

**PEMBILASAN SEDIMEN PADA TAMPUNGAN TIPE
MEMANJANG DI WADUK WLINGI - INDONESIA**

DISERTASI



Oleh:

**Slamet Lestari
2015832004**

Promotor:

Prof. Robertus Wahyudi Triweko, Ph.D.

Ko-Promotor:

Doddi Yudianto, Ph.D.

Penguji:

Dr. Ir. Arie Setiadi Moerwanto, M.Sc.

Salahudin Gozali, Ph.D.

Joko Nugroho, Ph.D.

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
2021**

HALAMAN PENGESAHAN

**PEMBILASAN SEDIMEN PADA TAMPUNGAN TIPE MEMANJANG DI
WADUK WLINGI - INDONESIA**



Oleh :

**Slamet Lestari
2015832004**

**Telah Dinyatakan Lulus Studi dari Program Teknik Sipil
Universitas Katolik Parahyangan
Dalam Ujian Disertasi Terbuka
Pada Hari/Tanggal:
Jumat, 26 Februari 2021**

Promotor:

Prof. Robertus Wahyudi Triweko, Ph.D.

Ko-Promotor:

Doddi Yudianto, Ph.D.

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
2021**

PEMBILASAN SEDIMEN PADA TAMPUNGAN TIPE MEMANJANG DI WADUK WLINGI – INDONESIA

Slamet Lestari (NPM: 2015832004)
Promotor: Prof. Robertus Wahyudi Triweko, Ph.D.
Ko-Promotor: Doddi Yudianto, Ph.D.
Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Katolik Parahyangan
Bandung
Februari 2021

ABSTRAK

Permasalahan utama yang dihadapi dalam pengelolaan waduk adalah sedimentasi yang mengurangi kapasitas tampung waduk. Salah satu upaya yang dapat dilakukan mengatasi permasalahan sedimentasi di waduk adalah pembilasan sedimen. Studi ini ditujukan untuk memodelkan mekanisme pembilasan sedimen Waduk Wlingi dan menentukan pola operasi pintu pelimpah dalam rangka meningkatkan efisiensi pembilasan sedimen di Waduk Wlingi-Indonesia, dengan metode uji model fisik dan numerik. Berdasarkan hasil analisis diketahui saat pembilasan, terjadi dua mekanisme penggerusan sedimen yaitu retrogresif dan progresif. Proses gerusan retrogresif merupakan awal dari terbilasnya sedimen yang dipicu adanya penurunan elevasi muka air di batas hilir, yang membentuk alur aktif dengan elevasi terdalam di batas hilir mendekati elevasi pelimpah hilir dengan besar rasio tegangan geser minimum 100. Proses gerusan ini menghasilkan volume sedimen terbilas lebih besar dibanding hasil pembilasan progresif. Gerusan retrogresif akan berubah menjadi gerusan progresif jika sudah terjadi titik balik nilai tegangan geser dari naik menjadi turun di seluruh segmen, dan ditandai terbentuk hanya satu kemiringan di sepanjang alur waduk. Semakin besar debit pembilasan akan semakin cepat terbentuk alur aktif dan semakin cepat gerusan retrogresif merambat ke arah hulu, serta mempercepat terjadinya peralihan dari gerusan retrogresif ke progresif. Ada Empat parameter utama yang mempengaruhi proses penggerusan sedimen ini yaitu parameter debit, lebar bukaan pintu pembilas, rasio tegangan geser, dan waktu. Selama pembilasan diketahui pola operasi pintu kondisi aliran bebas memberikan hasil pembilasan yang lebih baik dibanding kondisi aliran tertahan. Untuk kondisi volume total air yang tersedia di Waduk Wlingi kurang dari 15 juta m^3 pilihan debit 100 m^3/s menjadi pilihan pembilasan yang paling optimum, sedangkan untuk volume lebih dari 15 juta m^3 maka pilihan pembilasan dengan debit 400 m^3/s menjadi pilihan yang paling baik. Jika volume total sedimen dan waktu sebagai pertimbangan utama, maka pilihan pembilasan dengan debit Q400 m^3/s menjadi pilihan paling optimum. Hasil perhitungan volume sedimen terbilas menggunakan Persamaan Fan & Jiang menunjukkan hasil mendekati analisis model numerik, jika menggunakan kemiringan energi rata-rata antara segmen hulu dan hilir. Untuk Persamaan Xia, agar didapatkan hasil yang mendekati hasil analisis numerik diperlukan penyesuaian nilai erodibilitas yang berubah sesuai dengan besarnya debit pembilasan. Persamaan Guozhen memberikan hasil lebih kecil dari hasil analisis model numerik pembilasan Waduk Wlingi yang mempunyai tampungan memanjang. Persamaan Atmojo juga menunjukkan hasil di bawah hasil analisis numerik karena diameter sedimen di Waduk Wlingi jauh lebih kecil dibanding dengan asumsi penurunan Persamaan Atmojo. Proses perubahan dasar alur waduk secara memanjang selama pembilasan mendekati bentuk segitiga. Volume sedimen terbilas dapat diperkirakan dengan perkalian luas penampang memanjang tersebut dengan lebar total pintu pelimpah.

Kata Kunci: sedimentasi, tegangan geser, kemiringan energi, retrogresif, progresif

**SEDIMENT FLUSHING OF A LONG STORAGE TYPE RESERVOIR IN
WLINGI – INDONESIA**

Slamet Lestari (NPM: 2015832004)
Promotor: Prof. Robertus Wahyudi Triweko, Ph.D.
Co-Promotor: Doddi Yudianto, PhD.
Civil Engineering Doctoral Program
Faculty of Engineering
Parahyangan Catholic University
Bandung
February 2021

