

# Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

- Analisis Derajat Bencana Kekeringan di Pulau Jawa Akibat Fenomena El-Nino 2023** 115-126  
*S. Sanjaya, Bella Koes Paulina Cantik, dan Anastasia Septya Wardaningrum*
- Kajian Faktor Dominan terhadap Penilaian Kinerja Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) di Provinsi Nusa Tenggara Barat** 127-138  
*Sri Utami Sudiarti dan Satria Utama*
- Analisis Bangunan Pengaman Pantai Menggunakan Kubus Beton di Pantai Keraya Kalimantan Tengah** 139-150  
*Alton S. Ardi, I Putu Hartawan, M. Hendro Setiawan, Rizky Dwiyan Mahardhika, dan Sudarto*
- Efek Sekunder Turbulensi Aliran Super Kritis pada Saluran Terbuka terhadap Bangunan Perangkap Sedimen Irigasi** 151-162  
*Muhammad Isnaeni*
- Analisis Pengelolaan Pengendalian Banjir melalui Pembangunan Kolam Retensi di Sungai Cijambe Kabupaten Bekasi** 163-174  
*Geri Ramdhan Dazali dan Alif Lamra Amal Putra*
- Analisis Perubahan Peredaman Energi Akibat Penurunan Dasar Peredam Energi Menggunakan Uji Model Fisik Hidraulik** 175-186  
*Syaiful Anam, Very Dermawan, dan Dian Sisingih*
- Perbaikan Desain Bangunan Pelimpah Waduk Pacal dengan Uji Model Hidraulik Fisik** 187-200  
*Darto, Novianingrum Ekarina Sudaryanto, Indrawan, dan Anton Tri Asmoro*
- Pengembangan Model Prediksi Banjir berdasarkan Akurasi Inflow dan Outflow pada Bendungan Bili Bili** 201-210  
*Rachmat Ciptadi, Fajar Arif Nurdin, Febi Murdiana, Nur Indah Sari, dan Husnul Khatimah*
- Pemanfaatan Lahan Basah Buatan untuk Mengurangi Degradasi Kualitas Air di Danau Tondano** 211-218  
*Liany A. Hendratta, Sugeng Harianto, Audy H.P. Rantung, dan La'la Monica*
- Rekayasa Hidraulik untuk Pengendalian Sedimentasi Bendungan Sengguruh** 219-230  
*Jonathan Angelo Ishakputra, Slamet Lestari, Taty Yuniarti, Byan Farras Al Akbar, Iqbal Fauzan Herlambang, M. Rifqi Asyraf, dan M. Alix Rachman*

# Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

Jurnal Teknik Sumber Daya Air (JTSDA) adalah jurnal berbahasa Indonesia yang memuat naskah ilmiah dalam bidang Teknik Sumber Daya Air (SDA) dengan proses review secara *double-blind peer-reviewed*. JTSDA terbit 2 (dua) kali dalam setahun, *open access*, menerima berbagai tipe naskah, baik naskah penelitian (*research articles*), naskah kasus teknik (*technical notes*), ataupun naskah ulasan (*review articles*). Ketiga tipe naskah JTSDA tersebut mencakup aspek konservasi SDA, pendayagunaan SDA, pengendalian daya rusak SDA, sistem informasi SDA, serta kelembagaan SDA. JTSDA diterbitkan oleh Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia (HATHI).

Pelindung : Ketua Umum HATHI

Penanggung: Dr. Muhammad Rizal

Jawab : Ketua IV Bidang Pertemuan Ilmiah, Seminar dan Jurnal

Chief Editor : Dr. Evi Anggraheni (Universitas Indonesia)

*Hydrology, Water Resources Planning and Management, Water-related Disaster Management*

Chief Editor : Dr. Benazir (Universitas Gadjah Mada)

Deputy : *Coastal Engineering, Sea and Ocean Hazards, Tsunami Engineering*

Section : Dr. Muhammad Ramdhan Oliy (Universitas Gorontalo)

Editors : *Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management*

Dr. Roby Hambali (Universitas Bangka Belitung)

*Hydrology, Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management*

Dr. Mahendra Andiek Maulana (Institut Teknologi Sepuluh Nopember)

*Hydrology, Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management*

Dr. Ani Hairani (Universitas Muhammadiyah Yogyakarta)

*Hydraulics, Hydrology, Erosion and Sedimentation Engineering, Water-related Disaster Management*

Dr. Anggara Wiyono Wit Saputra (Universitas Brawijaya)

*Hydraulics Engineering and Watershed Management*

Dr. Retno Utami Agung Wiyono (Universitas Jember)

*Hydraulics Engineering and Watershed Management*

Dr. Ir. Steven Reinaldo Rusli, S.T., M.T., M.Sc. (Universitas Katolik Parahyangan)

*Hydraulics Engineering, Water Resources Planning and Management, and Watershed Management*

Stephen Sanjaya, M.Sc. (Praktisi)

*Hydrology, Water Resources Planning and Management, and Water-related Disaster Management*

Reviewers : Prof. Radianta Triatmadja (UGM)

Dr. Doddi Yudianto (UNPAR)

Prof. Djoko Legono (UGM)

Dr.techn. Umboro Lasminto (ITS)

Prof. Suripin (UNDIP)

Dr. Adi Prasetyo (Kementerian PUPR)

Prof. Lily M. Limantara (UB)

Dr. Dhemi Harlan (ITB)

Dr. Joko Nugroho (ITB)

Dr.-Ing. Bobby Minola Ginting (UNPAR)

Prof. Denik Sri Krisnayanti (UNDANA)

Dr. Nyoman Suwartha (UI)

Prof. Gusfan Halik (UNEJ)

Dr.Eng. M. Adhiraga Pratama (UI)

Prof. Farouk Maricar (UNHAS)

Dr.Eng. Agus Santoso (Kementerian PUPR)

Dr. Dian Sisingih (UB)

Dr. Nuryanto Sasmito Slamet (Kementrian PUPR)

Editor : Asep Harhar Muharam *Copy-Editor, Layout Editor*

Pelaksana : Ahmad Rizki Rivai *Layout-Editor, Proofreader*

Muhammad Rizki Amin *Translator, Layout-Editor*



Alamat Redaksi:

**Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia (HATHI)**

Gedung Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Lt. 8

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jl. Patimura No. 20 Kebayoran Baru, Jakarta Selatan 12100

Telepon & Fax. +6221-72792263

<http://jtsda.hathi.id> | [jtsda@hathi.id](mailto:jtsda@hathi.id)

# Jurnal TEKNIK SUMBER DAYA AIR

## DAFTAR ISI

Daftar Isi .....	ii
Analisis Derajat Bencana Kekeringan di Pulau Jawa Akibat Fenomena El-Nino 2023 .....	115-126
<i>S. Sanjaya, Bella Koes Paulina Cantik, dan Anastasia Septya Wardaningrum</i>	
Kajian Faktor Dominan terhadap Penilaian Kinerja Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) di Provinsi Nusa Tenggara Barat .....	127-138
<i>Sri Utami Sudiarti dan Satria Utama</i>	
Analisis Bangunan Pengaman Pantai Menggunakan Kubus Beton di Pantai Keraya Kalimantan Tengah .....	139-150
<i>Alton S. Ardi, I Putu Hartawan, M. Hendro Setiawan, Rizky Dwiyan Mahardhika, dan Sudarto</i>	
Efek Sekunder Turbulensi Aliran Super Kritis pada Saluran Terbuka terhadap Bangunan Perangkap Sedimen Irigasi .....	151-162
<i>Muhammad Isnaeni</i>	
Analisis Pengelolaan Pengendalian Banjir melalui Pembangunan Kolam Retensi di Sungai Cijambe Kabupaten Bekasi .....	163-174
<i>Geri Ramdhan Dazali dan Alif Lamra Amal Putra</i>	
Analisis Perubahan Peredaman Energi Akibat Penurunan Dasar Peredam Energi Menggunakan Uji Model Fisik Hidraulik .....	175-186
<i>Syaiful Anam, Very Dermawan, dan Dian Sisingsih</i>	
Perbaikan Desain Bangunan Pelimpah Waduk Pacal dengan Uji Model Hidraulik Fisik .....	187-200
<i>Darto, Novianingrum Ekarina Sudaryanto, Indrawan, dan Anton Tri Asmoro</i>	
Pengembangan Model Prediksi Banjir berdasarkan Akurasi Inflow dan Outflow Pada Bendungan Bili Bili .....	201-210
<i>Rachmat Ciptadi, Fajar Arif Nurdin, Febi Murdiana, Nur Indah Sari, dan Husnul Khatimah</i>	
Pemanfaatan Lahan Basah Buatan untuk Mengurangi Degradasi Kualitas Air di Danau Tondano .....	211-218
<i>Liany A. Hendratta, Sugeng Harianto, Audy H.P. Rantung, dan La'la Monica</i>	
Rekayasa Hidraulik untuk Pengendalian Sedimentasi Bendungan Senguruh ...	219-230
<i>Jonathan Angelo Ishakputra, Slamet Lestari, Taty Yuniarti, Byan Farras Al Akbar, Iqbal Fauzan Herlambang, M. Rifqi Asyraf, dan M. Alix Rachman</i>	

## ANALISIS DERAJAT BENCANA KEKERINGAN DI PULAU JAWA AKIBAT FENOMENA EL-NINO 2023

S. Sanjaya<sup>1,4\*</sup>, Bella Koes Paulina Cantik<sup>2,4</sup>, dan  
Anastasia Septya Wardaningrum<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pradita

<sup>3</sup>Researcher, Collaborative Knowledge Network Indonesia (CKNet-INA)

<sup>4</sup>Collaborative Knowledge Network Indonesia (CKNet-INA), Indonesia

\*sanjaya.stephen@unpar.ac.id

Pemasukan: 30 Juni 2024 Perbaikan: 29 September 2024 Diterima: 19 Desember 2024

### Intisari

Kekeringan adalah sebuah bencana alam dengan proses menjalar yang tidak nampak namun dapat teridentifikasi lewat dampaknya terhadap aspek kehidupan manusia. Berdasarkan studi terkini IPCC, bencana alam hidro-meteorologi seperti banjir ataupun kekeringan akan mengalami intensifikasi, serta peningkatan dampak risikonya. Hal ini juga semakin tergambar dengan beberapa kejadian kekeringan akibat fenomena El-nino seperti pada tahun 2015-2016 yang dikategorikan kuat. Kejadian ini berdampak sangat parah terhadap aspek pertanian, dan juga perekonomian hingga kesejahteraan penduduk dunia, terkhususnya Indonesia di mana pertanian adalah komoditas utamanya. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengukur seberapa parah kondisi kekeringan yang terjadi akibat fenomena alam El-nino di Indonesia pada tahun 2023 dengan Indeks Kekeringan SPI dan membuat peta sebaran kekeringan pada wilayah tertinjau, sehingga dapat diharapkan menjadi langkah awal mitigasi bencana dampak kekeringan yang terjadi. Metode penelitian yang digunakan adalah perhitungan kuantitatif Indeks Kekeringan SPI, yang diolah menggunakan pengukuran data hujan bulanan berbasis satelit, yaitu GPM 3IMERGMV07 selama 23 tahun (2001-2023) di Pulau Jawa. Pemetaan sebaran wilayah yang terdampak kekeringan dibuat berdasarkan hasil Indeks Kekeringan SPI, dengan menggunakan Metode IDW pada ArcGIS. Hasil analisis dari studi ini menunjukkan bahwa derajat keparahan kekeringan yang terjadi di Pulau Jawa rata-rata akibat fenomena El-nino tahun 2023 adalah  $-0,84 \pm 0,28$ , selain itu daerah yang mengalami dampak kekeringan paling parah berdasarkan pengukuran indeks ini adalah daerah selatan Pulau Jawa. Hasil ini juga didukung dengan penilaian durasi kekeringan SPI, bahwa rata-rata daerah mengalami kekeringan selama 5 bulan, pada akhir tahun 2023.

Kata Kunci: El-Nino 2023, GPM 3IMERGMV 07, Kekeringan, SPI

### Latar Belakang

Kekeringan adalah bencana alam yang diakibatkan oleh defisit curah hujan dalam periode waktu tertentu yang menyebabkan tidak cukupnya ketersediaan

air untuk kegiatan manusia dan lingkungan (Surmaini, 2016). Kekeringan merupakan salah satu bencana alam dengan mekanisme menjalar yang tidak terlihat secara langsung namun memiliki dampak signifikan. Kekeringan dapat berlangsung lama dan menyebabkan kerugian besar terhadap lingkungan, perekonomian, dan kehidupan masyarakat karena tidak memiliki batas waktu yang jelas (Surmaini, 2016; Darfia and Rahmalina, 2019). Intensitas dan frekuensi bencana banjir dan kekeringan mengalami peningkatan signifikan menurut Laporan dari Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) tahun 2022 (Simanjuntak and Safiril, 2020; Mondiana, Zairina and Sari, 2022). Perubahan iklim yang disebabkan oleh aktivitas manusia memperburuk kondisi ini, sehingga menyebabkan lebih seringnya terjadi fenomena cuaca ekstrem (Driga and Drigas, 2019).

El-Nino, fenomena alam akibat pemanasan abnormal di Samudra Pasifik bagian tengah dan timur, menyebabkan perubahan pola cuaca global. Di Indonesia, El-Nino sering kali berasosiasi dengan musim kemarau yang lebih panjang dan intens, mengakibatkan kekeringan parah di beberapa wilayah. Fenomena ini berdampak pada sektor pertanian, ketersediaan air, dan kesejahteraan masyarakat yang bergantung pada hasil pertanian. El-Nino telah menunjukkan dampak pada produksi padi, produksi jagung, dan pola budidaya pertanian di Indonesia, dengan adanya diferensiasi pada produksi dan perubahan pada pola tanam, khususnya pada Pulau Jawa (Utami, Jamhari and Hardyastuti, 2011; Ramadhan, 2024).

Bencana kekeringan sebenarnya dapat dimitigasi dengan berbagai alternatif. Salah satu cara paling efektif untuk mengurangi dampaknya adalah melalui pengamatan kontinu (*drought monitoring*). Pengamatan ini dapat dilakukan dengan mempelajari pola hujan bulanan menggunakan berbagai indeks seperti Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), dan Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Balbo dkk., 2019). Indeks kekeringan, seperti SPI, telah banyak diterapkan sebagai langkah awal untuk mendeteksi kekeringan pada studi-studi terdahulu, seperti oleh (Liu dkk., 2021). Keunggulan Metode SPI dibandingkan dengan metode lainnya adalah metode ini memiliki indeks yang fleksibel, dapat menganalisis periode bulan basah, dan analisis perhitungan yang tidak terlalu rumit dengan hanya memerlukan data hujan sebagai input data pada perhitungan (McKee dkk., 1993; Saidah, Budianto and Hanifah, 2017). Selain itu, SPI merupakan salah satu metode indeks kekeringan yang telah menunjukkan performa yang unggul dalam mendeteksi tingkat kekeringan pada suatu daerah dibandingkan dengan metode-metode lainnya (Asefjah dkk., 2014; Dewita, Harisuseno and Suhartanto, 2022).

Selain itu, mitigasi bencana kekeringan merupakan bagian penting dari rencana aksi dalam kerangka Sustainable Development Goals (SDGs), terutama terkait penanggulangan perubahan iklim dan peningkatan ketahanan terhadap bencana (Van Loon, 2020). Kekeringan secara langsung mempengaruhi beberapa tujuan utama dalam SDGs, termasuk: SDG 6: *Clean Water and Sanitation* (Air Bersih dan Sanitasi) yang menekankan pentingnya akses terhadap air bersih dan sanitasi untuk semua orang, serta pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan (Sena dkk., 2016); SDG 13: *Climate Action* (Penanganan Perubahan Iklim) yang mencakup tindakan yang diperlukan sesegera mungkin untuk memerangi perubahan iklim dan

dampaknya, termasuk peristiwa cuaca ekstrem seperti bencana kekeringan (Zhang dkk., 2019); SDG 2: *Zero Hunger* (Tanpa Kelaparan) yang berfokus pada mengakhiri kelaparan dan memastikan akses terhadap pangan yang aman, bergizi, dan cukup sepanjang tahun, yang dapat terganggu oleh kekeringan (Zhang dkk., 2019; Valin dkk., 2021); serta SDG 15: *Life on Land* (Ekosistem Daratan) yang melibatkan pengelolaan hutan, lahan basah, dan ekosistem daratan lainnya secara berkelanjutan, yang bisa terancam oleh kekeringan (Lucatello and Sannwald, 2020).

Studi ini bermaksud untuk memahami bencana kekeringan yang terjadi akibat fenomena El-Nino di tahun 2023. Dengan memahami karakteristik dan dampak kekeringan yang disebabkan oleh El-Nino, diharapkan dapat diperoleh informasi yang bermanfaat untuk perencanaan dan mitigasi bencana di masa mendatang. Maksud dari penelitian ini dapat terwujud dengan tujuan: (1) Mendeteksi kekeringan akibat fenomena el-nino tahun 2023 dengan metode SPI; (2) Mengevaluasi tingkat keparahan dan durasi dari kekeringan tersebut metode SPI; serta (3) Melakukan analisis spasial akibat kekeringan.

## **Metodologi Studi**

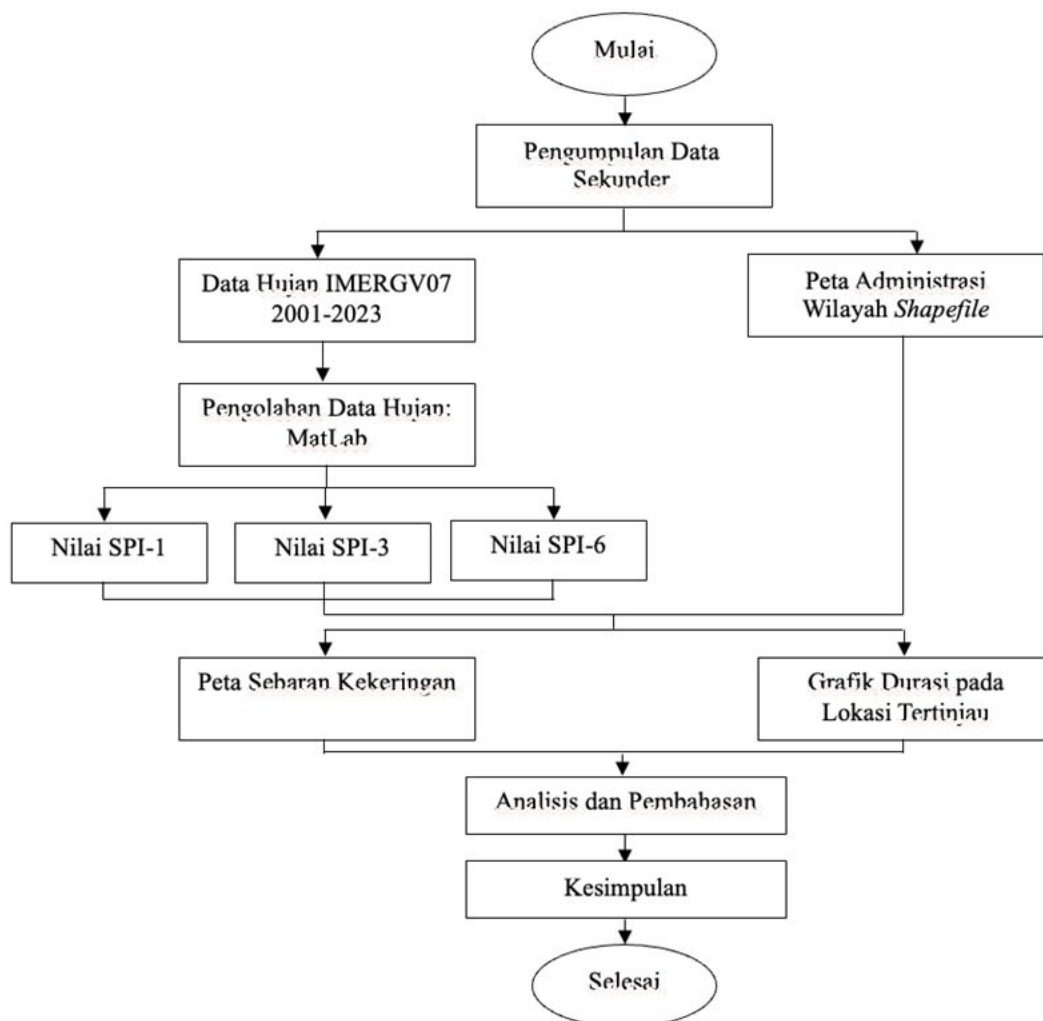
### **Data**

Penelitian ini berfokus pada data sekunder dalam keseluruhan analisis, tanpa pengambilan sampel di lapangan. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah data hujan hasil pengukuran satelit dari misi Global Precipitation Measurement (GPM). Misi satelit ini adalah buah hasil kerjasama antara National Aeronautics and Space Administration (NASA) dan Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), yang telah diorbitkan sejak tahun 2014. Data hujan dengan pengukuran GPM (Precipitation Processing System (PPS) At NASA GSFC, 2023) memiliki resolusi waktu 30 menit serta, resolusi spasial sebesar  $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$  (atau setara dengan 11 km dekat dengan daerah ekuator). Secara spesifik, data hujan bulanan yang digunakan adalah tipe hujan hasil kalibrasi dan validasi versi final, yaitu IMERG\_V07. Data dengan tipe ini sudah tersedia sejak bulan Juni 2000 sampai sekarang.

### **Metodologi Studi**

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kuantitatif deskriptif dengan menggunakan pendekatan Analisis Data Sekunder (ADS). Kerangka alur penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut. Idealnya, analisis kekeringan dengan Metode SPI digunakan periode data hujan dalam rentang 20-30 tahun (Guttman, 1994; World Meteorological Organization, 2012). Oleh karena itu, periode data hujan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 22 tahun, mulai dari Januari 2001 sampai dengan Desember 2023. Semua data hujan akan diolah menggunakan MatLab untuk mengetahui nilai kekeringan pada masing-masing indeks SPI, dan GIS Software digunakan untuk menggambarkan peta sebaran kekeringan di Pulau Jawa. Penelitian ini berfokus pada Pulau Jawa, Indonesia yang berada pada lokasi geografi  $7,6145^{\circ}$  LS,  $110,7122^{\circ}$  BT. Pulau Jawa memiliki

komoditas pertanian yang sangat tinggi, sehingga kegiatan tersebut juga sangat besar dipengaruhi oleh nilai hujan bulanan untuk pemenuhan kebutuhan airnya.



Gambar 1. Kerangka Alur Penelitian

Standardized Precipitation Index (SPI) adalah sebuah indikator yang menggambarkan probabilitas terjadinya hujan pada periode waktu tertentu dalam sebuah daerah. SPI didasarkan pada probabilitas curah hujan yang kemudian diubah dalam bentuk indeks kekeringan (McKee dkk., 1993). Indeks ini diperkenalkan oleh McKee yang digunakan untuk menganalisa perubahan curah hujan dan kekeringan. SPI memiliki kelebihan karena perhitungannya yang sederhana dan cenderung stabil, serta kemampuan penerapannya dalam memantau kekeringan pada skala bulanan. Indeks ini menggambarkan nilai hujan bulanan dalam fungsi kumulatif probabilitas (CDF) gamma, yang dinyatakan dalam persamaan (Liu dkk., 2021):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \tag{1}$$

dimana  $\alpha$  adalah parameter bentuk,  $\beta$  adalah parameter skala, dan  $x$  adalah nilai hujan bulanan

Sedangkan nilai  $\Gamma$  dalam fungsi  $\alpha$ , dinyatakan sebagai berikut:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \tag{2}$$

Penentuan nilai  $\alpha$  dan  $\beta$  diestimasi dengan menggunakan teknik Maximum Likelihood Estimation (MLE), yang dipilih dengan alasan kestabilannya dengan teknik hasil rekomendasi dari (Wilks, 1990). Selanjutnya nilai CDF gamma dikonversi ke dalam probabilitas teoretis, yaitu standar normal terdistribusi. Hasil konversi menjadi standar normal terdistribusi tersebut dapat diklasifikasikan ke dalam Tabel 1. Klasifikasi Kelas SPI berdasarkan (World Meteorological Organization, 2012), nilai ini juga diacu oleh BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika).

Tabel 1. Klasifikasi Nilai SPI

Nilai SPI	Klasifikasi Nilai SPI
$\leq -2,00$	Sangat Kering
-1,50 - -1,99	Kering
-1,00 - 1,49	Agak Kering
-0,99 - 0,99	Normal
1,00 - 1,49	Agak Basah
1,50 - 1,99	Basah
$\geq 2,00$	Sangat Basah

SPI terdiri dari beberapa skala waktu, yaitu 1, 3, 6. Perbedaan pada masing-masing skala waktu SPI dapat dilihat pada Tabel 2. Indeks kekeringan dengan skala waktu mengindikasikan parameter-parameter hidrologi lainnya. Nilai indeks seperti SPI-3 dapat mengindikasikan kondisi kelembaban jangka pendek dan menengah yang berkorelasi kuat dengan kebutuhan air untuk kegiatan agrikultur. Sedangkan, SPI-6 dapat menggambarkan kondisi debit sungai yang mencerminkan kondisi kelembaban jangka menengah.

Tabel 2. Perbedaan pada masing-masing skala waktu SPI (World Meteorological Organization, 2012)

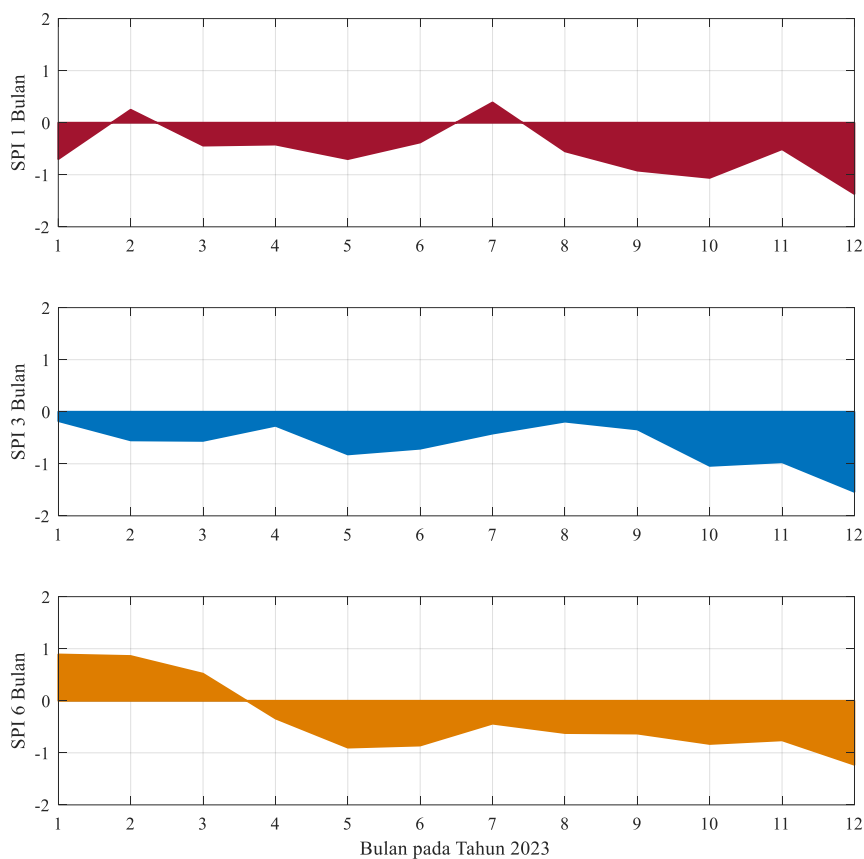
Pembeda	SPI-1	SPI-3	SPI-6
Periode	1 bulan (periode 30 hari)	3 bulan	6 bulan
Tujuan perhitungan	Mencerminkan kondisi jangka pendek	Mencerminkan kondisi kelembaban jangka pendek dan menengah	Mencerminkan kondisi kelembaban jangka menengah
Fungsi perhitungan	Memperkirakan Crop Moisture Index, dimana indeks ini merupakan bagian dari Palmer Drought Severity Index.	Memperkirakan kondisi kelembaban lebih efektif dibandingkan dengan Palmer Index atau indeks hidrologi lain yang tersedia	Pengamatan musim hujan dan anomali aliran sungai serta ketinggian waduk, tergantung pada wilayah dan waktu dalam setahun.

Perhitungan durasi kekeringan menjadi salah satu parameter penting dalam sebuah kejadian kekeringan. Durasi kekeringan itu sendiri dapat diestimasi dengan menghitung frekuensi kejadiannya apabila nilai SPI lebih kecil dari 0.

## Hasil Studi dan Pembahasan

### Kondisi SPI Rata-rata Tahun 2023

Hasil rerata SPI di Pulau Jawa menunjukkan bahwa pola hujan yang cenderung kering menjelang bulan Agustus, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Hasil SPI 1 menunjukkan durasi kekeringan selama kurang lebih 5 bulan, sejak Bulan Agustus sampai dengan Bulan Desember 2023. Pola ini tidak hanya terjadi pada skala waktu 1 bulan, akan tetapi juga terdeteksi pada SPI skala waktu 3 dan 6 bulan. Hal ini juga selaras dengan temuan fenomena El-Nino yang disampaikan terjadi sejak bulan Juni 2023 dan mencapai puncaknya pada bulan November di tahun 2023(JPL NASA, 2024).



Gambar 2. SPI rata-rata di Pulau Jawa pada skala waku 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan

Perhitungan kekeringan indeks SPI dengan berbagai skala waktu, yaitu 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan, dilakukan di seluruh Pulau Jawa untuk mendeteksi anomali pola hujan bulanan sepanjang tahun 2023 serta kekeringan akibat El-Nino 2023. Untuk mendapatkan gambaran umum dari perubahan curah hujan bulanan di Pulau Jawa, rata-rata dari indeks kekeringan dengan berbagai skala waktu dihasilkan, dan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil rata-rata SPI di Pulau Jawa pada tahun 2023

Bulan	SPI 1		SPI 3		SPI 6	
	Rata-rata	Standar Deviasi	Rata-rata	Standar Deviasi	Rata-rata	Standar Deviasi
Jan	-0.70	0.43	-0.18	0.49	0.89	0.25
Feb	0.25	0.73	-0.55	0.65	0.86	0.46
Mar	-0.44	0.68	-0.56	0.50	0.52	0.56
Apr	-0.42	0.80	-0.27	0.76	-0.34	0.74
Mei	-0.70	0.49	-0.82	0.38	-0.90	0.57
Jun	-0.38	0.58	-0.71	0.32	-0.86	0.39
Jul	0.39	0.42	-0.42	0.39	-0.44	0.35
Agu	-0.55	0.15	-0.19	0.22	-0.62	0.23
Sep	-0.92	0.24	-0.34	0.30	-0.63	0.24
Okt	-1.06	0.26	-1.04	0.20	-0.83	0.16
Nov	-0.51	0.50	-0.97	0.24	-0.76	0.17
Des	-1.37	0.57	-1.54	0.43	-1.23	0.30

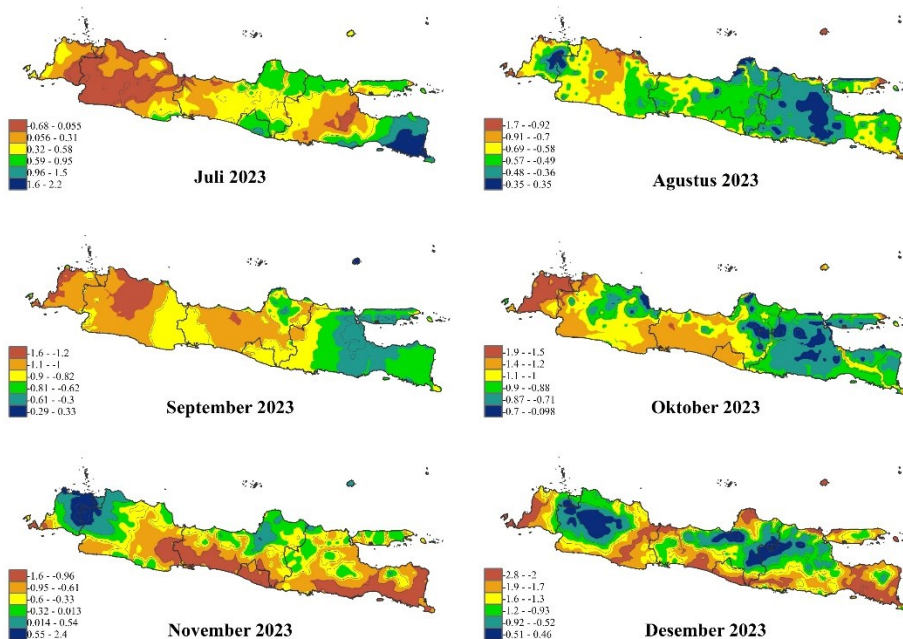
Walaupun puncak fenomena El-Nino 2023 diprediksi terjadi pada bulan November, akan tetapi dampaknya baru akan dirasakan pada bulan-bulan berikutnya, dan tentunya akan mengganggu pola iklim beberapa bulan mendatang (JPL NASA, 2024). Pernyataan ini didukung dengan bukti yaitu perubahan indeks yang begitu drastis pada bulan Desember 2023, mencapai hingga 2 kali lipat dari Bulan November. Derajat kekeringan terparah pada bulan Desember mencapai -1,37 untuk SPI 1, -1,54 untuk SPI 3 dan -1,23 untuk SPI 6. Secara lebih detail, hasil perhitungan rata-rata SPI di Pulau Jawa untuk berbagai skala waktu disajikan pada Tabel 3.

Kekeringan akibat fenomena El-Nino 2023 yang terdeteksi sejak Bulan Agustus di Pulau Jawa memiliki derajat rata-rata sebesar  $-0,88 \pm 0,34$  untuk SPI 1 bulan, sedangkan derajat keparahannya rata-rata menurun untuk SPI 3 bulan dan SPI 6 bulan sebesar  $-0,81 \pm 0,28$  dan  $-0,81 \pm 0,22$ , secara berurutan. Oleh karena itu, secara umum tingkat keparahan kekeringan akibat El-Nino 2023 untuk berbagai skala waktu adalah  $-0,84 \pm 0,28$ .

**Analisis Spasial Kekeringan Tahun 2023**

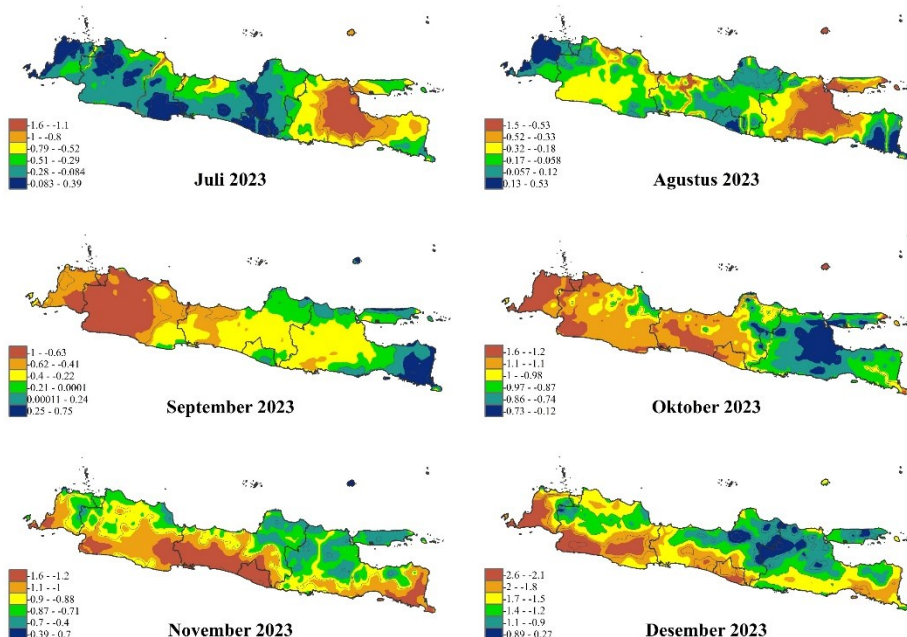
Analisis spasial terhadap kondisi kekeringan Pulau Jawa dilakukan dengan fokus memperhatikan SPI pada 6 bulan terakhir, yaitu dari Agustus sampai dengan Desember. Hal ini didasari dari kondisi rata-rata SPI selama setahun pada bagian sebelumnya. Gambar 3 sampai dengan Gambar 5 menyajikan peta sebaran nilai SPI di Pulau Jawa dari bulan yang dimaksud untuk berbagai skala waktu. Skala indeks kekeringan untuk masing-masing bulan berbeda-beda tergantung dari sebaran nilai indeksnya. Peta ini dimaksudkan untuk memperhatikan kondisi provinsi yang mengalami kekeringan dengan derajat terparah sepanjang akhir tahun 2023. Secara jangka panjang, metode ini dapat memberikan gambaran umum kepada pemangku kebijakan terkait dengan mitigasi bencana kekeringan yang dapat terjadi di lokasi tersebut.

Dari peta sebaran nilai SPI 1 bulan (lihat Gambar 3), beberapa provinsi yang masuk sebagai golongan kekeringan terparah sejak Bulan September 2023 (kategori derajat -1,6 s.d. -1,2), yaitu Provinsi Jawa Barat Bagian Utara. Sedangkan untuk bulan Oktober 2023, lokasi paling terdampak dengan kategori derajat -1,9 s.d. -1,5 ialah Provinsi Banten. Pulau Jawa bagian selatan mengalami anomali curah hujan bulanan secara berturut-turut pada Bulan November dan Desember, dengan kategori derajat -1,6 s.d. -0,96 dan -2,8 s.d. -2, secara berurutan.



Gambar 3. Sebaran nilai SPI-1 di Pulau Jawa dari Juli s.d. Desember 2023

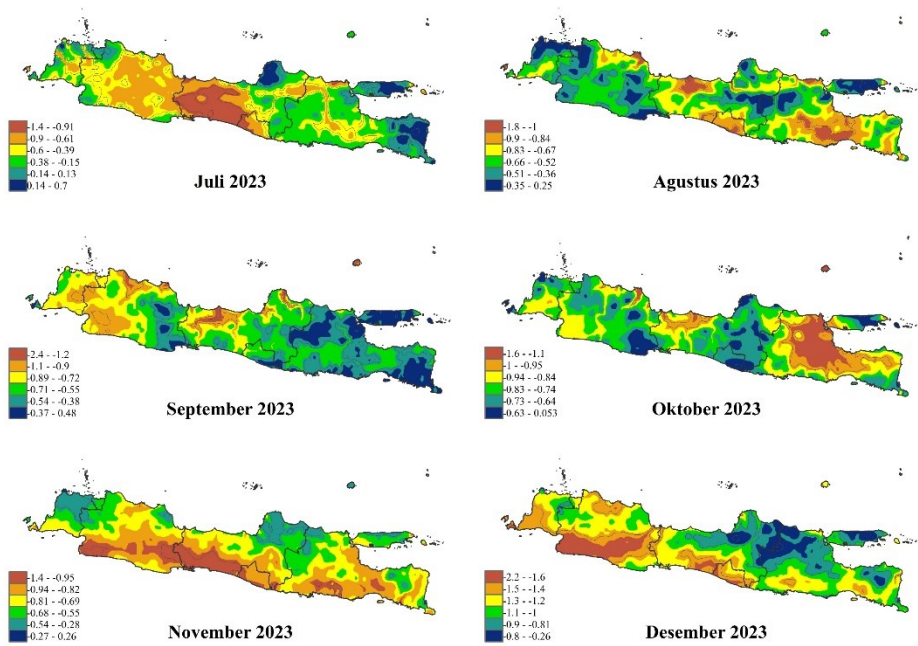
SPI 3 memiliki sebaran yang kekeringan yang cukup serupa dengan SPI 1, namun derajat keparahan SPI 1 bulan lebih tinggi daripada SPI 3. SPI 3 juga berkorelasi secara kuat dengan kondisi kelembaban udara, dan yang terdeteksi semakin menurun. Gambar 4 menunjukkan sebaran nilai SPI 3 bulanan di Pulau Jawa pada Bulan Juli sampai dengan Desember 2023. Pada Bulan Agustus 2023, hampir keseluruhan dari Provinsi Jawa Timur masuk dalam golongan kekeringan yang paling tinggi di Pulau Jawa dengan derajat -1,5 s.d. -0,53. Pada dua bulan berikutnya, kekeringan SPI 3 terdeteksi di bagian barat Pulau Jawa, dengan derajat keparahan maksimum pada September 2023 (-1,0) dan semakin menguat pada Bulan Oktober 2023 (-1,6). Di akhir dua bulan tahun 2023, pola yang sama dengan SPI 1 kembali terdeteksi di lokasi selatan Pulau Jawa, dengan derajat yang kian menguat di Desember 2023 dengan nilai maksimum -2,6.



Gambar 4. Sebaran Nilai SPI-3 di Pulau Jawa dari Juli-Desember 2023

SPI skala waktu 6 bulan memiliki korelasi kuat terhadap kondisi debit, selain itu juga SPI dengan skala ini memberikan efek kekeringan pada masa sebelumnya yang dapat mempengaruhi perhitungan indeks kekeringan pada waktu yang sama untuk skala waktu yang berbeda. Gambar 5 mengilustrasikan sebaran nilai SPI 6 bulanan di Pulau Jawa untuk enam bulan terakhir. Pada Bulan Agustus 2023, golongan derajat keparahan (kategori derajat -2,4 s.d. -1,2) ditemukan di Provinsi Jawa Tengah Bagian Timur dan sebagian besar Provinsi Jawa Timur. Berbeda dengan skala waktu sebelumnya, SPI 6 pada bulan September dengan kondisi normal hingga agak kering (derajat -1,0 s.d. -0,61) terjadi Provinsi Jawa Barat dan Provinsi Jawa Tengah Bagian Timur. Sedangkan untuk Bulan Oktober 2023, kondisi terparah meningkat hingga kering (derajat -1,6 s.d. -1,1) di Provinsi Jawa Timur. Akan tetapi, kondisi yang sama untuk SPI 6, lokasi selatan Pulau Jawa mengalami kekeringan maksimum pada Bulan November dan Desember 2023, hingga mencapai derajat maksimum -1,4 dan -2,6, secara berturut-turut.

Dari seluruh analisis SPI yang dilakukan, pada Bulan September dan Oktober, daerah yang paling terdampak adalah Propinsi Jawa Barat dan Banten, sedangkan pada Bulan November dan Desember, lokasi paling kering berada di daerah selatan Pulau Jawa. Lokasi tersebut seringkali mengalami kekeringan pada golongan derajat maksimum pada Bulan November dan Desember 2023 pada berbagai skala waktu.



Gambar 5. Sebaran Nilai SPI-6 di Pulau Jawa dari Juli-Desember 2023

**Kesimpulan dan Saran**

**Kesimpulan**

Beberapa hal penting yang menjadi fokus penelitian ini, yaitu kekeringan di Pulau Jawa akibat fenomena El-Nino terdeteksi indeks SPI pada berbagai skala waktu terjadi selama kurang lebih lima (5) bulan yaitu rata-rata sejak bulan Agustus sampai dengan Desember 2023. Derajat keparahan kekeringan akibat El-Nino di Pulau Jawa untuk SPI 1 bulan adalah  $-0,88 \pm 0,34$ , untuk SPI 3 bulan adalah  $-0,81 \pm 0,28$  dan SPI 6 bulan adalah  $-0,81 \pm 0,22$ , dengan rata-rata total  $-0,84 \pm 0,28$ . Selain itu, hasil analisis sebaran spasial kekeringan secara umum, menunjukkan bahwa pada Bulan September dan Oktober tahun 2023, daerah yang masuk ke dalam golongan kekeringan terparah adalah Provinsi Banten dan Jawa Barat. Sedangkan pada Bulan November dan Desember tahun 2023, daerah selatan Pulau Jawa mengalami kekeringan dengan derajat maksimum pada berbagai skala waktu.

**Saran**

Dalam rangka peningkatan studi ini, koreksi hujan satelit terhadap data hujan pos dapat dilakukan untuk meningkatkan akurasi studi. Selain itu juga, pemuktahiran data hujan agar mencapai 30 tahun juga dapat memperbaiki akurasi perhitungan nilai SPI dengan probabilitas Gamma.

**Ucapan Terima Kasih**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada CKNet-INA (*Collaborative Knowledge Network Indonesia*) atas kesempatan untuk berkolaborasi dalam penelitian ini, serta pihak-pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

## Daftar Referensi

- Asefjah, B., Fanian, F., Feizi, Z., AbolhasaniZarjo, A., Paktinat, H., TaghiNaghilou, M., Molaei Atani, A., Asadollahi, M., Babakhani, M., Kouroshniya, A., and others, 2014. Meteorological drought monitoring using several drought indices (case study: Salt Lake Basin in Iran). *Desert*, 19(2), pp.155–165.
- Balbo, F., Wulandari, R.A., Nugraha, M.R.R., Dwiandani, A., Syahputra, M.R. and Suwarman, R., 2019. The evaluation of drought indices: Standard Precipitation Index, Standard Precipitation Evapotranspiration Index, and Palmer Drought Severity Index in Cilacap-Central Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303(1), p.012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012012>.
- Darfia, N.E. and Rahmalina, W., 2019. Analisis Indeks Kekeringan di Daerah Irigasi Kelayang Kabupaten Indragiri Hulu Provinsi Riau. *Jurnal Infrastruktur*, 5(1), pp.35–44. <https://doi.org/10.35814/infrastruktur.v5i1.662>.
- Dewita, M., Harisuseno, D. and Suhartanto, E., 2022. Analisis Kekeringan Meteorologi dengan Metode Standardized Precipitation Index (SPI) dan China Z Index (CZI) Di Sub DAS Kadalpang, Kabupaten Pasuruan. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 2(1), pp.1–13.
- Driga, A.M. and Drigas, A.S., 2019. Climate Change 101: How Everyday Activities Contribute to the Ever-Growing Issue. *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)*, 7(1), p.22. <https://doi.org/10.3991/ijes.v7i1.10031>.
- Guttman, N.B., 1994. On the Sensitivity of Sample L Moments to Sample Size. *Journal of Climate*, 7(6), pp.1026–1029. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<1026:OTSOSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<1026:OTSOSL>2.0.CO;2).
- JPL NASA, 2024. *El Niño/La Niña Watch & PDO*. Available at: <<https://sealevel.jpl.nasa.gov/data/el-nino-la-nina-watch-and-pdo/el-nino-2023/>> [Accessed 30 June 2024].
- Liu, C., Yang, C., Yang, Q. and Wang, J., 2021. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11(1), p.1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3>.
- Lucatello, S. and Sannwald, E., 2020. Sustainable development goals and drylands: Addressing the interconnection. *Stewardship of Future Drylands and Climate Change in the Global South: Challenges and Opportunities for the Agenda 2030*, pp.27–40.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., and others, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston. pp.179–183.
- Mondiana, Y.Q., Zairina, A. and Sari, R.K., 2022. Prediksi Peluang Kejadian Curah Hujan Ekstrem Dan Implikasi Pengelolaan Sumberdaya Air. *Journal of Forest Science Avicennia*, 4(2), pp.96–101. <https://doi.org/10.22219/avicennia.v4i2.19695>.

- Precipitation Processing System (PPS) At NASA GSFC, 2023. *GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V07*. <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/07>.
- Ramadhan, N., 2024. The Influence of Climate Change on Rice Production And Cultivation Patterns in Indonesia. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika (Juatika)*, [online] 6(1). <https://doi.org/10.36378/juatika.v6i1.3374>.
- Saidah, H., Budianto, M.B. and Hanifah, L., 2017. Analisa indeks dan sebaran kekeringan menggunakan metode standardized precipitation index (SPI) dan geographical information system (GIS) Untuk Pulau Lombok. *Jurnal Spektran*, 5(2), pp.173–179.
- Sena, A., Freitas, C.M.D., Barcellos, C., Ramalho, W. and Corvalan, C., 2016. Measuring the invisible: Analysis of the Sustainable Development Goals in relation to populations exposed to drought. *Ciência & Saúde Coletiva*, 21(3), pp.671–684. <https://doi.org/10.1590/1413-81232015213.21642015>.
- Simanjuntak, P.P. and Safril, A., 2020. Tren Curah Hujan dan Suhu Udara Ekstrim Masa Depan (Periode 2021-2030) berdasarkan Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 di Kota Palu. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 4(1), pp.1–11. <https://doi.org/10.24198/jiif.v4i1.23846>.
- Surmaini, E., 2016. *Sistim komunikasi dan Diseminasi Prediksi Iklim untuk Adapatasi Pertanian Menghadapi Iklim Ekstrim*. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi.
- Utami, A.W., Jamhari, J. and Hardyastuti, S., 2011. El-Nino, La-Nina, dan Penawaran Pangan di Pulau Jawa, Indonesia. *Jurnal Ekonomi Pembangunan: Kajian Masalah Ekonomi dan Pembangunan*, 12(2), p.257. <https://doi.org/10.23917/jep.v12i2.197>.
- Valin, H., Hertel, T., Bodirsky, B., Hasegawa, T. and Stehfest, E., 2021. Achieving Zero Hunger by 2030 A Review of Quantitative Assessments of Synergies and Tradeoffs amongst the UN Sustainable Development Goals.
- Van Loon, A., 2020. Drought risk reduction for achieving Sustainable Development Goals. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-22385>.
- Wilks, D.S., 1990. Maximum likelihood estimation for the gamma distribution using data containing zeros. *Journal of climate*, pp.1495–1501.
- World Meteorological Organization, 2012. *Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood)*. (WMO-No. 1090). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Zhang, X., Chen, N., Sheng, H., Ip, C., Yang, L., Chen, Y., Sang, Z., Tadesse, T., Lim, T.P.Y., Rajabifard, A., Buetti, C., Zeng, L., Wardlow, B., Wang, S., Tang, S., Xiong, Z., Li, D. and Niyogi, D., 2019. Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals. *Science of The Total Environment*, 693, p.133536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.342>.

