

Jurnal

TEKNIK SUMBER DAYA AIR

- Pengembangan Model Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Serbaguna Wonogiri Paska Pembangunan Closure Dike** 1-12
Yotam Adiel Haryanto, Rachmad Jayadi, dan Istiarto
- Analisis Erosi pada Daerah Aliran Sungai Baturusa** 13-24
Aghata Christin Natalia, Roby Hambali, dan Fadillah Sabri
- Pengaruh Erosi Lahan terhadap Kapasitas Sabo Dam** 25-34
Novika Komariona Dewi, Jazaul Ikhsan, dan Nursetiawan
- Evaluasi Pemanfaatan Data Pos Hujan dan Data Satelit TRMM dalam Pemodelan Debit Sintetik DAS Temef** 35-46
Davianto F. B. Welkis, Donny Harisuseno, dan Sri Wahyuni
- Evaluasi Penjadwalan Awal Tanam Padi untuk Efisiensi Irigasi** 47-58
Sri Wahyuni, Riyanto Haribowo, Dian Sisinggih, Yusril Fatrah, dan Ivan Dwi P.
- Analisis Erosi Buluh Pada Dasar Sungai Kuning, Yogyakarta** 59-68
Djoko Legono

Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

DAFTAR ISI

Daftar Isi	iii
Pengembangan Model Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Serbaguna Wonogiri Paska Pembangunan Closure Dike.....	1-12
<i>Puji Harsanto, Hanan Eko Prihatmanti, dan Bayu Krisna Wisnulingga</i>	
Analisis Erosi pada Daerah Aliran Sungai Baturusa	13-24
<i>Aghata Christin Natalia, Roby Hambali, dan Fadillah Sabri</i>	
Pengaruh Erosi Lahan terhadap Kapasitas Sabo Dam	25-34
<i>Novika Komariona Dewi, Jazaul Ikhsan, dan Nursetiawan</i>	
Evaluasi Pemanfaatan Data Pos Hujan dan Data Satelit TRMM dalam Pemodelan Debit Sintetik DAS Temef	35-46
<i>Davianto F. B. Welkis, Donny Harisuseno, dan Sri Wahyuni</i>	
Evaluasi Penjadwalan Awal Tanam Padi untuk Efisiensi Irigasi	47-58
<i>Sri Wahyuni, Riyanto Haribowo, Dian Sisinggih, Yusril Fatrah, dan Ivan Dwi P.</i>	
Analisis Erosi Buluh Pada Dasar Sungai Kuning, Yogyakarta	59-68
<i>Djoko Legono</i>	

PENGEMBANGAN MODEL OPTIMASI PEMANFAATAN AIR WADUK SERBAGUNA WONOGIRI PASKA PEMBANGUNAN *CLOSURE DIKE*

Yotam Adiel Haryanto^{1*}, Rachmad Jayadi², dan Istiarto²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

*yotamharyanto@gmail.com

Pemasukan: 7 Juni 2021 Perbaikan: 25 Juni 2021 Diterima: 29 Juni 2021

Intisari

Untuk mengatasi persoalan sedimentasi Waduk Serbaguna Wonogiri telah dibangun *closure dike* yang menyebabkan terbentuknya dua buah tampungan, yaitu *Main Reservoir* (MR) dan *Sediment Storage Reservoir* (SSR). Oleh karena itu potensi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri perlu dikaji ulang dengan mempertimbangkan kondisi terkini tampungan waduk. Penerapan usulan pedoman operasi waduk baru yang telah disiapkan dapat digunakan untuk evaluasi kinerja pemanfaatan air menggunakan pendekatan model optimasi. Pada makalah ini disampaikan hasil pengembangan awal model optimasi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri berbasis simulasi neraca air dalam bentuk perangkat lunak menggunakan pemrograman Microsoft Visual Studio 2019. Pengaturan *release* waduk didasarkan pada pedoman operasi waduk sesuai rekomendasi Nippon Koei Co. Ltd. tahun 2016 menggunakan algoritma optimasi metode *Brute Force*. *Output* dari perangkat lunak selanjutnya dianalisis untuk evaluasi kinerja operasi waduk. Simulasi neraca air waduk dilakukan dengan variasi nilai *Control Water Level* (CWL), kondisi aliran *inflow*, yaitu tahun basah, normal dan kering, serta skenario *target release*. Hitungan model optimasi pengaturan *release* waduk menggunakan perangkat lunak yang dibuat dapat dilakukan secara cepat dengan hasil yang akurat. Hasil analisis menunjukkan bahwa *recovery* muka air MR berhasil tercapai jika digunakan CWL +136,30 m dan hanya pada kondisi *inflow* tahun basah. Tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada ketiga kondisi *inflow* tersebut berturut-turut sebesar 99,75%; 98,75%; 97,08% untuk CWL +135,80 m dan sebesar 99,83%; 98,75%; 94,58% untuk CWL 136,30 m.

Kata Kunci: Simulasi neraca air, optimasi, operasi waduk, *Control Water Level*

Latar Belakang

Waduk Serbaguna Wonogiri berada di Wilayah Sungai Bengawan Solo. Waduk yang cukup besar ini difungsikan untuk pengendalian banjir, penyediaan air irigasi dan air baku, serta pembangkit tenaga listrik. Operasi Waduk Serbaguna Wonogiri didasarkan pada Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 229/KPTS/1986 tentang Pedoman Eksploitasi dan Pemeliharaan Bendungan Serbaguna Wonogiri yang kemudian direvisi Proyek Induk Pengembangan Wilayah Sungai Bengawan Solo pada Juli 1994 dengan CWL pada +135,30 m.

Sumber air Waduk Wonogiri berasal dari aliran Sungai Bengawan Solo bagian hulu yang membentuk sistem Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan luas total sebesar 1.343 km² yang terdiri dari 10 DAS, antara lain DAS Pondok, DAS Keduang, DAS Kepuh, DAS Wiroko, DAS Temon, DAS Solo Hulu, DAS Alang Ngunggahan, DAS Kedungguling, DAS Wuryantoro, dan DAS Durensewu. Peta sistem DAS di daerah tangkapan air Waduk Wonogiri dapat dilihat pada Gambar 1.

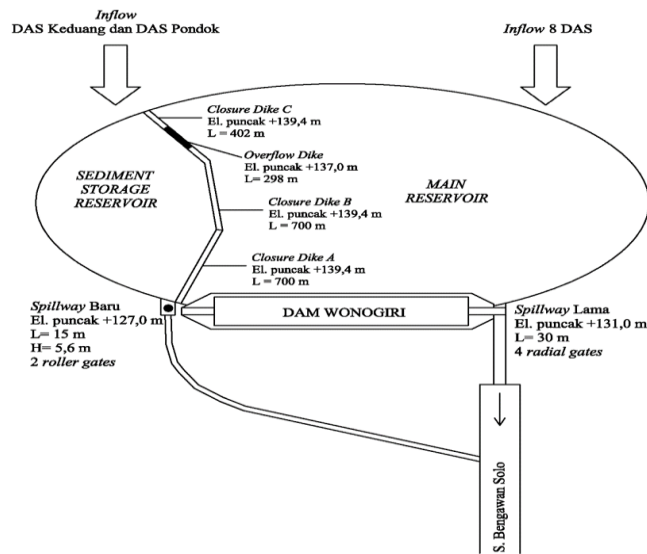


Gambar 1. Peta daerah tangkapan air Waduk Wonogiri (Pradipta, 2014)

Permasalahan sedimentasi yang cukup serius pada Waduk Wonogiri mengakibatkan berkurangnya volume tampungan efektif dan terganggunya *intake* waduk. Pada 2016, Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo bersama *Japan International Cooperation Agency* (JICA) melakukan kajian dan menghasilkan *Detailed Design of Structural Countermeasures for Sedimentation on Wonogiri Reservoir* yang mengusulkan pembangunan *closure dike* di dalam area Waduk Wonogiri untuk mengatasi permasalahan sedimentasi.

Closure dike merupakan tanggul penyekat yang berfungsi untuk melokalisir *inflow* waduk dari DAS Pondok dan DAS Keduang yang memberikan kontribusi angkutan sedimen terbesar pada waduk. Pembangunan *closure dike* ini menyebabkan terbentuknya dua buah tampungan, yaitu *Main Reservoir* (MR) untuk layanan kebutuhan air dan *Sediment Storage Reservoir* (SSR) untuk pengendalian sedimen.

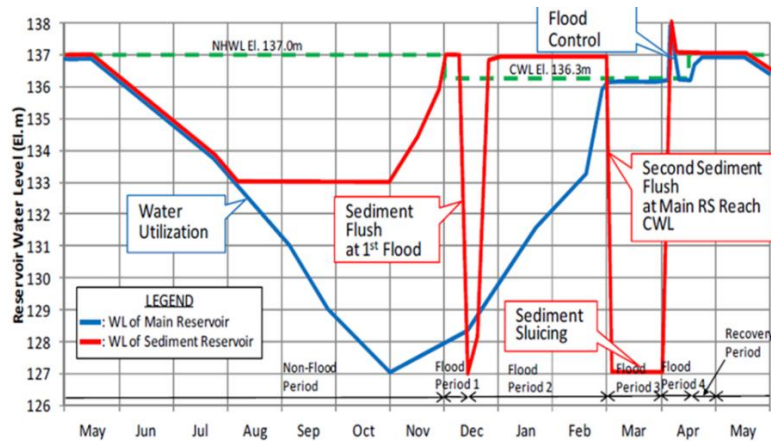
Pembangunan *closure dike* dilengkapi dengan bangunan pendukung lainnya seperti *overflow dike* untuk mengalirkan air yang meluap baik dari SSR maupun dari MR saat elevasi muka air melebihi elevasi puncak *overflow dike*, *connecting gated conduit* untuk mengalirkan air dari SSR pada saat elevasi muka air MR rendah, serta pintu pelimpah baru untuk mengatur pelepasan air dalam pengendalian banjir dan penggelontoran sedimen. Gambar 2 menyajikan sketsa kondisi Waduk Wonogiri terkini pasca pembangunan *closure dike*.



Gambar 2. Skema tampungan air Waduk Wonogiri kondisi terbaru (Pradipta, 2014)

Dengan terbentuknya dua buah tampungan dalam Waduk Wonogiri, maka perlu dilakukan kajian ilmiah untuk penyesuaian cara *release* air waduk sesuai dengan perkembangan kebutuhan air dan karakteristik tampungan terkini. Oleh karena itu diperlukan pemutakhiran pemodelan operasi waduk berbasis neraca air dengan mempertimbangkan adanya penambahan struktur baru dalam Waduk Wonogiri tersebut sehingga dapat merepresentasikan keadaan waduk yang sebenarnya dan dapat digunakan untuk mengoptimalkan fungsi Waduk Wonogiri.

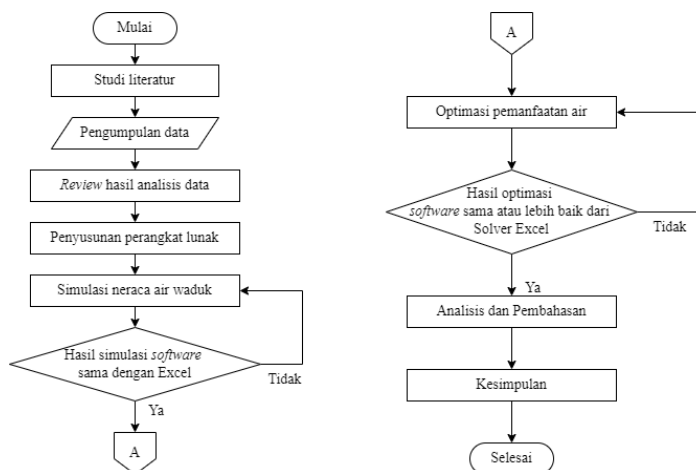
Pedoman operasi Waduk Serbaguna Wonogiri untuk pemenuhan kebutuhan air, pengendalian banjir, dan pengendalian sedimentasi pada kondisi terkini didasarkan atas kajian Nippon Koei Co. Ltd. (2016) selama periode satu tahun ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Usulan aturan operasi tahunan Waduk Wonogiri (Nippon Koei Co. Ltd., 2016)

Metodologi Studi

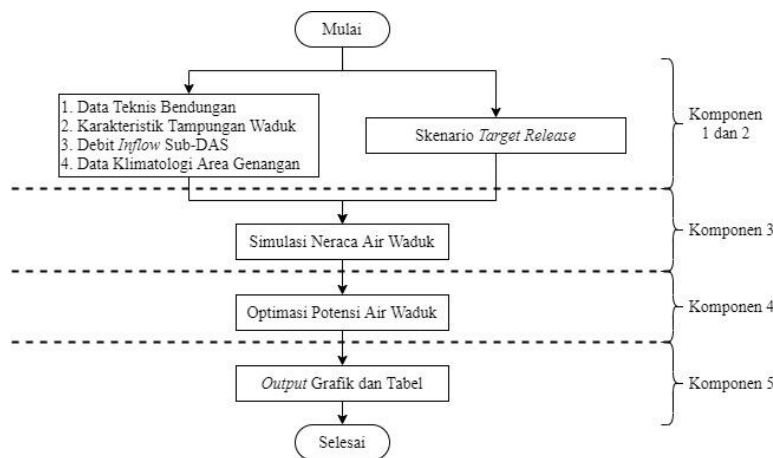
Prosedur penelitian dalam pengembangan model simulasi neraca air Waduk Serbaguna Wonogiri yang berbasis perangkat lunak secara umum dilaksanakan sesuai dengan tahapan seperti yang ditunjukkan oleh bagan alir pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan alir penelitian

Penyusunan Struktur Perangkat Lunak

Struktur perangkat lunak yang dikembangkan terdiri dari berbagai komponen yang disusun melalui beberapa komponen yaitu: (1) *database*, (2) *input*, (3) simulasi, (4) optimasi, dan (5) *output*. Bagan alir pengoperasian perangkat lunak yang memuat komponen-komponen struktur perangkat lunak dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema komponen perangkat lunak

Simulasi Neraca Air Waduk

Pemodelan simulasi neraca air waduk mengacu pada pedoman operasional tahunan Waduk Wonogiri yang direkomendasikan oleh Nippon Koei Co. Ltd. (2016).

1. Tampungan awal

Kondisi awal elevasi muka air MR (El_{MRO}) dan SSR (El_{SSRO}) ditetapkan kemudian diubah menjadi volume tampungan awal MR (V_{MRO}) dan SSR (V_{SSRO}) menggunakan

karakteristik tampungan. Aliran *inflow* dari tiap DAS ditambah hujan dan dikurangi evaporasi yang terjadi di area genangan merupakan nilai *net-inflow* tampungan waduk ($Q_{net-inflow}$). Setelah volume tampungan awal ditambah dengan *net-inflow* maka volume tampungan menjadi V_{MR1} dan V_{SSR1} .

$$V_{MR1} = V_{MR0} + Q_{net-inflow MR} \quad (1)$$

$$V_{SSR1} = V_{SSR0} + Q_{net-inflow SSR} \quad (2)$$

Tampungan V_{MR1} dan V_{SSR1} diterjemahkan kembali menjadi El_{MR1} dan El_{SSR1} menggunakan karakteristik tampungan. Nilai El_{MR1} dan El_{SSR1} dibatasi pada elevasi SHF setinggi +138,60 m mengikuti pedoman OP Waduk Wonogiri.

2. Aliran melalui *overflow dike*

Aliran pada *overflow dike* dapat terjadi apabila elevasi muka air tampungan melebihi elevasi *overflow dike* (El_{OD}) setinggi +137,00 m. Aliran melalui *overflow dike* mengakibatkan berpindahnya volume sebesar V_{OF} dari tampungan yang lebih tinggi ke tampungan yang lebih rendah sedemikian sehingga pada tampungan yang lebih tinggi menjadi setinggi El_{OD} .

a. Jika $El_{SSR1} < El_{OD}$ dan $El_{MR1} < El_{OD}$, maka tidak terjadi aliran *overflow*,
 $V_{OF} = 0$ (3a)

b. Jika $El_{MR1} > El_{OD}$ dan $El_{MR1} > El_{SSR1}$, maka terjadi aliran dari MR ke SSR,
 $V_{OF} = -(V_{MR1} - V_{MR0D})$ (3b)

c. Jika $El_{SSR1} > El_{OD}$ dan $El_{SSR1} > El_{MR1}$, maka terjadi aliran dari SSR ke MR,
 $V_{OF} = V_{SSR1} - V_{SSR0D}$ (3c)

Adanya aliran yang melalui *overflow dike* dari MR ke SSR atau sebaliknya mengakibatkan bertambahnya volume di salah satu tampungan dan berkurangnya volume di tampungan lainnya. Kondisi tampungan setelah terjadinya *overflow* dapat dirumuskan sebagai berikut ini.

$$V_{MR2} = V_{MR1} + V_{OF} \quad (4)$$

$$V_{SSR2} = V_{SSR1} - V_{OF} \quad (5)$$

Tampungan V_{MR2} dan V_{SSR2} diterjemahkan kembali menjadi El_{MR2} dan El_{SSR2} , menggunakan karakteristik tampungan dengan dibatasi pada elevasi SHF setinggi +138,60 m mengikuti pedoman OP Waduk Wonogiri.

3. Aliran melalui *connecting gated conduit*

Aliran melalui *connecting gated conduit* diatur menggunakan pintu air dengan syarat aliran hanya terjadi dari SSR ke MR dan pada periode non-banjir (Mei-I hingga November-II). Syarat terjadinya aliran pada *connecting channel* jika $El_{SSR2} > El_{CC}$ dan $El_{SSR2} > El_{MR2}$. Volume aliran melalui *connecting channel* dihitung sebagai volume air pada SSR di antara El_{CC} dan El_{MR2} .

$$V_{CF} = \begin{cases} V_{SSR2} - V_{SSR}^* & ; V_{SSR}^* > V_{SSR}^{**} \\ V_{SSR2} - V_{SSR}^{**} & ; V_{SSR}^* < V_{SSR}^{**} \end{cases} \quad (6)$$

dengan:

V_{SSR}^* = volume SSR dengan elevasi muka air setinggi $El_{MR2} = g(El_{MR2})$; dan

V_{SSR}^{**} = volume SSR dengan elevasi muka air setinggi $El_{CC} = g(El_{CC})$.

Nilai V_{CF} harus dicek terlebih dahulu terhadap kapasitas maksimum *connecting channel* yang dapat dihitung dengan persamaan *submerged-orifice*.

$$K_{CC} = Q_{max} \times \Delta t = (C_d A \sqrt{2gH}) \times \Delta t \quad (7)$$

dengan:

- C_d = koefisien debit *orifice* = 0,6;
- A = luas tampang basah saluran = 4 m²;
- g = percepatan gravitasi = 9,81 m/s²;
- H = selisih muka air El_{SSR2} dan El_{MR2} (m); dan
- Δt = interval waktu hitungan (s).

Apabila volume aliran lebih besar dari kapasitas maksimum saluran maka volume yang melalui *connecting channel* digunakan sebesar kapasitas maksimum saluran. Volume tampungan pada MR dan SSR setelah adanya aliran melalui *connecting channel* dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_{MR3} = V_{MR2} + V_{CF} \quad (9)$$

$$V_{SSR3} = V_{SSR2} - V_{CF} \quad (10)$$

Pada periode banjir (Desember-I hingga Maret-II), aliran pada *connecting gated conduit* tidak diperkenankan terjadi ($V_{CF} = 0$) dan pintu pelimpah baru diatur untuk melakukan *flushing* dan/atau *sluicing* pada tampungan SSR. *Flushing* pertama dilakukan pada periode banjir 1 (Desember-I), sedangkan *flushing* kedua dilakukan pada awal periode banjir 3 (saat TMA MR mencapai CWL) yang kemudian dilanjutkan dengan *sluicing*. Volume tampungan MR dan SSR adalah sebagai berikut ini.

$$V_{SSR3} = \begin{cases} g(127) & ; \text{jika terjadi } flushing/slucing \\ \text{Min}[g(NHWL); V_{SSR2}] & ; \text{jika tidak terjadi } flushing/slucing \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{MR3} = V_{MR2} \quad (12)$$

Tampungan V_{SSR3} kemudian diterjemahkan kembali menjadi El_{SSR3} yang merupakan elevasi muka air SSR pada akhir periode hitungan.

4. Release air pada MR

Pengaturan *release* air waduk didasarkan pada nilai target *release*, potensi *release* dan kondisi tampungan air waduk dengan keterangan sebagai berikut ini.

- a. *Potential release* (PR). Tampungan MR setelah adanya aliran *overflow dike* dan *connecting channel* (V_{MR3}) diterjemahkan kembali menjadi El_{MR3} . *Potential release* merupakan volume tampungan MR yang berada di atas elevasi *minimum operation level* (MOL).

$$PR = \text{Max}\left[\frac{V_{MR3} - V_{MOL}}{\Delta t}; 0\right] \quad (13)$$

- b. *Actual release* (AR). *Potential release* pada tampungan waduk digunakan untuk memenuhi kebutuhan air (*target release*). Ada kalanya debit *actual release* tidak sesuai dengan kebutuhannya karena PR lebih kecil daripada TR sehingga debit air yang dilepaskan hanya sebesar PR.

$$AR = \begin{cases} TR ; PR > TR \\ PR ; PR < TR \end{cases} \tag{14}$$

Actual release pada periode tertentu menunjukkan tingkat keandalan waduk dalam memenuhi suplai kebutuhan air, nilai ini dinyatakan sebagai tingkat pemenuhan kebutuhan air waduk.

$$Rb = \frac{AR}{TR} \times 100\% \tag{15}$$

- c. Limpasan melalui *spillway* eksisting dapat terjadi apabila elevasi muka air MR melebihi elevasi CWL pada periode banjir atau NHWL pada periode non-banjir.

$$OS = \begin{cases} V_{MR3} - AR - f(CWL) ; \text{pada periode banjir} \\ V_{MR3} - AR - f(NHWL) ; \text{pada periode non - banjir} \end{cases} \tag{16}$$

Debit *outflow* total yang dikeluarkan dari MR merupakan penjumlahan dari *actual release* (*AR*) dan limpasan melalui *spillway* eksisting (*OS*). Volume tampungan MR pada akhir periode hitungan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$V_{MR4} = V_{MR3} - TO \tag{17}$$

Kemudian V_{MR4} dapat diterjemahkan menjadi El_{MR4} yang merupakan elevasi muka air MR pada akhir periode hitungan. Selanjutnya, El_{MR4} dapat digunakan menjadi El_{MR0} untuk perhitungan pada periode berikutnya.

Optimasi Pemanfaatan Air

Optimasi pemanfaatan air dilakukan pada MR dengan fungsi tujuan untuk memaksimalkan tingkat keandalan waduk dengan memperhatikan batasan-batasan yang ada. Komponen variabel berupa $AR(t)$ disederhanakan menjadi $fk(t)$ yang merupakan rasio antara $AR(t)$ dengan $TR(t)$ untuk menyederhanakan algoritma optimasi. Secara ringkas rumusan optimasi dapat dituliskan sebagai berikut:

1. *Objective Function*: $\text{Max} \left[\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{AR(t)}{TR(t)} \right]$
2. *Variable* : $fk(t)$
3. *Constrains* :
 - a. $fk_{min} \leq fk(t) \leq 1,0$
 - b. $AR(t) \leq PR(t)$
 - c. $AR(t) \leq TR(t)$
 - d. $ElMR(t) \geq MOL$
 - e. $ElMR_{24} \approx ElMR_0$

Adapun algoritma optimasi pada perangkat lunak ini menggunakan metode *brute force* dengan melakukan iterasi terhadap setiap kemungkinan dari kombinasi nilai $fk(t)$. Penggunaan metode *brute force* menghasilkan jumlah kombinasi yang sangat besar sehingga membutuhkan proses yang lama dan kurang praktis. Oleh karena itu digunakan teknik heuristik untuk mengeliminasi beberapa kemungkinan solusi sehingga proses optimasi dapat berjalan lebih cepat dan efektif.