ABSTRACT

The main challenge commonly faced in dam management worldwide is sedimentation, which reduces the carrying capacity of dams. One of the ways to overcome the problem of sedimentation in dams is sediment flushing. This study was conducted to determine the relationship among the three parameters during the flushing of Wlingi Dam in Indonesia using physical and numerical model tests. Based on the analysis, there are two scouring mechanisms, namely retrogressive and progressive. The retrogressive scouring is the beginning of sediment flushing which is triggered by a decrease in the water level at the downstream boundary, which forms an active channel with the deepest elevation at the downstream boundary approaching the downstream spillway elevation with a minimum shear stress ratio of 100. This scouring process results in a larger volume of flushed sediment than that of the progressive flushing. The retrogressive scouring will turn into a progressive one if shear stress reversal occurs, from rising to falling, along the segment, marked by the formation of only one slope along the groove. The greater the flushing discharge, the faster the active groove will be formed and the faster the retrogressive scour will propagate upstream, which will also accelerate the transition from retrogressive to progressive scouring. . There are four main parameters that influence sediment scouring, namely discharge, flushing gate opening width, shear stress ratio, and time. During the flushing, it is known that the opening gates with free flow condition gives better result of sediment flushing than restrained flow. For the condition that total volume of water is less than 15 M m³ the option discharge 100 m³/s is the best option, while for total volume more than 15 M m³ flushing with discharge 400 m³/s is the best choice. If the total sediment volume and time are the main considerations, flushing with discharge 400 m³/s is the optimum choice. The result calculation using Fan & Jiang equation is closest to results of numerical analysis when using the average of energy slope as the variable. For the Xia equation, in order to obtain results, it is necessary to adjust the erodibility value which changes according discharge. The Guozhen equation gives smaller results than results of numerical modelling on the Wlingi Reservoir which has long storage type. The Atmojo equation also shows the results below of numerical analysis because the sediment diameter in Wlingi is much smaller than the assumed reduction in Atmojo equation. The process of changing bottom level of reservoir is triangular in shape. Total volume of sediment flushed can be estimated by multiplying the area of long section with total width of flushing gates.

Key words: sedimentation, shear stress, energy slope, retrogressive, progressive

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya dapat diselesaikan penulisan disertasi ini. Laporan disertasi ini disiapkan sebagai salah satu persyaratan untuk menempuh Ujian Terbuka Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan.

Judul disertasi ini adalah **Pembilasan Sedimen pada Tampungan Tipe Memanjang di Waduk Wlingi – Indonesia**. Penelitian pada disertasi ini membahas tentang mekanisme pembilasan sedimen di Waduk Wlingi dan menentukan pola operasi pintu pelimpah dalam rangka meningkatkan efisiensi pembilasan sedimen dengan menggunakan model numerik dan model fisik. Dari hasil penelitian ini didapatkan gambaran antara lain: pola operasi pintu yang optimum untuk pembilasan, proses penggerusan yang terjadi selama pembilasan seiring perubahan waktu dan lokasi, optimasi pembilasan yang dapat dilakukan dengan pertimbangan volume air dan waktu yang tersedia serta target volume sedimen yang akan dibilas, pemilihan persamaan dan variabel yang dapat digunakan berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, dan pengembangan cara perhitungan sebagai estimasi awal volume sedimen yang dapat dibilas.

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu penyusunan disertasi ini, antara lain kepada yang terhormat:

1. Bapak Prof. Robertus Wahyudi Triweko, Ph.D. dan Bapak Doddi Yudianto, Ph.D. selaku Promotor dan Ko-Promotor, yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan sepenuh hati selama penyusunan disertasi ini.
2. Bapak Arie Setiadi Moerwanto, MSc., Ph.D, yang telah memberikan kesempatan studi, membimbing, dan sekaligus sebagai tim penguji disertasi.
3. Bapak Salahudin Gozali, Ph.D. dan Bapak Joko Nugroho, Ph.D., selaku tim penguji dan memberikan banyak masukan untuk perbaikan disertasi selama ini.
4. Bapak Aswin Lim, Ph.D. selaku Ketua Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, beserta staf terkait, yang telah banyak membantu dalam pengurusan studi selama ini.

5. Rekan sejawat di Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan, antara lain: Ibu Yiniarti E. K, Ibu Sri Hetty S., Bapak Ririn Rimawan, Bapak Marta H., Bapak James Zulfan, Bapak Adang Hidayat (alm), Bapak Seno Utomo, Bapak M. Untung, Bapak Tuham, Ibu Petty Kartina, Ibu Tsani, dan petugas laboratorium yang telah membantu proses penyelidikan model fisik dan model numerik.
6. Bapak Airlangga Mardjono yang telah memberikan dukungan waktu dan kesempatan untuk menyelesaikan disertasi ini.
7. Rekan-rekan sejawat di Direktorat Bendungan dan Danau yang selalu membantu dalam penyusunan disertasi.
8. Direktur PT. Perum Jasa Tirta I beserta jajarannya yang selalu memberikan dukungan data selama penelitian.
9. Ibu Suyarni dan Bapak Ali Mundji (alm), yang merupakan orang tua penulis, yang telah dan selalu mendoakan penulis agar dapat menuntut ilmu setinggi mungkin.
10. Ibu Indah Rubiyanti, Firmansyah Fathur Rahman, dan Alif Abdurrahman Ali, adalah istri dan putra-putra penulis, yang setiap saat selalu mendukung dalam penyelesaian studi ini.
11. Keluarga besar penulis, khususnya Ibu Sri Rejeki dan Bapak Wahyu Supriyanto yang selalu memberikan doa dan dukungannya.

Penulis berharap agar hasil penelitian yang telah didapatkan dapat bermanfaat baik untuk penerapan di lapangan maupun untuk perkembangan ilmu pengetahuan pada waktu-waktu yang akan datang.

Bandung, 26 Februari 2021

Slamet Lestari
NPM: 2015832004

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	3
1.3. Lokasi Penelitian	5
1.4. Tujuan dan Batasan Penelitian	8
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Strategi Pengelolaan Sedimentasi di Waduk	9
2.2. Pemanfaatan Model Numerik dan Fisik	18
2.3. Proses Pembilasan Sedimentasi di Waduk	20
2.4. Parameter-Parameter Utama yang Mempengaruhi Pembilasan Sedimen	23
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	28
3.1. Kerangka Teoretis	28
3.2. Metode Pengumpulan Data Lapangan	33
3.3. Analisis Model Numerik	38
3.4. Analisis Model Fisik	48
3.5. Analisis Sensitivitas Parameter Hidraulik dan Efisiensi Pembilasan	56
BAB 4. PENGENDALIAN SEDIMEN PADA WADUK WLINGI	58
4.1. Data Pengelolaan Sedimen yang Telah Dilakukan di Waduk Wlingi	58
4.2. Data Debit dari Waduk Sutami	63
4.3. Pengukuran Bathimetri Waduk Wlingi	64
4.4. Pengambilan Material Sedimen di Genangan Waduk Wlingi	68
4.5. Elevasi Muka Air dan Pola Operasi Pintu Pelimpah Waduk Wlingi	71

