

Jurnal

P-ISSN : 2579-6097

E-ISSN : 2579-5511

Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai

Journal of Watershed Management Research

Vol. 9 No. 2, 2025



ANALISIS PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN MENGGUNAKAN CITRA RESOLUSI TINGGI DI KECAMATAN NAGRAK, KABUPATEN SUKABUMI

(Land Cover Change Analysis Using High-Resolution Imagery in Nagrak Sub-district, Sukabumi District)

Syahrul Ramdan, Muhammad Buce Saleh, dan Nining Pupsaningsih

ANALISIS BASEFLOW DAS SETAIL MENGGUNAKAN METODE GRAFIS

(Baseflow Analysis of Setail Watershed Using Graphical Method)

Mohamad Wawan Sujarwo, Gigik Nurbaskoro, Indarto Indarto1, Audia Chairani, dan Diana Nurhayati

EVALUASI KINERJA TEKNIK KOREKSI BIAS UNTUK MENINGKATKAN AKURASI GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT (GPM) DI DAERAH ALIRAN SUNGAI REJOSO, INDONESIA

(Performance Evaluation of Bias Correction Techniques for Enhancing Global Precipitation Measurement (GPM) Accuracy in the Rejoso Watershed, Indonesia)

Alyavara Mayang Feryndari, Ery Suhartanto, dan Linda Prasetyorini

PEMODELAN SEDIMENTASI DI SUB DAS KEDUANG TAHUN 2022 - 2024: APLIKASI SOIL AND WATER ASSESMENT TOOL (SWAT)

(Sedimentation Modeling in the Keduang Sub-Watershed for 2022- 2024: Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT))

Bandi Sasmito, Bambang Darmo Yuwono, Candrakanti Cahyaning Putri, dan Smilya Sheren Reynalda

FRAGMENTASI JARINGAN DAN KOALISI ADVOKASI DALAM TATA KELOLA DAERAH ALIRAN SUNGAI: PELAJARAN DARI DAS PAGUYAMAN, INDONESIA

(Network Fragmentation and Advocacy Coalitions in Watershed Governance: Lessons from the Paguyaman Basin, Indonesia)

Badariah, M. Syahrani Jailani, dan Sarah Fiebrina Heraningsih

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEBERHASILAN PERTUMBUHAN TANAMAN REHABILITASI HUTAN DAN LAHAN PERIODE 2019-2024 DI DAS SADDANG

(Factors Influencing The Success of Plant Growth in Forest and Land Rehabilitation in the Saddang Watershed from 2019 to 2024)

Asikin Muchtar, Muh. Bismar WWS, Wahyullah, Abd.Kadir, Mahmud, dan Ummu Kultsum

Diterbitkan oleh :

Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI)

Jl. Gunung Batu No 5 Bogor

E-mail: sekred.jppdas@gmail.com;

Website: <https://ejournal.aptklhi.org/index.php/JPPDAS/index>

Volume 9, Nomor 2, 2025

JPPDAS

Jurnal Penelitian
Pengelolaan Daerah Aliran Sungai

Journal of Watershed Management Research

P-ISSN: 2579-6097

E-ISSN: 2579-5511

JURNAL PENELITIAN PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (JPPDAS) pertamakali diterbitkan pada April 2017 oleh Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPPTPDAS) dengan P-ISSN: 2579-6097 dan E-ISSN: 2579-5511. Pada awal penerbitannya, JPPDAS dikelola oleh BPPTPDAS bekerjasama dengan Masyarakat Konservasi Tanah dan Air Indonesia (MKTI). Berdasarkan PermenLHK No 26 Tahun 2021, BPPTPDAS bertransformasi menjadi Badan Standardisasi Instrumen Lingkungan Hidup dan Kehutanan (BPSILHK) Solo. Seiring dengan perubahan tersebut, pengelolaan JPPDAS dilanjutkan oleh BPSILHK Solo bersama MKTI. Pada tahun 2023, pengelolaan JPPDAS dialihkan kepada Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI) sehubungan dengan perubahan kewenangan BPSILHK Solo yang tidak lagi melaksanakan kegiatan penelitian serta penerbitan publikasi ilmiah. Transisi pemindahan pengelolaan JPPDAS menyebabkan Tahun 2023 JPPDAS hanya menerbitkan satu kali, yaitu Volume 7 Nomor 1, 2023. Meskipun demikian, komitmen untuk menjaga kualitas dan kesinambungan jurnal tetap menjadi prioritas utama.

SASARAN DAN RUANG LINGKUP

Karya Tulis Ilmiah yang diterbitkan dalam JPPDAS merupakan hasil penelitian, kajian konseptual, dan pengembangan metode di bidang pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS). Ruang lingkup jurnal meliputi bidang pengelolaan lahan dan vegetasi, konservasi tanah dan air, rehabilitasi lahan, hidrologi, sosial, ekonomi, kelembagaan, penginderaan jauh, dan Sistem Informasi Geografis (SIG) yang mendukung teknologi pengelolaan DAS secara berkelanjutan.

TERBITAN



JPPDAS diterbitkan oleh Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI)

ISSN *print*/ P-ISSN : 2579-6097

ISSN *electronic*/ E-ISSN : 2579-5511

Edisi elektronik tersedia di

<https://ejournal.aptklhi.org/index.php/JPPDAS>



Seluruh KTI yang diterbitkan diberi nomor DOI yang digabungkan dengan awalan DOI Crossreff <https://doi.org/10.59465/jppdas>

FREKUENSI PENERBITAN

Jurnal diterbitkan dua kali dalam setahun yaitu pada bulan April dan Oktober dan setiap terbitan berisi 6 Karya Tulis Ilmiah (KTI).

KEBIJAKAN PEER REVIEW

Setiap KTI yang diterbitkan di JPPDAS akan ditelaah awal yang meliputi kesesuaian ruang lingkup jurnal dan tata cara penulisan menurut petunjuk penulisan. Selanjutnya telaah dilakukan minimal oleh dua *reviewer* dengan mempertimbangkan kebaruan, orisinalitas, metode, dan dampak keilmuan.

AKREDITASI

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (JPPDAS) telah terakreditasi **Peringkat 2** berdasarkan Kutipan dari Keputusan Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia Nomor **105/E/KPT/2022** tentang Peringkat Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode 1 Tahun 2022 tanggal **7 April 2022**. Akreditasi berlaku selama 5 (lima) tahun yaitu mulai Volume 5 Nomor 2 Tahun 2021 sampai Volume 10 Nomor 1 Tahun 2026.

ALAMAT KORESPONDENSI

Sekretariat Redaksi JPPDAS:

Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI)

Alamat: Jl Gunung Batu No 5 Bogor

Email: sekred.jppdas@gmail.com

Website: <https://ejournal.aptklhi.org/index.php/JPPDAS>

PENYERAHAN ONLINE

Penulis yang akan mengirimkan KTI kepada JPPDAS perlu melakukan registrasi untuk mendapatkan *username* dan *password*.

Registrasi dilakukan pada:

<https://ejournal.aptklhi.org/index.php/JPPDAS/user/register>

Login dilakukan pada:

<https://ejournal.aptklhi.org/index.php/JPPDAS/user/register>

Karya tulis ilmiah harus dikirim secara online melalui website JPPDAS. Penulis dapat memantau proses dan status pengelolaan KTI dalam website tersebut.

CHECKLIST PERSIAPAN PENYERAHAN

Sebelum mengunggah KTI, penulis diminta untuk mengecek kelengkapan penyerahannya sebagaimana disebutkan di bawah ini. Apabila KTI tidak sesuai dengan petunjuk jurnal, maka akan dikembalikan ke penulis.

1. Karya tulis ilmiah harus ditulis berdasarkan *template* JPPDAS dan sesuai dengan pedoman bagi penulis.
2. Format referensi berdasarkan gaya *American Psychological Association* (APA) edisi ke 6 dan dikelola dengan perangkat lunak Mendeley.
3. Delapan puluh persen dari referensi yang digunakan merupakan referensi primer terbitan 10 tahun terakhir.
4. Formulir pernyataan etis (Formulir JPPDAS 01_paper) dan formulir transfer hak cipta (Formulir JPPDAS 06_copyright Kesepakatan transfer) harus dilampirkan saat penyerahan KTI.
5. Pernyataan kesanggupan membayar *Article Processing Charge*.

PROSES PENGEDITAN (*COPY EDITING*) DAN KOREKSI CETAKAN (*PROOFREADING*)

Pada setiap KTI yang diterima akan melalui proses pengeditan untuk peningkatan kualitas tata bahasa oleh tim editorial.

PEMERIKSAAN PLAGIARISME

Pemeriksaan plagiarisme dilakukan oleh tim editorial JPPDAS. Apabila terindikasi plagiarisme melebihi 10%, maka KTI akan ditolak.

PENGELOLAAN REFERENSI

Untuk ketepatan pengambilan sumber informasi, silakan menggunakan perangkat lunak pengelola referensi Mendeley dalam membuat bibliografi, referensi dan kutipan dalam teks. Format referensi berdasarkan gaya APA ke 6. Mendeley adalah manajer referensi gratis yang dapat diunduh pada: <https://www.mendeley.com/Download-mendeley-desktop>.



KEBIJAKAN AKSES TERBUKA

Karya tulis ilmiah dalam JPPDAS dapat diakses secara terbuka dengan tujuan mendukung pertukaran informasi dan pengetahuan secara global.



IZIN CC

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dikelola oleh Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI) di bawah CC BY-NC-SA Creative Commons Attribution Non Komersial Berbagi seperti attribution 4.0 internasional.

PENGELOLAAN BIAYA

Setiap naskah yang terbit dikenakan biaya pemrosesan penerbitan sebesar Rp. 1.500.000,-. Karya tulis Ilmiah diterbitkan secara elektronik tersedia secara bebas pada website. Penulis dapat menggunakan file dengan ekstensi .pdf yang telah diterbitkan untuk keperluan non-komersial pada website institusi atau pribadi.

PROSES INDEX DAN ABSTRAK

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai telah terindeks dari layanan berikut: *Cross Ref*, *Google Scholar*, *Mendeley*, *Indonesian Scientific Journal Database (ISJD)*, *PKP Publishing Services*, *Cite Factor*, *Bielefeld Academic Search Engine (BASE)*, dan *Scientific and Literature (SCILIT)*.

HAK CIPTA

Jurnal ini dan kontribusi individu yang terkandung di dalamnya dilindungi oleh hak cipta Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI). Hak cipta tersebut mengikuti ketentuan dan kondisi yang berlaku dalam penggunaannya.

PERNYATAAN PRIVASI

Nama dan alamat email yang masuk dalam jurnal ini akan digunakan secara eksklusif untuk kebutuhan jurnal dan tidak akan digunakan untuk kebutuhan pihak lain.