Teknik heuristik diterapkan dengan mengevaluasi pengaruh perubahan nilai $fk(t)$ terhadap perubahan elevasi muka air MR pada akhir periode ($ElMR_{24}$). *Trial*

terhadap nilai $fk(t)$ menunjukkan bahwa hanya $fk(t)$ tertentu yang memberikan dampak terhadap perubahan nilai $EIMR_{24}$ yang selanjutnya disebut sebagai fk sensitive. Kemudian kombinasi nilai fk yang mungkin dapat disusun ulang sebagai berikut.

$$fk \text{ sensitive} \quad \rightarrow \quad fk_{min} \leq fk(t) \leq 1$$

$$fk \text{ non-sensitive} \quad \rightarrow \quad fk(t) = 1$$

Hasil Studi dan Pembahasan

Penerapan model untuk menyimulasikan perangkat lunak dilakukan dengan menggunakan masukkan data yang diperoleh dari PJT I (2021). Data *target release* didasarkan pada nilai rerata debit *release* aktual tengah bulanan dari pengolahan data operasional waduk tahun 2000-2020 seperti yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Debit *release* aktual rerata tengah bulanan

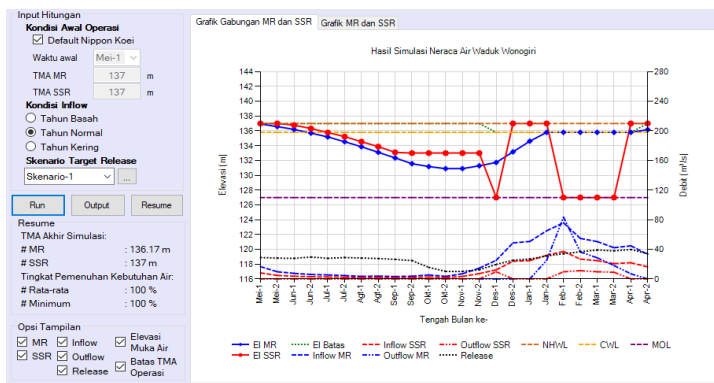
Tengah Bulan	Debit <i>Release</i> (m ³ /s)	Tengah Bulan	Debit <i>Release</i> (m ³ /s)
Jan-1	26,85	Jul-1	27,85
Jan-2	31,07	Jul-2	28,87
Feb-1	34,00	Agt-1	28,21
Feb-2	36,64	Agt-2	27,50
Mar-1	39,05	Sep-1	26,34
Mar-2	37,90	Sep-2	24,79
Apr-1	39,76	Okt-1	15,58
Apr-2	34,11	Okt-2	10,18
Mei-1	28,94	Nov-1	10,16
Mei-2	28,08	Nov-2	12,37
Jun-1	27,79	Des-1	19,58
Jun-2	29,59	Des-2	25,13

(Sumber: PJT I, 2021)

Data debit *release* tersebut selanjutnya digunakan menjadi data kebutuhan air irigasi (KAI) pada *target release* skenario-1 dengan tidak memperhitungkan kebutuhan air baku. Untuk *target release* skenario-2 dan skenario-3, kebutuhan air irigasi menggunakan data KAI yang sama dengan tambahan kebutuhan air baku berturut-turut sebesar 0,75 m³/s dan 1,45 m³/s.

Simulasi dan optimasi menggunakan variasi nilai CWL sebesar +135,80 m dan +136,30 m dengan nilai NHWL sebesar +137,00 m. Pengaturan kondisi awal menggunakan pengaturan *default* Nippon Koei Co. Ltd. dengan elevasi awal tampungan MR dan SSR sebesar +137,00 m.

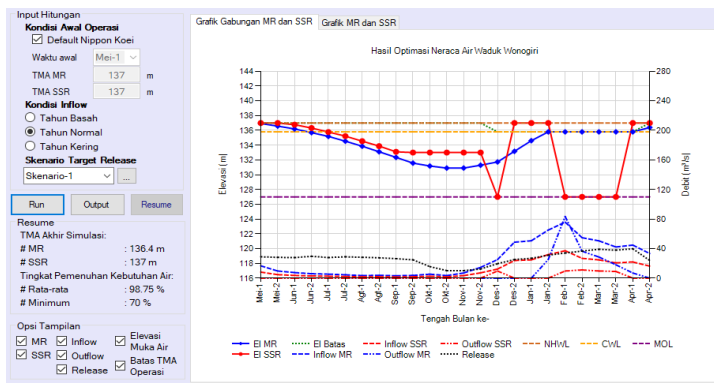
Pada hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 tampak bahwa elevasi muka air MR pada akhir simulasi sebesar +136,17 m tidak dapat mencapai elevasi muka air awal sebesar +137,00 m. Sedangkan pada SSR, elevasi muka air pada akhir simulasi sudah berhasil mencapai elevasi muka air awal sebesar +137,00 m. Hal ini terjadi karena pada simulasi neraca air kebutuhan air akan tetap dipenuhi selama *potential release* waduk masih mencukupi dan tidak mempertimbangkan pemulihan (*recovery*) tampungan waduk pada akhir simulasi yang sedapat mungkin kembali ke elevasi muka air pada awal simulasi.



Gambar 6. Simulasi neraca air dengan CWL +135,80 m pada tahun normal untuk skenario-1 (Haryanto, 2021)

Permasalahan deviasi elevasi muka air MR pada awal dan akhir simulasi tersebut dapat diatasi melalui pengaturan *release* air dengan mempertimbangkan kondisi tampungan air waduk. Dalam hal ini, pada perangkat lunak dapat dipilih menu “Optimasi Pengaturan Air” untuk melakukan pengaturan *release* air waduk.

Pada penerapan model optimasi, *input* hitungan menggunakan *input* yang sama pada kasus simulasi neraca air sehingga perbedaan antara hasil simulasi dan optimasi dapat diperbandingkan. Pengaturan optimasi menggunakan nilai faktor *k* minimum sebesar 0,7 dan jumlah iterasi maksimum sebesar 2.000 kali.



Gambar 7. Optimasi pengaturan air dengan CWL +135,80 m pada tahun normal untuk skenario-1 (Haryanto, 2021)

Hasil optimasi pengaturan air seperti pada Gambar 7 menunjukkan bahwa pengaturan *release* air waduk memberikan kondisi tampungan akhir MR yang lebih baik daripada simulasi neraca air, meskipun belum dapat mencapai kondisi awal. Sebagai perbandingan antara hasil simulasi dan optimasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi dan optimasi air pada tahun normal dan CWL +135,80 m

Target Release	Tingkat Pemenuhan Kebutuhan Air Rerata (%)		TMA MR Akhir (m)	
	Simulasi	Optimasi	Simulasi	Optimasi
Skenario-1	100	98,75	136,17	136,40
Skenario-2	100	98,79	136,16	136,38
Skenario-3	100	98,79	136,14	136,37

(sumber: Haryanto, 2021)

Nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada hasil optimasi menunjukkan hasil yang lebih rendah dari nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata hasil simulasi dikarenakan adanya pengaturan atau pengurangan *release* air waduk untuk dapat mencapai kondisi tampungan akhir yang mendekati kondisi tampungan awal. Rekapitulasi hasil optimasi pengaturan air waduk untu ditunjukkan pada Tabel 3 untuk CWL +135,80 m dan 0 untuk CWL +136,00 m.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil optimasi air untuk CWL +135,80 m

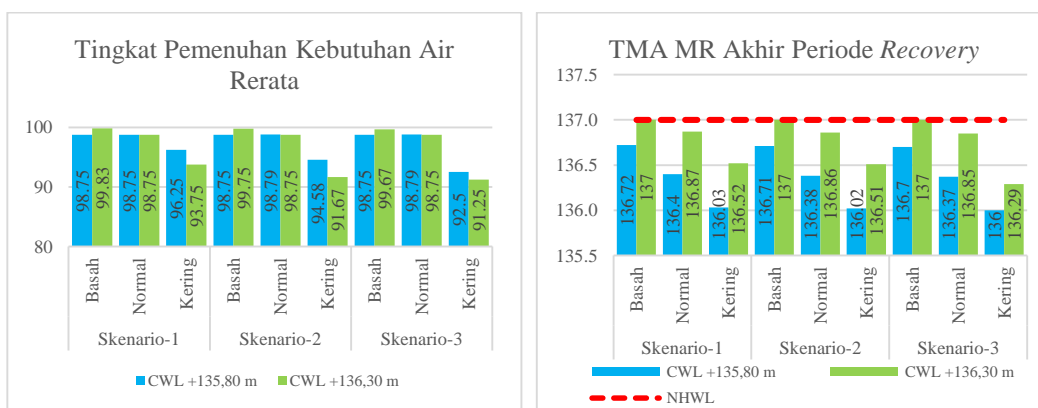
Target Release	Debit Inflow	Tingkat Pemenuhan Kebutuhan Air (%)		TMA SSR (m)			TMA MR (m)		
		Rerata	Min.	Awal	Akhir	Min.	Awal	Akhir	Min.
Skenario-1	Basah	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,72	132,53
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,40	130,90
	Kering	96,25	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,03	129,56
Skenario-2	Basah	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,71	132,29
	Normal	98,79	71,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,38	130,51
	Kering	94,58	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,02	129,01
Skenario-3	Basah	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,70	132,05
	Normal	98,79	71,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,37	130,13
	Kering	92,50	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,00	128,44

(sumber: Haryanto, 2021)

Tabel 4. Rekapitulasi hasil optimasi air untuk CWL +136,30 m

Target Release	Debit Inflow	Tingkat Pemenuhan Kebutuhan Air (%)		TMA SSR (m)			TMA MR (m)		
		Rerata	Min.	Awal	Akhir	Min.	Awal	Akhir	Min.
Skenario-1	Basah	99,83	96,00	137,00	137,00	127,00	137,00	137,00	132,53
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,87	130,90
	Kering	93,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,52	129,56
Skenario-2	Basah	99,75	94,00	137,00	137,00	127,00	137,00	137,00	132,29
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,86	130,51
	Kering	91,67	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,51	129,01
Skenario-3	Basah	99,67	92,00	137,00	137,00	127,00	137,00	137,00	132,05
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,85	130,13
	Kering	91,25	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,29	128,44

(sumber: Haryanto, 2021)



Gambar 8. Perbandingan tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata dan perbandingan TMA MR akhir periode *recovery* (Haryanto, 2021)

Pada Gambar 8 ditunjukkan bahwa nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada CWL +135,80 m lebih rendah dibanding pada CWL +136,30 m untuk *inflow* tahun basah. Pada tahun normal, nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata relatif sama untuk kedua variasi CWL. Sedangkan pada tahun kering, nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada CWL +135,80 m lebih tinggi dibandingkan pada CWL +136,30 m. Hal ini terjadi karena aturan operasi waduk pada akhir periode *recovery* yang mengharuskan muka air MR untuk mencapai NHWL.

Hasil perhitungan simulasi dan optimasi dengan variasi nilai CWL +135,80 m dan +136,30 m menunjukkan bahwa elevasi muka air MR pada akhir periode *recovery* sulit untuk mencapai NHWL. *Recovery* muka air akhir MR dapat terjadi hanya pada CWL +136,30 m dengan kondisi *inflow* tahun basah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Sedangkan pada tahun normal dan tahun kering, muka air akhir MR tidak dapat mencapai NHWL. Akan tetapi secara keseluruhan, CWL +136,30 m memberikan nilai elevasi muka air akhir MR yang lebih baik dibandingkan dengan CWL +135,80 m karena lebih mendekati nilai NHWL.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Simulasi neraca air untuk optimasi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri dapat dilakukan dengan cepat menggunakan perangkat lunak yang telah dibuat dengan hasil perhitungan yang akurat.
2. Dengan bantuan perangkat lunak dapat dilakukan optimasi pengaturan release waduk agar diperoleh pola fluktuasi muka air waduk yang baku, yaitu elevasi yang sama pada awal dan akhir periode tahun operasi dengan nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata waduk yang maksimum.
3. Optimasi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri pada CWL +136,30 m memberikan kinerja *recovery* muka air MR yang lebih baik dibandingkan dengan CWL +135,80 m.

Saran

Pemodelan simulasi neraca air waduk ini perlu ditingkatkan ketelitiannya pada perhitungan limpasan air dari SSR ke MR atau sebaliknya untuk mencapai kondisi keseimbangan muka air pada kedua tampungan yang belum dilakukan secara simultan. Komponen optimasi perangkat lunak dapat dikembangkan menggunakan algoritma lain seperti *Non-linear Programming*, *Dynamic Programming*, untuk memberikan proses yang lebih cepat. Selain itu, *output* perangkat lunak dapat ditingkatkan untuk mendapatkan Pola Operasi Waduk (POW) maupun Rencana Tahunan Operasi Waduk (RTOW) sebagai sarana dalam pengambilan keputusan terhadap rencana operasional Waduk Serbaguna Wonogiri kedepan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada Perum Jasa Tirta I (PJT I) yang telah membantu dalam penyediaan data yang digunakan pada penelitian ini.

Daftar Referensi

- Anggraheni, D., Jayadi, R. & Istiarto, 2017. Evaluasi Kinerja Pola Operasi Waduk (POW) Wonogiri 2014. *Jurnal Teknisia*, Vol XXII(1): 294-306.
- Devita, R. N. & Wibawa, A. P., 2020. Teknik-Teknik Optimasi Knapsack Problem. *Sains, Aplikasi, Komputasi dan Teknologi Informasi*, Vol II: 35-40.
- Haryanto, Y. A., 2021. Pengembangan Model Simulasi Neraca Air untuk Optimasi Pemanfaatan Potensi Air Waduk Serbaguna Wonogiri, *Tugas Akhir*. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Nippon Koei Co. Ltd., 2016. *Study Report on Operation and Maintenance of Wonogiri Multipurpose Dam and Related Structure*, Jakarta: Ministry of Public Works and Housing, The Republic of Indonesia.
- PJT I, 2021. *Kajian Perubahan Control Water Level (CWL) Bendungan Wonogiri*, Surakarta: Perum Jasa Tirta I.
- Pradipta, A., 2014. Studi Pengaruh Pembangunan Closure Dike Waduk Wonogiri Terhadap Pola Operasi Waduk Periode Banjir, *Tesis*. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Samosir, C. S., Soetopo, W. & Yuliani, E., 2015. Optimasi Pola Operasi Waduk untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri). *Jurnal Teknik Pengairan*, Vol VI: 108-115.
- Suharyanto, 1997. Analisis Unjuk Kerja Pengoperasian Waduk. *Media Komunikasi Teknik*, Vol VIII: 51-57.
- Wijayanti, P., 2020. Pola Operasi Waduk Wonogiri Setelah Pembangunan Pintu Pelimpah Baru untuk Pengendalian Banjir dan Sedimen di Wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu, *Tesis*. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Zakwan, M., Muzzammil, M. & Alam, J., 2017. Developing Stage-Discharge Relations using Optimization Techniques. *Aquademia: Water, Environment and Technology*, Vol I(2): 1-8.

ANALISIS EROSI PADA DAERAH ALIRAN SUNGAI BATURUSA

Aghata Christin Natalia^{1*}, Roby Hambali¹, dan Fadillah Sabri^{2*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bangka Belitung

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Bangka Belitung

*aghatacn@gmail.com

Pemasukan: 23 Juni 2022 Perbaikan: 15 Juli 2022 Diterima: 17 Juli 2022

Intisari

DAS Baturusa merupakan DAS terbesar keempat di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung, maraknya aktivitas tambang ilegal disinyalir menjadi penyebab kerusakan DAS di Kepulauan Bangka Belitung, salah satunya DAS Baturusa. Kerusakan yang umum terjadi pada DAS yaitu erosi lahan. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui laju erosi, persebaran tingkat bahaya erosi (TBE), besar sedimen yang dihasilkan oleh erosi lahan dan penurunan erosi setelah dilakukan simulasi konservasi tanah pada DAS Baturusa. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode USLE, dan data yang digunakan adalah data curah hujan (R), peta jenis tanah (K), peta kemiringan lereng (LS), peta tutupan lahan (C), serta pengelolaan dan konservasi tanah (P). Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dengan menggunakan metode USLE, diperoleh laju erosi tertinggi pada DAS Baturusa sebesar 4.777,083 ton/ha/tahun dan masuk dalam kategori sangat berat, sedangkan laju erosi terkecil adalah 12,571 ton/ha/tahun, masuk dalam kategori sangat ringan. DAS Baturusa didominasi oleh TBE sangat berat dengan luas 54.624,19 Ha atau 86,028% dari luas total DAS. Besaran sedimen yang dihasilkan oleh erosi pada DAS Baturusa yaitu 2.058.970,298 ton/tahun. Dengan dilakukannya arahan konservasi tanah pada beberapa satuan unit lahan, terjadi penurunan erosi sebesar 18.501.265,83 ton/tahun (76,206%), dari laju erosi semula 24.277.889 ton/tahun menjadi 5.776.623,649 ton/tahun.

Kata Kunci : DAS Baturusa, Konservasi, Sedimen, Tingkat Bahaya Erosi, USLE

Latar Belakang

DAS Baturusa merupakan DAS terbesar keempat di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung yang mencakup tiga Kabupaten dan Kota Pangkalpinang yang masuk dalam klasifikasi DAS yang dipulihkan atau mengalami kerusakan. Berdasarkan data dari BPDAS HL Baturusa Cerucuk Tahun 2018, DAS Baturusa dengan luas 63.495,90 ha memiliki kondisi luas lahan kritis 554,89 ha (8,74%), luas lahan potensial kritis 42.449,90 ha (66,85%), dan sisanya tidak kritis seluas 15.496,80 ha (24,41 %). Lahan kritis akan berpotensi mengalami erosi dan pada akhirnya akan mengakibatkan pendangkalan hulu sungai akibat sedimentasi hasil erosi.

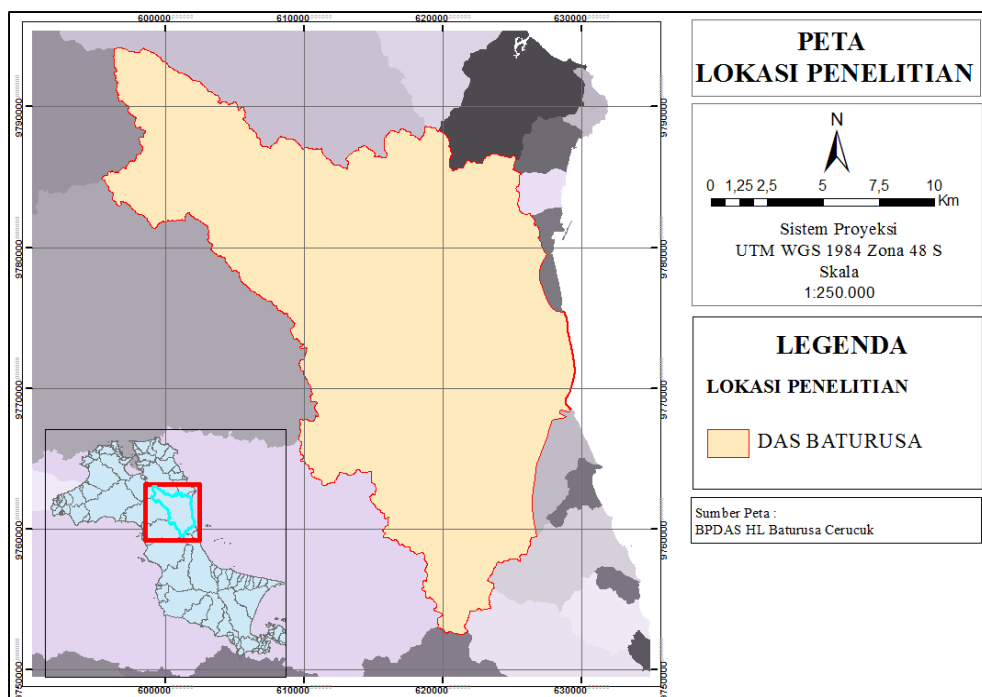
Dilansir dari mediaindonesia.com (Susianti, 2016), maraknya aktivitas tambang ilegal menyebabkan kerusakan DAS di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung.

Kepala Dinas Kehutanan Provinsi Kepulauan Bangka Belitung menjelaskan bahwa penambangan timah ilegal merupakan penyumbang kerusakan DAS di Bangka Belitung dan kerusakan tersebut menjadi pemicu bencana banjir di Pulau Bangka pada tahun 2016. Lebih lanjut dijelaskan, dari total 165 DAS di Provinsi Bangka Belitung, 65% diantaranya mengalami kerusakan karena pendangkalan akibat tambang ilegal. DAS Baturusa disebutkan masuk dalam 65% DAS yang mengalami kerusakan. Sukarman, dkk. (2020) mengungkapkan bahwa erosi pada sisi pit, longsor, dan limbah pertambangan tersebut dapat mempengaruhi daerah hilir, bahkan sampai ke laut. Hambali dan Wahyuni (2021) telah mengkaji potensi erosi akibat penambangan timah primer di Pulau Bangka. Hasilnya menunjukkan bahwa pembukaan lahan untuk penambangan timah primer menyebabkan peningkatan laju erosi yang signifikan, terutama pada tiga lokasi di Pulau Bangka, yaitu >150% dari laju erosi pada kondisi eksisting. Lebih lanjut, diungkapkan bahwa laju erosi pada tambang timah primer lebih dipengaruhi oleh faktor topografi (kemiringan lahan).

Dari uraian permasalahan diatas, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui laju erosi, tingkat bahaya erosi pada DAS Baturusa dan sedimen yang dihasilkan oleh erosi yang terjadi serta memberikan rekomendasi konservasi lahan potensial erosi. Setelah itu akan dilakukan analisis penurunan laju erosi setelah perencanaan konservasi lahan potensial erosi.

Metodologi Studi

Lokasi penelitian dilakukan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Baturusa. Berdasarkan data dari BPDAS Cerucuk (2018), DAS Baturusa memiliki luas wilayah sebesar ± 679,9376 km² serta panjang keliling ± 164,148 km. Bagian hulu DAS berada di Desa Bakam dan bagian hilir DAS berada di Pangkal Balam.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data solum tanah, data curah hujan bulanan, data kemiringan lereng, peta jenis tanah dan peta penutup lahan. Data hujan, kemiringan lereng, peta jenis tanah dan tutupan lahan digunakan untuk menghitung laju erosi lahan menggunakan metode USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Laju Erosi (ton/ha/tahun) diperkirakan dengan Persamaan 1 (Banuwa, 2013).

$$A = R . K . Ls . C . P \tag{1}$$

Dimana *A* adalah banyaknya tanah tererosi dalam ton/ha/th, *R* adalah indeks erosivitas hujan (MJ.cm/ha.jam/th), *K* merupakan faktor erodibilitas tanah, *Ls* adalah faktor panjang kemiringan lereng, *C* merupakan faktor penutup lahan dan pengelolaan tanaman, dan *P* adalah faktor tindakan-tindakan konservasi tanah.

Berdasarkan laju erosi lahan dapat diklasifikasikan bahaya erosi. Klasifikasi bahaya erosi menunjukkan nilai kualitatif erosi yang terjadi. Klasifikasi bahaya erosi dapat ditentukan berdasarkan Tabel 1 (Kironoto, 2000).

Tabel 1. Klasifikasi bahaya erosi

Kelas	Besaran Erosi (ton/ha/tahun)	Keterangan
1	< 15	Sangat Rendah
2	15 – 60	Rendah
3	60 – 180	Sedang
4	180 – 480	Berat
5	>480	Sangat Berat

Solum tanah digunakan untuk menetapkan tingkat bahaya erosi (TBE) berdasarkan klasifikasi bahaya erosi yang terjadi. Data solum tanah didapatkan melalui pengamatan solum tanah di lapangan disajikan pada Gambar 2. Penentuan TBE berdasarkan klasifikasi bahaya erosi dan solum tanah dapat ditentukan mengacu pada Tabel 2 (Hardjowigeno, 2010).



Gambar 2. Pengambilan kedalaman solum tanah di lapangan

Tabel 2. Tingkat bahaya erosi berdasarkan tebal solum tanah dan bahaya erosi

No	Tebal Solum (cm)	Erosi Maksimum (A) – ton/ha/tahun				
		< 15	15 - 60	60 - 180	180 - 480	>480
1	>90	SR	R	S	B	SB
2	60 – 90	R	S	B	SB	SB
3	30 – 60	S	B	SB	SB	SB
4	<30	B	SB	SB	SB	SB

Keterangan: SR = Sangat Ringan , B = Berat , R = Rendah, SB = Sangat Berat, S = Sedang

Untuk mempermudah perhitungan erosi menggunakan rumus USLE digunakan peta satuan. Satuan lahan merupakan satuan pemetaan dan pengamatan terkecil yang merupakan kesatuan lahan yang memiliki faktor yang sama, dalam arti erosi yang terjadi pada lahan dalam suatu unit lahan tersebut dianggap sama. Analisis tiap satuan lahan dibatasi berdasarkan perbedaan topografi jenis penggunaan lahan-lahan yang terdapat pada daerah penelitian. Kombinasi dengan cara menumpangtindihkan (*overlay*) peta kelas kelerengan dengan peta jenis penggunaan lahan dan jenis tanah merupakan cara untuk menentukan peta satuan lahan. Dengan mmengombinasikan faktor-faktor fisik tersebut menggunakan SIG, maka diperoleh total satuan lahan. Pada setiap satuan lahan diperoleh nilai-nilai faktor yang mempengaruhi erosi pada satuan lahan tersebut (Sinaga, 2012).