4.6. Pengumpulan Data Bangunan di Sekitar Pelimpah dan Dokumentasi Pola Aliran saat Pembilasan	73
BAB 5. ANALISIS DAN PEMBAHASAN	78
5.1. Analisis Model Fisik	78
5.1.1. Kalibrasi Model Fisik	79
5.1.2. Pengujian Pola Operasi Pintu	81
5.2. Analisis Model Numerik	101
5.2.1. Analisis Kalibrasi dan Validasi Model Numerik	101
5.2.2. Analisis Model Numerik Pembilasan dengan Pasok Debit dari Waduk Sutami 0 m ³ /s	105
5.2.3. Analisis Model Numerik Pembilasan Sedimen dengan Pasok Debit dari Waduk Sutami sebesar 100 m ³ /s	110
5.2.4. Analisis Model Numerik Pembilasan Sedimen dengan Debit dari Waduk Sutami sebesar 200 m ³ /s	120
5.2.5. Analisis Model Numerik Pembilasan Sedimen dengan Debit dari Waduk Sutami sebesar 400 m ³ /s	129
5.3. Analisis Mekanisme Retrogresif dan Progresif	137
5.4. Analisis Efisiensi Pembilasan	141
5.4.1. Efisiensi Pembilasan Debit dari Waduk Sutami 0 m ³ /s	141
5.4.2. Efisiensi Pembilasan Debit dari Waduk Sutami 100, 200, dan 400 m ³ /s	143
5.5. Analisis Sensitivitas Parameter Pembilasan terhadap Persamaan Penelitian-Penelitian Sebelumnya	145
5.5.1. Analisis Sensitivitas Parameter Utama Pembilasan terhadap Persamaan Fan dan Jiang	146
5.5.2. Analisis Sensitivitas Parameter Utama Pembilasan terhadap Persamaan Xia	150
5.5.3. Analisis Sensitivitas Parameter Utama Pembilasan terhadap Persamaan Guozhen dkk.	155
5.5.4. Analisis Sensitivitas Parameter Utama Pembilasan terhadap Persamaan Atmojo	157
5.6. Penyederhanaan Perhitungan Volume Sedimen Terbilas	166

BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN	176
6.1. Kesimpulan	176
6.2. Saran	179
DAFTAR PUSTAKA	



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Lokasi penelitian	6
Gambar 1.2.	Potongan melintang pintu pelimpah	7
Gambar 2.1.	Strategi pengelolaan sedimen waduk (Kondolf dkk. 2014)	10
Gambar 2.2.	Alternatif pengelolaan sedimentasi di waduk (Morris 2015)	11
Gambar 2.3.	Pemasangan tanggul penutup dan pelimpah baru di Waduk Wonogiri (Wulandari dkk. 2014)	12
Gambar 2.4.	Skematisasi pemindahan sedimen cara <i>flushing</i> (Kondolf dkk. 2014)	15
Gambar 2.5.	Pengelolaan sedimen cara <i>sluicing</i> (Kondolf dkk. 2014)	16
Gambar 2.6.	Pemindahan sedimen cara mekanik dan pemanfaatan beda tinggi hidraulik (Shrestha, 2012)	17
Gambar 2.7.	Proses pembilasan pada waduk (Morris dan Fan 2010)	22
Gambar 2.8.	Grafik hubungan antara tegangan geser dengan diameter butir sedimen (Shield 1936)	23
Gambar 2.9.	Waduk Xanmensia di China (Sanmenxia-Bing images)	24
Gambar 2.10.	Uji Model Hidraulik di laboratorium (Isaac dan Eldho 2015)	24
Gambar 2.11.	Pengaruh debit bilas dan waktu pembilasan terhadap volume sedimen terbilas (Isaac dan Eldho 2015)	27
Gambar 3.1.	Kerangka teoretis	31
Gambar 3.2.	Diagram alir tahapan penelitian	32
Gambar 3.3.	Sistem pembangkit listrik dan pelimpah di Waduk Sutami, tempat keluarnya debit air ke Waduk Wlingi	33
Gambar 3.4.	Alat ukur <i>echosounder</i>	35
Gambar 3.5.	Pengukuran bathimetri dan jalur pengambilan data	35
Gambar 3.6.	Alat pengambil sampel material sedimen di dasar waduk	36

Gambar 3.7.	Lokasi penempatan alat ukur AWLR	37
Gambar 3.8.	Batasan lokasi model fisik	51
Gambar 3.9.	Bangunan air di hilir Waduk Wlingi	52
Gambar 3.10.	Alat ukur debit Thomson	53
Gambar 3.11.	Alat ukur meteran taraf	54
Gambar 3.12.	Alat ukur kecepatan untuk uji model fisik	54
Gambar 3.13.	Alat bantu pelampung untuk mengetahui pola aliran uji model fisik	55
Gambar 3.14.	Tata letak alat ukur dan pengambilan data uji model fisik	55
Gambar 4.1.	Rangkaian <i>check dam</i> pada anak-anak sungai Waduk Wlingi	59
Gambar 4.2.	Tata letak saluran bypass Waduk Wlingi	59
Gambar 4.3.	Kondisi aliran air di anak sungai yang masuk Waduk Wlingi pada waktu pembilasan	61
Gambar 4.4.	Pola operasi pintu saat pembilasan Waduk Wlingi	61
Gambar 4.5.	Kondisi aliran dan sedimen yang keluar dari pintu pelimpah saat pembilasan	62
Gambar 4.6.	Fluktuasi debit air dari Waduk Sutami selama pembilasan 13 – 15 April 2017	63
Gambar 4.7.	Fluktuasi debit air dari Waduk Sutami selama pembilasan 27 – 30 April 2018	64
Gambar 4.8.	Layout hasil pengukuran bathimetri	65
Gambar 4.9.	Profil potongan memanjang tampungan waduk sebelum dan sesudah pembilasan pengukuran lapangan tahun 2017	65
Gambar 4.10.	Profil potongan memanjang tampungan waduk sebelum dan sesudah pembilasan pengukuran lapangan tahun 2018	66