## **KAJIAN FAKTOR DOMINAN TERHADAP PENILAIAN KINERJA SISTEM PENYEDIAAN AIR MINUM (SPAM) DI PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT**

Sri Utami Sudiarti dan Satria Utama

Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I

\* sriutamisudiarti@yahoo.co.id

Pemasukan: 28 Juni 2024 Perbaikan: 29 September 2024 Diterima: 9 Desember 2024

### **Intisari**

Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB) memiliki 7 (tujuh) BUMD (Badan Usaha Milik Daerah) mengelola air minum terbagi atas dua pulau yaitu pulau Lombok dan pulau Sumbawa. Kedua pulau tersebut masing-masing memiliki 4 (empat) badan pengelola air minum. Pada penilaian kinerja SPAM berdasarkan PP 122/2015 terdapat empat aspek yang dinilai yaitu aspek keuangan, aspek pelayanan, aspek operasional, dan aspek sumber daya manusia. Kajian ini bertujuan mendapatkan faktor dominan yang berpengaruh terhadap penilaian kinerja SPAM. Metode penelitian kuantitatif yang diaplikasikan pada penelitian ini menggunakan metode *fuzzy cluster means (Fuzzy C-Means)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam rentang waktu 2017 – 2022 kinerja SPAM pulau Lombok yang terdiri dari 4 (empat) BUMD memiliki dua BUMD dengan status sehat dan sedangkan dua lainnya memiliki status kurang sehat. Sementara itu, 4 BUMD di pulau Sumbawa rata-rata kurang sehat. Faktor dominan yang mempengaruhi kinerja BUMD tersebut yaitu aspek operasional dan aspek keuangan dimana pada aspek operasional yang dominan yaitu tingkat kehilangan air pada sistem distribusi air minum. Aspek keuangan yang dominan yaitu likuiditas termasuk didalamnya *cash ratio* dan efektifitas penagihan. Faktor dominan tersebut dari kedelapan BUMD diperoleh nilai yang mempengaruhi nilai kinerja BUMD sehingga masuk dalam kategori sehat, kurang sehat dan sakit. Kajian ini menghasilkan upaya yang perlu dilakukan untuk perbaikan kondisi kinerja BUMD kategori “sakit” dengan mengetahui faktor dominannya.

Kata Kunci: air minum, SPAM, operasional, keuangan, distribusi

### **Latar Belakang**

Air adalah suatu hal yang utama bagi kehidupan dimana semua makhluk hidup memerlukan air. Menurut Widiyanti (2004), sebagian besar tumbuhan dan hewan terbentuk dari air dimana 75% sel tumbuhan mengandung air dan lebih dari 67% sel hewan serta kurang dari 0,5% digunakan untuk kepentingan manusia secara tidak langsung. Air minum merupakan air yang dapat dikonsumsi manusia. Sejalan dengan kemajuan dan peningkatan taraf hidup manusia kebutuhan akan air mengalami peningkatan. Air tawar bersih yang layak minum semakin sulit ditemukan dan air tanah saat ini tidak menjamin sebagai air minum karena mulai

banyak terkontaminasi rembesan dari septictank maupun air permukaan (Soemardji, 1985).

Pengelolaan air minum yang baik dapat diketahui dari kinerja sistem penyediaan air minum dimana dikelola oleh badan usaha daerah sesuai dengan PP 122/2015. Dalam peraturan tersebut menyebutkan penilaian kinerja sistem penyediaan air minum (SPAM) terbagi atas empat aspek yaitu keuangan, pelayanan, operasional dan sumber daya manusia. Dari keempat aspek tersebut telah terbagi bobot di masing-masing aspek dimana terdapat satu aspek yang memiliki nilai bobot dominan yaitu aspek operasional sebesar 35%. Data-data yang diperoleh dari keempat aspek tersebut dikelompokkan dalam bentuk clustering.

Pengelompokan merupakan bagian utama untuk pengenalan pola tanpa pengawasan. Clustering yaitu cara membagi sekumpulan sampel yang tidak berlabel ke dalam beberapa partisi berdasarkan fungsi objektif tertentu yang telah ditentukan sebelumnya, dengan target mengurangi kesamaan antar-partisi dan meningkatkan kesamaan intra-partisi (Jayanth Krishnan & Mitra, 2022).

Kajian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui aspek paling dominan mempengaruhi terhadap kinerja SPAM dengan menggunakan metode *fuzzy cluster-means* (*Fuzzy C-Means*). Penggunaan fuzzy cluster merupakan satu metode yang dipilih dari banyak metode berdasarkan pendekatan jarak pendek, dan salah satu pendekatan yang paling efektif. Karena metode fuzzy menentukan data mana yang termasuk dalam cluster, metode ini sering kali memberikan hasil yang lebih baik daripada metode yang pasti. *Fuzzy C-Mean Cluster* (FCM) adalah metode *fuzzy* yang paling populer. Kesederhanaannya adalah salah satu fitur positif dari metode FCM. Banyak aplikasi yang telah berhasil diimplementasikan dengan menggunakan metode ini. Meskipun metode FCM berkinerja baik dalam banyak kasus, metode ini juga memiliki beberapa kekurangan. Di antara kekurangan ini adalah sensitivitas terhadap inisialisasi pusat cluster dan konvergensi terhadap respon lokal yang optimal (Suganya & Shanthi, 2012).

Ruang lingkup kajian yaitu lokasi penelitian berada di Provinsi NTB dengan badan pengelola berjumlah 7 (tujuh) BUMD dan range data selama 6 (enam) tahun. Kajian ini tidak menganalisis nilai pembobotan pada aspek yang ditinjau tetapi terhadap evaluasi kinerja lima tahun pada badan pengelola tersebut. Manfaat dari penelitian ini agar penilaian kinerja sistem penyediaan air minum dapat dilakukan evaluasi kembali sehingga kinerja pelayanan BUMD dapat ditingkatkan.

### **Metodologi Studi**

Wilayah studi yang dikaji berada di Provinsi Nusa Tenggara Barat dengan menggunakan 7 (tujuh) badan pengelola SPAM ditunjukkan pada Tabel 1.

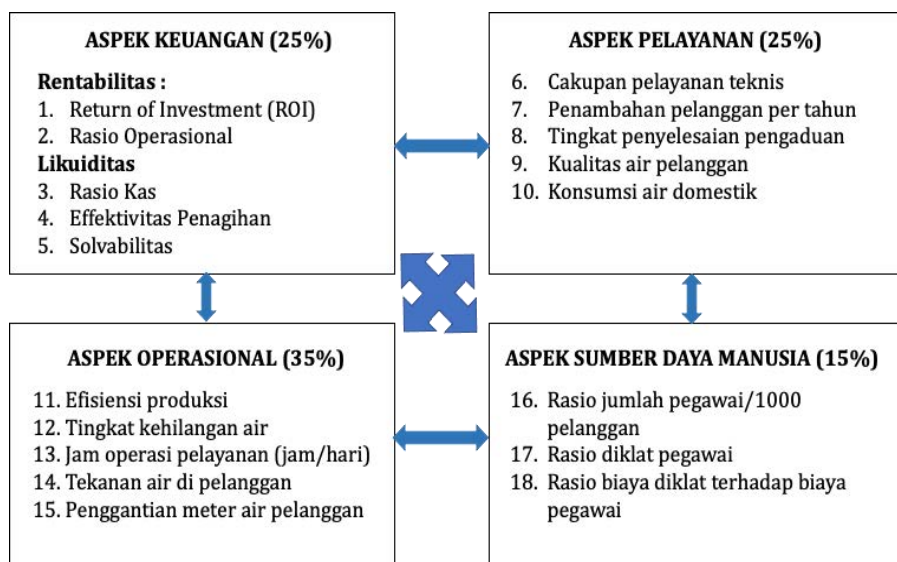
Data-data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder yaitu data kinerja BUMD Provinsi Nusa Tenggara Barat selama lima tahun terhadap empat aspek yang ditinjau. Data-data tersebut dilakukan pengklusteran dengan metode *fuzzy c-means*.

Tabel 1. Lokasi Penelitian

No	BUMD	Kabupaten
1	PT. Air Minum Giri Menang (Perseroda)	Lombok Barat
2	PDAM Tirtha Ardhia Rinjani Tengah	Lombok Tengah
3	PDAM Kabupaten Lombok Timur	Lombok Timur
4	PERUMDA Amerta Dayan	Lombok Utara
5	Perumdam Batulanteh	Sumbawa
6	Perumdam Tirta Rosa	Dompu
7	PDAM Kabupaten Bima	Bima

**Penilaian Kinerja SPAM**

Penilaian kinerja sistem penyediaan air minum (SPAM) didasarkan pada PP 122/2015 yang merupakan penilaian secara kelembagaan BUMD (Badan Usaha Milik Daerah) yang terdiri dari 4 (empat) aspek yaitu aspek keuangan, pelayanan, operasional dan sumber daya manusia. Keempat aspek tersebut digambarkan dalam bagan alir berikut.



Gambar 1. Siklus Indikator Indeks Kinerja berdasarkan PP 122/2015 (Sumber: Direktorat Air Minum, 2021)

Dari gambar diatas terlihat dari keempat aspek tersebut terdapat 18 (delapan belas indikator) dengan nilai bobot masing-masing aspek. Untuk aspek keuangan sebesar 25%, aspek pelayanan 25%, aspek operasional 35% dan aspek sumber daya manusia 15%. Pembobotan tersebut diatas kemudian dilakukan penilaian menjadi 3 (tiga) kategori yaitu

1. Kinerja Sehat, dengan nilai kinerja lebih dari 2,8 (> 2,8)
2. Kinerja Kurang Sehat, dengan nilai kinerja 2,2 sampai dengan 2,8 (2,2 – 2,8).
3. Kinerja Sakit, dengan nilai kinerja kurang dari 2,2 (< 2,2).

Untuk mendapatkan nilai kinerja air minum dilakukan analisis terhadap keempat aspek tersebut dengan nilai indikator tertinggi diberi nilai 5 sesuai rasio masing-masing aspek. Tabel berikut menunjukkan nilai indikator yang menjadi bagian dari keempat aspek tersebut.

Tabel 2. Rasio dan Bobot Kinerja Air Minum

Variabel	Nilai Indikator		
	Rasio	Nilai	Bobot
<b>ASPEK KEUANGAN</b>			<b>0,250</b>
<b>1. Rentabilitas</b>			
- ROE (Pengembalian modal sendiri)	>10 %	5	
Rumus :	7 - <10 %	4	
$\frac{\text{Laba bersih setelah pajak}}{\text{Jumlah equity}} \times 100\%$	3 - <7 %	3	0,055
	0 - <3%	2	
	0,00%	1	
- Ratio Operasi	<0,5	5	
Rumus :	>0,5 -0,65	4	
$\frac{\text{Biaya operasi}}{\text{Pendapatan operasi}}$	>0,65 -0,85	3	0,055
	>0,85 - 1,0	2	
	>1,0	1	
<b>2. Liquiditas</b>			
- Cash Ratio	>1,75 -2,0	5	
Rumus :	>1,50 -1,75	4	
$\frac{\text{Kas} + \text{Setara kas}}{\text{Utang lancar}} \times 100\%$	>1,25 -1,50	3	0,055
	>1,0-1,25	2	
	<= 1,0	1	
- Efektifitas Penagihan	≥90%	5	
Rumus :	85-<90%	4	
$\frac{\text{Jumlah penerimaan rekening air}}{\text{Jumlah rekening air}} \times 100\%$	80-<85%	3	0,055
	75-<80%	2	
	<75%	1	
<b>3. Solvabilitas (Debt ratio/rasio utang)</b>			
	>2,0	5	
Rumus :	>1,7-2,0	4	
$\frac{\text{Jumlah aktiva}}{\text{Jumlah utang}} \times 100\%$	1,3 -1,7	3	0,030
	>1,0 -1,3	2	
	<= 1,0	1	
<b>ASPEK PELAYANAN</b>			<b>0,250</b>
<b>1. Cakupan Pelayanan Teknis</b>			
	> 80 % Terlayani	5	
Rumus :	60 % - <80% Terlayani	4	
$\frac{\text{Jumlah penduduk terlayani}}{\text{Jumlah penduduk}} \times 100\%$	40% - <60% Terlayani	3	0,050
	20% - <40% Terlayani	2	
	<20% Terlayani	1	
<b>2. Pertumbuhan Pelanggan (%/thn)</b>			
	>10 %	5	
	8 -<10%	4	
	6 -<8%	3	0,050
	4-<6%	2	
	<4%	1	
<b>3. Tingkat Penyelesaian Aduan</b>			
	> 80 % Tertangani	5	
Rumus :	60 % - <80% Tertangani	4	
$\frac{\text{Jumlah pengaduan selesai ditangani}}{\text{Jumlah seluruh pengaduan}} \times 100\%$	40% - <60% Tertangani	3	0,025
	20% - <40% Tertangani	2	
	<20% Tertangani	1	
<b>4. Kualitas Air Pelanggan</b>			
	> 80 % (parameter wajib fisik, kimia dan biologi terpenuhi)	5	
	60 % - <80% parameter wajib fisik, kimia dan biologi terpenuhi	4	
$\frac{\text{Jumlah uji yang memenuhi syarat}}{\text{Jumlah yang diuji}} \times 100\%$	40% - <60% parameter wajib fisik, kimia dan biologi terpenuhi)	3	0,075
	20% - <40% (parameter wajib fisik, kimia dan biologi terpenuhi)	2	
	<20% parameter wajib fisik, kimia dan biologi terpenuhi)	1	
<b>5. Konsumsi Air Domestik</b>			
	> 30 m3/bulan	5	
Rumus :	25-<30 m3/bulan	4	
$\frac{\text{Air terjual ke pelanggan domestik}}{\text{Jumlah pelanggan domestik}}$	20 -<25 m3/bulan	3	0,050
	15-<20 m3/bulan	2	
	<15 m3/bulan	1	

Sumber: BPPSPAM, 2010

Tabel 2. Lanjutan

Variabel	Nilai Indikator		
	Rasio	Nilai	Bobot
<b>ASPEK OPERASIONAL</b>			<b>0,350</b>
1. Efisiensi Produksi	> 90%	4	0,070
Rumus :	> 80% - 90%	3	
$\frac{\text{Kapasitas produksi}}{\text{Kapasitas terpasang}} \times 100\%$	> 70% - 80%	2	
	<=70%	1	
2. Tingkat Kehilangan Air	<25 (%)	5	0,070
	>25- 30 (%)	4	
	>30- 35 (%)	3	
	>35- 40 (%)	2	
	>40 (%)	1	
3. Jam Operasi Layanan	Air mengalir selama 21-24 jam	5	0,080
Rumus :	Air Mengalir selama 18 - 21 jam	4	
$\frac{\text{Waktu distribusi air ke pelanggan}}{\text{Periode evaluasi}} \times 100\%$	Air Mengalir selama 16 - 18 jam	3	
	Air Mengalir selama 12 - 16 jam	2	
	Air Mengalir kurang dari 12 jam	1	
4. Tekanan Air Pada Sambungan Pelanggan	$\geq 80$ (%)	5	0,065
Rumus :	60 - 80 (%)	4	
$\frac{\text{Jumlah pelanggan terlayani}}{\text{Jumlah pelanggan}} \times 100\%$	40 - 60 (%)	3	
	20 - 40 (%)	2	
	< 20 (%)	1	
5. Pergantian/Kalibrasi Meter Air Pelanggan	lebih dari 20 % ditera	5	0,065
Rumus :	Antara 15- <20%	4	
$\frac{\text{Jumlah meter air pelanggan yang diganti}}{\text{Jumlah Pelanggan}} \times 100\%$	Antara 10 – <15 % ditera	3	
	Antara 5 – <10 % Ditera	2	
	Kurang dari 5 % Ditera	1	
<b>ASPEK SUMBER DAYA MANUSIA</b>			<b>0,150</b>
1. Ratio Pegawai Terhadap Pelanggan	<= 8	5	0,070
Rumus :	> 8 - 11	4	
$\frac{\text{Jumlah pegawai}}{\text{Jumlah pelanggan}/1000}$	> 11 - 15	3	
	> 15 - 18	2	
	> 18	1	
2. Ratio Diklat Pegawai (Peningkatan Kompetensi)	$\geq 80$ (%)	5	0,040
Rumus :	60 - 80 (%)	4	
$\frac{\text{Jumlah pegawai yang mengikuti diklat}}{\text{Jumlah pegawai}} \times 100\%$	40 - 60 (%)	3	
	20 - 40 (%)	2	
	< 20 (%)	1	
3. Ratio Biaya Diklat	$\geq 10$ (%)	5	0,040
Rumus :	7,5 - 10 (%)	4	
$\frac{\text{Jumlah beban diklat}}{\text{Jumlah beban pegawai}} \times 100\%$	5 – 7,5 (%)	3	
	2,5 - 5 (%)	2	
	< 2,5 (%)	1	

Sumber: BPPSPAM, 2010

**Fuzzy C-Means (FCM)**

FCM digunakan untuk mengelompokan data dimana dataset yang telah diidentifikasi dibagi menjadi beberapa kluster berdasarkan prinsip fuzzy C-partition. Metode FCM pertama kali diperkenalkan oleh Ruspini yang kemudian dikembangkan dan dibuat oleh Dunn dan Bezdek. Dalam metode ini, setiap titik dalam dataset adalah bagian dari konstanta kluster dari nilai derajat

keanggotaannya. Misal titik data yang dekat dengan pusat klaster memiliki nilai keanggotaan (derajat keanggotaan) tertinggi pada klaster tersebut, dan titik data yang jauh dari pusat klaster memiliki nilai keanggotaan terendah. Secara umum, memasukkan setiap titik data ke dalam salah satu cluster adalah tujuan penting dari FCM. Hal ini dilakukan dengan menggunakan metode FCM untuk memisahkan dataset pelatihan ke dalam beberapa subset (fungsi keanggotaan Gaussian) dengan berbagai pusat (Hashemi et.al, 2023).

### Hasil Studi dan Pembahasan

Data hasil analisis kinerja BUMD tahun 2022 dan tahun 2023 dari tujuh BUMD yang ada di Provinsi Nusa Tenggara Barat dari empat aspek seperti pada Tabel berikut. Analisis kinerja BUMD tahun 2022 dan 2023 terlihat Tabel 3 – 6 dalam aspek keuangan, pelayanan, operasional dan sumber daya manusia yang secara rerata mengalami penurunan dari tahun 2017 – 2022. Tabel 7 menunjukkan satu BUMD yaitu PT. Air Minum Giri Menang dan Perumda Amerta Dayan Gunung masuk kategori sehat selama 6 (enam) tahun, dua BUMD kategori sehat selama dua tahun. Kategori kurang sehat selama tiga tahun (2020-2022) yaitu Perumda Batulanteh sedangkan dua BUMD sakit selama tiga tahun berturut-turut yaitu Perumda Tirta Rora dan PDAM Kabupaten Bima (Kinerja BUMD, 2023).

Tabel 3. Kinerja Keuangan

No	Nama PDAM	Tahun					
		2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	PT. Air Minum Giri Menang (Perseroda)	1,030	1,030	1,030	1,030	1,030	1,150
2	PDAM Tirta Ardhia Rinjani	0,920	0,865	0,920	0,700	0,810	0,870
3	PDAM Kabupaten Lombok Timur	0,700	0,920	0,920	0,700	0,920	0,930
4	Perumda Amerta Dayan Gunung	1,030	0,700	0,865	0,865	0,920	0,930
5	Perumda Batulanteh	0,700	0,975	0,865	0,590	0,920	0,610
6	Perumdam Tirta Rora	0,480	0,535	0,700	0,480	0,370	0,490
7	PDAM Kabupaten Bima	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,390

Sumber: Analisis Kinerja BUMD, 2022/2023

Tabel 4. Kinerja Pelayanan

No	Nama PDAM	Tahun					
		2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	PT. Air Minum Giri Menang (Perseroda)	0,950	0,950	0,900	0,700	0,725	0,800
2	PDAM Tirta Ardhia Rinjani	0,800	0,450	0,450	0,000	0,450	0,400
3	PDAM Kabupaten Lombok Timur	0,750	0,650	0,525	0,450	0,600	0,450
4	Perumda Amerta Dayan Gunung	0,700	0,600	0,650	0,700	0,550	0,600
5	Perumda Batulanteh	0,850	0,500	0,500	0,500	0,450	0,400
6	Perumdam Tirta Rora	0,450	0,450	0,450	0,600	0,400	0,400
7	PDAM Kabupaten Bima	0,325	0,325	0,475	0,425	0,400	0,350

Sumber: Analisis Kinerja BUMD, 2022/2023

**Tabel 5. Kinerja Operasional**

No	Nama PDAM	Tahun					
		2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	PT. Air Minum Giri Menang (Perseroda)	1,410	1,275	1,340	1,340	1,340	1,410
2	PDAM Tirtha Ardhia Rinjani	1,010	1,080	1,065	0,865	1,135	1,070
3	PDAM Kabupaten Lombok Timur	1,205	1,065	0,995	0,950	1,145	1,210
4	Perumda Amerta Dayan Gunung	1,340	1,275	1,120	1,060	1,000	1,000
5	Perumdam Batulanteh	1,275	1,270	1,350	1,340	1,060	1,010
6	Perumda Tirta Rora	0,930	0,780	0,860	0,650	0,660	0,660
7	PDAM Kabupaten Bima	0,430	0,430	0,430	0,350	0,350	0,430

Sumber: Analisis Kinerja BUMD, 2022/2023

**Tabel 6. Kinerja Sumber Daya Manusia**

No	Nama PDAM	Tahun					
		2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	PT. Air Minum Giri Menang (Perseroda)	0,590	0,590	0,630	0,630	0,630	0,670
2	PDAM Tirtha Ardhia Rinjani	0,430	0,470	0,430	0,430	0,430	0,510
3	PDAM Kabupaten Lombok Timur	0,470	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430
4	Perumda Amerta Dayan Gunung	0,470	0,430	0,510	0,430	0,470	0,430
5	Perumdam Batulanteh	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	0,390
6	Perumda Tirta Rora	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430
7	PDAM Kabupaten Bima	0,150	0,150	0,430	0,430	0,430	0,430

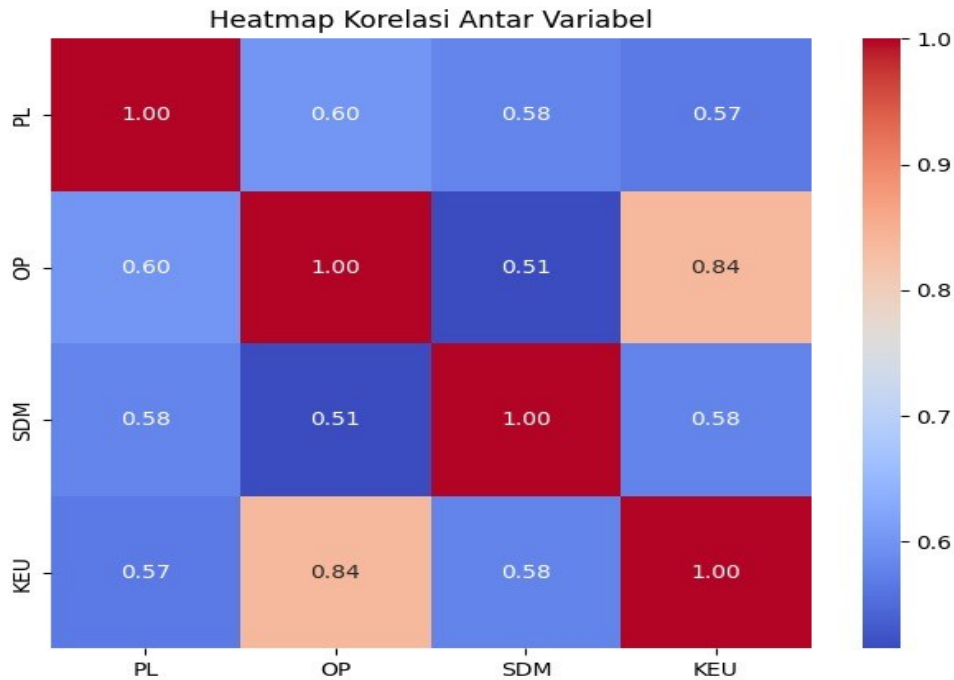
Sumber: Analisis Kinerja BUMD, 2022/2023

**Tabel 7. Penilaian Kinerja BUMD**

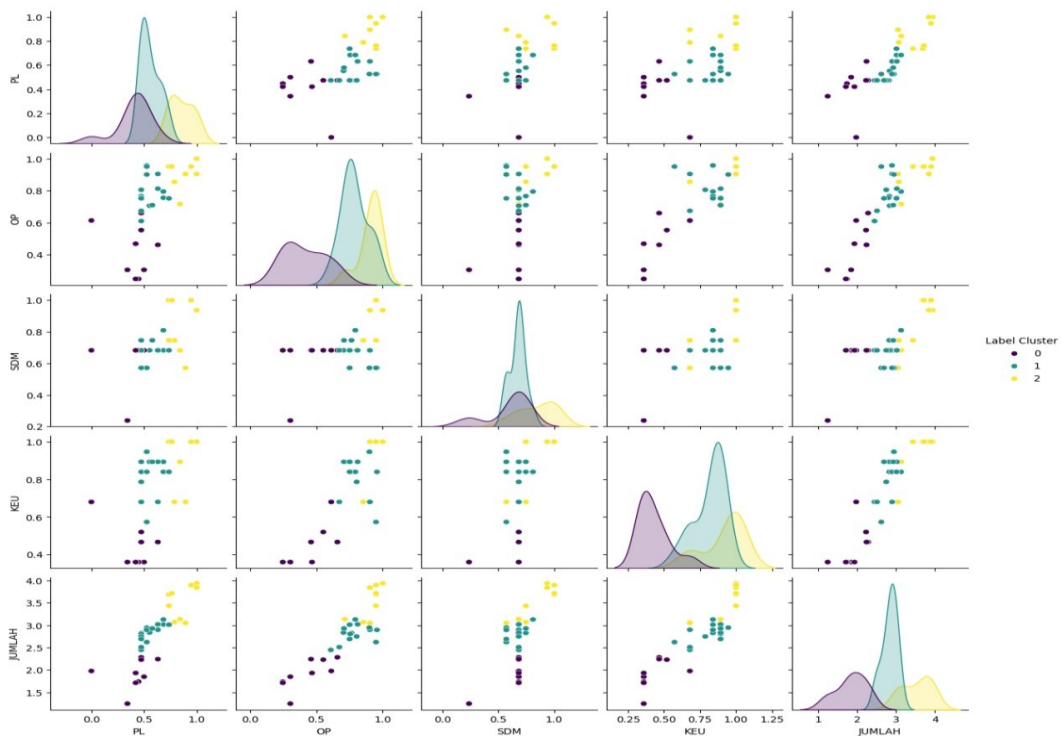
No	Nama PDAM	Tahun					
		2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	PT. Air Minum Giri Menang (Perseroda)	3,980	3,845	3,900	3,700	3,725	4,030
		Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat
2	PDAM Tirtha Ardhia Rinjani	3,160	2,865	2,865	2,420	2,825	2,850
		Sehat	Sehat	Sehat	Kurang Sehat	Sehat	Sehat
3	PDAM Kabupaten Lombok Timur	3,125	3,065	2,870	2,530	3,095	3,020
		Sehat	Sehat	Sehat	Kurang Sehat	Sehat	Sehat
4	Perumda Amerta Dayan Gunung	3,540	3,005	3,145	3,055	2,940	2,960
		Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat
5	Perumda Batulanteh	3,185	3,105	3,075	2,790	2,790	2,410
		Sehat	Sehat	Sehat	Kurang Sehat	Kurang Sehat	Kurang sehat
6	Perumdam Tirta Rora	2,290	2,195	2,440	2,160	1,860	1,980
		Kurang Sehat	Sakit	Kurang Sehat	Sakit	Sakit	Sakit
7	PDAM Kabupaten Bima	1,275	1,275	1,705	1,575	1,550	1,600
		Sakit	Sakit	Sakit	Sakit	Sakit	Sakit

Sumber: Analisis Kinerja BUMD, 2022/2023

Pembagian cluster didasarkan pada kondisi kategori penilaian yaitu sehat, kurang sehat dan sakit. Hasil analisis cluster keempat aspek tersebut dapat dilihat pada tabel dan grafik berikut yang dilakukan analisis dengan menggunakan *fuzzy c-means*.



Gambar 2. Grafik Hubungan antar Variabel/Aspek



Gambar 3. Korelasi antar Keempat Aspek Kinerja SPAM

Gambar 2 menunjukkan korelasi antar keempat aspek dimana nilai pusat cluster yaitu satu yang artinya jika nilai aspek mendekati satu maka kategori sehat begitu juga sebaliknya apabila nilai kurang dari satu termasuk kategori kurang sehat dan sakit. Sedangkan Gambar 3 menunjukkan korelasi antar keempat aspek yang menjadi bagian dari penilaian kinerja sistem penyediaan air minum. Terlihat pada cluster tersebut arah nilai operasional dan keuangan lebih rapat sebaran dan merata mendekati nilai satu sesuai nilai label cluster.

Tabel 8 berikut menunjukkan nilai korelasi keempat aspek tersebut yang terbagi atas tiga cluster yaitu sehat, kurang sehat dan sakit. Cluster pertama dengan kategori “Sehat” memiliki nilai tertinggi di semua aspek, menunjukkan bahwa entitas dalam cluster ini memiliki pelayanan, operasional, SDM, dan keuangan yang sangat baik. Cluster kedua, yang dikategorikan "Kurang Sehat," memiliki nilai sedang, menunjukkan performa yang cukup baik namun masih perlu peningkatan. Cluster ketiga, dikategorikan "Sakit," memiliki nilai terendah di semua variabel, menunjukkan bahwa entitas dalam cluster ini memiliki kinerja yang kurang baik di semua aspek.

Tabel 8. Nilai Clustering Fuzzy C-Means

PL	OP	SDM	KEU	Kategori
0,852	0,927	0,908	0,963	Sehat
0,563	0,782	0,671	0,817	Kurang Sehat
0,439	0,388	0,603	0,408	Sakit

Sumber: Analisa,2024

Tabel 8 dan gambar 2 diatas menunjukkan bahwa faktor dominan yang mempengaruhi penilaian kinerja sistem penyediaan air minum adalah aspek keuangan dan aspek operasional. Setelah dilakukan analisis terhadap kedua aspek tersebut maka indikator yang mempengaruhi aspek keuangan yaitu likuiditas yang didalamnya terdapat *cash ratio* dan efektifitas penagihan. Sedangkan aspek operasional indikator yang dominan yaitu tingkat kehilangan air. Tingkat kebocoran air dari ketujuh BUMD yang menjadi locus kajian lebih dari 20% bahkan ada tingkat kebocoran air lebih dari 50% yaitu sebesar 64% pada BUMD kategori sakit. Untuk BUMD kategori sehat dan kurang sehat rerata tingkat kehilangan air 25,93% yang mengindikasikan bahwa kehilangan air mempengaruhi kinerja operasional dari kelembagaan BUMD tersebut. BUMD dengan kategori kinerja “Sakit” diperlukan beberapa upaya agar kinerja meningkat di tahun selanjutnya.

Upaya perbaikan kinerja dilihat dari nilai yang dominan rendah dari BUMD tersebut sehingga secara bertahap dapat dilakukan perbaikan. Secara garis besar upaya yang diperlukan dalam meningkatkan kinerja BUMD antara lain:

1. Melakukan penambahan debit sumber air khususnya saat musim kemarau;
2. Melakukan pemeliharaan rutin dan berkala jaringan distribusi utama dan sambungan distribusi pelanggan termasuk juga pada meter induk dan meter air konsumen;

3. Pencatatan dan penggantian meter air yang akurat, kalibrasi meter air dan meter induk serta sambungan pelanggan/konsumen;
4. Melakukan pengukuran tekanan air pada sambungan pelanggan sehingga tekanan distribusi di sambungan pelanggan diketahui;
5. Kualitas air ditingkatkan dengan rutin melakukan pengujian sampel air dan penggunaan penjernihan air sesuai baku mutu;
6. Penggunaan pompa diminimalkan sehingga biaya operasional dapat ditekan;
7. Sumber daya manusia BUMD lebih diperhatikan dan mengalokasikan anggaran untuk peningkatan kompetensi pegawai.

Upaya tersebut diatas merupakan salahsatu bagian menuju kondisi kinerja BUMD menjadi setingkat lebih baik dari tahun sebelumnya. Kondisi ini untuk dua BUMD selama enam tahun kinerja “sakit” secara umum permasalahan sama sehingga upaya yang dilakukan juga tidak berbeda jauh. Dari poin 1-7 upaya diatas merupakan bagian dari permasalahan dua BUMD yaitu Perumdan Tirta Rora dan PDAM Kabupaten Bima sehingga memiliki kinerja “sakit”.

Kajian ini memberikan masukan terhadap peningkatan kinerja kelembagaan BUMD khususnya dilokasi studi dimana kinerja BUMD kategori Sehat jika keempat aspek tersebut diatas memiliki nilai diatas satu. Kinerja dapat dipertahankan jika nilai aspek keuangan dan aspek operasional “Sehat” dimana kendala utama dalam BUMD yaitu keuangan yang kurang memenuhi standar dan aspek operasional dengan tingkat kehilangan air yang masih tinggi. Tetapi dalam kajian ini masih belum dilakukan kajian detail timbal balik terhadap aspek teknis yaitu ketersediaan air di sumber yang menjadi bagian dari pengelolaan air minum. Dari hal tersebut maka diperlukan kajian lanjutan khususnya dengan memasukan aspek teknis pada kinerja sistem penyediaan air minum menjadi satu kesatuan sistem penyediaan air minum. Artinya jika aspek operasional kurang atau rendah apakah akibat sumber air yang menjadi suplay air minum kurang atau ada faktor lain. Ini perlu dilakukan kajian lanjutan untuk membuktikan asumsi tersebut.

## **Kesimpulan dan Saran**

### **Kesimpulan**

Kesimpulan hasil analisis sebagai berikut:

1. Ketujuh BUMD di provinsi Nusa Tenggara Barat masuk dalam kategori sehat yaitu 4 (empat) BUMD, satu BUMD kategori kurang sehat dan dua BUMD kategori sakit.
2. Aspek keuangan khususnya cash ratio dan efektifitas penagihan menjadi salah satu faktor dominan yang mempengaruhi dalam penilaian kinerja sistem penyediaan air minum
3. Aspek operasional dengan tingkat kehilangan air yang cukup tinggi pada dua BUMD kategori “Sakit” diatas 60% diatas standar kehilangan air yaitu 20%.

## Saran

Berdasarkan hasil kajian diatas antara lain:

1. Peneliti: kajian lanjutan untuk penilaian kinerja sistem penyediaan air minum yang tidak hanya secara non teknis tetapi juga memasukan aspek teknis. Aspek teknis yang perlu ditinjau yaitu ketersediaan air untuk air minum yang menjadi bagian dari pengelolaan BUMD tersebut.
2. Pemerintah: Diperlukan regulasi yang jelas dalam hal pengelolaan keberlanjutan air minum dalam hal ini stakeholder yang berperan dalam operasi dan pemeliharaan terhadap infrastruktur air minum tersebut. Hal ini diperlukan agar keberlanjutan sistem penyediaan air minum tetap berjalan dalam memenuhi kebutuhan air minum masyarakat.

## Daftar Referensi

- Direktorat Air Minum, Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, (2023). Executive Summary Buku Kinerja BUMD Air Minum Wilayah IV.
- Hashemi, Seyed Emadedin, Gholian-Jouybari, Fatemeh, Hajiaghaei-Keshteli, Mostafa, (2023). A fuzzy C-means algorithm for optimizing data clustering, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120377>
- Peraturan Pemerintah No. 122 tahun 2015 tentang Sistem Penyediaan Air Minum, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Peraturan Pemerintah No. 16 tahun 2005 tentang Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum.
- Jayanth Krishnan, K., Mitra, Kishalay., (2022). A modified Kohonen map algorithm for clustering time series data. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117249>
- Suganya, R., Shanthi, R., (2012). Fuzzy C- Means Algorithm- A Review, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012 1, ISSN 2250-3153.
- Soemardji, J., (1985). Pembuangan Kotoran dan Air Limbah. Proyek Pengembangan Pendidikan Tenaga Sanitasi Pusat. Departemen Kesehatan. Jakarta

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

## **ANALISIS BANGUNAN PENGAMAN PANTAI MENGUNAKAN KUBUS BETON DI PANTAI KERAYA KALIMANTAN TENGAH**

Alton S. Ardi\*, I Putu Hartawan, M. Hendro Setiawan,  
Rizky Dwiyan Mahardhika, dan Sudarto

Balai Teknik Pantai, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

\*altonsardi@pu.go.id

Pemasukan: 28 Juni 2024 Perbaikan: 30 September 2024 Diterima: 9 Desember 2024

### **Intisari**

Pantai Keraya yang terletak di Kabupaten Kotawaringin Barat Provinsi Kalimantan Tengah memiliki permasalahan yaitu kemunduran garis pantai berkisar 5 – 10 m dalam kurun waktu 14 tahun terakhir akibat erosi. Penanganan erosi dilakukan dengan cara pembangunan pengaman pantai dengan menggunakan desain bangunan tipe pemecah gelombang dan revetment, untuk menghasilkan bangunan yang handal dibutuhkan identifikasi lapangan berupa pengumpulan data primer yang digunakan dalam analisis teknis sebagai dasar desain. Berdasarkan data model ERA-5, kondisi ekstrim kala ulang 100 tahun saat musim barat diperoleh gelombang signifikan ( $H_s$ ) sebesar 2,717 m dengan periode 6,78 detik serta kecepatan angin 14,12 m/detik. Penjalaran gelombang dari laut dalam ke lokasi kajian dimodelkan dengan menggunakan model numerik dan didapatkan gelombang signifikan ( $H_s$ ) sebesar 0,40 – 0,51 m dengan periode 3,64 detik untuk masing – masing lokasi rencana bangunan. Untuk meningkatkan nilai keamanan bangunan, digunakan  $1,37H_s$  untuk perhitungan gelombang desain ( $H_d$ ) sehingga diperoleh nilai untuk alternatif pemecah gelombang sebesar 0,70 m dan revetment sebesar 0,55 m. Dari hasil kajian analisis data di Pantai Keraya didapat 2 alternatif perencanaan desain bangunan pengaman pantai yang dapat digunakan sebagai bentuk penanganan permasalahan erosi yaitu desain revetment dengan elevasi struktur +2,50 m dari MSL 0 serta berat armor kubus lapisan primer 150 kg dan alternatif lainnya yaitu desain bangunan pemecah gelombang pada bagian kepala dengan elevasi struktur + 2,20 m dari MSL 0 dan berat armor kubus lapisan primer 150 kg serta pada bagian badan dengan elevasi struktur + 2,20 m dari MSL 0 dan berat armor kubus lapisan primer 150 kg.

Kata Kunci: Pantai Keraya, Erosi, Kubus Beton, Revetment, Pemecah Gelombang

### **Latar Belakang**

Pantai Keraya yang terletak di Kabupaten Kotawaringin Barat Provinsi Kalimantan Tengah memiliki permasalahan pantai yaitu erosi dan terjadinya gelombang tinggi pada musim barat yang mengakibatkan kemunduran garis pantai, kerusakan permukiman dan prasarana jalan yang menghubungkan dua desa dan kecamatan. Berdasarkan informasi dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR)

Kab. Kotawaringin Barat dan hasil identifikasi lapangan, diketahui bahwa permasalahan erosi pantai di Pantai Keraya sudah cukup lama terjadi dan sudah dilakukan pembangunan bangunan pengaman pantai berupa bangunan pemecah gelombang (*breakwater*) sepanjang 126,4 m yang dibangun secara bertahap dari tahun 2015 hingga 2020. Selain bangunan tipe pemecah gelombang (*breakwater*), sebagai antisipasi kejadian erosi, dilakukan tindak darurat penanganan erosi yang terjadi pada Tahun 2019 dengan pemasangan karung berisikan pasir (*geobag*) sepanjang 300 m. Pada Tahun 2023.

Erosi pantai merupakan perubahan dataran pantai yang menyebabkan mundurnya garis pantai (Bird 2008; Ongkosongo 2010). Faktor – faktor yang mempengaruhi erosi pantai adalah: 1) faktor klimatologi seperti perubahan iklim (Day dkk. 2008), badai (Parvin dkk. 2008), gelombang (Bird 2008; Marfai dkk. 2008a; Day dkk. 2008), peningkatan muka air laut (Day dkk. 2008), perpindahan sudut datang gelombang, pasang surut, dan ketidakseimbangan neraca sedimen (Bird 2008). 2) faktor tektonik, seperti: *uplift* dan *subsidence*; serta 3) faktor perilaku manusia yang mempercepat perubahan lingkungan (Marfai dan King 2008; Parvin dkk. 2008; Day dkk. 2008; Kulkarni dkk. 2010; Marshall dkk. 2011; Ward dkk. 2011).

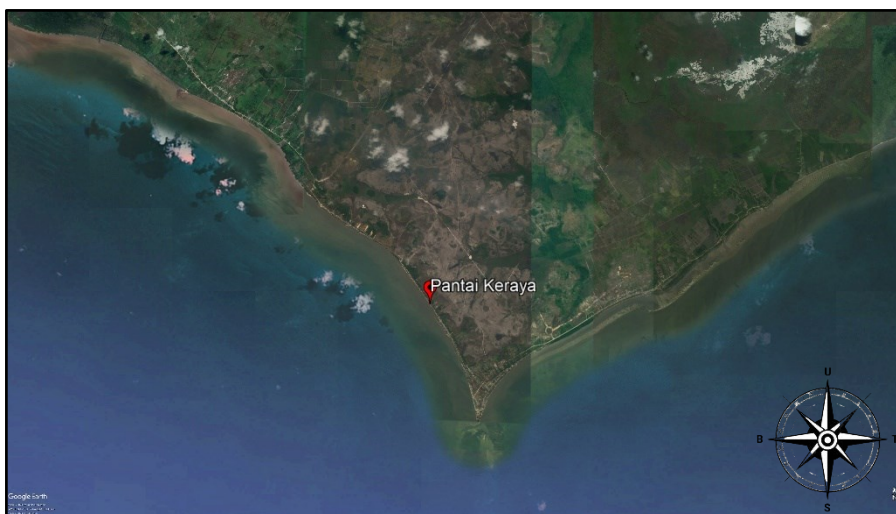
Indikator pantai mengalami erosi, menurut Bird (2008) antara lain 1) pantai berbentuk cekung dengan tersingkapnya batuan dan lahan berlumpur di pantai, 2) tampak material batuan penyusun pantai belakang, dan 3) kenampakan zona vegetasi pantai terpotong erosi. Dalam menangani permasalahan pada pantai ada beberapa hal yang dapat dilakukan seperti: 1) memperkuat/melindungi pantai agar mampu menahan serangan gelombang, 2) mengubah laju transpor sedimen sepanjang pantai, 3) mengurangi energi gelombang sampai ke pantai dan 4) reklamasi dengan menambah suplai sedimen ke pantai atau dengan cara lain (Triatmodjo, 2020). Sedangkan menurut (CERC, 1984) pada prinsipnya terdapat dua tipe bangunan pengendali erosi pantai yaitu struktur yang mampu menjadi pelindung lahan yang berada dibelakang pantai seperti *revetment* dan struktur yang berfungsi sebagai penangkap dan penahan pasir seperti *groin*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui alternatif desain pengaman pantai dengan menggunakan material armor kubus beton yang mampu menanganani permasalahan erosi pada Pantai Keraya, Kab. Kotawaringin Barat.

### Metodologi Studi

Penelitian ini dilakukan di Pantai Keraya, Kabupaten Kotawaringin Barat, Provinsi Kalimantan Tengah (Gambar 1). Panjang pantai yang menjadi lokasi studi memiliki panjang  $\pm 750$  m.

Data-data yang digunakan di dalam analisis ini merupakan data primer (topografi dan batimetri) yang berasal dari hasil survei dan pengukuran lapangan yang dilaksanakan serta data sekunder meliputi data peramalan pasang surut diperoleh dari model global pasang surut Naotide selama 20 tahun, data iklim gelombang yang diperoleh dari model ERA5 memiliki resolusi data  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  dengan rentang waktu dari Januari 1979 – Juni 2022. Untuk menentukan gelombang desain menggunakan *software* MIKE21 model *spectral wave*, sedangkan dalam perhitungan struktur menggunakan persamaan Hudson.



**Gambar 1.** Lokasi penelitian Pantai Keraya (sumber: Google Earth, 2024)

Untuk mendapatkan desain bangunan pengaman pantai yang paling optimal, dibutuhkan beberapa parameter desain seperti elevasi muka air rencana, elevasi dan lebar puncak struktur, tebal lapis lindung struktur, berat dan dimensi armor untuk lapis lindung serta pelindung kaki struktur. Pemilihan jenis struktur atau tipe armor harus mempertimbangkan aspek-aspek teknis seperti ketersediaan material, durabilitas material armor, kestabilan struktur, kemudahan dalam pelaksanaan konstruksi, dan biaya konstruksi yang ekonomis.