Sedimen yang disebabkan oleh erosi lahan di DAS Baturusa didapat melalui perhitungan Nisbah Pelepasan Sedimen (*Sediment Delivery Ratio*). Menurut SCS *National Engineering Handbook* (DPMA, 1984), besarnya prakiraan hasil sedimen dapat ditentukan berdasarkan Persamaan 2.

$$Y = E. (SDR). Ws \tag{2}$$

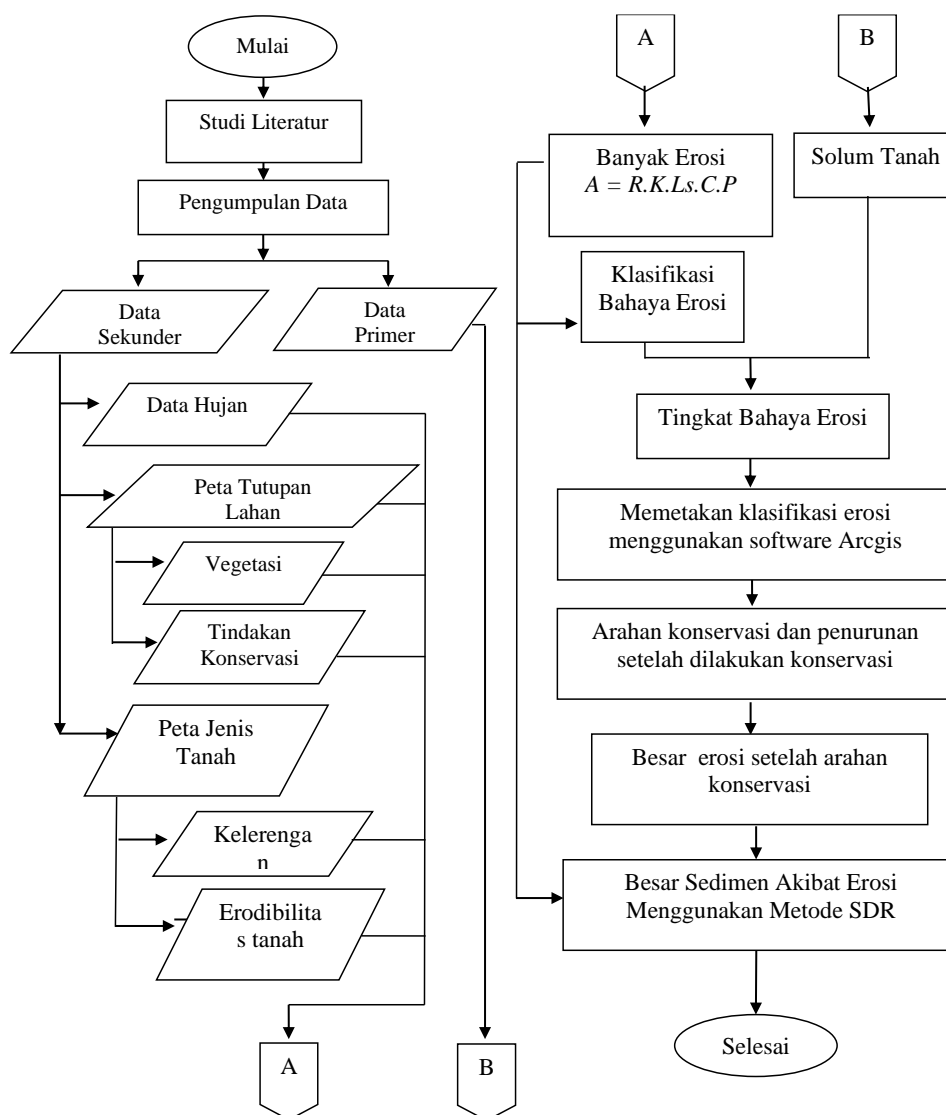
dimana *Y* merupakan hasil sedimen per satuan luas, *E* adalah Erosi total (Ton/ha/tahun), *Ws* merupakan luas daerah tangkapan air (Ha), dan *SDR* adalah nisbah pelepasan sedimen. Nilai *SDR* dapat ditentukan dengan tabel hubungan luas DAS dan nilai *SDR*. Hubungan luas DAS dan besarnya *SDR* dapat dilihat pada Tabel 3 (Suripin, 2004).

Tabel 3. Hubungan Luas DAS dan Nilai SDR

Luas		SDR
Km ²	Ha	
0,1	10	0,530
0,5	50	0,390
1,0	100	0,350
5,0	500	0,270
10,0	1.000	0,240
50,0	5.000	0,150
100,0	10.000	0,130
200,0	20.000	0,110
500,0	50.000	0,085
26000,0	2.600.000	0,049

Sumber: Arsyad, 2012

Tahapan analisis erosi pada penelitian ini disajikan dalam bentuk bagan alir sebagaimana Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Hasil Studi dan Pembahasan

Perhitungan Erosivitas Hujan

Data hujan yang digunakan untuk menghitung faktor erosivitas hujan adalah data curah hujan bulanan dengan rentang waktu 20 (tahun tahun 1999 sampai tahun 2018) yang diperoleh dari stasiun hujan BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika) Kota Pangkalpinang. Data curah hujan rata-rata bulanan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data curah hujan rata-rata bulanan

Bulan	Curah hujan rata-rata (mm)	Curah hujan rata-rata (cm)
Januari	280,42	28,042
Februari	222,74	22,274
Maret	265,64	26,564
April	260,345	26,034
Mei	195,78	19,578
Juni	139,10	13,910
Juli	133,17	13,317
Agustus	110,44	11,044
September	84,00	8,400
Oktober	162,42	16,242
November	232,36	23,236
Desember	301,62	30,162

(Sumber : Data diolah, 2020)

Nilai erosititas hujan tahunan dihitung menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Bols (Banuwa, 2013). Nilai indeks hujan pada bulan Januari sampai bulan Desember dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5, diketahui bahwa erosititas hujan di lokasi penelitian berkisar antara 58,323-217,494.

Tabel 5. Erosivitas Hujan

No	Bulan	Rain	Days	Maxp	R
1	Jan	28,04	20	6,01	217,494
2	Feb	22,27	14	6,55	203,756
3	Mar	26,56	18	5,49	204,156
4	Apr	26,03	18	5,73	207,008
5	Mei	19,58	16	4,95	141,704
6	Jun	13,91	12	3,59	89,213
7	Jul	13,32	11	3,88	92,680
8	Ags	11,04	9	3,62	79,873
9	Sep	8,40	9	3,64	58,323
10	Okt	16,24	13	4,40	115,777
11	Nov	23,24	17	4,55	161,425
12	Des	30,16	22	5,87	226,722
Total					1.571,409

(Sumber : Data diolah, 2020)

Indeks Erodibilitas Tanah

Berdasarkan peta jenis tanah yang diperoleh dari Balai Pemantapan Kawasan Hutan (BPKH) Wilayah XIII Pangkalpinang, pada daerah penelitian terdapat empat jenis tanah, sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Indeks erodibilitas tanah

Jenis Tanah	Luas (ha)	Luas (%)	K
Aluvial	10.888,631	17,148	0,47
Podsolik Coklat	4.699,640	7,401	0,16
Podsolik Merah Kuning	47.117,634	74,206	0,32
Regosol	789,950	1,245	0,40
Total	63.495,855	100	

(Sumber: BPKH Wilayah XIII Pangkalpinang, 2019)

Indeks Kemiringan Lereng

Dari peta kelas kelerengan DAS Baturusa, dapat diketahui bahwa kemiringan lahan yang beragam dari 0 - >40%. Berdasarkan bentuk topografinya, areal DAS Baturusan dikelompokkan menjadi 4 kelas kemiringan (*Ls*), yaitu 0-8%, 8-15%, 15-25%, dan >40%. Untuk nilai *Ls* didapat dari tabel kemiringan lereng pada Tabel 7.

Tabel 7. Indeks kemiringan lereng

Kelas Lereng	Kemiringan Lereng	Luas (%)	Nilai Ls
I	0 - 8 %	23,56	0,4
II	8 - 15%	2,47	1,4
III	15- 25%	61,18	3,1
IV	>40%	12,78	9,5
Total		100	

(Sumber : Data diolah, 2020)

Faktor Tutupan Lahan

Nilai faktor tutupan lahan (*C*) ditentukan berdasarkan jenis tutupan lahan pengelolaan lahan pada setiap unit lahan di DAS Baturusa. Nilai faktor *C* pada DAS Baturusa dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Faktor tutupan lahan

No	Tata Guna Lahan	Luas (%)	Nilai C
1	Air	1,380	0,05
2	Bandara	0,015	1,00
3	Hutan Rawa Sekunder	1,944	0,15
4	Pemukiman	20,710	0,60
5	Pertambangan	3,689	1,00
6	Pertanian Lahan Kering	5,118	0,10
7	Pertanian Lahan Kering Campur Semak	54,634	0,10
8	Sawah	0,018	0,15
9	Semak/Belukar	9,371	0,30
10	Tambak	0,621	0,05
11	Tanah Terbuka/Kosong	2,499	0,20
	Total	100	

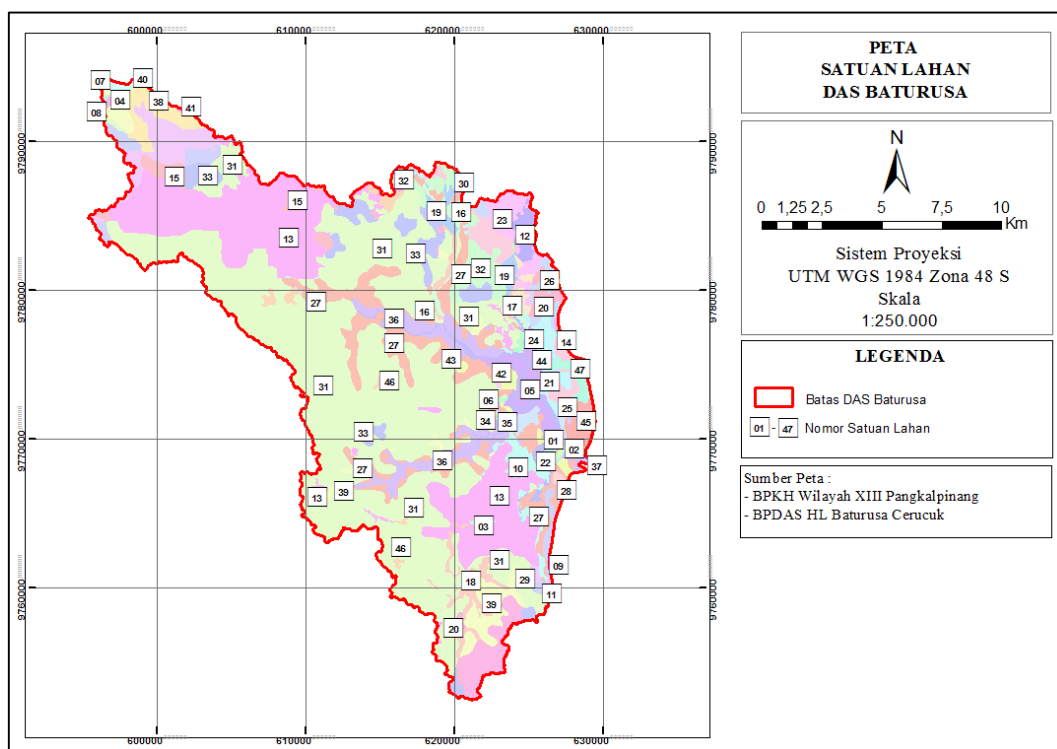
(Sumber : BPKH Wilayah XIII Pangkalpinang, 2019)

Faktor Tindakan Konservasi

Berdasarkan pengamatan langsung di lapangan, diketahui pengelolaan lahan di DAS Baturusa tidak ada tindakan konservasi yang dilakukan, baik oleh pemerintah maupun masyarakat. Dengan demikian untuk nilai pengelolaan lahan (P) dikategorikan tanpa ada tindakan konservasi, nilai $P = 1$.

Analisis Satuan Lahan

Perhitungan satuan lahan pada DAS Baturusa menghasilkan sebanyak 47-unit satuan lahan. Peta satuan lahan hasil analisis disajikan pada Gambar 4. Setelah semua variabel dalam persamaan USLE telah ditentukan nilainya, maka besarnya erosi pada DAS Baturusa dapat diperkirakan dengan cara mengalikan faktor-faktor erosi menggunakan metode USLE yaitu faktor erosivitas hujan (R), erodibilitas tanah (K), panjang dan kemiringan lereng (Ls) dan faktor pengelolaan tanaman (C) serta tindakan konservasi tanah (P). Total Erosi pada Das Baturusan Sebesar 24.277.889,481 ton/tahun atau setara 382,354 ton/ha/tahun. Rekapitulasi hasil perhitungan besarnya estimasi jumlah erosi pada tiap-tiap kelas erosi di DAS Baturusa ditunjukkan pada Tabel 9.



Gambar 4. Unit Satuan Lahan

Tabel 9. Rekapitulasi perkiraan erosi satuan lahan

Kelas Erosi	Klasifikasi Erosi	Luas (Ha)	Besar Erosi (Ton/ha/tahun)
1	Sangat Ringan	1.142,934	0,262
2	Ringan	11.399,391	8,144
3	Sedang	32.950,213	88,932
4	Berat	3.664,007	25,399
5	Sangat Berat	14.339,310	259,617
		63.495,855	382,354

(Sumber : Hasil perhitungan, 2020)

Pendugaan Tingkat Bahaya Erosi

Tingkat bahaya erosi diklasifikasikan berdasarkan solum tanah. Semakin tipis solum tanah maka tingkat bahaya erosi semakin berat walaupun laju eorsinya sama dengan yang terjadi pada solum tanah yang lebih besar. Berdasarkan kedalaman solum tanah, keempat jenis tanah di DAS Baturusa memiliki solum yang cukup dangkal sampai dalam. Pada DAS Baturusa terdapat tiga kelas tingkat bahaya erosi, yaitu sedang, berat dan sangat berat. Kelas bahaya erosi pada DAS Baturusa didominasi oleh kelas bahaya erosi Sangat Berat dengan luas 49609,1272 Ha atau 78,13% dari total luas DAS Baturusa. Tabel 10 dan Gambar 5 merupakan hasil pendugaan tingkat bahaya erosi (TBE) di DAS Baturusa.

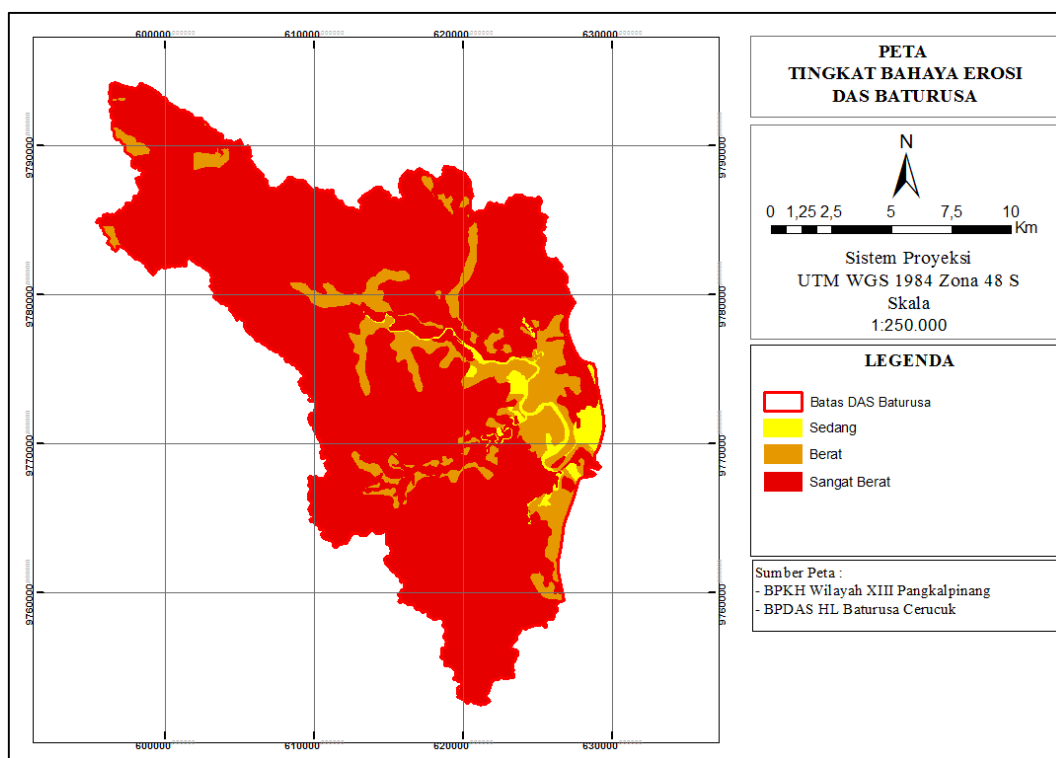
Besaran Sedimen

Dalam penelitian ini, nilai *SDR* yang digunakan merupakan fungsi dari luas DAS. Semakin luas DAS, maka nilai *SDR* akan semakin kecil. Hal ini disebabkan jarak dari tempat terjadinya erosi di atas lereng hingga ke saluran air (sungai) akan semakin jauh, sehingga sedimen yang terbawa ke sungai akan semakin sedikit. Nilai *SDR* ditentukan dengan Tabel 3. Nilai *SDR* untuk DAS Baturusa dengan luas sebesar 63.495,85 Ha dapat dihitung dengan menggunakan rumus interpolasi linear, yaitu sebesar 0,084. Dari hasil perhitungan besaran sedimen, didapat hasil sedimen pada DAS Baturusa sebesar 2.058.970,298 ton/tahun.

Tabel 10. Rekapitulasi tingkat bahaya erosi DAS Baturusa

No	Kelas	Luas (Ha)	Luas (%)
1	Sangat Ringan	0	0
2	Ringan	0	0
3	Sedang	1.035,289	1,630
4	Berat	7.836,383	12,342
5	Sangat Berat	54.624,193	86,028
Total		6.3495,855	100

(Sumber: Hasil perhitungan, 2020)

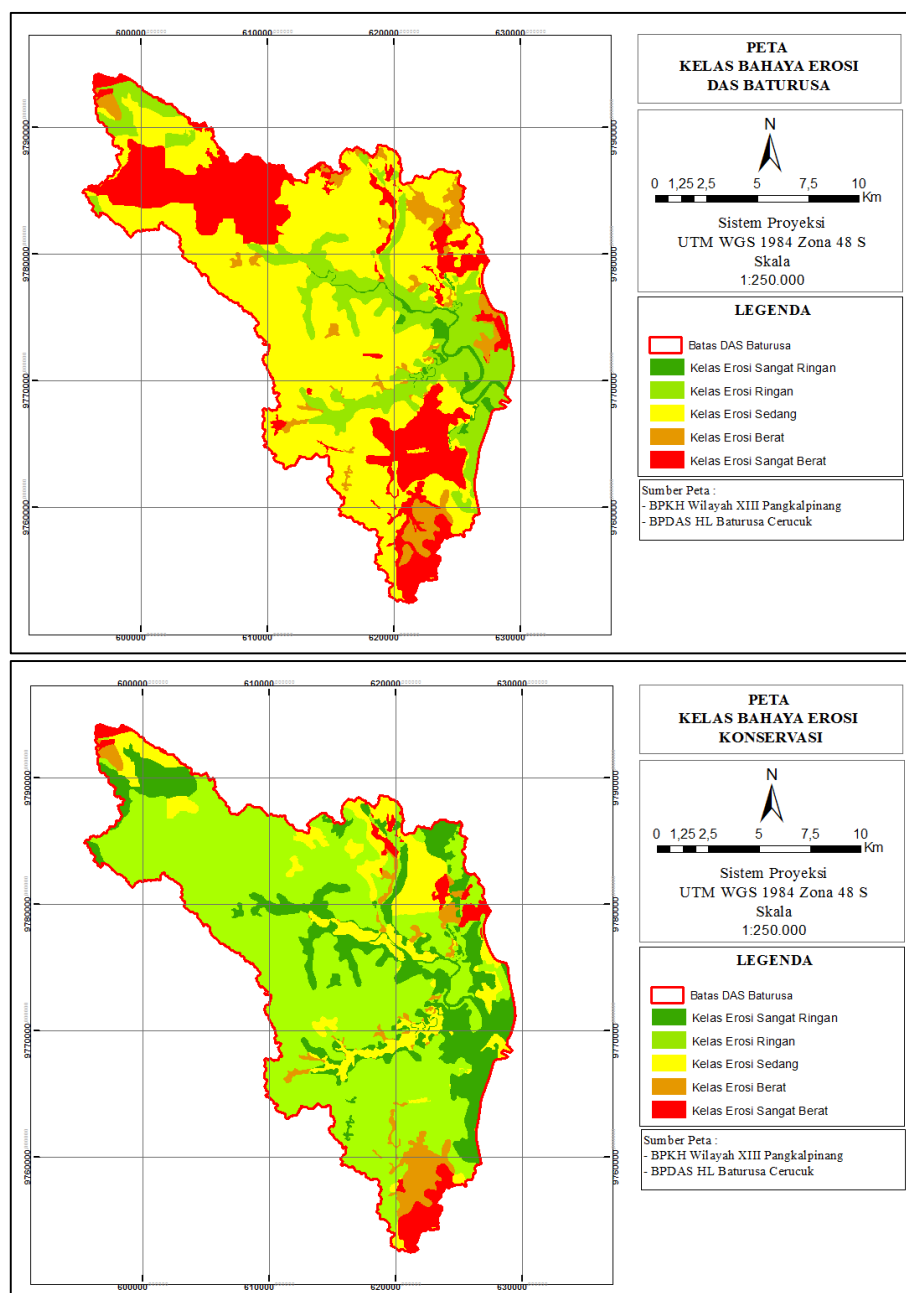


Gambar 5. Peta tingkat bahaya erosi (TBE) DAS Baturusa

Upaya Konservasi Lahan

Gambar 6 merupakan peta kelas bahaya erosi di DAS Baturusa pada kondisi sebelum dan setelah disimulasi dengan upaya konservasi lahan. Kelas bahaya erosi DAS Baturusa didominasi oleh kelas erosi sedang, namun secara total tergolong dalam kelas erosi berat. Untuk meminimalkan laju erosi secara umum juga untuk meningkatkan produktivitas lahan secara maksimal, memperbaiki lahan yang rusak/kritis, dan melakukan upaya pencegahan kerusakan akibat erosi perlu dilakukan upaya konservasi lahan.

Rekomendasi upaya konservasi lahan diberikan pada satuan lahan yang termasuk dalam klasifikasi bahaya erosi sedang, berat dan sangat berat. Klasifikasi yang masuk kedalam upaya konservasi lahan ialah penggunaan lahan pertanian lahan kering campur semak, pertambangan dan pemukiman. Bentuk upaya konservasi lahan yang diterapkan pada daerah tersebut antara lain metode vegetatif dan metode mekanik. Konservasi dengan cara vegetatif dilakukan dengan memberikan tanaman penutup tanah yang rapat/ vegetasi penutup baik yang disebar untuk menutup permukaan tanah guna melindungi permukaan tanah dari pukulan langsung butiran hujan sehingga mengurangi laju erosi permukaan. Teknik mekanik yang dapat diterapkan untuk lahan pertanian lahan kering di DAS Baturusa misalnya dengan pembuatan teras bangku. Setelah dilakukan simulasi upaya konservasi lahan pada seluruh DAS Baturusa, terjadi penurunan laju erosi secara signifikan. Total penurunan laju erosi yaitu 18.501.265,83 Ton/tahun (76,206%) dari laju erosi semula 24.277.889 Ton/tahun menjadi 5.776.623,649 Ton/tahun.



Gambar 6. Peta Kelas Bahaya Erosi DAS Baturusa pada kondisi sebelum dan sesudah disimulasi upaya konservasi

Kesimpulan

Laju erosi tertinggi di DAS Baturusa sebesar 4.777,083 ton/ha/tahun termasuk dalam kategori sangat berat. Laju erosi tersebut terjadi pada lereng >40% (sangat curam), dengan tutupan lahan pertambangan. Laju erosi yang paling kecil yaitu 12,571 ton/ha/tahun termasuk kategori sangat ringan, dengan kemiringan lereng 0-8 % (landai) dan tutupan lahan tubuh air. Klasifikasi bahaya erosi di DAS Baturusa didominasi dengan klasifikasi bahaya erosi kelas 3 (Sedang) yaitu seluas 32.950,21 Ha atau 51,89 % dari luas total DAS Baturusa. DAS Baturusa di dominasi oleh

Tingkat Bahaya Erosi sangat berat dengan luas 54.624,19 Ha atau 86,028%. Tingkat bahaya erosi sedang dengan luas 1.035,289 Ha atau 1,630 % dan tingkat bahaya erosi berat dengan luas 7.836,38 Ha atau 12,341%. Hasil perkiraan jumlah sedimen yang dihasilkan oleh erosi pada penelitian ini diperoleh berdasarkan perhitungan tiga faktor yaitu nilai erosi, nilai SDR dan luas DAS. Berdasarkan perhitungan tiga faktor tersebut, diperoleh nilai perkiraan sedimen yang dihasilkan erosi pada DAS Baturusa yaitu sebesar 2.058.970,298 ton/tahun.

Perlu dilakukannya konservasi lahan yang bertujuan untuk meningkatkan produktivitas lahan guna mendukung pertumbuhan tanaman sehingga dapat mengurangi atau menghilangkan dampak negatif pengelolaan lahan seperti erosi, sedimen dan banjir. Diperlukan peran instansi terkait untuk melakukan pembinaan atau mengadakan penyuluhan kepada masyarakat mengenai pengelolaan lahan yang benar dengan mengedepankan prinsip-prinsip konservasi agar tidak menyebabkan erosi dan kerusakan lahan yang lebih berat.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan in, penulis mengucapkan terima kasih kepada BPDAS-HL Baturusa-Cerucuk dan Badan Pemantapan Kawasan Hutan (BPKH) Wilayah XII Pangkalpinang yang telah membantu menyediakan kelengkapan data sekunder pada penelitian ini.