Gambar 4.11. Profil potongan melintang di genangan bagian hulu (Sta. 8039) sebelum dan sesudah pembilasan tahun 2017	66
Gambar 4.12. Profil potongan melintang di genangan bagian tengah (Sta. 4964) sebelum dan sesudah pembilasan tahun 2017	67
Gambar 4.13. Profil potongan melintang di genangan bagian hilir (Sta. 488) sebelum dan sesudah pembilasan tahun 2017	67
Gambar 4.14. Lokasi pengambilan material sedimen di genangan Waduk Wlingi	68
Gambar 4.15. Gradasi material sedimen di Lokasi A ($D_{50} = 0,05\text{mm}$)	69
Gambar 4.16. Gradasi material sedimen di Lokasi B ($D_{50} = 0,025\text{mm}$)	69
Gambar 4.17. Gradasi material sedimen di Lokasi C ($D_{50} = 0,022\text{mm}$)	69
Gambar 4.18. Gradasi material sedimen di Lokasi D ($D_{50} = 0,051\text{mm}$)	70
Gambar 4.19. Gradasi material sedimen di Lokasi E ($D_{50} = 0,022\text{mm}$)	70
Gambar 4.20. Gradasi material sedimen di Lokasi F ($D_{50} = 0,058\text{mm}$)	70
Gambar 4.21. Rekaman elevasi muka air di pintu pelimpah pembilasan 13 – 15 April tahun 2017	71
Gambar 4.22. Rekaman elevasi muka air di pintu pelimpah selama pembilasan 27 – 30 April tahun 2018	73
Gambar 4.23. Kondisi aliran dan pola gerusan alur waduk saat pembilasan	76
Gambar 4.24. Kondisi aliran dan pola gerusan di sekitar bangunan pelimpah saat pembilasan	76
Gambar 4.25. Kondisi sedimen yang terbilas di Waduk Wlingi	77
Gambar 4.26. Pemanfaatan alat mekanik untuk membantu pembilasan di bagian hilir waduk	77
Gambar 5.1. Pembuatan model fisik Waduk Wlingi di Laboratorium Hidrolika Balai Litbang Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan, Puslitbang Sumber Daya Air di Bandung	78

Gambar 5.2.	Hasil kalibrasi model fisik	80
Gambar 5.3.	Perbandingan pola aliran antara model fisik dan kondisi lapangan	80
Gambar 5.4.	Grafik korelasi debit, tinggi bukaan pintu, dan elevasi muka air operasi 1 pintu kondisi aliran tertahan	81
Gambar 5.5.	Grafik korelasi debit, tinggi bukaan pintu, dan elevasi muka air operasi 2 pintu kondisi aliran tertahan	82
Gambar 5.6.	Grafik korelasi debit, tinggi bukaan pintu, dan elevasi muka air operasi 3 pintu kondisi aliran tertahan	82
Gambar 5.7.	Grafik korelasi debit, tinggi bukaan pintu, dan elevasi muka air operasi 4 pintu kondisi aliran tertahan	83
Gambar 5.8.	Grafik korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 1 pintu kondisi aliran bebas	84
Gambar 5.9.	Grafik korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 2 pintu kondisi aliran bebas	84
Gambar 5.10.	Grafik korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 3 pintu kondisi aliran bebas	85
Gambar 5.11.	Grafik korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 4 pintu kondisi aliran bebas	85
Gambar 5.12.	Grafik perbandingan korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 1 pintu untuk operasi pintu tertahan dan aliran bebas	86
Gambar 5.13.	Grafik perbandingan korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 2 pintu untuk operasi pintu tertahan dan aliran bebas	87
Gambar 5.14.	Grafik perbandingan korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 3 pintu untuk operasi pintu tertahan dan aliran bebas	87
Gambar 5.15.	Grafik perbandingan korelasi debit dan elevasi muka air pada operasi 4 pintu untuk operasi pintu tertahan dan aliran bebas	88

Gambar 5.16. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 1,25 m, elevasi muka air di genangan +156,00 m, dan kondisi aliran tertahan	90
Gambar 5.17. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 1,25 m, elevasi muka air di genangan +158,00 m, dan kondisi aliran tertahan	90
Gambar 5.18. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 1,25 m, elevasi muka air di genangan +160,00 m, dan kondisi aliran tertahan	91
Gambar 5.19. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 1,25 m, elevasi muka air di genangan +162,00 m, dan kondisi aliran tertahan	91
Gambar 5.20. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 1,25 m, elevasi muka air di genangan +163,00 m, dan kondisi aliran tertahan	92
Gambar 5.21. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 2,50 m, elevasi muka air di genangan +158,00 m, dan kondisi aliran tertahan	93
Gambar 5.22. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 2,50 m, elevasi muka air di genangan +160,00 m, dan kondisi aliran tertahan	93
Gambar 5.23. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 2,50 m, elevasi muka air di genangan +162,00 m, dan kondisi aliran tertahan	94
Gambar 5.24. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 2,50 m, elevasi muka air di genangan +163,00 m, dan kondisi aliran tertahan	94
Gambar 5.25. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 3,75 m, elevasi muka air di genangan +160,00 m, dan kondisi aliran tertahan	95

Gambar 5.26. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 3,75 m, elevasi muka air di genangan +162,00 m, dan kondisi aliran tertahan	95
Gambar 5.27. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 3,75 m, elevasi muka air di genangan +163,00 m, dan kondisi aliran tertahan	96
Gambar 5.28. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 5,00 m, elevasi muka air di genangan +162,00 m, dan kondisi aliran tertahan	96
Gambar 5.29. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 5,00 m, elevasi muka air di genangan +163,00 m, dan kondisi aliran tertahan	97
Gambar 5.30. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 1,25 m dan kondisi aliran bebas	98
Gambar 5.31. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 2,50 m dan kondisi aliran bebas	98
Gambar 5.32. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 3,75 m dan kondisi aliran bebas	99
Gambar 5.33. Pola dan distribusi kecepatan tinggi bukaan pintu 5,00 m dan kondisi aliran bebas	99
Gambar 5.34. Perbandingan pola dan distribusi kecepatan hasil pembilasan pada kondisi aliran tertahan dan bebas untuk debit inflow 200 m ³ /s	100
Gambar 5.35. Hasil kalibrasi perbandingan antara hasil pengukuran lapangan dengan hasil analisis model numerik pembilasan tahun 2017	103
Gambar 5.36. Hasil validasi perbandingan antara hasil pengukuran lapangan dengan hasil analisis model numerik pembilasan tahun 2018	104
Gambar 5.37. Pemanfaatan alat mekanik saat pembilasan Waduk Wlingi	105

Gambar 5.38. Pola perubahan dasar alur waduk debit inflow pembilasan 0 m ³ /s	106
Gambar 5.39. Perubahan kumulatif volume sedimen terbilas selama pembilasan untuk debit inflow 0 m ³ /s	107
Gambar 5.40. Perubahan efisiensi pembilasan untuk debit inflow 0 m ³ /s	107
Gambar 5.41. Perbedaan pola dan besaran tegangan geser segmen hulu, tengah, dan hilir selama pembilasan untuk debit inflow 0 m ³ /s	109
Gambar 5.42. Alur genangan waduk awal pembilasan untuk debit inflow 0 m ³ /s	109
Gambar 5.43. Alur genangan waduk akhir pembilasan untuk debit inflow 0 m ³ /s	110
Gambar 5.44. Perubahan alur bathimetri waduk sampai akhir pembilasan untuk debit inflow 0 m ³ /s selama 38 jam	111
Gambar 5.45. Perubahan elevasi muka air dan lebar alur selama pembilasan dengan debit inflow 100 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0,5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	112
Gambar 5.46. Profil perubahan elevasi muka air dan dasar alur dengan debit inflow 100 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0,5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	113
Gambar 5.47. Perubahan dasar alur selama pembilasan dengan debit inflow 100 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0,5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	114
Gambar 5.48. Perubahan lebar alur selama pembilasan dengan debit inflow 100 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0,5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	116