Berikut perhitungan parameter – parameter desain yang digunakan dalam perhitungan dimensi struktur :

a. Penentuan Gelombang Desain

Bangunan pengaman pantai yang direncanakan pada Pantai Keraya adalah tipe fleksibel, maka untuk gelombang desain ( $H_d$ ) dapat menggunakan rumus seperti dibawah:

$$H_D = H_5 = 1,37 \times H_S \tag{1}$$

b. Perhitungan Elevasi Muka Air Rencana

Elevasi muka air rencana (DWL) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$DWL = MHWL/HWS + SLR + S_w \tag{2}$$

Dengan keterangan:

- $DWL$  : Elevasi muka air rencana (m)
- $MHWL$  : Elevasi muka air laut tertinggi rerata (m)
- $HWS$  : Elevasi Pasang tinggi yang terjadi pada awal dan pertengahan bulan (m)
- $SLR$  : kenaikan muka air akibat pemanasan global (m)
- $S_w$  : kenaikan muka air laut akibat gelombang (m)

c. Perhitungan Elevasi Puncak Struktur

Elevasi puncak struktur dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

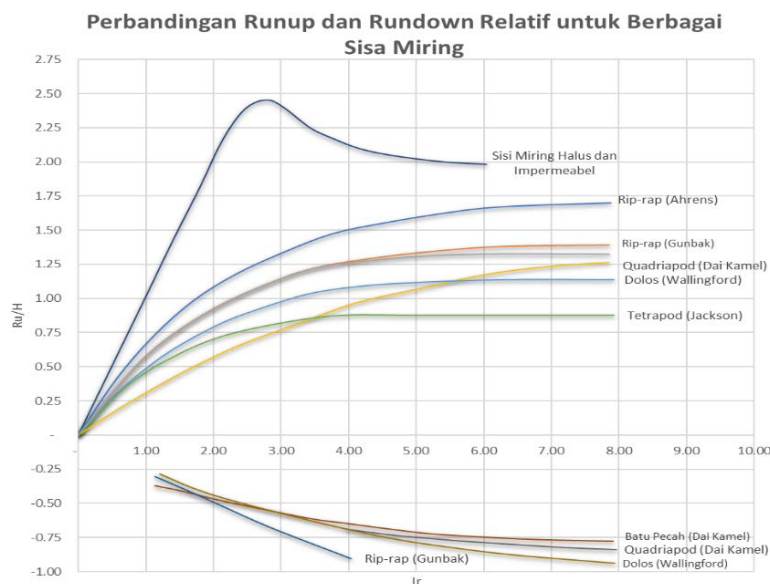
$$Elevasi\ Puncak = DWL + Ru + Freeboard \tag{3}$$

$$\frac{Ru}{H} = F(Ir) \tag{4}$$

$$Ir = \frac{\tan\theta}{\left(\frac{H}{1,56T^2}\right)^{0,5}} \tag{5}$$

Dengan keterangan:

- $Ir$  : bilangan irribaren
- $\theta$  : kemiringan struktur
- $H$  : tinggi gelombang desain (m)
- $T$  : periode gelombang desain (m)
- $Ru$  : tinggi rayapan gelombang (m)



Gambar 2. Grafik hubungan run-up dengan tinggi gelombang

d. Perhitungan Berat Armor

Untuk menghitung berat armor dapat menggunakan formula empiris Hudson seperti berikut:

$$W = \frac{W_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot\theta} = \frac{\rho_r H^3}{K_D \left(\frac{\rho_r}{\rho_{air\ laut}} - 1\right)^3 \cot\theta} \tag{6}$$

Dengan keterangan:

- $W$  : berat armor (kg)
- $H$  : tinggi gelombang desain (m)
- $\rho_r$  : massa jenis armor ( $kg/m^3$ )
- $\rho_{air\ laut}$  : massa jenis air laut ( $kg/m^3$ )
- $Cot\theta$  : kemiringan struktur
- $K_D$  : koefisien stabilitas armor yang digunakan

**Tabel 1.** Koefisien stabilitas ( $K_D$ ) untuk berbagai jenis butir

Lapis Lindung	n	Penempatan	Lengan Bangunan		Kepala Bangunan		Kemiringan
			KD		KD		Cot $\theta$
			Gel. Pecah	Gel. Tidak Pecah	Gel. Pecah	Gel. Tidak Pecah	
<b>Batu Pecah</b>							
- Bulat Halus	2	Acak	1,2	2,4	1,1	1,9	1,5-3,0
- Bulat Halus	>3	Acak	1,6	3,2	1,4	2,3	*2
- Bersudut Kasar	1	Acak	*1	2,9	*1	2,3	*2
					1,9	3,2	1,5
- Bersudut Kasar	2	Acak	2,0	4,0	1,6	2,8	2,0
					1,3	2,3	3,0
- Bersudut Kasar	>3	Acak	2,2	4,5	2,1	4,2	*2
- Bersudut Kasar	2	Khusus	5,8	7,0	5,3	6,4	*2
		*3					
- Paralelepipedum	2	Khusus	7,0-20,0	8,5-24,0	-	-	
- Tetrapod dan					5,0	6,0	1,5
Quadripod	2	Acak	7,0	8,0	4,5	5,5	2,0
					3,5	4,0	3,0
					8,3	9,0	1,5
- Tribar	2	Acak	9,0	10,0	7,8	8,5	2,0
					6,0	6,5	3,0
- Dolos	2	Acak	15,8	31,8	8,0	16,0	2,0
					7,0	14,0	3,0
- Kubus dimodifikasi	2	Acak	6,5	7,5	-	5,0	*2
- Hexapod	2	Acak	8,0	9,5	5,0	7,0	*2
- Tribar	1	Seragam	12,0	15,0	7,5	9,5	*2
- Batu Pecah ( $K_{RR}$ ) (graded angular)	-	Acak	2,2	2,5	-	-	

e. Perhitungan Lebar Puncak dan tebal lapis lindung Struktur

Lebar puncak pemecah gelombang tergantung beberapa batasan yang harus dipertimbangkan antara lain, limpasan gelombang dan keperluan operasi peralatan pada saat pembangunan dan perawatan. Untuk pertimbangan akibat *overtopping*, disyaratkan lebar puncak struktur minimal sama dengan lebar 3 butir unit armor yang disusun berdampingan ( $n_{\text{minimum}} = 3$ ). Sementara untuk tebal lapis lindung menggunakan  $n = 2$ . Perhitungan lebar puncak dan tebal lapis armor diperoleh dari persamaan berikut.

$$B = nk_{\Delta} \left[ \frac{W}{\rho_r} \right]^{1/3} \tag{7}$$

Dengan keterangan:

$B$  = lebar puncak/tebal lapis lindung (m)

$n$  = jumlah butir

$K_{\Delta}$  = koefisien lapis armor

$W$  = berat unit armor (kg)

$\rho_r$  = massa jenis armor ( $\text{kg/m}^3$ )

**Tabel 2.** Koefisien Lapis Armor ( $K_{\Delta}$ )

Batu Pelindung	n	Penempatan	Koef. Lapis ( $k_{\Delta}$ )	Porositas P (%)
Batu alam (halus)	2	acak	1,02	38
Batu alam (kasar)	2	acak	1,15	37
Batu alam (kasar)	>3	acak	1,10	40
Kubus	2	acak	1,10	47
Tetrapod	2	acak	1,04	50
Quadripod	2	acak	0,95	49
Hexapod	2	acak	1,15	47
Tribard	2	acak	1,02	54
Dolos	2	acak	1,00	63
Tribar	2	Seragam	1,13	47
Batu alam	1	acak	1,10	37

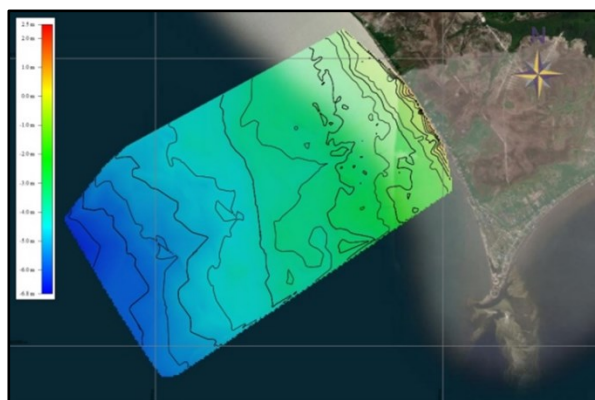
f. Perhitungan Pelindung Kaki Struktur (*Toe Protection*)

Berat batu pelindung kaki struktur (*toe protection*) dapat ditentukan dengan nilai berkisar minimal setengah dari berat armor lapis lindung primer.

**Hasil Studi dan Pembahasan**

**Batimteri dan Topografi**

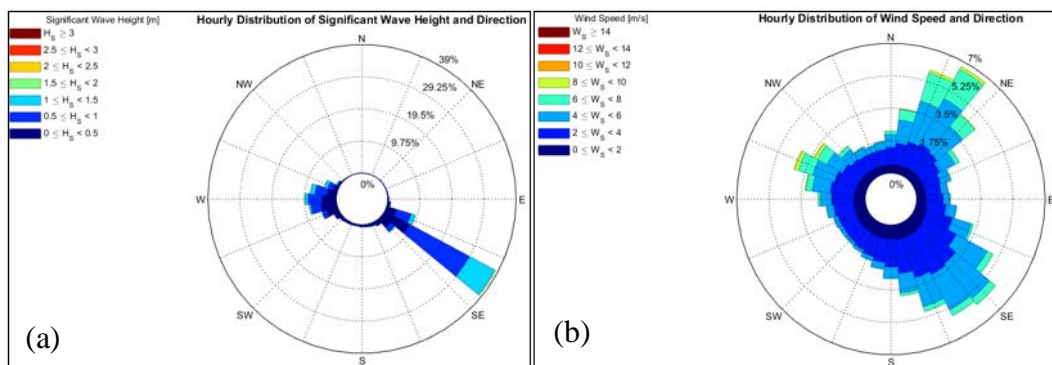
Klasifikasi kelas kemiringan profil Pantai Keraya berdasarkan data hasil pengukuran topografi dan batimetri yang dilakukan adalah kelas I dengan kategori datar dengan kemiringan pantai ( $S$ )  $\pm 0.001$  (Zuidam, 1985). Berdasarkan hasil peta kontur diketahui perairan Pantai Keraya mempunyai kemiringan profil pantai datar hingga jarak 6,3 km dari garis pantai dengan kedalamannya sekitar – 6,5 m dari MSL.



**Gambar 3.** Peta Batimetri Pantai Keraya

**Gelombang dan Angin**

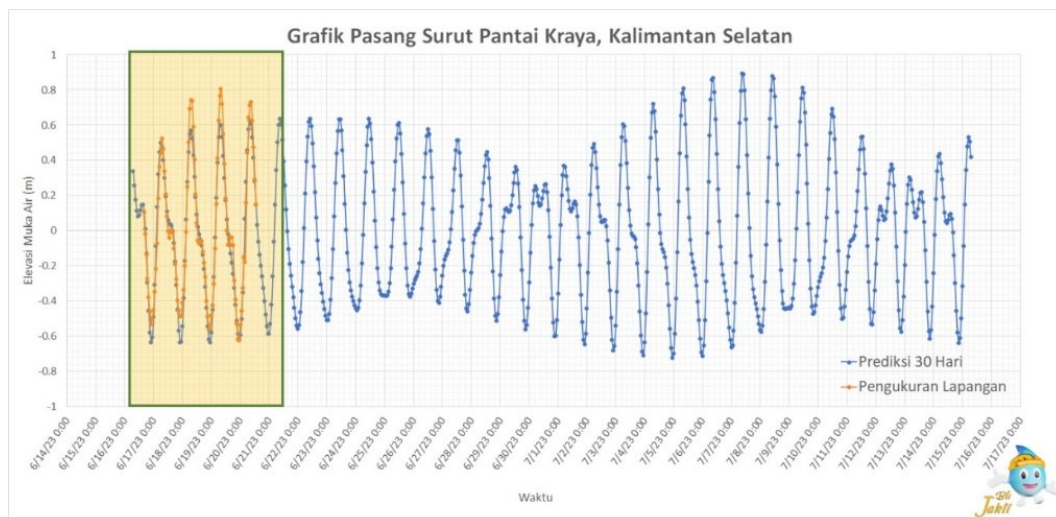
Pada sektor omnidirectional (**Gambar 4.**) kejadian gelombang terdistribusi dominan dari arah tenggara dengan probabilitas kejadian rata – rata adalah sekitar 54,08 %. Untuk kejadian angin terdistribusi hampir merata di seluruh arah. Namun dominan distribusi dari arah timur laut dan tenggara dengan probabilitas kejadian untuk arah timur laut dan tenggara adalah sekitar 11,36 % dan 11,54 %. Meskipun angin dan gelombang dominan dari tenggara namun gelombang tinggi datang dari arah barat.



**Gambar 4.** a) Windrose dan (b) Waverose pada Pantai Keraya (Lon, Lat :111°, -3.5°)

**Pasang Surut**

Data peramalan pasang surut diperoleh dari model global pasang surut Naotide selama 20 tahun yang kemudian divalidasi dengan data primer yang diperoleh dari pengukuran selama 4 (empat) hari pada lokasi studi. Grafik pasang surut dapat dilihat pada Gambar



**Gambar 5.** Grafik Pasang Surut Dengan Program Naotide (Lon, Lat : 111,53°, -2,99°)

Berdasarkan data pasang surut nilai tunggang pasang sebesar 1,85 m. Tipe pasang surut ditentukan berdasarkan pada perbandingan antara jumlah amplitudo konstanta diurnal ( $K_1, O_1$ ) dengan jumlah Amplitudo konstanta diurnal ( $M_2, S_2$ ). Perbandingan tersebut dituliskan dalam formula Formzahl (F):

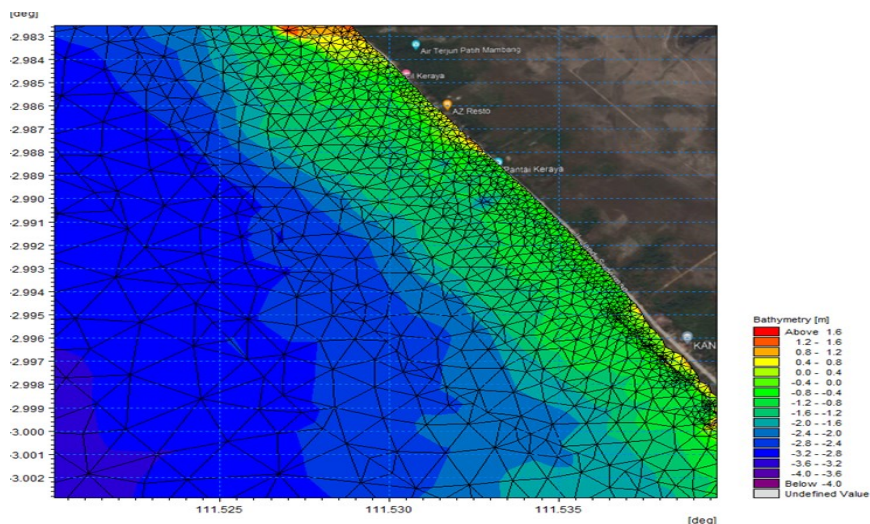
Berdasarkan konstanta-konstanta utama pasang surut di atas diketahui bahwa nilai Bilangan Formzahl ( $F$ ) = 1,44. Sehingga tipe pasang surut di lokasi kajian adalah *mixed semi diurnal* atau pasang surut campuran cenderung ganda.

**Tabel 3.** Elevasi Muka Air

Tahun	Referensi Elevasi Muka Air	
	MSL = 0	LLWL = 0
Highest Water Spring (HWS)	0,99	1,85
Mean High Water Spring (MHWS)	0,78	1,63
Mean High Water Level (MHWL)	0,35	1,20
Mean Sea Level (MSL)	0	0,85
Mean Low Water Level (MLWL)	-0,36	0,49
Mean Low Water Spring (MLWS)	-0,64	0,21
Lowest Low Water Level (LLWL)	-0,85	0

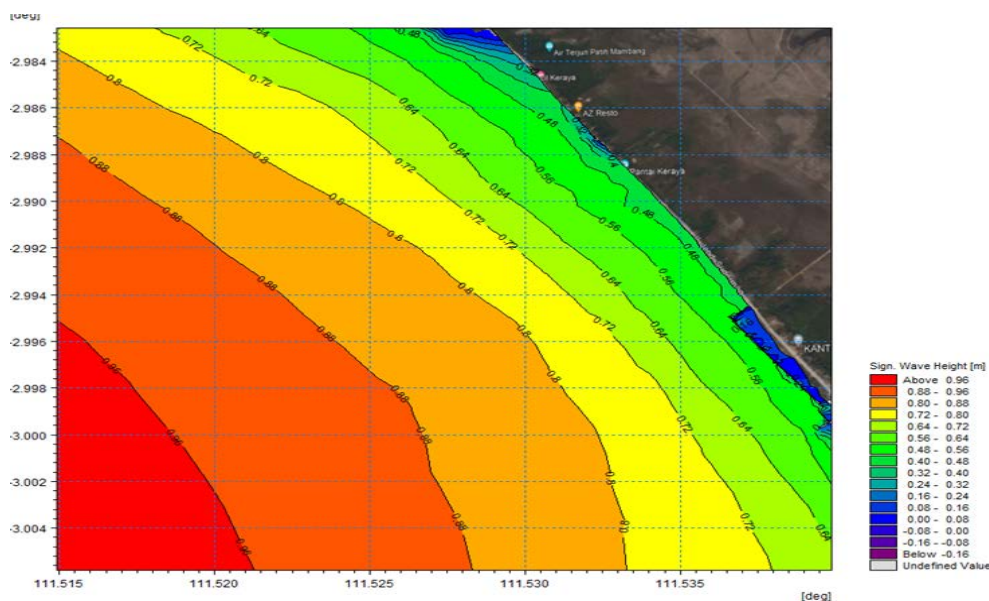
**Analisis Gelombang Desain**

Permodelan gelombang menggunakan *software* MIKE21 modul *spectral wave* (SW). Modul *spectral wave* merupakan sistem model numerik untuk mensimulasikan pembangkitan kehilangan energi dan penjalaran gelombang angin (*wind generated wave*) dan gelombang periode panjang (*swell*) di pantai dan lepas pantai.



**Gambar 6.** Domain mesh model transformasi gelombang di perairan Pantai Keraya

Tinggi gelombang yang diperoleh dari permodelan adalah tinggi gelombang ekstrim signifikan ( $H_s$ ) yaitu 0,51 m untuk lokasi rencana bangunan tipe pemecah gelombang (*breakwater*) dan 0,40 m untuk lokasi rencana revetment.



**Gambar 7.** Pola Gelombang Ekstrim Pola Ulang 100 Tahun di Pantai Keraya

**Perhitungan Struktur Bangunan**

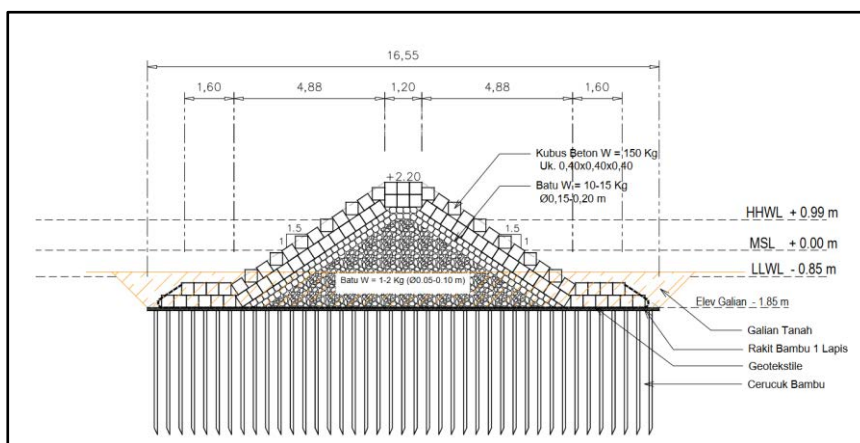
Menurut Triatmodjo (2020) dalam menentukan tinggi gelombang desain ( $H_d$ ) harus memperhatikan tipe konstruksi bangunan. Untuk bangunan kaku, seperti dinding beton atau kaisan, dimana keruntuhan bangunan dapat berakibat fatal dan bangunan tidak bisa diperbaiki lagi, maka tinggi gelombang rencana dipilih gelombang besar yang biasanya diambil  $H_1 = 1,68 \times H_s$ . Untuk bangunan semi kaku, seperti turap tinggi gelombang rencana dipilih antara  $H_{10} = 1,28 \times H_s$  sampai  $H_1$ . Untuk bangunan fleksibel tinggi gelombang rencana bervariasi dari menggunakan  $H_5$  sampai  $H_s$ . Pada studi kasus di Pantai Keraya, bangunan pengaman pantai yang akan direncanakan adalah bangunan yang fleksibel, maka untuk gelombang desain ( $H_d$ ) cukup menggunakan  $H_5$ .

**Tabel 4.** Parameter desain pengaman pantai

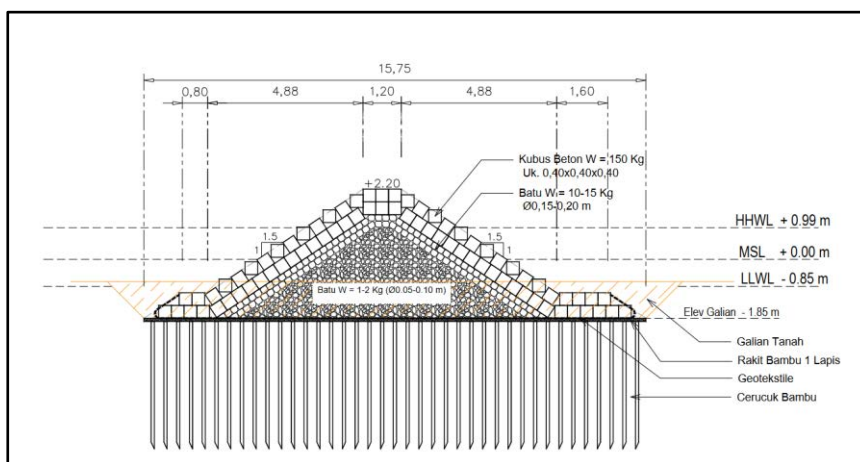
No.	Parameter	Bangunan	
		Pemecah Gelombang	Revetment
1	Elevasi muka air rencana (DWL)(m)	0,67	1,28
2	Tinggi rayapan ( $R_u$ )(m)	0,87	0,71
3	Tinggi jagaan ( <i>freeboard</i> )(m)	0,66	0,50
4	Elevasi puncak struktur terhadap MSL	2,20	2,50
5	Tinggi gelombang desain ( $H_d$ )(m)	0,70	0,55
6	Massa jenis armor		
	- Kubus beton ( $kg/m^3$ )	2200	2200
	- Batu pecah ( $kg/m^3$ )	2600	2600
7	Pelindung Kaki Struktur		
	- Kubus beton	5,0	5,0
	- Batu pecah	1,9	1,9
8	Kemiringan struktur	1,5	1,5

**Tabel 5.** Rekapitulasi hasil perhitungan struktur

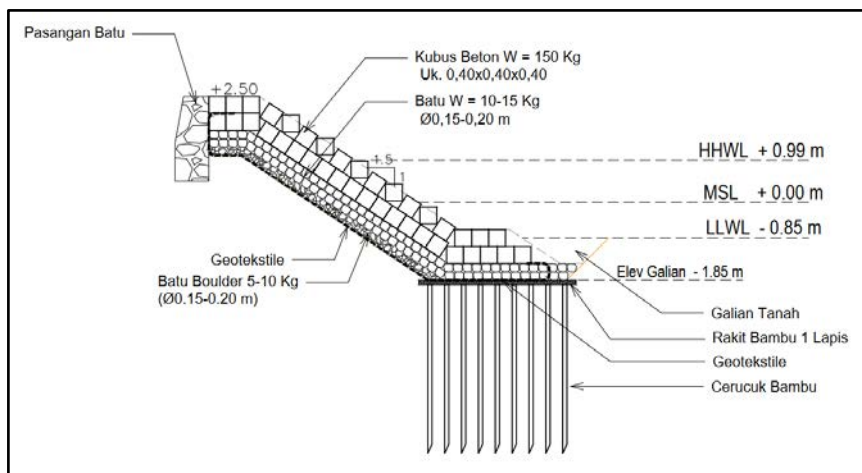
No.	Parameter	Bangunan	
		Pemecah Gelombang	Revetment
1	Lap. Primer (Kubus Beton)		
	- Berat armor minimum (Kg)	67	33
	- Berat armor yang digunakan (Kg)	150	150
	- Dimesi armor (m)	0,40	0,40
2	Lap. Sekunder (Batu)		
	- Berat armor minimum (Kg)	9	5
	- Berat armor yang digunakan (Kg)	10 - 15	10 - 15
	- Dimesi armor (m)	0,15 - 0,20	0,15 - 0,20
3	Lebar Puncak Struktur	1,20	1,20
4	Tebal Lapis Lindung	0,80	
5	Pelindung Kaki Struktur		
	- Berat armor (Kg)	150	150
	- Dimesi armor (m)	0,40	0,40



**Gambar 8.** Tipikal bangunan pemecah gelombang (bagian kepala)



**Gambar 9.** Tipikal bangunan pemecah gelombang (bagian lengan)



Gambar 10. Tipikal revetment

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil identifikasi dan analisis terhadap data-data yang telah didapatkan, maka kesimpulan dari advis teknis ini adalah sebagai berikut:

1. Permasalahan yang terjadi di Pantai Keraya adalah erosi pantai yang mengancam kawasan pemukiman masyarakat dan prasarana jalan yang menghubungkan dua Kabupaten;
2. Berdasarkan data pasang surut nilai tunggang pasang sebesar 1,85 m dengan tipe pasang surut adalah pasang surut campuran cenderung ganda;
3. Arah gelombang dominan berasal dari tenggara dengan probabilitas kejadian rata – rata adalah sekitar 54,08 %.
4. Tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) berkisar sebesar 0,40 – 0,51 m dengan periode 3,64 detik untuk masing – masing lokasi rencana bangunan. Untuk desain struktur pengaman pantai di Pantai Keraya menggunakan tinggi gelombang desain ( $H_d$ ), yaitu  $H_5$  adalah sebesar 0,70 m untuk alternatif breakwater dan 0,55 untuk alternatif revetment;
5. Desain bangunan pantai dengan menggunakan alternatif revetment diperoleh tinggi struktur +2,50 m dari MSL = 0, dengan berat armor kubus lapisan primer 150 kg, berat batu lapisan sekunder 10 – 15 kg dan lapisan armor kubus pelindung kaki 150 kg;
6. Desain bangunan pantai dengan menggunakan alternatif pemecah gelombang bagian kepala diperoleh tinggi struktur + 2,20 m dari MSL = 0, dengan berat armor kubus lapisan primer 150 kg, berat batu lapisan sekunder 10 – 15 kg dan lapisan armor kubus pelindung kaki 150 kg;

### Saran

Sebagai dasar parameter perencanaan yang dilihat dari aspek geoteknik, perlu dilakukan survei geoteknik dan analisis daya dukung tanah untuk mengetahui stabilitas dan kondisi tanah di lokasi yang akan direncanakan dan dilaksanakan pembangunan struktur bangunan pengaman pantai.

### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Dinas PUPR Kabupaten Kotawaringin Barat yang telah berkontribusi selama identifikasi dan survei lapangan sehingga penelitian ini berjalan dengan lancar.

### Daftar Referensi

- Alongi, D.M. 2008. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76 :1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Bird, E. 2008. *Coastal Geomorphology: an introduction*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd, Chicester.
- Day, J.W., R. R. Christian, D. M. Boesch, A. Yáñez-Arancibia, J. Morris, R. R. Twilley, L. Naylor, L. Schaffner, and C. Stevenson. 2008. Consequences of Climate Change on the Ecogeomorphology of Coastal Wetlands. *Estuaries and Coasts*, 31:477-491. <https://doi.org/10.1007/s12237-008-9047-6>
- Coastal Engineering Research Center (CERC). 1984. *Shore Protection Manual Volume I & II*, US Army Coastal Engineering Research Center, Wanshington
- Kulkarni, V. A., T. G. Jagtap, N. M. Mhalsekar and A. N. Naik. 2010. Biological and environmental characteristics of mangrove habitats from Manori creek, West Coast, India. *Environmental Monitoring Assessment*, 168:587-596. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1136-x>
- Marfai, M. A. and L. King. 2008. Tidal inundation mapping under enhanced land subsidence in Semarang, Central Java Indonesia. *Natural Hazards*, 44:93-109. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9144-z>
- Marshall, A., L. Robinson, and M.A. Owens. 2011. Coastal construction trends in response to coastal erosion: an opportunity for adaptation. *Journal Coastal Conservation*, 15:61-72. <https://doi.org/10.1007/s11852-010-0120-5>
- Ongkosongo, O. S. R. 2010. *Kuala, Muara Sungai dan Delta*. Lembaga ilmu Pengetahuan Indonesia, Jakarta.
- Parvin, G. A., F. Takahashi and R. Shaw. 2008. Coastal hazards and community-coping methods in Bangladesh. *Journal Coastal Conservation*, 12:181-193. <https://doi.org/10.1007/s11852-009-0044-0>
- Triatmodjo, B., 2020. *Perencanaan Bangunan Pantai*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Van Zuidam, R.A., 1985, *Guide to Geomorphologic Aerial Photographs Interpretation and Mapping*, Enschede The Netherlands, 325 h.
- Ward, P. J., M. A. Marfai, F. Yulianto, D. R. Hizbaron and J. C. J. H. Aerts. 2011. Coastal inundation and damage exposure estimation: a case study for Jakarta. *Natural Hazards*, 56:899-916. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9599-1>

## EFEK SEKUNDER TURBULENSI ALIRAN SUPER KRITIS PADA SALURAN TERBUKA TERHADAP BANGUNAN PERANGKAP SEDIMEN IRIGASI

Muhammad Isnaeni\*

Konsultan Perorangan dengan Kepakaran Hidraulika dan Sedimentasi

\*m\_isnaeni66@live.com

Pemasukan: 27 Juni 2024 Perbaikan: 30 September 2024 Diterima: 22 Desember 2024

### Intisari

Pengaruh sekunder pada aliran super kritis dengan bilangan *froude*  $> 1$ , yang mengalir pada dasar saluran di permukaan lining beton memiliki efek sekunder. Efek tersebut menyebabkan timbulnya tonjolan garis kontur dan kecepatan aliran dengan pola bergelombang dari distribusi kecepatan rata-rata yang melintasi penampang. Karakteristik aliran ini dapat dilihat dari alirannya yang cepat dan tidak stabil. Aliran super kritis dapat bertransisi ke aliran sub kritis melalui fenomena lompatan hidraulik yang merugikan debit aliran. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi inovasi efisiensi debit terhadap parameter kedalaman aliran optimum pada penampang saluran terbuka *flume* yang digunakan juga sebagai penguras perangkap sedimen di sistem irigasi. Metode penelitian ini menggunakan uji fisik dengan *flume* skala 1:40 dengan skala prototip di laboratorium. Uji fisik ini menghasilkan kecepatan aliran sesaat yang profil terperinci. Selain itu dilakukan pengamatan uji vertikal menggunakan *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) 16 Mhz untuk memperoleh distribusi kecepatan aliran, intensitas turbulensi, *Reynolds* dan tegangan geser pada seluruh lapisan penampang aliran. Langkah berikutnya adalah melakukan analisis hukum *wake-log* yang dimodifikasi pada dasar dan permukaan aliran. Analisis berikutnya adalah analisis aliran pada *flume* yang dipengaruhi oleh kesetimbangan aliran dalam kurun waktu 5 jam pengaliran untuk mengetahui peningkatan fraksi sedimen lebih stabil per jamnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio lebar (b) dan kedalaman aliran (h) dapat meningkatkan kekuatan arus sekunder yang signifikan dengan rasio yang b/h yang ideal dapat memberikan efisiensi pengaliran debit berdasarkan bilangan *Froude* = 2,2 dan *Reynolds* 2500-2600 dapat diefisiensikan hingga 46% diperlukan Q:1,26 l/s, kecepatan aliran 10,79 cm/s sehingga aliran dalam posisi transisi laminar ke turbulen dan tidak memicu sedimentasi pada penampang basah saluran.

Kata Kunci: Efek Sekunder, *Froude*, *reynolds*, super kritis, turbulensi, perangkap sedimen.

### Latar Belakang

Kerusakan tutupan lahan pada DAS Citarum harus segera ditangani karena mengakibatkan akumulasi sedimen, semakin signifikan penurunan kapasitas penampang besar Sungai Citarum akan mengurangi penampang basah sungai dan

berakibat pada pemanfaatan air di hilir sungai (Sudarningsih dkk., 2017). Sekitar 80% lahan pertanian terdegradasi akibat erosi tanah global. Praktik pertanian berkelanjutan sedikit terganggu oleh erosi tanah dan berkurangnya produktivitas tanah pertanian, yang mengakibatkan kerawanan pangan. Pada budidaya lahan, konservasi tanah membutuhkan jenis vegetasi tertentu yang didukung oleh strategi yang efisien untuk mengendalikan kehilangan tanah subur di permukaan. Air yang mengalir di sungai-sungai tersebut juga membawa angkutan sedimen. Dasar sungai tertimbun lumpur jika menerima angkutan sedimen melebihi kapasitas pengangkutannya, dan langkah-langkah efektif tidak diambil untuk pengendaliannya. Hal ini mengakibatkan penurunan kapasitas sungai atau saluran. Kemudian, kemiringan saluran umumnya lebih kecil dari sungai utama sehingga sedimen selalu cenderung tertampung di saluran atau sungai (Isnaeni dkk., 2022).

Untuk menganalisis fenomena ini khususnya untuk saluran terbuka, pengaruh arus turbulensi sekunder pada karakteristik aliran saluran terbuka super kritis pada aspek rasio rendah perlu untuk diteliti sehingga bentuk geometrik dan rasio  $b/h$  dari sebuah penampang akibat sedimentasi pada dasar saluran dapat optimal khususnya pada saluran penguras (Balachandar dan Bhuiyan, 2007).

Kebaruan penelitian ini adalah selain analisis numerik dengan persamaan konvensional, dilakukan uji laboratorium pada sebuah *flume* untuk menyelidiki secara eksperimental a) Karakteristik aliran rata-rata dan turbulen, b) gerakan sedimen, dan c) keterkaitannya dengan proses hidro-abrasi pada berbagai kondisi aliran saluran terbuka super kritis yang menyimulasikan aliran dalam *Flume* perangkap sedimen dan *Flume* penguras sedimen. Penelitian ini lebih fokus pada pengaruh arus sekunder pada karakteristik turbulensi aliran saluran terbuka sempit super kritis sangat rasio aspek rendah. Laju angkutan sedimen yang tinggi pada sebuah sungai oleh partikel pada dasar saluran dalam kombinasi kecepatan aliran menyebabkan berkurangnya penampang basah suatu sungai atau saluran (Chiodi dkk., 2014). Hidro-abrasi dan kerusakan karena kavitasi pada struktur hidraulik termasuk komponen bangunan seperti *outlet* bendungan, bendung, atau saluran pembilasan sedimen. Pengembangan model membutuhkan pemahaman yang lebih baik tentang proses fisik karakteristik aliran turbulen super kritis, gerakan partikel, abrasi, dan keterkaitan parameter hidraulik lainnya (Cuthbertson dan Ervine, 2007). Meskipun sejumlah besar penelitian terutama di saluran aluvial, hanya sedikit yang meneliti pada saluran alami dengan dasar batuan yang curam seperti sungai, dan aliran saluran terbuka super kritis dengan rasio lebar ( $b$ ) dan kedalaman aliran ( $h$ ) (Lepesqueur dkk., 2019).

Pengetahuan tentang karakteristik aliran super kritis seperti kecepatan rata-rata, turbulensi, tegangan geser dan *Reynolds* sangat penting untuk mengatasi banyak masalah hidraulika seperti angkutan sedimen, proses pengendapan, erosi, hidro-abrasi, dan kavitasi. Nikuradse, 1933 dan *Von Kármán* 1930 telah banyak melakukan kajian komprehensif pada karakteristik rata-rata dan turbulen dari aliran saluran terbuka dengan dan tanpa angkutan sedimen di atas lapisan halus dan kasar (Basse, 2023), studi ini menghasilkan berbagai adaptasi dari distribusi kecepatan *log-law* dasar di pada dasar saluran, dan distribusi kecepatan di wilayah luar diwakili oleh parameter hidraulik. Pada sisi dalam, juga disebut wilayah pengaruh

dari dinding saluran, didefinisikan sebagai  $z/h \leq 0,2$  dengan  $z$  = jarak dari dasar saluran dan  $h$  = kedalaman aliran. Pada lapisan ini, gaya viskositas mendominasi aliran, skala karakteristik kecepatan dan panjang adalah kecepatan gesekan lokal  $u^*$ , dan rasio viskositas kenematik terhadap kecepatan gesekan  $\nu/u^*$ . Pada wilayah luar, gaya inersia mendominasi aliran, karakteristik skala kecepatan dan panjang adalah kecepatan aliran rata-rata maksimum  $U_{max}$ , dan kedalaman aliran  $h$ . Distribusi kecepatan di wilayah dinding mengikuti persamaan universal yang disebut *log law* (Manes dkk., 2007), sebagai berikut:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A, (z^+ > 30) \tag{1}$$

Dengan  $U^+ = U/u^*$ ,  $U$  adalah kecepatan aliran rata-rata waktu,  $z^+ = zu^*/\nu$ ,  $k$  = konstanta *von Kármán*,  $A$  adalah konstanta integral. Konstanta *von Kármán*  $k = 0,41$  oleh beberapa peneliti untuk aliran saluran yang stabil, terbuka di atas *smooth bed load*, kasar, terlepas dari angka *Reynolds* dan *Froude*.

Pada lapisan transisi yang kasar pada aliran saluran terbuka diusulkan pergeseran kekasaran permukaan  $\Delta U^+$  untuk Persamaan (1). Dalam Persamaan (2),  $\Delta U^+$  meningkat dengan meningkatnya kekasaran bilangan *Reynolds*  $k_s^+ = k_s U^*/\nu$ , dimana  $k_s$  = tinggi kekasaran *Nikuradse* pada lapisan pasir. Nilai-nilai kisaran  $\Delta U^+$  antara 0 (pada *smooth bed*) dan 7,4 - 7,6 (pada *rough bed*). Untuk transisi dari lapisan permukaan halus *smooth bed* ke kasar *rough bed*, nilai  $\Delta U^+$  dilaporkan antara 3,5 dan 6, maka Persamaan (1) ditulis kembali menjadi:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A - \Delta U^+ \tag{2}$$

Untuk parameter hidraulik yang melalui dasar *smooth bed*, transisi pada *rough-bed*, dan dasar saluran yang kasar (*rough bed*), maka dipergunakan Persamaan (3) atau Persamaan (4). Pada Persamaan (3), nilai  $B$  adalah konstanta integral mulai dari 8.5 - 15% untuk dasar saluran yang kasar, dimana fungsi  $k_s^+$  adalah fungsi dari kekasaran dasar saluran.

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z}{k_s} \right) + B \tag{3}$$

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \tag{4}$$

$$k_s^+ < 5 \quad z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_*} \text{ (untuk parameter hidraulik smooth-bed)} \tag{5}$$

$$5 < k_s^+ < 70 \quad z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_*} + 0.033 k_s \text{ (untuk transisi dari smooth-bed ke rough-bed)} \tag{6}$$

$$k_s^+ > 70 \quad z_0 = 0.033 k_s \text{ (untuk dasar rough-bed)} \tag{7}$$

Telah banyak studi sebelumnya yang membahas tentang karakteristik aliran turbulen mencakup berbagai aliran dan kondisinya pada dasar saluran, sebagian besar penelitian terbatas pada bilangan *Froude* yang rendah. Hanya beberapa peneliti yang menyelidiki aliran super kritis dengan  $F > 1$  seperti yang ada di saluran curam. Khususnya *Otsuka* dkk., 2017 telah meneliti melalui data laboratorium tentang karakteristik turbulensi di saluran terbuka super kritis mengalir dengan fokus pada pengaruh *Froude* hingga 8 dan  $2,5 \leq b/h \leq 10,7$ . Namun, dampak rasio

aspek yang bahkan lebih rendah hingga 1 pada karakteristik turbulen aliran super kritis yang tinggi (Otsuka dkk., 2017). Oleh karena itu, jelas bahwa pengamatan fisik dan kuantifikasi akurasi pada aliran pada aspek rasio rendah seperti ini menarik dari praktik teknik keairan dan tinjauan mekanika fluida. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dengan laboratorium yang sistematis investigasi menggunakan Micro ADV 16 Mhz, matriks eksperimental mencakup rasio aspek  $1 \leq b/h_0 \leq 2$  dan angka *Froude* hingga 4. Karena terjadi turbulensi yang besar dengan angka *Froude* yang tinggi, sehingga sedimen hanya akan berputar dan membutuhkan waktu yang lama untuk ter gelontorkan.

Tujuan dari penelitian ini, untuk dapat merekomendasikan kepada operator Bendung khususnya bangunan utama yang memiliki perangkat sedimen, tinggi aliran (debit yang besar) apalagi harus 120% dari nilai *NFR* (*Nett Field Required*) untuk menguras sedimen pada sebuah bangunan perangkat sedimen tidak selalu dengan debit besar. Rasio  $b/h$  dari saluran pembawa ke jaringan irigasi harus ideal, sehingga sedimentasi yang dipicu oleh kerusakan lahan di hulu bangunan dan terbawa di bangunan utama seperti Bendung, dapat diminimalkan dengan rasio saluran yang ideal. Tinggi muka air yang optimum akan mampu memberikan nilai efisiensi waktu dan debit sehingga petani/pengguna air di hilir dapat tetap memanfaatkan air irigasi.

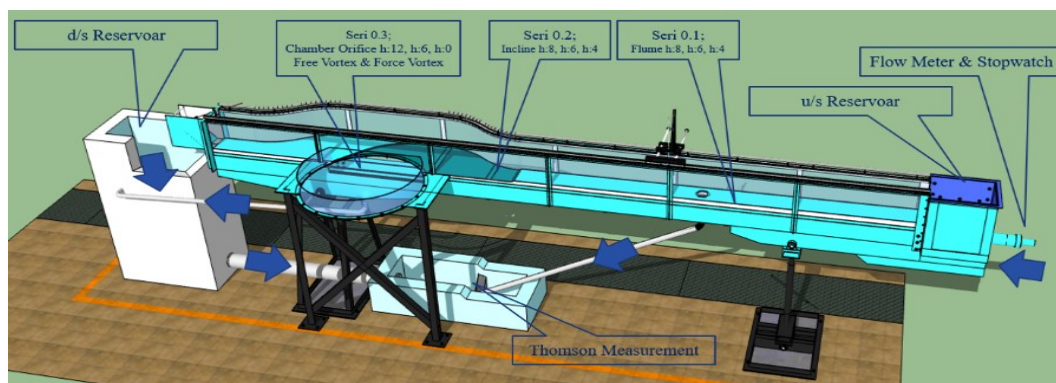
## Metodologi Studi

### Model Uji Laboratorium

Penggunaan model uji hidraulik untuk keperluan perencanaan bangunan-bangunan air sangat dibutuhkan untuk pengamatan fenomena hidraulik dan pemantapan dan kesempurnaan desain. Dalam pemodelan ini terdapat tiga kegiatan yang saling terkait yaitu: “*Modelling*” (proses membuat model), “*solving*” (proses pemecahan masalah) dan “*interpretation*” (menginterpretasikan atau menjabarkan hasil penelitian dari model ke prototip). Agar penelitian dan pengamatan profil aliran tersebut dapat memberikan hasil yang maksimal maka ketiga kegiatan tersebut di atas harus memenuhi kaidah-kaidah yang benar, artinya harus memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu (Huang dkk., 2018). Model uji fisik akan memberikan interpretasi nyata dalam setiap pengamatan untuk membuktikan fenomena fluida, eksperimen ini diawali dengan percobaan laboratorium dengan skala yang tidak terdistorsi dengan keserupaan dan kesebangunan dari prototip pada model fisik dan memenuhi analisis keserupaan geometrik, kenematik dan dinamis.

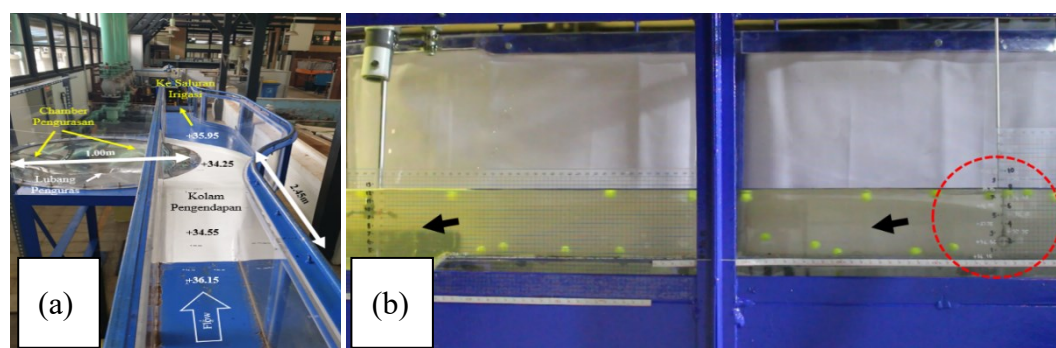
Setelah analisis keserupaan, skala prototip ke model uji diperoleh 1:40, dimensi geometrik pada model uji laboratorium diperoleh dengan dimensi *flume* uji dengan dimensi  $b = 0,2$  m,  $h_f = 0,5$  m dan panjang *flume* 4,00 m dengan kemiringan dasar  $S_b = 1\%$ , mewakili bagian lurus dari kolam/saluran pengendapan dan saluran penguras sedimen (lihat Gambar 1). Dasar saluran dengan permukaan plat besi tanpa dihaluskan. Dinding sampingnya terbuat dari bahan akrilik, aliran masuk pipa bertekanan diubah menjadi aliran permukaan bebas ke *flume* dengan sistem aliran seragam dikembangkan di laboratorium. Pipa masuk yang dikendalikan dengan keran dengan *flow meter* memungkinkan untuk menyesuaikan kedalaman aliran pendekatan  $h_0$ . Debit diukur menggunakan pengukur aliran magnetik yang

dipasang ke pipa dengan kesalahan pengukuran < 0,5%. Kedalaman aliran  $h$  diukur pada interval 0,5 m di sepanjang *flume*, baik menggunakan pengukur titik dan jarak *Propeller Current Meter Probe H33* dengan akurasi data < 0,5 mm (Isnaeni, 2023).

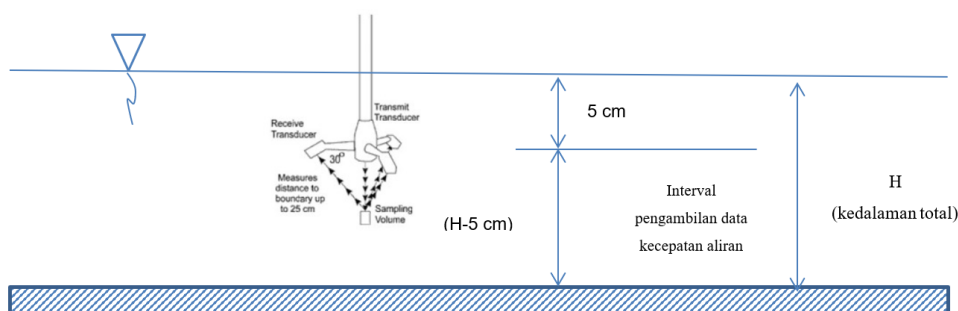


Gambar 1. Tampak *flume* uji keseluruhan

Skema *Propeller Current Meter Probe 33* dapat mengukur kecepatan aliran hingga 1.500 mm /s dengan menghubungkan pembacaan baling – baling ke *Data Logger* yang terhubung dengan Komputer/Laptop. Digunakan 2 unit H-33 *Propeller Current Meter* dalam mengamati kecepatan aliran dan penelitian ini, posisi penempatan alat ini diletakkan tergantung bagian profil mana yang akan diamati. *Micro ADV 16 Mhz SonTek 16-MHz Micro ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)* adalah terobosan paling signifikan dalam teknologi pengukur arus 3-sumbu (3D) sejak *SonTek ADV* lebih baik dibandingkan dengan sistem laser *Micro ADV* bahkan lebih baik (García-Ramos dkk., 2018). Frekuensi akustik yang lebih tinggi yaitu 16 MHz menjadikan *Micro ADV* instrumen yang optimal untuk pekerjaan laboratorium. Seperti semua instrumen *SonTek*, *Micro ADV* sangat mudah diatur dan digunakan, sebagian besar pengguna mengambil data berkualitas tinggi dalam beberapa menit setelah menerima sistem. Dengan fitur Pengukuran kecepatan tiga sumbu Sensor dipasang pada batang 25 cm dan laju pengambilan sampel tinggi — hingga 50 Hz Volume sampel kecil — kurang dari 0,1 cm<sup>3</sup>. Akurasi tinggi 1% dari rentang terukur kisaran kecepatan besar 1 mm/dt hingga 2,5 m/s performa aliran rendah yang luar biasa tidak perlu kalibrasi ulang Perangkat lunak yang komprehensif termasuk *Horizon ADV* (Isnaeni, 2023).



Gambar 2. Tata letak kolam pengendapan dan saluran penguras pada *flume* uji (a), Penempatan *Micro ADV 16 Mhz* dan *Propeller Current Meter H33* pada *Flume* uji di Laboratorium (b)



Gambar 3. Cara kerja pembacaan sensor akustik Micro ADV 16 Mhz *downlooking*

### Syarat dan Kondisi Pengujian Laboratorium

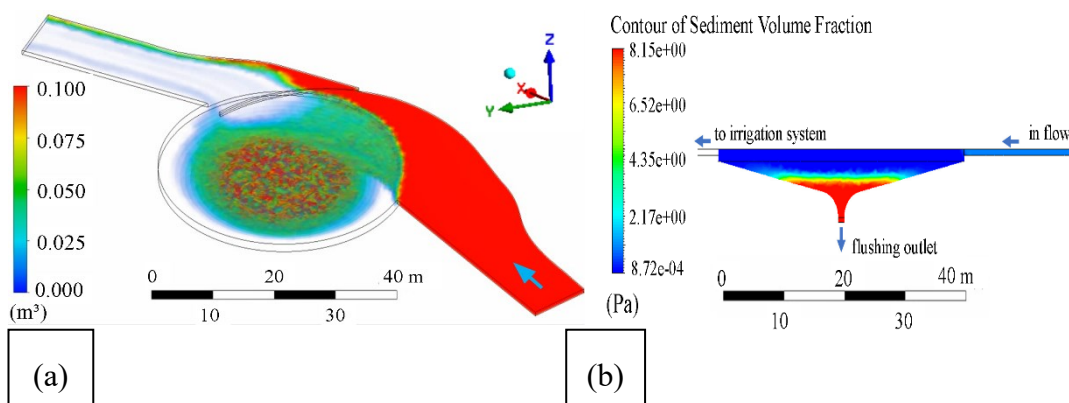
Matrik pengujian yang merangkum kondisi eksperimental, dengan penampang melintang TA1–TA4 dengan bilangan *Froude* yang terbatas pada  $F_r = 3$  dan 3,5 karena keterbatasan aliran maksimal pada pipa inlet (lihat Tabel 1). Dalam semua uji coba, bilangan *Reynolds* adalah  $k_s^+ < 6$ , dan karenanya rezim aliran halus secara hidraulik menggunakan Persamaan 5. Kecepatan aliran rata-rata penampang  $U$  ditentukan dengan menggunakan persamaan kontinuitas, dimana debit ditentukan menggunakan dua metode: a) kecepatan aliran rata-rata penampang basah, yaitu,  $U = Q/(b.h)$ , dihitung dengan debit  $Q$ , yang diukur dengan flow meter magnetik, dan b) kecepatan aliran rata-rata  $U$  dihitung dari pengukuran Micro ADV sebagai  $U = Q/A$  dengan  $Q = \int U dA$ , dimana  $A$  = luas penampang basah, dan  $U$  = kecepatan rata-rata waktu pada setiap titik pengukuran. Nilai-nilai ini sesuai dengan perbedaan deviasi maksimum 3%. Alirannya berangsur-angsur bervariasi; oleh karena itu, pengukuran ketinggian air digunakan untuk mengkalibrasi kurva *backwater*, yang dihitung dengan interval  $D_x = 0,05$  m di sepanjang *flume* untuk menentukan kehilangan gesekan *flume* dan mengukur kemiringan garis energi  $S_e$  serta ketinggian kekasaran pasir yang seragam  $k_s^+$ .