Daftar Referensi

- Anonim. 2018. *Peraturan Gubernur Kepulauan Bangka Belitung Nomor 1 tentang Rencana Pengelolaan DAS Bangka Belitung*.
- Arsyad, S. 2012. *Konservasi Tanah dan Air*. IPB Press. Bogor
- Banuwa, I.S. 2013. *Erosi*. Prenada Media. Jakarta.
- Hambali, R., Wahyuni S. 2021. The potential for land erosion due to primary tin mining in Bangka Island. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 926 012072.
- Hardjowigeno, S. 2010. *Ilmu Tanah*. Akademika Pressindo. Jakarta.
- Kironoto, dkk. 2016. Kajian Erosi dengan Metode MUSLE Daerah Tangkapan Hujan Waduk Sermo Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Teknik Sipil*. Padang.
- Sinaga, dkk. 2012. Analisis Potensi Erosi pada Penggunaan Lahan Daerah Aliran Sungai Sedau di Kecamatan Singkawang Selatan. *Jurnal Teknik Sipil*. Pontianak.
- Sukarman, Gani, R.A., Asmarhansyah. 2020. Tin mining process and its effects on soils in Bangka Belitung Islands Province, Indonesia. *SAINS TANAH – Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 17(2): 180-189. <http://dx.doi.org/10.20961/stjssa.v17i2.37606>
- Suripin. 2004. *Pelestarian Sumberdaya Tanah dan Air*. Andi. Yogyakarta.
- Susianti, D. 2016. 65% DAS di Babel Rusak Akibat Penambangan. <https://mediaindonesia.com/nusantara/52924/65-das-di-babel-rusak-akibat-penambangan.html>, (diakses tanggal 12 Juni 2021)

PENGARUH EROSI LAHAN TERHADAP KAPASITAS SABO DAM

Novika Komariona Dewi¹, Jazaul Ikhsan^{1*}, dan Nursetiawan¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

*jazaul.ikhsan@umy.ac.id

Pemasukan: 29 Juni 2022 Perbaikan: 11 Juli 2022 Diterima: 12 Juli 2022

Intisari

Indonesia memiliki banyak gunung aktif berapi salah satunya adalah Gunung Merapi. Gunung Merapi merupakan gunung teraktif di Indonesia bahkan dunia yang dimana mengalami erupsi dengan mengeluarkan piroklastik sebesar 150 juta m³ pada tahun 2010 dan lebih dominan ke arah Kali Gendol dengan jarak mencapai 15 km. Piroklastik yang dikeluarkan akibat letusan Gunung Merapi akan mengendap, menumpuk dan terjadi sedimentasi bercampur dengan hasil erosi-erosi lahan di sekitar. Seiring berjalannya waktu, endapan tersebut nantinya akan tererosi kembali dan menyebabkan banjir lahar dingin ketika terjadi hujan. Untuk menanggulangi bencana aliran lahar dingin maupun sedimen agar tidak berpotensi mengancam keselamatan manusia, sarana prasarana bangunan umum, hunian, maupun daerah pertanian, maka dilakukan pembangunan sabo dam sebagai pengendali banjir lahar dingin. Salah satu sabo dam yang dibuat adalah GE-C Gadingan. Untuk mengetahui kemampuan sabo dam GE-C Gadingan dalam menampung sedimen, maka perlu diprediksi laju erosi yang terjadi dengan menggunakan metode *USLE* (*Universal Soil Loss Equation*) dan SIG (Sistem Informasi Geografis) berbasis pixel atau software ArcGIS 10.1. Hasil analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa: (1) Laju erosi di Sub-DAS Kali Gendol dengan menggunakan metode USLE sebesar 47.119,470 ton/ha/tahun, (2) Besar volume sedimen yang terjadi di Sub-DAS Kali Gendol sebesar 1.132.925 m³/tahun dan tidak ada yang akan terlimpas ke bangunan sabo dam GE-C Gadingan. tahun, (3) Kapasitas sabo dam GE-C Gadingan dalam menampung sedimen sebesar 29.659,71 m³. Sehingga, dapat dikatakan bahwa sabo dam GE-C Gadingan dapat menampung volume angkutan sedimen yang terjadi dalam satu tahun.

Kata Kunci: Sedimentasi, Erosi, ArcGIS, *USLE*, Sabo Dam GE-C Gadingan

Latar Belakang

Indonesia memiliki banyak gunung aktif berapi, salah satunya adalah Gunung Merapi yang mempunyai ketinggian ±2968 m. Apabila gunung ini meletus, maka akan mengeluarkan piroklastik yang merupakan bongkahan-bongkohan batu besar yang dikeluarkan dari gunung lalu akan bergerak ke bawah mengikuti kemiringan lereng.

Untuk dapat mengetahui daya tampung sabo dam dalam usaha mitigasi bencana sedimen yang akan terjadi, maka penyusun melakukan perhitungan prediksi laju

erosinya menggunakan metode *USLE* (*Universal Soil Loss Equation*) dan bantuan software ArcGIS. Marseli (2015) dalam tugas akhirnya yang berjudul “Analisis Laju Erosi pada Daerah Tangkapan Waduk Sermo Menggunakan Metode *USLE*” mengatakan bahwa Metode *USLE* merupakan suatu metode yang umum digunakan untuk memprediksi kehilangan tanah yang disebabkan oleh erosi. Metode *USLE* mempunyai kelebihan, yaitu proses pengolahan datanya yang sederhana.

Teknik penanggulangan secara struktural yang telah diterapkan selama ini berupa sistem pengendalian sedimen melalui bangunan sabo yaitu bangunan pengendali sedimen yang dimaksudkan untuk menahan dan mengendalikan laju aliran sedimen ke arah hilir sehingga dengan demikian dapat mengurangi besarnya daya rusak yang ditimbulkan. Sebagai salah satu sungai yang berhulu di kaki Gunung Merapi, Kali Gendol adalah anak sungai Kali Opak dimana Kali Gendol mengalir ke arah tenggara dengan panjang sungai 22 km, serta luas DAS 14,60 km². Hal ini dikaji untuk mendapatkan estimasi mendasar dan akurat terhadap kapasitas tampung sedimen di alur sungai.

Dalam penelitian untuk mengetahui besarnya sedimen maka diperlukan analisis hidrologi. Menurut Triatmodjo (2008) dalam analisis hidrologi sering diperlukan untuk menentukan hujan rerata pada daerah tersebut, yang dapat dilakukan dengan tiga metode salah satunya adalah Metode Thiessen. Metode ini digunakan apabila penyebaran stasiun hujan di daerah yang ditinjau tidak merata. Perhitungan metode Thiessen adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{A_1P_1 + A_2P_2 + A_nP_n}{A_1 + A_2 + A_n} \quad (1)$$

dengan:

- P = Hujan rerata kawasan
 P_1, P_2, \dots, P_n = Hujan pada stasiun ke 1, 2, ..., n
 A_1, A_2, \dots, A_n = Luas daerah stasiun ke 1, 2, ..., n

Hal yang berkaitan erat dengan sedimentasi adalah terjadinya erosi. Erosi adalah suatu proses dimana tanah dihancurkan (*detached*) dan kemudian dipindahkan ke tempat lain oleh kekuatan air, angin, dan gravitasi (Hardjowigeno, 1995). Dalam memprediksi laju erosi, dilakukan dengan metode *USLE*. Metode *USLE* memungkinkan perencana memprediksi laju erosi rata-rata lahan tertentu pada suatu kemiringan dengan pola hujan tertentu untuk setiap macam-macam jenis tanah dan penerapan pengelolaan lahan (tindakan konversi lahan). *USLE* dirancang untuk memprediksi erosi jangka panjang. Persamaan tersebut dapat juga memprediksi erosi pada lahan-lahan (Listriyana, 2006). Formulasinya dapat digunakan rumus dari Wischmeier dan Smith (1960, dalam Sintanala, 1989) sebagai berikut:

$$E = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

dengan :

- R = Erosivitas Hujan
 K = Erodibilitas Tanah
 L dan S = Indeks Panjang dan Kemiringan Lereng

C dan P = Indeks Vegetasi Penutup Lahan dan Pengelolaan Tanaman

Menurut Soemarto (1987), sedimentasi dapat didefinisikan sebagai pengangkutan, melayangnya (suspensi) atau mengendapnya material fragmental oleh air. Sedimentasi merupakan akibat dari adanya erosi dan memberikan dampak yang banyak. Untuk memperkirakan besarnya hasil sedimen dari suatu DAS, dilakukan perhitungan SDR (*Sediment Delivery Ratio*). Nilai SDR mendekati satu artinya semua tanah yang terangkut masuk ke dalam sungai. Kejadian ini hanya mungkin terjadi pada DAS atau Sub-DAS kecil dan yang tidak memiliki daerah-daerah datar, tetapi memiliki lereng-lereng curam, banyak butir-butir halus (liat) yang terangkut, memiliki kerapatan drainase yang tinggi, atau secara umum dikatakan tidak memiliki sifat yang cenderung menyebabkan pengendapan sedimen di atas lahan DAS tersebut. Nilai Sediment Delivery Ratio dapat dihitung dengan menggunakan rumus Boyce (1975 dalam Susilowati, 2014) yaitu :

$$SDR = 0,41 \times Adas^{-0.3} \tag{3}$$

dengan:

SDR = *Sediment Delivery Ratio*
 $Adas$ = Luas DAS (ha)

Besarnya jumlah hasil sedimen per satuan DAS per satuan waktu (dalam satuan ton/ha/th) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$SY = SDR \times E \tag{4}$$

dengan:

SY = Angkutan sedimen (ton/ha/tahun)
 SDR = *Sediment Delivery Ratio*
 E = Erosi lahan (ton/ha/tahun)

Total volume sedimen didapat dari konversi nilai laju sedimen dengan menggunakan persamaan:

dengan:

$$Vs = \frac{sy \times A}{BeratJenisSedimen} \tag{5}$$

Vs = Volume sedimen (m³/tahun)
 SY = Angkutan sedimen (ton/ha/tahun)
 A = Luas DAS (ha)

Kapasitas bangunan sabo dam adalah kemampuan bangunan dalam menampung, mengendalikan dan mengalirkan sedimen. Menurut Cahyono (2000) dalam menghitung besarnya kapasitas sabo dam, digunakan rumus sebagai berikut:

$$Va = 1,5 (0,67. i. h. B) \tag{6}$$

$$Vb = 1,5 (0,4. i. h. B) \tag{7}$$

dengan:

Va = Tampungan mati/tetap (m³)

- V_b = Tampung kontrol (m^3)
 i = Kemiringan dasar sungai
 h = Tinggi efektif dam (m)
 B = Lebar efektif dam (m)

Metodologi Studi

Lokasi Penelitian

Penelitian ini meninjau bangunan sabo dam GE-C Gadingan yang berlokasi di antara Dusun Bronggang dan Dusun Gadingan Banaran, Desa Argomulyo, Kecamatan Cangkringan, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Lokasi bangunan ini terletak pada koordinat UTM, X = 440889,365; Y = 9152783,349.

Data Pengujian

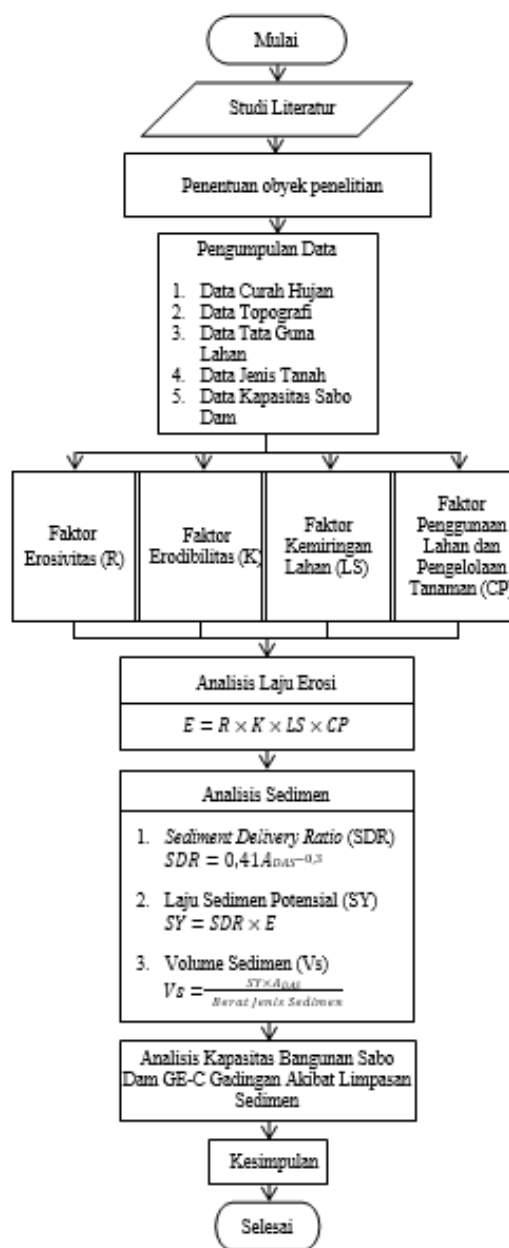
Data Pengujian menggunakan metode USLE dan software ArcGIS 10.1. Dalam memprediksikan besarnya laju erosi dan sedimentasi yang tertampung dalam bangunan sabo dam GE- C Gadingan, maka diperlukan beberapa data dimana data-data tersebut merupakan data-data sekunder. Data-data diperoleh dari beberapa instansi diantaranya sebagai berikut,

Tabel 1. Sumber data pengujian

No	Data	Sumber
1.	Data Curah Hujan (2010-2015)	Balai Sabo yang diambil dari stasiun Sorasan dan stasiun Ngandong.
2.	Data Topografi	Data topografi diperoleh dari Balai Sabo Yogyakarta dan PPK (Pejabat Pembuat Komitmen), berupa peta kontur dan peta kemiringan lahan
3.	Data Tata Guna Lahan	Data tata guna lahan diperoleh dari Balai Sabo Yogyakarta, berupa peta penutup tanah dan pengolaan tanah pada masing-masing penggunaan lahan tersebut.
4.	Data Jenis Tanah	Data jenis tanah diperoleh dari BPDAS Progo-Serayu-Opak, berupa peta jenis tanah pada DAS Progo
5.	Data Sabo DAM	Data sabo dam diperoleh dari Balai Sabo Yogyakarta dan PPK (Pejabat Pembuat Komitmen), berupa peta lokasi, koordinat sabo dam, kapasitas sabo dam sepanjang Sub-DAS Kali Gendol dan dimensi sabo dam GE-C Gadingan.

Tahap dan Prosedur Penelitian

Suatu penelitian harus dilakukan secara sistematis dan dengan urutan yang jelas serta teratur agar hasil yang diperoleh sesuai dengan yang diharapkan. Sehingga, pelaksanaan penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 1 bagan alir sebagai berikut:



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Hasil Studi dan Pembahasan

Sub-DAS ini mencakup Desa Wukirsari, Glagaharjo, dan Argomulyo, Kecamatan Cangkringan, Kabupaten Sleman, Provinsi Jawa Tengah. Sub-DAS ini memiliki luas sebesar 1360,77 Ha.

Kondisi topografi pada daerah ini sangat dipengaruhi oleh adanya Gunung Merapi sehingga memiliki relief pegunungan dan lembah-lembah. Daerah ini memiliki karakteristik wilayah yang berpotensi menimbulkan resiko bencana oleh erupsi gunung api. Hal ini merupakan konsekuensi dari kondisi wilayah daerah tersebut secara geologis, geomorfologis, dan klimatis.

Pada analisis hidrologi ini dilakukan dengan mencari nilai curah hujan rerata wilayah menggunakan metode Thiessen. Terdapat 2 (dua) stasiun, yaitu Stasiun Sorasan dengan luas 4,315 km² (bobot 31,712 %) dan Stasiun Ngandong dengan luas 9,292 km² (bobot 68,288%) pada bulan 2010-2015. Kemudian, setelah didapatkan nilai curah hujan rerata wilayah, kemudian dihitung curah hujan bulanan rata-rata yang terjadi dengan menggunakan metode rerata.

Faktor erosititas hujan dihitung dengan rumus Hudson (Sena, 2016) sebagai berikut:

$$R = 14,374 \bar{P}^{1,075}$$

dengan:

$$R = \text{erosivitas hujan (ton/ha.cm)}$$

Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Perhitungan nilai rata rata hujan P (mm) dan erosititas hujan

Bulan	Tahun						P	R (ton/ha.cm)
	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
Januari	491,45	476,13	394,57	787,76	563,44	525,00	539,73	1243,55
Februari	456,29	362,78	549,50	112,86	439,82	349,00	378,37	848,87
Maret	485,67	486,65	289,00	274,50	381,41	459,50	396,12	891,75
April	447,50	366,12	212,53	220,00	403,07	463,64	352,14	785,78
Mei	650,50	459,49	78,26	191,00	209,81	125,00	285,68	627,54
Juni	82,55	11,27	52,65	226,00	138,72	7,40	86,43	173,57
Juli	131,28	29,36	0,68	50,50	79,78	0,00	48,60	93,48
Agustus	166,62	5,80	0,00	13,04	1,00	0,57	31,17	57,99
September	474,93	14,99	2,73	14,34	0,00	0,00	84,50	169,41
Oktober	374,15	106,55	181,63	205,55	1,00	0,00	144,81	302,30
November	255,26	603,64	773,77	483,23	266,16	247,46	438,25	994,10
Desember	564,20	366,71	780,93	612,59	543,45	459,56	554,57	1280,36
Rata-rata							278,36	622,39

Faktor erodibilitas tanah di lokasi penelitian didasarkan pada tipe tanah yang ada yaitu dominan *association brown andosol and red brown latosol serta grey brown regosol*, dengan nilai erodibilitasnya adalah 0,271. Untuk tanah tipe *complex grey regosol and lithosol*, maka nilai erodibilitasnya sebesar 0,172.

Nilai kemiringan lereng (S) sangat menentukan indeks panjang lereng (LS). Nilai LS ditentukan dengan rumus berikut:

$$LS = \frac{L^{0,5}}{100(1,38+0,965S+0,138S^2)} \text{ jika } S < 20\%$$

$$LS = \left(\frac{L}{22,1}\right)^{0,6} \times \left(\frac{S}{9}\right)^{1,4} \text{ jika } S > 20\%$$

Dimana L adalah jarak rata-rata antar elevasi dan S adalah kemiringan

Contoh perhitungan untuk interval elevasi 500-600 m, dengan L = 1735 m dan S = 5,8%, maka nilai LS sebesar:

$$LS = \frac{1735^{0,5}}{100(1,38+0,965 \times 5,8+0,138 \times 5,8^2)} = 4,8$$

Indeks penggunaan lahan dan pengelolaan tanaman (*CP'*) dihitung dengan menggunakan bantuan software ArcGIS 10.1, untuk menentukan luasan masing-masing tata guna lahan tiap jarak elevasi atau interval. Contoh untuk mendapatkan nilai *CP'* untuk elevasi 500-600 m, dengan diketahui tata guna lahannya berupa *dry land* sebesar 3,26 Ha dan nilai *CP* = 0,75, *grass* sebesar 0,72 Ha dan nilai *CP* = 0,07, *plantation yard* sebesar 143,68 Ha dan nilai *CP* = 0,40 serta *residential area* sebesar 32,81 Ha dan nilai *CP* = 0,60.

$$CP\ total = (3,26 \times 0,75) + (0,72 \times 0,07) + (143,68 \times 0,40) + (32,81 \times 0,60) = 79,66.$$

$$CP' = CP\ total / total\ area = 79,66 / 180,47 = 0,44.$$

Setelah semua parameter telah didapatkan nilainya, maka dapat ditentukan prediksi laju erosi (*E*) nya.

Berikut adalah perhitungan prediksi laju erosi untuk elevasi 500-600 m:

$$E = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

$$E = R \times K \times LS \times CP$$

$$E = 622,39 \times 0,271 \times 4,8 \times 0,44$$

$$E = 356,228\ \text{Ton/Ha/Tahun}$$

Perhitungan potensi erosi tiap elevasi dapat ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Rekapitulasi Potensi Erosi dengan *USLE*

No	Elevasi (m)	Luas (Ha)	R (Ton/Ha.cm)	K	LS	CP'	Erosi (E = R × K × LS × CP') (Ton/Ha/Tahun)
1	>2300	8,30	622,39	0,271	117,15	0,75	14.819,660
2	2300-2200	5,69	622,39	0,271	45,30	0,75	5.730,522
3	2200-2100	7,68	622,39	0,271	49,32	0,75	6.239,058
4	2100-2000	9,60	622,39	0,271	50,46	0,56	4.766,175
5	2000-1900	11,67	622,39	0,271	51,25	0,35	3.025,496
6	1900-1800	17,03	622,39	0,271	39,70	0,30	2.008,845
7	1800-1700	19,72	622,39	0,271	49,08	0,26	2.152,348
8	1700-1600	25,47	622,39	0,271	13,48	0,24	545,677
9	1600-1500	29,34	622,39	0,271	41,53	0,22	1.541,059
10	1500-1400	28,01	622,39	0,271	27,78	0,18	843,411
11	1400-1300	30,88	622,39	0,271	25,70	0,25	1.083,697
12	1300-1200	40,02	622,39	0,271	20,65	0,31	1.079,733
13	1200-1100	80,43	622,39	0,271	9,45	0,42	669,446
14	1100-1000	110,96	622,39	0,271	7,30	0,42	517,138
15	1000-900	113,20	622,39	0,172	8,46	0,44	398,490
16	900-800	114,07	622,39	0,172	6,96	0,45	335,286
17	800-700	159,21	622,39	0,172	6,62	0,47	333,081
18	700-600	166,86	622,39	0,271	5,61	0,47	444,729
19	600-500	180,47	622,39	0,271	4,80	0,44	356,228
20	500-412,5	202,16	622,39	0,271	4,00	0,34	229,390
TOTAL		1360,77					47119,470

Berikut ini perhitungan nilai *SDR* dan volume sedimen potensial:

Sediment Delivery Ratio (*SDR*)

$$SDR = 0,41 \times Adas^{-0,3}$$

$$SDR = 0,41 \times 1360,77^{-0,3}$$

$$SDR = 0,047$$

Laju Sedimen Potensial (*SY*)

$$SY = SDR \times 47.119,470$$

$$SY = 0,047 \times 47.119,470$$

$$SY = 2.214,615 \text{ Ton/Ha/Tahun}$$

Volume Sedimen Total (*Vs*)

Total volume sedimen didapat dari konfersi nilai laju sedimen potensial:

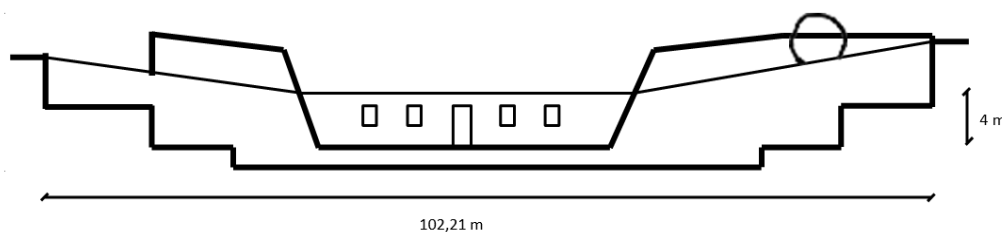
$$Vs = \frac{SY \times Adas}{Berat \text{ Jenis Sedimen}}$$

$$Vs = \frac{2.214,615 \times 1.360,77}{2,66}$$

$$Vs = 1.132.925 \text{ m}^3/\text{Tahun}$$

Analisis Kapasitas Bangunan Sabo Dam Akibat Limpasan Sedimen

1. Sketsa Bangunan GE-C Gadingan:



Gambar 2. Sketsa Sabodam

Dengan:

Lebar dam = 102,21 m

Tinggi efektif dam = 4 m

$$\begin{aligned} \text{Kemiringan Sungai} &= \frac{H}{0,9 \times L} \\ &= \frac{2650 - 412,5}{0,9 \times 22000} \\ &= 11,3\% \end{aligned}$$

2. Kapasitas Bangunan Sabo Dam yang ada di sepanjang Sub-DAS Kali Gendol

Tabel 3. Data kapasitas sabodam (Balai sabo)

No	Nama Bangunan Sabo Dam	Kapasitas Bangunan (m ³)
1	GE D (Kaliadem)	49.500
2	GE D7 (Kaliadem)	386.000
3	GE D5 (Kaliadem)	444.000
4	GE D4	47.900
5	GE D3	117.900
6	GE D2	70.000
7	GE D (Kepuharjo)	100.500
8	GE C13	214.200
9	GE C12 (Ngancar)	111.200
10	GE C10 (Bakalan)	87.700
11	GE C (Cangkring I)	56.900
12	GE C (Bronggang)	52.600
	Total	1.738.400

Maka dapat dihitung:

1. Untuk menentukan kapasitasnya dalam mengontrol atau menampung sedimen tiap tahunnya dapat dihitung sebagai berikut:

- a. Tampung Mati/Tetap (V_a)

$$= 1,5 (0,67. i. h_2. B)$$

$$= 1,5 (0,67.11,3. 42. 102,21)$$

$$= 18.571,97 \text{ m}^3$$

- b. Tampung Kontrol (V_b)

$$= 1,5 (0,4. i. h_2. B)$$

$$= 1,5 (0,4.11,3. 42. 102,21)$$

$$= 11.087,74 \text{ m}^3$$

- c. Total Kapasitas GE-C Gadingan

$$= V_a + V_b$$

$$= 18.571,97 + 11.087,74$$

$$= 29.659,71 \text{ m}^3$$

2. Untuk mengetahui besarnya volume sedimen yang terlimpas ke bangunan GE-C Gadingan adalah:

$$= \text{Vol. Sedimen Total} - \sum \text{Kapasitas Bangunan Sabo}$$

$$= 1.132.925 - 1.738.400$$

$$= -605475 \text{ m}^3/\text{Tahun}$$

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data menggunakan metode USLE dan software ArcGIS 10.1, dapat diketahui dan disimpulkan sebagai berikut:

3. Laju erosi di Sub-DAS Kali Gendol dengan menggunakan metode USLE adalah sebesar 47.119,470 Ton/Ha/Tahun.
4. Besarnya volume sedimen yang terjadi pada Sub-DAS Kali Gendol adalah 1.132.925 m³/Tahun dan tidak ada yang akan terlimpas ke bangunan GE-C Gadingan yang memiliki daya tampung sebesar 29.659,71 m³.

