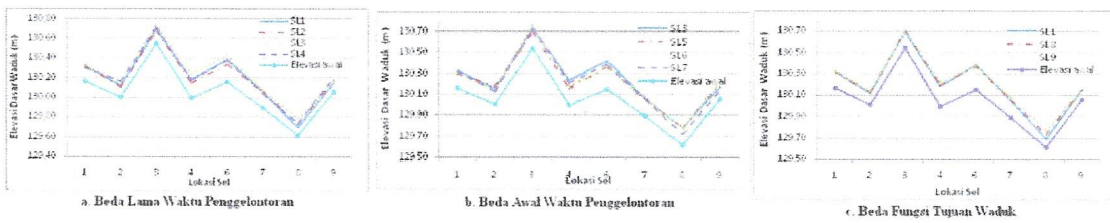
Gambar 2. Hasil Pola Sedimentasi Waduk Berdasarkan Skenario Operasi Waduk



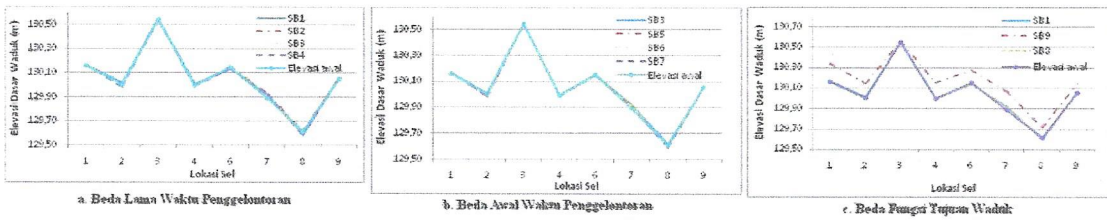
Gambar 3. Hasil Pola Sedimentasi Waduk di Sekitar Intake dan Muara Sungai Keduang Berdasarkan Skenario Operasi Waduk