EDITORIAL TEAM

Editor in-Chief

Dr. Ir. Dewi Retna Indrawati, M.P.
(Scopus ID: 57226719729)

Ekologi Manusia

Pusat Riset Kependudukan, Badan
Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Editor

Prof. Ris. Dr. Ir. Tyas Mutiara Basuki,
M.Sc.
(Scopus ID: 26030255700)

Hidrologi; Konservasi Tanah dan
Air, dan Penginderaan Jauh

Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi,
BRIN

Prof. Ris. Dr. Irfan Budi Pramono, M.Sc.
(Scopus ID: 57194592259)

Hidrologi dan Konservasi Tanah

Pusat Riset Limnologi dan Sumber
Daya Air, BRIN

Dr. Muhammad Anggri Setiawan, M.Sc.
(Scopus ID: 23487125500)

Geografi

Universitas Gadjah Mada (UGM)

Dr. Agung Budi Supangat, S.Hut., M.T.,
M.Si.
(Scopus ID: 57226712006)

Hidrologi

Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi,
BRIN; MKTI

Dr. Ir. Nining Wahyuningrum, M.Sc.
(Scopus ID: 57216288607)

Konservasi Tanah dan Air;
Sistem Informasi Geografis

Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi,
BRIN

Saut A. Sagala, ST., M.Sc., Ph.D.
(Scopus ID: 35323035100)

Mitigasi Bencana

Institut Teknologi Bandung (ITB)

Dr. S. Andy Cahyono, S.P., M.Si.
(Scopus ID: 57329151500)

Sosial Ekonomi

Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi,
BRIN

Dr. Yonky Indrajaya, S.Hut., M.T., M.Sc.
(Scopus ID: 57189633934)

Manajemen Hutan

Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi,
BRIN

Dr. Ir. Hunggul Yudono S.H. Nugroho,
M.Si.
(Scopus ID: 57194607752)

Hidrologi dan Konservasi Tanah

Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi,
BRIN

Dr. Ir. Sulistya ekawati, M.Si.
(Scopus ID: 57209010673)

Sosiologi Kehutanan;
Pemberdayaan Masyarakat

Pusat Riset Masyarakat dan Budaya,
BRIN

Volume 9, Nomor 2, 2025

JPPDAS

Jurnal Penelitian
Pengelolaan Daerah Aliran Sungai

Journal of Watershed Management Research

P-ISSN: 2579-6097

E-ISSN: 2579-5511

Copy Editor

Dr. Ir. Endang Savitri, M.Sc.
(Scopus ID: 57204823033)

Pengelolaan DAS, Konservasi
Tanah dan Air, Kebencanaan

MKTI

R. Pamungkas Buana Putra, S.Hut., M.Sc.
(Scopus ID: 57092722900)

Silvikultur

Pusat Riset Ekologi dan
Etnobiologi, BRIN

Section Editor

Daniel Pandapotan Simarmata, M.Sc.
(Scopus ID: 57885111400)

Ekologi Manusia

Pusat Riset Kependudukan,
BRIN

F. Maftukhakh Hilmya Nada, S.Hut.,
M.Sc.
(Scopus ID: 57885111300)

Konservasi Tanah dan Air

Pusat Riset Ekologi dan
Etnobiologi, BRIN

Dian Pratiwi, S.Hut., M.Sc.
(Scopus ID: 57222641915)

Konservasi Hutan dan Pengaruh
Hutan

Pusat Riset Ekologi dan
Etnobiologi, BRIN

Luthfi Hanindiyasari, S.Hut., M.Sc.
(Scopus ID:57884113400)

Konservasi dan Pengaruh Hutan

Pusat Riset Ekologi dan
Etnobiologi, BRIN

Layout Editor

Diah Auliyani, S.Hut., M.Si.
(Scopus ID: 57219661069)

Konservasi dan Pengaruh Hutan

Pusat Riset Ekologi dan
Etnobiologi, BRIN

Tri Hastuti Swandayani, S.Kom., M.Si.

Balai KSDA Yogyakarta



**Sekretariat Redaksi JPPDAS: Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia
(APTKLHI)**

Alamat: Jl. Gunung Batu No 5 Bogor

E-mail: sekred.jppdas@gmail.com ; Website: <https://ejournal.aptklhi.org/index.php/JPPDAS/index>

Diterbitkan di Bogor, Indonesia

©2025 Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI)

REVIEWER

Dr. Tri Sulistyati Widyaningsih, S.Sos., M.Sc. (Scopus ID: 57216432755)	Sosiologi Lingkungan	Pusat Riset Kependudukan, BRIN
Prof. Dr. Ahmad Maryudi, S.Hut., M.For. (Scopus ID: 48461414700)	Kebijakan Kehutanan	Universitas Gadjah Mada (UGM)
Prof. Dr. rer. nat. Junun Sartohadi, M.Sc. (Scopus ID: 24766831900)	Geografi Tanah dan Lingkungan	UGM; Masyarakat Konservasi Tanah dan Air Indonesia (MKTl)
Andry Rustanto, S.Si., M.Sc. (Scopus ID: 57192945184)	Geografi	Universitas Indonesia (UI)
Dr. Tjahyo Nugroho Adji, S.Si., M.Sc.Tech. (Scopus ID: 54987826800)	Geografi	Universitas Gadjah Mada (UGM)
Dr. Ogi Setiawan, S.Hut., M.Sc. (Scopus ID: 57205433334)	Hidrologi, Geomorfologi, Kehutanan	Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi, BRIN
Dr. Prabang Setyono, S.Si., M.Si. (Scopus ID: 56179823100)	Ekologi Pemodelan dan Rekayasa Lingkungan	Universitas Sebelas Maret (UNS)
Dr. Ryke Nandini, S.Si., M.Si. (Scopus ID: 57205494099)	Konservasi dan Pengaruh Hutan	Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi, BRIN
Ary Widiyanto, S.Hut., M.Eng., M.P.P. (Scopus ID: 57226365246)	Kebijakan Publik, Agroforestry	Pusat Riset Kependudukan, BRIN
Dwi Priyo Ariyanto S.P., M.Sc., Ph.D.. (Scopus ID: 57214875170)	Soil Science	Universitas Sebelas Maret (UNS)
Dr. Siswo, S.P., M.Sc.For. (Scopus ID: 572094566980)	Forest Environment and Ecology	Balai Perhutanan Sosial Yogyakarta, Kementerian Kehutanan
Dr. Margaretha Widyastuti, M.T. (Scopus ID: 57214875170)	Hidrologi. Karst Hydrology	Universitas Gadjah Mada (UGM)
Dr. Ahmad Cahyadi, S.Si., M.Sc. (Scopus ID: 55979018700)	Hidrologi, Geomorfologi	Universitas Gadjah Mada (UGM)
Prof. Dr. Ir. Gusfan Halik, S.T., M.T. (Scopus ID: 56816987300)	Teknik Hidrologi	Universitas Jember



**Sekretariat Redaksi JPPDAS: Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia
(APTKLHI)**

Alamat: Jl. Gunung Batu No 5 Bogor

E-mail: sekred.jppdas@gmail.com ; Website: <https://ejournal.aptklhi.org/index.php/JPPDAS/index>

Diterbitkan di Bogor, Indonesia

©2025 Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia (APTKLHI)

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dan penghargaan kami sampaikan kepada Editor dan Mitra Bestari yang telah menyunting dan memberi saran yang konstruktif terhadap Karya Tulis Ilmiah dalam Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Volume 9 Nomor 2, 2025.

1. Dr. Ryke Nandini, S.Si., M.Si
2. Dr. Ir. Nining Wahyuningrum, M.Sc.
3. Dr. Margaretha Widyastuti, M.T.
4. Dr. Ahmad Cahyadi, S.Si., M.Sc.
5. Prof. Dr. Ir. Gusfan Halik, S.T., M.T.
6. Dr. Ogi Setiawan, S.Hut., M.Sc.
7. Dr. Agung Budi Supangat, S.Hut., M.T., M.Si.
8. Dr. Tri Sulistyati Widyaningsih, S.Sos., M.Sc.
9. Dr. Ir. Hunggul Yudono S.H. Nugroho, M.Si.
10. Dr. Siswo, S.P., M.Sc.For.
11. Dr. Yonky Indrajaya, S.Hut., M.T., M.Sc.

DAFTAR ISI (CONTENTS)

Judul	Halaman
ANALISIS PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN MENGGUNAKAN CITRA RESOLUSI TINGGI DI KECAMATAN NAGRAK, KABUPATEN SUKABUMI <i>(Land Cover Change Analysis Using High-Resolution Imagery in Nagrak Sub-district, Sukabumi District)</i> Syahrul Ramdan, Muhammad Buce Saleh, dan Nining Pupsaningsih _____	121-144
ANALISIS BASEFLOW DAS SETAIL MENGGUNAKAN METODE GRAFIS <i>(Baseflow Analysis of Setail Watershed Using Graphical Method)</i> Mohamad Wawan Sujarwo, Gigik Nurbaskoro, Indarto Indarto1, Audia Chairani, dan Diana Nurhayati _____	145-164
EVALUASI KINERJA TEKNIK KOREKSI BIAS UNTUK MENINGKATKAN AKURASI GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT (GPM) DI DAERAH ALIRAN SUNGAI REJOSO, INDONESIA <i>(Performance Evaluation of Bias Correction Techniques for Enhancing Global Precipitation Measurement (GPM) Accuracy in the Rejoso Watershed, Indonesia)</i> Alyavara Mayang Ferynandari, Ery Suhartanto, dan Linda Prasetyorini _____	165-180
PEMODELAN SEDIMENTASI DI SUB DAS KEDUANG TAHUN 2022 - 2024: APLIKASI SOIL AND WATER ASSESMENT TOOL (SWAT) <i>(Sedimentation Modeling in the Keduang Sub-Watershed for 2022- 2024: Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT))</i> Bandi Sasmito, Bambang Darmo Yuwono, Candrakanti Cahyaning Putri, dan Smilya Sheren Reynalda _____	181-200
FRAGMENTASI JARINGAN DAN KOALISI ADVOKASI DALAM TATA KELOLA DAERAH ALIRAN SUNGAI: PELAJARAN DARI DAS PAGUYAMAN, INDONESIA <i>(Network Fragmentation and Advocacy Coalitions in Watershed Governance: Lessons from the Paguyaman Basin, Indonesia)</i> Ivan Taslim, Sambas Basuni, Yanuar Jarwadi Purwanto, I Putu Santikayasa _____	201-222
FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEBERHASILAN PERTUMBUHAN TANAMAN REHABILITASI HUTAN DAN LAHAN PERIODE 2019-2024 DI DAS SADDANG <i>(Factors Influencing The Success of Plant Growth in Forest and Land Rehabilitation in the Saddang Watershed from 2019 to 2024)</i> Asikin Muchtar, Muh. Bismar WWS, Wahyullah, Abd.Kadir, Mahmud, Ummu Kultsum _____	223-244

JURNAL PENELITIAN PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI (JPPDAS)

ABSTRAK

P-ISSN : 2579-6097

Vol. 9 No. 2, 2025

E-ISSN : 2579-5511

Kata kunci bersumber dari artikel. Lembar abstrak ini boleh disalin tanpa izin dan biaya

Syahrul Ramdan¹, Muhammad Buce Saleh², dan Nining Pupsaningsih³

¹*Program Studi Ilmu Pengelolaan Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University*

²*Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University*

³*Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University*

ANALISIS PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN MENGGUNAKAN CITRA RESOLUSI TINGGI DI KECAMATAN NAGRAK, KABUPATEN SUKABUMI

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Vol. 9 No. 2, 2025, p. 121 - 144

Perubahan penutupan lahan merupakan fenomena global yang dipengaruhi oleh dinamika sosial, ekonomi, dan kebijakan pemerintah. Kecamatan Nagrak yang berada di sekitar Taman Nasional Gunung Gede Pangrango mengalami perubahan signifikan akibat kebijakan dan peningkatan populasi penduduk. Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan kelas penutupan lahan, membandingkan metode klasifikasi yang digunakan, serta menganalisis perubahan penutupan lahan dari tahun 2017 hingga 2022. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi klasifikasi visual dan digital. Klasifikasi visual dengan metode on-screen digitizing menghasilkan sembilan kelas penutupan lahan dengan akurasi sebesar 94%, sementara klasifikasi digital menggunakan algoritma random forest menghasilkan akurasi yang lebih rendah, yaitu 89%. Untuk meningkatkan akurasi, hasil dari kedua klasifikasi tersebut digabungkan menggunakan metode identity, sehingga diperoleh kelas penutupan lahan yang lebih baik dan akurat. Hasil analisis menunjukkan perubahan positif seluas 54,17 ha (0,78%), yang mencerminkan peningkatan fungsi lahan dari tidak produktif menjadi produktif. Sementara itu, perubahan negatif seluas 214,08 ha (3,10%) mengindikasikan adanya tekanan terhadap keberlanjutan lahan. Penelitian ini memberikan gambaran dinamika penggunaan lahan yang dapat menjadi acuan perencanaan tata ruang dan pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan.