Saran

1. Perlu dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode lain sebagai pembanding agar memperoleh data yang bisa lebih akurat.
2. Berdasarkan hasil yang didapatkan, pengaruh erosi lahan di sekitar Sub-DAS Kali Gendol besar sehingga perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut untuk meminimalisir kemungkinan terjadinya bencana sedimen di kemudian hari..
3. Dilakukan pemeliharaan terhadap bangunan sabo dam secara berkala agar fungsi bangunan bisa maksimal dan optimal.
4. Dilakukan sosialisasi terhadap penambang pasir agar tidak menambang pasir terlalu dekat dengan bangunan sabo dam karena itu dapat mengurangi stabilitas bangunan.

Daftar Referensi

- Cahyono, J., 2000. *Pengantar Teknologi Sabo*. Yayasan Teknologi Sabo.
- Hardjowigeno, S., 1995. *Ilmu Tanah* (1st Ed.). Jakarta Akademika Pressindo.
- Listriyana, I., 2006. *Pemetaan Daerah Rawan Bahaya Erosi Di Bagian Barat Daya Gunung Lawu Melalui Pendekatan Model Pixel Dan Sistem Informasi Geografi* (Sig. Universitas Negeri Semarang).
- Marseli, Y., 2015. *Analisis Laju Erosi Pada Daerah Tangkapan Waduk Sermo Menggunakan Metode Usle. Tugas Akhir*, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Sintanala, A., 1989. *Konservasi Tanah Dan Air* (H. Siregar (Ed.); 1st Ed.). Ipm Press.
- Soemarto, C., 1987. *Hidrologi Teknik* (1st Ed.). Surabaya : Usaha Nasional.
- Susilowati, Langlang Adi Pratama, D. K., & Darsono, S., 2014. *Perancangan Check Dam Pramuka Untuk Mengatasi Sedimentasi di Banjir Kanal Barat Kota Semarang*. Jurnal Karya Teknik Sipil, 3, 630–637.
- Triatmodjo, B., 2008. *Hidrologi Terapan*. In Beta Offset, Yogyakarta (2nd Ed., Vol. 59).

EVALUASI PEMANFAATAN DATA POS HUJAN DAN DATA SATELIT TRMM DALAM PEMODELAN DEBIT SINTETIK DAS TEMEF

Davianto F. B. Welkis^{1*}, Donny Harisuseno², dan Sri Wahyuni²

¹ Program Magister Teknik Pengairan, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

² Jurusan Pengairan, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

* fwelkis@yahoo.com

Pemasukan: 2 Juli 2022 Perbaikan: 21 Juli 2022 Diterima: 22 Juli 2022

Intisari

Pengambilan data hujan berbasis satelit *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) menjadi salah satu alternatif yang baik dalam memperkirakan curah hujan pada suatu kawasan yang tidak berpengukur. Teknologi TRMM dapat meminimalisir kesalahan pencatatan curah hujan secara manual dan meningkatkan keakuratan curah hujan untuk analisis hidrologi. Untuk perhitungan dengan matematis menggunakan analisis regresi polinomial. Persamaan terpilih adalah polinomial dengan persamaan sebagai berikut $y = 0,0112 x^2 - 0,2564x + 4,1293$, sehingga dilakukan analisis validasi dengan persamaan yang terpilih sehingga diperoleh hasil validasi terhadap data hujan 1 tahun untuk nilai RMSE 7,022, nilai NSE 0,923, koefisien korelasi 0,94 dan nilai kesalahan relatif 5,48. Perbedaan debit observasi dan simulasi ini sebesar 30,76% yang tentunya masih terbilang cukup besar dan perlunya kajian dengan data yang lebih panjang.

Kata Kunci: TRMM NASA 3B42, DAS Temef, TRMM

Latar Belakang

Propinsi Nusa Tenggara Timur termasuk daerah kering dimana musim kemarau lebih lama daripada musim hujan (Mulyani A, 2014). Musim basah yang relatif pendek, dengan topografi pegunungan dan vegetasi yang jarang, mengakibatkan curah hujan yang kecil (rata-rata 1000 mm/th) melimpah sebagai air permukaan dan mengumpul di sungai-sungai sebagai banjir dan selanjutnya terbuang ke laut (Susilawati, 2016). Sebagai wilayah dengan curah hujan rendah, data curah hujan di Nusa Tenggara Timur sering kali tidak lengkap, kendala dan permasalahan yang masih sering dihadapi yaitu minimnya ketersediaan data hujan observasi, baik spasial maupun temporal, *time series* data hujan tidak cukup panjang dan tidak lengkap, serta jumlah stasiun hujan kurang tersebar merata, kurang tenaga pengamat, sistem pengamatan dan pemasukan data masih manual, pengumpulan data dari daerah tertentu ke tingkat pusat yang masih terhambat dan berjalan lambat, dan format data yang belum standar (Mamenun, 2014).

Pada perkembangan teknologi yang semakin pesat sekarang, terdapat produk Analisis Curah hujan Multisatelit TRMM atau TRMM *Multisatellite Precipitation Analysis* (TMPA). TRMM dimaksudkan untuk memberikan perkiraan situasi yang

akurat dari curah hujan, dari sejumlah sensor gelombang mikro dan inframerah dari satelit pengamat dan pengukur berbasis rupa bumi (Huffman dkk., 2007; 2010). Produk TMPA tersedia sejak tahun 1998 pada resolusi spasial garis bujur $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ lat/long dan resolusi temporal tiga jam. Produk tiga jam dan harian dikenal sebagai TMPA-3B42 sedangkan produk bulanan disebut sebagai TMPA-3B43 resolusi (Huffman dkk., 2010).

Adapun beberapa penelitian di luar negeri dan dalam negeri yang telah diteliti terkait dengan produk TMPA 3B42 diantaranya untuk penelitian Jian Fang dkk, (2019) menghasilkan analisis probabilitas hasil yang baik antar TRMM 3B42 dan produk GPM IMERG dibanding data pos hujan. Untuk Dan Li dkk (2017) menunjukkan bahwa rata TRMM 3B42 berbanding pengukur hujan sumber curah hujan tidak signifikan, Na Yang dkk (2017) menghasilkan analisis dengan model 3B42V7 menunjukkan hasil yang baik, dan dapat dipakai di Hanjiang (China). Kenawy dkk (2015) menghasilkan kinerja TMPA-3B42 tergantung cuaca atau musim, Kai Tong dkk (2014) menghasilkan satelit 3B42RT dan PERSIANN secara signifikan menunjukkan hasil curah hujan terlalu tinggi di seluruh dataran tinggi, sedangkan untuk penelitian dalam negeri ada beberapa pandangan terkait penelitian 3B42 diantaranya, Krisnayanti dkk. (2020); Pratiwi dkk (2017). Hasil penelitian menunjukkan bahwa data satelit TRMM 3B42, TRMM 3B42-RT dan GPM mampu digunakan untuk memprediksi data hujan pengamatan. Riza Arian Noor dkk (2016) menyatakan bahwa hasil validasi data sangat memungkinkan untuk memanfaatkan data Satelit TRMM sebagai salah satu data pengganti data curah hujan permukaan. Sri Maulidani S dkk (2015) menyatakan juga bahwa hasil analisis pola curah hujan di Makassar dengan menggunakan data satelit TRMM 3B42 V7 dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dengan menggunakan data dari Pengelola Sumber Daya Air (PSDA) kota Makassar menunjukkan kesesuaian pola grafik untuk curah hujan bulanan pada tahun 2013. Syaifullah (2014) menyampaikan bahwa nilai korelasi antara data TRMM dengan data pengamatan akan lebih baik apabila analisis data menggunakan data bulanan. Mamenun (2014) menyatakan bahwa perbandingan data hujan satelit TRMM terhadap data observasi menunjukkan pada wilayah dengan pola hujan monsun, pola dan intensitas data satelit TRMM cukup mendekati data hujan observasi.

Dari hasil analisis data curah hujan antara pos hujan dan TRMM akan di validasi dgn data debit. Debit sungai merupakan indikator fungsi DAS dalam pengaturan proses, khususnya dalam transformasi (alih ragam) hujan menjadi aliran. Debit umumnya disajikan dalam bentuk hidrograf. Hidrograf debit merupakan penyajian grafis hubungan debit aliran dengan waktu, yang menggambarkan perilaku debit dalam kurun waktu tertentu. Di sisi lain, masalah yang masih dihadapi adalah masalah debit pada DAS Temef, dimana pada akhir tahun 2017 dicanangkan mulainya pembangunan Bendungan Temef (Welkis dkk., 2020). Pada perencanaan Bendungan Temaf, hasil desain debit PMF (*probable maximum flood*) sangat besar yaitu $5024,14 \text{ m}^3/\text{s}$ (PT. Indra Karya, 2017). Debit desain ini mempengaruhi bagian struktur bangunan pelimpah (*spillway*) bendungan yang akhirnya memiliki dimensi yang besar dan berdampak pada anggaran yang dikeluarkan pemerintah. Atas dasar masalah inilah perlu dikaji transformasi (alih ragam) hujan menjadi aliran dalam

satuan waktu yang disajikan dalam bentuk hidrograf pada DAS Temef, serta mengevaluasi seberapa besar debit yang terjadi pada DAS Temef. Harto (1993) mengemukakan suatu metode untuk mendapatkan hidrograf satuan sintetik (HSS) dari suatu DAS yang tidak mempunyai alat ukur hidrometri dan kurangnya data-data DAS untuk menganalisis debit banjir pada daerah tertentu.

Metode HSS SCS (Hidrograf Satuan Sintetik *Soil Conservation Service*) ini pertama kali dikembangkan di Amerika Serikat oleh Victor Mockus pada tahun 1972, Ordinat debit pada diekspresikan sebagai rasio antara debit (Q) dengan debit puncak (Q_p) dan absis waktu diekspresikan sebagai rasio waktu (t) dengan waktu puncak (t_p), dimana waktu naik (T_p) dapat diekspresikan sebagai bagian dari waktu puncak (t_p) dan lamanya hujan efektif (t_r). Metode ini yang akan dipakai untuk menganalisis hidrograf dan debit dari DAS Temef berdasarkan data yang tersedia (Junia N, dkk., 2015).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan suatu model debit pada DAS Temef dengan menggunakan data pos hujan *groundstation* dan data hujan satelit TRMM. Selanjutnya data tersebut disimulasikan dengan hujan dan karakteristik DAS sebagai komponen masukannya. Karakteristik DAS tersebut menyangkut aspek morfometri, penggunaan lahan dan kondisi tanah. *Output* yang dikeluarkan berupa data debit *outflow* dan volume limpasan.

Metodologi Studi *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM)

Seiring dengan perkembangan teknologi terutama penginderaan jarak jauh seperti satelit dan radar, pengukuran curah hujan sekarang telah menggunakan teknologi tersebut sehingga memungkinkan pemantauan curah hujan pada wilayah yang luas bahkan tempat yang tidak dapat dijangkau oleh peralatan konvensional. Khusus untuk wilayah tropis, saat ini telah tersedia sebuah perangkat *remote sensing* yang melakukan misi pengukuran curah hujan di wilayah tropis menggunakan satelit TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*) (Solihin, dkk. 2017).

Pemanfaatan data satelit TRMM memungkinkan daerah yang sebelumnya sangat sulit dilakukan pengukuran curah hujan akan didapatkan data curah hujan. Metode tersebut terhubung langsung ke satelit sehingga mempercepat proses pengumpulan data-data yang diperlukan untuk pemodelan. Data yang diperoleh dari metode tersebut yaitu data hujan yang terekam merupakan data yang *runtut waktu* dan waktu nyata (*real time*) dengan tingkat resolusi yang tinggi. Menurut Sutikno dkk (2017) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penggunaan data hujan TRMM dapat digunakan sebagai alternatif dalam analisis banjir di daerah yang memiliki keterbatasan data hidrologi.

Satelit TRMM dikeluarkan NASA dan Jepang (NASDA: *National Space Development of Japan*; sekarang berubah menjadi JAXA: *Japan Aerospace Exploration Agency*). Satelit TRMM diluncurkan pada tanggal 27 November 1997 pada jam 6:27 pagi waktu Jepang dan dibawa oleh roket H-II di pusat stasiun peluncuran roket milik JAXA di Tanegashima-Jepang, berorbit polar (non-sunsynchronous) dengan inklinasi sebesar 35° terhadap ekuator, berada pada ketinggian orbit 350 km (pada saat-saat awal diluncurkan), dan diubah ketinggian

orbitnya menjadi 403 km sejak 24 Agustus 2001 sampai sekarang. Pengoperasian satelit TRMM pada ketinggian orbit 403 km ini dikenal dengan istilah TRMM boost, untuk mengukur curah hujan di wilayah tropis. Pengamat curah hujan meliputi wilayah lautan yang mana tidak ada pengamatan secara manual dilakukan. TRMM akan memberikan informasi keberadaan awan dan hujan.

Probabilitas *General Extreme Value* (GEV)

Berdasarkan Rahmayani dan Sutikno (2019), distribusi *Probabilitas General Extreme Value* (GEV) merupakan distribusi probabilitas kontinue yang dikembangkan berdasarkan teori nilai extreme yang mencakup distribusi Gumbel, Frechet, dan Weibull. Sesuai dengan teori tersebut, distribusi GEV adalah satu-satunya distribusi yang mernormalisasi nilai maksimum atas serangkaian data identik dan independen yang terdistribusi secara acak. Distribusi GEV bersifat fleksibel untuk memodelkan perilaku ekstrim yang berbeda dengan tiga parameter distribusi $\theta = (\mu, \sigma, \xi)$ dimana:

1. parameter lokasi (μ) dengan $-\infty < \mu < \infty$, menentukan pusat distribusi
2. parameter skala (σ) dengan $\sigma > 0$, menentukan ukuran penyimpangan di sekitar parameter lokasi
3. parameter bentuk (ξ) mengatur perilaku ekor distribusi GEV.

Distribusi GEV dibedakan menjadi tiga tipe apabila dilihat berdasarkan nilai parameter bentuk (ξ) yaitu Tipe 1 Gumbel jika nilai $\xi = 0$, Tipe 2 Frechet jika nilai $\xi > 0$, dan Tipe 3 Weibull jika nilai $\xi < 0$. Distribusi probabilitas GEV ini telah banyak digunakan di berbagai negara baik di benua Asia, Eropa, Amerika, maupun Australia dan diakui sebagai distribusi probabilitas yang paling akurat dalam memprediksi nilai ekstrem.

Untuk memudahkan perhitungan nilai ekstreme berdasarkan distribusi GEV, direkomendasikan digunakan perangkat lunak SMADA - DISTRIB.

Model SCS-CN

Mishra, dkk. (2016) menyampaikan Model SCS-CN didasarkan pada persamaan neraca air dan dua dasar hipotesis. Hipotesis pertama menyamakan rasio jumlah aktual limpasan permukaan langsung (Q) dengan curah hujan total (P) (atau potensi limpasan permukaan maksimum) dengan rasio jumlah infiltrasi aktual (F) (atau infiltrasi kumulatif) dengan jumlah potensi retensi maksimum (S). Hipotesis kedua menghubungkan abstraksi awal (I_a) dengan potensi retensi maksimum (S). Ini dinyatakan, masing-masing, sebagai

Persamaan *Water Balance*:

$$P = I_a + F + Q \quad (1)$$

Probabilitas Hipotesis:

$$\frac{Q}{P-I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a - S \text{ Hipotesis } I_a = \lambda S \quad (3)$$

dengan keterangan

- P : curah hujan total [mm]
- I_a : abstraksi awal [mm]
- F : infiltrasi kumulatif [mm]
- Q : limpasan langsung permukaan [mm]
- S : potensi retensi maksimum [mm]
- λ : koefisien abstraksi awal.

Konsep proporsionalitas diturunkan dari data curah hujan-limpasan diplot pada kertas grafik aritmatika, seperti yang ditunjukkan gambar 1 yang menjadi asimtotik pada garis lurus dengan kemiringan 1:1 pada curah hujan tinggi. Dengan asumsi tidak ada lag antara awal curah hujan dan limpasan, persamaan bagian garis lurus dari kurva limpasan dapat diberikan sebagai:

$$Q = P' - S' \tag{4}$$

dimana P' = potensi limpasan maksimum (curah hujan aktual setelah limpasan dimulai atau curah hujan actual ketika abstraksi awal tidak terjadi) (mm) dan S' = retensi potensial maksimum setelah limpasan mulai (mm). Proporsionalitas berikut menggambarkan hubungan antara curah hujan, limpasan, dan retensi (selisih antara curah hujan dan limpasan) pada setiap titik pada kurva limpasan:

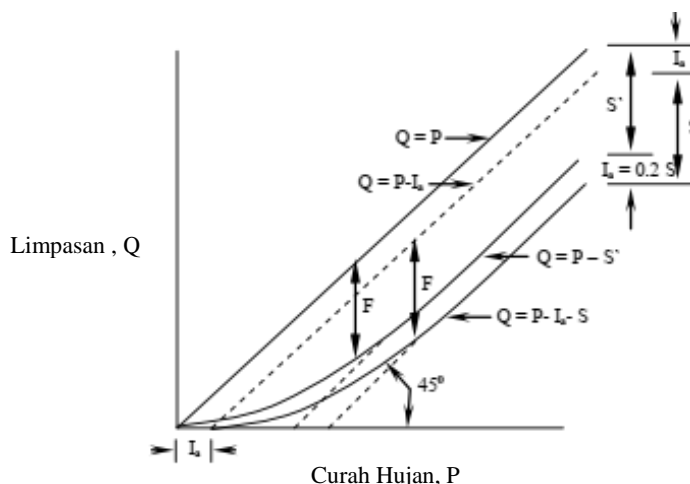
$$\frac{F}{S'} = \frac{Q}{P'} \tag{5}$$

dengan keterangan

$$F = P' - Q \tag{6}$$

Di sini, F menggambarkan retensi aktual setelah limpasan dimulai (mm). Substitusi untuk F persamaan didapatkan persamaan berikut

$$\frac{P'-Q}{S'} = \frac{Q}{P'} \tag{7}$$



(Sumber: Mishra dkk., 2016)

Gambar 1. Hubungan Antara Limpasan, Curah Hujan, dan Retensi

Estimasi Limpasan

Untuk estimasi limpasan, CNII disesuaikan dengan Anteseden Kondisi Kelembaban (AMC) DAS, yang dapat didefinisikan sebagai kelembaban awal kondisi DAS sebelum peristiwa badai. Metodologi SCS-CN menyatakan parameter ini sebagai indeks berdasarkan batas musiman untuk total 5 hari curah hujan sebelumnya sebagai berikut:

1. AMC I merupakan tanah kering dengan curah hujan musim (5 hari) kurang dari 12,7 mm dan curah hujan musim tanam (5 hari) kurang dari 35,56 mm,
2. AMC II mewakili kondisi kelembaban tanah rata-rata dengan curah hujan rata-rata dari 12,7 hingga 27,94 mm dan curah hujan musim tanam dari 35,56 hingga 53,34 mm
3. Kondisi AMC III merupakan tanah jenuh dengan curah hujan lebih dari 27,94 mm dan curah hujan musim tanam di atas 53,34 mm.

Kemudian, tergantung pada jumlah curah hujan 5 hari, AMC II (CNII) dapat dikonversi menjadi AMC I (CNI) atau AMC III (CNIII) menggunakan salah satu hubungan persamaan pada Tabel 1 yang diberikan pada penelitian Mishra S.K, Suresh Babu P, Singh V P (2016).

Tabel 1. Formula konversi dari CN

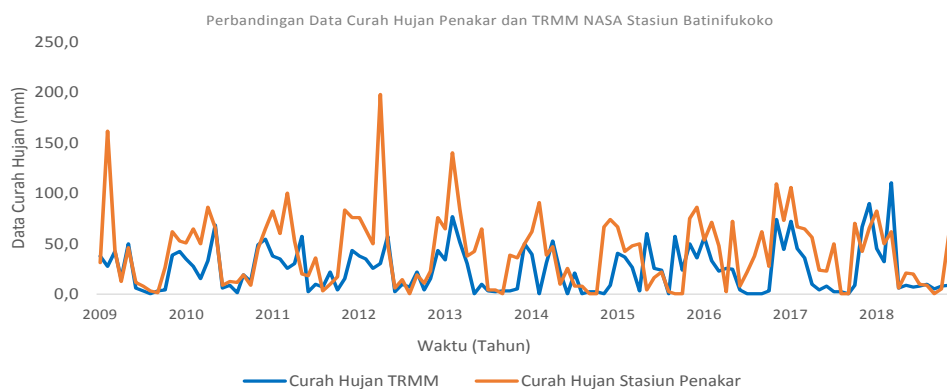
Metode	AMC I	AMC III
Sobhani (1975)	$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,344 - 0,01334 CN_{II}}$	$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,005964 CN_{II}}$
Hawkins dkk. (1985)	$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 CN_{II}}$	$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 + 0,00573 CN_{II}}$
Chow dkk. (1988)	$CN_I = \frac{CN_{II}}{10 - 0,058 CN_{II}}$	$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0,13 CN_{II}}$
Neitsch dkk.	$CN_I = \frac{20(100 - CN_{II})}{\{100 - CN_{II} + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_{II})]\}}$	$CN_{III} = CN_{II} \exp[0,0067 - 3(100 - CN_{II})]$

(Sumber: Mishra dkk., 2016)

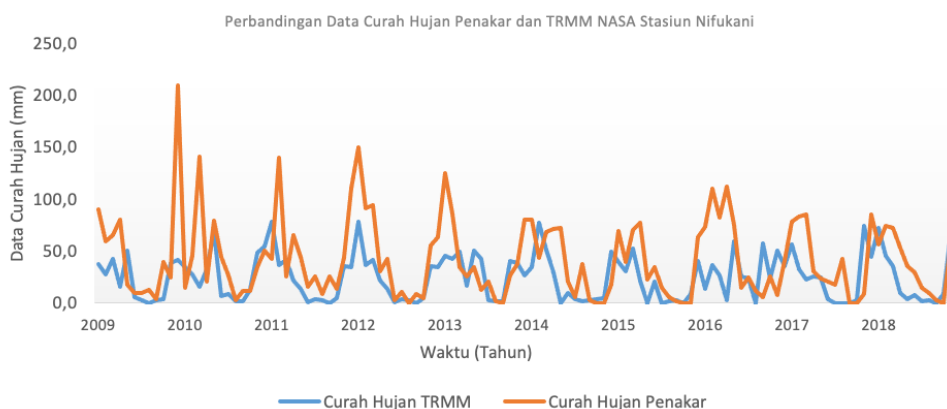
Hasil Studi dan Pembahasan

Hubungan Curah Hujan

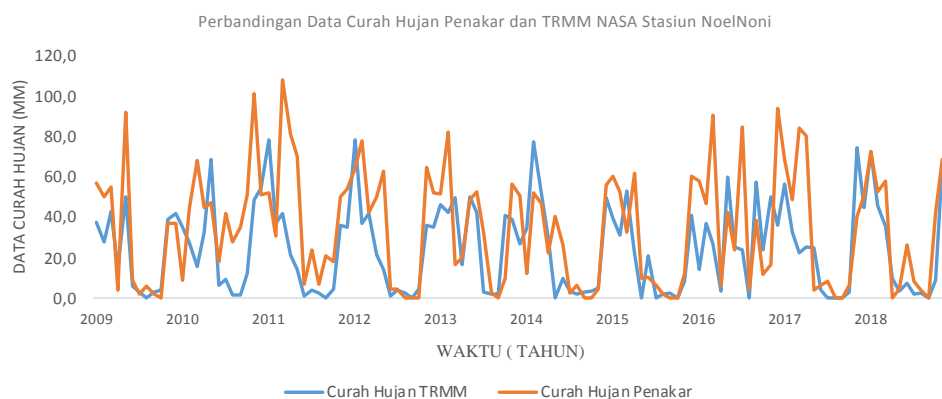
Dari Gambar 2-4 di bawah dapat kita lihat hubungan curah hujan observasi dan curah hujan TRMM 3B42 untuk masing masing stasiun pada daerah penelitian.



Gambar 2. Data Curah Hujan Penakar dan TRMM NASA 3B42 Stasiun Batinifukoko



Gambar 3. Data Curah Hujan Penakar dan TRMM NASA 3B42 Stasiun Nifukani



Gambar 4. Data Curah Hujan Penakar dan TRMM NASA 3B42 Stasiun Noelnoni

Berdasarkan Gambar 2 didapatkan koefisien korelasi bulanan untuk Stasiun Banifukoko adalah 0,482, yang termasuk dalam kategori kurang baik. Untuk koefisien korelasi bulanan pada Stasiun Nifukani adalah 0,295 dan untuk Stasiun Noelnoni memiliki koefisien korelasi bulanan sebesar 0,725. Untuk pos hujan Noelnoni memiliki nilai koefisien korelasi bulanan yang paling baik dibanding 2 pos hujan lainnya. Namun hasil analisis data curah hujan TRMM 3B42 dan curah hujan observasi menunjukkan tren yang sama dengan kondisi pada hujan dengan intensitas tinggi curah hujan.

