

Analisis Pendangkalan Waduk Pacal Kabupaten Bojonegoro

Khoiru Nisa¹, Harjono², Musthofa³

^{1,2,3}Universitas Bojonegoro, Jalan Lettu Suyitno No.2 Bojonegoro.
anisakhoiru31@gmail.com

ABSTRAK

Waduk Pacal memiliki fungsi dan peran yang sangat penting untuk kegiatan sehari-hari masyarakat menjadi sumber air utama untuk kegiatan pertanian. Waduk Pacal sendiri memiliki area layanan irigasi seluas 16.688 ha. Proses sedimentasi di Kali Pacal khususnya di Waduk Pacal di indikasikan dampak dari erosi yang disebabkan oleh adanya perubahan tata guna lahan yang dahulunya hutan menjadi lahan perkebunan jagung (sumber observasi) dan salah satu dampak yang ditimbulkan oleh sedimentasi di Waduk Pacal adalah pendangkalan dan pendangkalan ini bisa mengakibatkan terjadinya luapan dan penurunan kinerja dari Waduk Pacal. Berkurangnya kinerja dari Waduk Pacal disebabkan oleh banyak faktor diantaranya faktor teknis dan faktor non teknis, kerusakan faktor teknis salah satunya adalah rusaknya beberapa bagian Waduk Pacal, dan faktor non teknis salah satunya adalah terjadinya pendangkalan Waduk Pacal yang disebabkan oleh menumpuknya sedimen-sedimen di Waduk Pacal. Setelah dilakukannya perhitungan mengenai Berapa besarnya sedimentasi yang terjadi pada Waduk Pacal yaitu: Besarnya volume suspended load adalah 3755.51 ton/tahun, besarnya volume bed load adalah 45205,5 m³/th, total inflow sedimen adalah 71583.76 ton/th, Total rambatan sedimen yaitu 0,98 mm/th. Setelah pengoprasian waduk selama 89 tahun sisa tampungan pendangkalan Waduk Pacal sebesar 15,710m³ maka dari itu umur daya tampung Waduk Pacal tinggal 30 tahun.

Kata kunci: Waduk Pacal, Daerah Aliran Sungai, Sedimentasi, Daya Tampung Waduk.

ABSTRACT

Pacal Reservoir has a very important function and role for the daily activities of the community as the main source of water for agricultural activities. Pacal Reservoir itself has an irrigation service area of 16,688 ha. The sedimentation process in Pacal River, especially in Pacal Reservoir, indicates the impact of erosion caused by caused by land use change from forest to corn plantation (source of observation) and one of the impacts caused by sedimentation in Pacal Reservoir is siltation and this siltation can lead to overflow and reduced performance of Pacal Reservoir. The reduced performance of the Pacal Reservoir is caused by many factors including technical factors and non-technical factors, one of which is damage to several parts of the Pacal Reservoir, and one of the non-technical factors is the siltation of the Pacal Reservoir caused by the accumulation of sediments in the Pacal Reservoir. After calculating how much sedimentation occurred in the Pacal Reservoir, namely: The amount of suspended load volume is 3755.51 tonnes/year, the amount of bed load volume is 45205.5 m³ / year, the total sediment inflow is 71583.76 tonnes/year, the total sediment propagation is 0.98 mm/year. After operating the reservoir for 89 years the remaining siltation storage of Pacal Reservoir is 15,710m³, therefore the life of the Pacal Reservoir capacity is only 30 years.

Keywords: Pacal Reservoir, Watershed, Sedimentation, Reservoir Capacity.

1. PENDAHULUAN

Waduk merupakan kolam besar tempat menyimpan air sediaan untuk berbagai kebutuhan, waduk juga sebagai tempat pada permukaan tanah yang digunakan untuk menampung air saat terjadi kelebihan air/ musim penghujan, kemudian air yang melimpah tersebut dimanfaatkan untuk keperluan pertanian dan berbagai keperluan lainnya pada saat musim kemarau. Waduk dapat terjadi secara alami maupun dibuat oleh manusia.

Sedimentasi dapat didefinisikan sebagai pengangkutan, melayangnya (suspensi) atau mengendapnya material fragmental oleh air. Sedimentasi merupakan akibat dari adanya erosi, dan memberikan dampak yang banyak. Di waduk-waduk, pengendapan sedimen akan mengurangi volume efektifnya. Sebagian besar jumlah sedimen dialirkan oleh Sungai-Sungai yang mengalir ke waduk, hanya sebagian kecil saja yang berasal dari longsor tebing-tebing waduk, atau berasal dari longsor tebing-tebingnya oleh limpasan permukaan. (Soemarto, 1987).