### Hasil Studi dan Pembahasan

#### Komputasi Numerik

Hasil simulasi dengan *Computational Fluid Dynamics CFD* menunjukkan konsentrasi sedimen non-kohefif 120.000 – 190.000 ppm, Dengan menghitung secara grafik fraksi sedimen pada deskriptor simulasi pada komputer. Pada simulasi numerik dengan *Ansys 2021 R2 Fluent Students* ini, sangat sulit untuk mengamati pola aliran yang sebenarnya (Kumar dan Malipatil, 2014). Sedimen yang mengendap pada kolam pengendapan dan saluran penguras pada kondisi bilangan *Froude* terjadi aliran super kritis sedimen tidak dapat mengendap sempurna. Kecepatan aliran lebih besar pada sisi kanan *chamber*, karena bidang masuknya aliran dari *flume*. Bagian dasar *chamber* kecepatan aliran didominasi pada sisi kanan lubang mencapai kecepatan absolut 8,2 cm/s dalam kondisi katup/keran di *orifice* terbuka. Kecepatan yang diinginkan sehingga dapat diperoleh bilangan *Froude* 1-1,2 dan bilangan *Reynold* transisi dari laminar ke turbulen di kisaran 3 – 4 dengan cara katup/keran dibuka tidak penuh dengan setengah bukaan sehingga rotasi gradasi partikel dapat tertuju pada lubang pengurasan (lihat Gambar 4). Pada peningkatan fraksi lebih cepat dikarenakan tekanan menurun dari dinding *chamber*

menuju *outlet flushing* yang dipengaruhi gaya gravitasi ketika partikel mengalir dari dinding depan ke arah dinding belakang, lebih banyak partikel akan diseret ke arah daerah tekanan rendah yaitu menuju *outlet flushing* dan akan mengendap pada pusaran sebelum membentuk lapisan partikel berputar yang stabil terhadap dinding *chamber*.



Gambar 4. Hasil simulasi penggelontoran sedimen pada *CFD Ansys 2021 R2*, kontur fraksi sedimen tampak atas (a), kontur fraksi sedimen pada potongan melintang dari arah *inlet* ke *outlet* (b)

**Pemodelan Fisik**

Selain itu, aliran yang mengalir pada *flume* juga dipengaruhi kesetimbangan aliran dalam kurun waktu ke 5 jam pengaliran menunjukkan peningkatan fraksi sedimen lebih stabil per jamnya. Parameter kesetimbangan aliran  $\beta$  yang menunjukkan tingkat keseragaman aliran dihitung dengan persamaan berikut:

$$\beta = \frac{gRh}{U_*^2} \left( \frac{dRh}{dx} - Sb \right) \tag{8}$$

Dengan  $\beta$  keseragaman aliran,  $g$  gravitasi,  $R$  jari-jari hidraulik,  $U$  adalah kecepatan aliran,  $l$  adalah panjang *flume* yang dilalui oleh fluida,  $h$  adalah ketinggian muka air pada *flume*,  $dRh$  panjang karakteristik aliran ketinggian muka aliran,  $dx$  panjang karakteristik *flume* dan  $Sb$  adalah kemiringan *flume*. Persamaan 2-7 dalam kondisi umum dapat ditulis kembali menjadi distribusi kecepatan di wilayah dinding mengikuti rumus universal yang disebut hukum log berikut (Ramirez dkk., 2020):

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A, (z^+ > 30) \tag{9}$$

Dengan  $U^+ = U/u^*$ ;  $U$  kecepatan aliran rata-rata waktu,  $z^+ = zu^*/\nu$ ,  $k$  konstanta *von Kármán*,  $A$  adalah konstanta integral. Konstanta *von Kármán*  $k = 0,41$  oleh beberapa peneliti untuk aliran saluran yang stabil, terbuka di atas *smooth bed load*, kasar, dan dapat dipindahkan, terlepas dari angka *Reynolds* dan *Froude*. Maka persamaan di atas menjadi:

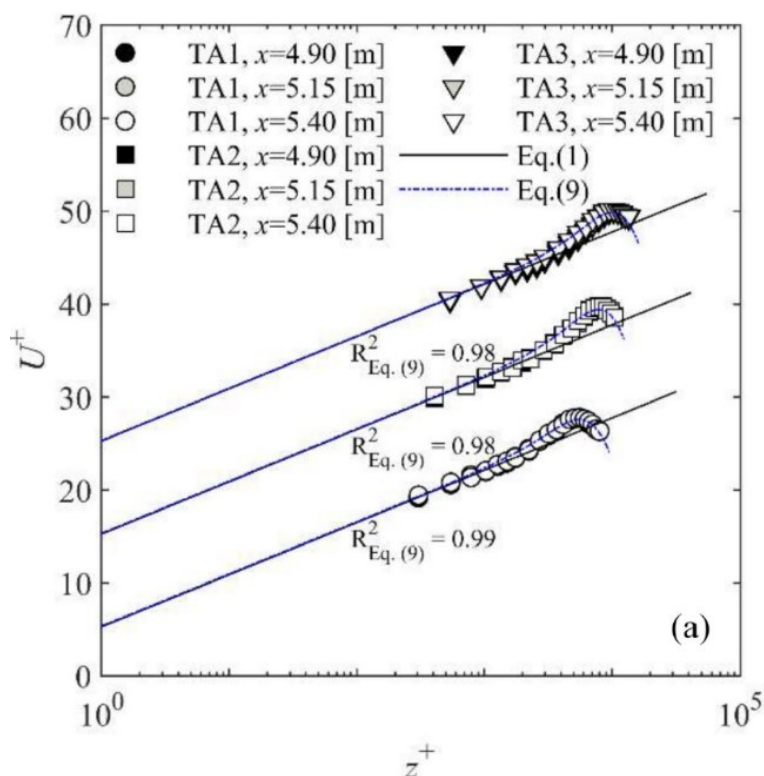
$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A - \frac{1}{3k} \left( \frac{z}{\delta} \right)^3 + \frac{2\pi(1+\alpha^{0,5})}{k} \sin^2 \frac{\pi z}{2\delta}, (z^+ > 30) \tag{10}$$

Dengan  $\delta$  posisi kecepatan maksimum yang dapat ditentukan secara eksperimental, dan  $\alpha$  rasio tegangan geser yang jelas pada permukaan air dengan tegangan geser pada saat sedimen mulai bergerak. Dari data dan analisis percobaan model uji pada penampang melintang *flume*, hasil uji disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Percobaan hidraulik parameter pada penampang melintang aliran

Test	$F_o$	F	$h_o$	$h$	$b/h_o$	$b/h$	R	$\bar{U}_{bulk}$	$\bar{U}$	$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{bulk}}$	$\beta$
	(-)	(-)	(cm)	(cm)	(-)	(-)	( $10^5$ )	(m/s)	(m/s)	(-)	(-)
TA1	2.0	1.9	10	10.5	2	1.91	4.0	1.95	1.96	1.01	-0.80
TA2	3.0	2.5	10	11.2	2	1.79	5.6	2.66	2.68	1.01	-0.43
TA3	4.0	3.3	10	11.4	2	1.75	7.5	3.52	3.52	1.00	-0.26
TA4	2.0	1.9	15	16.0	1.33	1.25	5.7	2.31	2.31	1.00	-0.69

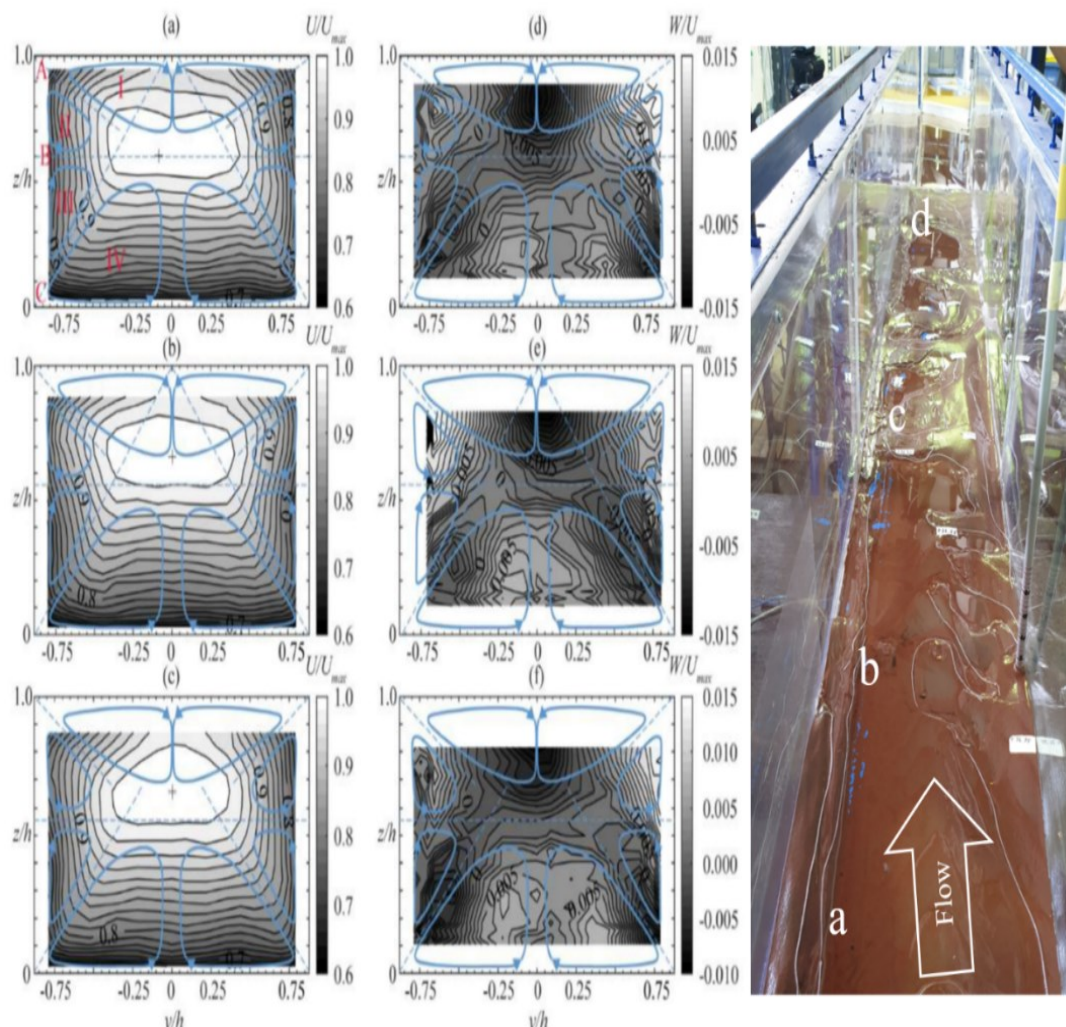
Keseragaman aliran pada *flume* pada Gambar 5, menunjukkan pada panjang aliran masuk pada kolam pengendapan mengalami ketidakseragaman pola aliran karena aliran mulai berbelok dari lurus ke radian kolam pengendapan. Kondisi aliran yang baik untuk mengendapkan sedimen adalah aliran yang seragam dan nilai bilangan *Reynolds* dikisaran 3 – 4 dan rasio  $b/h$  = berkisar 1 – 1,2.



Gambar 5. Rata-rata profil kecepatan *streamwise* bersama dengan *log-law* Persamaan 3 dan dimodifikasi *log-wake-law* Persamaan 10 cocok untuk TA1–TA3 di semua penampang pada  $y/h = 0$ .

Plot kontur kecepatan aliran rata-rata yang dinormalisasi dalam (a–c) arah aliran, (d–f) arah vertikal untuk TA1–TA3. Dalam (a) I = pusaran permukaan bebas, II dan

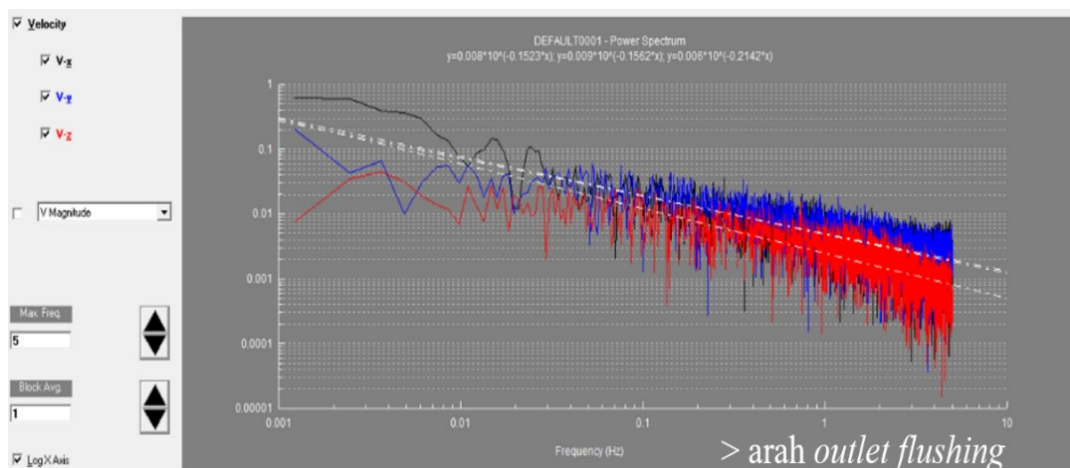
III = pusaran tengah, IV = pusaran bawah, A = vektor sudut permukaan, B = bisector tengah, C = vektor sudut bawah. Aliran seragam pada jarak 1,6 – 1,8, ditunjukkan pada Gambar 6 dari jaring *honey comb* pada jarak ini sedimen mulai jatuh dan mengendap hingga kolam pengendapan pada *flume* (d).



Gambar 6. Profil aliran pada *flume* model uji

Kehilangan partikel dari pengamatan dengan Micro ADV, diperoleh spektrum kecepatan aliran yang semakin tinggi pada lubang pengurasan *oulet flushing*. Namun kecepatan ini yang semakin tinggi akan menghasilkan bilangan *Froude* yang tinggi pula dan aliran dalam kondisi  $F_r > 1$  = super kritis, diperoleh  $F_r$ : 3.42 ditunjukkan pada Gambar 7.

Fenomena *vortex* ini, mempengaruhi efektivitas pengurasan pada sebuah perangkat sedimen, pengaturan debit diperlukan untuk mengatur aliran dalam kondisi transisi laminar ke turbulen sehingga fraksi sedimen dapat dikuras secara maksimal. Dalam penelitian ini diperlukan  $Q$ : 1.26 l/s, kecepatan aliran 10,79 cm/s untuk dapat menguras fraksi sedimen secara optimal.



Gambar 7. Spektrum aliran pada titik kolam pengendapan

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

Hasil penelitian eksperimental ini secara sistematis pada pengaruh sekunder arus pada karakteristik turbulensi aliran saluran terbuka super kritis pada aspek yang sangat rendah rasio di pada dasar saluran terbuka. Dari hasil pengamatan dengan *Micro ADV 16 Mhz* dan Persamaan 3 - 10 terperinci dari pengukuran pada *flume* laboratorium dengan kemiringan dasar saluran 1%. Parameter hidraulik utama yang dipelajari adalah rasio aspek  $b/h_0 = 1-2$  dan aliran pendekatan bilangan *Froude*,  $F_r = 2 - 4$ . Kondisi aliran keduanya seragam dan secara bertahap bervariasi tergantung pada bilangan *Froude*. Hasil studi ini menunjukkan bahwa empat seri pengaliran arus sekunder yang digerakkan oleh turbulensi pusaran permukaan bebas, dan dua pusaran tengah di antaranya, terjadi pada penampang *flume* tanpa bentuk pada dasar saluran. Pola aliran arus sekunder terlihat jelas dalam distribusi penampang kecepatan aliran rata-rata dan vertikal, intensitas turbulensi dan *Reynolds* dan distribusi tegangan geser. Kecepatan aliran vertikal rata-rata dengan aliran naik dan turun pada dinding samping dan gradien hidraulik pada *flume* cocok dengan pola arus sekunder. Aliran turun yang kuat di dekat permukaan air dan aliran ke puncak aliran pada *flume* di tengah *flume* masing-masing sesuai dengan daerah kecepatan aliran yang dipercepat dan diperlambat. Oleh karena itu, kecepatan maksimum terjadi jauh di bawah permukaan aliran, yang disebut "fenomena kecepatan-dip". Oleh karena itu, distribusi kecepatan logaritmik *Prandtl - Von Kármán (log-law)* memerlukan koreksi penurunan kecepatan di wilayah luar. Hukum *wake-log* yang dimodifikasi termasuk koreksi ini berlaku dengan baik untuk data di wilayah dalam dan luar untuk semua kondisi hidraulika yang dipelajari dan dengan demikian direkomendasikan untuk aliran 3D seperti dalam penelitian ini.

Dalam penggelontoran sedimen dapat diizinkan dengan debit maksimal hingga 120% NFR, namun pada pengamatan pada penelitian ini dengan debit 74% dari NFR dapat menggelontorkan sedimen. Pada prototip debit penggelontoran 120% NFR adalah  $13,21 \text{ m}^3/\text{s}$  pada model uji  $2,16 \text{ l/s}$ , Kecepatan aliran pada prototip  $3,43 \text{ m/dt}$  atau pada model uji setara kecepatan aliran  $16,32 \text{ cm/dt}$ . Efisiensi pengaliran

debit berdasarkan bilangan *Froude* = 2.2 dan *Reynolds* 2500 – 2600 dapat diefisiensikan hingga 46% diperlukan  $Q:1.26$  l/s, kecepatan aliran 10,79 cm/dt untuk dapat menguras fraksi sedimen secara optimal.

### Saran

Pola arus sekunder dan pengaruh aliran yang diperoleh dari pengukuran aliran saluran pada *flume* dengan pengujian laboratorium. Namun, penyimpangan studi aliran saluran terbuka model fisik untuk rasio aspek yang serupa. Untuk alasan ini, direkomendasikan untuk kalibrasi dan validasi studi model numerik dan matematik. Secara keseluruhan, kebaruan penelitian ini memberikan karakterisasi yang cukup komprehensif dari aliran super kritis tinggi 3D pada rasio aspek yang sangat rendah. Untuk memberikan kontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang dinamika arus sekunder dan pengaruh potensialnya pada tegangan geser pada dasar, dan karenanya angkutan sedimen serta mekanisme hidro-abrasi yang terjadi pada struktur hidraulik. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung tindak lanjut studi tentang berbagai kekasaran pada dasar saluran pada arus sekunder pada kondisi hidraulik yang serupa. Untuk mengefisiensi debit penggelontoran disarankan dilakukan pemodelan fisik untuk memperoleh debit yang optimum sehingga tidak selalu debit penggelontoran yang besar dapat menggelontorkan sedimen secara maksimal, bilangan *Froude* dan *Reynolds* sangat menentukan sehingga dapat diperoleh parameter hidraulik yang tepat. Karena nilai gradien kecepatan di sepanjang arah kecepatan itu sendiri akan memberikan ukuran kecepatan geser yang baik ke arah tertentu.

### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada segenap pengajar pada KK-TSA FTSL dan Teknisi Laboratorium Rekayasa Sumber Daya Air – Fluida Institut Teknologi Bandung atas bantuan fasilitas dan peralatan uji.

### Daftar Referensi

- Balachandar, R., dan Bhuiyan, F. (2007): Higher-Order Moments of Velocity Fluctuations in an Open-Channel Flow with Large Bottom Roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(1), 77–87. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(77))
- Basse, N. T. (2023): An Algebraic Non-Equilibrium Turbulence Model of the High Reynolds Number Transition Region, *Water*, **15**(18), 3234. <https://doi.org/10.3390/w15183234>
- Chiodi, F., Claudin, P., dan Andreotti, B. (2014): A two-phase flow model of sediment transport: transition from bedload to suspended load, *Journal of Fluid Mechanics*, **755**, 561–581. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.422>
- Cuthbertson, A. J., dan Ervine, D. A. (2007): Experimental Study of Fine Sand Particle Settling in Turbulent Open Channel Flows over Rough Porous Beds, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(8), 905–916. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:8\(905\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(905))

- García-Ramos, F. J., Badules, J., Boné, A., Gil, E., Aguirre, A. J., dan Vidal, M. (2018): Application of an Acoustic Doppler Velocimeter to Analyse the Performance of the Hydraulic Agitation System of an Agricultural Sprayer, *Sensors*, **18**(11), 3715. <https://doi.org/10.3390/s18113715>
- Huang, C.-C., Lai, J.-S., Lee, F.-Z., dan Tan, Y.-C. (2018): Physical Model-Based Investigation of Reservoir Sedimentation Processes, *Water*, **10**(4), 352. <https://doi.org/10.3390/w10040352>
- Isnaeni, M. (2023): Experiments Of Geometric Shape Of Sediment Trap Rectangular And Vortex Settling Desilting Basin, *International Journal of GEOMATE*, **24**(106). <https://doi.org/10.21660/2023.106.s8650>
- Isnaeni, M., Buhyatil Kubra, H., Sukadi, Sopandi, Triyadi, dan Chairunnisa (2022): Perilaku Pengendapan Sedimen Sphere Particles yang Mengandung Fiber dalam Aliran Sungai Ciasem yang Terkontaminasi Limbah Industri, *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 105–116. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v2i2.47>
- Kumar, N., dan Malipatil, A. S. (2014): CFD Analysis of Vortex Tube for Various Cross Sectional Nozzles, **2**.
- Lepesqueur, J., Hostache, R., Martínez-Carreras, N., Montargès-Pelletier, E., dan Hissler, C. (2019): Sediment transport modelling in riverine environments: on the importance of grain-size distribution, sediment density, and suspended sediment concentrations at the upstream boundary, *Hydrology and Earth System Sciences*, **23**(9), 3901–3915. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3901-2019>
- Manes, C., Pokrajac, D., dan McEwan, I. (2007): Double-Averaged Open-Channel Flows with Small Relative Submergence, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(8), 896–904. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:8\(896\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(896))
- Otsuka, J., Saruwatari, A., dan Watanabe, Y. (2017): Vortex-induced suspension of sediment in the surf zone, *Advances in Water Resources*, **110**, 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.021>
- Ramirez, R., Avila, E., Lopez, L., Bula, A., dan Duarte Forero, J. (2020): CFD characterization and optimization of the cavitation phenomenon in dredging centrifugal pumps, *Alexandria Engineering Journal*, **59**(1), 291–309. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.041>
- Sudarningsih, S., Maulana, L., Bijaksana, S., Hafidz, A., Pratama, A., Widodo, W., dan Iskandar, I. (2017): Magnetic CHARACTERIZATION OF SAND AND BOULDER SAMPLES FROM CITARUM RIVER AND THEIR ORIGIN, *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, **49**(2), 116. <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2017.49.2.2>

## ANALISIS PENGELOLAAN PENGENDALIAN BANJIR MELALUI PEMBANGUNAN KOLAM RETENSI DI SUNGAI CIJAMBE KABUPATEN BEKASI

Gerri Ramdhan Dazali<sup>1</sup> dan Alif Lamra Amal Putra<sup>2</sup>

<sup>12</sup>Balai Besar Wilayah Sungai Ciliwung Cisadane

<sup>1</sup>geriridid@yahoo.com, <sup>2</sup>lamra.alif@gmail.com

Pemasukan: 29 Juni 2024 Perbaikan: 29 September 2024 Diterima: 10 Desember 2024

### Intisari

Banjir tahunan Sungai Cijambe terjadi akibat perubahan tata guna lahan dari lahan terbuka hijau menjadi kawasan pemukiman, dan kawasan niaga. Perkembangan kawasan perkotaan yang terus meningkat berkorelasi negatif terhadap kemampuan infiltrasi air hujan DAS Cijambe. Perubahan besaran banjir ditinjau berdasarkan parameter *Curve Number* (CN) yang menunjukkan terjadi peningkatan sejak tahun 2009 hingga 2021, dari 77.68, menjadi 81.72. Limpasan air hujan yang semakin besar tidak diimbangi dengan kapasitas sungai yang cenderung semakin mengecil. Salah satu titik lokasi penyebab banjir di Sungai Cijambe adalah interseksi sungai dan jalan Tol Jakarta-Cikampek Km-19. Penyempitan penampang sungai dan peningkatan debit banjir pada gorong-gorong jembatan (2 buah ukuran 5,0 x 4,5 m) menyebabkan terjadinya efek *bottleneck* di lokasi tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis kebutuhan kolam retensi, dengan tolak ukur debit banjir  $Q_{25}$  dapat mengalir tanpa hambatan pada lokasi yang ditinjau. Analisis debit banjir dilakukan melalui model hidrologi yang kemudian dikomparasikan dengan kondisi eksisting. Hasil pemodelan hidrologi dan hidraulik berdasarkan usulan penanganan menunjukkan perlu dibangun 5 buah kolam retensi yang tersebar di hulu interseksi (2 di Kota Bekasi dan 3 di Kabupaten Bekasi) dengan total volume tampungan sebesar 421,541 m<sup>3</sup>. Hidrograf banjir menunjukkan debit rencana  $Q_{25}$  semula sebesar 129,98 m<sup>3</sup>/s kemudian tereduksi sebesar 34.61% menjadi 85.42 m<sup>3</sup>/s. Hasil pemodelan hidraulik menunjukkan dengan penurunan debit banjir  $Q_{25}$ , elevasi Muka Air Banjir (MAB) sudah dapat melalui gorong-gorong tanpa ada hambatan. Melalui hasil analisis disimpulkan, pengendalian banjir di Sungai Cijambe dapat ditingkatkan melalui pembangunan kolam retensi melalui pengelolaan debit banjir sub-DAS Cijambe selama periode banjir puncak.

Kata Kunci: Banjir, Limpasan, Kapasitas Sungai, *Bottleneck* dan Kolam Retensi.

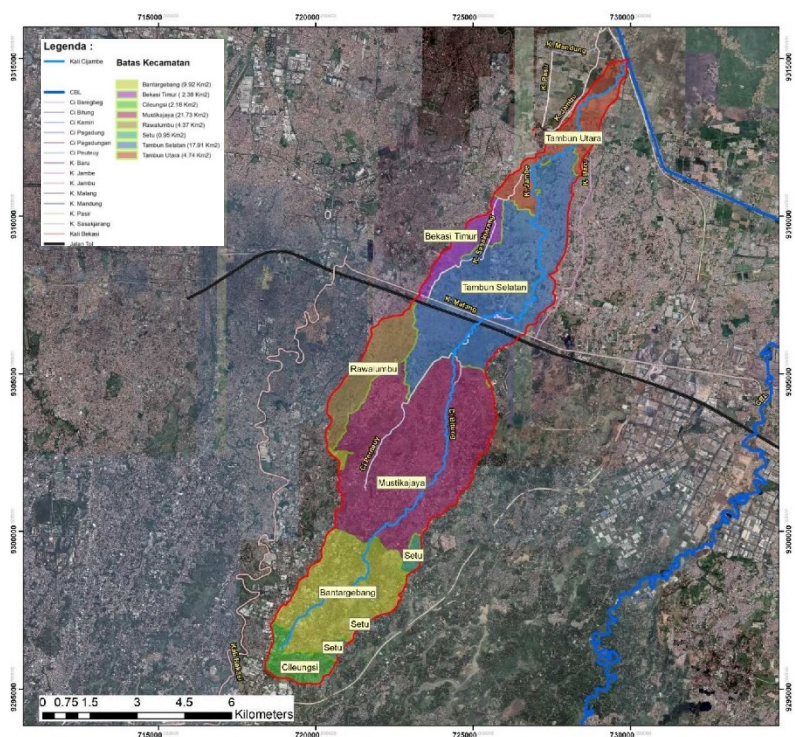
### Latar Belakang

Permasalahan banjir pada umumnya terkait erat dengan perkembangan kawasan perkotaan yang selalu diiringi dengan peningkatan jumlah penduduk, aktifitas dan kebutuhan lahan, baik untuk permukiman maupun kegiatan ekonomi. Karena keterbatasan lahan di perkotaan, terjadi intervensi kegiatan perkotaan pada lahan yang seharusnya berfungsi sebagai daerah konservasi dan ruang terbuka hijau.

Akibatnya, daerah resapan air semakin sempit sehingga terjadi peningkatan aliran permukaan dan erosi. Hal ini menyebabkan pendangkalan (penyempitan), sehingga air meluap dan memicu terjadinya bencana banjir.

Kejadian banjir di wilayah permukiman juga dipicu oleh kondisi drainase yang buruk. Tidak terkoneksinya saluran-saluran yang ada sehingga menyebabkan aliran air tidak mengalir ke tempat seharusnya dan saat musim hujan menyebabkan banjir. Penanganan sementara yang telah dilakukan oleh Pemerintah Kota Bekasi dan Pemerintah Kabupaten Bekasi yaitu dilaksanakan kegiatan normalisasi dan pematuan saluran, akan tetapi permasalahan banjir dan genangan belum teratasi dengan maksimal, dibutuhkan studi lebih lanjut mengenai penyebab dan penanganan pengelolaan banjir yang terjadi di Sungai Cijambe. Melalui analisis ini akan disampaikan hasil indentifikasi penyebab banjir dan rekomendasi penanganan yang optimal.

DAS Cijambe merupakan salah satu sub-DAS Bekasi yang berlokasi di Jabodetabek-Punjur dengan luasan 8.877 Ha atau sepanjang 32 Km, membentang dari Kabupaten Bogor melintasi Kota Bekasi serta Kabupaten Bekasi dan bermuara di CBL (Cikarang Bekasi Laut). DAS Cijambe berjarak 19 Km ke arah timur dari 0 Km Jakarta. Pada bagian hulu terdapat 2 pengolahan sampah yaitu Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Bantar Gebang untuk DKI yang merupakan open pit terluas di dunia, dan Tempat Pengolahan Akhir (TPA) Sumur Batu untuk Kota Bekasi.



**Gambar 1.** Peta DAS Cijambe dengan Batas Administrasi Kecamatan.

Pembangunan secara masif yang dilakukan oleh pemerintah maupun pengusaha, baik pembangunan untuk pusat perbelanjaan, perhotelan, apartemen, Gedung

perkantoran juga untuk infrastruktur lain seperti pembangunan fasilitas kereta cepat, pelebaran jalan, pembangunan flyover, pembangunan jalan tol, pembangunan stasiun baru untuk commuter line yang tentunya akan memiliki dampak kedepannya. Pembangunan secara masif tersebut tentunya merubah penggunaan lahan secara massif, banyak lahan yang sebelumnya berupa rawa-rawa maupun lahan pertanian dan perkebunan beralih fungsi sehingga menimbulkan hal negatif salah satu contohnya yaitu bencana banjir.

Ketika hujan turun, sebagian dari hujan akan meresap ke dalam tanah dan sebagian lagi akan mengalir ke permukaan. Besarnya kehilangan hujan dapat di perkirakan melalui analisis kehilangan air dengan menggunakan metode NRCS/SCS bergantung dari parameter CN (*Curve Number*). Karakteristik DAS secara umum yang mempengaruhi parameter SCS-CN adalah jenis tanah, jenis tutupan vegetasi, penggunaan lahan, kondisi hidrologi, kondisi kelengasan tanah sebelumnya (AMC), dan iklim pada DAS.

Berdasarkan analisis data terdahulu diperoleh bahwa terjadi peningkatan parameter kehilangan air (CN) dari tahun 2009 hingga tahun 2021 sebesar 4.04% semula 77.86% menjadi 82,65%. Pada kondisi eksisting, analisis dilakukan dengan mempertimbangkan Tata Guna lahan pada tahun 2009 dan berdasarkan tata guna lahan RDTR 2021, sehingga dari 2 (dua) kondisi tersebut dapat diperoleh gambaran terjadinya peningkatan debit banjir rencana akibat perubahan tata guna lahan.

**Tabel 1.** Rekapitulasi Analisis Nilai CN Kondisi Tata Guna Lahan tahun 2009

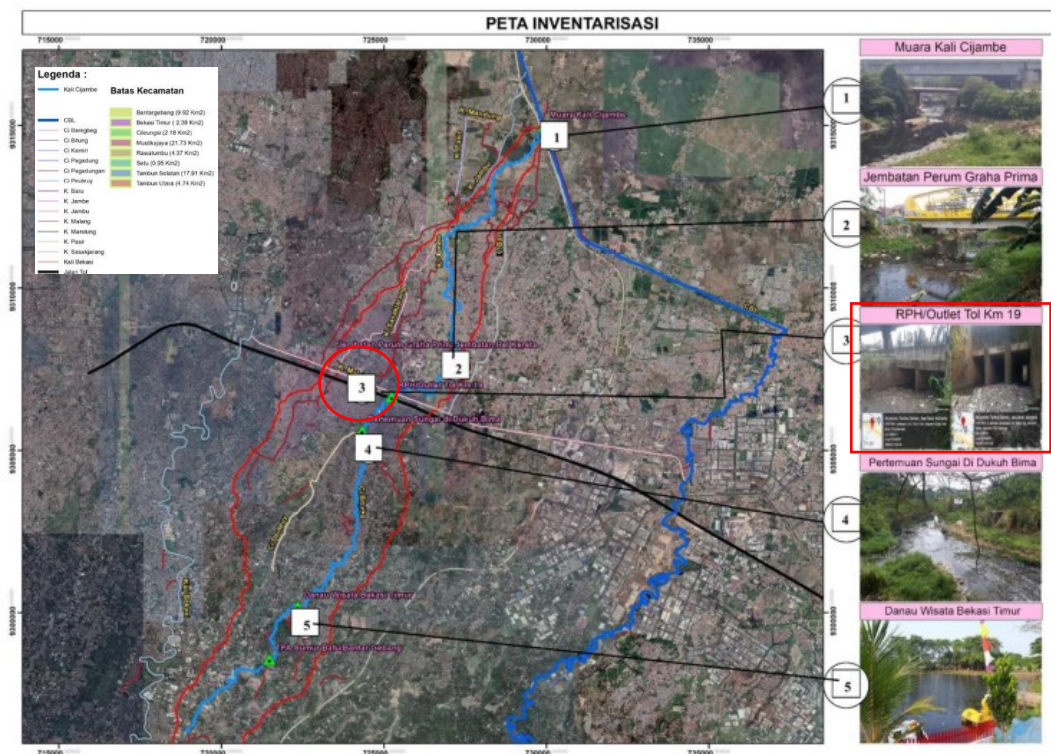
<b>Nama Sub DAS</b>	<b>CN</b>	<b>S</b>	<b>IA</b>	<b>Luas (km<sup>2</sup>)</b>
Kali Jambe 1	82.01	50.36	11.15	25.44
Kali Jambe 2	73.77	84.49	18.07	10.40
Kali Jambe 3	72.11	95.08	19.65	5.04
Kali Sasak	80.89	84.88	12.28	13.86
Kali Pete	80.89	57.38	12.00	9.54
	<b>77.86</b>	<b>74.44</b>	<b>14.63</b>	<b>12.86</b>

**Tabel 2.** Rekapitulasi Analisis Nilai CN Komposit Kondisi Tata Guna Lahan RDTR tahun 2021

<b>Nama Sub DAS</b>	<b>CN</b>	<b>S</b>	<b>IA</b>	<b>Luas (km<sup>2</sup>)</b>
Kali Jambe 1	84.63	46.14	9.23	25.49
Kali Jambe 2	81.74	56.72	11.34	8.22
Kali Jambe 3	75.29	83.38	16.68	5.04
Kali Pete	83.54	50.03	10.01	9.59
Kali Sasak Atas	76.06	79.95	15.99	3.02
Kali Sasak Kiri	85.16	44.28	8.86	1.88
Kali Sasak Tengah	90.48	26.73	5.35	2.26
Tol Sisi Kanan	82.90	52.38	10.48	2.09
Tol Sisi Kiri	83.75	49.28	9.86	5.28
Tol Sisi Tengah	82.91	52.35	10.47	1.68
<b>Rerata</b>	<b>82.65</b>	<b>54.12</b>	<b>10.82</b>	<b>6.45</b>

Peningkatan debit banjir juga bertolak belakang dengan kapasitas Sungai Cijambe yang tiap tahun mengalami penurunan akibat penyempitan maupun sedimentasi.

Sehingga ketika banjir datang, beberapa segmen yang telah terlampaui kapasitasnya mengalami luapan. Berdasarkan informasi kegiatan operasi dan pemeliharaan, daerah yang sering terjadi banjir ketika musim hujan yaitu: Kelurahan Mustika Jaya, Kelurahan Peduren, Kelurahan Cimuning, Kelurahan Jatimulya, Kelurahan Lambang Sari, Kelurahan Wareng dan Perum Pondok Timur Indah.



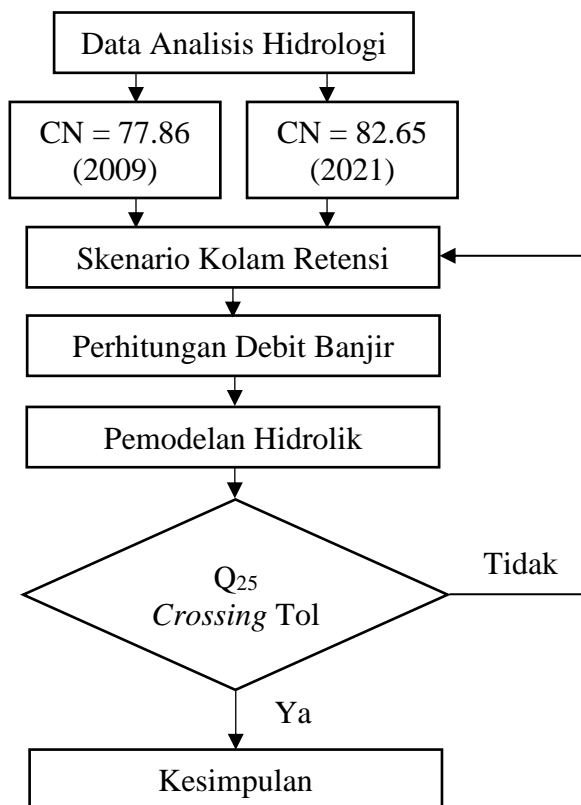
**Gambar 2.** Peta Inventarisasi Kondisi Sungai Cijambe

Salah satu titik penyebab banjir paling signifikan di sungai cijambe berada pada lokasi *crossing* antara Sungai Cijambe dan Jembatan Tol Jakarta-Cikampek Km 19. Terjadi penyempitan penampang sungai akibat gorong-gorong jembatan dengan dimensi 5,0 x 4,5 m (2 buah) yang menyebabkan efek *bottle neck* pada aliran sungai. Debit banjir kala ulang 25 tahun yang meningkat, menyebabkan tidak mempunya dimensi gorong-gorong untuk menampung debit banjir yang lebih besar. Menanggapi hal tersebut, dibutuhkan suatu upaya pengelolaan debit banjir rencana agar debit banjir dari hulu sungai tetap dapat melauai titik *crossing* tanpa terjadi luapan di jalan Tol.

**Metodologi Studi**

Analisis dilakukan melalui pemodelan hidraulik dari kombinasi jumlah kolam retensi dengan tolak ukur elevasi debit banjir kala ulang 25 tahun dapat mengalir melalui dimensi gorong-gorong Tol Jakarta-Cikampek. Variabel utama dalam perhitungan debit rencana adalah koefisien kehilangan Air (CN) tahun 2021. Dilakukan pemodelan analisis debit banjir dengan bantuan *software* HEC-HMS. Tidak terdapat rekaman data pemantauan Tinggi Muka Air (TMA) maupun rekaman data debit pada Sungai Cijambe, sehingga hasil pemodelan debit

dikalibrasi dengan data debit banjir rencana studi terdahulu. Pemodelan hidraulik kemudian dilakukan sehingga diperoleh debit *outflow* optimum selama puncak banjir berlangsung. Analisis dihentikan setelah diperoleh debit banjir  $Q_{25}$  dengan elevasi yang sesuai. Alur analisis sebagai berikut.



**Gambar 3.** Flow Chart Metodologi.

Pemodelan disusun guna memantapkan desain penanggulangan yang diusulkan. Hasil pemodelan bertujuan untuk memprediksi dampak negatif yang mungkin timbul akibat adanya perubahan penampang sungai. Selain itu, juga hasil pemodelan ini dapat digunakan untuk menentukan muka air rencana yang didesain pada penanggulangan masalah banjir. Kemudian akan dilakukan perbandingan debit rencana antara hasil analisis dengan studi terdahulu. Skenario pemodelan yang disusun dalam studi ini adalah sebagai berikut :

1. Kondisi Eksisting, digunakan penampang sungai existing.
2. Kondisi Penanganan melalui pembangunan 5 buah kolam retensi di hulu titik *Crossing Tol*.

**Hasil Studi dan Pembahasan**

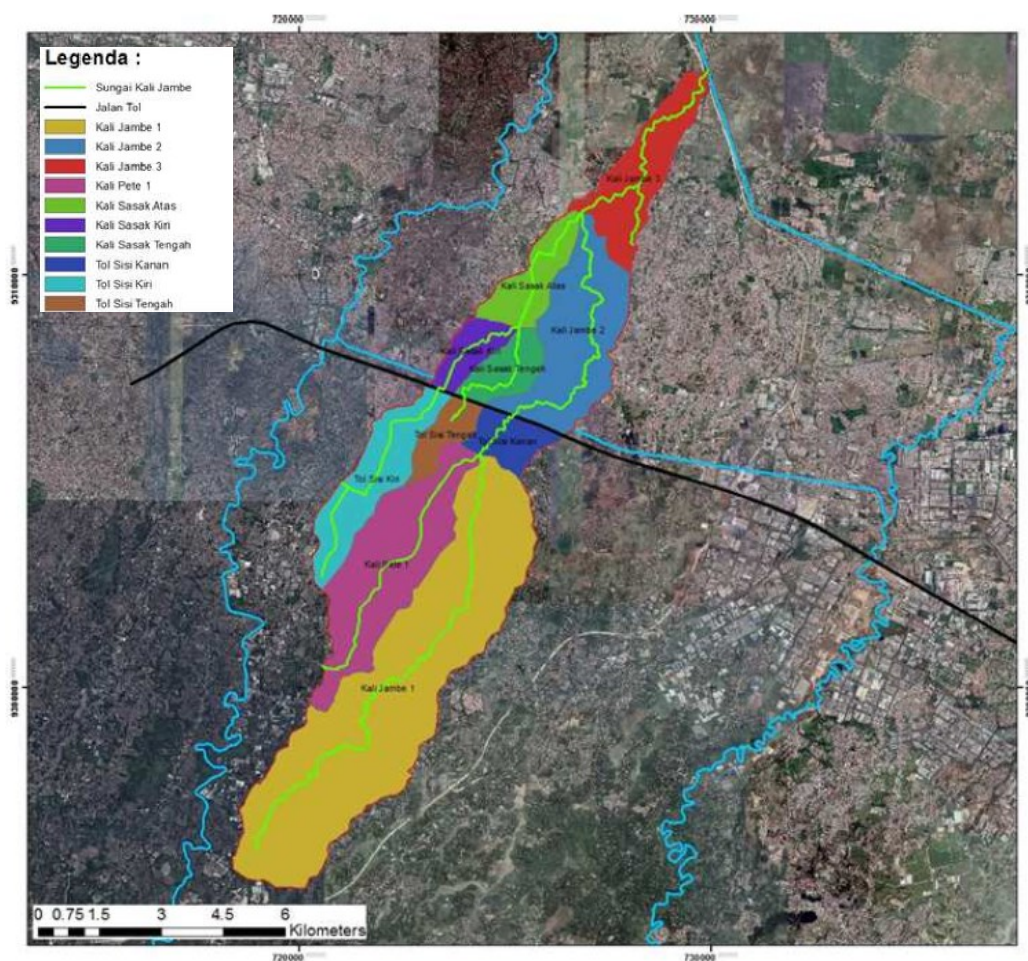
Analisis debit banjir rencana dilakukan dengan bantuan software HEC-HMS. Analisis dilakukan terhadap 2 (dua) kondisi yaitu kondisi eksisting dan kondisi penanganan khususnya melalui pembangunan kolam retensi. Pada kondisi eksisting

dan penanganan, analisis dilakukan dengan mempertimbangkan tata guna lahan RDTR 2021.

Usulan penanganan dengan tujuan bahwa kolam retensi akan mampu mereduksi besarnya debit banjir rencana. Pembangunan kolam retensi berfungsi untuk mereduksi debit puncak, sehingga sungai Cijambe terkhusus lokasi *Crossing Tol* tidak akan menerima debit yang melebihi kapasitasnya.

Secara garis besar DAS Cijambe terdiri dari 1 (satu) sungai utama dan 2 (dua) anak sungai, yakni kali Cijambe, Kali Cipete dan Kali Sasak. Analisis debit banjir rencana dilakukan dengan cara multi basin, dimana DAS kali Cijambe dibagi menjadi beberapa sub Basin yang disesuaikan dengan kebutuhan analisis hidraulik. Pembagian sub DAS Cijambe dibuat sebagai berikut :

1. Sub DAS Kali Cijambe 1
2. Sub DAS Kali Cijambe 2
3. Sub DAS Kali Cijambe 3
4. Sub DAS Kali Cipete
5. Sub DAS Kali Sasak
6. Crossing Tol



Gambar 4. Peta Pembagian Sub-DAS Cijambe.

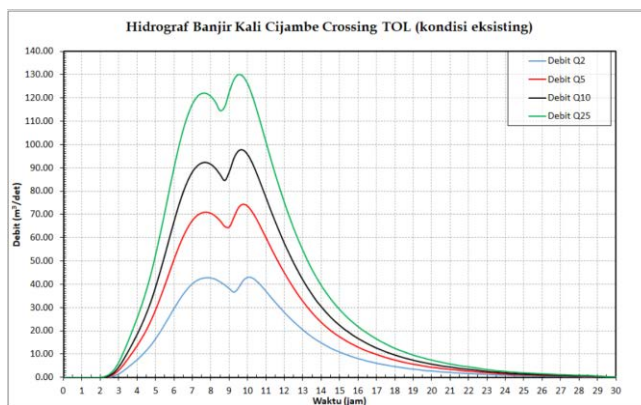
Pada kondisi eksisting skema sungai Cijambe dapat diterangkan sebagai berikut :

1. Pada kondisi eksisting ruas sungai Cijambe 1, terdapat 1 (satu) buah kolam retensi eksisting, sehingga pada ruas ini dibagi menjadi 2 (dua) buah sub DAS yakni Sub DAS Kali Jambe 1.a dan sub DAS Kali Jambe 1.b.
2. Pada ruas sungai Cipete dibuat 1 (satu) buah sub DAS yakni sub DAS Kali Cipete.
3. Pada ruas sungai Cijambe 2, terdapat beberapa beberapa bangunan persilangan yang relative berdekatan, sehingga pada ruas ini dibagi menjadi 2 yakni sub DAS *Crossing TOL* dan Kali Cijambe 2.
4. Pada ruas sungai kali Sasak dibuat 1 (satu) buah sub DAS yakni sub DAS kali Sasak.
5. Pada ruas sungai Cijambe 3 dibuat 1 (satu) buah sub DAS yakni sub DAS Kali Cijambe 3.
6. Pertemuan antara Kali Jambe 1 dengan Cipete disebut Juncion 1, pertemuan antara Kali Jambe 2 dengan Kali Sasak disebut Junction 2.
7. Pertemuan Kali Jambe 3 dengan CBL disebut Sink 1.

Dari hasil perhitungan debit banjir kondisi eksisting (tanpa penanganan) diperoleh debit banjir kala ulang 25 tahun sebesar 129,98 m<sup>3</sup>/det. Rekapitulasi Debit Banjir Rencana dan Hidrograf banjir dapat dilihat pada **Tabel 3**. Grafik hidrograf banjir sungai cijambe di *crossing tol* pada kondisi eksisting debit kala ulang 2, 5, 10, dan 25 tahun diilustrasikan pada **Gambar 5**.

**Tabel 3.** Rekapitulasi Debit Banjir Rencana DAS Cijambe Kondisi Eksisting (CN = 82.65, RDTR Tahun 2021)

Nama DAS	Luas (km <sup>2</sup> )	Debit Puncak (m <sup>3</sup> /dtk)					
		Q <sub>2</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>100</sub>
Kali Jambe 1.b	20.23	27.49	45.33	58.88	77.77	93.14	109.57
Kali Cipete	9.55	15.49	25.93	33.92	45.08	54.18	63.92
Kali Jambe 1.a	5.21	14.77	24.45	31.77	41.95	50.25	59.23
KR - Eksisting	5.21	13.44	23.13	30.5	40.47	48.42	56.68
R - Jambe 1.a	5.21	13.44	23.13	30.5	40.47	48.42	56.68
Junction - 1	34.99	43.06	74.08	97.35	129.58	155.33	182.63
R - TOL	34.99	42.83	73.9	97	129.21	155.18	182.52
Tol Sisi Kanan	2.08	6.09	10.32	13.55	18.06	21.82	25.85
<b>J - Tol Kanan</b>	37.07	43.03	74.28	97.49	<b>129.98</b>	156.09	183.57
R - Jambe 2	37.07	42.93	74.19	97.47	129.84	156	183.53
Kali Sasak Kiri	6.97	10.49	17.34	22.55	29.82	35.74	42.06
Kali Sasak Tengah	3.93	9.9	15.98	20.55	26.86	31.97	37.41
J - Sasak	10.9	18.45	30.07	38.91	51.22	61.22	71.9
R - Sasak	10.9	18.43	30.07	39.88	51.13	61.08	71.73
Kali Jambe 2	8.25	11.88	20.3	26.79	35.91	43.43	51.52
Kali Sasak Atas	2.96	4.28	7.92	10.87	15.13	18.67	22.52
Junction - 2	59.18	64.68	107.02	139.3	184.59	221.51	261.02
R - Jambe 3	59.18	64.53	106.96	139.27	184.42	221.2	260.55
Kali Jambe 3	5.04	5.72	10.66	14.69	20.05	25.35	30.61
Sink - 1	64.21	65.47	108.64	141.54	187.52	224.99	265.08



**Gambar 5.** Hidrograf Banjir Sungai Cijambe Crossing Tol (Kondisi Eksisting) per Kala Ulang  $Q_2$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{10}$  dan  $Q_{25}$ .