Kalibrasi, Verifikasi dan Validasi Data

Persamaan kalibrasi yang didapat merupakan persamaan unuk mengkoreksi data hujan TRMM ke data hujan observasi. Penentuan persamaan regresi ini dipilih dengan nilai koefisien korelasi (R^2) yang paling besar atau mendekati 1. Untuk panjang data digunakan dari 7 tahun hingga 10 tahun karena data hujan observasi dari pengambilan di lapangan memiliki panjang hingga 10 tahun saja. Berikut adalah hasil rekapitulasi untuk data kalibrasi verifikasi dan validasi dengan panjang data 7, 8, 9 dan 10 tahun.

Tabel 2. Hasil Kalibrasi Data Curah Hujan TRMM

Periode	Kalibrasi		Validasi	Persamaan	Jenis Persamaan Terpilih
	Jumlah Tahun	Nilai R^2 Verifikasi			
Bulanan	7 Tahun	0,4883	3 Tahun	$y = -0,0062x^2 + 1,1976x + 7,0443$	Polinomial
	8 Tahun	0,4773	2 Tahun	$y = -0,0012 x^2 + 0,5401x + 1,3078$	Polinomial
	9 Tahun	0,4889	1 Tahun	$y = 0,0112 x^2 - 0,2564x + 4,1293$	Polinomial
	10 Tahun	0,5431	-	-	-

Tabel 3. Hasil Validasi Data Curah Hujan TRMM

Periode	Jumlah Tahun	RMSE	NSE		KR	Kesalahan Relatif	
			Nilai	Interpretasi		Nilai	Interpretasi
Bulanan	3 Tahun	16,20	0.876	Memenuhi	0.78	23,35 %	Lemah
	2 Tahun	13.91	0.902	Memenuhi	0.82	16,9 %	Kuat
	1 Tahun	7.022	0.923	Memenuhi	0.94	5,48 %	Sangat Kuat
	0 Tahun	-	-	Tidak memenuhi	-	-	Lemah

Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat bahwa hasil verifikasi data untuk kalibrasi 9 tahun dan validasi 1 tahun menghasilkan persamaan hubungan nilai R^2 yang lebih tinggi daripada yang lain. Hasil verifikasi mendapatkan hubungan $R^2 = 0,94$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai korelasi sangat baik, yaitu diatas dari 0,60. Validasi data mendapatkan persamaan $y = 0,0112x^2 - 0,2564x + 4,1293$ (Persamaan Polinomial) dengan interpretasi “Sangat Kuat”

Pada Tabel 2 Nilai RMSE dipengaruhi oleh jumlah data dan selisih antara data observasi dengan data simulasi. Semakin panjang rentang data, pengaruh nilai RMSE semakin besar. Validasi dengan panjang data 3 tahunan memiliki nilai terbesar dibandingkan dengan panjang data 2 tahun dan 1 tahun.

Pada metode NSE untuk jumlah 1 tahun, 2 tahun dan 3 tahun menunjukkan interpretasi “Memenuhi”. Berdasarkan kriteria metode NSE, apabila nilai NSE semakin mendekati nilai 1 maka semakin baik model. Sedangkan hasil dari

validasi adalah $> 0,75$, Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil memenuhi dan model baik untuk validasi 1, 2 dan 3 tahun.

Besaran nilai Kesalahan Relatif dari validasi data terkoreksi pada semua periode dan rentang waktu berkisar sekitar 5% - 23% sehingga dapat dikatakan bahwa data curah hujan TRMM terkoreksi memiliki tingkat kesalahan yang relatif kecil terhadap data curah hujan pos pengamatan.

Berdasarkan analisis yang dihasilkan dari perbandingan antara validasi data TRMM tidak terkoreksi dengan data TRMM terkoreksi dapat disimpulkan bahwa data TRMM terkoreksi lebih mendekati nilai curah hujan pos stasiun hujan yang dianggap sebagai data yang benar dengan demikian data curah hujan TRMM dapat digunakan sebagai alternatif data hidrologi untuk digunakan dalam perencanaan dalam bidang sumber daya air.

Hasil kalibrasi data 9 tahun dan validasi data 1 tahun dianggap sebagai hasil dengan hubungan data yang paling baik sehingga dipakai untuk analisis lanjutan. Persamaan Polinomial dipakai sebagai dikoreksi data hujan TRMM yang terjadi. Data hujan akan simulasikan dengan debit observasi.

Analisis Debit Observasi dan Simulasi

Untuk menjadi analisis debit didahulukan dengan analisis curah hujan kala ulang dengan menggunakan Metode GEV *General Extreme Value*. Hujan rancangan dengan metode GEV dipakai karena distribusi probabilitas GEV ini telah banyak digunakan di berbagai negara baik di benua Asia, Eropa, Amerika, maupun Australia dan diakui sebagai distribusi probabilitas yang paling akurat dalam memprediksi nilai ekstrem.

Analisis debit kala ulang dengan menggunakan data hujan TRMM menunjukkan deviasi terhadap debit kala ulang observasi. Hasil pemodelan debit kala ulang 2, 5, 10, 20 dan 25 tahun untuk debit observasi dan simulasi dijelaskan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Debit Simulasi dan Observasi

Kala Ulang	Data Debit	
	Observasi	Simulasi
2	83,44	51,84
5	105,95	65,35
10	120,86	74,15
20	135,16	84,89
25	139,69	94,65

Perbedaan data debit hasil observasi dan simulasi ini sebesar 30,76% yang artinya masih perlu dilakukan uji dan data yang lebih panjang. Hasil yang didapat bergantung besar pada *input* parameter yang dipakai pada analisis SCS-SC dimana input data berupa L = Panjang Sungai (km), S = Kemiringan Sungai (m/m), CN = *curve number*, Tr = Satuan Durasi Hujan (jam) Tp = Waktu Puncak (Jam). Hal ini dianalisis dengan perhitungan berdasarkan kondisi AMC I di mana nilai CN_{II} di konversi ke CN_I .

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan:

1. Hasil kalibrasi dari hujan observasi dan hujan TRMM menunjukan data trend hujan yang sama. Kondisi hujan dengan intensitas tinggi pada observasi memperlihatkan hujan TRMM yang rendah. Data menunjukkan hasil kalibrasi 10 tahun dengan koefisien korelasi adalah 0,5431. Hasil untuk kalibrasi 7 tahun adalah 0,4883 dan persamaan yang terpilih adalah persamaan polynomial ($y = -0,0062x^2 + 1,1976x - 7,0443$), hasil untuk kalibrasi 8 tahun adalah 0,4773 dan persamaan yang terpilih adalah persamaan polynomial ($y = -0,0012x^2 + 0,5401x + 1,3078$) dan hasil untuk kalibrasi 9 tahun adalah 0,4489 dan persamaan yang terpilih adalah persamaan polynomial ($y = 0,0112x^2 - 0,2564x + 4,1293$).
2. Hasil validasi dari hujan observasi dan hujan TRMM untuk data 3 tahun menunjukkan nilai RMSE 16,20, Nilai NSE 0,876, Koefisien Korelasi 0,78 dan nilai kesalahan relative 23,35 sementara TRMM untuk data 2 tahun menunjukkan nilai RMSE 13,91, Nilai NSE 0,92, Koefisien Korelasi 0,82 dan nilai kesalahan relative 16,90. Serta untuk data TRMM untuk 1 tahun menunjukkan nilai RMSE 7,022, Nilai NSE 0,93, Koefisien Korelasi 0,94 dan nilai kesalahan relatif 5,48
3. Hasil pemodelan kala ulang dari debit 2, 5, 10, 20 dan 25 tahun untuk debit obeservasi kala ulang 2 tahun; $Q = 84,44$, m^3/s kala ulang 5 tahun; $Q = 105,95$ m^3/s , kala ulang 10 tahun; $Q = 120,86$ m^3/s , kala ulang 20 tahun; $Q = 135,16$ m^3/s , kala ulang 25 tahun; $Q = 139,69$ m^3/s , Sedangkan untuk debit simulasi didapatkan kala ulang 2 tahun; $Q = 51,84$ m^3/s kala ulang 5 tahun; $Q = 65,35$ m^3/s , kala ulang 10 tahun; $Q = 74,15$ m^3/s , kala ulang 20 tahun; $Q = 84,89$ m^3/s , kala ulang 25 tahun ; $Q = 94,65$ m^3/s .

Saran

Dari hasil penelitian dapat disarankan hal-hal berikut untuk penelitan selanjutnya :

1. Untuk mendapatkan nilai debit simulasi dan observasi yang lebih mendekati maka diperlukan uji parameter pada masing-masing model. Keandalan data pengukuran di lapangan juga menjadi indikator utama dalam menghasilkan nilai debit yang mendekati dengan kondisi di lapangan.
2. Hasil formula dari penelitian yang dihasilkan bersifat temporal, sehingga perlu dilakukan penelitian lanjutan di lokasi studi untuk mencari formula atau permasalahan yang sesuai kondisi pada lokasi penelitian.
3. Perlu dilakukan *update* data penelitian lanjutan untuk memperoleh hasil yang baik.
4. Penelitian sejenis dengan menggunakan data TRMM NASA perlu diteliti untuk daerah lain yang mempunyai data hujan observasi yang lengkap.

5. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan satelit cuaca untuk melihat hubungan persamaan curah hujan pada masing-masing pos hujan daerah penelitian.

Daftar Pustaka

- Ahmed, K., López-Moreno, J.I., McCabe, M.F., dan Vicente-Serrano, S.M., 2014. Evaluation of the TMPA-3B42 precipitation product using a high-density rain gauge network over complex terrain in northeastern Iberia, *Global and Planetary Change*, Volume 133, October 2015, Pages 188-200
- Fang, J., Yang, W., Luan, Y., Du, J., Lin, A., dan Zhao, L., 2019. Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmospheric Research*, 223:24-38,
- Harto, S. 1993. *Analisis Hidrologi*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E.F., dan Wolff, D.B., 2007. The TRMM Multi satellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 38–55, doi:10.1175/JHM560.1.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., dan Nelkin, E.J., 2010. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). *Satellite Applications for Surface Hydrology*, F. Hossain and M. Gebremichael, Eds., Springer, 3–22.
- Junia N, Fauzi M, dan Suprayogi M., 2015. Kesesuaian Model Hidrograf Satuan Sintetik Studi Kasus Sub Daerah Aliran Sungai Siak Bagian Hulu. *Jom FTEKNIK* Volume 2 No. 1 Februari 2015.
- Krisnayanti, D.S., Welkis, D.F.B., Moun, F., dan Legono, D., 2020. Evaluasi Kesesuaian Data Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) dengan Data Pos Hujan Pada Das Temef di Kabupaten Timor Tengah Selatan, *Jurnal Sumber Daya Air*, 16(1): 51-62.
- Li, D., Christakos, G., Ding, X., dan Wu, J., 2017. Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modeling of Tiaoxi catchment (Taihu lake basin, China). *Journal of Hydrology* Volume 556, January 2018, Pages 1139-1152
- Maulidani S, S., Ihsan, N., dan Sulistiawaty, 2015. Analisis Pola Dan Intensitas Curah Hujan Berdasarkan Data Observasi Dan Satelit Tropical Rainfall Measuring Missions (TRMM) 3b42 V7 di Makassar *Jurnal sains dan Pendidikan Fisika* 11(1)
- Mishra S.K, Suresh Babu P, Singh V P., 2016. *SCS-CN METHOD REVISITED*
- Mulyani A, Nursyamsi D, dan Las I, 2014. Acceleration of Agricultural Development in Dryland with Dry Climate in Nusa Tenggara: *Pengembangan Inovasi Pertanian* Vol. 7 No. 4 Desember 2014: 187-198
- Noor, R.A., Ruslan, M., Rusmayadi, G., dan Badaruddin, B., 2016. Pemanfaatan Data Satelit Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) untuk Pemetaan

Zona Agroklimat Oldeman di Kalimantan Selatan, *EnviroScienteeae* Vol 12 no 3

- Pratiwi, D.W., Sujono, J., dan Rahardjo, A.P., 2017. Evaluasi Data Hujan Satelit Untuk Prediksi Data Hujan Pengamatan Menggunakan Cross Correlation; disajikan dalam *Prosiding SEMNASTEK Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta*, ISSN: 2407 – 1846 e-ISSN : 2460 – 8416
- PT Indra Karya. 2017. *Laporan Hidrologi - Sertifikasi Desain Lanjutan Penyelidikan Geologi Dan Model Tes Bendungan Temef di Kabupaten Timor Tengah Selatan* – No. Kontrak HK.02.03./SATKER/BWS-NT II/KGT-PP/01/II/2017 ; Tanggal 24 Pebruari 2017.
- Solihin M. A, Handayani, Y.L, dan Fauzi M., 2017. Kajian Pola Distribusi Hujan Jam-Jaman Di Kabupaten Rokan Hulu Menggunakan Data Satelit Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), *Jom FTEKNIK* 4 (2) Oktober 2017
- Susilawati, Konservasi *Tanah Dan Air di Daerah Semi Kering Propinsi Nusa Tenggara Timur*, Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandira – NTT
- Sutikno, S., Handayani, Y. L., Fauzi, M., dan Kurnia, A., 2017. *Hydrologic modelling using TRMM-based rainfall products for flood analysis*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710105015>
- Yang, N., Zhang, K., Hong, Y., Zhao, Q., Huang, Q., Xu, Y., Xue, X., dan Chen, S., 2017. Evaluation of the TRMM multisatellite precipitation analysis and its applicability in supporting reservoir operation and water resources management in Hanjiang basin, China. *Journal of Hydrology* 549:313-325
- Welkis, D.F.B., Moun, F., Lobo, I., dan Krisnayanti, D.S., 2020. Characteristics of Flood Water Level Based on Hydrologic Soil Group Analysis in Temef Watershed, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 437 (2020) 012005.

EVALUASI PENJADWALAN AWAL TANAM PADI UNTUK EFISIENSI IRIGASI

Sri Wahyuni^{1*}, Riyanto Haribowo¹, Dian Sisinggih¹,
Yusril Fatrah², dan Ivan Dwi P.¹

¹ Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

² Profil Consultant, Konsultan Teknik

*yuniteknik@ub.ac.id

Pemasukan: 5 Juli 2022 Perbaikan: 17 Juli 2022 Diterima: 19 Juli 2022

Intisari

Pengelolaan irigasi yang optimal harus bisa menyediakan dan mendistribusikan air secara tepat sehingga tanaman bisa mendapatkan air sesuai dengan kebutuhannya. Oleh karena itu maka harus dianalisa secara cermat kebutuhan air tanaman berdasarkan awal tanam yang tepat. Tujuan penelitian ini adalah evaluasi jadwal awal tanam padi sebagai upaya efisiensi irigasi. Lokasi penelitian adalah Daerah Irigasi Bilokka, Sulawesi Selatan dengan luas daerah irigasi sebesar 1.005 ha. Data yang diperlukan adalah klimatologi untuk menganalisa evapotranspirasi (suhu, penyinaran matahari, kecepatan angin dan kelembaban udara), pola tata tanam eksisting dan data curah hujan. Metode yang digunakan adalah menggeser jadwal awal tanam padi sampai menemukan kebutuhan air yang paling kecil. Alternatif penggeseran dilakukan sebanyak 7 alternatif, yaitu 1 kondisi eksisting dan 6 alternatif tambahan. Hasil analisa menunjukkan 1) Nilai evapotranspirasi berada pada kisaran 3-6 mm/hari; 2) Curah hujan andalan sebesar 0-110 mm/10hari, dan curah hujan efektif 0-8 mm/hari; dan 3) Analisa pola tanam dengan jenis tanaman padi dengan dua musim tanam, kebutuhan air minimum terdapat pada alternatif III yaitu 1,56 liter/detik/ha dengan awal tanam pada bulan November III. Keuntungan alternatif III bisa menghemat penggunaan irigasi sebesar 0,31 liter/ha (16% atau 322 liter /detik/1.005ha). Dengan efisiensi air tersebut, maka daerah irigasi yang masih dapat dikembangkan seluas 206 ha. Pemerintah Daerah yang bertanggung jawab atas pengelolaan irigasi dapat menggunakan hasil penelitian ini sebagai referensi untuk menentukan jadwal awal tanam padi.

Kata Kunci: Eevaluasi, jadwal awal tanam, kebutuhan air, irigasi, neraca air.

Latar Belakang

Irigasi merupakan faktor penting untuk memaksimalkan produktivitas pertanian dalam rangka memenuhi tuntutan pangan (Prayogo, Wahyuni and Iqbal, 2021). Beberapa faktor yang mempengaruhi pemberian air yang berlebihan, salah satunya adalah kurang tepatnya perencanaan penentuan pola tanam (jenis tanaman dan saat tanam) di daerah irigasi (Sayekti R, 2010). Pemberian air ke petak sawah disalurkan melalui saluran irigasi dan mengikuti urutan di dalam jaringan irigasi. Saluran primer dapat dianggap sebagai saluran paling hulu, kemudian bercabang ke saluran sekunder dan seterusnya sampai menuju petak tersier. Pengoperasian jaringan

irigasi menjadi perhatian beberapa pemangku kepentingan seperti pengelola saluran, operator saluran, petani dan otoritas lingkungan. Tujuan dari penjadwalan pemberian irigasi sangat berbeda dari persepsi masing-masing pihak. Misalnya, operator mungkin tertarik untuk mempertahankan fluktuasi ketinggian air agar air bisa terjaga, sedangkan para petani mengharapkan pasokan air lebih cepat dan lebih banyak. Keputusan yang diambil pada tingkat yang lebih rendah berdampak pada pemenuhan di tingkat yang lebih tinggi. Misalnya, memenuhi semua kebutuhan air di area tersier dapat bertentangan dengan tujuan di seluruh jaringan sampai ke tingkat primer. Penjadwalan pemberian irigasi dapat dilakukan dengan tujuan untuk mengoptimalkan satu atau lebih tujuan penjadwalan. Menyadari tujuan penjadwalan biasanya mempunyai kendala yaitu kondisi fisik jaringan irigasi, metode penjadwalan pemberian air dan faktor-faktor seperti ketersediaan air serta biaya. Oleh karena itu, penjadwalan pemberian air dapat dinyatakan sebagai kendala pada masalah simulasi. Penjadwalan pemberian irigasi ini sangat berkaitan erat dengan mulai awal tanam padi. Karena awal tanam yang tepat akan mengoptimalkan pemberian irigasi.

Peneliti terdahulu yang membahas tentang penjadwalan pemberian irigasi adalah sebagai berikut; Metode optimasi generik untuk penjadwalan irigasi untuk berbagai tujuan pada saluran irigasi, berhasil menerapkan metode hipotesis dan aplikasi nyata di lapangan dimana gabungan kedua metode tersebut dapat mencapai keuntungan yang optimal (Delgoda et al., 2017). Pengembangan platform simulasi sistem multi-purpose untuk penjadwalan irigasi menghasilkan perilaku sistem irigasi untuk mencari solusi yang mungkin dan menemukan solusi yang paling efisien dalam pembagian air. Meskipun hanya pada skala areal kecil, penelitian ini menunjukkan bagaimana teknik simulasi berhasil digunakan untuk memecahkan masalah pertanian (Isern, Abelló and Moreno, 2012). Optimasi penjadwalan irigasi untuk gandum pada musim semi berdasarkan model simulasi-optimasi di bawah ketidakpastian model, menghasilkan bahwa empat kejadian irigasi dengan kondisi awal penyimpanan air tanah yang lebih menghasilkan keuntungan bersih yang lebih tinggi dan keuntungan bersih yang optimal akan meningkat seiring dengan kenaikan harga pasar tanaman. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai panduan pengelolaan irigasi bagi petani lokal (Li et al., 2018). Optimasi real-time dari penjadwalan irigasi dengan paralel algoritma menunjukkan bahwa model ini berhasil mengimplementasikan pembagian irigasi yang optimal (Alonso Campos, Jiménez-Bello and Martínez Alzamora, 2020). Optimasi jadwal irigasi di wilayah pertanian yang luas dengan skenario hidrologi yang berbeda, dimana hasil penelitian menunjukkan bahwa jadwal irigasi yang dioptimalkan berkinerja lebih baik daripada jadwal irigasi sebelumnya, yaitu meningkatkan hasil panen dan keuntungan ekonomi (Guo et al., 2020).

Berdasarkan keberhasilan beberapa penelitian sebelumnya maka tujuan penelitian ini adalah evaluasi awal tanam padi pada Daerah Irigasi Bilokka Sulawesi Selatan sebagai salah satu cara efisiensi penggunaan irigasi. Kerangka yang dikembangkan dalam studi ini adalah menggeser awal tanam padi sehingga dengan efisiensi pemberian air dapat mencapai hasil panen yang optimal. Hasilnya juga dapat dipakai sebagai pedoman bagi petani lokal dan pengelola irigasi.

Metodologi Studi

Lokasi Studi

Lokasi studi terletak pada Kabupaten Sidenreng Rappang (SIDRAP) 183 Km di pada arah Utara Kota Makassar yang merupakan Ibukota Propinsi Sulawesi Selatan (Gambar 1). Daerah Irigasi (DI) Bilokka merupakan salah satu daerah irigasi teknis di Kabupaten Sidrap dengan luas fungsional sawah 1.005 ha yang terus berkembang hingga saat ini.



(sumber: (Badan Pusat Statistik, 2017))

Gambar 1. Peta Lokasi Studi

Analisa Hidrologi

Evapotranspirasi Potensial

Rumus Penman Modifikasi dipakai untuk menganalisa evapotranspirasi potensial seperti pada Persamaan (1) (Panjaitan, 2012):

$$E_p = c [(W \times R_n)] + (1 - W) \times f(u) \times (e_a - e_d) \tag{1}$$

dengan keterangan:

- E_p : evapotranspirasi potensial (mm/hri)
- c : faktor asumsi yang tergantung dari musim
- W : koefisien pembobotan
- R_n : penyinaran radiasi bersih matahari (mm/hri)
- $(1-W)$: faktor koreksi
- $f(u)$: fungsi dari angin relatif (km/hari)

ea : tekanan uap jenuh yang tergantung dari suhu (mbar)
 ed : tekanan uap air (mbar)

Hujan Andalan

Hujan andalan merupakan hujan rerata wilayah dengan prosentase terlampaui sesuai dengan yang ditetapkan serta bisa dipakai untuk pengairan air disawah. Hujan andalan untuk pertumbuhan padi ditentukan sebesar 80 % (R_{80}) (Direktur Jenderal Pengairan, 2013).