- Gambar 5.49. Tegangan geser segmen hilir, tengah, dan hulu selama pembilasan dengan debit inflow $100 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 118
- Gambar 5.50. Efisiensi pembilasan dengan debit inflow $100 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 119
- Gambar 5.51. Perubahan alur bathimetri waduk sampai akhir pembilasan untuk debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$ selama 72 jam 121
- Gambar 5.52. Perubahan elevasi muka air dan lebar alur selama pembilasan dengan debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$,
 $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 122
- Gambar 5.53. Profil perubahan elevasi muka air dan dasar alur dengan debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$,
persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 123
- Gambar 5.54. Perubahan dasar alur selama pembilasan dengan debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 124
- Gambar 5.55. Perubahan lebar alur selama pembilasan dengan debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 125
- Gambar 5.56. Tegangan geser segmen hilir, tengah, dan hulu selama pembilasan dengan debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 127
- Gambar 5.57. Efisiensi pembilasan dengan debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 127

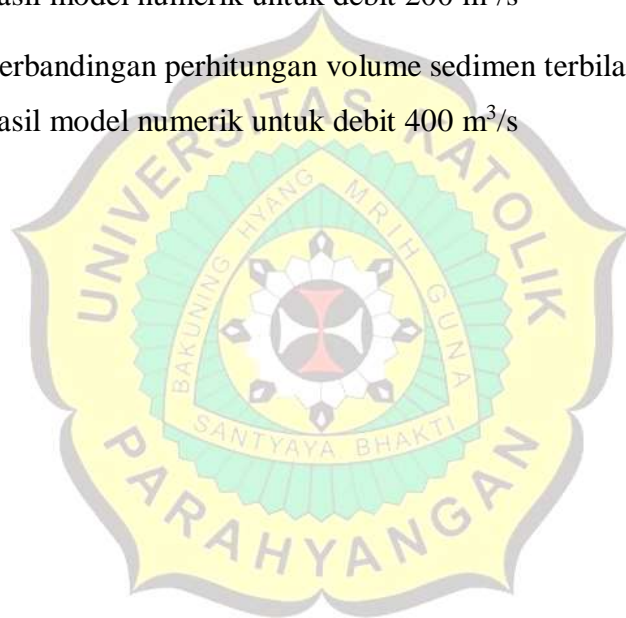
Gambar 5.58. Perubahan alur bathimetri waduk sampai akhir pembilasan untuk debit inflow dan outflow 400 m ³ /s selama 72 jam	130
Gambar 5.59. Perubahan elevasi muka air dan lebar alur selama pembilasan dengan debit inflow 400 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0.5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	131
Gambar 5.60. Profil perubahan elevasi muka air dan dasar alur dengan debit inflow 400 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0.5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	132
Gambar 5.61. Perubahan dasar alur selama pembilasan dengan debit inflow 400 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0.5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	133
Gambar 5.62. Perubahan lebar alur selama pembilasan dengan debit inflow 400 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0.5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	134
Gambar 5.63. Tegangan geser segmen hilir, tengah, dan hulu selama pembilasan debit inflow 400 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0.5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	136
Gambar 5.64. Efisiensi pembilasan dengan debit inflow 400 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0.5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	136
Gambar 5.65. Penyederhanaan pola gerusan retrogresif dan progresif selama pembilasan sedimen Waduk Wlingi	140
Gambar 5.66. Hubungan antara volume total sedimen yang terbilas terhadap waktu untuk debit inflow 0 m ³ /s, D _{material} = 0,09 mm, C = 30 m ^{0.5} /s, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata	142

- Gambar 5.67. Hubungan antara volume total sedimen yang terbilas terhadap volume total air yang digunakan untuk debit inflow $0 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 143
- Gambar 5.68. Hubungan antara efisiensi pembilasan terhadap waktu untuk debit inflow $0 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 143
- Gambar 5.69. Hubungan antara volume total sedimen yang terbilas terhadap volume total air untuk debit inflow 100, 200, dan $400 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 144
- Gambar 5.70. Hubungan antara volume total sedimen yang terbilas terhadap waktu untuk debit inflow 100, 200, dan $400 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 145
- Gambar 5.71. Hubungan antara efisiensi pembilasan terhadap waktu untuk debit inflow 100, 200, dan $400 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{\text{material}} = 0,09 \text{ mm}$, $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, persamaan Engelund-Hansen, kondisi 4 pintu dibuka merata 145
- Gambar 5.72. Nilai kemiringan energi debit inflow $100 \text{ m}^3/\text{s}$ selama pembilasan 147
- Gambar 5.73. Nilai kemiringan energi debit inflow $200 \text{ m}^3/\text{s}$ selama pembilasan 147
- Gambar 5.74. Nilai kemiringan energi debit inflow $400 \text{ m}^3/\text{s}$ selama pembilasan 148
- Gambar 5.75. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit $100 \text{ m}^3/\text{s}$ persamaan Fan dan Jiang dengan hasil model numerik 149
- Gambar 5.76. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit $200 \text{ m}^3/\text{s}$ persamaan Fan dan Jiang dengan hasil model numerik 149

Gambar 5.77. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 400 m ³ /s persamaan Fan dan Jiang dengan hasil model numerik	150
Gambar 5.78. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 100 m ³ /s persamaan Xia dengan hasil model numerik	152
Gambar 5.79. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 200 m ³ /s persamaan Xia dengan hasil model numerik	152
Gambar 5.80. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 400 m ³ /s persamaan Xia dengan hasil model numerik	153
Gambar 5.81. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 200 m ³ /s persamaan Xia dengan hasil model numerik, kemiringan energi rerata, nilai erodibilitas 0,80	154
Gambar 5.82. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 400 m ³ /s persamaan Xia dengan hasil model numerik, kemiringan energi rerata, nilai erodibilitas 0,60	154
Gambar 5.83. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 100 m ³ /s persamaan Guozhen dengan hasil model numerik	156
Gambar 5.84. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 200 m ³ /s persamaan Guozhen dengan hasil model numerik	156
Gambar 5.85. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 400 m ³ /s persamaan Guozhen dengan hasil model numerik	157
Gambar 5.86. Besaran parameter kedalaman muka air untuk debit pembilasan 100 m ³ /s	158
Gambar 5.87. Besaran parameter tebal sedimen untuk debit pembilasan 100 m ³ /s	159
Gambar 5.88. Besaran parameter kecepatan aliran untuk debit pembilasan 100 m ³ /s	159
Gambar 5.89. Besaran parameter kedalaman muka air untuk debit pembilasan 200 m ³ /s	160