Kata kunci: *penutupan lahan; digitasi on-screen; random forest; citra SPOT 6/7*

Mohamad Wawan Sujarwo¹, Gigik Nurbaskoro², Indarto Indarto¹, Audia Chairani¹, dan Diana Nurhayati³

¹*Prodi Teknik Pertanian, Universitas Jember, Jl. Kalimantan Tegalboto No.37, 68121, Indonesia*

²*BMKG Meteorologi Klas III Banyuwangi, Jl. Jaksa Agung Suprpto No.152, Kabupaten Banyuwangi, Indonesia*

³*Prodi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Jember, Jl. Kalimantan Tegalboto No.37, 68121, Indonesia*

ANALISIS BASEFLOW DAS SETAIL MENGGUNAKAN METODE GRAFIS

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Vol. 9 No. 2, 2025, p. 145 - 164

Pemahaman mengenai dinamika aliran dasar di areal ini sangat penting pada pengelolaan DAS yang berkelanjutan, terutama menghadapi tekanan hidrometeorologi yang semakin meningkat. Penelitian ini mengkaji kinerja tiga algoritma HYSEP (Fixed Interval, Sliding Interval, dan Local Minimum) pada DAS Setail Kabupaten Banyuwangi. DAS Setail mengalami tekanan hidrologis akibat banjir di hilir dan kekeringan musiman di wilayah tropis dengan iklim monsunial. Data debit harian dari AWLR Jambewangi (hulu) dan Kradenan (hilir) digunakan sebagai input utama. Kalibrasi dilakukan melalui pendekatan trial-and-error menggunakan perangkat lunak BFI+ untuk memperoleh parameter optimal yang menghasilkan kesesuaian antara baseflow terukur dan terhitung. Evaluasi kinerja dilakukan menggunakan koefisien determinasi (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), serta analisis Flow Duration Curve (FDC). Hasil menunjukkan bahwa algoritma Local Minimum memberikan kinerja terbaik dengan nilai R^2 tertinggi (hingga 0,98) dan RMSE terendah (0,38) pada periode kalibrasi maupun validasi. Nilai Baseflow Index (BFI) yang tinggi menunjukkan dominasi aliran dasar terhadap total debit sungai dan mencerminkan karakteristik DAS yang permeabel dan mampu mempertahankan aliran pada musim kering. Temuan ini menegaskan relevansi metode HYSEP pada DAS tropis serta pentingnya kalibrasi skala lokal untuk mendukung pengelolaan sumber daya air secara adaptif terhadap variabilitas iklim.

Kata kunci: *Aliran dasar; Grafis; HYSEP; DAS; Setail*

JURNAL PENELITIAN PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI (JPPDAS)

ABSTRAK

P-ISSN : 2579-6097

Vol. 9 No. 2, 2025

E-ISSN : 2579-5511

Kata kunci bersumber dari artikel. Lembar abstrak ini boleh disalin tanpa izin dan biaya

Alyavara Mayang Ferynandari¹, Ery Suhartanto², Linda Prasetyorini³

^{1,2,3}Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, 65145, Indonesia

EVALUASI KINERJA TEKNIK KOREKSI BIAS UNTUK MENINGKATKAN AKURASI GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT (GPM) DI DAERAH ALIRAN SUNGAI REJOSO, INDONESIA

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Vol. 9 No. 2, 2025, p. 165 – 180

Peningkatan akurasi data curah hujan satelit dari Global Precipitation Measurement (GPM) sangat penting dilakukan untuk mendukung peran krusial dalam aplikasi hidrologi dan pengelolaan bencana. Studi ini mengidentifikasi bias dan ketidakakuratan data GPM, terutama pada daerah dengan medan kompleks dan curah hujan ekstrem, yang memengaruhi keandalannya secara signifikan. Untuk mengatasi hal ini, berbagai teknik koreksi bias, seperti Linear Scaling, Analisis Regresi, dan Metode Faktor Koreksi diterapkan dan dievaluasi menggunakan metrik seperti Efisiensi Nash-Sutcliffe (NSE) dan koefisien korelasi. Hasilnya menunjukkan bahwa Metode Linear Scaling lebih akurat dibandingkan dengan metode lainnya, dengan mencapai NSE tertinggi sebesar 0,906 dan koefisien korelasi sebesar 0,904. Sementara, Metode Regresi dan Faktor Koreksi juga menunjukkan kinerja yang kuat dengan nilai NSE sekitar 0,79 – 0,80. Penggunaan hasil koreksi dari metode Linear Scaling yang diintegrasikan dengan interpolasi spasial berbasis IDW memungkinkan validasi distribusi spasial data curah hujan yang telah dikoreksi. Pendekatan hibrida ini memperbaiki pemahaman tentang variabilitas spasial-temporal dan kejadian ekstrem. Studi ini berkontribusi pada peningkatan akurasi data curah hujan satelit serta menyediakan dasar untuk pengembangan pemodelan hidrologi dan mitigasi risiko bencana.

Kata kunci: *Global Precipitation Measurement (GPM); teknik koreksi bias; DAS Rejoso; akurasi estimasi curah hujan; pemodelan hidrologi*

Bandi Sasmito¹, Bambang Darmo Yuwono¹, Candrakanti Cahyaning Putri¹, dan Smilya Sheren Reynalda¹

¹Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

PEMODELAN SEDIMENTASI DI SUB DAS KEDUANG TAHUN 2022 - 2024: APLIKASI SOIL AND WATER ASSESMENT TOOL (SWAT)

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Vol. 9 No. 2, 2025, p. 181 – 200

Waduk Gajah Mungkur merupakan infrastruktur strategis yang berperan penting dalam pengendalian banjir, dan penyediaan air irigasi di Wonogiri dan sekitarnya. Namun, kapasitas tampung waduk terus menurun akibat sedimentasi dari Daerah Aliran Sungai (DAS) dan lokasi sekitarnya. Waduk Gajah Mungkur mengalami peningkatan sedimentasi sebesar 3,2 juta m³ per tahun dengan Sub DAS Keduang menjadi kontributor utama sebesar 40% atau setara 1,2 juta m³ per tahun. Penelitian ini menggunakan Soil and Water Assessment Tool (SWAT), bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai sedimentasi dan proses hidrologi di Sub DAS Keduang yang mempengaruhi proses sedimentasi selama periode 2022-2024. Data yang digunakan meliputi citra satelit Sentinel-2A, Digital Elevation Model (DEM), peta jenis tanah, data iklim, dan data debit sungai, yang diolah melalui QGIS 3.16 dengan plugin QSWAT3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model SWAT mampu merepresentasikan dinamika hidrologi dan sedimentasi dengan akurasi tertinggi pada tahun 2024 dan koefisien determinasi (R²) sebesar 0,956 dan Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) sebesar 0,888. Selama periode penelitian, laju sedimentasi meningkat signifikan, dengan sediment yield tertinggi sebesar 119.543,18 ton/ha pada tahun 2023 dan akumulasi sedimentasi tertinggi di outlet sebesar 86.030 ton pada tahun 2024. Peningkatan sedimentasi ini dipicu oleh alih fungsi lahan menjadi permukiman dan berkurangnya tutupan hutan, yang menyebabkan peningkatan limpasan permukaan dan penurunan infiltrasi.

Kata kunci: *hidrologi; daerah aliran sungai; alih fungsi lahan; sedimentasi; soil and water assesment tool*

JURNAL PENELITIAN PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI (JPPDAS)

ABSTRAK

P-ISSN : 2579-6097

Vol. 9 No.2, 2025

E-ISSN : 2579-5511

Kata kunci bersumber dari artikel. Lembar abstrak ini boleh disalin tanpa izin dan biaya

Ivan Taslim^{1,2}, Sambas Basuni³, Yanuar Jarwadi Purwanto⁴, I Putu Santikayasa⁵

¹*Natural Resources and Environmental Management Study Program, IPB University, Bogor*

²*Geography Study Program, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Gorontalo*

³*Department of Forest Resources Conservation and Ecotourism, IPB University, Bogor*

⁴*Department of Civil and Environmental Engineering, IPB University, Bogor*

⁵*Department of Geophysics and Meteorology, IPB University, Bogor*

FRAGMENTASI JARINGAN DAN KOALISI ADVOKASI DALAM TATA KELOLA DAERAH ALIRAN SUNGAI: PELAJARAN DARI DAS PAGUYAMAN, INDONESIA

Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Vol. 9 No. 2, 2025, p. 201–222

Tata kelola daerah aliran sungai (DAS) di negara berkembang sering menghadapi kesenjangan implementasi, meskipun telah tersedia kebijakan lingkungan yang baik. Studi ini mengkaji bagaimana struktur pemangku kepentingan dan dinamika koalisi berkontribusi terhadap tantangan tata kelola di DAS Paguyaman, Gorontalo, Indonesia. Dengan pendekatan deskriptif-eksploratif, metode MACTOR digunakan untuk menganalisis hubungan antar 15 aktor kunci dan 22 tujuan strategis, berdasarkan kuesioner terstruktur, diskusi kelompok terfokus, dan pemetaan pengaruh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jaringan aktor terpolarisasi menjadi dua koalisi utama: koalisi Pemerintah-Akademisi yang berorientasi teknokratis, dan koalisi Masyarakat Sipil yang menekankan keadilan sosial-ekologis. Skor divergensi antara koalisi mencapai 0,81–0,87, menandakan potensi konflik ideologis yang tinggi. Aktor industri berada dalam posisi terisolasi secara struktural, dengan skor konvergensi rendah.

Kata kunci: *analisis pemangku kepentingan; tata kelola DAS; MACTOR; dinamika koalisi; kesenjangan implementasi*

Asikin Muchtar, Muh.Bismar WWS, Wahyullah, Abd.Kadir, Mahmud, Ummu Kultsum

¹*Universitas Indonesia Timur, Jl. Rappocini Raya No.171 Makassar, Sulawesi Selatan*

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEBERHASILAN PERTUMBUHAN TANAMAN REHABILITASI HUTAN DAN LAHAN PERIODE 2019-2024 DI DAS SADDANG

9Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Vol. 9 No. 2, 2025, p. 223 – 244

Rehabilitasi hutan dan lahan setiap tahun dilaksanakan untuk memulihkan kondisi DAS. Tahun 2019 BPDAS Jeneberang Saddang melakukan penanaman pinus, kemiri, dan aren pada Blok 1 dan Blok 2 seluas masing-masing 50 ha di Desa Rosoan, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang Provinsi Sulawesi Selatan. Penelitian bertujuan untuk mengetahui tingkat keberhasilan dan faktor yang mempengaruhi keberhasilan pertumbuhan tanaman Rehabilitasi Hutan dan Lahan (RHL) yang ditanam tahun 2019 dan mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilannya. Penelitian ini adalah penelitian survei. Data dikumpulkan melalui observasi, wawancara dan dokumentasi. Data diolah dengan regresi linear berganda dengan tiga variabel independen yaitu faktor fisik tanah, kimia tanah, dan kondisi sosial ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pertumbuhan tanaman pinus (*Pinus merkusii*) 36,4, (sangat rendah) atau 432 tanaman/ha, kemudian jenis MPTS kemiri (*Aleurites moluccana*) 42,7% (sangat rendah) atau 470 tanaman/ha, dan aren (*Arenga pinnata*) 39,2% (sangat rendah) atau 400 tanaman/ha. Tingkat pertumbuhan tanaman yang rendah ini dipengaruhi oleh kondisi fisik lahan (tekstur tanah liat 68,1%) dan kedalaman solum tanah 20–25 cm yang secara spasial berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman (nilai F hitung 14,866 > 2,810; t hitung 3,856 > 1,679; signifikansi 0,000). Selain itu, faktor kimia tanah secara spasial juga berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman (F hitung 7,940 > 3,200; t hitung 2,818 > 1,679; signifikansi 0,007), serta faktor sosial ekonomi secara spasial berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan (F hitung 18,143 > 3,200; t hitung 4,259 > 1,679; signifikansi 0,000). Hasil penelitian ini merekomendasikan kepada BPDAS untuk melibatkan masyarakat sekitar dalam pemeliharaan yang intensif dan menganggarkan biaya pemeliharaan tanaman agar pertumbuhan tanaman mencapai optimum.