Hujan Efektif

Hujan efektif untuk pertumbuhan padi merupakan 70% dari hujan 15 harian yang terlewati 80% pada jangka waktu tertentu (Persamaan (2)) yang berhubungan dengan hujan rerata 15 harian R_{80} serta curah hujan rerata bulanan (Direktur Jenderal Pengairan, 2013).

$$R_{eff\ padi} = R_{80} \times 70\% \quad (2)$$

dengan keterangan:

$R_{eff\ padi}$: curah hujan untuk padi di lahan (mm/hri)
 R_{80} : hujan dengan keandalan 80% (mm)

Kebutuhan Air di Sawah

Analisa kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman di sawah ditentukan oleh (Direktur Jenderal Pengairan, 2013) dengan rincian sebagai berikut:

1) Penyiapan Lahan

Rumus yang digunakan untuk menganalisa keperluan irigasi ketika penyiapan lahan di sawah **Van de** menggunakan Metode Goor dan Zijlstra yang ditunjukkan pada Persamaan (3):

$$IR = \frac{Me^k}{(e^k - 1)} \quad (3)$$

dengan keterangan:

IR : kebutuhan air di sawah (mm/hari)
 M : kebutuhan air dalam rangka mengganti air yang hilang karena evaporasi dan perkolasi pada saat kondisi jenuh (mm/hari)
 e : bilangan alam (2,71828)

2) Penggunaan Air Konsumtif Tanaman

Penggunaan air konsumtif untuk tanaman bisa dianalisa memakai Persamaan (4):

$$Etc = Kc \times Eto \quad (4)$$

dengan keterangan:

Etc : evapotranspirasi potensial (mm/hari)

Kc : koefisien tanaman

Eto : evapotranspirasi potensial yang didapatkan dari analisa yang menggunakan rumus Penman modifikasi (mm/hari)

3) Analisis Kebutuhan Irigasi

Analisa kebutuhan bersih air di sawah memakai Persamaan (5) (Direktur Jenderal Pengairan, 2013):

$$NFR_{padi} = R_{eff\ padi} - (Eto + PL + P + WLR) \quad (5)$$

dengan keterangan:

NFR_{padi} : *netto field water requirement* (mm/hari)

$R_{eff\ padi}$: curah hujan efektif untuk padi (mm/hari)

Eto : evapotranspirasi potensial (mm/hari)

PL : penyiapan lahan (mm/hari)

P : perkolasi (mm/hari)

WLR : penggantian lapisan air (mm/hari)

4) Simulasi Awal Tanam

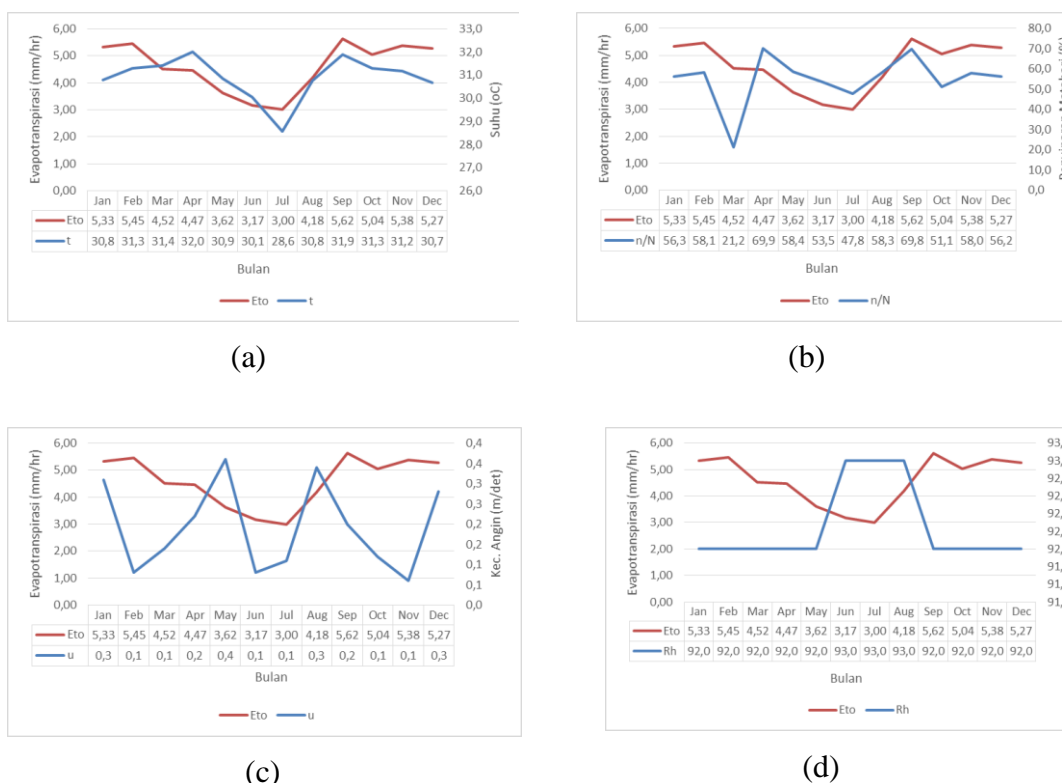
Simulasi pola tanam dianalisa dengan cara melakukan pergeseran awal tanam, yaitu sebagai berikut:

1. Eksisting : awal tanam Desember II
2. Alternatif I : awal tanam Desember III
3. Alternatif II : awal tanam Desember I
4. Alternatif III : awal tanam November III
5. Alternatif IV : awal tanam Januari I
6. Alternatif V : awal tanam Januari II
7. Alternatif VI : awal tanam Januari III

Hasil Studi dan Pembahasan

Evapotranspirasi Potensial

Metode Penman Modifikasi dipakai untuk menganalisa kehilangan air baik yang terjadi pada tampungan memanjang bendung maupun yang terjadi di sawah. Rumus ini cukup handal karena sudah dipakai oleh banyak peneliti dan telah berhasil dengan baik, selain itu metode ini menggunakan data klimatologi yang paling lengkap jika dibandingkan dengan metode lainnya. Dibawah ini grafik yang menyatakan hubungan evapotranspirasi potensial dengan beberapa parameternya.



Gambar 2. Hubungan Evapotranspirasi dengan Temperatur, Penyinaran Matahari, Kecepatan Angin dan Kelembaban Relatif.

Dari hasil analisa diketahui bahwa nilai evapotranspirasi potensial berkisar antara 3-5,62 mm/hari. Suhu merupakan faktor yang berkontribusi sangat penting pada hasil perhitungan evapotranspirasi. Pada Gambar 2 diketahui bahwa evapotranspirasi tertinggi terjadi pada bulan yang mempunyai suhu tertinggi diantara bulan lainnya, dan begitu juga sebaliknya. Tingginya suhu udara menyebabkan evaporasi juga cenderung meningkat (Zhang et al., 2020). Penyinaran matahari dan kelembaban relatif mempunyai hubungan linier dengan nilai evapotranspirasi, sedangkan untuk kecepatan angin tidak nampak secara jelas hubungannya.

Curah Hujan Efektif

Perhitungan hujan efektif untuk pertumbuhan padi dilakukan dengan periode 10 harian sesuai dengan rencana pola tata tanam. Tabel 1 merupakan hasil tabulasi dari analisa hujan efektif untuk pertumbuhan padi.

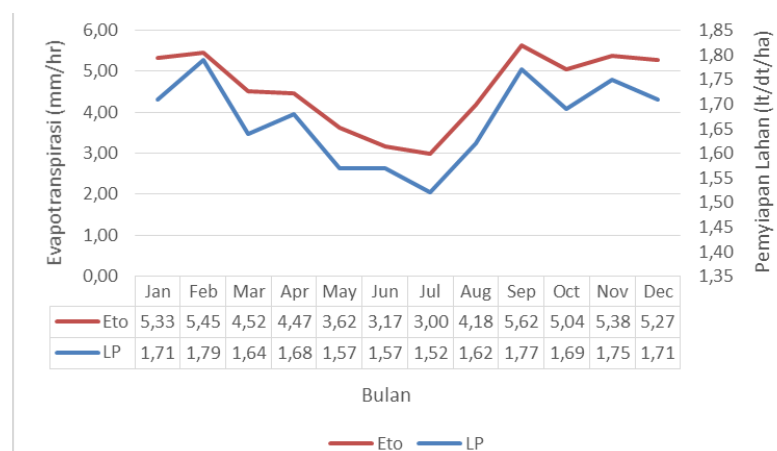
Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa curah hujan andalan berkisar antara 0-110 mm/10 hari, sedangkan curah hujan efektif untuk padi berkisar antara 2-77 mm/10 harian atau 0-8 mm/hari. Pola curah hujan di lokasi studi sama dengan di lokasi lain di Indonesia, yaitu hujan paling besar terjadi pada musim penghujan dan sebaliknya hujan minimum terjadi pada musim kemarau.

Tabel 1. Hujan Andalan dan Hujan Efektif untuk Padi

Bulan	Periode	R 80	Re padi		Bulan	Periode	R 80	Re padi	
		(mm)	(mm)	(mm/hr)			(mm)	(mm)	(mm/hr)
Jan	1	7	5	0.49	Jul	1	11	8	0.79
	2	36	25	2.52		2	46	32	3.22
	3	31	22	2.17		3	18	13	1.28
Feb	1	18	13	1.28	Ags	1	10	7	0.70
	2	26	18	1.80		2	11	8	0.77
	3	18	13	1.26		3	5	4	0.37
Mar	1	12	8	0.82	Sep	1	11	8	0.77
	2	19	14	1.35		2	6	4	0.44
	3	78	55	5.48		3	3	2	0.19
Apr	1	40	28	2.80	Okt	1	29	21	2.05
	2	29	21	2.05		2	29	20	2.01
	3	95	67	6.65		3	110	77	7.67
Mei	1	103	72	7.23	Nov	1	95	66	6.63
	2	15	10	1.03		2	38	27	2.66
	3	64	45	4.50		3	74	52	5.19
Jun	1	16	11	1.10	Des	1	68	48	4.78
	2	6	4	0.44		2	10	7	0.72
	3	63	44	4.41		3	4	3	0.30

Kebutuhan Air Untuk Penyiapan Lahan

Selain kejenuhan tanah, perkolasi, evapotranspirasi, penggenangan juga diperlukan untuk analisa kebutuhan air irigasi. Data iklim (suhu udara, kelembaban relatif, kecepatan angin, sinar matahari), curah hujan, tekstur dan jenis tanah, serta pola tanam sesuai dengan rencana, semuanya diperlukan untuk memperkirakan jumlah air yang dibutuhkan untuk pertumbuhan padi.



Gambar 3. Hubungan Evapotranspirasi dengan Penyiapan Lahan

Dari hasil analisa didapatkan besarnya air pada saat pengolahan lahan antara 1,52-1,79 liter/detik/ha tergantung evapotranspirasi potensial. Semakin besar nilai evapotranspirasi potensial maka semakin besar juga kebutuhan air untuk pengolahan lahan.

Perkolasi

Perkolasi pada tanah lempung berat dengan karakteristik pengolahan (*puddling*) yang baik, laju perkolasi dapat mencapai 1 sampai 3 mm/hari (Direktur Jenderal Pengairan, 2013). Pada tanah yang lebih ringan, laju perkolasi bisa lebih tinggi.

Laju perkolasi berdasarkan jenis tanah adalah sebagai berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2004):

- Tektur tanah liat : 1,0 – 1,5 mm/hari
- Tektur tanah liat berdebu : 1,5 – 2,0 mm/hari
- Tektur tanah lempung liat, lempung liat berdebu : 2,0 – 2,5 mm/hari
- Tektur tanah lempung liat berpasir : 2,5 – 3,0 mm/hari
- Tektur tanah lempung berpasir : 3,0 – 5,0 mm/hari

Berdasarkan Laporan Akhir Review Desain Jaringan Irigasi DI. Bilokka di Kabupaten Sidrap Tahun 2015 (CV Profil Konsultan, 2015), dituliskan bahwa jenis tanah di lokasi penelitian mempunyai tekstur lempung dengan tekstur berpasir sehingga dalam analisa kebutuhan air diasumsi nilai perkolasi adalah 3 mm/hari.

Pergantian Lapisan Air (WLR)

Penggantian lapisan air dilakukan dua kali, yaitu 50 mm untuk tiap waktunya (atau 3,3 mm/hari selama 15 hari) pada jangka waktu satu bulan atau dua bulan setelah transplantasi.

Rencana Pola Tata Tanam

Awal musim hujan atau kebiasaan petani setempat, serta studi kebutuhan air, biasanya menjadi langkah awal dalam menentukan pola tanam, dalam hal ini awal musim tanam padi pertama. Awal musim hujan dimulai bulan November menurut data statistik yang terjadi di D.I. Bilokka. Untuk mencapai kebutuhan air bersih maksimum (*NFR*) terendah, maka perlu dilakukan simulasi waktu mulai tanam padi yang berbeda.

Metode neraca air/keseimbangan air (*water balance*) penjadwalan irigasi merupakan salah satu metode untuk memperkirakan jumlah dan waktu pengairan yang diperlukan untuk tanaman. Keseimbangan air dapat tercapai dengan baik jika rencana awal tanam dilakukan pada waktu yang tepat.

Pola tanam dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut:

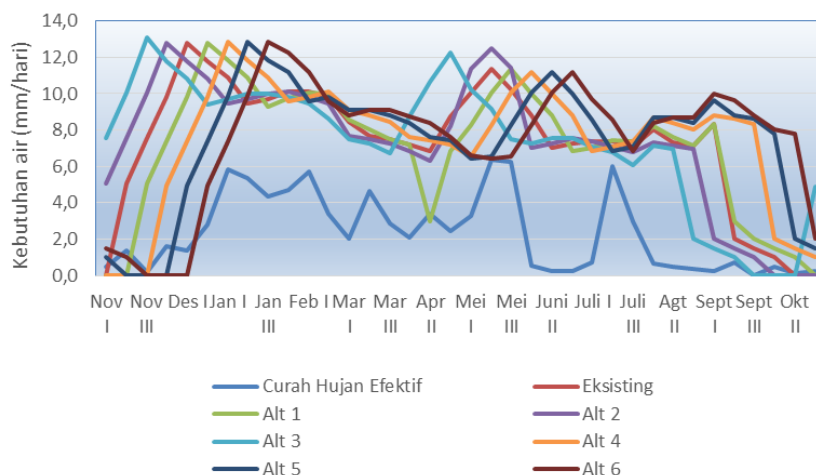
1. Pola tata tanam yaitu Padi I (90 hr) – Padi II (90 hr) yang menerapkan sistem dua golongan.
2. Masa pengolahan lahan adalah 1 bulan yang dilakukan sebelum menanam padi.

- Setelah masa panen Padi I dilakukan mas bero selama 1 bulan sebelum dimulai pengolahan lahan II untuk Padi II.

Simulasi pola tanam dianalisa dengan cara melakukan pergeseran awal tanam, yaitu sebagai berikut:

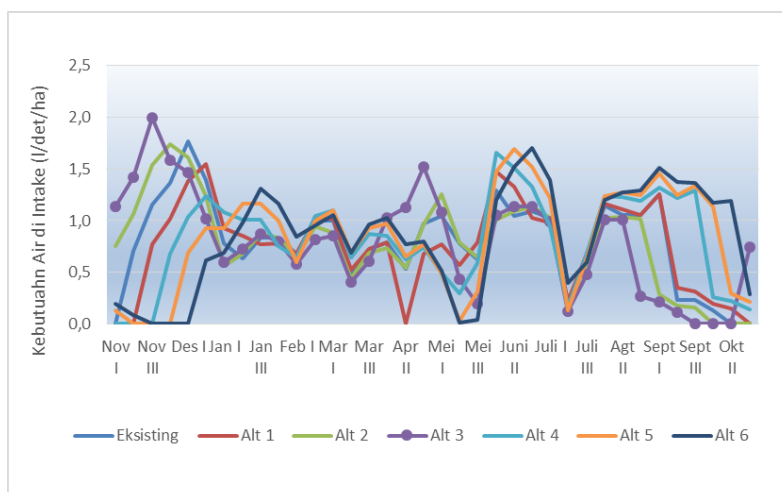
- Eksisting : awal tanam Desember II
- Alternatif I : awal tanam Desember III
- Alternatif II : awal tanam Desember I
- Alternatif III : awal tanam November III
- Alternatif IV : awal tanam Januari I
- Alternatif V : awal tanam Januari II
- Alternatif VI : awal tanam Januari III

Dari hasil analisa perhitungan kebutuhan air dengan menggunakan persamaan 5 dan dengan simulasi pola awal tanam dengan tujuh (7) alternatif, maka didapatkan rata-rata curah hujan efektif antara 0 - 6,35 mm/hari, sedangkan untuk kebutuhan air irigasi antara 0 – 13,07 mm/hari. Grafik perbandingan ketersediaan curah hujan efektif dan kebutuhan air untuk irigasi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Ketersediaan Curah Hujan Efektif dan Kebutuhan Air

Analisis kebutuhan air pada *intake* adalah jumlah debit yang harus disediakan oleh bendung untuk memenuhi kebutuhan penguapan, kehilangan air di saluran, kebutuhan air untuk tanaman dengan mempertimbangkan jumlah air yang disediakan oleh alam melalui curah hujan dan air tanah. Gambar 5 adalah grafik kebutuhan air di *intake* dengan tujuh (7) alternatif simulasi awal tanam. Dari grafik 5 dapat dilihat bahwa alternatif III mempunyai nilai terendah jika dibandingkan baik dengan kondisi eksisting maupun dengan alternatif lainnya.



Gambar 5. Kebutuhan Air di Intake

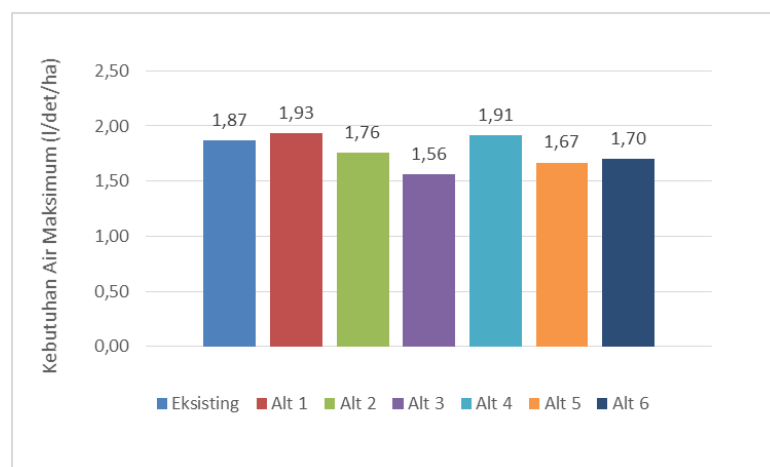
Langkah selanjutnya adalah membuat rekapitulasi kebutuhan air maksimum di *intake* untuk setiap simulasi dan awal tanam baik untuk Padi I maupun Padi II. Tabel 2 dan Gambar 6 menunjukkan kebutuhan air terkecil di *intake* adalah alternatif III yang awal tanamnya pada November III yaitu sebesar 1,564 l/dt/ha. Selisih kebutuhan air di *intake* pada saat kondisi eksisting dengan alternatif III adalah sebesar 0,31 liter/detik/ha atau mendapatkan efisiensi sebesar 16%. Jika alternatif III diterapkan di lapangan, maka air yang bisa dihemat adalah sebesar 322 liter/detik untuk keseluruhan daerah irigasi (1.050 ha). Dengan demikian, efisiensi ini dapat digunakan untuk pengembangan areal irigasi seluas 206 ha lagi.

Tabel 2. Rekapitulasi Kebutuhan Air di Intake pada Berbagai Awal Tanam

Simulasi	Awal Tanam		
	Padi I	Padi II	Q maks (l/dt/ha)
Eksisting	Desember II	Mei II	1,87
Alternatif 1	Desember III	Mei III	1,93
Alternatif 2	Desember I	Mei I	1,76
Alternatif 3	November III	April III	1,56
Alternatif 4	Januari I	Juni I	1,91
Alternatif 5	Januari II	Juni II	1,67
Alternatif 6	Januari III	Juni III	1,70

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pemberian irigasi ke petak tersier sesuai dengan kebutuhan air tanaman yang tentunya sesuai dengan tahap siklus vegetatifnya, tidak hanya akan meminimalkan kebutuhan air tetapi juga mengurangi drainase dan meningkatkan efisiensi. Evaluasi awal tanam ini penting tidak hanya karena mencegah defisit air atau menghemat air, akan tetapi juga meningkatkan penggunaan sumber daya air yang baik dan mengurangi dampak lingkungan di daerah irigasi. Dampak lingkungan atau sosial yang biasanya terjadi adalah konflik para petani karena saling berebut air terutama pada saat musim

kemarau. Oleh karena itu, sosialisasi dari pengelola irigasi kepada petani harus dilakukan dengan baik.



Gambar 6. Kebutuhan Air di Intake

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi awal pola tanam yang selama ini diterapkan di lokasi studi. Dari hasil perhitungan didapatkan efisiensi sebesar 16% yang dapat digunakan untuk pengembangan areal irigasi seluas 206 ha lagi. Pengembangan areal ini didasarkan dengan sistem pemberian air yang terus menerus, akan tetapi jika akan diterapkan sistem giliran maka areal yang bisa dikembangkan bisa lebih luas lagi, tergantung bagaimana proses sistem giliran yang akan diterapkan.

Hasil ini dapat dipakai sebagai bahan pertimbangan oleh pemangku kepentingan dalam pengelolaan irigasi. Diperlukan pengembangan pengetahuan yang terus-menerus dari semua pemangku kepentingan yang berkaitan, yaitu dengan cara berbagi tanggung jawab yang lebih besar di seluruh rantai pemakai air. Lebih lanjut, pengelolaan yang lebih hemat air dapat menggabungkan manfaat lingkungan yang lebih luas dengan keuntungan ekonomi bagi para petani.

Daftar Referensi

- Alonso Campos, J.C., Jiménez-Bello, M.A. and Martínez Alzamora, F., 2020. Real-time energy optimization of irrigation scheduling by parallel multi-objective genetic algorithms. *Agricultural Water Management*, 227, p.105857. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105857>.
- Badan Pusat Statistik, 2017. *Kabupaten Sidrap dalam Angka*.
- CV Profil Konsultan, 2015. *Laporan Akhir Review Desain Jaringan Irigasi DI Bilokka di Kabupaten Sidrap*.
- Delgoda, D., Malano, H., Saleem, S.K. and Halgamuge, M.N., 2017. A novel generic optimization method for irrigation scheduling under multiple objectives and multiple hierarchical layers in a canal network. *Advances in Water Resources*, 105, pp.188–204. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.04.025>.

- Direktur Jenderal Pengairan, 2013. *Standar Perencanaan Irigasi. Kriteria Perencanaan Bagian Saluran Kp-01. Standar Perencanaan Irigasi*.
- Guo, D., Olesen, J.E., Manevski, K. and Ma, X., 2020. Optimizing irrigation schedule in a large agricultural region under different hydrologic scenarios. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106575>.
- Isern, D., Abelló, S. and Moreno, A., 2012. Development of a multi-agent system simulation platform for irrigation scheduling with case studies for garden irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 87, pp.1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.007>.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2004. *Pemberian Air pada Lahan dengan Sistem Surjan*. Indonesia.
- Li, J., Song, J., Li, M., Shang, S., Mao, X., Yang, J. and Adeloje, A.J., 2018. Optimization of irrigation scheduling for spring wheat based on simulation-optimization model under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 208, pp.245–260. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.029>.
- Panjaitan, D., 2012. Kajian evapotranspirasi potensial standar pada daerah irigasi muara jalai kabupaten kampar provinsi riau. *Aplikasi Teknologi*, 4(1), pp.49–54.
- Prayogo, T., Wahyuni, S. and Iqbal, M., 2021. A Study of Irrigation Performance Index and Real Cost Value of Irrigation Operations and Maintenance in Surak Irrigation Area. *Civil and Environmental Science*, 004(01), pp.030–042. <https://doi.org/10.21776/ub.civense.2021.00401.4>.
- Sayekti R, 2010. Model Optimasi Alternatif Pola Tanam untuk Mendapatkan Luas Tanam dan Keuntungan yang Optimum (Studi kasus di Dam Jatimlerek, Kabupaten Jombang). *Jurnal Teknik Pengairan*, [online] 1(2), pp.115–126. Available at: <<https://jurnalpengairan.ub.ac.id/index.php/jtp/article/view/107>>.
- Zhang, A., Gao, R., Wang, X., Liu, T. and Fang, L., 2020. Historical trends in air temperature, precipitation, and runoff of a plateau inland river watershed in North China. *Water (Switzerland)*, 12(74), pp.1–17. <https://doi.org/10.3390/w12010074>.

ANALISIS EROSI BULUH PADA DASAR SUNGAI KALI KUNING, YOGYAKARTA

Djoko Legono^{1,2*}

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, FT-UGM, Yogyakarta

²Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia (HATHI) Cabang D.I Yogyakarta

*djokolegono@ugm.ac.id

Pemasukan: 18 Juli 2022 Perbaikan: 21 Juli 2022 Diterima: 22 Juli 2022

Intisari

Sungai yang berhulu dari kawasan vulkanik aktif pada umumnya merupakan sungai yang mengalir pada depositnya sendiri, seperti halnya sungai-sungai yang mengalir dari Gunung Merapi. Deposit ini terbentuk dari suatu fenomena erupsi yang memproduksi sejumlah material sedimen dengan berbagai ukuran dan karakteristik. Sifat atau karakteristik deposit ini sangat dinamik seiring dengan interaksinya dengan fenomena hidrologi, utamanya aliran air akibat hujan di daerah tangkapan. Proses perubahan karakteristik deposit dapat berlangsung dalam waktu singkat (dalam rentang waktu harian) ataupun lambat laun (rentang waktu beberapa tahun), tergantung pada pemicunya yaitu aliran air dengan angkutan sedimennya. Fenomena penurunan tanah atau amblesan, termasuk erosi buluh atau *piping* merupakan salah satu dari banyak kasus akibat perubahan karakteristik deposit. Makalah ini menyajikan evaluasi cepat (*rapid assessment*) tentang fenomena erosi buluh yang terjadi di Kali Kuning, Gunung Merapi, tepatnya di sebelah hulu Bendung Samberembe, Kabupaten Sleman, Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Hasil analisis menunjukkan bahwa erosi buluh yang terjadi telah diawali dengan gejala dan fenomena dalam kurun waktu sekitar satu tahun sebelum fenomena terjadi. Proses tersebut juga mengikuti kaidah kejadian erosi buluh yang dijelaskan oleh peneliti sebelumnya. Analisis lanjut menunjukkan bahwa erosi buluh dapat memicu laju intensitas gerusan lokal di pangkal ataupun pilar jembatan di sekitarnya. Hasil analisis juga memberikan saran atau rekomendasi tentang penanganan erosi buluh, utamanya untuk tujuan mitigasi kerusakan bangunan disekitar lokasi erosi buluh, baik Bendung Samberembe maupun pilar jembatan.

Kata Kunci: Bendung Samberembe, erosi buluh, Kali Kuning, sungai vulkanik.