Proses sedimentasi/pendangkalan di Waduk Pacal di indikasikan dampak dari erosi yang disebabkan oleh adanya perubahan tata guna lahan yang kurang memperhatikan aspek lingkungan (sumber observasi) Dan salah satu dampak yang ditimbulkan oleh sedimentasi di Waduk Pacal pendangkalan yang bisa mengakibatkan terjadinya luapan dan penurunan kinerja dari Waduk Pacal.

Perhitungan jumlah tampungan sedimentasi diketahui pada 10 tahun terakhir pada 2011 sejumlah 23.358.000 yang bertujuan untuk mengetahui berapa besar angkutan sedimen pada tahun berikutnya yang terbawa oleh aliran Sungai di daerah Sugihan, dan Sungai di daerah Sukun yang mengakibatkan terjadinya sedimentasi/Pendangkalan di Waduk Pacal.

2. METODE PENELITIAN

TINJAUAN UMUM

Metode penelitian merupakan langkah-langkah umum atau metode yang akan dilakukan dalam melakukan penelitian. Penelitian ini merupakan penelitian pengujian yang dilakukan pada Waduk Pacal yang berada di Dukuh Tretes, Desa Kedungsumber, Kecamatan Temayang Kab. Bojonegoro. Metode ini dipilih untuk mengetahui dan mendapatkan data data yang diperlukan.

JENIS DATA

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer yang berasal dari pengukuran langsung dilapangan Bojonegoro. Data primer merupakan data yang di dapat langsung oleh peneliti dan data sekunder yang berasal dari studi literatur penelitian sebelumnya.

Analisis Data Curah Hujan

Sebelum diolah menjadi data debit aliran Sungai (FJ. Mock) dan curah hujan efektif, dilakukan pengujian data curah hujan. Dengan data yang tersedia selama 10 tahun terakhir pada 1 lokasi stasiun hujan maka pada studi ini dilakukan pengujian data dengan menggunakan.

Analisis Debit

Untuk Analisis debit FJ. Mock perlu diketahui dahulu curah hujan harian, jumlah hari, dan curah hujan maksimal. Ketersediaan debit FJ. Mock juga memperhatikan kondisi tata guna lahan, koefisien infiltrasi, kapasitas kelembaban tanah (soil moisture capacity), initial storage (besarnya volume air), dan faktor resesi tanah (kandungan air tanah). Debit FJ.Mock inilah yang nantinya digunakan untuk menghitung debit andalan (inflow).

Langkah-langkah perhitungan debit FJ.Mock:

1. Mempersiapkan data–data yang dibutuhkan, antara lain: rerata hujan daerah (P), evapotranspirasi potensial (Eto), jumlah hari hujan (n), faktor resesi aliran air tanah (k), dan angka koefisiensi infiltrasi (i).
2. Menentukan evapotranspirasi terbatas.
3. Menentukan besar hujan di permukaan tanah (Δs).
4. Menentukan harga kelembaban tanah (SMC).
5. Menentukan infiltrasi (i), dengan koefisien antara 0,2 – 0,5
6. Menentukan air lebihan tanah (water surplus)
7. Menentukan kandungan air bawah tanah (Vn)
8. Menentukan perubahan kandungan air bawah tanah (dVn)
9. Menentukan aliran dasar dan aliran langsung
10. Menentukan debit yang tersedia di Sungai.

Untuk dapat mengetahui debit hasil perhitungan FJ. Mock akurat dan bisa digunakan maka perlu dilakukan pengujian dengan kalibrasi dengan data debit pengukuran di DAS. Namun dalam studi ini tidak terdapat data debit pengukuran maka pengujian debit hasil perhitungan F.J Mock menggunakan metode koefisien korelasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Data yang diperoleh pada saat penelitian lapangan selanjutnya digunakan untuk penentuan kebutuhan air bersih Desa Pungpungan Kecamatan Kalitidu. Data jumlah penduduk 10 tahun terakhir yang ada, selanjutnya digunakan sebagai perkiraan jumlah penduduk 10 tahun mendatang, dan menghitung kebutuhan air bersih 10 tahun mendatang di Desa Pungpungan Kecamatan Kalitidu.