Kata kunci: *keberhasilan tumbuh; rehabilitasi hutan; fisik; kimia; sosial ekonomi*

ANALISIS PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN MENGGUNAKAN CITRA RESOLUSI TINGGI DI KECAMATAN NAGRAK, KABUPATEN SUKABUMI

*(Land Cover Change Analysis Using High-Resolution Imagery in Nagrak Sub-district,
Sukabumi District)*

Syahrul Ramdan^{1,*}, Muhammad Buce Saleh², dan Nining Puspansingsih³

¹Program Studi Ilmu Pengelolaan Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University,
Lingkar Kampus IPB Dramaga, Bogor, Indonesia, 16680.

²Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University,
Lingkar Kampus IPB Dramaga, Bogor, Indonesia, 16680.

³ Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University,
Lingkar Kampus IPB Dramaga, Bogor, Indonesia, 16680.

* Email: n_puspaningsih@apps.ipb.ac.id

Diterima: 10 Maret 2025, Direvisi : 6 Juni 2025, Disetujui : 16 September 2025

ABSTRACT

Land cover change is a global phenomenon influenced by social, economic, and governmental policy dynamics. Nagrak District, located around Mount Gede Pangrango National Park, has experienced significant changes due to policy shifts and population growth. This study aims to classify land cover classes, compare the classification methods used, and analyze land cover changes from 2017 to 2022. The methods used in this study include visual and digital classification. Visual classification using the on-screen digitizing method produced nine land cover classes with an accuracy of 94%, while digital classification using the random forest algorithm resulted in 89% accuracy. To improve accuracy, the results of both classifications were combined using the identity method, resulting in better and more accurate land cover classes. The analysis results show a positive change of 54,17 ha (0,78%), reflecting an increase in land function from unproductive to productive. Conversely, a negative change of 214,08 ha (3,10%) indicates pressure on land sustainability. This study provides an overview of land use dynamics, which can inform spatial planning and sustainable resource management.

Keywords: *land cover; on-screen digitizing; random forest; SPOT 6/7 imagery*

ABSTRAK

Perubahan penutupan lahan merupakan fenomena global yang dipengaruhi oleh dinamika sosial, ekonomi, dan kebijakan pemerintah. Kecamatan Nagrak yang berada di sekitar Taman Nasional Gunung Gede Pangrango mengalami perubahan signifikan akibat kebijakan dan

peningkatan populasi penduduk. Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan kelas penutupan lahan, membandingkan metode klasifikasi yang digunakan, serta menganalisis perubahan penutupan lahan dari tahun 2017 hingga 2022. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi klasifikasi visual dan digital. Klasifikasi visual dengan metode on-screen digitizing menghasilkan sembilan kelas penutupan lahan dengan akurasi sebesar 94%, sementara klasifikasi digital menggunakan algoritma random forest menghasilkan akurasi yang lebih rendah, yaitu 89%. Untuk meningkatkan akurasi, hasil dari kedua klasifikasi tersebut digabungkan menggunakan metode *identity*, sehingga diperoleh kelas penutupan lahan yang lebih baik dan akurat. Hasil analisis menunjukkan perubahan positif seluas 54,17 ha (0,78%), yang mencerminkan peningkatan fungsi lahan dari tidak produktif menjadi produktif. Sementara itu, perubahan negatif seluas 214,08 ha (3,10%) mengindikasikan adanya tekanan terhadap keberlanjutan lahan. Penelitian ini memberikan gambaran dinamika penggunaan lahan yang dapat menjadi acuan perencanaan tata ruang dan pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan.

Kata kunci: penutupan lahan; digitasi on-screen; random forest; citra SPOT 6/7

I. PENDAHULUAN

Perubahan penutupan lahan dan penggunaan lahan merupakan suatu fenomena yang menjadi isu global. Penutupan lahan menggambarkan bagaimana permukaan bumi terlihat secara fisik, seperti distribusi tanaman, air, dan tanah (Rawat & Kumar, 2015). Menurut Fauzi *et al.* (2016), perubahan penutupan lahan dapat disebabkan faktor alami dan atau manusia. Faktor alami mencakup peristiwa seperti tanah longsor, letusan gunung berapi, banjir, kebakaran hutan, dan erosi, sedangkan faktor yang disebabkan oleh aktivitas manusia antara lain penebangan ilegal, perambahan lahan, dan pembakaran hutan yang disengaja. Tuakora *et al.* (2022) menambahkan bahwa penyebab perubahan penutupan lahan juga diakibatkan oleh pertambahan populasi dan kebijakan pemerintah.

Taman Nasional Gunung Gede Pangrango (TNGGP) merupakan salah satu kawasan yang telah mengalami perubahan

penutupan lahan. Perubahan tersebut antara lain terjadi akibat kebijakan pemerintah melalui keputusan Menteri Kehutanan No. 174/Kpts II/2003 tentang penetapan perluasan kawasan Taman Nasional dari 15.196 hektar menjadi 21.975 hektar (BBNTGP, 2022). Menurut Zulfikar & Nasdian (2018), area yang diperluas sebelumnya adalah hutan produksi yang dikelola oleh masyarakat setempat atas izin dari Perum Perhutani, namun sebagian besar kawasan telah mengalami degradasi dan deforestasi akibat perambahan hutan oleh masyarakat untuk keperluan pertanian.

Perluasan kawasan TNGGP salah satunya berada di Kecamatan Nagrak, Kabupaten Sukabumi. Perluasan ini telah berlangsung sejak tahun 2008 hingga 2018 melalui program pemulihan ekosistem bersama masyarakat dan bekerjasama dengan *Conservation International* dan *Daikin Industries* (Ario *et al.*, 2021). Perubahan penggunaan lahan di kawasan ini didorong oleh dua faktor utama, yaitu

kebijakan pemulihan ekosistem dan peningkatan jumlah penduduk. Berdasarkan data BPS (2023), kepadatan penduduk di Kecamatan Nagrak tahun 2017 berjumlah 82.974 juta jiwa, sementara tahun 2022 kepadatan penduduk berjumlah 92.757 juta jiwa. Dengan adanya program pemulihan ekosistem di wilayah TNGGP dan jumlah penduduk yang semakin meningkat di Kecamatan Nagrak, perlu dilakukan monitoring terhadap dinamika perubahan penggunaan lahan. Monitoring perubahan penutupan lahan dilakukan pada seluruh Kecamatan Nagrak termasuk wilayah TNGGP yang masuk ke dalam zonasi rehabilitasi dan berada di wilayah administrasi Kecamatan.

Teknologi penginderaan jauh menjadi sarana yang efektif untuk mengidentifikasi arah perubahan penutupan lahan karena kemampuannya dalam menyediakan data yang cepat, luas, akurat, dan mudah diakses (Chen, 2023; Wang *et al.*, 2017). Teknologi ini merupakan alat penting dalam membangun basis data yang dapat mendukung perencanaan dalam melakukan evaluasi dan monitoring kawasan secara lebih efisien. Penginderaan jauh merupakan ilmu dan seni untuk memperoleh informasi tentang suatu objek, daerah, atau fenomena melalui analisis data yang diperoleh menggunakan suatu alat tanpa kontak langsung dengan objek, daerah, atau fenomena yang dikaji (Lasmi *et al.*, 2015). Contohnya adalah citra satelit. Salah satu citra beresolusi tinggi dan mudah didapat yaitu citra SPOT. Dalam penelitian ini, citra SPOT yang digunakan yaitu SPOT-6 dan citra SPOT-7 yang memiliki dua mode yaitu pankromatik dan

multispektral. Mode pankromatik terdapat 1 band yang memiliki resolusi spasial 1,5 m dan mode multispektral terdapat 4 band dengan resolusi spasial 6 m.

Penelitian ini menggunakan analisis secara visual dan digital. Klasifikasi digital adalah proses pengambilan informasi yang melibatkan mesin melalui penerapan teori pengenalan pola pada citra multispektral, dimana klasifikasi didasarkan pada piksel-piksel dengan karakteristik spektral yang serupa, sehingga memungkinkan pembagian berdasarkan kelas (Fitriawan, 2020). Seiring perkembangannya, teknik klasifikasi digital mulai beralih ke metode berbasis objek, yang memanfaatkan tiga parameter utama untuk memisahkan objek, yaitu skala, bentuk, dan kekompakan (Purwanto & Lukiawan, 2019). Salah satu metode klasifikasi digital yang bersifat *supervised* adalah *algorithm random forest*. *Algorithm random forest* ini merupakan salah satu yang paling banyak digunakan untuk tugas klasifikasi dan regresi (Azhari *et al.*, 2021). *Random forest* terdiri dari kumpulan *decision tree* atau pohon keputusan, yang menggunakan sedikit parameter namun memberikan hasil yang akurat.

Klasifikasi menggunakan *random forest* diterapkan untuk mengatasi keterbatasan klasifikasi visual, karena *random forest* memiliki keunggulan dalam pemisahan objek dari hasil digital number yang akurat dan presisi, termasuk untuk objek kecil. Selain itu, teknik ini juga menawarkan kecepatan dalam proses pengerjaan (Teluguntla *et al.*, 2018). Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh hasil perubahan penutupan lahan yang lebih akurat. Tujuan penelitian ini melakukan

klasifikasi kelas penutupan lahan, menganalisis perbandingan metode klasifikasi visual dan digital dalam perubahan penutupan lahan, dan menganalisis perubahan penutupan lahan. Data citra yang digunakan merupakan citra SPOT-7 tahun 2017 dan SPOT-6 tahun 2022 yang sudah dilakukan *pansharpening*.

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi

Penelitian dilaksanakan bulan Desember 2023 sampai April 2024 di Kecamatan Nagrak Kabupaten Sukabumi (Gambar 1). Kecamatan Nagrak secara geografis terletak antara $6^{\circ}46'41,153''$ – $6^{\circ}53'27,416''$ Lintang Selatan dan $106^{\circ}46'34,975''$ – $106^{\circ}55'44,760''$ Bujur Timur. Pengolahan citra dilakukan di laboratorium *Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS)*, Departemen Manajemen Hutan, Institut Pertanian Bogor.

B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan yaitu data spasial berupa citra SPOT-7 tahun 2017 dan citra SPOT-6 tahun 2022, serta peta batas administrasi. Sementara alat yang digunakan pada pengolahan data berupa *hardware* dan *software*. *Software* terdiri dari *ArcGIS 10.8*, *Google Earth Pro*, *Microsoft Excel*, dan *Microsoft Word*. Alat yang digunakan untuk pengambilan data lapangan yaitu alat tulis, kamera *handphone* untuk dokumentasi, dan *Avenza Maps*. Selengkapannya disajikan pada Tabel 1.

C. Metode Penelitian

Penelitian terdiri dari beberapa tahapan diantaranya: (1) Pra-pengolahan citra, (2)

Ground check, (3) Analisis data, dan (4) Analisis perubahan penutupan lahan. Proses pra-pengolahan citra terbagi kedalam empat tahap, yaitu: *mosaicking*, *pansharpening*, *Geographic transformation*, dan *cropping*. Pengolahan data dilakukan secara visual dengan *on-screen digitizing* dan digital melalui *algorithm random forest*. Pada analisis perubahan penutupan lahan hasil dari kedua metode dilakukan *overlay* untuk memperoleh perubahan penutupan lahan yang lebih baik (Suni *et al.*, 2023; Rakuasa, 2022). Gambar 2 menunjukkan prosedur penelitian.