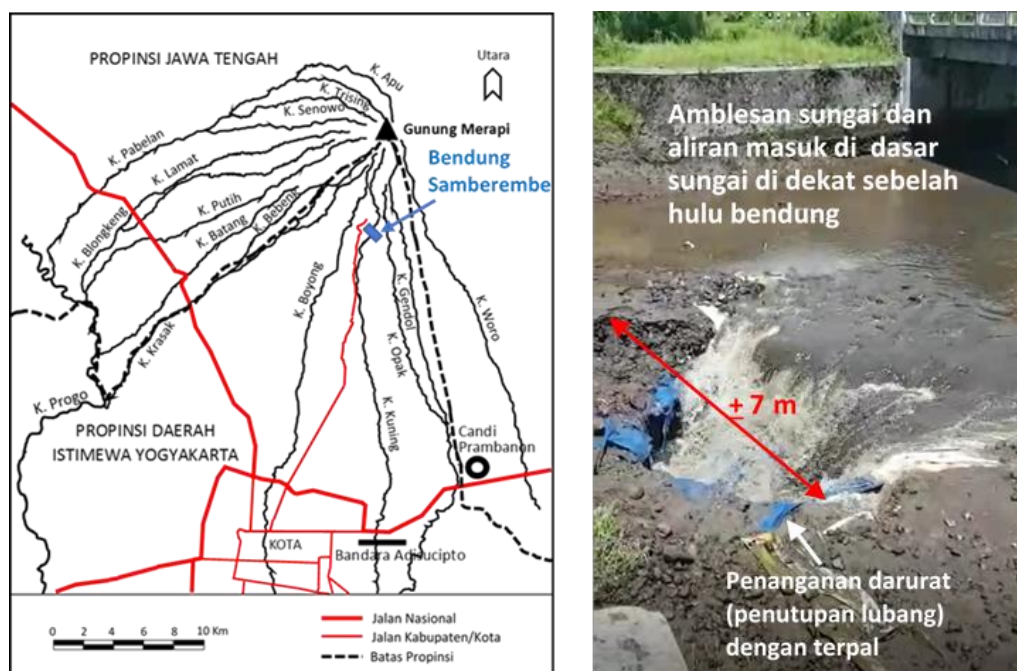
Latar Belakang

Seperti diberitakan, pada hari Jumat, 8 Februari 2019 pukul 11.00, telah terjadi fenomena erosi buluh di dasar Kali Kuning (tepatnya di sebelah hulu Bendung Samberembe, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta). Ukuran amblesan cukup besar, dengan diameter lubang $\pm 2-5$ m, dan mengakibatkan seluruh aliran sungai masuk kedalam lubang amblesan, disertai dengan sedimen hasil erosi dasar sungai di sebelah hulu lubang amblesan. Pada saat yang bersamaan juga terlihat aliran keluar dari dasar sungai di dekat sebelah hilir bendung, dengan aliran yang cukup keruh dengan kandungan sedimen halus atau fraksi lumpuran. Tidak ada data

yang jelas yang menyebutkan tentang proses atau kronologis pembentukan lubang amblesan tersebut, namun beberapa cerita masyarakat di sekitarnya diperoleh informasi bahwa kejadian tersebut bukan yang pertama kalinya. Kejadian amblesan di sebelah hulu bendung dalam ukuran yang lebih kecil telah terjadi pada beberapa bulan sebelumnya.

Tujuan dari studi ini adalah untuk menganalisis kejadian erosi buluh di dasar Kali Kuning di dekat sebelah hulu Bendung Samberembe dengan memperhatikan pada analisis karakteristik deposit sungai serta sejarah atau kronologi kejadian erosi buluh. Hasil analisis akan digunakan sebagai dasar penyampaian rekomendasi terhadap tindak lanjut mitigasi kerusakan bangunan di sekitar Bendung Samberembe.

Peristiwa amblesan dasar sungai di sebelah hulu bendung yang disertai dengan aliran keluar (dengan butir-butir tanah) di sebelah hilir bendung ini dikenal dengan erosi buluh atau *piping*, yang apabila berlangsung secara intensif akan membawa dampak kerusakan pada bendung dan infrastruktur lain di sekitarnya terutama jembatan. Kali Kuning merupakan salah satu dari 9 (sembilan) sungai di kawasan Gunung Merapi yang berpotensi terhadap kejadian aliran lahar. Kesembilan sungai tersebut adalah Kali Pabelan, Kali Blongkeng, Kali Putih, Kali Batang, Kali Krasak, Kali Boyong/Code, Kali Kuning, Kali Gendol, dan Kali Woro (Gambar 1). Seperti halnya sungai lain di wilayah Gunung Merapi, Kali Kuning juga sangat potensial untuk terjadi aliran lahar (Hidayat dkk., 2021; Ikhsan dkk., 2021). Kejadian aliran lahar terakhir yang melanda Kali Kuning terjadi pada awal tahun 2011, sebagai dampak dari erupsi Gunung Merapi yang terjadi pada 26 Oktober 2010 dan 3 November 2010 (Legono dkk., 2017). Sumber lain menyebutkan bahwa secara geologi batuan, formasi dasar Kali Kuning di wilayah lereng atas Gunung Merapi termasuk dalam Formasi Sleman dengan litologi vulkanik terdiri dari material pasir, kerakal dan yang lebih besar atau boulder. Ketebalan deposit ini mencapai 38 m, dan bersifat poros dengan permeabilitas (sifat kelolosan air) sangat tinggi (Mac. Donald & Partners, 1984). Di sepanjang Kali Kuning terdapat beberapa bangunan penyadapan air yang digunakan untuk pemenuhan kebutuhan air irigasi, dan salah satunya adalah Bendung Samberembe. Pada Gambar 1 disajikan foto yang menunjukkan amblesan dasar sungai di sebelah hulu bendung yang merupakan awal dari proses erosi buluh. Aliran sungai yang masuk lewat lubang amblesan ini muncul di dasar sungai di sebelah hilir bendung dengan warna keruh yang menunjukkan adanya proses erosi buluh. Di dekat sebelah hulu Bendung Samberembe terdapat jembatan jalan raya, terdiri dari dua bentang dengan bagian tengah berupa pilar pasangan beton. Apabila erosi buluh atau *piping* ini tidak segera ditangani, maka butiran tanah di bawah tubuh bendung akan banyak yang hilang sehingga tanah dasar di bawah tubuh bendung akan kehilangan kemampuan untuk mendukung beban bendung yang berada di atasnya. Hal ini akan membahayakan stabilitas bendung, dan selain itu, penurunan dasar sungai yang berlebihan di sebelah hulu bendung dapat membahayakan stabilitas jembatan yang berada di dekat sebelah hulu bendung.

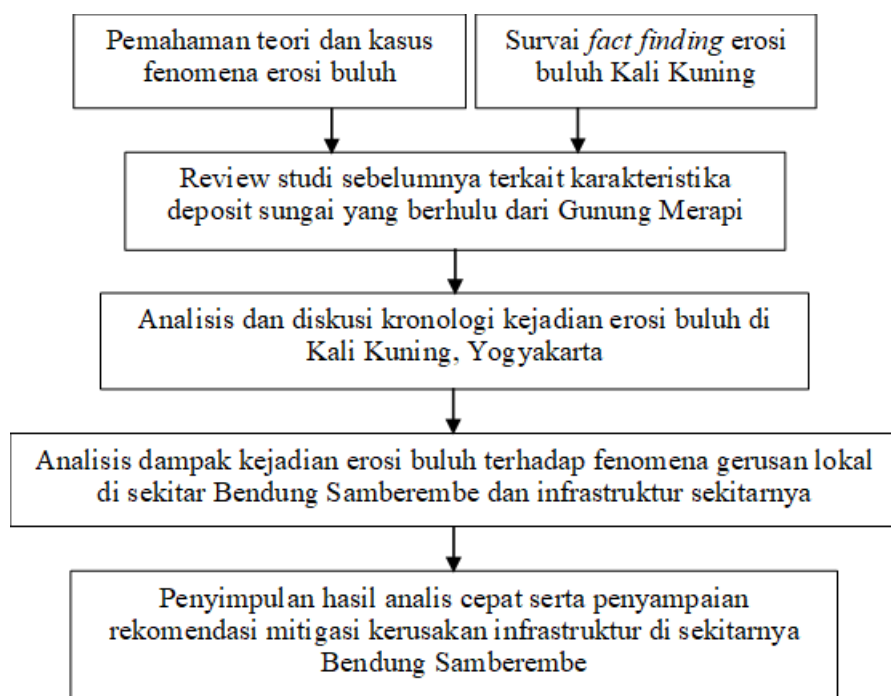


Gambar 1. Lokasi Bendung Samberembe di Kali Kuning dan amblesan

Metodologi dan Pendekatan Analisis

Analisis erosi buluh dilakukan dengan terlebih dahulu mengkaji ulang beberapa teori yang ada serta kasus-kasus riil kejadian erosi buluh dalam kajian laboratorium maupun lapangan (Bonelli dkk., 2010; Ojha dkk., 2003). Pada Gambar 2 disajikan bagan alir dari pelaksanaan kajian erosi buluh yang dimulai dari tinjauan pustaka serta survai *fact finding*, dilanjutkan dengan diskusi sejarah dan kronologi kejadian erosi buluh Kali Kuning di dekat sebelah hulu Bendung Samberembe, dan diakhiri dengan penyusunan rekomendasi mitigasi dampak kerusakan bangunan di sekitar Bendung Samberembe akibat kejadian erosi buluh. Studi sebelumnya menyebutkan bahwa terdapat empat jenis erosi buluh yang dapat terjadi pada kasus lapangan. Jenis erosi buluh ini tergantung pada geomorfologi, jenis tanah, serta hidrogeologi di mana erosi buluh tersebut terjadi (Sankar dkk., 2016). Empat jenis erosi buluh tersebut dibedakan menurut ukuran lubang erosi buluh, yang sesungguhnya berproses dari ukuran lubang yang kecil sampai dengan yang sangat besar, yaitu:

1. Erosi buluh mikro (*juvenile piping*), dimana ukuran lubang buluh sangat kecil atau kurang dari 5 cm, umumnya terjadi pada jenis tanah lempungan.
2. Erosi buluh kecil (*small piping*), merupakan pengembangan erosi buluh mikro, dengan diameter lubang antara 5-30 cm.
3. Erosi buluh dewasa (*mature piping*), merupakan pengembangan dari erosi buluh kecil, diameter lubang antara 0.30-5.00m, dan erosi buluh seperti ini umumnya terhubung dengan bangunan keluaran yang berfungsi sebagai drainase bawah tanah.
4. Erosi buluh besar (*huge piping*), ini adalah tahap berikutnya dari pipa setelah pengembangan pipa yang khas, diameter lubang umumnya sangat besar (> 5.00m).

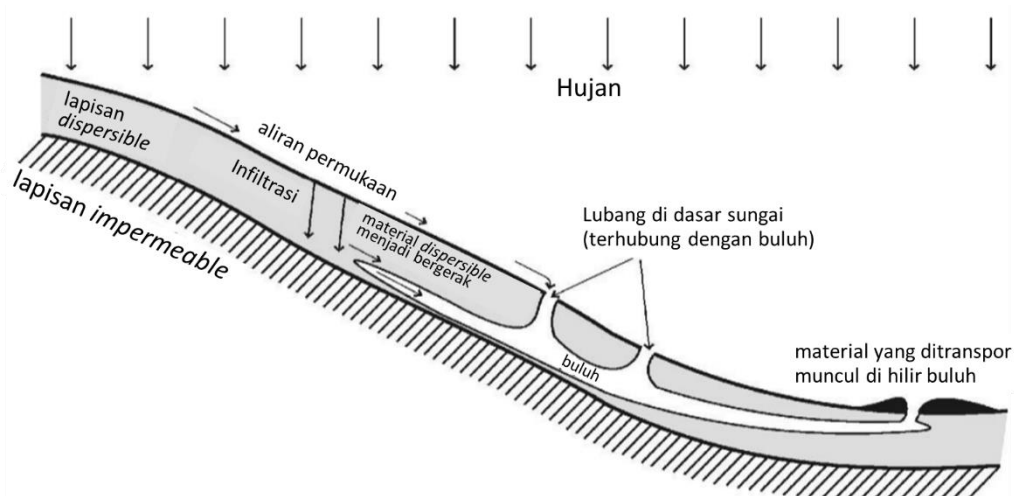


Gambar 2. Bagan alir pelaksanaan kajian erosi buluh, Kali Kuning

Kejadian erosi buluh bukanlah proses yang instan atau mendadak; butuh waktu yang bervariasi dari beberapa hari sampai beberapa tahun, tergantung pada kondisi tanah deposit dan fenomena aliran yang terjadi di suatu tempat. Dua syarat utama yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi terjadinya erosi buluh adalah; (1) tanah menyebar ke dalam air yang bergerak melalui air tanah dan (2) tanah memiliki permeabilitas yang cukup baik dalam matriks tanah atau pori-pori makro untuk memungkinkan pergerakan partikel tanah liat yang tersebar tanpa penyumbatan (Sankar dkk., 2016). Peneliti lain menyebutkan bahwa sifat fisik yang memicu terjadinya erosi buluh adalah: kemiringan energi, elevasi muka air, laju aliran bawah tanah, serta permeabilitas tanah yang dapat tererosi (Gattinoni dkk., 2009; Wang dkk., 2017). Apabila kondisi-kondisi tanah tersebut cukup baik dan tidak mendukung terjadinya erosi maka erosi buluh tidak akan pernah terjadi. Tidak ada faktor tunggal ataupun kelompok faktor yang secara universal berperan untuk pengembangan erosi buluh. Faktor pemicu terjadinya erosi buluh dapat bervariasi dalam situasi yang berbeda antara satu fenomena dengan fenomena yang lain. Beberapa faktor penting untuk mendukung kejadian erosi buluh adalah:

- a) Air yang cukup untuk membuat kondisi jenuh dari lapis tanah dasar.
- b) Tinggi tekanan yang cukup untuk mengalirkan air melalui jalur bawah tanah.
- c) Media berupa material lepas untuk mengalirkan air melalui jalur bawah tanah.
- d) Tersediannya akses keluar (*outlet*) aliran bawah tanah.

Pada Gambar 3 disajikan sketsa erosi buluh tipikal mulai dari lubang masuk, saluran bawah tanah, dan lubang keluar yang berkontribusi terjadinya erosi buluh secara umum (Boucher, 1990).



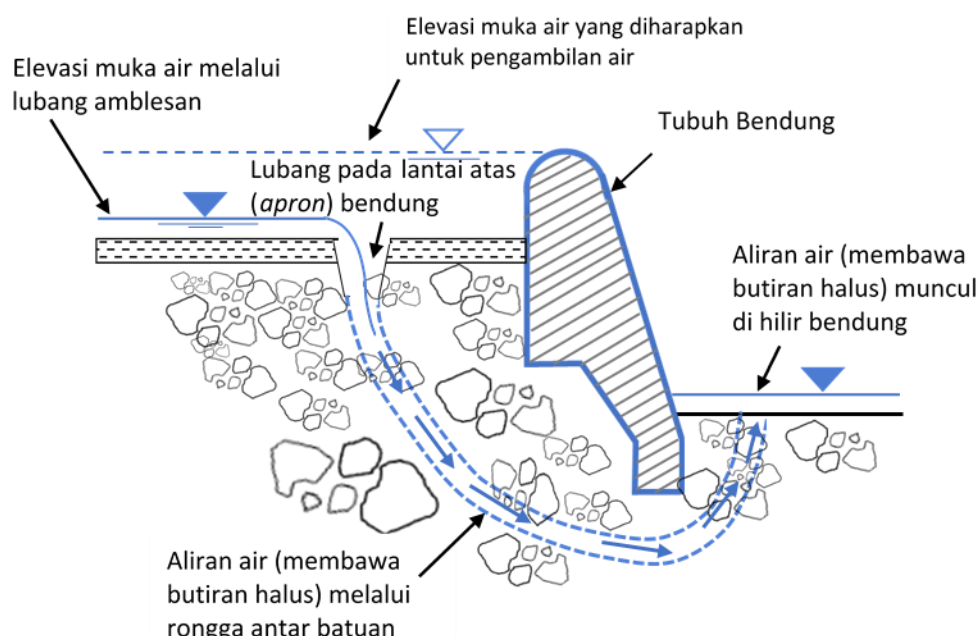
Gambar 3. Sketsa proses erosi buluh (Boucher, 1990)

Hasil dan Pembahasan

Informasi tentang formasi dasar Kali Kuning sesuai dengan kenampakan di lapangan adalah dijumpai adanya kerakal dan boulder di bawah dasar lantai depan (*apron*) Bendung Samberembe (lihat Gambar 4). Sifat-sifat deposit atau endapan seperti di atas menjadikan erosi buluh atau piping melalui dasar Bendung Samberembe akan sangat potensial, terutama apabila terdapat aliran melalui bagian bawah bendung dengan kemiringan energi yang cukup besar, baik oleh karena perbedaan elevasi dasar sungai ataupun oleh gradien hidraulik (beda tinggi antara elevasi muka air di dekat sebelah hulu dan di sebelah hilir bendung) yang cukup tinggi. Erosi buluh dapat terjadi secara lambat laun atau tiba-tiba, tergantung pada kondisi butiran tanah di bawah dasar sungai serta kondisi aliran sungai. Pada kasus dimana kenaikan air sungai berlangsung secara cepat, misal karena banjir maka gradien hidraulik akan menjadi besar dan dapat memicu kejadian erosi buluh secara mendadak. Erosi buluh secara lambat laun umumnya terjadi karena proses pemadatan sendiri pada struktur tanah dasar granuler atau tanah dengan permeabilitas tinggi karena adanya aliran air tanah. Kenaikan hidraulik gradien juga dapat terjadi karena adanya pemendekan jalan lintasan air sehingga kecepatan aliran di bawah permukaan tanah semakin besar. Kondisi yang terakhir inilah yang menyebabkan terjadinya erosi buluh seperti yang terjadi pada Kali Kuning tanggal 8 Februari 2019 (lihat sketsa pada Gambar 5). Perkembangan erosi buluh tersebut berawal dari ukuran lubang yang relatif kecil (antara $\pm 2-5\text{m}$) yang berkembang menjadi ukuran lubang yang relative besar (sebesar $\pm 7\text{m}$) dalam kurun waktu selama satu musim hujan. Kejadian erosi buluh juga dapat memicu kejadian gerusan terlokalisir (*localized scouring*) di sebelah hulu bendung, serta gerusan lokal (*local scouring*) di sekitar pangkal dan pilar jembatan, yang pada gilirannya dapat mengancam kestabilan struktur jembatan. Penanganan darurat dalam bentuk penyumbatan lubang dengan material yang dapat mencegah butiran halus menjadi hal yang penting untuk segera dilakukan segera berkembang menjadi aliran tanah yang lebih besar karena dapat mengundang gerusan lokal di sekitarnya.



Gambar 4. Formasi dasar Kali Kuning di sebelah hulu Bendung Samberembe



Gambar 5. Sketsa tipikal erosi buluh (*piping*) melalui dasar bendung

Kejadian erosi buluh di dasar Kali Kuning di sebelah hulu Bendung Samberembe telah mengakibatkan gerusan lokal di sekitar bagian jembatan di sebelah hulu bendung, yaitu sebesar kurang lebih 0,50m, 0,80m, dan 0,60m, berturut-turut di sekitar pangkal jembatan, pilar jembatan, serta tebing sungai di sebelah kiri (lihat Gambar 6). Kehadiran lubang di lantai atas (*apron*) Bendung Samberembe dapat disebabkan oleh berbagai hal, antara lain oleh benturan antara lantai dengan material sedimen yang dibawa oleh aliran air, rusaknya lantai atas bendung karena usia (*aging*), ataupun hilangnya daya dukung tanah di bawah lantai. Kejadian erupsi Gunung Merapi yang terjadi pada tahun 2010 yang diikuti dengan aliran lahar pada awal tahun 2011 di Kali Kuning juga berperan dengan rusaknya lantai atas Bendung Samberembe.



Gambar 6. Gerusan di sekitar jembatan di sebelah hulu Bendung Samberembe

Penanganan yang dipandang relevan pada kasus kejadian erosi buluh seperti halnya Kali Kuning ini adalah dengan melakukan penyumbatan di lubang dasar sungai, baik dengan timbunan material batu, ataupun dengan batu cor. Pada prinsipnya penyumbatan mempunyai dua tujuan, pertama adalah mencegah butiran tanah masuk ke dalam rongga di bawah tanah, dan kedua adalah memperpanjang jalan atau lintasan air melalui dasar bendung. Mengingat persoalan erosi buluh adalah adanya aliran air yang membawa butiran tanah, maka sebelum dilakukan tindakan penyumbatan tersebut sebaiknya dilakukan pemasangan lembar saringan atau filter (misal: geotekstil, atau geotube, atau anyaman bambu), yang berfungsi untuk menahan bitiran halus apabila terjadi aliran air tanah atau air rembesan melalui dasar sungai di sekitar tubuh bendung. Setelah penanganan dilakukan ada baiknya juga melakukan pemantauan secara kontinu terhadap kondisi lantai atas (*apron*) di sebelah hulu bendung, serta pengamatan aliran keluar di sebelah hilir bendung. Apabila di sebelah hilir bendung terdapat aliran air keluar disertai dengan membawa lumpur (keruh), maka perlu dicurigai bahwa fenomena erosi buluh sedang berlangsung. Demikian juga apabila dijumpai lubang bocoran di lantai atas (*apron*) bendung, seberapapun kecilnya, agar segera dilakukan penyumbatan dengan cara-cara seperti disebutkan di atas.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa bahwa kejadian erosi buluh pada dasar Kali Kuning di dekat sebelah hulu Bendung Samberembe bukan merupakan kejadian yang tiba-tiba, melainkan kejadian yang telah diawali dengan proses-proses sebelumnya. Semua faktor pendukung kejadian erosi buluh baik yang

berupa beda tinggi tekanan hidraulik, karakteristik sedimen dasar, perbedaan tekanan hidraulik, kehadiran jalur erosi di bawah bendung, cukup menjadi pemicu untuk kehadiran erosi buluh.

2. Proses erosi buluh yang diawali dengan kerusakan lantai hulu berupa lubang erosi kecil (*small piping*) yang kemudian berkembang menjadi erosi besar (*huge piping*) menunjukkan pentingnya penanganan awal sebelum beban keairan hadir pada skala yang lebih besar.
3. Perlu segera dilakukan penyumbatan lubang erosi buluh dengan susunan material serta bahan geotekstil yang dapat mencegah terjadinya aliran air dan tanah masuk ke dalam buluh atau pipa.

Saran

1. Peran dari lantai hulu untuk memperpanjang garis rembesan sangat diperlukan dalam rangka menghindari aliran butiran tanah di bawah badan bendung. Untuk itu kerusakan lantai dasar yang seberapapun kecilnya harus segera diperbaiki agar proses erosi buluh tidak berkembang yang dapat mengancam konstruksi bendung kehilangan daya dukung karena hilangnya material di bawah tubuh bendung
2. Analisis erosi buluh ini belum didukung dengan data teknis yang dapat digunakan sebagai prediksi potensi kejadian erosi boleh di lokasi kejadian. Oleh sebab itu penelitian selanjutnya yang didukung dengan penggunaan data teknis karakteristik tanah deposit di sekitar Bendung Semberembe serta data aliran di titik kontrol Bendung Semberembe sangat disarankan.
3. Perlu pengamatan periodik yang terkait dengan fenomena rembesan yang berpotensi memicu kejadian erosi buluh, antara lain dengan mengetahui kekeruhan atau turbiditas dari air yang berada di sebelah hilir bendung.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Balai Besar Wilayah Sungai Serayu-Opak, Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia (HATHI) Cabang Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, serta masyarakat di sekitar lokasi Bendung Semberembe, atas keterangan dan diskusi yang disampaikan selama penulis melakukan evaluasi cepat (*rapid assessment*) di lapangan.

Daftar Referensi

- Bonelli, S., Benahmed, N. (2011). Piping flow erosion in water retaining structures: inferring erosion rates from hole erosion tests and quantifying the failure time. HAL Archives-Ouvertes. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00555648>
- Boucher, S.C. (1990). Field tunnel erosion, its characteristics and amelioration. Dept. of Conservation and Environment, Land Protection Division. [http://refhub.elsevier.com/S0012-8252\(18\)30243-5/rf0140](http://refhub.elsevier.com/S0012-8252(18)30243-5/rf0140)

- Gattinoni, P., and Francani, V. (2009). A Tool for Modeling Slope Instability Triggered by Piping. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 3(8): 238-244.
- Hidayat, M., Legono, D., Wignyosukarto, B., Jayadi, R., Rahardjo, A.P., Hairani, A., Harsanto, P., Ikhsan, J. (2021). Flow Behavior of Boyong River as Revealed by Long-term Hydro-monitoring System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 930, 4th International Conference of Water Resources Development and Environmental Protection (ICWRDEP 2021) 7 August, Malang, Indonesia (Virtual)*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012023>
- Ikhsan, J., Legono, D., Ardiansyah, R. (2021). Simulation of debris flows in the watershed of the Putih River, Indonesia using SIMLAR 2.1. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 930, 4th International Conference of Water Resources Development and Environmental Protection (ICWRDEP 2021) 7 August, Malang, Indonesia (Virtual)*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012034>
- Legono, D., Rahardjo, A.R. (2017). Lahar Flow Disaster, Human Activities, and Risk Mitigation on Volcanic Rivers, John Wiley Publisher. <https://doi.org/10.1002/9781118971437.ch20>
- Mac Donald & Partners. (1984). Greater Yogyakarta Ground Water Resources Study, Volume I: Main Report, The Republic of Indonesia, The Ministry of Public Works, The Directorate General of Water Resources.
- Ojha, C.C.P., Sing, V.P., and Adrian, D.D. (2003). Determination of Critical Head in Soil Piping. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(7): 511-518 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:7\(511\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:7(511))
- Sankar, G., Varma, A.K., Kuriakose, S.L., Deepa, C., Rajan, P.P., Eldhose, K. (2016). Studies on Soil Piping in the Highlands and Foothills of Kerala to avoid the Disaster. Project Report, National Centre for Earth Science Studies (NCESS), Ministry of Sciences, India.
- Wang, Y., Li, C., Zou, X., and Wei, X. (2017). Seepage Piping Evolution Characteristics in Bimsoils-An Experimental Study. *Water*, 9: 458. <https://doi.org/doi: 10.3390/w9070458>

[Halaman ini sengaja dibiarkan kosong/*This page is intentionally left blank*]

ALUR PROSES PENERBITAN MAKALAH

Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