PEMBAHASAN

Perhitungan Hujan Rata-Rata

Curah hujan yang diperlukan untuk menyusun suatu rancangan pemanfaatan air dan pengendalian banjir adalah curah hujan merata daerah (area rainfall). Dalam analisis ini menggunakan metode Poligon Thiessen, hal ini disebabkan kondisi daerah dan stasiun pengamatan tidak merata.

Perhitungan prosentase luas daerah pengaruh curah hujan DAS Pacal dengan rumus:

$$W = \frac{A_i}{A_{tot}} \quad (1)$$

Luas daerah Tretes	: 17,450 km ²
Luas daerah Sugihan	: 39,201 km ²
Luas daerah Gondang	: 352,57 km ²
Luas daerah pengaruh stasiun Tretes	: 17,450/90,57 = 0,193
Luas daerah pengaruh stasiun Sugihan	: 39,201/90,57= 0.433

Analisis Debit

Received: 25 September 2023, Accepted: 13 Oktober 2023

Untuk mengetahui besarnya debit terdapat beberapa metode yang bisa dipakai, namun pada studi ini akan menggunakan metode F.J. Mock. Berikut merupakan contoh perhitungan analisis ketersediaan debit dengan metode F.J. Mock.

Data-data yang diketahui adalah

- Luas Daerah Aliran (DAS) = 90.66 km²
- Soil moisture Capacity (SMC) = 100 mm
- Koefisien Infiltrasi (I) = 0.5 mm
- Faktor Resesi Aliran Tanah (k) = 0.4

Contoh perhitungan menggunakan Metode F.J. Mock

- Data Hujan
 - Curah Hujan (P) = 171.00 mm (Data Curah Hujan)
 - Hari Hujan (h) = 6 hari
- optranspirasi Terbatas
 - Evapotranspirasi (Eto/hr) = 2.186 mm/hari
 - = 58.42 (nilai Evapotranspirasi potensial)
 - Permukaan Lahan Terbuka (m) = 0.35
 - (m/20) x (18-h) = -0.91
 - E=(ETo) x (m/20) x (18-h) = -2.23 mm/bln
 - E=(ETo)-(E) = 4.69 mm/bln
- Keseimbangan Air
 - Ds = P-Et = 226.31 mm
 - Kandungan air tanah (SMC) = 0.00 mm/bln
 - Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC) = 100.00
 - Kelebihan Air (WS) = Ds- Kandungan air tanah (SMS)
 - = 226.31 - 0.00
 - = 226.31
- Aliran dan penyimpanan air tanah
 - Infiltrasi (I) = Ws x i
 - = 226.31 x 0.5
 - = 113.15 mm
 - 0.5 x (1+k) x 1 = 0.5 x (1 + 0.4) X 113.16
 - = 79.21
 - K x V(n-1) = 0.4 x (56.152)
 - = 22.46 mm/bln
 - Tampungan (Vn) = 0.5 x (1+k) x l + k x V(n-1)
 - = 101.67 mm
 - Perubahan Vol. Tampungan (DVn) = Tampungan (Vn) – V(n-1)
 - = 45.52 mm/bln
 - Aliran dasar = Infiltrasi (I) – (DVn)
 - = 67.64 mm/bln
 - Aliran Langsung = Ws – I
 - = 113.16 mm/bln
 - Debit Aliran = Aliran Dasar + Aliran Langsung
 - = 180.80 mm/bln
 - Debit Sungai = Luas DAS x 1000/ (Jumlah hari x 24x86400) x Debit Aliran (mm/bln)

$$= 6.13 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Parameter yang digunakan metode F.J. Mock sebagai berikut:

- a) $m=10\% - 40\%$ untuk lahan yang tererosi . (Diambil 20%)
- b) Kapasitas kelembaban tanah (SMC) = 100 mm
- c) Daerah Aliran Sungai = 90.77 km²
- d) Koefisien infiltrasi = 0.5
- e) Faktor resesi aliran air tanah = 0.4
- f) Penyimpanan awal (initial storage) = 100
- g) m ditentukan = 0.353.3