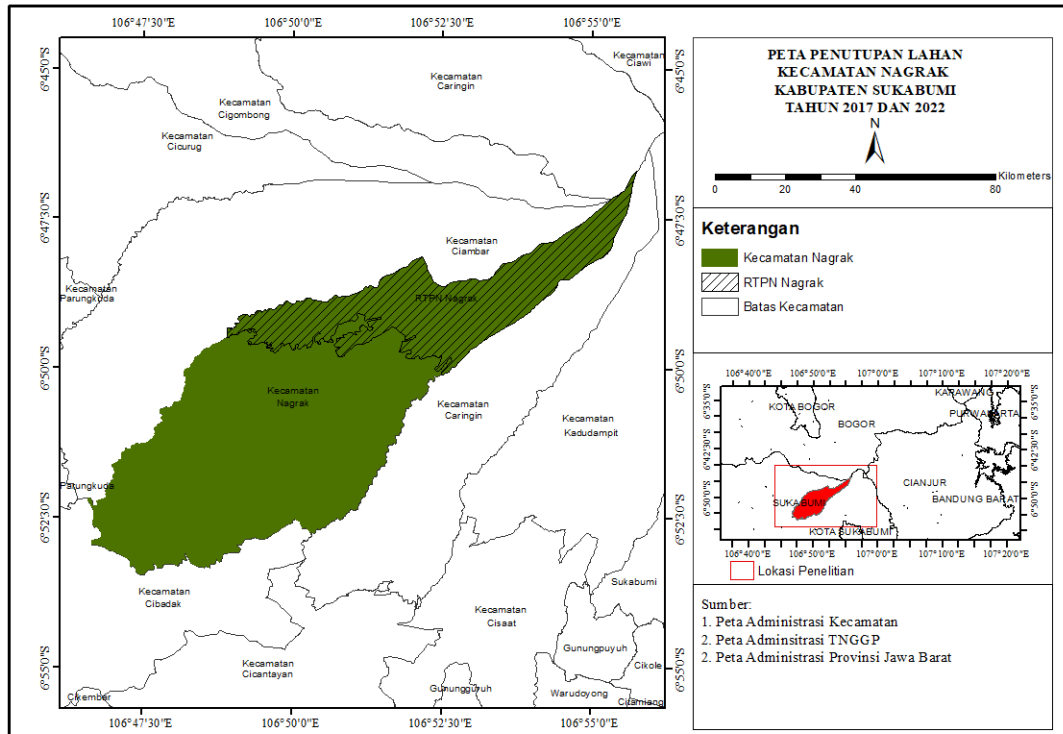
1. Pra-pengolahan Citra

a) *Mosaicking*

Mosaicking dilakukan untuk menggabungkan beberapa gambar atau citra menjadi gambar komposit tunggal. *Mosaicking* bertujuan untuk membentuk peta visual dari area penelitian secara keseluruhan (Hassan & Mossa, 2021). Citra tahun 2017 dan 2022 yang diperoleh dari BRIN merupakan citra yang masih terpisah antar *scene* sehingga perlu dilakukan *mosaicking* untuk menghasilkan satu citra tunggal.

b) *Geographic transformation*

Geographic transformation dilakukan untuk mengkonversi proyeksi spasial atau sistem koordinat tanpa melakukan perubahan pada bentuk atau posisi relatif piksel dalam citra. Citra SPOT 6 dan 7 yang diperoleh dari BRIN merupakan citra dengan koordinat geografis sehingga perlu disesuaikan menjadi koordinat UTM. Kecamatan Nagrak, Kabupaten Sukabumi masuk ke dalam zona 48 S dan datum WGS 84.



Gambar (Figure) 1. Area penelitian (Research area)

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

Tabel (Table) 1. Jenis data dan sumber data penelitian (Type and source of research data)

No	Jenis Data (Data type)	Sumber Data (Data source)
1	Dokumentasi kelas penutupan lahan	Ground check lapangan
2	Titik koordinat uji akurasi	Ground check lapangan
3	Peta batas administrasi kecamatan	Badan Informasi Geospasial (BIG)
4	Peta batas TNGGP	Balai Taman Nasional Gunung Gede Pangrango
5	Citra SPOT 7 tahun 2017	Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
6	Citra SPOT 6 tahun 2022	Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

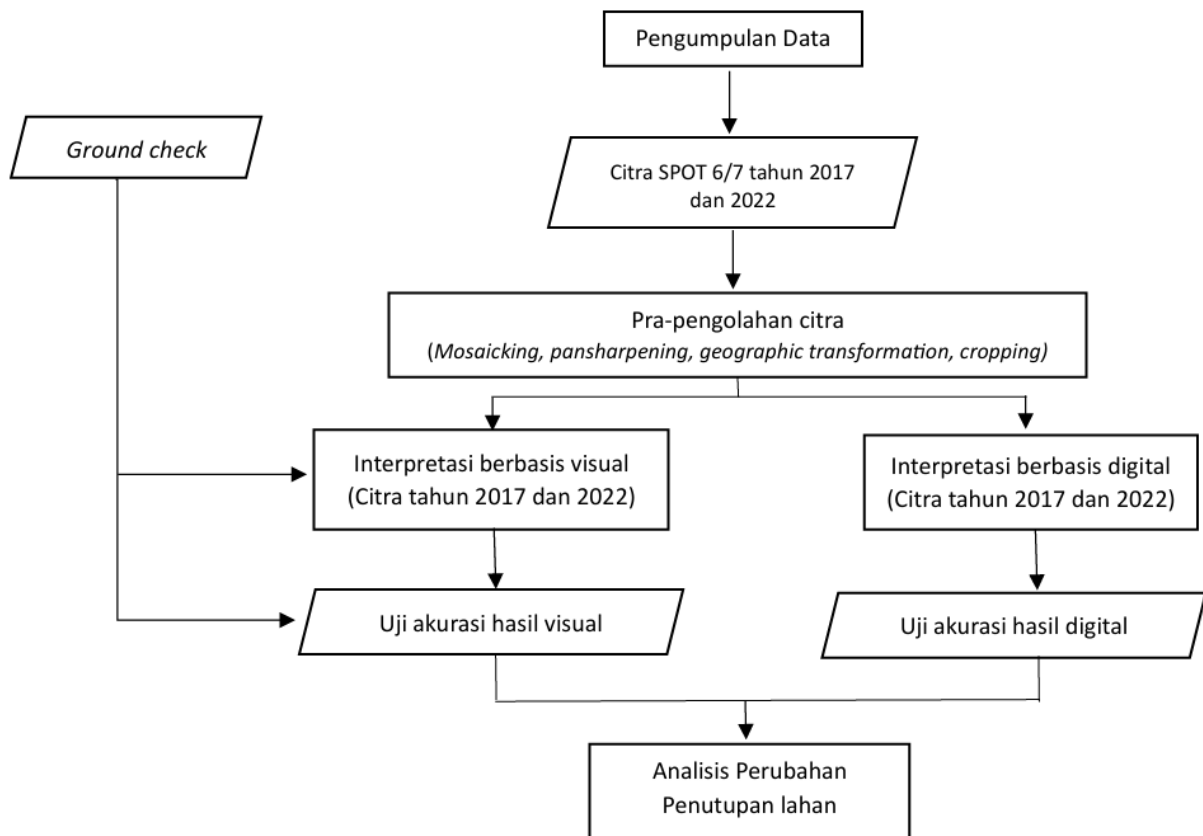
c) *Pansharpening*

Pansharpening adalah metode untuk meningkatkan ketajaman kenampakan objek pada citra untuk keperluan analisis visual. Proses ini melibatkan penggabungan citra multispektral yang memiliki keunggulan dalam resolusi spektral dengan citra pankromatik yang menawarkan resolusi spasial lebih tinggi. Hasil penggabungan kedua jenis citra ini menghasilkan citra baru dengan resolusi

spasial setara dengan citra pankromatik namun tetap mempertahankan visualisasi warna dari citra multispektral (Chen, 2023; Wang *et al.*, 2017).

d) *Cropping*

Cropping dilakukan pada daerah penelitian yaitu di Kecamatan Nagrak, Kabupaten Sukabumi. Pemotongan citra bertujuan untuk memfokuskan dan memperkecil daerah yang dikaji sesuai dengan lokasi penelitian.



Gambar (Figure) 2. Prosedur penelitian (research procedures)

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

2. Ground check

Ground check merupakan kegiatan seseorang dalam pemetaan untuk mengetahui perbedaan kondisi antara di peta atau foto udara dengan kondisi di lapangan (Hazazi *et al.*, 2019). Pengecekan lapangan ini berguna untuk memverifikasi dan memvalidasi hasil klasifikasi agar sesuai dengan keadaan aktual di lapangan. Pengambilan data lapangan dilakukan secara langsung menggunakan metode *purposive sampling*, mencakup dokumentasi dan pengukuran koordinat menggunakan aplikasi Avenza Maps. Sebanyak 76 titik *ground check* diambil dan tersebar pada setiap kelas tutupan lahan. Titik-titik ini digunakan untuk uji akurasi interpretasi berbasis visual, karena berasal langsung dari hasil

pengamatan lapangan. Sementara itu, untuk uji akurasi interpretasi berbasis digital, digunakan 178 titik acak yang dibuat pada peta hasil klasifikasi. Dari jumlah tersebut, 78 titik merupakan data lapangan hasil *ground check*, sedangkan sisanya merupakan dari data citra.

3. Analisis data

Analisis data yang dilakukan merupakan klasifikasi citra untuk mendapatkan peta penutupan lahan tahun 2017 dan 2022. Proses Klasifikasi citra menggunakan interpretasi secara visual dan digital.

a) Interpretasi berbasis visual

Interpretasi berbasis visual dilakukan berdasarkan penyusunan atau pengelompokan piksel dengan ciri obyek secara spasial (Sampurno & Thoriq, 2016).

Analisis berbasis visual dilakukan dengan membuat deliniasi untuk membuat batas kelas setiap penutupan lahan berdasarkan sifat fisik yang tampak dari citra. Pembuatan tiap kelas penutupan lahan dilakukan dengan metode *on-screen digitizing* dengan bantuan elemen interpretasi yaitu bentuk, warna, pola, ukuran, bayangan, asosiasi, tekstur, dan lokasi (Saleem *et al.*, 2021). Hasil dari klasifikasi visual ini kemudian diuji akurasi menggunakan 76 titik *ground check* yang diperoleh langsung dari survei lapangan, dan tidak digunakan dalam proses deliniasi.

Penentuan kelas penutupan lahan mengacu pada dokumen Standar Nasional Indonesia (SNI) 7645:2010 dengan skala peta 1:25.000. Hal ini dilakukan agar sejalan dengan TNGGP yang sedang memperbaiki klasifikasi penutupan lahan dari yang awalnya menggunakan dokumen petunjuk teknis penafsiran citra dari KLHK menjadi SNI 7645:2010. Selain itu, penggunaan SNI 7645:2010 dianggap sudah cukup memadai untuk mengidentifikasi kelas penutupan lahan di Kecamatan Nagrak karena tidak memerlukan pendetailan lebih lanjut, seperti pendetailan pada jenis tanaman dalam klasifikasi penutupan hutan maupun lahan pertanian (BSN, 2010).

b) Interpretasi berbasis digital

Interpretasi berbasis digital menggunakan metode *random forest*. *Random forest* merupakan klasifikasi dan *clustering* berdasarkan *ensemble* dari pohon keputusan (*Decision tree*) (Breiman,

2001). Data latih (*training sample*) ditentukan berdasarkan hasil verifikasi lapangan (*ground check*) dan interpretasi visual terhadap citra resolusi tinggi. Penentuan kelas penutupan lahan mengacu pada kondisi aktual di lapangan. Sebanyak 178 titik digunakan sebagai data latih dalam proses klasifikasi yang dilakukan melalui fitur *Train Random Trees* pada perangkat lunak *ArcGIS 10.8*, dengan parameter *default* berupa jumlah pohon maksimum sebanyak 50, kedalaman maksimum pohon 30, dan jumlah maksimum sampel per kelas sebanyak 1000.

Evaluasi akurasi klasifikasi dilakukan menggunakan 76 titik sebagai data uji (*testing sample*). Analisis dilakukan dengan menggunakan matriks kesalahan (*confusion matrix*) untuk memperoleh nilai akurasi, yang mencakup *Overall Accuracy* dan *Kappa Accuracy* sebagai indikator performa model klasifikasi. Dalam proses klasifikasinya, *Random Forest* menggunakan voting dari pohon-pohon yang telah dibentuk, dimana Keputusan yang paling banyak dipilih akan menjadi hasil akhir (Rosyani *et al.*, 2021).