Gambar 5.90. Besaran parameter tebal sedimen untuk debit pembilasan 200 m ³ /s	160
Gambar 5.91. Besaran parameter kecepatan aliran untuk debit pembilasan 200 m ³ /s	161
Gambar 5.92. Besaran parameter kedalaman muka air untuk debit pembilasan 400 m ³ /s	161
Gambar 5.93. Besaran parameter tebal sedimen untuk debit pembilasan 400 m ³ /s	162
Gambar 5.94. Besaran parameter kecepatan aliran untuk debit pembilasan 400 m ³ /s	162
Gambar 5.95. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 100 m ³ /s persamaan Atmojo dengan hasil model numerik	163
Gambar 5.96. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 200 m ³ /s persamaan Atmojo dengan hasil model numerik	163
Gambar 5.97. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 400 m ³ /s persamaan Atmojo dengan hasil model numerik	164
Gambar 5.98. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 100 m ³ /s persamaan Atmojo dengan nilai parameter terbesar	165
Gambar 5.99. Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 200 m ³ /s persamaan Atmojo dengan nilai parameter terbesar	165
Gambar 5.100 Perbandingan volume sedimen hasil pembilasan debit 400 m ³ /s persamaan Atmojo dengan nilai parameter terbesar	166
Gambar 5.101 Skematisasi bentuk gerusan sedimen jam ke 0, 10, 20, 30, dan 38 debit 100 m ³ /s	168
Gambar 5.102 Luas gerusan penampang memanjang tiap tahap hasil perhitungan untuk debit 100 m ³ /s	168
Gambar 5.103 Skematisasi bentuk gerusan sedimen jam ke 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, dan 70 debit 200 m ³ /s	169

Gambar 5.104 Luas gerusan penampang memanjang tiap tahap hasil perhitungan untuk debit 200 m ³ /s	169
Gambar 5.105 Skematisasi bentuk gerusan sedimen jam ke 0, 10, 20, 30, dan 40 debit 400 m ³ /s	170
Gambar 5.106 Luas gerusan penampang memanjang tiap tahap hasil perhitungan untuk debit 400 m ³ /s	170
Gambar 5.107 Perbandingan perhitungan volume sedimen terbilas dengan hasil model numerik untuk debit 100 m ³ /s	171
Gambar 5.108 Perbandingan perhitungan volume sedimen terbilas dengan hasil model numerik untuk debit 200 m ³ /s	172
Gambar 5.109 Perbandingan perhitungan volume sedimen terbilas dengan hasil model numerik untuk debit 400 m ³ /s	172



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Rekaman pembangunan waduk di Indonesia	2
Tabel 1.2	Laju sedimentasi waduk di Indonesia	3
Tabel 1.3	Laju sedimentasi waduk di hilir pegunungan berapi di Indonesia	4
Tabel 2.1	Penelitian-penelitian angkutan sedimen	20
Tabel 3.1	Koefisien Kutter	45
Tabel 3.2	Berat jenis faktor konsolidasi	46
Tabel 3.3	Berat jenis inisial Lara-Pamberton	47
Tabel 3.4	Berat sedimen yang mengendap di waduk	47
Tabel 3.5	Hasil penurunan skala model fisik tanpa distorsi	50
Tabel 4.1	Hasil pembilasan sedimen Waduk Wlingi tahun 2016 sampai 2018	62
Tabel 4.2	Jenis dan komposisi ukuran butir material sedimen	68
Tabel 4.3	Pengamatan elevasi muka air dan pola operasi pintu saat pembilasan sedimen Waduk Wlingi tahun 2017	72
Tabel 4.4	Pengamatan elevasi muka air dan pola operasi pintu saat pembilasan sedimen Waduk Wlingi tahun 2018	74
Tabel 5.1	Hasil kalibrasi uji model fisik terhadap data lapangan	79
Tabel 5.2	Skenario pengujian model fisik kondisi aliran tertahan	89
Tabel 5.3	Skenario pengujian model fisik kondisi aliran bebas	98
Tabel 5.4	Ukuran diameter butir material sedimen di lapangan	102
Tabel 5.5	Volume sedimen terbilas dan air yang digunakan untuk debit inflow 100 m ³ /s	119
Tabel 5.6	Volume sedimen terbilas dan air yang digunakan untuk debit inflow 200 m ³ /s	128

Tabel 5.7	Koefisien erodibilitas material sedimen	151
Tabel 5.8	Hasil perhitungan volume sedimen terbilas dan hasil analisis numerik untuk debit 100 m ³ /s	173
Tabel 5.9	Hasil perhitungan volume sedimen terbilas dan hasil analisis numerik untuk debit 200 m ³ /s	173
Tabel 5.10	Hasil perhitungan volume sedimen terbilas dan hasil analisis numerik untuk debit 400 m ³ /s	174



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejarah pembangunan waduk pertama di Indonesia adalah Waduk Butak yang dibangun pada tahun 1902 di Propinsi Jawa Tengah. Sampai dengan tahun 2019 telah dibangun sebanyak 232 waduk yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Total kapasitas tampungan air rencana pada waduk yang telah dibangun sampai dengan tahun 2019 mencapai lebih dari 15 miliar m³.

Sebanyak 33 waduk telah dibangun sebelum kemerdekaan Indonesia, 113 waduk dibangun antara tahun 1946 sampai tahun 1997, dan 57 waduk dibangun periode tahun 1997 sampai 2014 (*Indonesian National Committee on Large Dam* 2014). Jumlah tersebut akan bertambah dengan adanya rencana pembangunan 70 bendungan yang ditargetkan selesai dibangun dari tahun 2015 sampai dengan 2024 (Kementerian PUPR 2017). Gambaran rekaman pembangunan waduk di Indonesia dari tahun 1900 sampai sekarang dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Berdasarkan data tersebut, dengan rata-rata penurunan kapasitas tampung sebesar 1,28% (Rohi dkk. 2013) per tahun, maka diperkirakan lebih dari 76% waduk yang ada di Indonesia dan telah dioperasikan lebih dari 20 tahun telah mengalami pengurangan kapasitas sebesar 25%, dan lebih dari 16% waduk telah mengalami pengurangan kapasitas sebesar $\geq 50\%$ akibat sedimentasi. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi laju erosi lahan antara lain: aktivitas tektonik dan vulkanik, kemiringan lahan, curah hujan, gangguan terhadap tutupan lahan akibat pertanian dan penebangan hutan (Milliman dan Meade 1983, Hidayat dkk. 2017).