Berikut Tabel Rekapitulasi Debit Hasil Perhitungan Metode Fj.Mock

Tabel 1. Rekapitulasi Debit Hasil Perhitungan Metode Fj.Mock

Tahun	Bulan											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2013	112.39	114.23	115.02	115.62	114	115.22	114.92	112.48	107.19	101.42	103.06	108.05
2014	111.62	112.67	115.61	115.44	114.61	111.33	108.9	107.53	104.3	101.67	99.26	105.92
2015	109.95	114.39	113.02	113.36	112.29	108.15	103.28	102.65	102.54	101.77	102.41	106.11
2016	110.91	111.97	114.38	114.46	113.65	113.94	113.62	112.58	109.79	108.71	111.57	113.96
2017	113.18	114.98	114.71	113.95	112.74	110.24	109.42	108.31	106.66	107.02	109.99	113.51
2018	114.12	114.97	115.16	113.24	110.82	106.02	105.28	105.04	104.75	104.56	104.76	109.01
2019	110.73	113.99	115.07	114.72	114.57	110.94	107.59	106.86	106.02	105.38	105	105.84
2020	111.66	114.42	114.49	115.27	114.39	114.4	110.21	108.8	106.94	105.75	110.05	113.1
2021	114.13	114.92	115.64	115.4	113.8	111.65	111.64	110.14	108.64	106.62	107.66	111.44
2022	113.97	114.76	115.11	115.27	114.72	114.49	114.43	112.29	109.99	106.93	113.13	113.27

Sumber: Hasil Perhitungan Peneliti

ANALISIS SEDIMEN

Perhitungan Suspended Load

Untuk Besarnya debit sedimen dapat dihitung dengan rumus:

$$Q_s = 0,0864 \cdot C \cdot Q$$

dimana:

$$Q_s = \text{debit sedimen (ton/hari)}$$

$$Q = \text{debit Sungai (m}^3/\text{det)}$$

$$C = \text{konsentrasi (mg/l atau g/m}^3\text{)}$$

Untuk perhitungan sedimen Kali Pacal sebagai berikut:

Nilai Q didapat dari tabel Rekapitulasi Debit Andalan metode Fj. Mock

$$Q = 112.39 \text{ (m}^3/\text{det)}$$

$$C = 32 \text{ (mg/l)}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= 0,0864 \times C \times Q \\ &= 0,0864 \times 32 \times 112.39 \\ &= 310.73 \text{ ton/hari} \end{aligned}$$

Tabel 2. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2013

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/l)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	112.39	32	9.71	34925.81
2	Feb	114.23	14	9.87	15784.15

Received: 25 September 2023, Accepted: 13 Oktober 2023

3	Mar	115.02	23	9.94	26291.00
4	Apr	115.62	12	9.99	13859.41
5	Mei	114.00	10	9.85	11228.54
6	Jun	115.22	0	9.95	0.00
7	Jul	114.92	0	9.93	0.00
8	Ags	112.48	0	9.72	0.00
9	Sep	107.19	0	9.26	0.00
10	Okt	101.42	9	8.76	7998.91
11	Nov	103.06	23	8.90	21108.53
12	Des	108.05	18	9.34	18157.85
					149,354.21

Sumber: Hasil Perhitungan Peneliti

Tabel 3. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2014

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/l)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	111.62	31	9.64	33368.52
2	Feb	112.67	22	9.73	24130.37
3	Mar	115.61	16	9.99	18476.09
4	Apr	115.44	23	9.97	26480.22
5	Mei	114.61	0	9.90	0.00
6	Jun	111.33	0	9.62	0.00
7	Jul	107.53	0	9.29	0.00
8	Ags	107.53	0	9.29	0.00
9	Sep	104.30	0	9.01	0.00
10	Okt	101.67	9	8.78	8037.27
11	Nov	99.26	10	8.58	8513.34
12	Des	105.92	15	9.15	14540.06
					133,545.88

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Tabel 4. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2015

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/l)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	109.95	13	9.50	13578.45
2	Feb	114.39	18	9.88	20350.54
3	Mar	113.02	23	9.76	25382.24
4	Apr	113.36	21	9.79	23316.75
5	Mei	112.29	14	9.70	15252.43
6	Jun	108.15	0	9.34	0.00
7	Jul	103.28	0	8.92	0.00
8	Ags	102.65	0	8.87	0.00
9	Sep	102.54	5	8.86	4541.95
10	Okt	101.77	7	8.79	6263.64
11	Nov	102.41	13	8.85	11780.75
12	Des	106.11	23	9.17	22373.18
					142,839.92