Pengujian akurasi menggunakan *confusion matrix*. *Confusion matrix* merupakan sebuah tabel yang digunakan untuk melakukan perbandingan antara kondisi lapangan dengan hasil klasifikasi (Romadloni *et al.*, 2022). Uji akurasi dilakukan hanya pada citra 2022 dengan hasil klasifikasi secara visual maupun digital. Tabel 2 menyajikan model perhitungan uji akurasi.

Tabel (Table) 2. Perhitungan uji akurasi menggunakan matriks kesalahan (*Accuracy test calculation using error matrix*)

Data Referensi (Reference Data)	Kelas Klasifikasi (Classification class)			Jumlah Titik (Number of points)	Akurasi Pembuat (Producer accuracy)
	A	B	C		
A	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₊	X ₁₁ /X ₁₊
B	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₊	X ₁₂ /X ₂₊
C	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₊	X ₁₃ /X ₃₊
Total Titik	X ₊₁	X ₊₂	X ₊₃	N	
Akurasi Pengguna	X ₁₁ /X ₊₁	X ₁₂ /X ₊₂	X ₁₃ /X ₊₃		

Sumber (source): Dwi et al. (2025)

Akurasi yang dapat diperoleh meliputi *user's accuracy*, *producer's accuracy*, *overall accuracy*, dan *kappa accuracy*. Menurut (Dwi et al., 2025), *producer's accuracy* diperoleh dengan membagi jumlah piksel yang terklasifikasi benar dengan total piksel di *training area* untuk setiap kelas. Namun, akurasi ini dapat mengalami kesalahan omisi, sehingga sering disebut sebagai *omission error*. Sebaliknya, *user's accuracy* diperoleh dengan membagi jumlah piksel yang benar dengan total piksel dalam kolom, yang dikenal dengan *commission error*. Secara matematis, perhitungan akurasi dari klasifikasi citra dijelaskan dengan rumus 1, 2, 3, dan 4 (Jensen 2005).

$$User's\ accuracy = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \times 100\% \quad (1)$$

$$Producer's\ accuracy = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \times 100\% \quad (2)$$

$$Overall\ accuracy = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \times 100\% \quad (3)$$

$$Kappa\ accuracy = \frac{\sum_{i=1}^r N x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N \cdot N - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

N = Total Jumlah piksel yang digunakan dalam analisis

R = Banyaknya baris atau kolom pada matriks error

X_{i+} = Jumlah piksel yang terdapat pada baris ke-i

X_{+i} = Jumlah piksel yang terdapat pada kolom ke-i
 X_{ii} = Nilai elemen diagonal dalam matriks kontingensi baris ke-i dan kolom ke-i

4. Analisis Perubahan penutupan lahan

Analisis perubahan penutupan lahan dilakukan pada hasil klasifikasi tahun yang berbeda. Menurut Toure et al. (2018), analisis dilakukan dengan Teknik *overlay* peta hasil klasifikasi dengan menu *intersect* untuk menghasilkan perubahan penutupan lahan. Analisis yang dilakukan pada perubahan penutupan lahan yaitu mengamati perubahan luas pada tiap kelas penutupan lahan dan arah perubahan kelas tersebut sehingga dapat memberikan informasi jelas mengenai perubahan yang terjadi. Perubahan penutupan lahan dibagi menjadi perubahan ke arah positif, negatif, dan tetap.

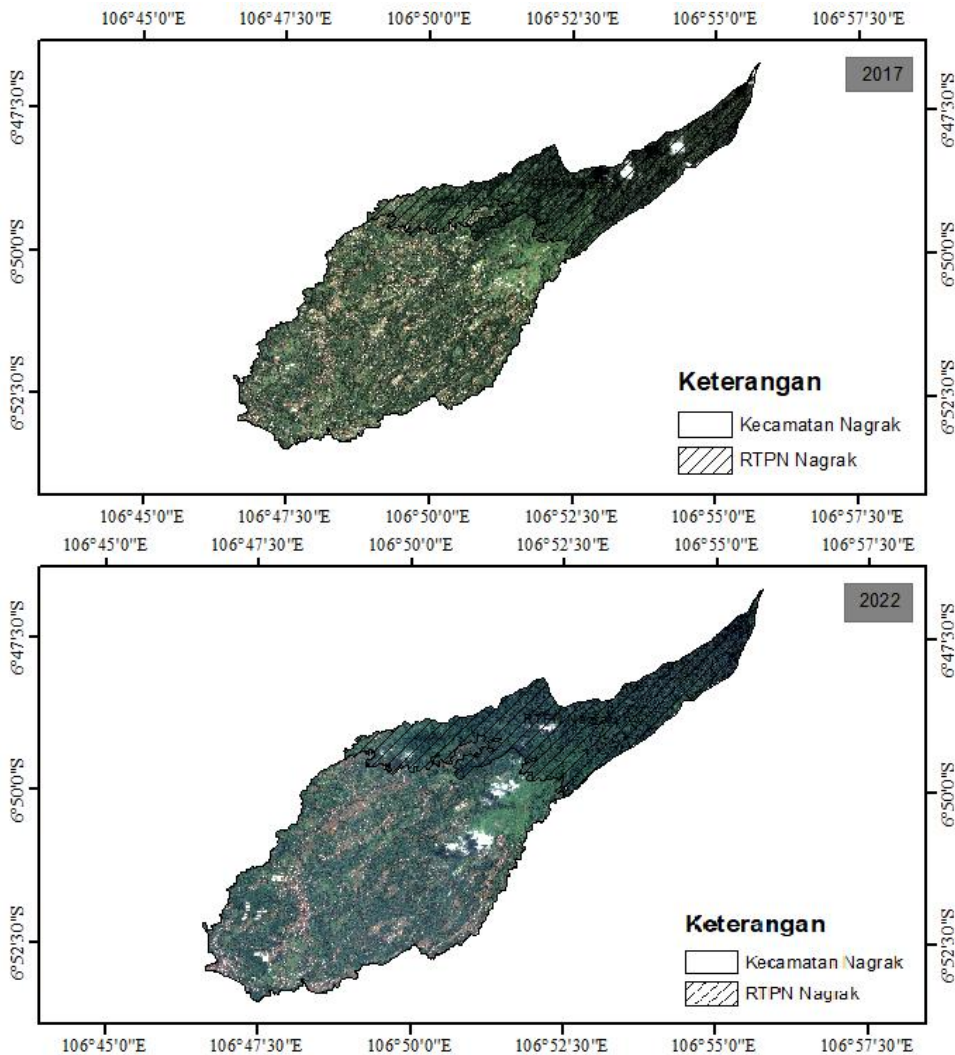
Perubahan penutupan lahan dibagi menjadi tiga arah: positif, negatif, dan tetap. Perubahan dikategorikan sebagai positif apabila perubahan tersebut meningkatkan produktivitas lahan, seperti peningkatan lahan pertanian atau kehutanan. Sebaliknya, perubahan negatif terjadi apabila penggunaan lahan berubah menjadi bentuk yang cenderung menurunkan fungsi ekologis atau produktivitas, misalnya konversi lahan

hutan menjadi lahan terbangun. Namun demikian, perlu dicatat bahwa arah perubahan juga sangat bergantung pada jenis penutup lahannya. Misalnya, penambahan luas pemukiman yang dikategorikan sebagai perubahan positif dari sisi pembangunan, belum tentu berdampak positif terhadap produktivitas lahan secara ekologis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi penutupan lahan menggunakan citra *times series* tahun 2017

dan 2022 dilakukan untuk mengidentifikasi kelas penutupan lahan dan perubahan penutupan lahan pada rentang tahun tersebut. Data citra yang dianalisis merupakan citra yang diperoleh dari Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang dipilih berdasarkan tingkat penutupan awan yang relatif sedikit. Gambar 3 menunjukkan citra tahun 2017 dan 2022 yang telah dipotong sesuai dengan area penelitian dan disajikan dalam kombinasi band 1-2-3 dengan resolusi 1,5 meter hasil *Pansharpening*.



Gambar (Figure) 3. Citra SPOT 6/7 tahun 2017 dan 2022 (SPOT 6/7 imagery in 2017 and 2022)
Sumber (Source): Badan Riset dan Inovasi Nasional (National Research and Innovation Agency)

A. Karakteristik Penutupan Lahan di Lapangan

Pengamatan lapangan dilakukan untuk memverifikasi kondisi penutupan lahan secara langsung, yaitu mencocokkan informasi citra dengan keadaan sebenarnya di lapangan. Selain itu, pengamatan lapangan juga membantu

mengidentifikasi objek penutupan lahan yang mungkin tidak terlihat jelas pada citra, sehingga penentuan kelas penutupan lahan tetap akurat. Dari hasil pengamatan yang dilakukan pada 76 titik yang telah ditentukan, diperoleh empat belas kelas penutupan lahan disajikan pada Tabel 3.

Tabel (Table) 3. Karakteristik penutupan lahan di Kecamatan Nagrak, Kabupaten Sukabumi tahun 2022
(*Land cover characteristics in Nagrak sub-district, Sukabumi district in 2022*)

Jenis Penggunaan Lahan (<i>Land cover type</i>)	Deskripsi Penutupan Lahan (<i>Description of land cover</i>)
Badan air	Daerah yang tergenang oleh air secara alami seperti sungai.
Hutan lahan kering primer	Hutan yang tumbuh di pegunungan, perbukitan, maupun dataran rendah yang masih utuh dan belum terpengaruh oleh intervensi dari manusia.
Hutan sengon	Hamparan lahan berupa hutan tanaman dengan jenis sengon
Hutan bambu	Hamparan lahan berupa hutan tanaman dengan jenis bambu berasosiasi dengan jalan dan permukiman.
Hutan jati	Hamparan lahan hutan dengan tanaman jenis jati
Kebun singkong	Lahan pertanian yang ditanami oleh jenis singkong, menyebar secara luas dan menjadi komoditi utama dalam berladang masyarakat disana.
Kebun kacang	Lahan pertanian yang ditanami oleh jenis kacang-kacangan.
Lahan kosong	Lahan kosong adalah area yang telah mengalami campur tangan manusia, sehingga penutupan lahan alami maupun semi alami tidak lagi terlihat.
Permukiman	Lahan berupa perumahan, bangunan industri, perkantoran, dan peternakan
Sawah	Lahan pertanian yang terdapat delta sungai yang pengairannya dipengaruhi oleh air Sungai dengan tanaman padi.
Padang rumput	Hamparan lahan yang ditutupi oleh berbagai jenis rumput serta pepohonan yang tumbuh tersebar dan tidak rapat bahkan jarang.
Semak belukar	Hamparan yang dipenuhi oleh vegetasi tumbuhan bawah seperti semak, belukar, dan rumput yang tumbuh menyebar.
Lapangan	Areal yang memiliki fungsi sebagai tempat berolahraga.
Pemakaman	Areal yang diperuntukan sebagai lokasi pemakaman jenazah dan berasosiasi dengan semak belukar.






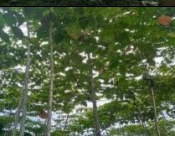






Sumber (*Source*): Hasil pengecekan lapangan yang mengacu pada klasifikasi penutupan lahan berdasarkan SNI 7645:2010. (*the result of ground check referring to land cover classification based on SNI 7645: 2010*)

B. Penutupan Lahan Hasil Klasifikasi Visual

Klasifikasi penutupan lahan secara visual merupakan kegiatan identifikasi objek citra melalui kemampuan interpreter dalam pengenalan objek, interpretasi visual dilakukan dengan menetapkan kriteria visual berdasarkan delapan elemen interpretasi (Silva *et al.*, 2020). Klasifikasi secara visual dibantu dengan delapan elemen interpretasi. Klasifikasi visual dilakukan hanya pada citra tahun 2022, sementara Citra tahun 2017 juga digunakan dalam analisis, namun tidak diklasifikasi secara visual dari awal. Sebagai gantinya, dilakukan pemotongan (*cut*

polygon) terhadap hasil klasifikasi tahun 2022 untuk menyesuaikan batas-batas penutupan lahan tahun 2017. Pendekatan ini bertujuan untuk menjaga konsistensi spasial dan memudahkan perbandingan perubahan penutupan lahan antar tahun. Interpretasi awal dilakukan langsung dari data citra untuk memperoleh gambaran umum kondisi penutupan lahan di lokasi penelitian. Selanjutnya, dilakukan *ground check* untuk memverifikasi hasil interpretasi dan memastikan keakuratannya. Gambar citra saat interpretasi dan foto lapang disajikan pada Tabel 4.