Besaran debit banjir rencana yang telah diperoleh kemudian dikalibrasi dengan debit banjir rencana Detail Desain Bendung Pengendali Banjir Kali Bekasi-CBL tahun 2020. Perbandingan hasil pemodelan debit banjir untuk masing-masing kala ulang  $Q_2$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{10}$  dan  $Q_{25}$  dapat dilihat pada tabel berikut.

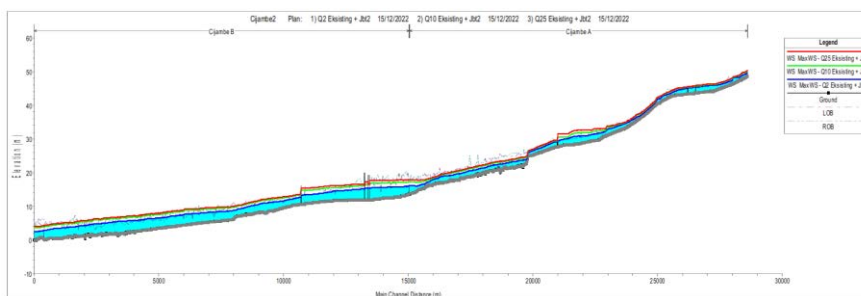
**Tabel 4.** Kalibrasi Debit Banjir Rencana

Debit Banjir Rencana	Debit Puncak ( $m^3/dtk$ )			
	$Q_2$	$Q_5$	$Q_{10}$	$Q_{25}$
Hasil Analisis	43.03	74.28	97.49	<b>129.98</b>
DD Bendung Pengendali Banjir, 2020	77.18	98.69	127.12	<b>131.57</b>

Dapat dilihat bahwa kedua hasil pemodelan terutama pada debit banjir kala ulang 25 tahun memiliki nilai yang saling mendekati sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa pemodelan yang dilakukan sudah merepresentasikan keadaan yang sesungguhnya.

Analisis dilanjutkan dengan melakukan pemodelan hidraulik dengan data hidrologi hasil analisis dan data sekunder yang diperoleh dari BBWS Ciliwung Cisadane meliputi, data pengukuran topografi, data sungai dan bangunan eksisting.

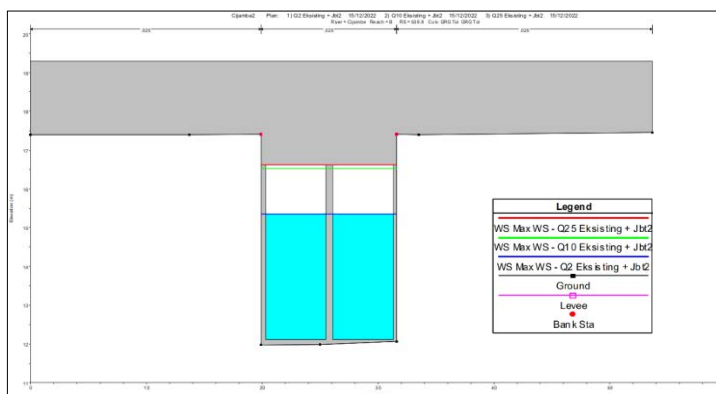
Pemodelan ini dimaksudkan untuk memperoleh gambaran mengenai sebaran banjir Kali Cijambe Kondisi Eksisting yang akan terjadi, masing-masing dicoba dengan cara mengalirkan debit 2 tahunan, 5 tahunan, 10 tahunan dan debit 25 tahunan. Hasilnya dapat dilihat pada gambar di berikut ini.



**Gambar 6.** Hasil Pemodelan Sungai Cijambe pada Kondisi Eksisting dengan Debit  $Q_2$ ,  $Q_{10}$  dan  $Q_{25}$ .

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sungai Kali Cijambe, pada beberapa ruas sungai Cijambe tidak mampu (meluap) mengalirkan debit dengan kala ulang 25 tahunan, termasuk salah satunya lokasi *Crossing Tol Jakarta- Cikampek Km. 19* sehingga diperlukan upaya pengendalian banjir.

Untuk memberikan gambaran mengenai kondisi luapan yang terjadi, dapat dilihat beberapa penampang sungai Cijambe di gorong-gorong *Crossing Tol* Kondisi Eksisting seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 7.** Muka Air Sungai Cijambe di Gorong-gorong *Crossing Tol* (Kondisi Eksisting).

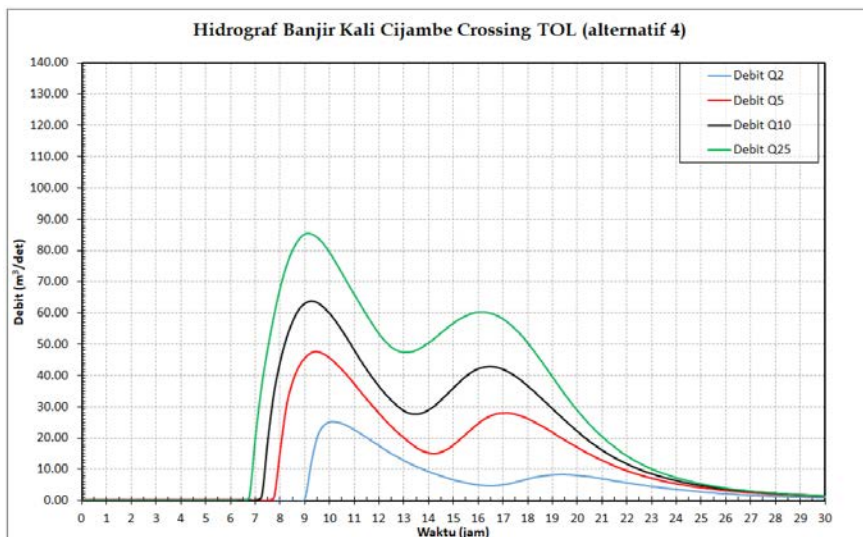
Ilustrasi penampang gorong-gorong menunjukkan elevasi air pada banjir kala ulang 25 tahun berada pada elevasi +16,5 yang merupakan *top* dari gorong-gorong. Sedangkan, debit banjir yang dapat lewat adalah debit banjir kala ulang 10 tahun namun dengan *freeboard* kurang dari 15 cm.

Uji Coba pemodelan dilakukan dengan skenario pembangunan 2 buah kolam retensi di Kota Bekasi (KR 1 dan 4) serta 3 buah kolam retensi di Kabupaten Bekasi (KR 5, 6 dan 7) dengan total volume tampungan sebesar 421,541 m<sup>3</sup>. Ilustrasi sebaran kolam retensi dan kebutuhan tampungannya ditunjukkan pada peta berikut



**Gambar 8.** Skema Sebaran Kolam Retensi Pengelolaan Banjir Sungai Cijambe.

Melalui penanganan pengelolaan banjir dengan pembangunan kolam retensi, debit puncak dapat tereduksi sebesar 34.61% dari kondisi eksisting 129,98 m<sup>3</sup>/s menjadi 85.42 m<sup>3</sup>/s diilustrasikan kedalam hidrograf berikut.

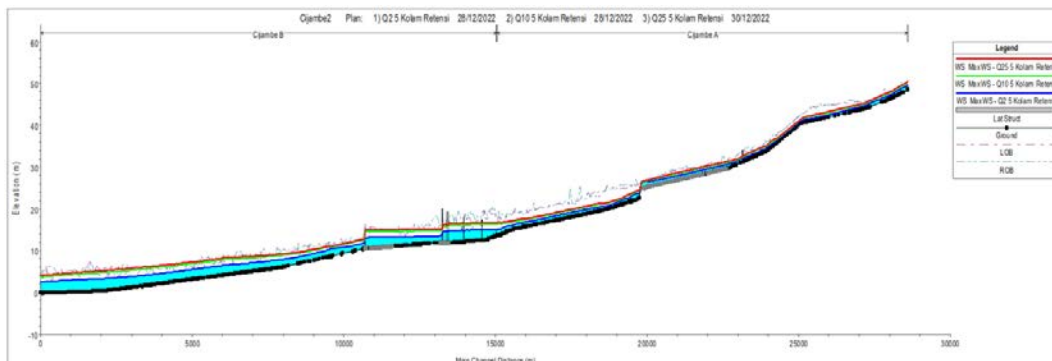


**Gambar 9.** Hidrograf Banjir Kali Cijambe Crossing TOL per Kala Ulang Q<sub>2</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>10</sub> dan Q<sub>25</sub>

**Tabel 5.** Rekapitulasi Perbandingan Hasil Perhitungan Debit Banjir Rencana Sebelum dan Setelah Penanganan

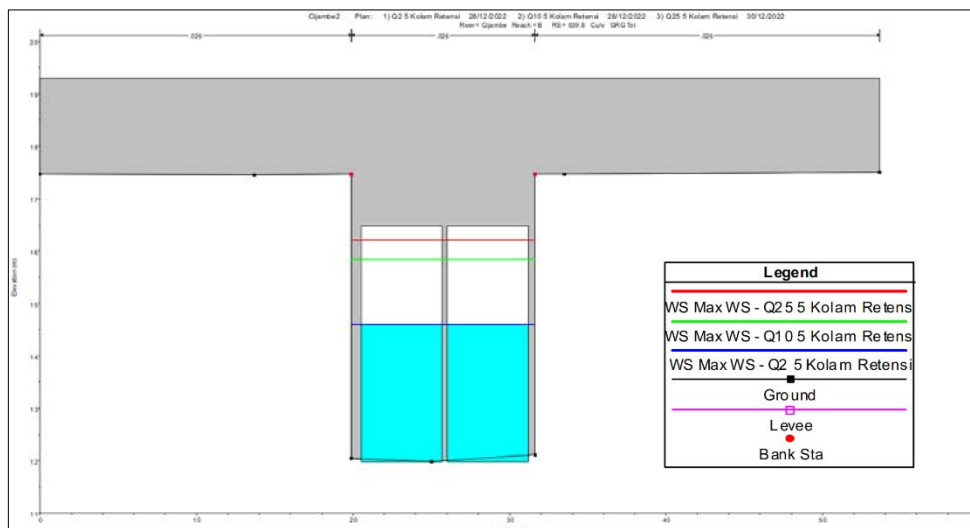
Titik Tinjau	Luas DTA (km <sup>2</sup> )	Eksisting		Penanganan	
		Q <sub>10</sub>	Q <sub>25</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>25</sub>
Sub DAS Kali Jambe 1.b	25.44	89.38	118.24	41.71	56.76
Sub DAS Kali Jambe 1.a					
Sub DAS Kali Jambe a.1	5.21	31.8	42.0	31.8	42.0
Kolam Retensi – Eksisting (11.000 m <sup>2</sup> )		30.5	40.5	30.5	40.5
Sub DAS Kali Jambe a.2	20.23	58.9	77.8		
Sub DAS Kali Jambe 1.b	7.02			34.2	45.2
Kolam Retensi 1 (35.262 m <sup>2</sup> )				45.4	60.2
Sub DAS Kali Jambe 1.c	2.97			19.3	25.5
Kolam Retensi 2 (55.660 m <sup>2</sup> )				37.9	52.4
Sub DAS Kali Jambe 1.d	10.23			44.2	58.3
Kolam Retensi 3 (18.087 m <sup>2</sup> )				41.9	56.8
Sub DAS Cipete	9.55	33.9	45.1	28.9	38.4
Sub DAS Cipete 1	2.71			15.8	21.0
Kolam Retensi 4 (40.000 m <sup>2</sup> )				3.2	7.8
Sub DAS Cipete 2	6.84			28.9	38.4
Kolam Retensi 5 (3.372 m <sup>2</sup> )				28.9	38.4
<b>Junction - 1</b>	<b>34.98</b>	<b>97.4</b>	<b>129.6</b>	<b>65.9</b>	<b>87.2</b>
Sub DAS Tol Sisi Kanan	2.08	13.6	18.1	13.6	18.1
Kolam Retensi 6 (37.516 m <sup>2</sup> )				64.2	85.9
Kolam Retensi 7 (11.149 m <sup>2</sup> )				64.0	85.5
<b>Junction Crossing Tol</b>	<b>37.07</b>	<b>97.5</b>	<b>129.98</b>	<b>63.9</b>	<b>85.4</b>

Proses pemodelan dilakukan kembali dengan hasil debit banjir penangan setelah menambahkan kolam retensi. Sehingga diperoleh Muka Air Banjir (MAB)  $Q_{25}$  di lokasi *crossing* TOL sebesar +16,2 dengan *freeboard* sebesar 30 cm.



Gambar 82. Hasil Pemodelan Sungai Kali Cijambe pada Kondisi eksisting dengan debit Q2, Q10 dan Q25 (alternatif Penanganan 4)

**Gambar 10.** Hasil Pemodelan Sungai Cijambe pada Kondisi Eksisting dengan Debit  $Q_2$ ,  $Q_{10}$  dan  $Q_{25}$ .



**Gambar 11.** Muka Air Sungai Cijambe di Gorong-gorong Crossing Tol

### Kesimpulan dan Saran

#### Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Kapasitas kali Cijambe eksisting tidak mampu mengalirkan debit dengan periode ulang 25 tahunan.
2. Hasil pemodelan hidraulik menunjukkan perlu dibangun 5 buah kolam retensi yang tersebar di hulu interseksi Tol dengan total volume tampungan sebesar 421,541 m<sup>3</sup>.

3. Diperoleh penurunan debit rencana  $Q_{25}$  pada lokasi *crossing* TOL sebesar 34.61%, dimana semula sebesar 129,98  $m^3/s$  kemudian tereduksi menjadi 85.42  $m^3/s$ .
4. Penurunan Muka Air Banjir (MAB) lokasi *crossing* TOL dari semula elevasi +16,5 (elevasi *top* dari gorong-gorong) menjadi +16,2 sehingga debit banjir  $Q_{25}$  sudah dapat melalui gorong-gorong tanpa ada hambatan

### Saran

Studi ini terbatas pada analisis debit aliran sungai dan memerlukan beberapa studi lanjutan untuk mengoptimalkan pengendalian banjir pada ruas sungai cijambe. Beberapa saran yang diberikan antara lain

1. Salah satu permasalahan yang memperburuk kondisi luapan banjir Sungai Cijambe adalah sampah yang terbawa ke dalam aliran sungai. Untuk mencapai pengelolaan banjir yang optimal perlu dilakukan penelitian lanjutan terkait pengelolaan sampah yang terbuang ke Sungai Cijambe.
2. Analisis lanjutan mengenai pelebaran dimensi atau penambahan jumlah gorong-gorong Tol Jakarta – Cikampek km 19 yang disertai dengan alternatif pelebaran penampang sungai sisi hilir dari lokasi *crossing* tol sampai pertemuan Cikarang Bekasi Laut (CBL).

### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada Balai Besar Wilayah Sungai Ciliwung Cisadane yang telah membantu dalam penyediaan data yang digunakan dalam penelitian ini.

### Daftar Referensi

- Bambang Triatmodjo., 2010. Hidrologi Terapan, Beta Offset, Yogyakarta.
- Suprpto., 2016. Hidrologi dan Neraca Air, Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, Bandung.
- Soemarto., 1987. Hidrologi Teknik, Usaha Nasional, Surabaya.
- Tegallega Jaya., 2022. Detail Desain Pengendalian Banjir Kali Cijambe, BBWS Ciliwung Cisadane, Jakarta.
- Supriyono, B., 2008. Dasar-Dasar Hidrologi Terapan, Erlangga, Jakarta.
- Hantoro, W. S., & Mulyadi., 2007. **Teknik Hidraulika**, ITS Pres, Surabaya.
- Kodoatie, R. J., & Sjarief, R., 2010. **Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu**, Andi, Yogyakarta.

## ANALISIS PERUBAHAN PEREDAMAN ENERGI AKIBAT PENURUNAN DASAR PEREDAM ENERGI MENGGUNAKAN UJI MODEL FISIK HIDRAULIK

Syaiful Anam<sup>1</sup>, Very Dermawan<sup>2</sup>, dan Dian Sisingih<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Program Teknik Sipil, Universitas Brawijaya

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Pengairan, Universitas Brawijaya

\*massyaifulanam@gmail.com

Pemasukan: 30 Juni 2024    Perbaikan: 30 September 2024    Diterima: 18 Desember 2024

### Intisari

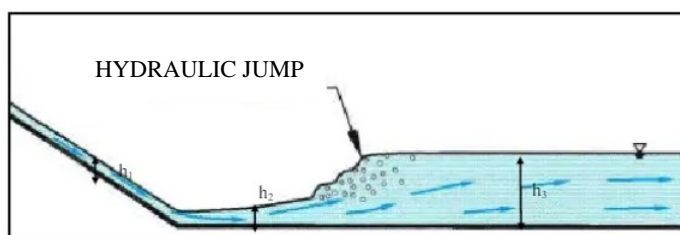
Bangunan utama (*Headworks*) pada bangunan jaringan irigasi didefinisikan sebagai kompleks bangunan di sepanjang sungai yang berfungsi untuk membelokkan air menuju saluran irigasi. Bangunan utama terdiri atas bangunan pengelak, peredam energi, kantong lumpur, bangunan pembilas. Pembangun sebuah bendung dapat menyebabkan terjadinya loncat air di bagian hilir bendung. Kecepatan aliran yang tinggi akibat perubahan elevasi dan tinggi energi sehingga diperlukan suatu konstruksi peredam energi. Dampak buruk yang dihasilkan oleh aliran energi yang tidak dapat diredam oleh bangunan adalah terjadinya penurunan muka tanah dasar sungai. Gerusan menyebabkan kerusakan pada struktur tanah yang berpotensi menyebabkan kerusakan bangunan hingga keruntuhan bangunan. Tipe peredam energi USBR biasanya dipakai untuk *head drop* yang lebih tinggi dari 10 meter. Penelitian ini difokuskan untuk melakukan analisis efektifitas peredam energi Tipe USBR II, yaitu peredam energi yang memiliki blok-blok saluran tajam (gigi pemencar) di ujung hulu dan didekat ujung hilir (*end sill*). Tujuan penelitian adalah untuk menentukan geometri bangunan peredam energi dengan membuat persamaan tinggi jatuh ( $Z_1$ ) pada model penurunan lantai dasar saluran keseluruhan dan penurunan lantai dasar peredam energi (kombinasi *negatif slope*) pada peredam energi tipe datar dan tipe USBR II, sehingga mengetahui model peredaman yang paling efektif dan efisien. Berdasarkan perhitungan dan analisis dapat disimpulkan bahwa pemodelan peredam energi untuk meningkatkan peredaman energi yang paling efektif adalah Model Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope*) dengan Tipe Peredam Energi USBR II.

Kata Kunci: Peredam Energi, USBR II, Penurunan Lantai Dasar.

### Latar Belakang

Bendung merupakan bangunan melintang sungai yang dibangun untuk mengubah karakteristik aliran sungai. (Mawardi dan Memet, 2010) mengatakan bahwa fungsi utama dari bendung adalah untuk meninggikan elevasi muka air sungai. Pembendungan aliran akan menyebabkan perbedaan elevasi muka air antara hulu dan hilir bendung yang cukup besar, sehingga mengakibatkan adanya terjunan dan terjadi perubahan energi yang cukup besar ketika air melewati mercu bendung.

Akibatnya, aliran akan mengalami kejut-normal atau loncatan hidraulik yaitu suatu aliran yang mengalami perubahan dari aliran superkritis menjadi subkritis (Frank, 2001). Perubahan aliran dari superkritis ke subkritis menyebabkan terjadinya loncatan hidraulik (Raju, 1986). Cara kerja pemecah energi air pada bangunan air yaitu dengan cara membuat gesekan air dengan lantai serta dinding struktur, membentuk pusaran air dan menghasilkan benturan aliran ke struktur serta menciptakan loncatan air di dalam ruang olakan (Agustin dkk, 2021). Loncatan hidraulik atau loncat air merupakan salah satu contoh bentuk aliran berubah cepat atau *rapidly varied flow* (Triatmodjo, 2003). Aspek hidraulik pada bendung merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam perencanaan kolam peredam energi. Sisa energi di hilir kolam peredam energi diharapkan seminimal mungkin sehingga tidak terjadi gerusan pada dasar sungai (Afrida dkk, 2023).



Gambar 1. Loncat Air

Untuk saluran persegi panjang bentuk horizontal datar, maka kedalaman aliran hilir yaitu (Triatmodjo, 2003):

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_r^2} - 1 \right) \tag{1}$$

Kedalaman sebelum loncatan hidraulik ( $y_1$ ) dan kedalaman setelah loncatan hidraulik ( $y_2$ ) disebut juga dengan kedalaman konjugasi.

Tabel 1. Klasifikasi Loncatan Hidraulik pada Saluran Persegi Mendatar

$Fr$	Definisi	Keterangan
1	Aliran kritis	Tidak terbentuk loncatan
1 – 1.70	Loncatan berombak	Terjadi ombak pada permukaan air
1.70 - 2.50	Loncatan lemah	Kehilangan energi kecil
2.50 – 4.50	Loncatan berosilasi	Terjadi semburan berosilasi yang tidak teratur menghasilkan gelombang besar menuju hilir, merusak tanggul.
4.50 – 9.00	Loncatan tunak	Peredaman energinya 45–70%. Loncatan hidraulik sangat seimbang. Perencanaan ekonomis yang terbaik.
> 9.00	Loncatan kuat	Loncatan kuat. Peredaman energi hingga 85%. Resiko erosi pada dasar saluran.

(sumber: Chanson, 2004)

Akibat loncatan hidraulik ini sering menimbulkan gulungan ombak atau pusaran (*vortex*) yang bisa menyebabkan gerusan pada dasar saluran, terutama bagian hilir yang tidak diberi perlindungan.

Ada beberapa penelitian tentang fenomena gerusan di hilir kolam olakan bendung, yaitu USBR. (Farhoudi, 1995) meneliti tentang pengaruh kolam olakan (*stilling*

*basin*) terhadap peredaman energi. (Kumar dkk, 1982) meneliti gerusan di hilir bendung. (Farhoudi dan Smith, 1985) meneliti tentang profil gerusan lokal (*local scour*) di hilir loncatan hidraulik. (Hoffmans dan Pilarczyk, 1995) meneliti tentang gerusan lokal di hilir bangunan hidraulik yang diberi apron atau lapisan lindung. (Mays, 1999) meneliti tentang ukuran batu dalam riprap kasar buatan yang berbentuk kutil (*wart*). Abdurrosyid dkk. pada tahun 2009 meneliti tentang gerusan di hilir kolam olakan tipe USBR-III tanpa meneliti tentang proteksi gerusannya.

Dengan adanya loncatan air maka diperlukan kolam olakan yang dapat melindungi dasar sungai. Walaupun menggunakan kolam olakan yang dapat meredam energi, akan tetapi kenyataannya masih terjadi gerusan pada dasar saluran di sebelah hilir kolam olakan, hal ini menyebabkan kerusakan pada bangunan tersebut (Abdurrosyid dkk, 2009).

Tipe kolam olak yang akan direncana di sebelah hilir bangunan bergantung pada energi air yang masuk, yang dinyatakan dengan bilangan Froude ( $Fr$ ), dan pada bahan konstruksi kolam olak. Konstruksi tipe kolam olakan dibagi menjadi 5 (lima) tipe, yaitu: (i) Kolam olak tipe Vlughter; (ii) Kolam olak tipe Schoklitsch; (iii) Kolam olak tipe Bucket; (iv) Kolam olak tipe USBR; (v) Kolam olak tipe The SAF Stilling Basin (SAF = Saint Anthony Falls) (Sosrodarsono, 1977).

Penelitian terhadap peredam energi telah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu. Kathibi dkk. pada tahun 2014 berpendapat bahwa untuk permodelan terhadap peredam energi pada bendung beronjong bertingkat menggunakan metode ANN (*Artificial Neural Network*) memiliki nilai keakuratan yang tinggi. (Guyen dkk, 2006) berpendapat bahwa hasil pemodelan ANN (*Artificial Neural Network*) memiliki keunggulan dibandingkan dengan model regresi dan memiliki nilai kesalahan relatif yang kecil. (Narayana dkk, 1989) berpendapat bahwa bilangan froude rendah pada kolam peredam USBR IV, IS Tipe I dan SAF telah menunjukkan bahwa dua kolam pertama tidak memiliki peningkatan kinerja apapun dibandingkan dengan kolam peredam SAF pendek. (Habibzadeh dkk, 2012) berpendapat bahwa efisiensi efek dari tinggi, lebar, lokasi, dan jumlah balok penghalang pada rezim DSJ (*Deflected Surface Jet*) dan RWJ (*Reattaching Wall Jet*) tidak signifikan. (Toso dan Bowers 1988) berpendapat bahwa penambahan blok penghalang, menengah dan akhir (kolam USBR tipe II dan tipe III) tidak menghasilkan nilai konstanta tekanan kecepatan ( $C_p$ ) secara signifikan.

Penelitian hingga desain untuk berbagai fenomena hidraulik membutuhkan suatu cara yang mampu memprediksi hasil dari berbagai macam atau jenis karakteristik fluida yang diteliti atau disimulasi dengan akurat dan cepat (Dermawan dkk, 2021).

Kolam olak USBR II banyak digunakan pada bendungan tinggi, bendungan urugan tanah dan struktur-struktur saluran besar dilengkapi dengan blok-blok di ujung hulu dan ambang bergigi di ujung hilir (Saputra dkk, 2019).

Dari penelitian yang sudah dilakukan tersebut dapat dilihat bahwa ada beberapa perlakuan yang dilakukan pada peredam energi untuk mendapatkan ukuran peredam energi yang optimal sehingga pada penelitian bertujuan untuk melakukan pengujian model fisik hidraulik terhadap peredam energi yaitu dengan uji model fisik hidraulik penurunan dasar saluran keseluruhan dan penurunan dasar peredam

energi (kombinasi *negatif slope*) dengan tipe peredam energi datar dan USBR II dengan harapan kecepatan aliran pada hilir saluran (setelah loncatan hidraulik) adalah subkritis sehingga diperlukan suatu model persamaan peredaman dalam menentukan kedalaman penurunan elevasi dasar saluran atau elevasi dasar peredam energi sehingga didapatkan model peredaman yang paling efektif dari 2 model fisik hidraulik tersebut.

## Metodologi Studi

### Variabel Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Sungai dan Rawa, Teknik Pengairan, Universitas Brawijaya dengan menggunakan fasilitas laboratorium, antara lain: (a) Model fisik hidraulik pelimpah dengan saluran terbuka (*open channel*), pelimpah menggunakan tipe Ogee ambang tegak sebagai parameter tetapnya dengan kemiringan saluran peluncur adalah 1:4, lebar saluran tetap (B) 40 cm, (b) Tiga buah pompa air untuk suplai aliran air ke model, (c) Bak penampung air untuk menyuplai air ke model dan dilengkapi alat pengukur debit, (d) Alat ukur debit *Rechbox*, (e) Meteran taraf (*Point Gauge*), tabung pitot, alat ukur sipat datar (*Waterpass*), bak ukur, gelas takar, ember, *stopwatch*.

Dalam penelitian ini digunakan beberapa variabel untuk mendukung hasil penelitian. Variabel terikat terdiri atas Kedalaman kritis ( $Y_c$ ), Kedalaman air di kaki pelimpah ( $Y_1$ ), Kedalaman air di hilir saluran ( $Y_2$ ), Bilangan froude ( $Fr$ ), Panjang loncatan ( $L_j$ ). Selain itu, variabel bebas terdiri atas Debit ( $Q$ ), Pelimpah ogee tegak, Kemiringan saluran peluncur, Beda tinggi *crest* ambang dengan dasar peredam energi ( $Z_1$ ), Peredam energi tipe datar dan Peredam energi tipe USBR II.

### Rancangan Analisis Dimensi

Analisis dimensi banyak membantu dalam eksperimen dan akan mengarahkan pada sesuatu yang secara nyata mempengaruhi fenomena yang ada (Triatmodjo, 2003). Untuk menuliskan dimensi dari variabel yang terdapat pada bidang teknik hidraulik biasanya dipergunakan sistem MLT yaitu massa, panjang dan waktu. Dalam pembuatan model biasanya dilakukan pengecilan dari berbagai variabel tersebut, yaitu dengan memberikan skala (n) pada masing-masing variabel tersebut. Skala dari berbagai variabel atau parameter yang diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi.

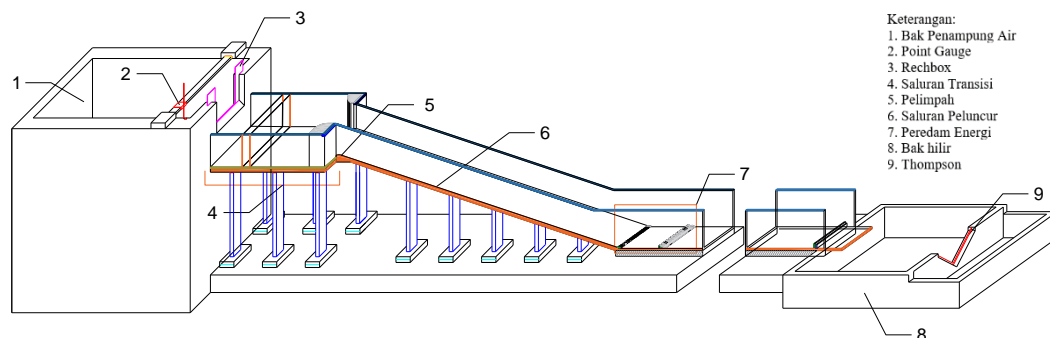
Untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut dapat dilakukan dengan analisis dimensi. Analisis dimensi untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut ada beberapa cara, salah satunya adalah dengan cara matriks Langhaar. Adapun langkah-langkah dalam perhitungan analisis dimensi penelitian, antara lain:

1. Melakukan tabulasi parameter untuk analisis dimensi untuk mengetahui jumlah bilangan tak berdimensi ( $\Phi$ ), serta menentukan parameter sebagai variabel berulang.
2. Melakukan perhitungan bilangan tak berdimensi dengan matriks Langhaar untuk menentukan bilangan tak berdimensi

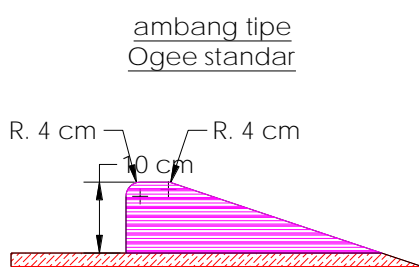
### Rancangan Penelitian di Laboratorium

Secara garis besar rancangan penelitian meliputi:

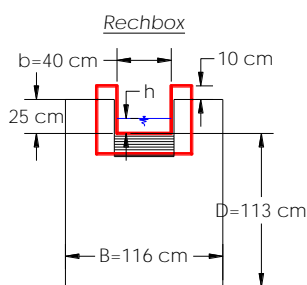
1. Studi *literatur* tentang peredaman energi tipe datar dan tipe USBR II.
2. Merencanakan dan membuat model fisik hidraulik dan menyiapkan tempat untuk penelitian (*set up experiment*)



**Gambar 2.** Potongan Melintang Model Saluran Penelitian



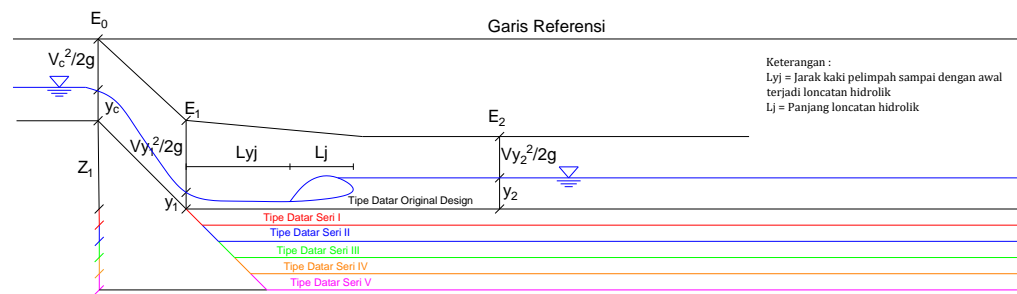
**Gambar 3.** Potongan Memanjang Ambang tipe Ogee standar



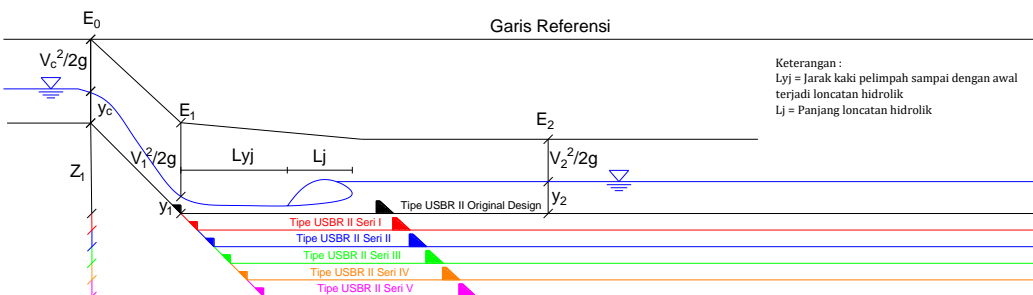
**Gambar 4.** Potongan Melintang Thompson

3. Melakukan kalibrasi alat sebelum dilakukan pengujian aliran pada pemodelan
4. Melakukan perumusan fenomena hidraulik aliran pada bangunan pelimpah dan menghitung profil muka air pada saluran peluncur. Rancangan perlakuan ini dimaksudkan untuk mendapatkan gambaran perilaku aliran.
5. Melakukan pengamatan dan pengukuran data pada bangunan. Pengukuran yang dilakukan meliputi kedalaman kritis ( $Y_c$ ), kecepatan kritis ( $V_c$ ), kedalaman aliran di hilir kaki pelimpah ( $Y_1$ ), kecepatan aliran dihilir kaki pelimpah ( $V_{y1}$ ) kedalaman aliran setelah loncatan hidraulik ( $Y_2$ ), kecepatan aliran setelah loncatan hidraulik ( $V_{y2}$ ) dan panjang loncatan air yang terjadi ( $L_j$ ). Pengukuran dilakukan dengan bantuan alat ukur manual seperti waterpass, bak ukur, tabung pitot, dan penggaris.
6. Melakukan analisis terhadap parameter yang ada dan dilakukan pengecekan terhadap hasil penelitian. Analisis data sebagai berikut:
  - a. Melakukan analisis dimensi dengan cara Langhaar
  - b. Membuat grafik hubungan antar parameter
  - c. Dari grafik akan didapatkan rumus persamaan

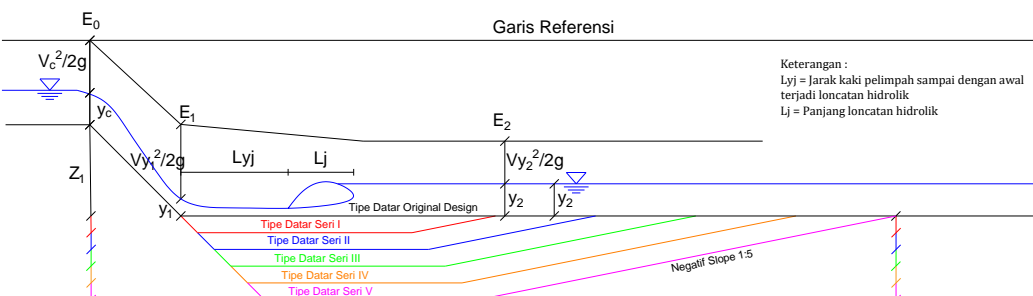
Skema saluran penelitian disajikan dalam Gambar 5-8 di bawah ini



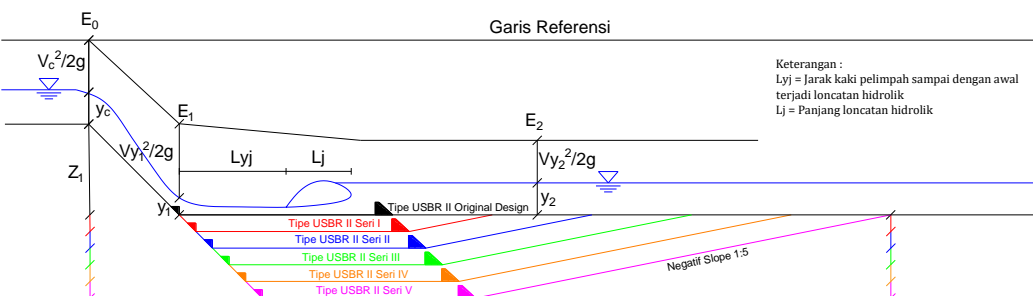
**Gambar 5.** Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Saluran Keseluruhan dengan Kondisi Peredam Energi Datar



**Gambar 6.** Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Saluran Keseluruhan dengan Kondisi Peredam Energi USBR II

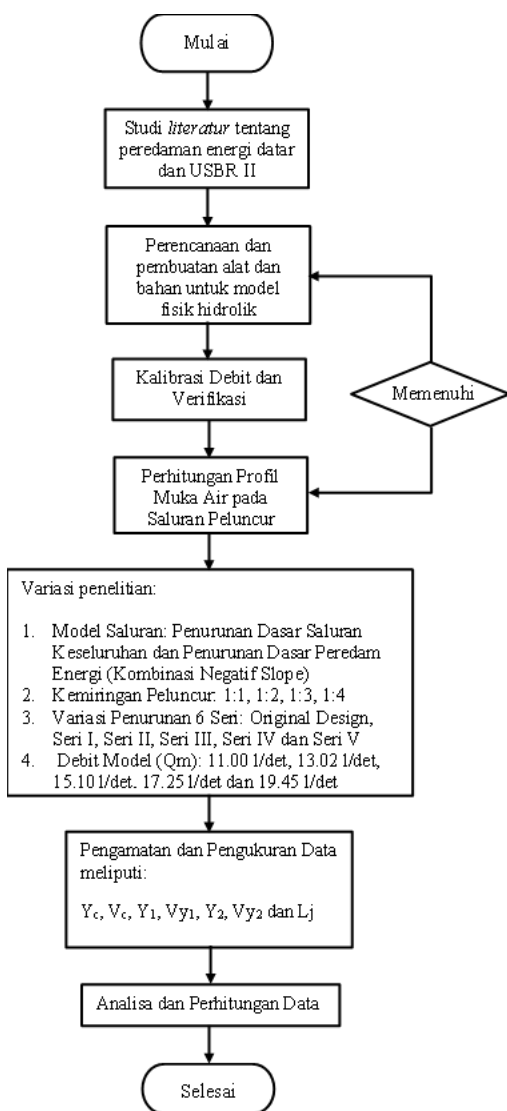


**Gambar 7.** Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope* 1:5) dengan Kondisi Peredam Energi Datar

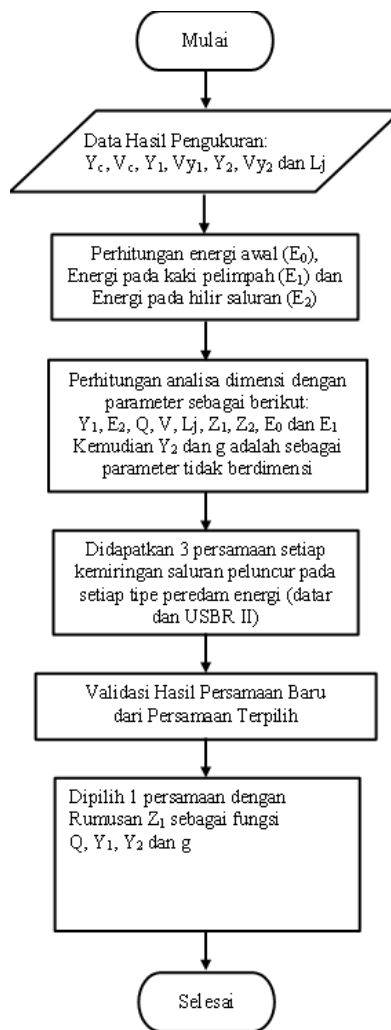


**Gambar 8.** Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope* 1:5) dengan Kondisi Peredam Energi USBR II

Langkah penelitian dijelaskan dalam diagram alir penelitian dan diagram alir analisis data pada Gambar 5 dan Gambar 6 berikut.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Analisis Data

**Hasil Studi dan Pembahasan**

**Perhitungan Debit Aliran Pemodelan (Debit Model)**

Perhitungan debit aliran dimulai dengan menghitung debit dengan persamaan *rechbox* dan perhitungan debit takar (manual) kemudian mencari kesalahan relatif dari perbandingan hasil perhitungan dan pengukuran tersebut.

1. Perhitungan Debit Aliran Rechbox

$$Q = KBh^3 \tag{2}$$

$$K = 107.1 + \frac{0.177}{h} + 14.2 \frac{h}{D} - 25.7 \left[ \frac{(B-b)h}{DB} \right]^{\frac{1}{2}} + 2.04 \frac{B^{\frac{1}{2}}}{D} \tag{3}$$

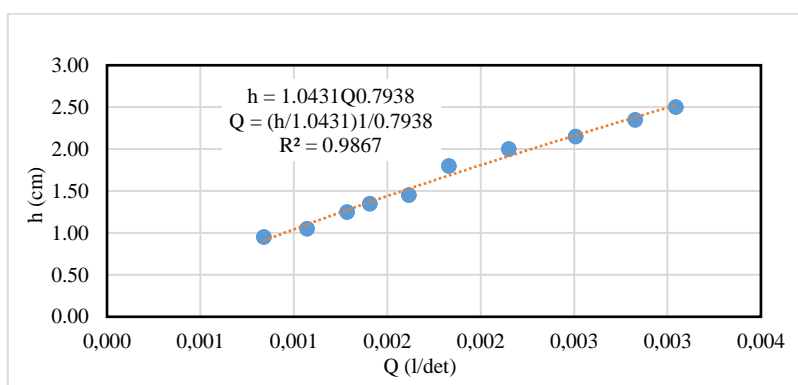
2. Perhitungan Debit Takar (Manual)

$$Qtakar = \frac{Volume}{Durasi} \tag{4}$$

Kemudian dihitung kesalahan relatif rata-ratanya.

Dari hasil perhitungan 10 variasi debit diperoleh nilai kesalahan relatif kurang dari 4%.

3. Perhitungan Debit Model antara Debit Rechbox dengan Debit Takar  
 Perhitungan debit model dilakukan dengan cara mencari kesalahan relatif dan debit koreksi antara debit rechbox dan debit takar. Kemudian mencari nilai debit model melalui persamaan dari grafik lengkung debit yang diperoleh dari debit koreksi.  
 Kemudian dari perhitungan debit dan kesalahan relatif di atas diplotkan kembali dalam bentuk grafik hubungan antara debit koreksi dan  $h$  *rechbox*. Grafik dapat dilihat pada Gambar 6 berikut:



**Gambar 11.** Grafik Hubungan Antara  $Q$  dan  $H$  Hasil Takar Dan Rechox

Dari grafik diatas didapatkan persamaan yang digunakan untuk menghitung debit model *rechbox* yaitu:

$$h = 1.043Q^{0.7938} \tag{5}$$

dengan rumus tersebut selanjutnya dihitung nilai debit *rechbox* model.

Pada penelitian ini menggunakan 5 variasi debit yaitu 11.004 l/s, 13.019 l/s, 15.102 l/s, 17,246 l/s dan 19,446 l/s.

**Perhitungan Profil Muka Air di Saluran Peluncur**

Perhitungan profil muka air pada peluncur dilakukan dari hulu ke hilir dikarenakan aliran bersifat superkritis, analisis ini bertujuan untuk mencari nilai debit persatuan lebar ( $q$ ), kedalaman kritis ( $Y_c$ ), kecepatan ( $V$ ), energi ( $E$ ), jari-jari hidrolis ( $R$ ), kehilangan energi akibat gesekan ( $hf$ ), froude ( $Fr$ ) dan kedalaman setelah loncatan ( $Y_2$ ).

Kemudian menghitung nilai  $Y_2$  (kedalaman air setelah loncatan) dengan rumus sebagai berikut:

$$Y_2 = 0.5 \times \sqrt{1 + 8 \times Fr^2} - 1 \times Y_1 \tag{6}$$

**Perhitungan Bangunan Perdam Energi (USBR Tipe II)**

Perhitungan dimensi untuk desain peredam energi USBR tipe II untuk model penelitian di laboratorium meliputi perhitungan panjang peredam energi, tinggi *chute block*, lebar *chute block*, jarak antar *chute block*, jarak *chute block* dengan dinding, tinggi *block* ujung, lebar *block* ujung, jarak antar *block* ujung dan tebal *block* ujung bagian atas.

**Data Hasil Pengukuran**

Data pengukuran yang diambil pada penelitian meliputi kedalaman kritis ( $Y_c$ ), kecepatan kritis ( $V_c$ ), kedalaman aliran di hilir kaki pelimpah ( $Y_1$ ), kecepatan aliran dihilir kaki pelimpah ( $V_{y1}$ ) kedalaman aliran setelah loncatan hidraulik ( $Y_2$ ), kecepatan aliran setelah loncatan hidraulik ( $V_{y2}$ ) dan panjang loncatan air yang terjadi ( $L_j$ ). Diukur pada 6 seri penurunan dasar dengan 5 variasi debit. Dari data hasil pengukuran selanjutnya dilakukan perhitungan  $E_0$  (energi awal),  $E_1$  (energi pada kaki pelimpah) dan  $E_2$  (energi pada hilir saluran).

**Analisis Dimensi**

Hasil analisis dimensi dengan teori Langhaar ditemukan beberapa persamaan yang kemudian dipilih persamaan yang mempunyai hubungan dengan fungsi  $Z_1$  (beda tinggi antara *crest* pelimpah dengan dasar peredam energi).

1. Data Parameter Analisis Dimensi  
Parameter-parameter yang digunakan untuk analisis dimensi adalah  $Z_1, Y_c, V_c, E_0, Y_1, V_{y1}, E_1, Y_2, V_{y2}, E_2$  dan  $L_j$ .
2. Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi  
Dari data parameter diatas kemudian setiap parameter dihubungkan menjadi bilangan tak berdimensi. Selanjutnya diplotkan pada grafik sehingga didapatkan persamaan linier.
3. Hasil Persamaan Bilangan Tak Berdimensi

$$Z_1 = \frac{\alpha y_2 - y_c - \frac{v_c^2}{2g}}{\beta} \quad \rightarrow \text{Persamaan 1} \tag{7}$$

$$\alpha \frac{Y_1 Q}{\sqrt{Y_2^5 g}} + \beta \frac{Q}{\sqrt{Y_2^3 g}} \quad \rightarrow \text{Persamaan 2} \tag{8}$$

$$Z_1 = \alpha \frac{Z_1 E_0}{Y_2 Fr} + \beta E_0 \quad \rightarrow \text{Persamaan 3} \tag{9}$$

**Validasi Hasil Persamaan**

Setelah didapatkan 3 persamaan dari hasil analisis dimensi, selanjutnya dilakukan validasi persamaan dengan membandingkan nilai  $Z_1$  persamaan dengan nilai  $Z_1$  penelitian kemudian dihitung nilai kesalahan relatifnya.

Berdasarkan hasil validasi persamaan dapat disimpulkan bahwa  $Z_1$  pada persamaan 2 memiliki nilai kesalahan relatif yang kecil sehingga dipilih persamaan no. 2 yang memiliki parameter beda tinggi *crest* ambang dengan dasar peredam energi ( $Z_1$ ), debit ( $Q$ ), tinggi muka air di kaki pelimpah ( $Y_1$ ), tinggi muka air dihilir saluran ( $Y_2$ ), serta gravitasi ( $g$ ) dengan persamaan dengan fungsi  $Z_1 = f(Q, y_1, y_2, g)$ . Ditemukan persamaan sebagai berikut:

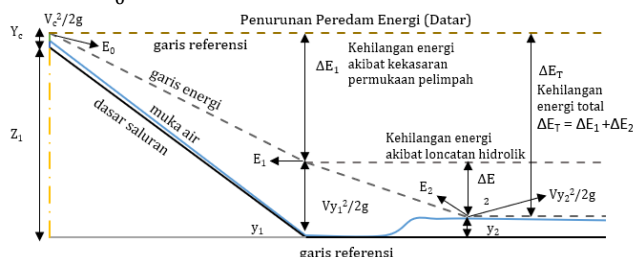
$$Z_1 = a \frac{Y_1 Q}{\sqrt{Y_2^5 g}} + b \frac{Q}{\sqrt{Y_2^3 g}} \tag{10}$$

**Perhitungan Efektivitas Peredaman**

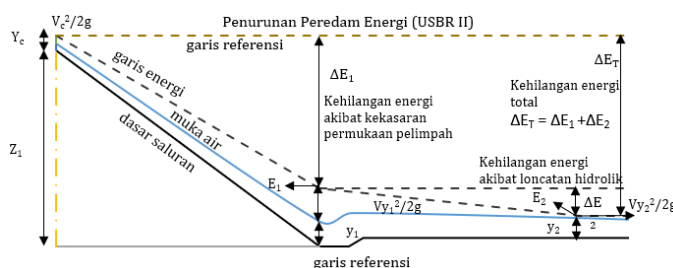
Dari persamaan diatas kemudian dihitung nilai  $Z_1$  dengan data hasil penelitian, kemudian dihitung nilai energi awal di titik kritis ( $E_0$ ) dengan nilai  $Z_1$  dari hasil perhitungan tersebut. Selanjutnya dihitung nilai efektifitas peredaman dengan rumus sebagai berikut:

$$E_0 = Z_1 + Y_c + \frac{V_c^2}{2g} \tag{11}$$

$$Ef. Peredaman = \frac{(E_0 - E_1)}{E_0} \times 100\% \tag{12}$$



**Gambar 12.** Skema Penampang Memanjang Aliran (Tipe Datar)



**Gambar13.** Skema Penampang Memanjang Aliran (Tipe USBR II)

Dari hasil perhitungan rata-rata nilai efektifitas peredaman didapatkan nilai efektifitas peredaman terbesar adalah pada model Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope*) Tipe USBR II yaitu sebesar 67,33%.