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/l)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	110.91	23	9.58	24444.18
2	Feb	111.97	13	9.67	14082.77
3	Mar	114.38	16	9.88	18085.85
4	Apr	114.46	13	9.89	14715.57
5	Mei	113.65	10	9.82	11160.34
6	Jun	113.62	0	9.82	0.00
7	Jul	113.62	0	9.82	0.00
8	Ags	112.58	0	9.73	0.00
9	Sep	109.79	0	9.49	0.00
10	Okt	108.71	10	9.39	10211.30
11	Nov	111.57	21	9.64	22585.14
12	Des	113.96	15	9.85	16831.19
					132,116.33

Tabel 5.
Perhitungan
Suspended
Load Kali
Pacal Tahun
2016
Sumber
Hasil
Perhitungan
Peneliti

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/l)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	113.18	22	9.78	24350.23
2	Feb	114.98	12	9.93	13707.68
3	Mar	114.71	25	9.91	28420.03
4	Apr	113.95	16	9.85	17950.86
5	Mei	112.74	7	9.74	7687.55
6	Jun	110.24	0	9.52	0.00
7	Jul	109.42	0	9.45	0.00
8	Ags	108.31	0	9.36	0.00
9	Sep	106.66	0	9.22	0.00
10	Okt	107.02	17	9.25	16821.97
11	Nov	109.99	21	9.50	21951.45
12	Des	113.51	18	9.81	20039.37
					150,929.13

Tabel 6.
Perhitungan
Suspended
Load Kali
Pacal Tahun
2017

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Tabel 7. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2018

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/l)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	114.12	26	9.86	29254.22
2	Feb	114.97	14	9.93	15989.71
3	Mar	115.16	23	9.95	26351.98
4	Apr	113.24	23	9.78	25483.36
5	Mei	110.82	7	9.57	7427.12
6	Jun	106.02	0	9.16	0.00
7	Jul	105.28	0	9.10	0.00
8	Ags	105.04	0	9.08	0.00
9	Sep	104.75	0	9.05	0.00
10	Okt	104.56	11	9.03	10390.59
11	Nov	104.76	12	9.05	11377.44
12	Des	109.01	21	9.42	21562.50
					147,836.91

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Tabel 8. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2019

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/l)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	110.73	15	9.57	15889.04
2	Feb	113.99	25	9.85	28063.97
3	Mar	115.07	24	9.94	27454.45
4	Apr	114.72	18	9.91	20466.65
5	Mei	114.57	0	9.90	0.00
6	Jun	110.94	0	9.59	0.00
7	Jul	107.59	0	9.30	0.00
8	Ags	106.86	0	9.23	0.00
9	Sep	106.02	0	9.16	0.00
10	Okt	105.38	6	9.10	5756.87
11	Nov	105.00	11	9.07	10478.96
12	Des	105.84	18	9.14	17421.09
					125,531.04

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Tabel 9. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2020

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/lt)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	111.66	17	9.65	18313.36
2	Feb	114.42	23	9.89	26017.71
3	Mar	114.49	21	9.89	23783.48
4	Apr	115.27	24	9.96	27549.89
5	Mei	114.39	0	9.88	0.00
6	Jun	114.40	0	9.88	0.00
7	Jul	110.21	0	9.52	0.00
8	Ags	108.80	0	9.40	0.00
9	Sep	106.94	0	9.24	0.00
10	Okt	105.75	0	9.14	0.00
11	Nov	110.05	12	9.51	12555.70
12	Des	113.10	21	9.77	23210.55
					131,430.69

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Tabel 10. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2021

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/lt)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	114.13	18	9.86	20258.19
2	Feb	114.92	19	9.93	21681.45
3	Mar	115.64	17.23	9.99	19906.87
4	Apr	115.40	12.68	9.97	14588.38
5	Mei	113.80	7	9.83	7832.60
6	Jun	111.65	0	9.65	0.00
7	Jul	111.64	0	9.65	0.00
8	Ags	110.14	0	9.52	0.00
9	Sep	108.64	0	9.39	0.00
10	Okt	106.62	11	9.21	10803.33
11	Nov	107.66	12	9.30	12017.51
12	Des	111.44	21	9.63	22532.02
					129,620.35