Tabel (Table) 3. Deteksi secara visual jenis penutupan lahan pada citra SPOT 6 kombinasi band 3-2-1 (*Visual recognition of land cover types in SPOT 6 imagery using a 3-2-1 band combination*)

Penutupan Lahan (<i>Land cover</i>)	Gambar Citra (<i>Image</i>)	Foto lapang (<i>field photos</i>)	Karakteristik pada Citra (<i>Characteristics of the image</i>) (Lillesand <i>et al.</i> , 2015)			
			Warna/ rona (<i>Color/ Tone</i>)	Tekstur (<i>Texture</i>)	Pola (<i>Pattern</i>)	Situs/ asosiasi (<i>Site/ association</i>)
Badan air			Biru tua-cokelat muda	Halus	Teratur	
Hutan lahan kering primer			Hijau tua gelap	Kasar	Tidak teratur	Pegunungan
Hutan tanaman			Hijau muda	Sedang	Teratur	Permukiman dan ladang
Ladang			Hijau tua-muda bercampur	Kasar	Tidak teratur	Permukiman dan hutan tanaman
Lahan kosong			Cokelat tua-merah dengan campuran	Halus	Tidak teratur	Semak belukar dan permukiman
Permukiman			Merah muda	Kasar	Teratur	Jalan

Padang rumput			Hijau terang	Halus	Teratur	Perbukitan
Semak belukar			Hijau terang-tua	Kasar	Tidak teratur	Hutan tanaman, ladang, dan permukiman
Sawah			Hijau terang-biru bercampur	Halus	teratur	Ladang dan permukiman

Sumber (Source): Analisis Citra SPOT 6 tahun 2022 (*Analysis of SPOT 6 imagery in 2022*)

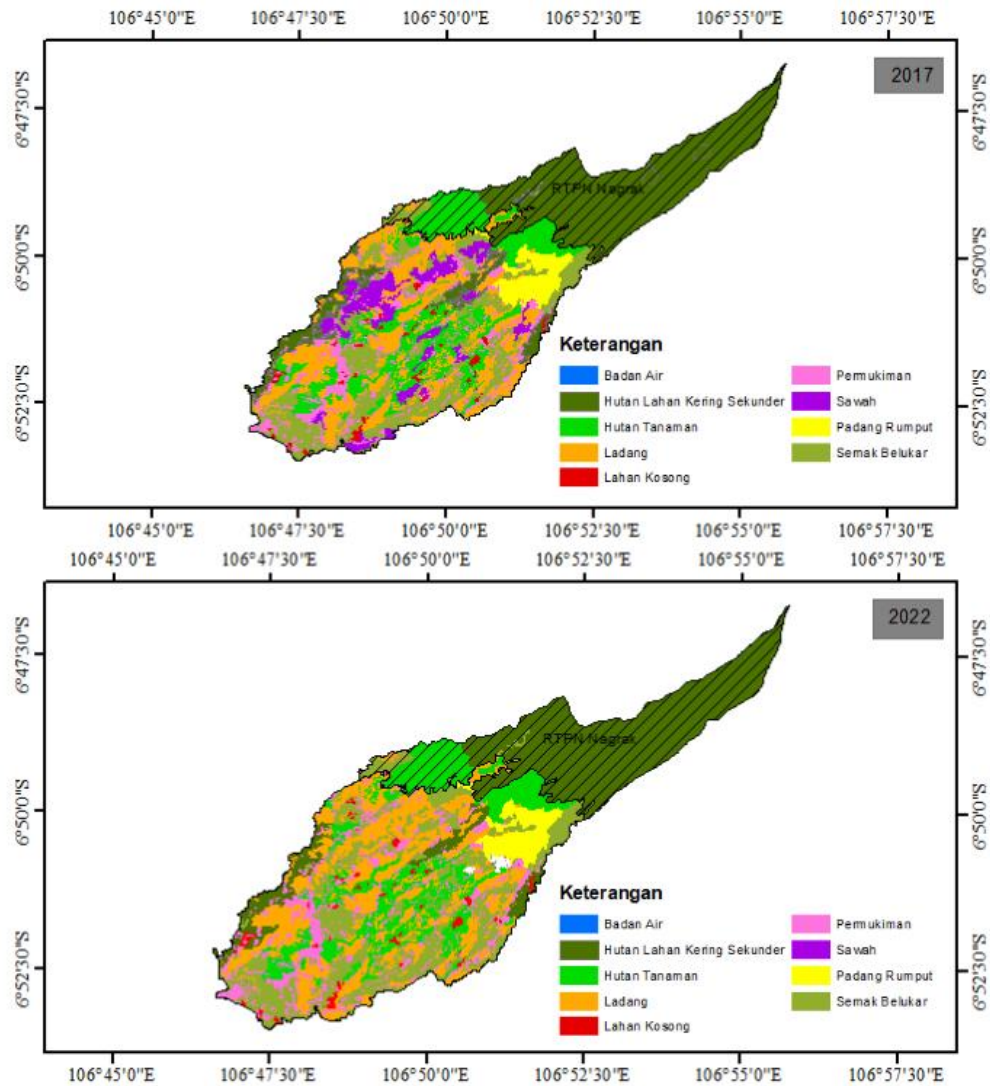
Data *ground check* menghasilkan empat belas jenis penutupan lahan. Namun, berdasarkan interpretasi citra hanya ditemukan sembilan kelas penutupan lahan sehingga dalam membuat kunci penafsiran dilakukan reklasifikasi. Reklasifikasi kelas penutupan lahan tersebut dibuat berdasarkan pertimbangan kemampuan interpreter dalam pengenalan objek berdasarkan elemen interpretasi. Hasil reklasifikasi disajikan pada Tabel 5.

Hasil Klasifikasi visual menggunakan metode *on-screen digitizing* yang sudah dilakukan reklasifikasi pada citra SPOT 6 tahun 2022 dan SPOT 7 tahun 2017 diperoleh sembilan kelas penutupan lahan diantaranya: badan air, hutan lahan kering primer, hutan tanaman, ladang, lahan kosong, permukiman, sawah, padang rumput, dan semak belukar. Gambar 4 menyajikan informasi sebaran spasial penutupan lahan tahun 2017 dan 2022.

Tabel (Table) 4. Reklasifikasi citra secara visual (*Visual image reclassification*)

No	Kelas penutupan lahan hasil <i>ground check</i> (<i>Land cover class from ground check</i>)	No.	Hasil reklasifikasi (<i>Reclassification result</i>)
1	Badan air	1	Badan air
2	Hutan lahan kering primer	2	Hutan lahan kering primer
3	Hutan sengon	3	Hutan tanaman
4	Hutan bambu		
5	Hutan Jati	4	Ladang
6	Kebun singkong		
7	Kebun kacang	5	Lahan kosong
8	Lahan kosong	6	Permukiman
9	Permukiman	7	Sawah
10	Sawah	8	Padang rumput
11	Padang rumput	9	Semak belukar
12	Semak belukar		
13	Lapangan		
14	Pemakaman		

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (*Data analysis 2024*)



Gambar (Figure) 4. Peta penutupan lahan tahun 2017 dan tahun 2022 hasil *on-screen digitizing* (Land cover maps for 2017 and 2022, the result of *on-screen digitizing*)
Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

Hasil perhitungan penutupan lahan menggunakan metode *on-screen digitizing* tahun 2017 didominasi oleh hutan lahan kering primer dengan luas 2.701,52 ha atau 39,14%. Pada tahun 2022 hutan lahan kering primer masih mendominasi dengan luasan yang tidak jauh berbeda yaitu 2.675,40 ha atau 38,76%. Sementara, penutupan lahan dengan luas terkecil pada tahun 2017 dan 2022 yaitu badan air sebesar 3,56 ha atau 0,05%. Tidak adanya perubahan luas badan air ini kemungkinan

mencerminkan kondisi aktual di lapangan, dan bukan semata disebabkan oleh kelemahan metode. Namun, perbedaan waktu perekaman citra juga memengaruhi. Citra tahun 2017 diambil pada bulan Maret (musim hujan), sedangkan citra tahun 2022 diambil pada bulan Juli (musim kemarau). Perbedaan musim ini dapat memengaruhi tampilan vegetasi dan aktivitas lahan, terutama pada kelas lahan seperti ladang dan sawah, yang sifatnya musiman. Luasan penutupan lahan disajikan pada Tabel 6.

Tabel (Table) 5. Luas penutupan lahan tahun 2017 dan tahun 2022 berdasarkan hasil analisis visual (*Land cover area in 2017 and 2022 based on the results of visual analysis*)

No.	Penutupan Lahan (<i>Land cover</i>)	Tahun (Year) 2017		Tahun (Year) 2022	
		Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion) (%)	Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion) (%)
1	Badan air	3,56	0,05	3,56	0,05
2	Hutan lahan kering primer	2.701,52	39,14	2.675,40	38,76
3	Hutan tanaman	455,33	6,60	469,43	6,80
4	Ladang	1.160,24	16,81	1.386,10	20,08
5	Lahan kosong	86,86	1,26	86,04	1,25
6	Permukiman	619,59	8,98	677,13	9,81
7	Sawah	421,91	6,11	-	0,00
8	Padang rumput	259,09	3,75	249,92	3,62
9	Semak belukar	1.193,98	17,30	1.354,50	19,62
Total		6.902,08	100	6902.08	100

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (*Data analysis 2024*)

Hasil uji akurasi menggunakan *confusion matrix* pada sembilan kelas diperoleh *overall accuracy* 95% dan *kappa accuracy* 94%. Hasil uji akurasi terbilang cukup tinggi dan menjadi kelebihan metode *on-screen digitizing*, akan tetapi

waktu yang dibutuhkan dalam klasifikasi cukup lama. Menurut Jaya (2015) nilai uji akurasi citra lebih dari 85% sudah baik dan hasil klasifikasi dapat digunakan. Untuk lebih jelas Tabel 7 menyajikan *confusion matriks* metode *on-screen digitation*

Tabel (Table) 7. Matriks kesalahan digitasi on-screen (*on-screen digitization error matrix*)