**Kesimpulan dan Saran**

**Kesimpulan**

Berdasarkan hasil perhitungan secara teoritis dan analisis data serta uji validasi persamaan untuk uji model fisik saluran dengan penurunan dasar saluran keseluruhan dan penurunan dasar peredam energi (kombinasi *negatif slope*) dapat disimpulkan bahwa beda tinggi *crest* ambang dengan dasar peredam energi ( $Z_1$ ) dipengaruhi oleh parameter debit ( $Q$ ), tinggi muka air di kaki pelimpah ( $Y_1$ ), tinggi muka air dihilir saluran ( $Y_2$ ) dan gravitasi ( $g$ ). Penelitian ini menghasilkan kesimpulan sesuai rumusan masalah sebagai berikut:

1. Persamaan (Z1) pada model penurunan dasar saluran keseluruhan dan penurunan dasar peredam energi (kombinasi *negatif slope*) dengan peredam energi tipe datar dan tipe USBR II adalah sebagai berikut:

$$Z_1 = \alpha \frac{Y_1 Q}{\sqrt{Y_2^5 g}} + \beta \frac{Q}{\sqrt{Y_2^3 g}} \quad (13)$$

2. Berdasarkan perhitungan dan analisis dapat disimpulkan bahwa pemodelan peredam energi untuk meningkatkan peredaman energi yang paling efektif adalah Model Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope*) dengan Tipe Peredam Energi USBR II.

### Saran

Berdasarkan pada hasil penelitian ini, terdapat beberapa saran guna mendukung studi dan penelitian lebih lanjut yaitu sebagai berikut:

1. Disarankan untuk melakukan uji validasi hasil penelitian pada berbagai macam bangunan bendung pada banyak lokasi untuk meningkatkan keakurasian hasil persamaan tinggi jatuh (Z1).
2. Beberapa topik bahasan lanjutan yang dapat dikembangkan dari penelitian ini adalah: Penurunan Dasar Peredam Energi Tipe USBR III, USBR IV atau tipe Peredam Lainnya (Roller Bucket), Penelitian Persamaan Panjang Peredam Energi (L) dengan Penurunan Dasar Peredam Energi.

### Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Prof. Dr. Ir. Suhardjono, MPd., Dipl. HE. telah memberikan arahan dan masukan dalam penyelesaian penelitian ini, kepada Laboratorium Sungai dan Rawa, Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya serta kepada Program Pascasarjana Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

### Daftar Referensi

- Abdurrosyid, J., Wibowo, G.J., dan Nursahid, M. (2009). Studi Gerusan dan Perlindungan di Hilir Kolam Olakan Bendung Tipe USBR-I. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, 9(1): 27-37. <https://publikasiilmiah.ums.ac.id/handle/11617/227>.
- Afrida, E., Apriyanto, T., dan Pujiastuti, R. (2023). Desain Kolam Peredama Energi Bendung Plaosan Kabupaten Semarang. *Jurnal Teknik Indonesia*, 4(1). <https://doi.org/10.61689/jti.v4i1.414>
- Agustin, D.N., Salim, N., dan Rizal, N.S. (2022). Kajian Model Fisik Perbandingan Perilaku Aliran pada Bendung dengan Kolam Olak tipe USBR II, III, IV. *Jurnal Smart Teknologi*, 3(6): 100-102. <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JST/article/view/8482>
- Chanson, H., 2004. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*, Second Edition, halaman 91-96, Elsevier, Oxford.
- Chow, V.T., 1997. *Hidraulika Saluran Terbuka*, halaman 25-26, Erlangga, Jakarta.
- Dermawan, D.R., Cahya, E.N., dan Sisingih, D. (2021). Pemodelan Numerik Bangunan Peredam Energi Bendungan Pomalaa dengan Analisa Komputasi

- Fluida Dinamis. *Jurnal Teknik Pengairan*, 12(2): 139-150.  
<http://dx.doi.org/10.21776/ub.pengairan.2021.012.02.06>
- Farhoudi, J., and Smith, K.V.H. (1985). Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump. *Journal of the Hydraulics Research*, 23(4): 343-358.  
<https://doi.org/10.1080/00221688509499344>
- Güven, A., Günel, M., and Cevik., A. (2006). Prediction of Pressure Fluctuations on Sloping Stilling Basins. *Canadian Journal Of Civil Engineering*, 33(11): 106-101. <https://doi.org/10.1139/106-101>
- Habibzadeh, A., Loewen, M., and Rajaratnam, N. (2012). Performance of Baffle Blocks in Submerged Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10): 902-908. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000587](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000587)
- Hoffmans, G.J.C.M., and Pilarczyk, K.W. (1995). Local Scour Downstream of Hydraulic Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(4): 326. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:4\(326\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:4(326))
- Kathibi, R., Salmasi, F., Ghorbani, M.A., dan Ashadi, H. (2014). Modelling Energy Dissipation Over Stepped-gabion Weirs by Artificial Intelligence. *Water Resources Management*, 28(7): 1807-1821.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0545-y>
- Kumar, D., Mishra, G.C., and Chandra, S. (1982). Flow Under Weir On Scoured Bed. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(4).  
<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005853>
- Mawardi, E. dan Memed, M. (2010). Desain Hidraulik Bendung Tetap untuk Irigasi Teknis, halaman 5-6, Alfabeta, Bandung.
- Mays, L.W. (1999). *Hydraulic Design Handbook*, halaman 17-18, McGraw-Hill Education, New York
- Raju, K.G. (1986). *Aliran Melalui Saluran Terbuka*, halaman 7-8, Erlangga, Jakarta.
- Saputra, D.T., Khaerudin, D.N., dan Sulistyani, K.F. (2019) . Kajian Pemilihan Jenis Kolam Olak Dari Segi Fisik Bendung Pada Bendung Di Dusun Darok. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur (SENTIKUIN) Volume 2, page D6.1-D6.5. Fakultas Teknik Universitas Tribhuwana Tunggaladewi, Malang, Indonesia. 24 Agustus 2019.  
<https://pro.unitri.ac.id/index.php/sentikuin>.
- Sosrodarsono, S. (1977). *Bendungan Type Urugan*, halaman 13-14, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Toso, J.W., and Bowers, C.E. (1988). Extreme Pressures In Hydraulic-Jump Stilling Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8) : 829.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(829\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(829))
- Triatmodjo, B. 2003. *Hidraulika II*, halaman 87-135, Yogyakarta: Beta Offset, Yogyakarta

## **PERBAIKAN DESAIN BANGUNAN PELIMPAH WADUK PACAL DENGAN UJI MODEL HIDRAULIK FISIK**

Darto\*, Novianingrum Ekarina Sudaryanto, Indrawan, dan Anton Tri Asmoro  
Balai Teknik Sungai, Direktorat Sungai dan Pantai, Direktorat Jenderal Sumber  
Daya Air, Kementerian PUPR/HATHI Cabang Solo

\*darto98@pu.go.id

Pemasukan: 28 Juni 2024 Perbaikan: 29 September 2024 Diterima: 16 Desember 2024

### **Intisari**

Desain hidraulik bangunan pelimpah bendungan dapat dilakukan dengan uji model hidraulik (UMH) fisik di laboratorium. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mempelajari perilaku hidraulik bangunan pelimpah dengan komponen pelengkapannya. Metode yang digunakan dalam pemodelan adalah mencakup pembuatan model fisik, dan uji pengaliran hidraulik. Pengujian hidraulik dilakukan dalam 3 seri, antara lain: seri I tes desain; seri II, dan III merupakan tes perbaikan/penyempurnaan dimensi saluran lurus, modifikasi kolam olakan yang lebih baik dan pengamanan gerusan lokal akibat loncatan air dari kolam olakan dengan menambah tinggi elevasi endsill. Perbaikan dengan memodifikasi secara coba-coba, sehingga didapat desain bangunan pelimpah yang aman dari segi hidraulik, dimana tinggi jagaan untuk semua debit rencana aman, pola aliran di saluran lurus tidak terjadi aliran silang. Juga kolam olakan dapat meredam energi dengan baik, serta gerusan lokal di hilir kolam olakan dapat dikendalikan. Hasil penyempurnaan yang diperoleh dari modifikasi adalah seri terbaik yang akan digunakan sebagai bahan rekomendasi untuk diterapkan di lapangan.

Kata kunci: Bangunan pelimpah, kolam olak, UMH fisik, Waduk Pacal

### **Latar Belakang**

keberlanjutan pemanfaatan sumber daya air secara umum dan khususnya irigasi sangat penting sehingga pemerintah dalam hal ini Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo pada tahun 2015 telah melaksanakan kajian untuk meningkatkan pelestarian dan pemanfaatan potensi sumber air serta pengendalian banjir di Daerah Aliran Sungai (DAS) Bengawan Solo. Waduk Pacal telah dibangun oleh pemerintah Hindia Belanda pada tahun 1927 sampai 1935 dan Kontraktor pelaksana pembangunan bendungan ini juga dilakukan oleh Pemerintah Hindia Belanda.

Pada Tahun 2014 terjadi kerusakan pada bagian Spillway yang disebabkan oleh longsornya tebing tumpuan kanan dari *Spillway* Waduk Pacal. Kerusakan ini mengakibatkan berkurangnya tampungan air pada Waduk Pacal yang cukup besar, sehingga dikhawatirkan mengganggu kinerja waduk sebagai sumber pemenuhan air irigasi maupun untuk pemanfaatan lainnya.

Waduk Pacal terletak di Kali Pacal, tepatnya di Desa Kedungsumber, Kecamatan Temayang, Kabupaten Bojonegoro, Provinsi Jawa Timur. Secara geografis Waduk Pacal terletak pada  $111^{\circ} 52' 14,75''$  BT dan  $7^{\circ} 21' 44,75''$  LS.



**Gambar 1.** Lokasi Waduk Pacal (google maps, 2024)



**Gambar 2.** Kerusakan Pada Bagian *Spillway* Sisi Kanan (beritajatim.com, 2019)

Berdasarkan data volume tampungan yang diperoleh dari hasil pengukuran situasi topografi tahun 2012 (kondisi waduk kering), diperoleh tampungan  $28.522.779 \text{ m}^3$  dengan elevasi  $+115,00$  (elevasi *spillway*), sedangkan kondisi awal berdasarkan referensi data terdahulu volume tampungan mencapai  $41,18$  juta  $\text{m}^3$  (tahun 1933) mengingat adanya pengaruh sedimentasi.

Pada Tahun 2014 terjadi kerusakan pada bagian *Spillway* yang disebabkan oleh longornya tebing tumpuan kanan. Kerusakan ini mengakibatkan berkurangnya tampungan air cukup besar, sehingga dikhawatirkan mengganggu kinerja waduk sebagai sumber pemenuhan air irigasi maupun untuk pemanfaatan lainnya.

Pelimpah langsung sebagai salah satu komponen dari saluran pengatur aliran dibuat untuk lebih meningkatkan pengaturan serta memperbesar debit air yang akan melintasi bangunan pelimpah (Sosrodarsono, 1981:181). Saluran transisi pada bangunan pelimpah diperlukan untuk menghubungkan perubahan penampang dari ukuran dimensi yang lebih besar ke ukuran yang lebih kecil pada ruas hilir profil pelimpah sampai ke suatu potongan sebelum menuju ke saluran peluncur

Maksud dilakukannya uji model fisik untuk menyelidiki kapasitas pelimpah, pola aliran, mengamati elevasi muka air, kecepatan aliran, dan gerusan lokal pada sungai di hilir kolam olakan. Adapun tujuan dari pemodelan ini adalah menguji kehandalan desain bangunan pelimpah Waduk Pacal dan mempelajari efek bangunan terhadap efek hidraulik, mengevaluasi dan memodifikasi desain untuk penyempurnaan desain bangunan pelimpah tersebut, dan memberikan saran teknik penyempurnaan desain bangunan pelimpah Waduk Pacal dipandang dari segi hidraulik.

## Metodologi Studi

### Data Teknis

#### 1. Pelimpah

- Desain mercu bangunan pelimpah tipe: *Ogee* (bentuk paruh bebek 1/2 lingkaran)

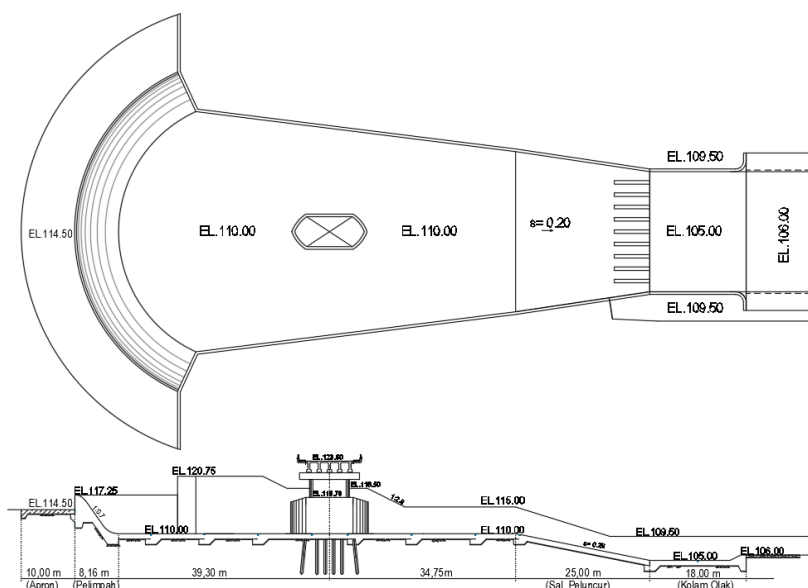
- Elevasi puncak ambang = + 117,25 m
  - Elevasi dasar pelimpah = + 114,50 m
  - Panjang ambang = 65,00 m
2. Saluran transisi
- Panjang saluran transisi : 60,40 m
  - Lebar saluran transisi: dari 45,00 m mengecil ke 23,50 m
  - Elevasi dasar saluran transisi + 110,00 m
3. Saluran Luncur (saluaran terbuka)
- Panjang saluran luncur = 21,22 m
  - Kemiringan saluran luncur (i) = 0,20.
  - Peredam Energi
  - Kolam peredam: *USBR III*
  - Panjang Kolam olak 21,16 m
  - Elevasi Kolam oalak + 115,00 m
4. Data Hidrologi, debit yang keluar lewat pelimpah *Spillway* Waduk Pacal dapat dilihat pada Tabel 1. di bawah ini.

**Tabel 1.** Debit *Outflow* Pelimpah *Spillway* Waduk Pacal

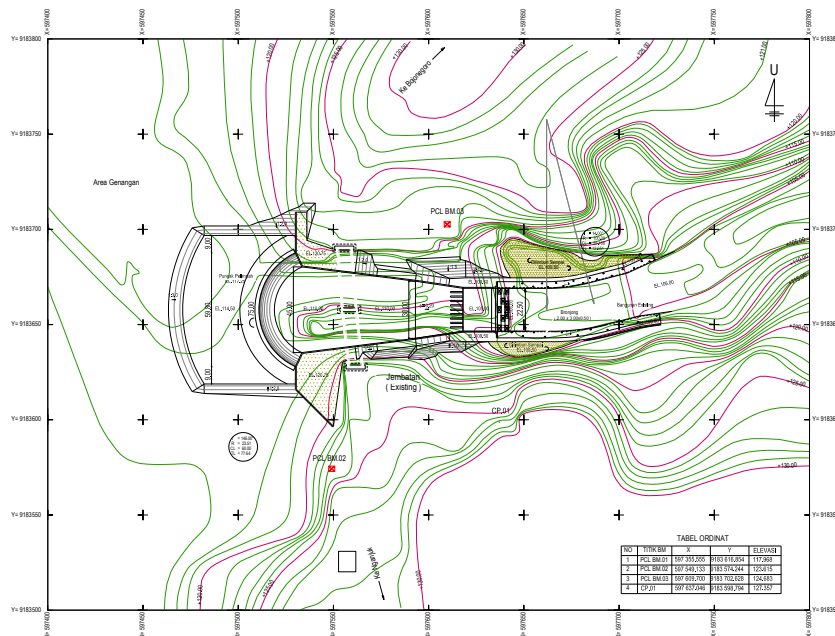
Debit Kala Ulang	Debit Pelimpah (m <sup>3</sup> /dt)
Q <sub>5</sub>	71
Q <sub>10</sub>	79
Q <sub>100</sub>	110
Q <sub>1000</sub>	148
Q <sub>PMF</sub>	526

Sumber: perhitungan konsultan, 2014

5. Angkutan Sedimen, pemodelan sedimen dari serbuk batubara dibuat dengan diameter sekecil mungkin yang bisa dihasilkan oleh mesin pemecah batu.



**Gambar 3.** Tampak Atas Dan Potongan Memanjang Bangunan Pelimpah Desain Waduk Pacal (desain konsultan, 2014)



Gambar 4. Situasi Waduk Pacal (desain konsultan, 2014)

**Metode Pelaksanaan**

Analisa dari pengkajian penyempurnaan desain bangunan Pelimpah Waduk Pacal dengan uji model hidraulik fisik ini didasarkan pada kaidah-kaidah teori perencanaan kapasitas pengaliran melalui pelimpah, panjang efektif bendung, hidrolika saluran transisi, saluran peluncur, peredam energi, baik itu rumus yang sifatnya khusus maupun rumus-rumus umum yang masih terkait dengan pemodelan tersebut.

**Penentuan skala model**

Model dibuat dengan skala 1:33,333 dari prototip di lapangan, baik skala tegak (Nh) maupun skala datar (NL). Skala Parameter hidraulik dapat diturunkan dari kriteria kesebangunan bilangan *Froude* sehingga diperoleh skala parameter-parameter hidraulik sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

**Model Froude (Gaya gravitasi) – Skala Model Sama**

Jika gaya gravitasi dominan dalam suatu sistem, maka skala model yang dipakai berdasarkan bilangan Froude. Bilangan Froude harus sama antara model dan prototipe.

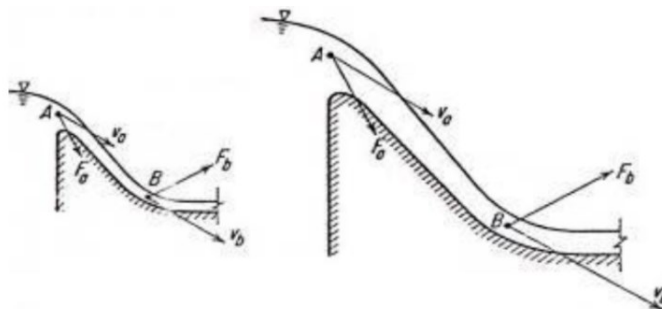
$$(Fr)_m = (Fr)_p$$

$$\left(\frac{v}{\sqrt{g.L}}\right)_m = \left(\frac{v}{\sqrt{g.L}}\right)_p \tag{1}$$

Dimana subskrip m dan p menunjukkan model dan prototipe. Dengan menganggap bahwa percepatan gravitasi adalah konstan diseluruh muka bumi, maka :

$$\frac{v_m}{v_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2} \tag{2}$$

Dalam hal ini  $L_r = L_m/L_p$  dinamakan skala geometri.



Gambar 5. Kesebangunan Hidraulika

Tabel 2. Skala Parameter Pemodelan

Parameter	Notasi	Rumus	Rasio ( $n_h = n_L = 33,33$ )
Kecepatan Aliran	$v$	$n_v = n_h^{1/2}$	$n_v = 5,77$
Waktu Aliran	$t$	$n_t = n_h^{1/2}$	$n_v = 5,77$
Debit Aliran	$Q$	$n_Q = n_h^{5/2}$	$n_v = 6.413$
Volume	$V$	$n_v = n_h^3$	$n_v = 37.026$
Koefisien Manning	$n$	$n_h = n_h^{1/6}$	$n_v = 1,79$

Sumber: Hasil Perhitungan

### Fasilitas dan peralatan

Lahan Laboratorium Indoor untuk mengerjakan uji model dengan ukuran 20 m x 50 m, dan *outdoor* ukuran 100m x 80 m, Kolam penampung air kapasitas 5000 m<sup>3</sup>, Sistem sirkulasi air untuk memenuhi kebutuhan maksimum dan minimum pengaliran debit model dengan Pompa. Peralatan observasi, antara lain: *Waterpass*, *currentmeter*, *counter*, *pointgauge*, batang jarum dan kamera sebagai dokumentasi

### Skenario pengamatan

Urutan kegiatan uji model hidraulik fisik adalah sebagai berikut:

- Debit masukan, dari debit kecil sampai debit maksimum. Lengkung debit ini nantinya sebagai dasar operasi di lapangan.
- Pengujian desain awal, yaitu menguji desain untuk mengetahui dampak hidraulik, terutama elevasi muka air untuk mengetahui kapasitas Dam, pola aliran, kecepatan aliran pada saluran luncur, Stilling basin, dan sungai di hilir kolam olakan.
- Modifikasi I, yaitu memodifikasi dimensi sayap pelimpah untuk mengetahui dampak hidraulik, pola aliran di saluran transisi, elevasi muka air, kecepatan aliran pada awal saluran luncur, stilling basin, dan sungai di hilir kolam olakan.
- Modifikasi II, yaitu menambah bangunan ambang dasar pada akhir saluran transisi. Tujuan bangunan ini adalah untuk menstabilkan pola aliran yang liar di saluran transisi.
- Modifikasi III, yaitu mempertinggi endsill dari + 106,00 menjadi +106,17 m untuk meredam energi di kolam olak, dan perlindungan dasar sungai akibat gerusan lokal di hilir endsill.

Pembuatan garis lengkung debit *out flow* pada pelimpah, dengan cara mengalirkan debit *inflow* yang diukur dengan alat ukur debit *rech bock*. Setelah daerah genangan penuh air, akan terjadi limpasan di bangunan pelimpah. sehingga tinggi muka air di atas mercu pelimpah dapat diukur, pengamatan ini dilakukan dengan beberapa variasi pengaliran direncanakan dengan skenario sebagai berikut.

**Tabel 3.** Skenario Pengujian Pengaliran

Pengaliran dan Pengamatan	Debit Pengaliran (kala ulang)				
	Q5	Q10	Q100	Q1000	PMF
<b>• Seri I</b>					
Profil muka air	√	√	√	√	√
Kecepatan aliran	√	√	√	√	√
Pola aliran	√	√	√	√	√
Pola gerusan		√	√		
<b>• Seri-II</b>					
Profil muka air			√	√	√
Kecepatan aliran			√	√	√
Pola aliran			√	√	√
<b>• Seri-III</b>					
Profil muka air			√	√	√
Kecepatan aliran			√	√	√
Pola aliran			√	√	√
Pola gerusan			√	√	√

**Hasil Studi Dan Pembahasan**

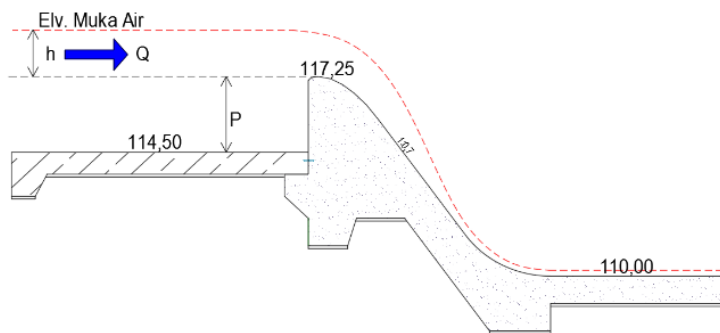
**Tes Desain ( Model seri- I)**

1. Pengamatan lengkung debit di hulu mercu pelimpah. Hasil pengamatan debit *inflow* yang menggenangi waduk dan keluar lewat pelimpah dapat diukur elevasi muka air, dengan anggapan debit *inflow* sama dengan debit *outflow* yang melimpas di atas pelimpah dan mengalir dengan konstan. Ketinggian air di atas pelimpah (h) sama dengan elevasi muka air dikurangi elevasi puncak pelimpah (+ 117,25 m). Nilai koefisien pelimpah C dihitung dengan Rumus:

$$\begin{aligned}
 Q &= C \cdot Le \cdot He^{3/2} \\
 V &= (Q/le) / (P+h) \\
 Le &= 65,00 \text{ m} ; e = v^2/2.g \\
 He &= h + v^2/2.g \text{ atau } He = h + e
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Keterangan:

- Q : debit *out flow* ( m<sup>3</sup>/s)
- V : kecepatan aliran (m/s)
- Le : lebar efektif pelimpah = 65,00 m
- P : tinggi pelimpah = 2,75 m



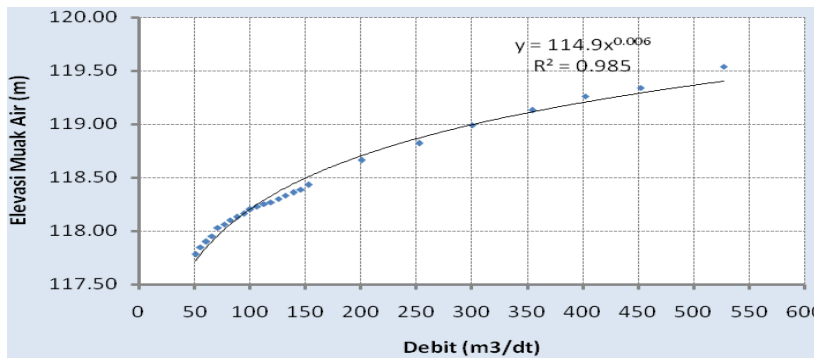
**Gambar 6.** Pengamatan di Hulu Mercu Pelimpah

Kapasitas pelimpah dinyatakan memenuhi kebutuhan apabila dialiri banjir dengan debit desain  $Q_{1000}$  menimbulkan tinggi genangan di waduk masih di bawah tinggi jagaan yang disyaratkan sebesar 2,00 m, sedangkan apabila dialiri banjir PMF genangan waduk tidak melampaui mercu bendungan.

**Tabel 4.** Hasil Pengamatan Tinggi Muka Air Waduk Untuk  $Q_{1000}$  dan QPMF

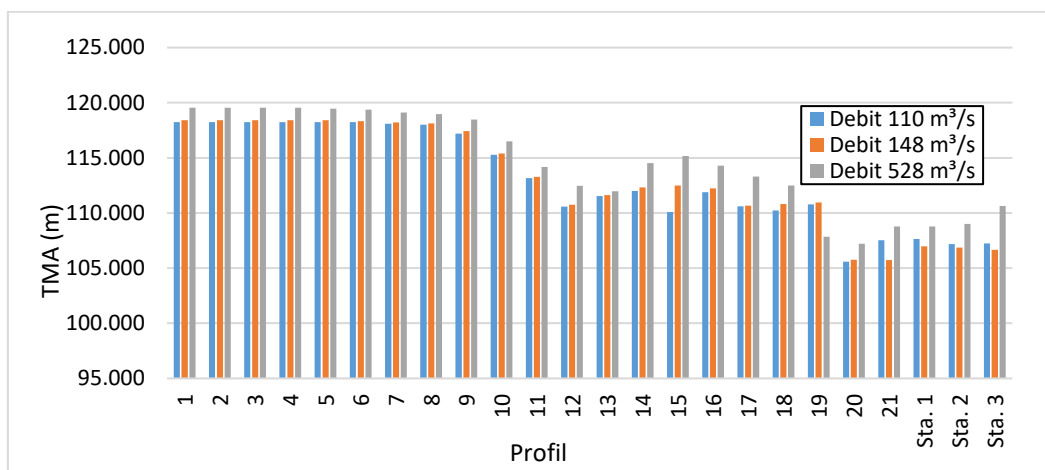
No.	Debit aliran (m <sup>3</sup> /s)	Elevasi muka air (m)	Sisa Jagaan (m)	Elevasi Puncak Bendungan
1	$Q_{1000} = 148.05$	118.37	2.38	+120.75
2	PMF = 526.70	119.47	1.28	

Hasil pengamatan *rating curve* aliran pada pelimpah waduk dibuat sebagai grafik hubungan antara data debit pelimpah dengan data tinggi air waduk di atas pelimpah muka air waduk. gambar lengkung debit dengan elevasi muka air pada Gambar 7. Secara matematik *rating curve* dinyatakan dalam formulasi:  $Y = 114,9x^{0.006}$



**Gambar 7.** Garis Lengkung Hubungan Antara Debit Dengan Elevasi Muka Air (2015)

- Hasil Pengamatan elevasi muka air. Pengamatan elevasi muka air dilakukan untuk setiap debit kala ulang dan dimulai dari hulu pelimpah sampai sungai di hilir kolam olakan. Dalam tulisan ini hanya ditampilkan debit kala ulang  $Q_{100}$  (110 m<sup>3</sup>/dt) untuk mengontrol kapasitas kolam olak,  $Q_{1000}$  (148 m<sup>3</sup>/dt) untuk mengontrol kapasitas dinding saluran luncur dan  $Q_{PMF}$  (528 m<sup>3</sup>/dt) untuk mengontrol kapasitas dam. Hasil pengamatan elevasi muka air disajikan dalam Gambar 8.



Gambar 8. Elevasi Muka Air, Seri-I (2015)

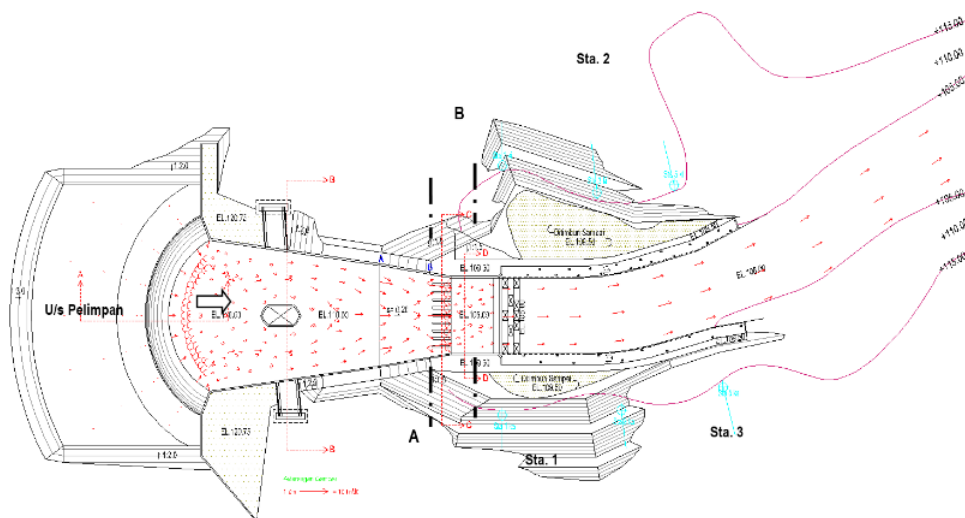
- Kecepatan aliran model seri- I (desain awal). Kecepatan aliran dilakukan pengukuran hanya pada tertentu saja antara lain: di hulu pelimpah, di saluran lurus dan di hilir kolam olak (saluran pembuang). Letak pengamatan kecepatan aliran seperti gambar 5 yaitu di *upstream* pelimpah, di *crosssection* A, B dan di Sta 1, 2 dan 3. Hasil pengamatan kecepatan aliran seperti Tabel 5.

Tabel 5. Kecepatan Aliran (m/dt) Model Seri -I

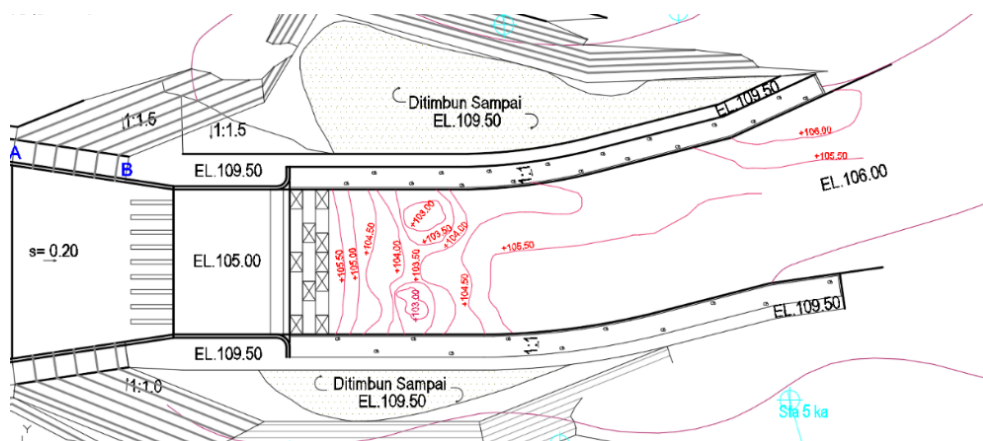
No.Sta	Debit Kala Ulang			
	Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>100</sub>	Q <sub>1000</sub>
U/s. Cross	0,32	0,33	0,40	0,60
A	3,31	3,51	4,09	5,32
B	5,15	5,39	6,58	7,33
Sta.1	2,15	2,39	3,11	6,45
Sta.2	2,88	3,40	4,13	7,23
Sta.3	2,79	3,40	4,65	6,46

Sumber: Balai Sungai, 2015

- Pola aliran, aliran di hulu pelimpah mengalir merata mengali tegak lurus terhadap As pelimpah. Tetapi aliran yang berada disaluran transisi, terjadi aliran silang dan tebal aliran tidak merata (Gambar 9) di saluran lurus terjadi aliran yang bergelombang, dan kolam olak hanya mampu meredam energi debit kala ulang 5 tahun saja.
- Gerusan Lokal. Gerusan lokal yang dilakukan Seri-I adalah debit kala ulang 10 tahun untuk mengetahui kecenderungan terjadinya gerusan lokal di hilirkolam olak ( pada saluran pembuang). Dari hasil pengamatan gerusan lokal terjadi gerusan sedalam 3,00 m. Dari dasar rencana + 106,00 m gerusan terdalam +103,00 m (Gambar 10).



Gambar 9. Letak Pengukuran Kecepatan Aliran



Gambar 10. Gerusan lokal pada saluran pembuang

**Tes Modifikasi I ( Model Seri-II)**

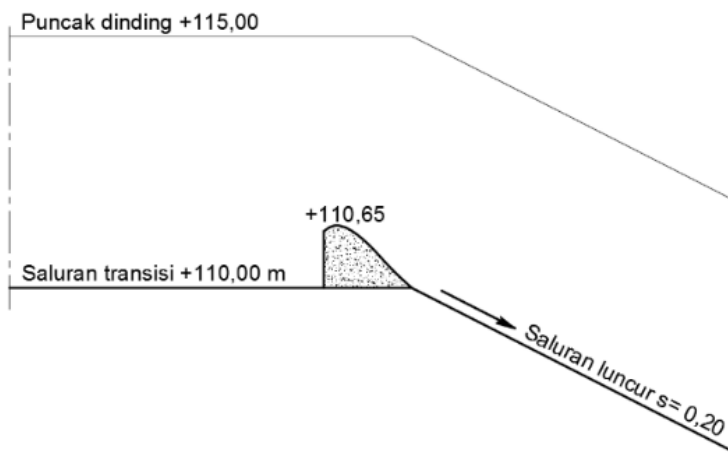
Tes modifikasi I adalah menyempurnakan bentuk pola aliran di saluran transisi, supaya tidak terjadi aliran silang yang liar, sehingga dapak di saluran lancar maupun di kolam olak akan lebih sempurna.

Dengan dipasangnya ambang dasar (*bottom controle*) di perubahan elevasi antara saluran taransisi dengan saluran lancar. Elevasi ambang dasar ini didapat dengan cara *trial and error* hasil pengaliran, sehingga didapat elevasi puncak optimum ambang dasar + 110,65 m(atau 0,65 m dari dasar saluran transisi) Gambar 11.

Tujuan ambang dasar ini adalah untuk membentuk aliran super kritis menjadi subkritis, sehingga aliran bisa tenang.

1. Elevasi muka arah memanjang kondisinya berdasarkan hasil pengamatan kecepatan aliran sebagai berikut:
  - a. Dam mampu menampung kapasitas debit PMF.
  - b. Dinding saluran lancar mampu mengalirkan debit dengan kala ulang 1000 tahunan, begitu pula dinding kolam olak.

- c. Aliran silang dan kecepatan aliran pada saluran luncur telah terdistribusi merata.
- d. Muka air untuk debit PMF di saluran pembuang tidak terkontrol.
- e. Tabel hasil pengamatan disajikan pada Tabel 6.



**Gambar 11.** Ambang Dasar Di Akhir Salurarah Transisi

**Tabel 6.** Kecepatan Aliran Model Seri -II

No.Sta	Debit Kala ulang			
	Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>100</sub>	Q <sub>1000</sub>
U/s. Cress	0,32	0,33	0,40	0,60
A	3,34	3,51	4,96	5,20
B	5,39	5,39	5,29	7,93
Sta.1	2,73	2,40	3,14	3,69
Sta.2	2,39	3,40	3,78	3,21
Sta.3	3,39	3,40	3,78	3,68

Sumber: Balai Sungai, 2015

2. Pola Aliran. Dengan adanya ambang dasar yang berada di akhir saluran transisi ini aliran di saluran transisi lebih merata dibanding model seri – I. Kondisi aliran di saluran luncur seragam dan merata, bentuk pola aliran di kolam olak, untuk debit dibawah 110 m<sup>3</sup>/dt energinya dapat pecahkan, tetapi untuk > 110 m<sup>3</sup>/dt masih perlu adanya modifikasi desain kolam olak. (Gambar 12 dan 13)



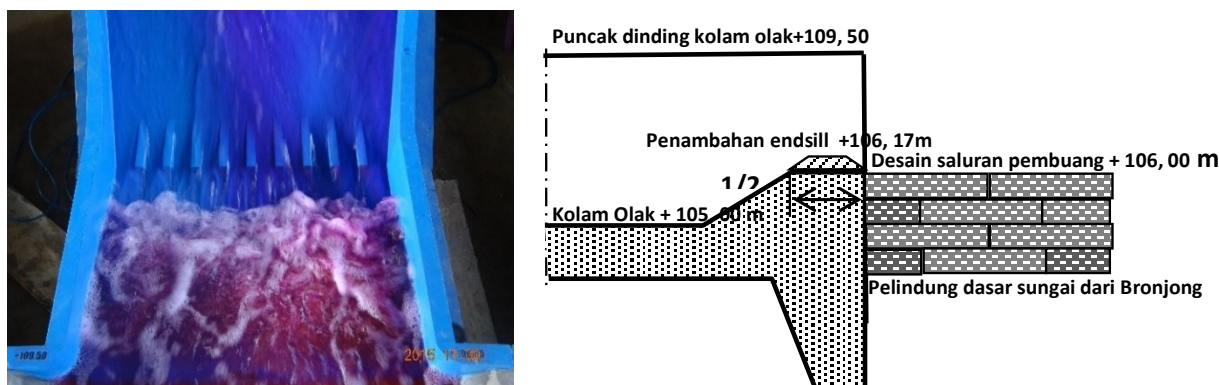
**Gambar 12.** Kolam Olak Berfungsi Maksimum Q<sub>10</sub> th



**Gambar 13.** Kolam Olak Tidak Berfungsi, Bila > Q<sub>10</sub> th

**Tes Modifikasi II ( Model Seri-III)**

Model Seri-III atau modifikasi II adalah menyempurnakan kolam olak supaya untuk setiap debit mengalir khususnya untuk debit kala ulang 100 tahun energinya harus dapat dipecahkan. Untuk membuat kolam olak supaya berfungsi dengan sempurna ada beberapa cara antara lain dasar kolam olak elevasi diturunkan, menambah blok beton diantara *chute block* dan *endsill*. Mengingat kolam olak ini sudah bisa meredam debit sampai 110 m<sup>3</sup>/dt maka cukup meninggikan *end sill* setinggi 17 cm. Penentuan tinggi ini berdasarkan *trial and error* percobaan aliran di model fisik.



**Gambar 14.** Modifikasi *End Sill*

1. Kecepatan aliran.

Hasil pengamatan kecepatan aliran seperti tabel berikut:

**Tabel 7.** Kecepatan Aliran Model Seri -III

No.Sta	Debit Kala ulang			
	Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>100</sub>	Q <sub>1000</sub>
U/s. Cress	0,32	0,33	0,40	0,60
A	3,34	3,51	4,96	5,39
B	5,39	5,39	6,59	8,30
Sta.1	2,73	2,40	3,56	3,80
Sta.2	2,39	3,40	2,78	3,21
Sta.3	3,39	3,40	3,08	3,27

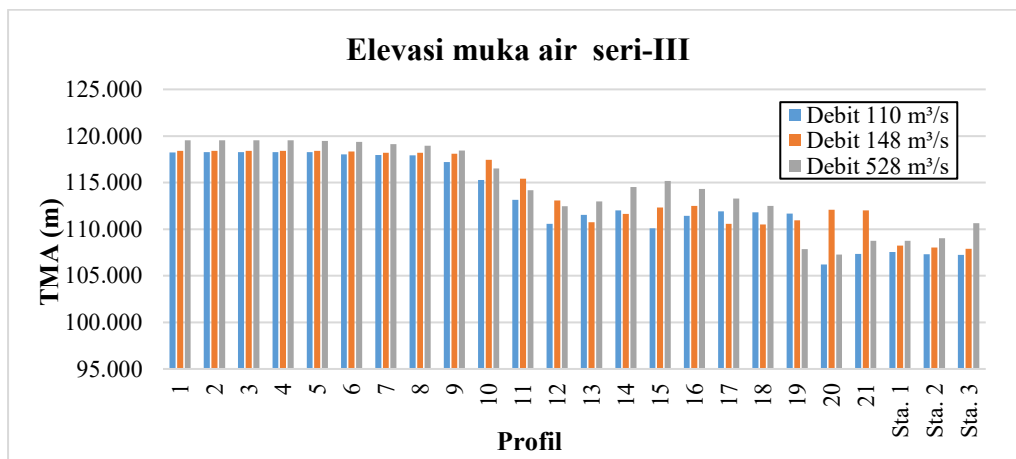
Sumber: Balai Sungai 2015

Setelah dilakukan modifikasi desain pada kolam olakan terjadi perubahan terhadap karakteristik aliran. Pada debit Q<sub>100</sub> dan Q<sub>1000</sub> terlihat aliran pada kolam olakan telah teredam dengan sempurna sebelum masuk ke alur sungai.

2. Elevasi muka air

Hasil pengamatan elevasi tinggi muka air arah memanjang kondisinya sbb:

- a. Dam mampu menampung kapasitas debit PMF.
- b. Dinding saluran luncur mampu mengalirkan debit dengan kala ulang 1000 tahunan, begitu pula dinding kolam olak.
- c. Muka air untuk debit PMF di saluran pembuang tidak terkontrol.



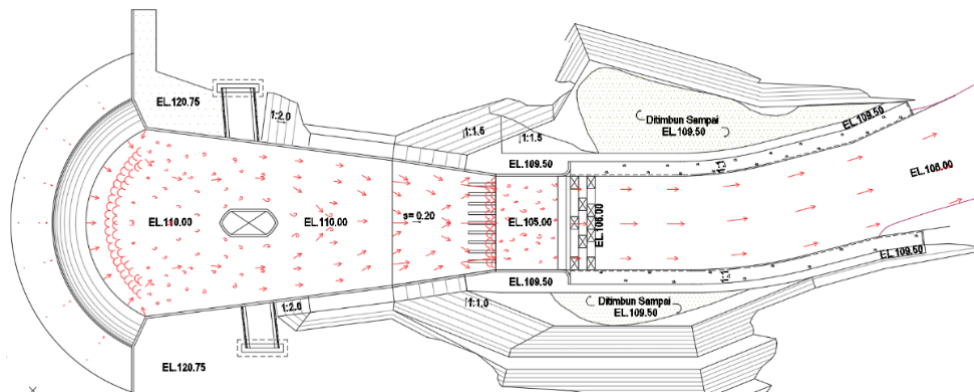
Gambar 15. Elevasi Muka Air, Seri-I (2015)

### 3. Pola Aliran

Dengan adanya ambang dasar di akhir saluran transisi dan penambahan tinggi end sill, aliran di saluran luncur dari pelimpah sampai saluran pembuang menjadi lebih sempurna. Khususnya untuk debit kala ulang 100 tahun kebawah. Kolam olak berfungsi pemecah energi sehingga diharapkan gerusan lokal di hilir kolam olak tidak membahayakan (Gambar 16 dan 17).



Gambar 16. Aliran Model Fisik Dengan Debit Kala Ulang 100 Tahun. (110 m³/dt)



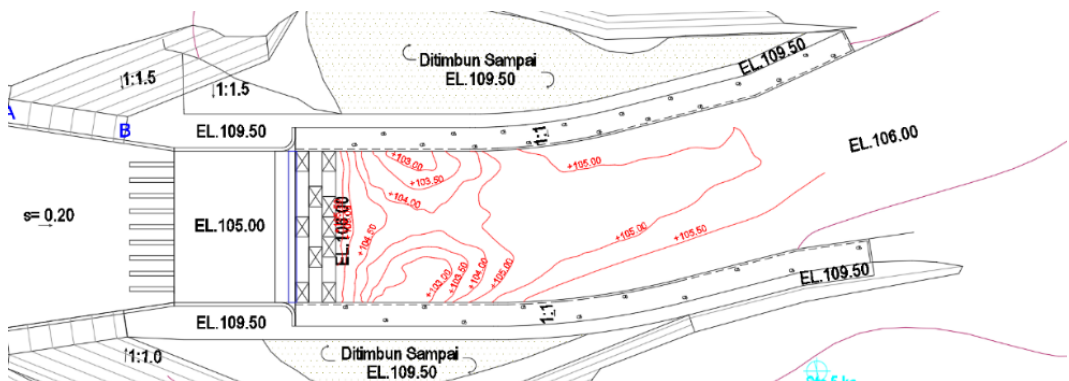
Gambar 17. Pola Aliran Dengan Debit Kala Ulang 100 Tahun. (110 m³/dt)

4. Gerusan Lokal

Setelah didapat hasil uji model fisik (Gambar 17) yang terbaik ditinjau dari segi hidraulik, lalu dilakukan uji gerusan lokal khususnya di hilir kolam olak pada saluran pembuang (Gambar 18).

Hasil pengamatan gerusan sbb:

- a. Debit aliran  $Q_{10}$  tahun ( $79 \text{ m}^3/\text{dt}$ )
  - Gerusan terdalam mencapai 2,00 m dibawah dasar saluran pembuang rencana (Elevasi dasar saluran pembuang desain +106,00 m)
  - Letak gerusan terdalam berada di alur kanan dan kiri sejauh 15,00 m dari *endsill*, gerusan terdalam mencapai elevasi  $1= 104,00 \text{ m}$ .
- b. Debit aliran  $Q_{100}$  tahun ( $110 \text{ m}^3/\text{dt}$ )
  - Gerusan terdalam mencapai 3,00 m dibawah dasar saluran pembuang rencana (Elevasi dasar saluran pembuang desain +106,00 m)
  - Letak gerusan terdalam berada di alur kanan dan kiri sejauh 15,00 m dari *endsill* gerusan terdalam mencapai elevasi  $1= 103,00 \text{ m}$



Gambar 18. Gerusan Lokal Akibat Debit Aliran  $110 \text{ m}^3/\text{dt}$

**Kesimpulan dan Saran**

**Kesimpulan**

Hasil pengujian terhadap desain bendung/dam masih aman pada saat bedit PMF dengan debit kala ulang 1000 tahun. Tinggi jagaan bendung pada saat  $Q_{1000}$  adalah 2,38 m, dimana persyaratan minimal adalah 2,00 m.

Bangunan ambang dasar sangat bermanfaat, untuk menyeragamkan pola aliran di saluran transisi dan bisa menstabilkan aliran yang bergelombang di kolam olak. Dengan memodifikasi mempertinggi bangunan *endsill* sebesar 17 cm, kolam olak berfungsi secara sempurna untuk segala debit aliran.

**Saran**

Perlu di lakukan penambahan ambang datar pada saluran pembuang untuk meminimalisir gerusan yang diakibatkan oleh debit kala ulang  $Q_{100}$  tahun ( $110 \text{ m}^3/\text{dt}$ ).

### **Ucapan Terima Kasih**

Ucapan terimakasih disampaikan kepada seluruh tim Peneliti dan Perakayasa Balai Sungai dan semua pihak yang telah membantu sehingga terwujudnya tulisan ini.

### **Daftar Referensi**

- Anonim. 2013 Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Anonim. 2015. Laporan Akhir Uji Model Fisik Bendungan Sukamahi Kabupaten Bogor Propinsi Jawa Barat. Malang : Jurusan Pengairan FT UB.
- Daud F S, Reza A, Andi Rani. (2018) “Uji Model Pengaruh Bentuk Pelimpah Terhadap Karakteristik Pengaliran” Jurnal Teknik Hidro. Maksar.
- Lutfi Moh M, Eko N, Azizah R. 2018. “Studi Perencanaan Bendung Pelimpah(Spillway) pada Bendung Tugu Kabupaten Trenggalek” Jurnal Rekayasa Sipil. Malang.
- Kirno dan Sarwono. (2014) “Penyempurnaan Desain Bangunan Pelimpah Cileuweung Dengan Uji Model Hidraulik Fisik” Jurnal PUSAIR Bandung.
- PT. Daya Cipta Dianrancana. 2015 “Laporan Detail Desain Rehabilitasi Spillway Waduk Pacal di Kabupaten Bojonegoro” BBWS Bengawan Solo.
- Sosrodarsono, Ir. Suyono & Kensaku Takeda. 1997. Bendungan Tipe Urugan. Jakarta : Pradnya Paramita.

## PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI BANJIR BERDASARKAN AKURASI INFLOW DAN OUTFLOW PADA BENDUNGAN BILI BILI

Rachmat Ciptadi\*, Fajar Arif Nurdin, Febi Murdiana\*, Nur Indah Sari,  
dan Husnul Khatimah\*

Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang

\*work.rachmat.ciptadi@pu.go.id

Pemasukan: 30 Juni 2024 Perbaikan: 30 September 2024 Diterima: 6 Desember 2024

### Intisari

Pemodelan prediksi debit *inflow* pada Bendungan Bili Bili yang sudah dikembangkan oleh Pusat Monitoring Bendungan (PMB) telah memenuhi nilai interpretasi validasi, akan tetapi nilai validasi data masih dapat perlu ditingkatkan. Sehingga pada penelitian ini dilakukan pengembangan simulasi model prediksi menggunakan HEC-HMS dengan metode *Transform Method Clark* untuk memprediksi debit 5 harian dengan menggunakan data curah hujan prediksi BMKG dan debit *inflow* hasil observasi. Validasi hasil model simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dan observasi menggunakan metode *Root Mean Squared Error* (RMSE), uji Kesalahan Relatif (KR), *Nash Sutcliffe Efficiency* (NSE) dan Koefisien Korelasi (R). Metode kalibrasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan persamaan linier dengan rentang data 7 hari yang dimulai dari tanggal 6 Februari-23 Juni 2024. Hasil validasi data model simulasi data hujan BMKG terhadap *inflow* observasi terkalibrasi terbaik terdapat pada periode prediksi 1 hari ke depan, dengan hasil NSE rata-rata = 0,761; R rata-rata = 0,246; KR rata-rata = 7,2%; RMSE rata-rata = 26,814, karena memiliki nilai NSE yang mendekati satu dan nilai RMSE dan kesalahan relatifnya rendah. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa perbandingan data simulasi data hujan BMKG terhadap debit *inflow* observasi dengan keakurasian prediksi 1 hari ke depan dapat digunakan untuk prediksi *inflow* pada Bendungan Bili Bili.

Kata kunci: Curah Hujan BMKG, Prediksi *Inflow*, Kalibrasi, Validasi, Akurasi.

### Latar Belakang

Waduk merupakan salah satu contoh perairan tawar buatan yang dibuat dengan cara membendung sungai tertentu dengan berbagai tujuan yaitu sebagai pereduksi debit banjir, pembangkit tenaga listrik, penyedia air bagi kebutuhan irigasi pertanian, dan air baku. Waduk mempunyai karakteristik yang berbeda dengan badan air lainnya, waduk menerima masukan air secara terus menerus dari sungai yang mengalirinya (Apridayanti, 2008). Waduk Bili Bili memiliki peranan sangat penting dalam penunjang kehidupan sumber daya air diantaranya sebagai pengelolaan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) 20,5 MWh, Daerah Irigasi sebesar 25,783 Ha, Air Baku sebesar 3,52 m<sup>3</sup>/detik dan berfungsi untuk menampung air saat terjadi

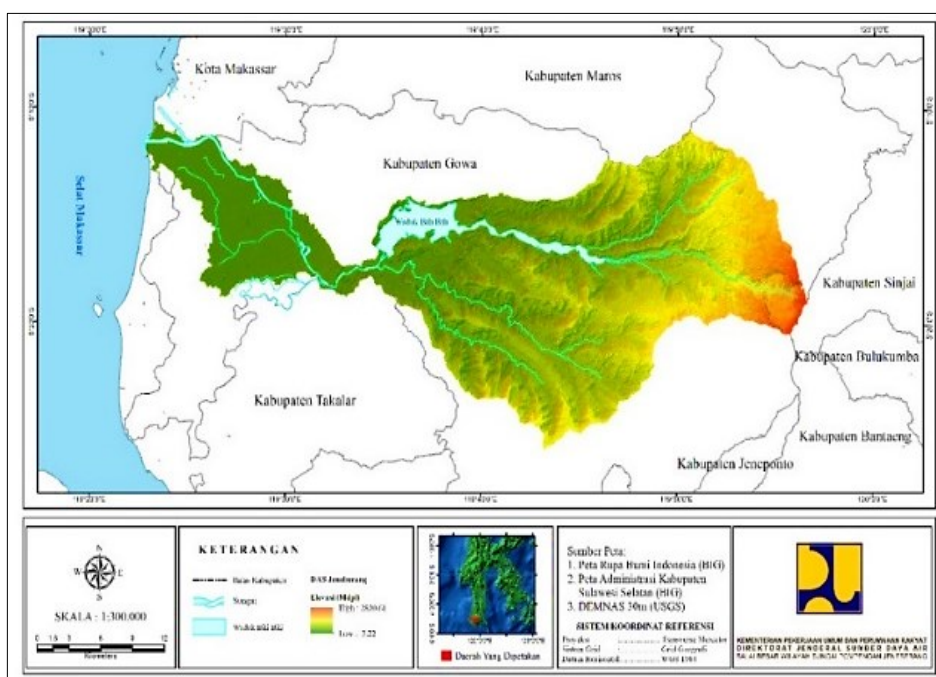
kelebihan air/musim penghujan sehingga dapat mereduksi banjir sampai 1200 m<sup>3</sup>/detik. Sehingga air itu dapat dimanfaatkan pada musim kering.

Dengan memiliki kemampuan yang beragam, tentu saja memerlukan strategi operasional dalam mengelola suatu waduk, pengelolaan suatu waduk yang hanya memiliki satu fungsi misalnya PLTA saja akan memiliki strategi operasional yang berbeda dengan waduk yang memiliki fungsi yang kompleks (Xu, Dkk., 2014) Dibutuhkan strategi dalam pengoperasian waduk untuk mencegah kesalahan dalam memperhitungkan kekurangan atau kelebihan tampungan air (*storage*) serta kesalahan saat pelepasan air (*release*). Kesalahan ini dapat merugikan, karena kekurangan air di tampungan dapat mengakibatkan tidak tercapainya target pemanfaatan air pada bendungan. Sebaliknya, kesalahan dalam pelepasan air waduk dapat menyebabkan banjir (Elmasari dan Nurhadi, 2019). Prediksi debit *inflow* sangat penting untuk penyusunan Pola Operasi Waduk dan Operasi Waduk Harian. Prediksi tersebut dalam mendukung Operasi Waduk Harian dapat digunakan untuk memberikan rekomendasi TMA waduk dan rekomendasi *outflow* sebagai bahan pertimbangan Unit Pengelola Bendungan (UPB) dalam melaksanakan operasi waduk baik pada kondisi operasi banjir, normal dan kering. Model prediksi harus memiliki tingkat akurasi yang baik terhadap debit *inflow* realisasi sehingga dapat memberikan rekomendasi yang mendekati kondisi aktual.

Pemodelan prediksi debit *inflow* pada Bendungan Bili Bili sebelumnya sudah dilakukan simulasi peramalan debit masuk (*inflow*) oleh Pusat Monitoring Bendungan (PMB), Direktorat Bina Operasi dan Pemeliharaan, Ditjen Sumber Daya Air. Pada penelitian kali ini dilakukan kembali model peramalan debit masuk (*inflow*) menggunakan model HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*) dengan menggunakan *Transform Method Clark*, dengan menyesuaikan adanya perubahan data bathimetri dan tutupan lahan agar meningkatkan keakurasian *inflow* prediksi terhadap *inflow* observasi. Hasil dari model simulasi HEC-HMS berupa debit *inflow* prediksi 5 hari kedepan, dan perlu dilakukan kalibrasi dan validasi data. Untuk menguji keakuratan perbandingan data prediksi *inflow* terhadap debit *inflow* observasi. Dilakukan analisis perbandingan validasi data menggunakan metode *Root Mean Squared Error* (RMSE), *Nash Sutcliffe Efficiency* (NSE), Koefisien Korelasi (R), dan Kesalahan Relatif (KR) dengan kalibrasi data menggunakan metode linier.

### Metodologi Studi

Lokasi penelitian dalam studi ini terletak di Bendungan Bili Bili. Di Desa Bili Bili, Kecamatan Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Secara geografis berada pada posisi koordinat 5° 16' 49.3" LS - 119° 35' 10.4" BT. Bendungan Bili Bili berada pada Wilayah Sungai Jeneberang dengan Sungai utama yaitu Sungai Jeneberang, Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Lokasi Penelitian di Bendungan Bili Bili (sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang, 2024)

Data yang digunakan untuk penelitian ini adalah data *inflow* observasi dan curah hujan prediksi BMKG periode harian pada tanggal 6 Februari - 23 Juni 2024. Data *inflow* observasi bendungan diperoleh dari Unit Pengelola Bendungan I (UPB I) Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang, sedangkan data curah hujan prediksi BMKG diperoleh melalui Pusat Monitoring Bendungan (PMB) periode harian. Langkah simulasi model dilakukan dengan tahap sebagai berikut:

1. Melakukan input data pada model seperti data curah hujan prediksi BMKG dalam format ECMWF kemudian dilakukan pemrosesan *gridded data* dengan bantuan perangkat lunak HEC-HMS 4.10 dan data *inflow* observasi dilakukan penginputan data debit melalui perangkat lunak HEC-DSS.
2. Menjalankan program pada aplikasi HEC-HMS 4.12 menggunakan parameter transform *Mod Clark* dengan memasukkan variabel *Time of concentration* dan *Storage capacity* kedalam Persamaan *Bransby Williams* (1) dan (2) (Kull dan Feldman, 1998) sehingga menghasilkan data volume debit dan hidrograf.

variabel *Time of concentration* pada Persamaan (1)

$$t_c = \frac{58.5 L}{A^{0.1} S_e^{0.2}} \tag{1}$$

dengan :

- $t_c$  : *time concentration* (menit)
- $L$  : *longest flowpath* (km)
- $S_e$  : *longest flowpath slope* (m/km)
- $A$  : luas area *subbasin* (km<sup>2</sup>)

variabel *Storage coefficient* pada Persamaan (2)

$$R = t_c \tag{2}$$

3. Kalibrasi hasil prediksi *inflow* HEC-HMS pada studi ini menggunakan kalibrasi linier dengan data mingguan selama rentang 4 bulan. Kalibrasi data bertujuan untuk proses optimalisasi nilai parameter untuk meningkatkan koherensi antara respon hidrologi yang teramati dan tersimulasi (Indarto, 2012). Dimasukkan pada Persamaan (3) dan (4) untuk membuat hubungan antara dua variabel (Soewarno, 1995).

$$\hat{Y} = a_1X + b_1 \tag{3}$$

$$\hat{X} = a_2X + b_2 \tag{4}$$

dengan :

$\hat{Y}$  : persamaan garis lurus Y terhadap X

$\hat{X}$  : persamaan garis lurus X terhadap Y

$a_1, a_2$  : koefisien regresi (koefisien arah dari garis regresi)

$b_1, b_2$  : koefisien yang merupakan titik potong dari garis regresi

4. Validasi model pada penelitian ini dilakukan dengan terbagi menjadi dua tahapan, terdiri dari tahap analisis validasi data tidak terkoreksi dan data terkoreksi. Validasi data bertujuan untuk mengetahui tingkat ketidakpastian dari suatu model yang sudah dihasilkan dari proses kalibrasi untuk memprediksi proses hidrologi (Rahma, 2019) validasi data memakai parameter *Root Mean Squared Error* (RMSE), *Nash Sutcliffe Efficiency* (NSE), Koefisien Korelasi (R), dan Kesalahan Relatif (KR) (Jarwanti, dkk., 2021) pada Persamaan (5), (6), (7) dan (8).

**Root Mean Square Error (RMSE)**

*Root Mean Square Error* (RMSE) perbedaan nilai dari prediksi sebuah model sebagai estimasi atas nilai yang diobservasi. Semakin kecil nilai RMSE suatu model mendekati 0 maka semakin akurat model analisa tersebut (Syaifullah, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2}{n}} \tag{5}$$

dengan:

$z_i$  : nilai aktual ( $m^3/s$ )

$\hat{z}_i$  : nilai hasil prediksi ( $m^3/s$ )

$n$  : jumlah data

**Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)**

Fungsi dari NSE untuk mengevaluasi kebenaran antara data yang terukur dan data terhitung suatu model (Wulandari, dkk., 2016). Model dikatakan bagus jika nilai NSE mendekati 1 (Indarto, 2012) Jika nilai  $NSE < 0$  maka kecocokan terhadap data yang ada di lapangan sangat buruk (Sugiyono, 2007). Tingkat interpretasi nilai NSE dapat dilihat pada Tabel 1.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \tag{6}$$

dengan:

$P_i$  = data observasi (m<sup>3</sup>/s)

$Q_i$  = data perkiraan (m<sup>3</sup>/s)

$\bar{P}_i$  = data observasi rata-rata

$n$  = jumlah data

Tabel 1. Interpretasi nilai *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

Nilai NSE	Interpretasi
NSE > 0,750	Baik
0,36 < NSE < 0,75	Memenuhi
NSE < 0,36	Tidak Memenuhi

(sumber : Motovilov et al., 1999)

**Koefisien Korelasi (R)**

Analisis korelasi ialah salah satu metode statistik yang biasa digunakan dalam mengetahui kuatnya hubungan antara dua variabel (Clay, 2007). Tingkat kriteria nilai koefisien korelasi dapat dilihat pada Tabel 2.

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N P_i Q_i - \sum_{i=1}^N P_i \times \sum_{i=1}^N Q_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N P_i^2 - (\sum_{i=1}^N P_i)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N Q_i^2 - (\sum_{i=1}^N Q_i)^2}} \tag{7}$$

Tabel 2. Kriteria Nilai Koefisien Korelasi (R)

R	Intrepretasi
0,00 – 0,19	Sangat Rendah
0,20 – 0,39	Rendah
0,40 – 0,59	Sedang
0,60 – 0,79	Kuat
0,81 – 1,00	Sangat Kuat

(sumber : Soewarno, 1995)

**Kesalahan Relatif (KR)**

Uji kesalahan relatif pada Persamaan (8)

$$KR = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)}{\sum_{i=1}^N P_i} \times 100\% \tag{8}$$

**Hasil Studi dan Pembahasan**

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dengan perbandingan *inflow* observasi terhadap *inflow* prediksi periode 6 Feb 2024 - 23 Jun 2024 menggunakan *software* HEC-HMS menunjukkan bahwa prediksi 5 harian memiliki tingkat kesalahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan prediksi periode 1 harian. Oleh karena itu, dalam penelitian ini menggunakan akurasi prediksi periode 1 harian. Untuk perbandingan nilai hasil uji validasi data tidak terkalibrasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai validasi *inflow* prediksi tidak terkalibrasi

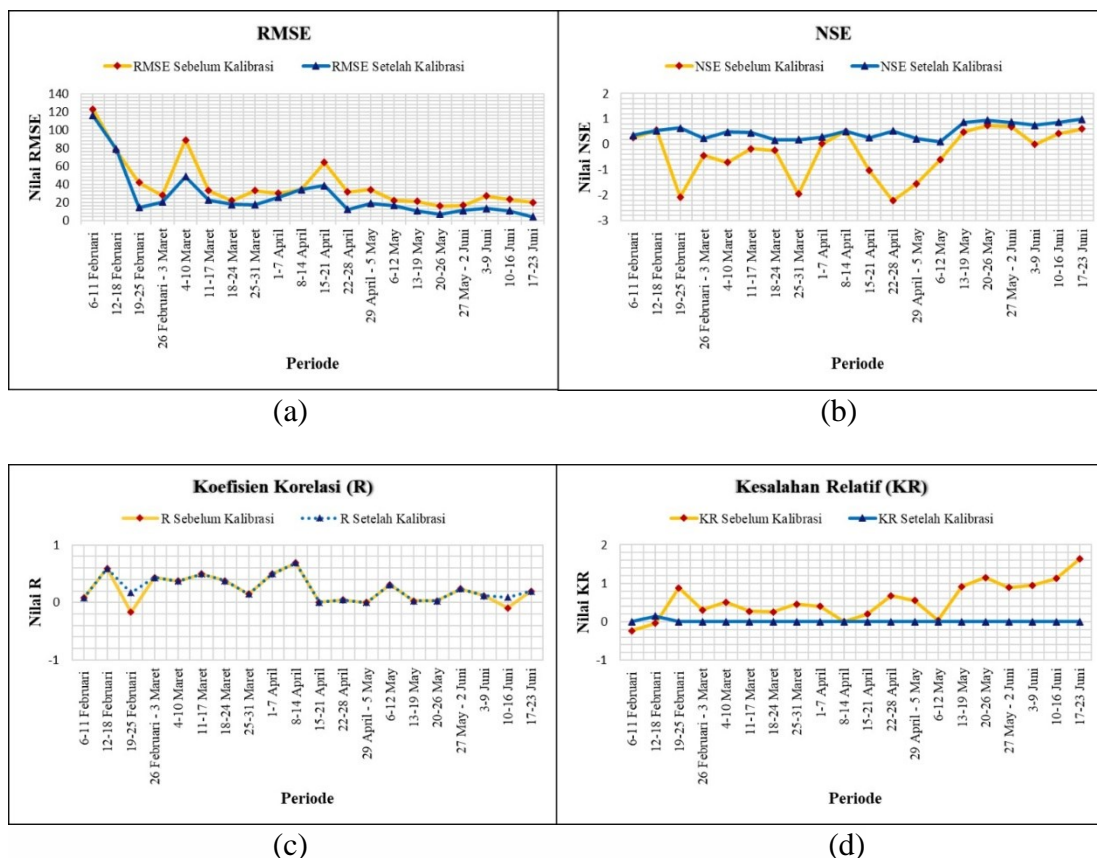
Periode	RMSE	NSE		KR	R	
		nilai	Intrepretasi		nilai	Intrepretasi
6-11 Februari	122,926	0,267	Tidak Memenuhi	-0,230	0,081	Sangat Rendah
12-18 Februari	77,421	0,549	Memenuhi	-0,037	0,592	Sedang
19-25 Februari	41,556	-2,071	Tidak Memenuhi	0,880	-0,171	Sangat Rendah
26 Februari - 3 Maret	27,734	-0,430	Tidak Memenuhi	0,309	0,432	Sedang
4-10 Maret	88,592	-0,712	Tidak Memenuhi	0,511	0,374	Rendah
11-17 Maret	32,899	-0,173	Tidak Memenuhi	0,270	0,494	Sedang
18-24 Maret	21,715	-0,237	Tidak Memenuhi	0,253	0,378	Rendah
25-31 Maret	32,962	-1,948	Tidak Memenuhi	0,454	0,148	Sangat Rendah
1-7 April	29,902	0,025	Tidak Memenuhi	0,403	0,496	Sedang
8-14 April	33,900	0,509	Memenuhi	0,002	0,688	Kuat
15-21 April	63,907	-1,035	Tidak Memenuhi	0,197	0,005	Sangat Rendah
22-28 April	31,449	-2,222	Tidak Memenuhi	0,678	0,048	Sangat Rendah
29 April - 5 May	33,905	-1,538	Tidak Memenuhi	0,549	0,001	Sangat Rendah
6-12 May	22,090	-0,608	Tidak Memenuhi	0,038	0,312	Rendah
13-19 May	21,134	0,480	Memenuhi	0,916	0,028	Sangat Rendah
20-26 May	15,994	0,730	Baik	1,151	0,031	Sangat Rendah
27 May - 2 Juni	16,614	0,698	Memenuhi	0,886	0,235	Rendah
3-9 Juni	26,879	-0,009	Tidak Memenuhi	0,950	0,117	Sangat Rendah
10-16 Juni	23,368	0,414	Memenuhi	1,124	-0,093	Sangat Rendah
17-23 Juni	19,978	0,604	Memenuhi	1,633	0,196	Sangat Rendah

Berdasarkan dari Tabel 3 dapat terlihat bahwa secara umum hasil validasi data tidak terkalibrasi menunjukkan nilai intrepretasi data prediksi tidak memenuhi. Maka perlu dilakukan kalibrasi data *inflow* prediksi terhadap *inflow* observasi menggunakan persamaan linier. Hasil uji validasi data terkalibrasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai validasi *inflow* prediksi terkalibrasi

Periode	RMSE	NSE		KR	R	
		nilai	Intrepretasi		nilai	Intrepretasi
6-11 Februari	115,733	0,351	Tidak Memenuhi	0,000	0,081	Sangat Rendah
12-18 Februari	78,607	0,536	Memenuhi	0,145	0,592	Sedang
19-25 Februari	14,256	0,639	Memenuhi	0,000	0,171	Sangat Rendah
26 Februari - 3 Maret	20,228	0,239	Tidak Memenuhi	0,000	0,432	Sedang
4-10 Maret	48,313	0,491	Memenuhi	0,000	0,374	Rendah
11-17 Maret	22,486	0,464	Memenuhi	0,000	0,494	Sedang
18-24 Maret	17,748	0,173	Tidak Memenuhi	0,000	0,378	Rendah
25-31 Maret	17,318	0,186	Tidak Memenuhi	0,000	0,148	Sangat Rendah
1-7 April	25,510	0,291	Tidak Memenuhi	0,000	0,496	Sedang
8-14 April	33,900	0,510	Memenuhi	0,000	0,688	Kuat
15-21 April	38,491	0,262	Tidak Memenuhi	0,000	0,005	Sangat Rendah
22-28 April	12,042	0,527	Memenuhi	0,000	0,048	Sangat Rendah
29 April - 5 May	18,757	0,223	Tidak Memenuhi	0,000	0,001	Sangat Rendah
6-12 May	16,499	0,103	Tidak Memenuhi	0,000	0,312	Rendah
13-19 May	10,462	0,873	Baik	0,000	0,028	Sangat Rendah
20-26 May	6,895	0,950	Baik	0,000	0,031	Sangat Rendah
27 May - 2 Juni	10,945	0,869	Baik	0,000	0,235	Rendah
3-9 Juni	13,396	0,751	Baik	0,000	0,117	Sangat Rendah
10-16 Juni	10,791	0,875	Baik	0,000	0,093	Sangat Rendah
17-23 Juni	3,909	0,985	Baik	0,000	0,196	Sangat Rendah

Berdasarkan dari Tabel 4 menunjukkan hasil nilai validasi terkalibrasi jauh lebih baik, dimana nilai RMSE dan kesalahan relatif mengalami penurunan, sementara itu nilai NSE mengalami peningkatan yang hampir mendekati satu. Tetapi masih terdapat nilai interpretasi yang tidak memenuhi. Berikut disajikan grafik perbandingan antara hasil validasi data tidak terkalibrasi dan validasi data terkalibrasi pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Hasil perbandingan antara validasi data metode (a) RMSE (b) NSE (c) Koefisien Korelasi (R) (d) Kesalahan Relatif (KR)

Dari Gambar 2 menunjukkan hasil nilai dari masing-masing parameter validasi data tidak terkalibrasi dan data terkalibrasi dari *inflow* prediksi terhadap *inflow* observasi. Pada Gambar 2 (a) nilai RMSE antara data setelah dikalibrasi dan data sebelum dikalibrasi menghasilkan nilai kesalahan yang hampir sama, tetapi apabila dibandingkan dengan nilai data terkalibrasi menunjukkan hasil yang cukup baik nilai yang mendekati 0 sehingga menghasilkan tingkat kesalahan yang lebih kecil dibanding data sebelum dikalibrasi. Gambar 2 (b) nilai NSE sebelum dikalibrasi menunjukkan nilai tingkat kesalahan yang cukup tinggi, sedangkan nilai validasi data setelah terkalibrasi menunjukkan hasil yang paling baik karena nilai validasi NSE yang mendekati 1. Gambar 2 (c) nilai koefisien korelasi (R) menunjukkan nilai kesalahan yang hampir sama antara validasi data sebelum terkalibrasi dan sesudah terkalibrasi. Gambar 2 (d) kesalahan relatif (KR) sebelum dikalibrasi menunjukkan nilai tingkat kesalahan yang cukup tinggi, sedangkan nilai validasi data setelah

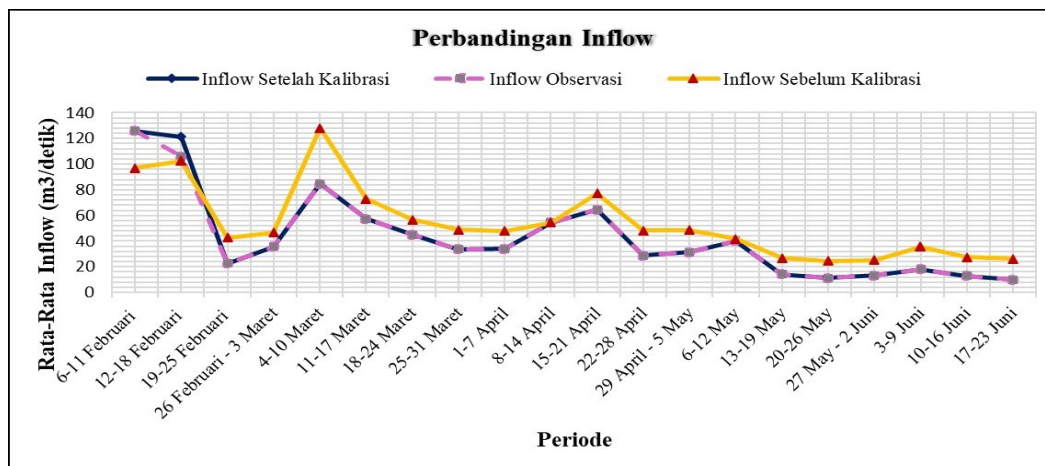
terkalibrasi menunjukkan kesalahan relatif yang kecil maka nilai perkiraan yang diperoleh akan semakin baik. Nilai terbaik untuk RMSE dan KR adalah yang mendekati 0, sedangkan nilai NSE dan R yang terbaik adalah mendekati 1 (Soewarno, 1995). Sehingga validasi data mengambil metode NSE karena memiliki nilai yang paling baik mendekati 1. Rekapitulasi hasil validasi data perbandingan antara *inflow* observasi, *inflow* prediksi sebelum terkalibrasi dan *inflow* sesudah kalibrasi pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji validasi *inflow* observasi, *inflow* sebelum kalibrasi dan *inflow* setelah kalibrasi

Periode	<i>Inflow</i> Observasi	<i>Inflow</i> Sebelum Kalibrasi	<i>Inflow</i> Setelah Kalibrasi
6-11 Februari	125,9710	96,9463	125,9756
12-18 Februari	106,0460	102,0274	121,3713
19-25 Februari	22,6625	42,6207	22,6621
26 Februari - 3 Maret	35,5446	46,5450	35,5428
4-10 Maret	84,6754	128,0097	84,6756
11-17 Maret	57,3617	72,8236	57,3587
18-24 Maret	45,1460	56,5736	45,1454
25-31 Maret	33,5813	48,8521	33,5809
1-7 April	34,0766	47,8227	34,0775
8-14 April	54,2886	54,3854	54,2882
15-21 April	64,3662	77,0537	64,3672
22-28 April	28,7386	48,2235	28,7368
29 April - 5 May	31,3973	48,6266	31,3976
6-12 May	40,1297	41,6528	40,1303
13-19 May	14,0688	26,9586	14,0690
20-26 May	11,3986	24,5145	11,3984
27 May - 2 Juni	13,3493	25,1751	13,3493
3-9 Juni	18,2137	35,5148	18,2143
10-16 Juni	12,9048	27,4120	12,9052
17-23 Juni	9,9260	26,1385	9,9256

Hasil uji validasi dari perbandingan *inflow* observasi dan *inflow* simulasi setelah validasi dapat disimpulkan memiliki keakurasian yang tinggi. Dimana grafik perbandingan antara *inflow* observasi, *inflow* simulasi sebelum kalibrasi dan *inflow* setelah kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan hasil data curah hujan prediksi BMKG harian terkalibrasi periode prediksi 1 hari ke depan memiliki tingkat nilai kesalahan yang paling rendah, terlihat dari *trend* grafik *inflow* prediksi setelah dilakukan kalibrasi nilainya hampir mendekati nilai grafik debit *inflow* observasi.



**Gambar 3.** Perbandingan *inflow* observasi, *inflow* sebelum kalibrasi dan *inflow* setelah kalibrasi

### Kesimpulan dan Saran

#### Kesimpulan

1. Hasil validasi data *inflow* prediksi terhadap *inflow* observasi menunjukkan bahwa validasi data terkalibrasi menghasilkan nilai yang lebih baik daripada nilai validasi data tidak terkalibrasi, ditinjau dari nilai RMSE rata-rata = 26,814 dan Kesalahan relatif (KR) rata-rata = 0,072 yang cenderung menurun dibandingkan dengan validasi data tidak terkalibrasi dimana nilai RMSE rata-rata = 39,247 dan kesalahan relatif (KR) rata-rata = 0,5469, sementara nilai NSE sebelum terkalibrasi rata-rata = 0,3350 dan Koefisien korelasi (R) sebelum terkalibrasi rata-rata = 0,2195 sedangkan untuk nilai NSE rata-rata = 0,761; koefisien korelasi (R) rata-rata = 0,246 setelah terkalibrasi mengalami kenaikan tetapi masih terdapat nilai interpretasi yang tidak memenuhi dengan konsistensi nilai interpretasi memenuhi baru 60% dari data 20 minggu.
2. Hasil pemodelan data curah hujan prediksi BMKG harian dalam format ECMWF dan *inflow* observasi periode 6 Feb 2024 - 23 Jun 2024 menggunakan *software* HEC-HMS menunjukkan bahwa prediksi 5 harian memiliki tingkat kesalahan yang lebih tinggi. Sehingga dilakukan validasi data dengan prediksi 1 hari kedepan dengan *rentang* data validasi 7 hari. Sehingga dapat disimpulkan bahwa menggunakan data curah hujan BMKG harian terkalibrasi dapat digunakan untuk memprediksi *inflow* pada Bendungan Bili Bili dengan periode 1 hari ke depan karena memiliki nilai tingkat kesalahan yang paling rendah.

#### Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, disarankan untuk penelitian selanjutnya untuk melakukan pengembangan model prediksi menggunakan metode yang lain untuk meningkatkan akurasi prediksi dan melakukan kalibrasi data *inflow* observasi pada tahun yang terbaru agar meningkatkan keakurasian terhadap data observasi dan data prediksi.

## Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Kementerian PUPR Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang, Unit Pengelola Bendungan I (UPB I) dan Pusat Monitoring Bendungan (PMB) atas bantuan dan masukan yang telah diberikan.

## Daftar Referensi

- Apridayanti, E., 2008. Evaluasi Pengelolaan Lingkungan Perairan Waduk Lahor Kabupaten Malang Jawa Timur. *tesis program magister Universitas Diponegoro*. <http://eprints.undip.ac.id/17305/>
- Clay, A., 2007. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta.: Gadjah Mada University Press.
- Elmasari, Y. & Nurhadi, 2019. Optimasi Artificial Neural Network Dengan Genetic Algorithm Pada Prediksi Debit Inflow Waduk Sengguruh. *Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika*, 4(2). <https://www.jurnal.stkipppgritulungagung.ac.id/index.php/jipi/article/view/1442>
- Indarto, 2012. *Hidrologi Dasar Teori dan Contoh Aplikasi Model Hidrologi*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Jarwanti, D. P., Suhartanto, E. & Fidari, J. S., 2021. Validasi Data Curah Hujan Satelit TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) dengan Data Pos Penakar Hujan di DAS Grindulu, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air (JTRESDA)* , 1 (2). <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2021.001.02.36>
- Kull, D. W. & Feldman, A. D., 1998. Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering* , 3(1). [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1998\)3:1\(9\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(1998)3:1(9))
- Rahma, N. F., 2019. Validasi Data Curah Hujan TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) dengan Pos Stasiun Hujan di Sub DAS Sumber Brantas. *skripsi program sarjana, Universitas Brawijaya*. <https://repository.ub.ac.id>
- Soewarno, 1995. *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Jilid 2*. Bandung: Nova.
- Sugiyono, 2007. *Statika Untuk Penelitian*. Bandung: Alfabeta.
- Syaifullah, M. D., 2014. Validasi Data TRMM Terhadap Data Curah Hujan Aktual Di Tiga Das Di Indonesia, J. Meteorol. dan Geofis. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* , 15(2). <https://jmg.bmkg.go.id>
- Wulandari, D. A., Budienny, H. & Kurniani, D., 2016. Keakuratan Prediksi Inflow Waduk Dengan Neraca Air Waduk. *Jurnal Ilmiah Bidang Ilmu Kerekayasaan* , 37(2). <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/teknik>
- Xu, B., Zhong, P.-a., Zhao, Y.-f. & Zhu, Y.-z., 2014. Comparison between dynamic programming and genetic algorithm for hydro unit economic load dispatch. *Water Science and Engineering*, 7(4), pp. 420-432. <https://www.sciencedirect.com/science>

## PEMANFAATAN LAHAN BASAH BUATAN UNTUK MENGURANGI DEGRADASI KUALITAS AIR DI DANAU TONDANO

Liany A. Hendratta<sup>1\*</sup>, Sugeng Harianto<sup>2</sup>, Audy H.P. Rantung<sup>2</sup>, dan La'la Monica<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi

<sup>2</sup>Balai Wilayah Sungai Sulawesi 1

\*lianyhendratta@unsrat.ac.id

Pemasukan: 29 Juni 2024 Perbaikan: 30 September 2024 Diterima: 21 Desember 2024

### Intisari

Perubahan iklim global akan berdampak pada perubahan temperatur dan curah hujan di Daerah Aliran Sungai (DAS). Dampak tersebut dapat mengubah volume aliran air masuk ke danau dan menyebabkan terbawanya kontaminan dan sedimen yang berujung pada degradasi kualitas air. Selain itu, polutan dari pertanian dan sumber lainnya semakin memperparah kondisi pencemaran di danau. Danau Tondano sebagai salah satu dari 15 danau prioritas nasional memiliki pemanfaatan yang beragam antara lain untuk pembangkit listrik tenaga air, air baku, pertanian, perikanan jaring tancap dan pariwisata, sudah mengalami eutrofikasi dan ledakan pertumbuhan plankton di permukaan danau yang akan membahayakan kehidupan organisme dalam ekosistem danau. Studi tentang kualitas air pada 9 inlet utama dan di danau dilakukan untuk mendapatkan kondisi aktual kualitas air danau. Hasil studi menunjukkan sebagian besar air di danau Tondano sudah tercemar ringan sampai berat. Dengan kondisi yang telah ada, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengantisipasi kejadian penurunan kualitas air dengan inovasi sistem lahan basah buatan. Metode kajian ini merupakan studi lanjutan dengan mengaplikasikan sistem lahan basah terapung yang memanfaatkan 3 jenis tanaman air lokal. Hasil studi menunjukkan bahwa kandungan nutrisi (N, P, K) pada 3 tanaman air cenderung berada di atas standar menurut SNI 19-17030-2004. Khususnya kandungan Nitrogen standar mutu (N) 0,40% namun pada ketiga makrofitanya masing-masing sebesar (0,72; 1,34, 0,92) %, jauh di atas standar mutu. Kandungan nutrisi juga menunjukkan angka melebihi baku mutu menurut PP RI No. 22 tahun 2021. Penelitian ini menemukan tanaman makrofitanya air, bertumbuh dan berkembang sangat pesat di dalam lahan basah. Jika pemanenan dilakukan, maka 3 tanaman air ini relatif efisien dalam menghilangkan nutrisi (P dan N) sehingga mengurangi tingkat kesuburan danau penyebab eutrofikasi.

Kata Kunci: Kualitas air, lahan basah terapung, makrofitanya air, danau Tondano

### Latar Belakang

Danau adalah salah satu sumber daya alam yang memiliki potensi pemanfaatan tinggi namun sangat rentan mengalami kerusakan. Beberapa permasalahan utama danau saat ini adalah pencemaran akibat limbah dari kegiatan antropogenik baik di

daerah tangkapan air maupun badan air; pendangkalan akibat alih fungsi lahan pada daerah tangkapan air (DTA) yang memicu erosi dan sedimentasi dan berkurangnya keanekaragaman hayati akibat eksploitasi biota dan rusaknya habitat. Hal ini sangat mempengaruhi daya dukung dan daya tampung danau. Kehadiran komunitas biologis suatu badan air memberikan evaluasi yang sensitive dan cukup efektif dalam menilai kondisi aliran. Danau Tondano, di Sulawesi Utara menerima masukan (inlet) dari 9 sungai dan lebih dari 30 saluran irigasi, sungai intermitten dan saluran drainase permukiman yang bermuara ke Danau Tondano, serta keluar melalui satu-satunya outlet yaitu Sungai Tondano yang bermuara di Teluk Manado. Danau Tondano mempunyai arti yang sangat penting dalam kehidupan masyarakat, perekonomian dan pelaksanaan pembangunan di tiga kota/kabupaten yakni Kabupaten Minahasa, Kabupaten Minahasa Utara dan Kota Manado. Akan tetapi, kondisi Danau Tondano saat ini sangat memprihatinkan sehingga termasuk danau kritis yang sedang dalam penanganan permasalahan lingkungan oleh Pemerintah Republik Indonesia.

Salah satu komponen primer dalam ekosistem perairan dan berperan penting dalam mendukung produktivitas serta aktivitas perikanan adalah makrofita. Makrofita merupakan tumbuhan yang hidup terapung (floating), pinggiran (marginal) dan mencuat (emergent), dengan tipe habitat yang berlumpur, permukaan, dan pinggir perairan. Makrofita dapat berperan sebagai tempat berlindung ikan, tempat kelompok ikan mencari makan, tempat menempelkan telur ikan dan lain-lain. Kehadiran makrofita dapat dimanfaatkan pula sebagai agen penghilang nutrient (nutrient removal), seperti Fosfor (P) dan Nitrogen (N). Diketahui bahwa P dan N adalah nutrient penyebab produktivitas tinggi di danau. Perairan danau yang terus menerus mendapat masukan unsur hara yang tinggi dari aliran air sungai di sekitarnya dan aktivitas perikanan budidaya di danau akan meningkatkan pertumbuhan fitoplankton dengan kepadatan yang tinggi (blooming). Jenis-jenis fitoplankton dari alga biru hijau (Cyanophyta), alga hijau (Chlorophyta), diatom (Bacillariophyta), Pyrrhophyta dan Euglenophyta akan berlimpah pada kondisi perairan tertentu karena adanya pengayaan 2 unsur hara. Badan air Danau Tondano kondisinya berada dalam kondisi Eutrofik, atau perairan dengan tingkat kesuburan tinggi. Tingginya kelimpahan fitoplankton disebabkan karena terpenuhinya kebutuhan nutrient dalam hal ini ketersediaan Fosfor yang tinggi. Kelebihan muatan masukan Fosfor (P) dan nitrogen (N) dari domestik, limbah pertanian dan industri merupakan penyebab utama eutrofikasi pada ekosistem akuatik, merusak kualitas dan fungsi ekologi. Eutrofikasi permukaan air selain dapat menyebabkan blooming alga dan cyanobakteri, juga kematian vegetasi asli dan penurunan yang serius dalam biodiversitas (Tang et al., 2017).

Dalam dekade terakhir ini, beberapa negara mengaplikasikan lahan basah dibangun (constructed wetland) untuk mengurangi eutrofikasi pada badan air, danau, laut dengan menurunkan beban nutrisi dalam debit air pada wastewater treatment plant, lahan pertanian, perumahan atau industri (Tang et al., 2017). Sistem constructed wetland makrofita atau kombinasi makrofita dan sedimen untuk mengeluarkan nutrien dari air. Makrofita air dapat digunakan untuk sistem pemolesan air limbah yang dapat digunakan baik sebagai sistem pemurnian air saja atau sebagai metode

pemolesan air limbah sebelum perlakuan. Makrofit yang paling sering digunakan adalah dari genera emergent seperti *Typha*, *Pragmites*, *Scirpus*, *Phalaris* dan *Iris* (Vymazal, 2011 dalam Tang et al., 2017). Keuntungan menggunakan constructed wetland adalah proses pemanfaatan secara alami, kebutuhan biaya yang rendah dan mudah dalam penggunaan maupun perawatan. Namun akibat sistem perawatan yang rendah, sistem ini mudah menjadi jenuh dengan fosfor (P) dan nutrisi lainnya, dengan menurunkan kapasitas ikatan nutrisi. Akibatnya, mereka hanya bekerja secara efisien untuk waktu yang terbatas (Drizo et al., 2002 dalam Tang et al., 2017). Dengan memanen tanaman ini secara teratur, nutrisi dapat dikeluarkan dari sistem. Selanjutnya hasil panen dapat digunakan dalam berbagai aplikasi berbasis bio, misalnya sebagai pupuk hayati atau pakan ternak (Tang et al., 2017). Konsep fitoteknologi ini masih jarang dilakukan di Indonesia, bahkan belum pernah diterapkan di Danau Tondano. Oleh karena itu, penelitian mengenai efisiensi tanaman makrofit air dengan media lahan basah terapung penting untuk dilakukan. Demikian pula dapat diketahui efektifitas penggunaan media lahan basah terapung, yang baru pertama kali diaplikasikan di Danau Tondano. Nutrien yang dikeluarkan dari Danau merupakan salah satu strategi pencegahan eutrofikasi, dan merupakan proses pemurnian alamiah terhadap kualitas perairan.

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis efisiensi penghilangan nutrient (nutrient removal) makrofit air yang ditanam pada lahan basah terapung (floating treatment wetland) lahan basah terbangun (constructed wetland) yang diletakkan di inlet danau dan di perairan Danau Tondano.

### **Metodologi Studi**

Penelitian awal dilakukan pada beberapa Lokasi yaitu 9 sungai inlet dan 6 titik pada badan danau Tondano. Sampel air dari ke 15 lokasi tersebut dilakukan pengujian kualitas air. Penelitian kemudian dilanjutkan dengan mengambil beberapa tanaman makrofit lokal seperti eceng gondok (*Eichornia crassipes*), kangkung (*Ipomoea aquatica*) dan Rumput teki (*Cyperus ustulatus*), yang diletakkan pada media lahan basah terapung buatan (artificial floating treatment wetland) disingkat FTW. Pengambilan sampel tanaman dilakukan di seputaran Danau Tondano, dan peletakan FTW dilakukan di badan air Danau Tondano, disekitar Sungai Panasen, Lokasi ini dipilih karena memiliki kondisi kedua yang paling tercemar dari 9 inlet danau Tondano. Pada tahapan ini penelitian menggunakan metode penelitian

kuantitatif, berupa uji kandungan Fosfor (P), Nitrogen (N) dan BOD, COD dan TDS pada tanaman makrofit akuatik yang diletakkan pada FTW. Pengambilan sampel makrofit dilakukan langsung in situ, sedangkan uji kualitas air dilakukan di Balai Riset dan Standarisasi, Sulawesi Utara. Pada bagian akhir, penelitian kembali dilakukan pada daerah lahan basah (wetland) alamiah seluas kurang lebih 95 Ha yang terletak di tepi danau Tondano. Penelitian ini dimaksudkan untuk membandingkan dengan hasil penelitian dengan memanfaatkan FTW. Pengambilan sampel air dilakukan pada beberapa Sungai inlet dan uji kualitas air dilakukan di Balai Riset dan Standarisasi, Sulawesi Utara.

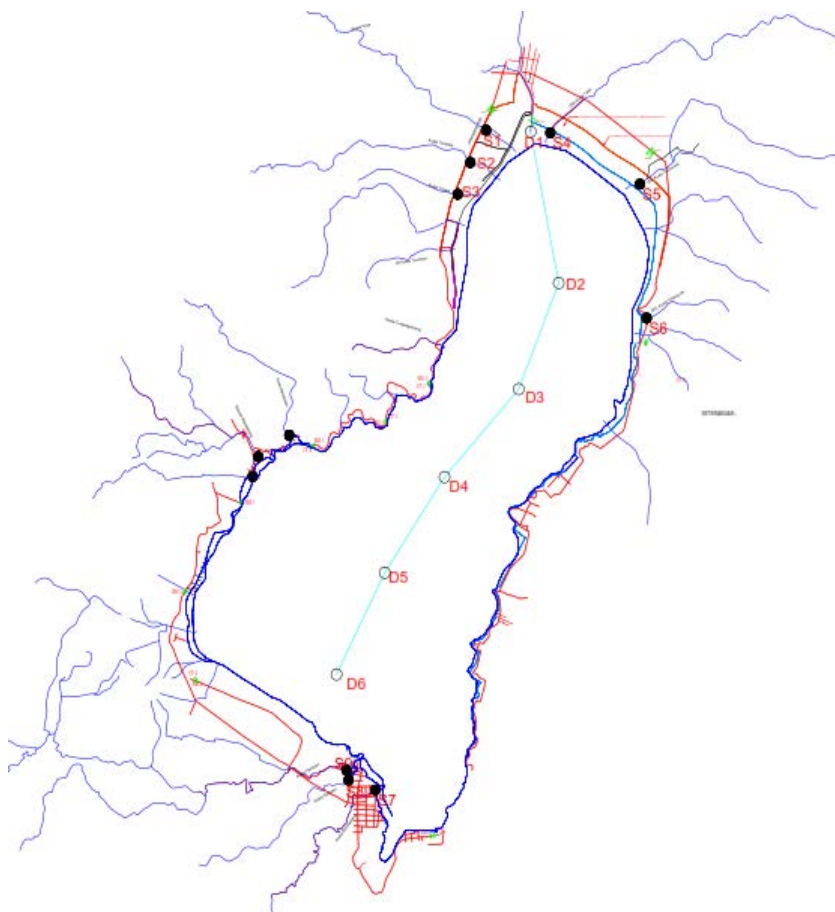
Dalam rangka mencapai tujuan penelitian telah dikumpulkan data, informasi dan pengetahuan yang berasal dari sumber primer dan sekunder. Tahap pra-lapangan: Menyusun rencana penelitian sesuai dengan konteks penelitian. Selanjutnya tahap di lapangan: Memahami latar belakang penelitian dimulai sejak memasuki lapangan, mengumpul data, setiap kegiatan dicatat dalam memo harian, recorder, log book. Kemudian hasil cuplikan lapangan dibawa ke laboratorium untuk uji N, P, COD, BOD, TDS. Hasil yang diperoleh ditabulasi dan dikompilasi. Hasil penelitian secara kuantitatif, adalah data kandungan N, P pada batang tanaman makrofita akuatik, dan kandungan COD, BOD, TDS pada air di bawah FTW.

### Hasil Studi dan Pembahasan

Studi awal dilakukan dengan pengambilan sampel air pada beberapa lokasi yaitu:

- a) 1 titik pada setiap lokasi Inlet (S1-S9) dan outlet (D1) danau Tondano
- b) 3 titik pada setiap lokasi genangan danau (D2 – D6), *up*, *middle* dan *bottom*

Distribusi Lokasi pengambilan sampel untuk pemeriksaan kualitas air dilakukan seperti ditunjukkan Gambar. 1.