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Tabel 11. Perhitungan Suspended Load Kali Pacal Tahun 2022

No	Bulan	Qw (m ³ /dt)	C (mg/lt)	0.64xQw	Qs (ton/hari)
1	Jan	113.97	10	9.85	11222.76
2	Feb	114.76	14	9.92	15931.45
3	Mar	115.11	22	9.95	25186.76
4	Apr	115.27	21	9.96	24106.99
5	Mei	114.72	7	9.91	7959.18
6	Jun	114.49	0	9.89	0.00
7	Jul	114.43	0	9.89	0.00
8	Ags	112.29	0	9.70	0.00
9	Sep	109.99	0	9.50	0.00
10	Okt	106.93	0	9.24	0.00
11	Nov	113.13	6	9.77	6634.85
12	Des	113.27	16	9.79	17737.63
					08,779.62

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Dari Tabel perhitungan Debit Suspended Load Tahun 2013– 2022 adalah 1351984.07 ton/hari.

Perhitungan Bed Load

Untuk perhitungan bed load pada kali Pacal didasarkan pada hubungan parameter hidrolis dengan Bed Load. Disini dipakai rumusan oleh “Sato – Kikkawa Ashida’s “ sebagai berikut :

$$q_b = \frac{\phi \cdot f\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right) \left(\frac{\tau}{P}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{\tau}{P} - 1\right)g}$$

dimana :

Q = Debit bed load persatuan waktu per satuan lebar Sungai (m³/det/m)

ϕ = Konstanta yang besarnya dipengaruhi oleh koefisien kekasaran dan kondisi dari Sungai.

Untuk $n \geq 0,025 \rightarrow \phi = 0,623$

$n < 0,025 \rightarrow \phi = 0,623(40.n)^{-3,5}$

τ = tegangan geser di dasar Sungai (kg/ cm²)

τ_c = tegangan kritis di dasar Sungai (kg/ cm²)

$f\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right)$ = fungsi dari $\frac{\tau_c}{\tau}$

Tabel 12. Hubungan Antara $\frac{\tau_c}{\tau_0}$ dan $f(\frac{\tau_c}{\tau_0})$ adalah :

$\frac{\tau_c}{\tau_0}$	$f(\frac{\tau_c}{\tau_0})$
0,00	1,00
0,20	0,97
0,40	0,85
0,60	0,54
0,80	0,20
1,00	0,05
1,20	0,00

$$\frac{\omega}{P} = g.I.R$$

$$\omega = \gamma.d.S$$

dimana :

$$\frac{\tau}{P} = \text{specific gravity (16,69665)}$$

g = percepatan gravitasi (9,8 m/det²)

l = gradient energy

R = jari- jari hidrolis (m)

γ = berat jenis air (kg/ m³)

d = kedalaman air rata-rata (m)

s = kemiringan dasar sungai

Tabel 13. Harga-Harga ψ dan τ_c

Diameter butir rata-rata sedimen (mm)	ψ	τ_c (kg/cm ²)
0,125	523000	$7,8 \times 10^{-6}$
0,25	312000	$8,3 \times 10^{-6}$
0,50	187000	$1,01 \times 10^{-5}$
1	111000	$1,54 \times 10^{-5}$
2	66200	$2,5 \times 10^{-5}$
4	39900	$4,3 \times 10^{-5}$

Perhitungan Bed Load sebagai berikut:

$$n = 0,124$$

$$l = 0,0035$$

Received: 25 September 2023, Accepted: 13 Oktober 2023

$$d = 0,71 \text{ m}$$

$$\text{Untuk } n = 0,124 > 0,025 \rightarrow \emptyset = 0,623$$

$$\begin{aligned} \tau_o &= \gamma \cdot d \cdot I \\ &= 10000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,71 \text{ m} \cdot 0,0035 \\ &= 0,00024 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Didapat D50 = 0,38 mm, dari Tabel 4.21 didapat :

$$\text{Untuk D50} = 0,38 \text{ mm, didapat } T_c = 0,0000094 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{\tau_c}{\tau_o} = \frac{94 \cdot 10^{-7}}{0.00024} = 38 \cdot 10^{-7} \sim 0$$

$$\text{Untuk } \frac{\tau_c}{\tau_o} = 0 : f\left(\frac{\tau_c}{\tau_o}\right) = 1$$

$$\begin{aligned} \tau_o/p &= g \cdot I \cdot R \\ &= 9,8 \cdot 0,0035 \cdot 0,846 \\ &= 0,024 \text{ m}^2/\text{det}^2 \\ &= \frac{0.623 \times 1 \times (0,024)^{3/2}}{(16,69665 - 1) \times 9,8} \end{aligned}$$

$$= 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det}/\text{m}$$

$$\begin{aligned} Q_B &= q_B \cdot t \cdot W \\ &= 1,5 \times 10^{-4} \times 2678400 \times 8,61 \\ &= 3459,154 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat dalam Tabel 14