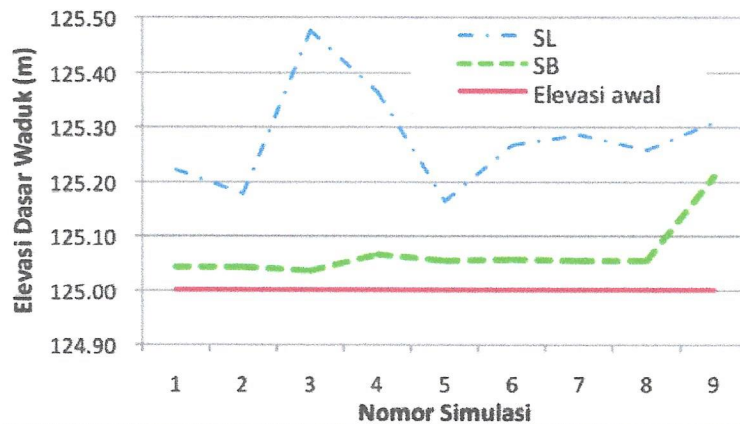
Gambar 4. Sketsa sel di sekitar intake



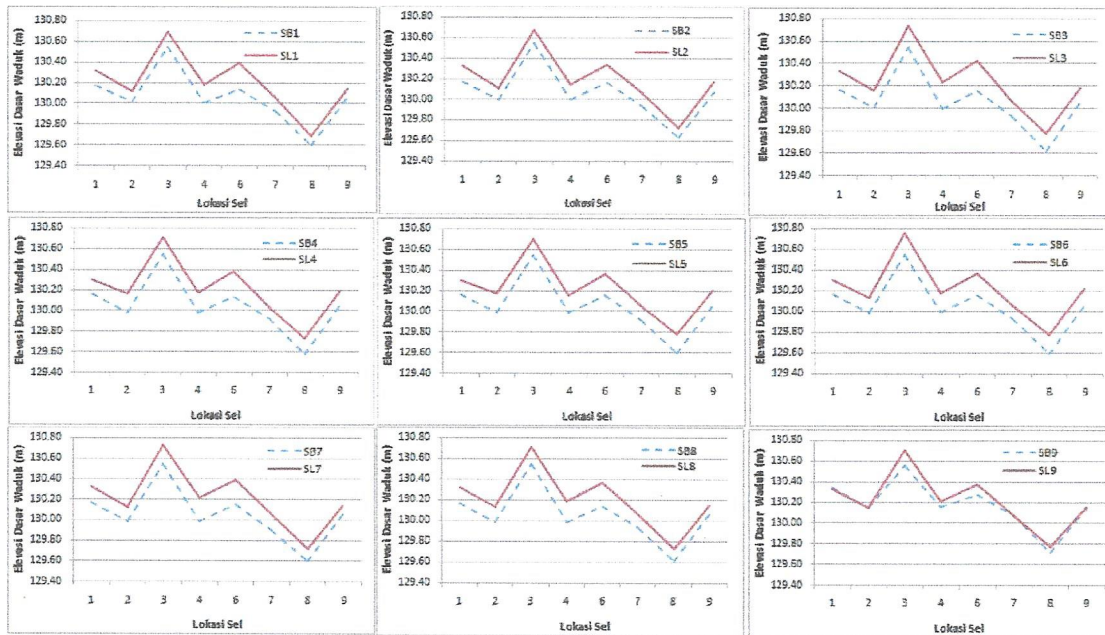
Gambar 5. Pengendalian di Sekitar Intake Berdasarkan Skenario Operasi Waduk Pada Sistem Waduk Lama



Gambar 6. Pengendalian di Sekitar Intake Berdasarkan Skenario Operasi Waduk Pada Sistem Waduk Baru



Gambar 7. Pengendalian di Intake Berdasarkan Sistem Waduk Lama dan Sistem Waduk Baru



Gambar 8. Pengendapan di Sekitar Intake Berdasarkan Sistem Waduk Lama dan Sistem Waduk Baru

KESIMPULAN

Perubahan lama waktu penggelontoran, awal waktu penggelontoran dan fungsi tujuan waduk menghasilkan pelepasan dan tinggi muka air waduk yang berbeda-beda.

Pola pengendapan sedimen Waduk Wonogiri sangat dipengaruhi oleh elevasi muka air waduk yang dihasilkan selama dilakukan operasi waduk.

Perubahan sistem waduk berpengaruh pada pola pengendapan sedimen di sekitar muara tiap anak sungai Waduk Wonogiri.

Pengendapan sedimen di intake dan sekitar intake pada Sistem Waduk Lama lebih tinggi dari pada pengendapan sedimen pada Sistem Waduk Baru.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Perum Jasa Tirta I dan BBWS Bengawan Solo yang telah memberikan dukungan data untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Hadihardaja, I.K., 2009. Decision Support System for Optimal Reservoir Operation Modeling Within Sediment Deposition Control, *Water Science & Technology*, Vol. 59(3):479-489.
- JICA, 2007a. *Volume I : Executive Summary The Study On Countermeasures For Sedimentation in The Wonogiri Multipurpose Dam Reservoir In The Republic Of Indonesia*, Dirjen SDA Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia.
- JICA, 2007b. *Volume III : Supporting Report I The Study On Countermeasures For Sedimentation in The Wonogiri Multipurpose Dam Reservoir In The Republic Of Indonesia*, Dirjen SDA Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia.
- Morris, G.L., & Fan J., 1997. *Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*, McGraw Hill, USA.
- Nicklown, J.W., and Mays, L.W., 2000. Optimization of Multiple Reservoir Network for Sedimentation Control, *Journal of hydraulic Engineering*, Vol. 126(4) : 232-242.
- Petkovsek, G. and Roca, M., 2014. Impact of Reservoir Operation On Sediment Deposition, *Proceedings of ICE-Water Management*, 167(WM10), pp. 577-584.
- Sardi, Kironoto, B.A., dan Jayadi, R., 2008. Kajian Penanganan Sedimentasi Dengan Waduk Penampung Sedimen Pada Bendungan Serbaguna Wonogiri, *Forum Teknik Sipil*, No. XVIII halaman 879-887.