Gambar. 1. Lokasi pengambilan sampel air

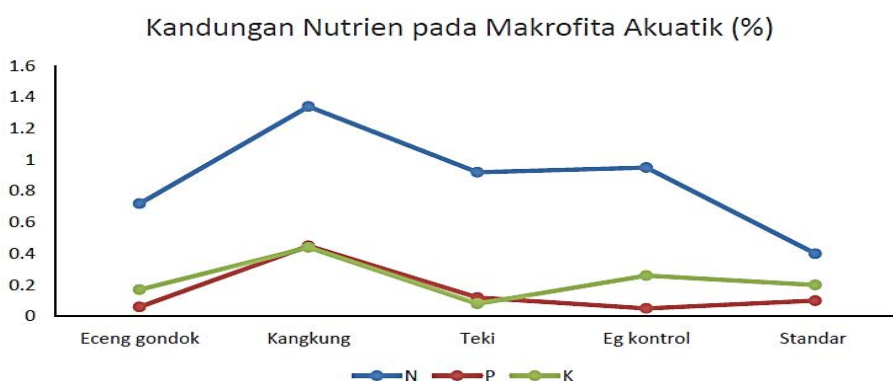
Kesembilan sungai tersebut adalah Sungai Koya (S1), sungai Toubeke (S2), Sungai Tougela (S3), Sungai Taler (S4), Sungai Tolour Oki (S5), Sungai Touliang Oki (S6), Sungai Ranowelang (S7), Sungai Paslaten (S8) dan Sungai Panasen (S9). Hasil pengujian kualitas air insitu disajikan pada Tabel 1. berikut :

Tabel.1. Parameter Air Sungai Inlet dan Danau Tondano yang melebihi ambang batas Kualitas Air Baku Mutu I

Kode	Sungai	Parameter Air yang Melebihi Ambang Batas
S1	Sungai Koya	BOD, COD, Fosfat
S2	Sungai Toubeke	BOD, COD, Fosfat
S3	Sungai Tougela	BOD, COD, Fosfat
S4	Sungai Taler	BOD, COD, Fosfat
S5	Kuala Toulour Oki	BOD, COD, Fosfat, Fe, Fecal Coliform, Total Coliform
S6	Kuala Touliang Oki	BOD, COD, Fosfat, Fe, Fecal Coliform
S7	Kuala Ranowelang	BOD, COD, Fosfat, Fe
S8	Kuala Paslaten	BOD, COD, Fosfat, Fe, Fecal Coliform
S9	Kuala Panasen	BOD, COD, Fosfat, Fe, Fluorida, Fecal Coliform
D1-Bot	Outlet Danau pada Dasar	Residu Tersuspensi, BOD, COD, Fosfat, Fe, Fecal Coliform, Total Coliform
D1-Mid	Outlet Danau Bagian Tengah Kedalaman	BOD, COD, Fosfat, Fecal Coliform
D1-Up	Outlet Danau Bagian Permukaan	BOD, COD, Fosfat, Fecal Coliform
D2-Bot	Genangan Danau Lokasi 2 Bagian Dasar	BOD, COD, Fosfat, Fecal Coliform, Total Coliform
D2-Mid	Genangan Danau Lokasi 2 Bagian Tengah Kedalaman	BOD, COD, Fosfat, Fecal Coliform, Total Coliform
D2-Up	Genangan Danau Lokasi 2 Bagian Permukaan	BOD, COD, Fosfat, Fluorida
D3-Bot	Genangan Danau Lokasi 3 Bagian Dasar	BOD, COD, Fosfat, Fecal Coliform
D3-Mid	Genangan Danau Lokasi 3 Bagian Tengah Kedalaman	BOD, COD, Fosfat
D3-Up	Genangan Danau Lokasi 3 Bagian Permukaan	BOD, COD, Fosfat
D4-Bot	Genangan Danau Lokasi 4 Bagian Dasar	BOD, Fosfat, Fecal Coliform, Total Coliform
D4-Mid	Genangan Danau Lokasi 4 Bagian Tengah Kedalaman	BOD, Fosfat, Fecal Coliform
D4-Up	Genangan Danau Lokasi 4 Bagian Permukaan	BOD, Fosfat, Fecal Coliform, Total Coliform
D5-Bot	Genangan Danau Lokasi 5 Bagian Dasar	BOD, COD, Fecal Coliform
D5-Mid	Genangan Danau Lokasi 5 Bagian Tengah Kedalaman	BOD, COD, Fosfat, Fecal Coliform
D5-Up	Genangan Danau Lokasi 5 Bagian Permukaan	BOD, COD, Fosfat
D6-Bot	Genangan Danau Lokasi 6 Bagian Dasar	BOD, COD, Fosfat, Fluorida
D6-Mid	Genangan Danau Lokasi 6 Bagian Tengah Kedalaman	BOD, COD, Fosfat, Fluorida, Fecal Coliform, Total Coliform
D6-Up	Genangan Danau Lokasi 6 Bagian Permukaan	BOD, COD, Fosfat, Fluorida, Fecal Coliform

Dari penelitian ditemukan bahwa badan air Danau Tondano, berada dalam kondisi Eutrofik, atau perairan dengan tingkat kesuburan tinggi, karena telah melampaui 15.000 ind/L fitoplankton. Tingginya kelimpahan fitoplankton disebabkan karena terpenuhinya kebutuhan nutrient dalam hal ini ketersediaan Fosfor yang tinggi. Hal ini berdasarkan hasil uji kualitas air yang telah dilakukan menunjukkan total fosfat pada semua lokasi yang diteliti telah melebihi baku mutu nasional (Baku Mutu Air Nasional PP RI No. 22 Tahun 2021 Lamp VI No II) baik kelas I, II dan III dengan range 0.045-0.14 mg/L. Kelebihan muatan masukan Fosfor (P) dan nitrogen (N) dari domestik, limbah pertanian dan industri merupakan penyebab utama eutrofikasi pada ekosistem akuatik, merusak kualitas dan fungsi ekologi.

Untuk mengurangi degradasi kualitas air, penelitian dilanjutkan dengan mengaplikasikan sistem lahan basah terapung dengan memanfaatkan 3 makrofita akuatik yang diperoleh dari sekitar danau Tondano. Hasil penelitian diperoleh bahwa makrofita akuatik yang ditanam di FTW mengandung nutrient yang relatif tinggi menurut SNI 19-7030-2004. Unsur yang paling banyak dikandung oleh tanaman adalah Nitrogen (N) seperti Gambar 2. Penyerapan Nitrogen paling tinggi pada tanaman kangkung. Tingkat efisiensi penyerapan nutrient relatif tinggi ini relatif sama, baik pada tanaman yang ditanam di FTW (ditanam pada lahan basah terapung) maupun yang hidup bebas di permukaan air.



Gambar 2. Kandungan Nutrien pada makrofita akuatik

Dalam penelitian ini, parameter dari air yang diuji adalah Nitrat, PO<sub>4</sub>, Kalium, BOD, COD dan TDS. Adapun hasil uji parameter air untuk Nitrat menggambarkan bahwa pada Lokasi 3 makrofita akuatik dan di danau, memiliki kandungan nitrat yang bervariasi antara 1,3 – 1,6 mg/L, hampir mendekati dua kali daripada baku mutu kelas I. Untuk PO<sub>4</sub>, hasil analisis menunjukkan pada area kangkung dan rumput teki memiliki kandungan sebesar 0,048 mg/L, jauh melebihi baku mutu kelas 1 sebesar 0,01 mg/L. Untuk area eceng gondok dan di danau, nilai PO<sub>4</sub> masih lebih rendah dari baku mutu kelas I. Parameter lainnya yaitu Kalium, hasil menunjukkan pada area ke 3 mikrofita air dan di danau memiliki nilai yang bervariasi yaitu 3,9 – 4,2 mg/L dan jauh lebih kecil dari bku mutu kelas 1 (10 mg/L). Untuk parameter BOD dan COD, dari 3 area makrofita air memiliki nilai yang melebihi baku mutu kelas I, sedangkan pada area di danau nilainya dibawah baku mutu kelas I. Selanjutnya, TDS sebagai salah satu parameter yang diamati, di area 3 makrofita air dan area danau nilainya bervariasi antara 40-110 mg/L, berada pada kondisi jauh

di bawah baku mutu kelas I (1000 mg/L). Berdasarkan hasil uji beberapa parameter air dapat dilihat bahwa dengan penerapan FTW dapat mereduksi Tingkat pencemaran walaupun hasilnya masih belum begitu nyata karena kurangnya luasan FTW yang diaplikasikan.

Pada bagian akhir dari penelitian, dilakukan uji kualitas air pada Sungai 2 inlet yang dipilih dengan memanfaatkan lahan basah alami yang ada ditepi danau Tondano. Hasil uji kualitas air pada bagian hilir Sungai sebagai inlet danau Tondano seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji kualitas air

No	Parameter	Satuan	Hasil		Persyaratan Baku Mutu Air 1
			S. Toubeke	S. Tougela	
1	BOD	mg/L	1	2	6
2	COD	mg/L	19	<4	40
3	Fosfat (P)	mg/L	0,2	0,9	1,0
4	Nitrat sebagai N	mg/L	1	1	20
5	TDS	mg/L	157	135	1000

Berdasarkan Tabel 1. Dapat dilihat bahwa Parameter BOD, COD dan fosfat pada 2 Sungai inlet yaitu Sungai Toubeke dan Sungai Tougela melebihi ambang batas Kualitas Air Baku Mutu I. Pada kondisi menggunakan lahan basah buatan nilai ke 3 parameter tersebut sudah berada dalam batas normal dan memenuhi persyaratan baku mutu Air 1.

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

BOD, COD dan total fosfat pada semua lokasi inlet danau Tondano dan di danau Tondano telah melebihi baku mutu nasional (Baku Mutu Air Nasional PP RI No. 22 Tahun 2021 Lamp VI No II). Dengan demikian integritas ekologis Danau Tondano termasuk dalam kategori rendah.

Tanaman makrofita air yaitu eceng gondok, kangkung dan rumput teki dapat bertumbuh dan berkembang sangat pesat di dalam lahan basah. Jika pemanenan dilakukan, maka 3 tanaman air ini relatif efisien dalam menghilangkan nutrient (P dan N) sehingga mengurangi tingkat kesuburan danau penyebab eutrofikasi.

Lahan basah alami yang berada ditepi danau Tondano dapat mempengaruhi nilai BOD, COD dan total Fosfat menjadidalam batas normal sesuai persyaratan baku mutu air 1. Dengan demikian, lahan basah buatan (wetland) dapat digunakan untuk mengurangi pencemaran di danau.

### Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk seluruh inlet yang ada dengan memanfaatkan lahan basah buatan atau dalam bentuk lahan FTW.

**Daftar Referensi**

- Anonim, (2001). Recommendations for Achieving Community Based Conservation Tondano Watershed, Northern Sulawesi. *Report on Rapid Rural Appraisal of Six Villages*. NRM-EPIQ. USAID.
- Dapas, F., J. Lengkong dan S.O. Dapas. (2021). Struktur Komunitas Fitoplankton sebagai Indikator Integritas Ekologis Danau Tondano, Sulawesi Utara. *Laporan Penelitian RTUU*. LPPM Unsrat, Manado.
- Edmondson, W. T. (1959). *Freshwater Biology*, 2nd edit. John Wiley and Sons Inc. New York. p. 902 – 1079.
- Krebs, J.C. (2014). *Ecological Methodology*. 3rd ed. (in prep). Addison-Wesley Educational Publisher.Inc. (downloaded 20 April 2015)
- Needham, J. G. and P. R. Needham. (1962). *A Guide to The Study of Freshwater Biology*. 5th ed. Holden-Day, Inc. San Fransisco. 107 pp.
- Odum, E. P. (1971). *Fundamentals of Ecology*, 3rd ed. WB Saunders Comp. Philadelphia. p : 8, 295 – 302, 316 – 323, 324 – 325.
- Smith, R. L. 1990. *Ecology and field biology*. 4th edit. Harper Collins Publ. p : 848 – 863.
- Tang, Y., S.F. Harpenslager, M. M. L van Kempen, E. J. H. Verbaarschot, L. M. J. M. Loeffen, J. G. G. Roelofs, A. J P. Smolders, and L. P. M. Lamers. (2017). Aquatic macrophytes can be used for wastewater polishing but not for purification in constructed wetland. *Biogeosciences*, 14, 755-766. <https://doi.org/10.5194/bg-14-755-2017>
- Wetzel, R. G. and G. E. Likens. (1991). *Limnological Analyses*. 2nd edit. Springer-Verlag. New York. p :200 - 205. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4098-1>

## REKAYASA HIDRAULIK UNTUK PENGENDALIAN SEDIMENTASI BENDUNGAN SENGGURUH

Jonathan Angelo Ishakputra\*, Slamet Lestari, Taty Yuniarti, Byan Farras Al Akbar, Iqbal Fauzan Herlambang, M. Rifqi Asyraf, dan M. Alix Rachman

Direktorat Bendungan dan Danau, Kementerian PUPR

\*jonathanangelo82@gmail.com

Pemasukan: 29 Juni 2024 Perbaikan: 30 September Diterima: 12 Desember 2024

### Intisari

Sungai Brantas merupakan salah satu sungai besar yang terletak di Provinsi Jawa Timur. Sungai ini memiliki panjang mencapai 320 km dan luas Daerah Aliran Sungai (DAS) sebesar 14.103 km<sup>2</sup>. Berbagai macam bangunan air telah dibangun pada aliran Sungai Brantas dengan tujuan ketahanan air dan produksi energi listrik. Dibalik manfaat yang dihasilkan terdapat permasalahan yang cukup serius yakni sedimentasi. Bendungan Sengguruh merupakan Bendungan yang terletak pada bagian hulu pada DAS Brantas yang mendapat pasokan air dari Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti. Setiap tahun sebanyak 528.915,9 m<sup>3</sup> sedimen mengendap di Bendungan Sengguruh yang berasal dari erosi DAS Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti. Akibat dari sedimentasi yang terjadi, maka dilakukan penggelontoran sedimen atau *flushing* setiap dua tahun sekali. Penelitian ini akan membahas terkait efektifitas *submerged sediment trap* sebagai upaya rekayasa hidraulik untuk pengendalian sedimen pada Bendungan Sengguruh. Metode yang dilakukan pada penelitian ini dengan melakukan pemodelan numerik sedimentasi 2-dimensi selama 1 tahun dan data yang gunakan adalah data debit *inflow* sungai, bathimetri Bendungan Sengguruh, debit sedimen, data teknis Bendungan Sengguruh dan pola operasi Bendungan Sengguruh. Berdasarkan hasil pemodelan dengan penggunaan *submerge sediment trap* mampu mereduksi sedimen terendap pada reservoir Bendungan Sengguruh dari 4,4 m menjadi 4,0 m dan penurunan luas sedimentasi.

Kata Kunci: Pengendalian Sedimentasi, Bendungan Sengguruh, Rekayasa Hidraulik

### Latar Belakang

Air merupakan sumber daya alam utama untuk makhluk hidup (Young, 2006) yang dapat diperoleh melalui fenomena hujan, namun sayangnya fenomena ini tidak terjadi setiap saat, sehingga manajemen sumber daya air diperlukan sebagai sarana konservasi air. (Adongo, Kyei-Baffour, Abalage, & Agyare, 2019). Waduk merupakan tampungan air buatan manusia (Sisinggih, 2021) yang memiliki tujuan untuk beberapa kepentingan seperti bangunan pengendali banjir (Teguh, 2021), pemenuhan air baku, irigasi, pembangkit listrik, wisata, dll. Kegunaan dari sebuah waduk ditentukan dari usia layanan waduk itu sendiri. Usia layanan waduk merupakan gabungan dari usia guna, usia ekonomis, usia manfaat, usia desain dan

usia penuh waduk (Sisinggih, 2021). Usia waduk dikatakan sudah penuh apabila kapasitas waduk terisi hingga titik inlet oleh sedimen.

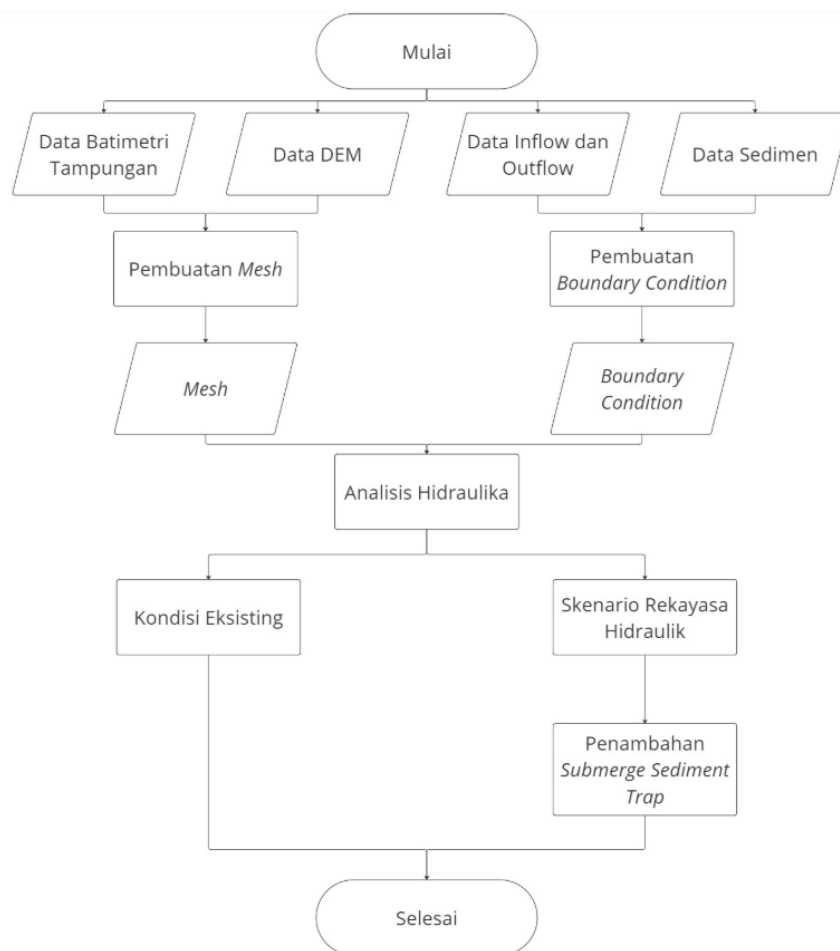
Sedimentasi meliputi proses erosi, transportasi, deposisi dan kompaksi partikel tanah oleh aliran air (Chabalala, 2017; Obialor, 2019; Reseda, 2022) dan merupakan fenomena yang tidak dapat terelakan pada semua reservoir (Anton J., 2016) sehingga sedimentasi yang tidak terkontrol mengarah pada penurunan kapasitas tampungan. (Adongo, Kyei-Baffour, Abalage, & Agyare, 2019; Morris, 2020; Madadi, 2022). Fenomena sedimentasi tidak hanya berdampak pada waduk melainkan pada morfologi sungai dibawah waduk tersebut yang terdampak akibat berkurangnya pasokan sedimen (Wang, 2009).

Pengendalian sedimentasi pada waduk perlu direncanakan sejak perencanaan konstruksi bendungan (Nda, 2020). Pengendalian sedimen dapat dilakukan sebelum dan sesudah masuk waduk. Konservasi tanah dan air di bagian hulu merupakan upaya pengendalian sedimentasi sebelum memasuki waduk yang bertujuan untuk mengurangi laju erosi lahan dengan melakukan penghijauan, Pembangunan *check dam*, *gully plug*, dsb (Sisinggih, 2021). Sedangkan pengendalian sedimen sesudah masuk ke waduk dapat dilakukan dengan rekayasa hidraulik seperti pengerukan, penggelontoran, *venting*, *sluicing*, *submerge sediment trap*, dll (Nda, 2020).

Sungai Brantas merupakan salah satu sungai besar yang terletak di Provinsi Jawa Timur. Sungai ini memiliki panjang mencapai 320 km yang memiliki luasan Daerah Aliran Sungai (DAS) sebesar 14.103 km<sup>2</sup> (Nippon Koei Co., Ltd. Japan Water Agency, 2024). Bendungan Sengguruh adalah bendungan yang terletak paling hulu di aliran Sungai Brantas, berperan penting dalam mengelola aliran air dan sedimen di kawasan tersebut. Bendungan ini menerima pasokan air dari dua sungai utama: Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti. Sungai Brantas Hulu melayani daerah tangkapan air yang luasnya mencapai 102.990,60 Ha, sedangkan Sungai Lesti melayani daerah tangkapan air seluas 61.546,8 Ha. setiap tahun sekitar 528.915,9 m<sup>3</sup> sedimen mengendap di badan air Bendungan Sengguruh. Sedimen ini berasal dari erosi yang terjadi di daerah aliran Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti, menunjukkan betapa pentingnya pengelolaan erosi dan sedimentasi untuk menjaga kapasitas dan fungsi bendungan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis efektifitas *submerged sediment trap* sebagai upaya rekayasa hidraulik untuk pengendalian sedimen di Bendungan Sengguruh.

### Metodologi Studi

Penelitian ini menggunakan pemodelan numerik 2-dimensi dengan Langkah pengerjaan ditunjukkan pada Gambar 1. Dari Gambar 1 terdapat data-data dan langkah-langkah pemodelan akan dijabarkan melalui Pengumpulan Data, Pengolahan Data, pemodelan, dan kalibrasi model.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

### Pengumpulan Data

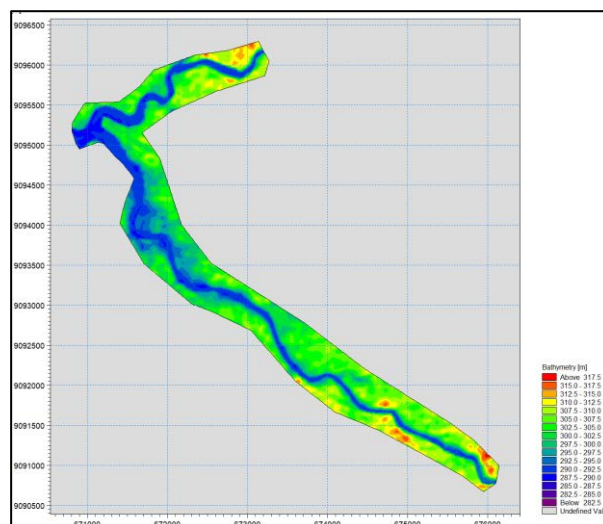
Tabel 1 Ketersediaan Data

Jenis Data	Tahun	Sumber
Batimetri Waduk Sengguruh	2021 - 2023	PJT I
DEMNAS	2018	DEMNAS
<i>Inflow</i> dan TMA	2013 - 2023	PJT I
Sedimen	2021 - 2023	PJT I
Data Teknis Bendungan	-	PJT I

Dari Tabel 1 dibutuhkan 4 data yang akan digunakan sebagai input dari pemodelan. Data batimetri menggunakan data hasil pengukuran tahun 2021 dan 2023 yang bersumber dari PJT I. Data DEMNAS memiliki resolusi 0,27-*arcsecond* tahun 2018 yang diunduh dari situs resmi DEMNAS. Untuk data *boundary condition* menggunakan data *inflow* waduk Sengguruh tahun 2013 hingga 2023 sedangkan data TMA diatur setinggi 292.5 karena Waduk Sengguruh merupakan waduk harian (Gambar 2). Data sedimen didapat dari selisih kapasitas tampungan tahun 2021 dan 2023.

## Pengolahan Data

Pengolahan data untuk pembuatan mesh diawali dengan merubah data batimetri menjadi data *raster* dengan resolusi 10x10 m yang kemudian di-*overlay* menggunakan data DEMNAS menggunakan perangkat lunak pemodelan GIS. Setelah mendapat *output* berupa *raster* kemudian dilakukan *extract* untuk mendapat koordinat dan elevasi setiap grid. Data koordinat dan elevasi setiap grid disimpan dengan *format* data.xyz untuk pembuatan *mesh* yang akan digunakan pada pemodelan numerik 2 dimensi.



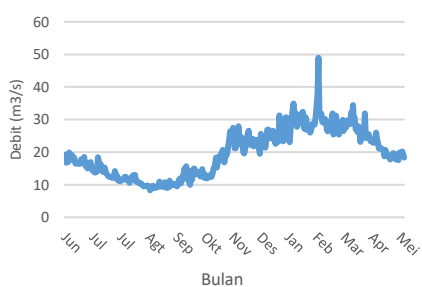
Gambar 2 Batimetri Waduk Sengguruh

Dalam melakukan pemodelan membutuhkan boundary condition pada titik *inflow* dan *outflow* pada Waduk Sengguruh. *Inflow* berupa debit air dari 2 sumber yaitu DAS Brantas Hulu dan DAS Lesti, debit didapat dari rata-rata debit harian selama 10 tahun yang kemudian dibagi dengan perbandingan luas DAS dari DAS Brantas Hulu dan DAS Lesti. Masing-masing kondisi batas dari DAS Brantas Hulu dan DAS Lesti membawa sedimen dengan konsentrasi  $839.86 \text{ g/m}^3$ , besaran konsentrasi sedimen didapat dari pembagian volume sedimen dari tahun 2021 – 2023 dengan volume debit selama 2 tahun. Pada bagian *outflow* Waduk Sengguruh diatur dengan pelimpah dan TMA Waduk Sengguruh. Debit pelimpah didapat dengan persamaan debit pelimpah dengan lebar pelimpah 28 m dan interval ketinggian efektif sebesar 0.1m, sedangkan untuk Waduk Sengguruh merupakan waduk harian dengan MAN +292.5 m dan tidak memiliki fluktuasi elevasi air yang besar.

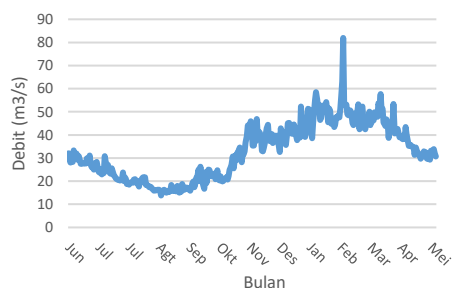
## Pemodelan

Gambar 3 hingga Gambar 6 menampilkan debit sungai, TMA dan *rating curve*. Pada makalah ini menggunakan pemodelan numerik 2-dimensi dengan perangkat lunak *Mike 21*. Pemodelan yang dilakukan merupakan *hydrodynamic model* dan *sand transport model*. *Hydrodynamic model* mensimulasikan perubahan tinggi muka air dan aliran air terhadap waktu akibat berbagai gaya, sedangkan *sand transport model* merupakan pemodelan yang di hasilkan berdasarkan perhitungan adveksi-dispersi dari *hydrodynamic model*. Terdapat dua skenario yang digunakan

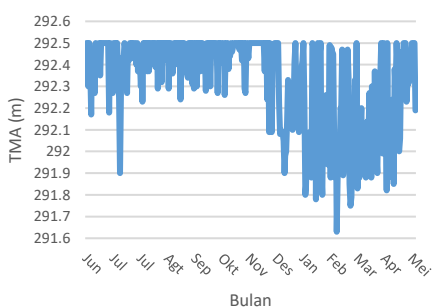
dalam pemodelan ini. Skenario pertama yaitu skenario kondisi eksisting dimana kondisi eksisting dimodelkan untuk menjadi *benchmark* dalam pemodelan selanjutnya. Skenario ke-dua yaitu skenario dengan rekayasa hidraulik. Rekayasa Hidraulik yang dilakukan pada Waduk Sengguruh yaitu dengan peletakan 3 buah *submerged sediment trap* yang masing-masing memiliki elevasi 291.5. Lokasi peletakan *submerge sediment trap* ditampilkan pada Gambar 7.



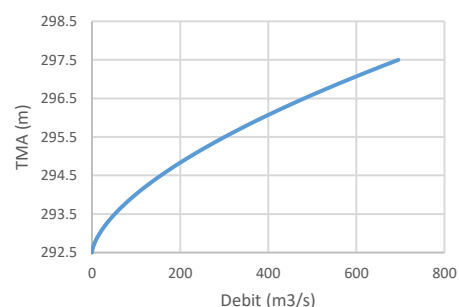
Gambar 3 Debit Sungai Lesti



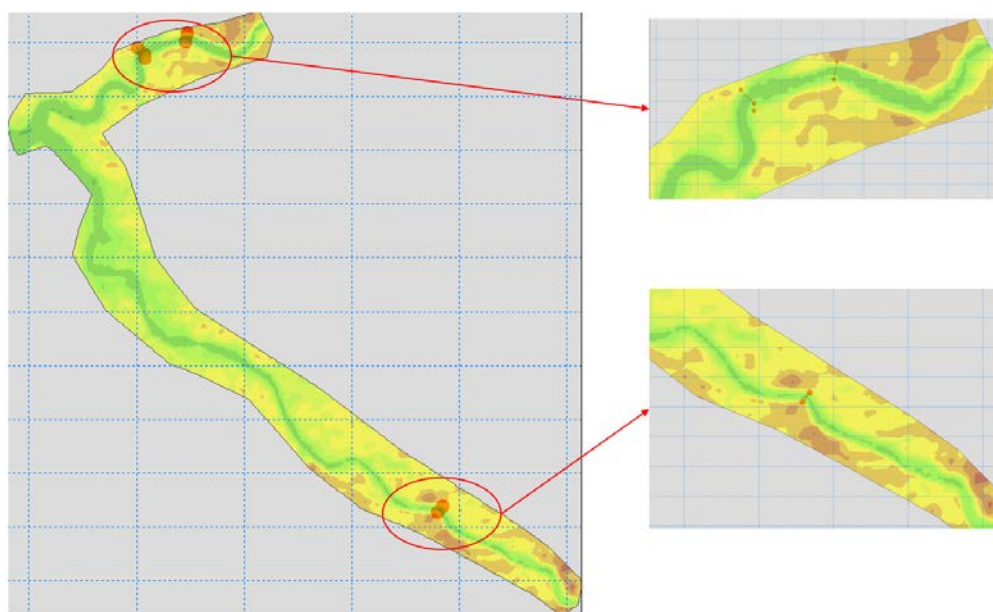
Gambar 4 Debit Sungai Brantas Hulu



Gambar 5 TMA Waduk Sengguruh



Gambar 6 Rating Curve Sengguruh



Gambar 7 Lokasi Peletakan Submerge Sediment Trap

Pemodelan 2-dimensi ini memiliki batasan yaitu hanya memodelkan pengendapan sedimen selama 1 tahun yang dimulai pada bulan juni dan tidak mengikutsertakan kejadian flushing. Selain itu, pemodelan ini hanya memiliki dua inflow dari Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti serta tidak adanya sedimen layang yang keluar dari Waduk Sengguruh. Output pemodelan meliputi arah aliran dan perubahan dasar waduk akibat adanya sedimentasi yang terjadi baik saat kondisi eksisting dan setelah penambahan *submerge sediment trap*.

### **Kalibrasi Model**

Kalibrasi model sedimentasi Bendungan Sengguruh dilakukan dengan membandingkan antara hasil pola sedimentasi model eksisting dan pola sedimentasi eksisting di lapangan yang diperoleh dari data profil sedimentasi Bendungan Sengguruh tahun 2021 dan 2022. Pemilihan tahun 2021 dan 2022 berdasarkan adanya pekerjaan flushing pada tahun 2021 dan pengamatan pola sedimentasi selama satu tahun setelah kejadian tersebut. Hal ini serupa dengan set-up model yang menggunakan batimetri tahun 2023 setelah pekerjaan flushing, dimana output dari model dianalisis untuk periode satu tahun. Dengan membandingkan hasil model dengan data profil sedimentasi dari tahun 2021 dan 2022, dilakukan kalibrasi parameter dalam pemodelan dengan membandingkan bentuk pola sedimentasi yang terjadi pada Bendungan Sengguruh.

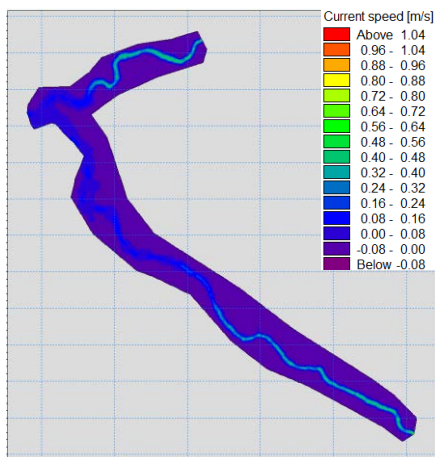
### **Hasil Pemodelan dan Pembahasan**

Setelah melakukan *set-up model* dan *running model*, didapat hasil untuk kedua skenario yang telah ditetapkan sebelumnya. Hasil pemodelan menunjukkan perubahan yang cukup signifikan akibat adanya penambahan *submerged sediment trap* sebanyak 3 buah.

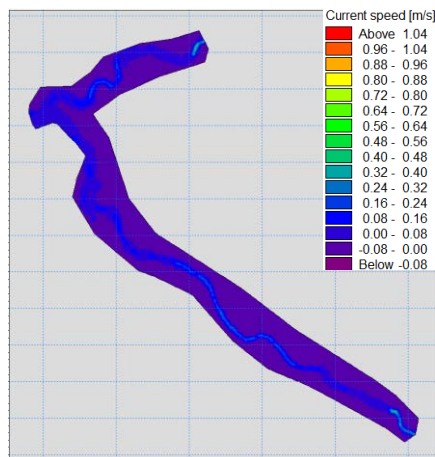
Gambar 8 hingga Gambar 15 menunjukkan perilaku aliran air setiap triwulan untuk scenario-01 (eksisting) dan scenario-02 (rekayasa hidraulik). Pada skenario -01 dimana ini merupakan pemodelan kondisi eksisting, dapat dilihat bahwa Sungai Brantas Hulu lebih dahulu sampai di area outlet yaitu pada bulan ke- 6 dibandingkan dengan aliran air Sungai Lesti yang mencapai daerah outlet pada bulan ke-9. Hal ini dapat terjadi diakibatkan oleh perbedaan panjang saluran terhadap Lokasi outlet Bendungan Sengguruh. Selain itu, aliran air mengalir dari hulu ke hilir tanpa terputus dan cenderung memiliki kecepatan aliran yang serupa sepanjang aliran air dengan besar mencapai 0.8m/s. aliran air yang serupa sepanjang saluran menunjukkan tidak adanya hambatan dalam saluran. Kecepatan air sangat dipengaruhi oleh besarnya debit air yang mengalir, hal ini terbukti terjadinya penurunan kecepatan air dari bulan ke-9 ke bulan ke-12 yang diakibatkan oleh perubahan musim dari musim hujan ke musim kemarau.

Berbeda dengan skenario-02 dengan penambahan *submerged sediment trap* pada elevasi 291.5m sebagai upaya rekayasa hidraulik yang secara signifikan menurunkan kecepatan aliran baik dari Sungai Brantas Hulu maupun Sungai Lesti. Pada aliran Sungai Brantas Hulu terjadi perubahan kecepatan aliran yang cukup signifikan pada daerah sebelum dan setelah *submerge sediment trap* pertama dimana kecepatan aliran menurun lebih dari 0.5 m/s mendekati 0 m/s. lalu kecepatan air kembali

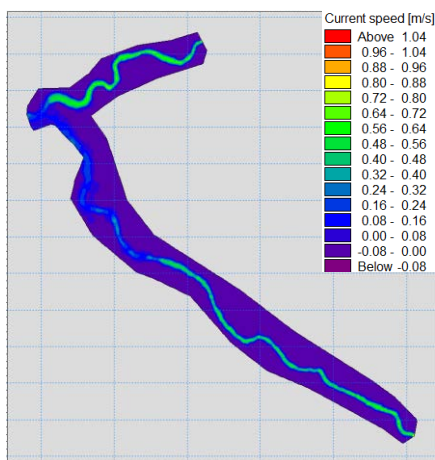
meningkat setelah melewati *submerged sediment trap* ke-2. Pada Sungai Lesti kecepatan aliran air terbilang cukup rendah dari inflow hingga Lokasi *submerged sediment trap* dan kecepatan aliran air meningkat setelah melewati *submerged sediment trap*. Kedua sungai ini memiliki tren aliran air yang berbeda dengan penambahan *submerged sediment trap* dikarenakan batimetri pada Sungai Lesti cenderung lebih landai dibandingkan dengan Sungai Brantas Hulu.



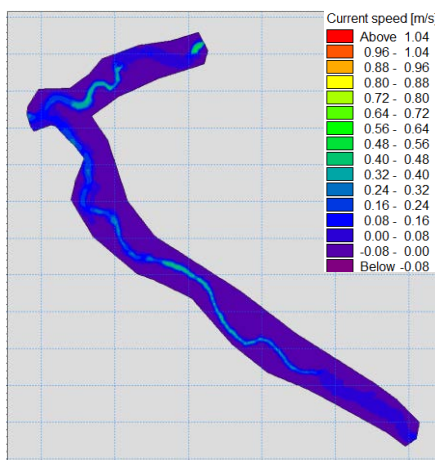
Gambar 8 Aliran Air Bulan ke-3 Skenario-01



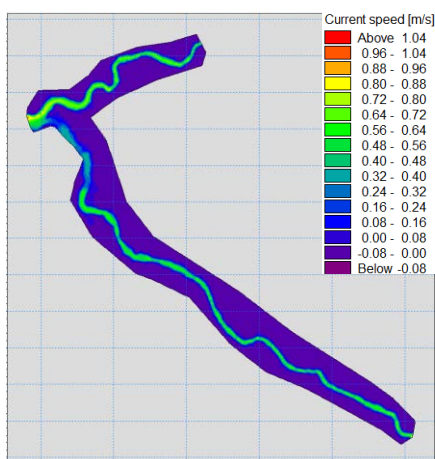
Gambar 9 Aliran Air Bulan ke-3 Skenario-02



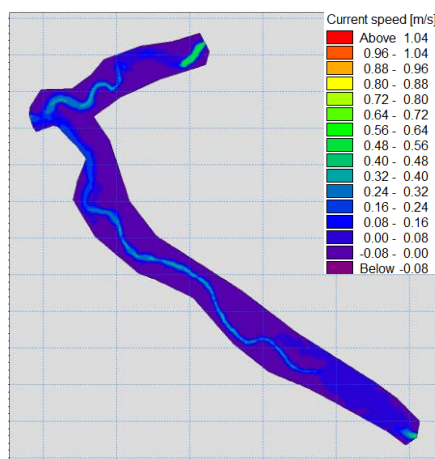
Gambar 10 Aliran Air Bulan ke-6 Skenario-01



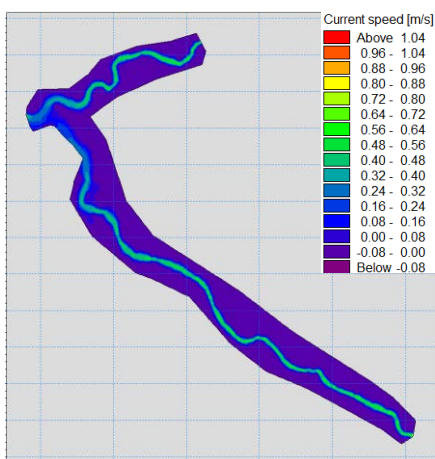
Gambar 11 Aliran Air Bulan ke-6 Skenario-02



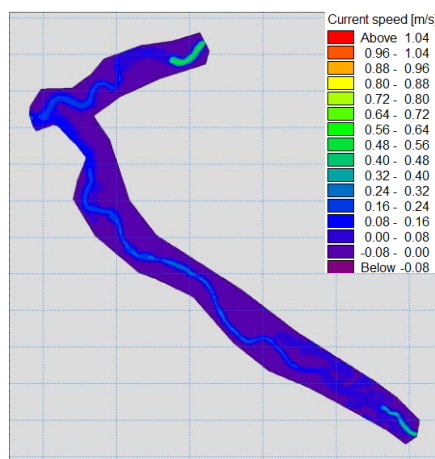
Gambar 12 Aliran Air Bulan ke-9 Skenario-01



Gambar 13 Aliran Air Bulan ke-9 Skenario-02

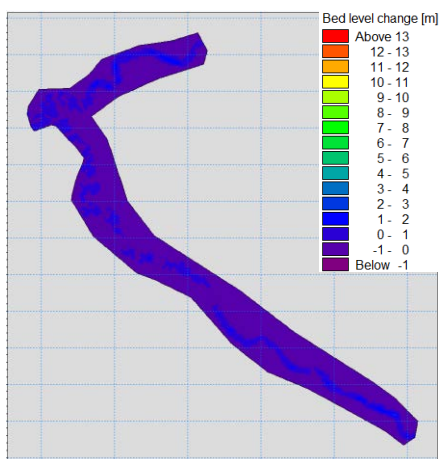


Gambar 14 Aliran Air Bulan ke-12 Skenario-01

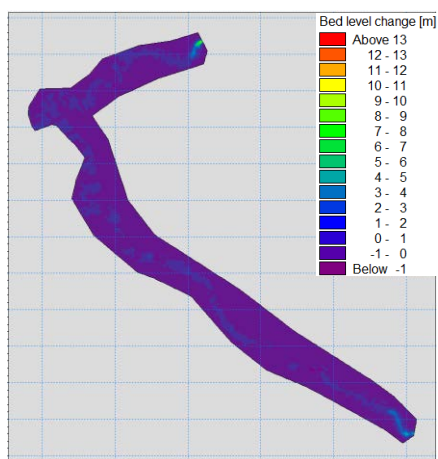


Gambar 15 Aliran Air Bulan ke-12 Skenario-02

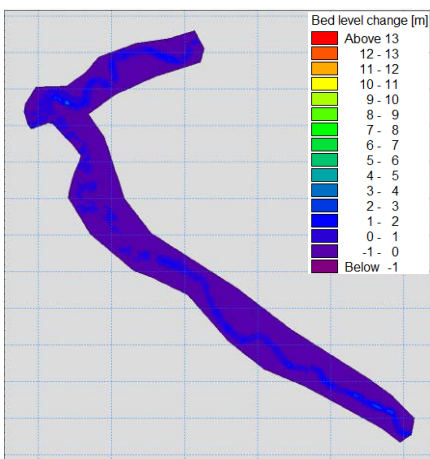
Gambar 16 hingga Gambar 23 menampilkan tren lokasi sedimentasi pada tampungan Bendungan Sengguruh setiap triwulan. Dalam scenario-01, tren sedimentasi yang terjadi di Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti cenderung merata dari hulu hingga hilir. Namun, suplai sedimen dekat outlet lebih didominasi oleh sedimen dari Sungai Brantas Hulu dibandingkan Sungai Lesti. Hal ini karena Sungai Brantas Hulu memiliki panjang yang relatif lebih pendek dan kemiringan yang lebih curam. Sedimen dari Sungai Brantas Hulu mencapai lokasi sekitar outlet pada bulan ke-9, sementara sedimen dari Sungai Lesti mencapai lokasi tersebut pada bulan ke-12. Selain itu, Sungai Lesti cenderung mengalami sedimentasi sepanjang badan sungainya daripada mengalirkan sedimen menuju outlet. Pada akhir pemodelan, ketebalan sedimen yang mengendap di sekitar outlet mencapai 4,4 meter.



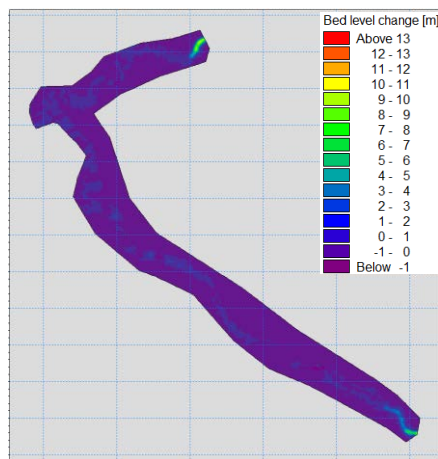
Gambar 16 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-3 Skenario-01



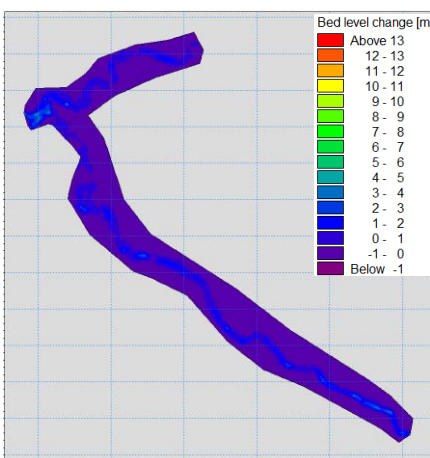
Gambar 17 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-3 Skenario-02



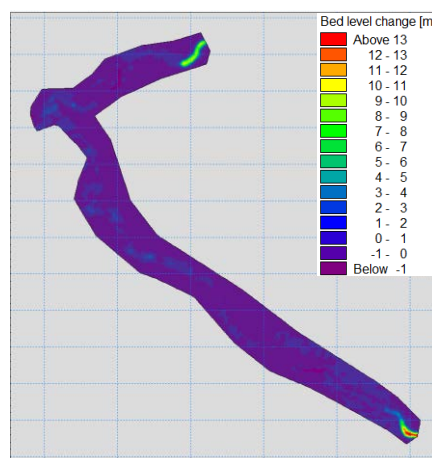
Gambar 18 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-6 Skenario-01



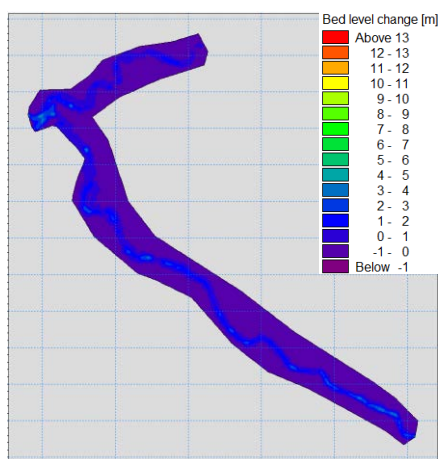
Gambar 19 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-6 Skenario-02



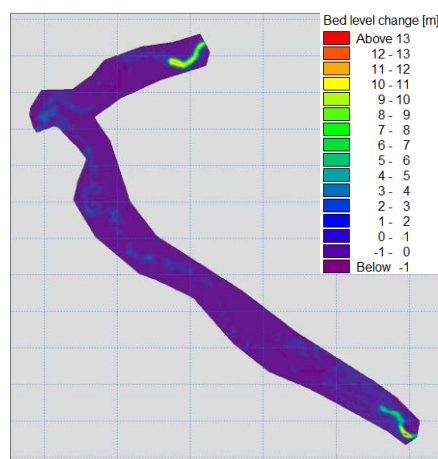
Gambar 20 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-9 Skenario-01



Gambar 21 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-9 Skenario-02



Gambar 22 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-12 Skenario-01



Gambar 23 Tinggi Sedimentasi Bulan ke-12 Skenario-02

Penurunan tinggi sedimentasi terjadi secara signifikan setelah penambahan tiga buah *submerged sediment trap*. Hasil pemodelan menunjukkan tinggi sedimentasi berkurang sekitar 0,4m dari 4,4m menjadi 4,0m. Tidak hanya ketebalan sedimentasi yang berkurang, namun luas lokasi sedimentasi terjadi penurunan. *Submerge sediment trap* berperan sebagai penahan sedimen agar tidak mencapai daerah outlet. Penambahan *submerge sediment trap* dinilai efektif karena adanya sedimen yang tertahan. Pada Sungai Brantas Hulu terdapat 2 buah *submerged sediment trap* diletakkan pada aliran sungai, hasil pemodelan menunjukkan pengendapan sedimen terjadi hanya pada lokasi tepat sebelum *submerged sediment trap* yang pertama dan pada lokasi sebelum *submerged sediment trap* ke-2 tidak ditemukan sedimentasi yang signifikan. Ketebalan sedimentasi pada Sungai Brantas Hulu mencapai 11m pada akhir pemodelan. Berbeda dengan Sungai Lesti, sungai ini hanya memiliki 1 *submerged sediment trap* dan dinilai cukup berpengaruh karena adanya penumpukan sedimentasi mencapai 13 m tetapi berada cukup jauh dari lokasi *submerge sediment trap*. Hal ini dapat terjadi karena kemiringan Sungai Lesti cenderung landau dan adanya penambahan *submerged sediment trap* yang menahan kecepatan air.

**Kesimpulan dan Saran**

**Kesimpulan**

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa rekayasa hidraulik, khususnya penambahan *submerged sediment trap*, efektif dalam mengurangi kecepatan aliran air dan sedimentasi di Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti. Pada kondisi eksisting (Skenario-01), aliran air dan sedimentasi mengalir dengan cepat dan merata sepanjang saluran, sementara perubahan musim menyebabkan penurunan kecepatan air. Sedimentasi mencapai ketebalan maksimum di dekat outlet Bendungan Sengguruh.

Dengan penambahan *submerge sediment trap* dalam Skenario-02, kecepatan aliran air berkurang secara signifikan sebelum dan setelah *submerged sediment trap*, mengurangi pengendapan sedimen di outlet. Sungai Brantas Hulu dan Sungai Lesti menunjukkan pola sedimentasi yang berbeda karena perbedaan kemiringan dan penempatan *submerged sediment trap*. Penurunan ketebalan sedimen dari 4,4 meter menjadi 4,0 meter di sekitar outlet menunjukkan efektivitas *submerged sediment trap* dalam mengelola sedimentasi, sehingga mengurangi risiko penyumbatan dan meningkatkan efisiensi pengelolaan air di bendungan.

Secara keseluruhan, rekayasa hidraulik dengan penambahan *submerge sediment trap* dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengendalikan kecepatan aliran air dan sedimentasi.

### Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Melakukan pemodelan jangka panjang untuk mengevaluasi efektivitas dari *submerged sediment trap* dalam beberapa tahun.
2. Memasukan pekerjaan *dredging* untuk melihat pengaruh kegiatan *dredging* pada sedimentasi
3. Optimasi peletakan *submerged sediment trap* untuk mendapat kapasitas maksimum.
4. Mensimulasikan pengaruh iklim seperti tahun basah, tahun kering, *La Nina*, atau *El Nino*

### Ucapan Terima Kasih

Kami menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang terlibat. Demikian pula kami menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya untuk pihak PJT I untuk penyediaan data-data yang diperlukan dalam penulisan makalah ini.

### Daftar Referensi

- Adongo, T., Kyei-Baffour, N., Abalage, & Agyare, W. (2019). Assessment of Reservoir Sedimentation of Irrigation Dams in Northern Ghana. *Lake and Reservoir Management*, 87-105. <https://doi.org/10.1080/10402381.2019.1659461>
- Anton J., S. (2016). Reservoir Sedimentation. *Journal of Hydraulics Resesarch*, 595-614. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>
- Chabalala. (2017). Determining the sources of sediment at different Areas of the Catchment: A Case Study of Welbedacth Reservoir, South Africa. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*.
- Madadi, M. R. (2022). Resrvoir Sedimenetation Management: A State-Of-The-Art Review. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*.
- Morris, G. L. (2020). Classification of management Aleternatives to Combat Reservoir Sedimentation. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12030861>

- Nda, M. (2020). Sustainable Sediment Management in Reservoirs; An Overview. Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, (pp. 1662-1671). Michigan.
- Nippon Koei Co., Ltd. Japan Water Agency. (2024). The Preparatory Survey for the Project for Sutami Dam Upgrading in the Brantas River Basin, Indonesia. Indonesia.
- Obialor, C. (2019). Reservoir Sedimentation: Causes, Effects and Mitigation. International Journal of Advance Academic Research, 5(10).
- Reseda, A. (2022). Protokol Prediksi Sedimentasi Waduk. Jakarta: UI Publishing.
- Sisingih, D. (2021). Buku Ajar Sedimentasi Waduk. Malang: UB Press.
- Teguh, N. A. (2021). Analisis Kecenderungan Sedimentasi dalam Upaya Keberlanjutan Usia Guna Waduk Wonorejo. Jurnal Unsiyah, 9(2), 52-56.
- Wang, Z.-y. (2009). Strategies for Managing Reservoir Sedimentation. International Journal of Sediment Research, 369-384. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60011-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60011-X)
- Young, G. (2006). United Nation's World Water Development Report. Ontario: Wilfrid Laurier University.