Tabel 14. Perhitungan Volume Bed Load Kali Pacal

Bln	Debit (m ³ /det)	Waktu (det)	H (m)	τ_o/p (m ² /det ²)	$(\tau_o/p)^{2/3}$	q_B (m ³ /dt ² /m)	Q (m ³)
1	2	3	4	5	6	7	8
Jan	113.97	2.678.400	1,39	0,024	0,003718	0,00015	3459,154
Feb	114.76	2.419.200	2,13	0,024	0,003718	0,00015	3124,397
Mar	115.11	2.678.400	1,67	0,024	0,003718	0,00015	3459,154
Apr	115.27	2.592.000	1,42	0,024	0,003718	0,00015	3347,568
Mei	114.72	2.678.400	0,62	0,024	0,003718	0,00015	3459,154
Jun	114.49	0	0	0	0	0	0
Jul	114,43	0	0	0	0	0	0

Ags	112.29	0	0	0	0	0	0
Sep	109.99	0	0	0	0	0	0
Okt	106.93	2.678.400	0,29	0,024	0,003718	0,00015	3459,154
Nov	113.13	2.592.000	0,29	0,024	0,003718	0,00015	3347,568
Des	113.27	2.678.400	1,86	0,024	0,003718	0,00015	3459,154
							Σ=27.115,303

Sumber : Hasil Penelitian

$$\begin{aligned}
 \text{Dari tabel di atas Volume bulk} &= \frac{\text{volume}(\text{partikel})}{1 - \text{porositas}} \\
 &= \frac{27115,303}{1 - 0,4} \\
 &= 45205,5 \text{ m}^3/\text{th}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Rambatan Sedimen

Rambatan Sedimen daerah pengaliran Waduk Pacal adalah jumlah volume suspended load ditambah volume bed load Kali Pacal. Besarnya sediment density 1500 ton/m³. Dari perhitungan sebelumnya volume bed load tiap tahun adalah :

$$\begin{aligned}
 45205,5 \text{ m}^3. \text{ Jadi beratnya} &= 45205,5 \times 1500 \\
 &= 67808,25 \text{ ton/th}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Total inflow sedimen} &= \text{Debit Suspended load} + \text{Debit Bed Load} \\
 &= 3755.51 + 67808,25 \\
 &= 71583.76 \text{ ton/th}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rambatan Sedimen} &= \frac{Q_{\text{total}}}{ws} : A \\
 &= \frac{71583,76}{0,8 \text{ ton/m}^3} : 90,57 \text{ km}^2 \\
 &= \frac{89.479.7 \times 10^9 \text{ mm}^3}{90,57 \times 10^{12} \text{ mm}^3} \\
 &= 0.98 \text{ mm/th}
 \end{aligned}$$

Setelah dilakukannya perhitungan mengenai jumlah sedimen yang terdapat di Sungai Pacal yaitu:

- Besarnya volume suspended load adalah 3755.51ton/tahun
- Besarnya volume bed load adalah 45205,5 m³/th
- Total inflow sedimen adalah 71583.76 ton/th
- Total rambatan sedimen yaitu 0.98 mm/th

Perhitungan pada Limpasan

Selain terjadi di hulu Waduk Pacal sedimen juga terjadi di kali pacal yang merupakan limpasan dari Waduk Pacal dan juga sebagai pembuangan saat terjadi banjir. Besarnya debit limpasan tergantung dari besar kecilnya debit di hulu Waduk Pacal.