Dampak langsung yang dirasakan adanya sedimentasi di waduk adalah berkurangnya volume tampungan. Jika sedimentasi waduk ini tidak dikelola dengan baik, maka dalam jangka waktu tertentu fungsi waduk akan jauh menurun.

Tabel 1.1 Rekaman Pembangunan Waduk di Indonesia

No	Tahun Awal Operasional	Umur	Jmlh Waduk	Jmlh Kumulatif	
		(th)	(bh)	(bh)	(%)
1	1900 - 1910	> 110	1	1	0,46
2	1910 - 1920	> 100	6	7	3,21
3	1920 - 1930	> 90	10	17	7,80
4	1930 - 1940	> 80	10	27	12,39
5	1940 - 1950	> 70	8	35	16,06
6	1950 - 1960	> 60	2	37	16,97
7	1960 - 1970	> 50	3	40	18,35
8	1970 - 1980	> 40	15	55	25,23
9	1980 - 1990	> 30	33	88	40,37
10	1990 - 2000	> 20	79	167	76,61
11	2000 - 2010	> 10	30	197	90,37
12	2010 - 2014	> 5	6	203	93,12
13	2014 - 2019	< 5	15	218	100,00
Total			218		
14	2019 - 2024	Progres	55		

Sumber : Inacold 2014, Direktorat Bendungan dan Danau 2021

Upaya pengendalian yang sudah banyak dilakukan adalah pembangunan pengendali sedimen di hulu waduk, sedangkan pembilasan sedimen yang mengendap untuk menjaga kapasitas tampungan belum banyak dilakukan akibat tidak tersedianya fasilitas pembilasan dan konflik kepentingan pemanfaatan air untuk kebutuhan lain (cadangan air baku dan PLTA). Beberapa bendungan yang tercatat telah melakukan upaya pembilasan sedimen antara lain Waduk Wlingi, Waduk Lodoyo, dan Waduk Mrica. Upaya pembilasan yang telah dilakukan oleh ketiga waduk tersebut mampu mempertahankan kapasitas tampung yang ada sampai saat ini.

1.2 Permasalahan

Gambaran permasalahan pengurangan kapasitas tampung waduk akibat sedimentasi dapat dilihat di beberapa negara di kawasan Asia, Afrika, dan Amerika. Tercatat kehilangan tampungan waduk di Jepang sebesar 0,15% per tahun, di India sebesar 0,5% per tahun, di China mencapai 2,3% per tahun (Liu dkk. 2001), Turki sebesar 1,5% per tahun, Afrika Selatan 0,34% per tahun, dan Amerika sebesar 0,22% per tahun, dengan rata-rata pengurangan kapasitas waduk di seluruh dunia mencapai 1% per tahun (Chaudhry dan Ur-Rahman 2012). Kecenderungan pengurangan kapasitas tampung waduk di dunia ini juga dapat dilihat, dari kapasitas tampung total sebesar 6000 km³ terjadi sedimentasi sebesar 31 km³ per tahun (Sumi dkk. 2004).

Permasalahan sedimentasi ini juga dihadapi dalam pengelolaan waduk di Indonesia. *Susilo* (2001) menyampaikan data hasil penelitian laju sedimentasi waduk di Indonesia berkisar antara 0,1% sampai 4,65% per tahun, seperti terlihat pada Tabel 1.2. Rata-rata pengurangan kapasitas per tahun waduk-waduk di Indonesia juga disampaikan oleh *Rohi dkk.* (2013) sebesar 1,28% per tahun, yang melebihi rata-rata pengurangan waduk-waduk di dunia. Beberapa waduk lainnya di Indonesia yang juga mengalami laju pengurangan kapasitas tampung melebihi rata-rata di dunia, yaitu Waduk Wonogiri sebesar 2,7% per tahun dan Waduk Sempor sebesar 1,64% per tahun (*Atmojo dkk.* 2013).

Tabel 1.2 Laju Sedimentasi Waduk di Indonesia

No	Nama Waduk	Pengurangan Kapasitas Waduk (% per tahun)
1	Jatiluhur	0,62
2	Cirata	0,20
3	Wadas Lintang	0,10
4	Mrica	4,65

Sumber : Susilo 2001

Gambaran sedimentasi terhadap waduk yang berada di hilir pegunungan berapi di Indonesia juga disampaikan oleh Hidayat (2018), seperti disampaikan pada Tabel 1.3.

Tabel 1.3 Laju Sedimentasi Waduk di Hilir Pegunungan Berapi di Indonesia

No	Nama Waduk	Pengurangan Kapasitas Waduk
		(% per tahun)
1	Sengguruh	0,37
2	Wlingi	0,54
3	Sutami	1,17
4	Selorejo	1,49
5	Lodoyo	1,64
6	Lahor	2,36
7	Bening	2,91
8	Wonorejo	7,99

Sumber : Hidayat, 2018

Memperhatikan hasil penelitian-penelitian tersebut diketahui besarnya pengurangan volume kapasitas tampung waduk di Indonesia karena sebagian besar daerah tangkapan waduk yang sudah terbangun berada area kipas aluvial gunung berapi. Pengurangan volume tampungan air secara langsung akan mengurangi potensi pemanfaatan air, antara lain berkurangnya suplai air baku ke masyarakat, berkurangnya daerah layanan irigasi, dan berkurangnya energi listrik yang dapat dibangkitkan.

Tantangan lain yang dihadapi adalah semakin sulitnya melakukan pembangunan waduk baru untuk menambah kapasitas cadangan air pada masa yang akan datang. Untuk itu upaya pengurangan sedimentasi waduk sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan air. Dengan kata lain upaya pengurangan sedimen di waduk setara dengan pembangunan waduk baru dengan kapasitas sesuai volume sedimen tersebut.