Tabel 15. Tabel Debit Limpasan Waduk Pacal

NO	Bulan	Debit waduk m ³ /dt	Debit limpas m ³ /dt
1	Januari	11.23	9.26
2	Februari	11.41	9.09
3	Maret	11.48	8.96
4	April	11.47	9.37
5	Mei	11.36	9.27
6	Juni	11.16	9.08
7	Juli	10.99	9.14
8	Agustus	10.87	9.30
9	September	10.67	9.32
10	Oktober	10.50	9.43
11	November	10.67	0.00
12	Desember	11.00	0.00

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Hasil sedimen yang melayang yaitu:

$$X = 13,01 \times 50m \times 2m^1/det$$

$$X = 1.301m^3$$

Tabel 16. Perhitungan Limpasan Melayang

No	Tahun	Qw (m ³ /dt)	C (mg/lit)	0.0864xQw	Qs (ton/hari)
1	2012	1.33	10	0.11	1.53
2	2013	2.34	14	0.20	6.62
3	2014	4.25	22	0.37	34.33
4	2015	6.60	21	0.57	79.04
5	2016	8.12	7	0.70	39.88
6	2017	10.98	0	0.95	0.00
7	2018	12.97	0	1.12	0.00
8	2019	14.73	0	1.27	0.00
9	2020	18.20	0	1.57	0.00
10	2021	23.33	6	2.02	282.16
11	2022	33.73	16	2.91	1572.77
					2016.33

Sumber : Hasil Perhitungan Peneliti

Jumlah tampungan awal 41.588.000

Diketahui jumlah tampungan pada sedimen pada tahun 2012 diperkirakan sebesar 23.358.000. Maka jumlah total sedimen yang berada di tampungan Waduk Pacal adalah:

$$41.588.000 - 23.358.000 = 19.230.000$$

Dari hasil perhitungan penelitian jumlah limpasan sebesar 2.016,33 ton/hari dengan Bj humus: 1,37

$$1,37 \times 1.301\text{m}^3 = 1.782,37\text{m}^3$$

Untuk mengetahui sedimen selama 1 tahun:

$$30 \text{ hari} \times 12 \times 1.782,37\text{m}^3 = 641.653,2 \text{ m}^3/\text{th}$$

Jumlah potensi sedimen yang tersisa:

$$\frac{19.230.000}{641.653,2} = 29,96 \text{ m}^3/\text{th}$$

Maka hasil dari perhitungan usia guna waduk pacal tinggal 30 tahun lagi.

Akumulasi faktor penyebab sedimentasi

Faktor yang menyebabkan sedimentasi akibat banjir bandang yang terjadi setiap tahun di hulu waduk pacal yang melarutkan partikel-partikel tanah disekitar sungai (kali senganten). Adapun faktor lain yaitu adanya perubahan tata guna lahan yang berubah yang awalnya hutan menjadi lahan perjagungan.

4. KESIMPULAN.

Setelah dilakukannya perhitungan mengenai Berapa besarnya laju sedimentsi yang terjadi pada Waduk Pacal mulai tahun 2013-2022 yakni besarnya volume suspended load adalah 3755.51 ton/tahun, Besarnya volume bed load adalah 45205,5 m³/th, Total inflow sedimen adalah 71583.76 ton/th, Total rambatan sedimen yaitu 0.98 mm/th.

Berdasarkan hasil penelitian diatas dapat dikatakan bahwa umur daya tampung Waduk Pacal Kabupaten Bojonegoro tinggal 30 tahun. Dan sedimentasi yang terjadi pada Waduk Pacal disebabkan oleh rusaknya area tangkapan air, adanya akar dan batang kayu yang mengendap didasar waduk, dan adanya lumpur yang menyumbat pintu waduk pacal serta adanya perubahan tata guna lahan yang dahulunya hutan menjadi perkebunan jagung.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Goldman, S.J. (1986). Erosion and Sediment Control Handbook. Mcgraw Hill Book Company, New York.
- Soemarto, CD. (1987). Hidrologi Teknik, Usaha Nasional, Surabaya.
- Soedibyo. (2003). Teknik Bendungan, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Soewarno. (1991). Hidrologi Pengukuran dan Pengolahan Data Aliran Sungai (Hidrometri), Nova, Bandung.
- Soewarno. (1995). Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data Jilid 2, Nova, Bandung.

Suyono Sosrodarsono, Kenseku Takeda. (2000). Hidrologi Untuk Pengairan, Pradnya Paramita, Jakarta.

Suyono Sosrodarsono, Masateru Tominaga (2000). Perbaikan dan Pengaturan Sungai, Pradnya Paramita, Jakarta.