Berdasarkan hasil penelitian-penelitian yang telah dilakukan, terdapat tiga pertanyaan utama terkait upaya pengurangan sedimentasi, khususnya dengan cara pembilasan di waduk, yang perlu dipelajari lebih lanjut yaitu:

- a. Bagaimana proses pembilasan terjadi seiring perubahan waktu dan antar segmen di sepanjang alur genangan, dari awal sampai akhir pembilasan.
- b. Bagaimana pembilasan optimum dapat dilakukan sesuai ketersediaan air, waktu, dan volume sedimen yang ada.
- c. Mengingat besaran parameter hidraulik selalu berubah selama proses pembilasan baik secara temporal maupun spasial, maka tantangan yang dihadapi adalah bagaimana menentukan parameter-parameter utama dalam perhitungan sedimen terbilas untuk persamaan-persamaan yang telah disampaikan para peneliti-peneliti sebelumnya (Fan dan Jiang, Xia, Guozhen dkk., dan Atmojo).

1.3 Lokasi Penelitian

Pembilasan waduk yang dijadikan sebagai lokasi utama penelitian adalah Waduk Wlingi yang terletak di Kota Blitar, Propinsi Jawa Timur. Saat ini Waduk Wlingi dikelola oleh Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta I, seperti disampaikan pada Gambar 1.1.

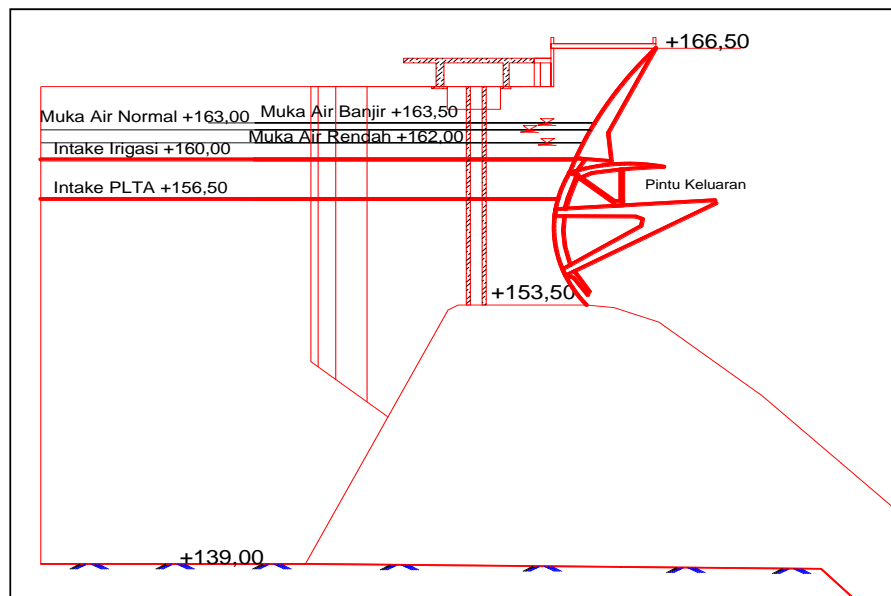


Gambar 1.1 Lokasi Penelitian

Waduk Wlingi merupakan waduk yang dibangun pada periode tahun 1975 – 1997 sebagai penyedia air irigasi, pembangkit listrik, pengendali banjir, dan penampung sedimen sementara dari material letusan Gunung Kelud (*Indonesian National Committee on Large Dam* 2014). Waduk ini dibangun dengan membendung Sungai Brantas, berada 22 km di hilir Waduk Sutami, dan 7,9 km di hulu Waduk Lodoyo. Volume air di waduk sebesar 22 juta m³ mengandalkan kapasitas tampungan memanjang alur waduk sepanjang ±20 km.

Sumber air utama yang masuk ke Waduk Wlingi berasal dari daerah tangkapan seluas 2.890 km² dan air keluaran Waduk Sutami. Sedimen yang masuk ke waduk berasal dari material letusan Gunung Kelud yang mengalir melalui empat anak sungai utama, yaitu : Sungai Lekso, Sungai Semut, Sungai Jari, dan Sungai Putih. Tercatat sudah tujuh kali Gunung Kelud meletus, yaitu : 1901, 1919, 1951, 1966, 1990, 2007, dan 2014 dengan volume produksi material tiap erupsi sebesar 100.000.000 – 200.000.000 m³ (Hidayat dkk. 2017).

Bagian hilir dari Waduk Wlingi dilengkapi dengan bangunan pengendali muka air dan pengatur air layanan. Bangunan tersebut terbagi dalam beberapa bagian, yaitu pintu pengambil PLTA pada elevasi +156,50 m, pintu pengambil irigasi pada elevasi +160,00 m, dan mercu pelimpah pada elevasi +153,50 m yang dilengkapi dengan empat buah pintu gerak dengan lebar masing-masing 10,60 m, seperti disampaikan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Potongan Melintang Pintu Pelimpah

Pemilihan lokasi penelitian pembilasan di Waduk Wlingi dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Semua data terkait pembilasan sedimen selama pelaksanaan pembilasan telah direkam dengan baik oleh Perum Jasa Tirta 1. Hal ini memudahkan dalam proses penelitian untuk kepentingan kalibrasi dan validasi model.
- b. Terkait tantangan penelitian, tipe waduk yang mengandalkan tampungan pada satu alur memanjang dari sungai utama, tentu akan mempunyai perilaku yang berbeda antar segmen dari hulu sampai ke hilir seiring perubahan waktu, selama pembilasan dilakukan.

- c. Pola operasi pintu pelimpah Waduk Wlingi sangat mempengaruhi perilaku hidraulik di genangan waduk. Operasi pintu dengan membuat air melimpas bebas akan memberikan dampak pembilasan sedimen yang berbeda jika dibandingkan dengan pola operasi menahan sebagian aliran air di atas pelimpah waduk.
- d. Tipikal waduk yang mengandalkan pola operasi pintu pelimpah dalam mengendalikan tampungan air dan pembilasan sudah banyak dibangun di Indonesia. Paling tidak ada 17 waduk tipe ini yang diharapkan dapat memanfaatkan hasil penelitian ini dalam pengendalian sedimen.

1.4 Tujuan dan Batasan Penelitian

Studi ini bertujuan untuk memodelkan mekanisme pembilasan sedimen Waduk Wlingi dan menentukan pola operasi pintu pelimpah dalam rangka meningkatkan efisiensi pembilasan sedimen. Untuk mendukung tercapainya tujuan studi, penelitian ini memodelkan proses pembilasan menggunakan model numerik dan model fisik. Penelitian ini tidak membahas pengaruh pembilasan terhadap kualitas air dan perubahan morfologi sungai di hilir waduk.