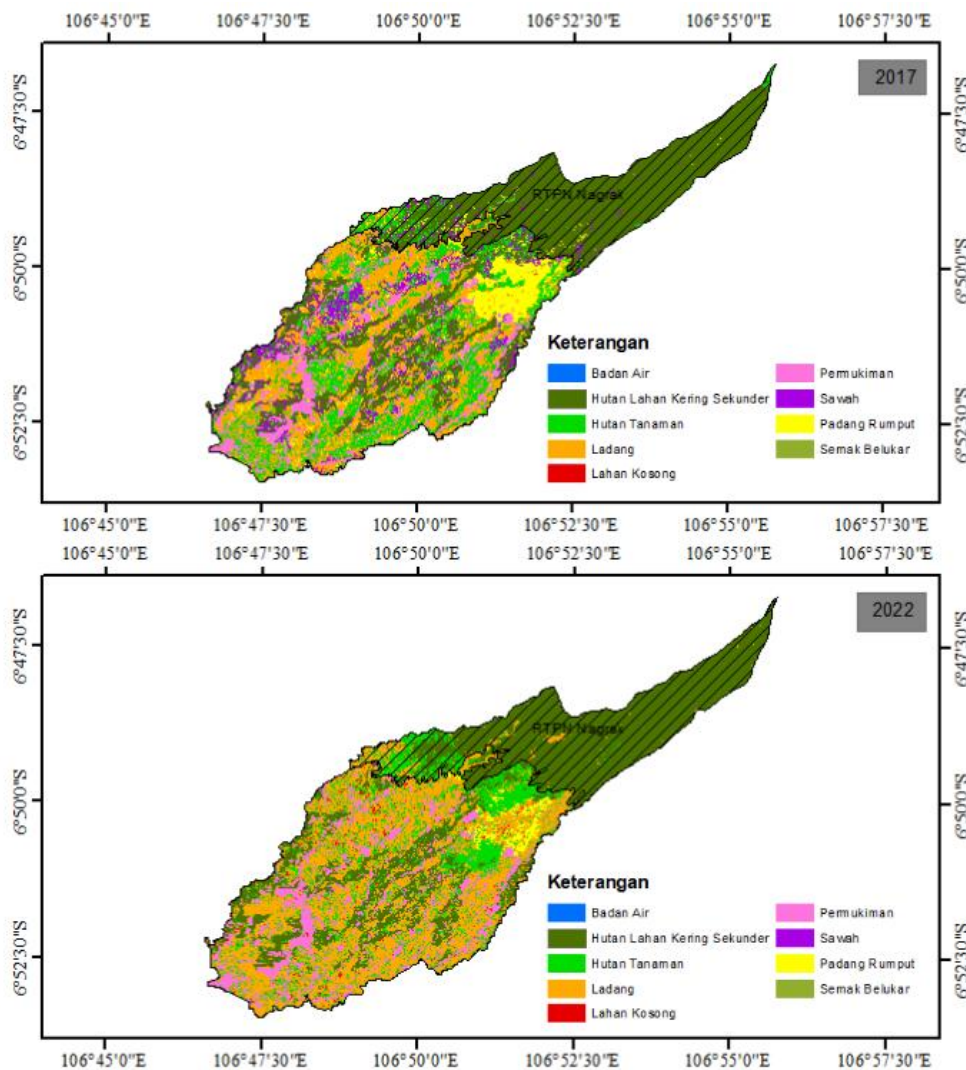
ClassValue	Hasil Lapangan (<i>ground check</i>)										U_Accuracy	Kappa
	BA	HLP	HT	LP	LK	PK	SW	PR	SB	Total		
BA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0.94
HLP	0	28	1	0	0	0	0	0	0	29	0.97	0.94
HT	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5	1.0	0.94
LP	0	0	0	14	0	0	0	0	1	15	0.93	0.94
LK	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1.0	0.94
PK	0	0	1	0	0	6	0	0	0	7	0.86	0.94
SW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0.94
PR	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	1.0	0.94
SB	0	0	0	0	0	0	0	1	14	15	0.93	0.94
Total	0	28	7	14	1	6	0	4	15	76		
P_Accuracy	-	1.0	0.71	1.0	1.0	1.0	-	0.75	0.93	0.95	0.94	
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0.94

Keterangan: BA : Badan air, PK : Permukiman, HLP : Hutan lahan kering primer, SW : Sawah, HT : Hutan tanaman, PR : Padang rumput, LP : Ladang, SB : Semak belukar, dan LK : Lahan kosong

C. Penutupan Lahan Hasil Klasifikasi Digital

Dalam analisis ini digunakan sembilan kelas penutupan lahan hasil reklasifikasi diantaranya: (1) badan air, (2) hutan lahan kering primer, (3) hutan tanaman, (4) ladang, (5) lahan kosong, (6) permukiman, (7) sawah, (8) padang rumput, dan (9) semak belukar. Alasan tidak menggunakan empat belas kelas pada klasifikasi *random forest* karena data *training area* yang diambil tidak mewakili keseluruhan kelas penutupan lahan sehingga hasil yang

diperoleh kurang maksimal. Dalam proses klasifikasi, parameter yang digunakan mengacu pada Zulfajri *et al.* (2021) yaitu data *training area* yang digunakan sebagai data *train* sebanyak 70% dan 30% untuk data *test*, selanjutnya parameter pohon yang digunakan sebanyak 50 pohon dengan ke dalam pengujian parameter setiap pohonnya 30. Gambar 4 di bawah menyajikan peta sebaran spasial penutupan lahan pada tahun 2017 dan 2022 hasil klasifikasi *random forest*.



Gambar (Figure) 5. Peta penutupan lahan tahun 2017 dan tahun 2022 hasil *random forest* (Map of land cover in 2017 and 2022 from random forest)

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

Penutupan lahan tahun 2017 hasil klasifikasi *random forest* didominasi oleh hutan lahan kering primer 2.643,12 ha atau 38,29% dan penutupan lahan terkecil terdapat pada badan air sebesar 2,98 ha atau 0,04%. Sementara, penutupan lahan tahun 2022 hutan lahan kering primer masih mendominasi dengan luasan 2.616,16 ha atau 37,90% dan luasan terkecil pada badan air dengan luas 0.04 ha atau 0.001%. Adapun hasil klasifikasi menggunakan *random forest* disajikan pada Tabel 7.

Perubahan penutupan lahan terjadi pada semua kelas, namun perubahan yang terjadi tidak terlalu baik dan akurat. Hal tersebut disebabkan karena data latih yang tidak dapat mewakili setiap kelas yang diinginkan sehingga hasil klasifikasi menjadi kurang baik. Selain itu, *random forest* memiliki kelemahan *overfitting* pada data yang kecil sehingga dilakukan

reklasifikasi ulang dan *eliminate* pada luasan yang kurang dari 0,1 ha. Hasil uji akurasi yang diperoleh menggunakan *random forest overall accuracy* 90% dan *kappa accuracy* 89%. Tabel 8 menyajikan *confusion matriks* metode *random forest*.

Hasil uji akurasi dengan metode *random forest* lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan visual. Hal ini disebabkan karena klasifikasi penutupan lahan secara digital hanya menggunakan data *training area*. Selanjutnya, untuk menghasilkan kelas penutupan lahan yang lebih baik dilakukan penggabungan hasil klasifikasi visual dan digital dengan menu *identity*. Hal tersebut dilakukan karena masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan. Sebaran spasial penutupan lahan dengan *identity* disajikan pada Gambar 6 dan luasan penutupan lahan disajikan pada Tabel 9.

Tabel (Table) 6. Luas penutupan lahan tahun 2017 dan tahun 2022 berdasarkan hasil analisis *random forest* (*Land cover area in 2017 and 2022 based on the results of random forest*)

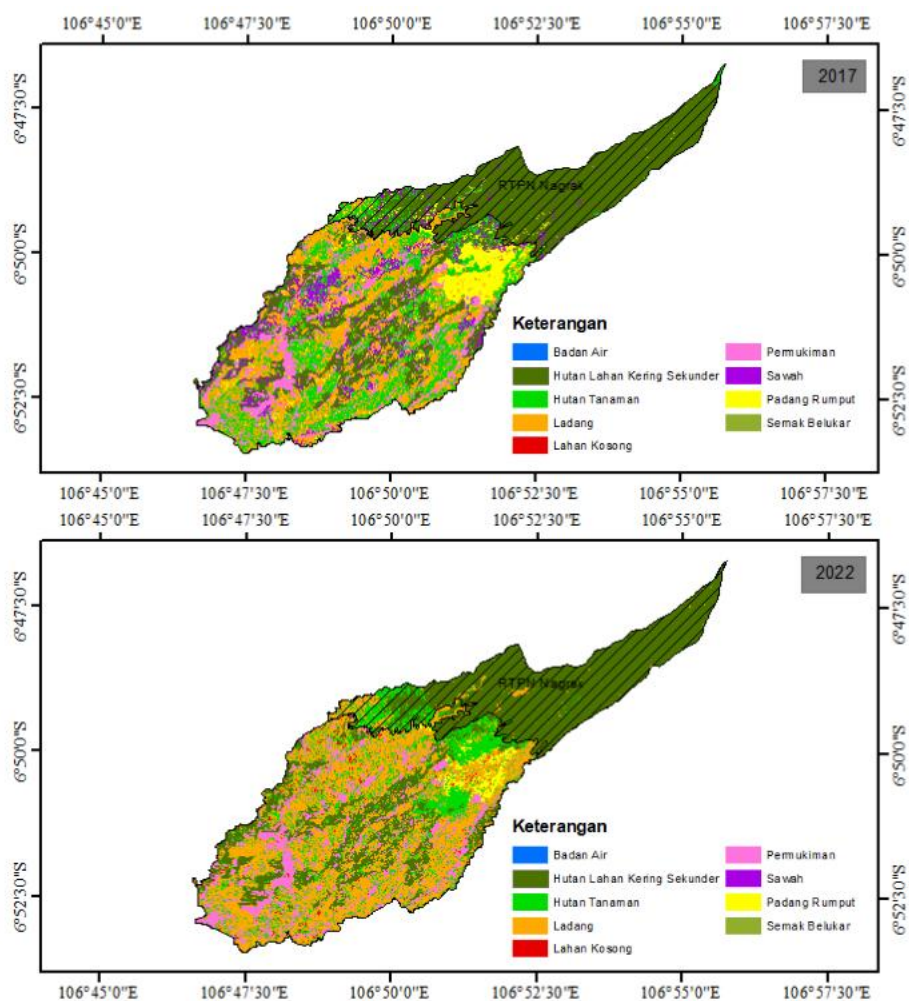
No	Penutupan Lahan (<i>Land cover</i>)	Tahun (Year) 2017		Tahun (Year) 2022	
		Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion) (%)	Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion) (%)
1	Badan air	2,98	0,04	0,04	0,00
2	Hutan lahan kering primer	2.643,12	38,29	2.616,16	37,90
3	Hutan tanaman	1.160,30	16,81	878,44	12,73
4	Ladang	1.448,22	20,98	2.061,32	29,87
5	Lahan kosong	3,19	0,05	84,36	1,22
6	Permukiman	613,60	8,89	600,34	8,70
7	Sawah	445,22	6,45	58,01	0,84
8	Padang rumput	433,30	6,28	110,90	1,61
9	Semak belukar	152,14	2,20	492,50	7,14
	Total	6.902,08	100	6.902,08	100

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (*Data analysis 2024*)

Tabel (Table) 8. Matriks kesalahan *random forest* (*random forest error matrix*)

ClassValue	Hasil Lapangan (<i>ground check</i>)										U_Accuracy	Kappa
	BA	HLP	HT	LP	LK	PK	SW	PR	SB	Total		
BA	3	1	0	0	0	0	0	0	4	0.75	0.89	3
HLP	0	9	1	0	0	0	0	0	10	0.90	0.89	0
HT	0	1	2	0	0	0	0	0	3	0.67	0.89	0
LP	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0.50	0.89	0
LK	0	0	0	0	19	2	0	0	21	0.90	0.89	0
PK	0	0	0	0	1	12	1	0	14	0.86	0.89	0
SW	0	0	0	0	0	0	3	1	4	0.75	0.89	0
PR	0	0	0	0	0	0	1	13	14	0.93	0.89	0
SB	3	11	5	1	20	14	6	14	76			3
Total	1.00	0.82	0.40	1.00	0.95	0.86	0.50	0.93	0.90			1.00
P_Accuracy	3	1	0	0	0	0	0	0	4	0.75	0.89	3
Kappa	0	9	1	0	0	0	0	0	10	0.90	0.89	0

Keterangan: BA : Badan air, PK : Permukiman, HLP : Hutan lahan kering primer, SW : Sawah, HT : Hutan tanaman, PR : Padang rumput, LP : Ladang, SB : Semak belukar, dan LK : Lahan kosong



Gambar (Figure) 6. Peta penutupan lahan tahun 2017 dan tahun 2022 menggunakan metoda *identity* (*Land cover map 2017 and 2022 using the identity method*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (*Data analysis 2024*)

Tabel (Table) 7. Luas penutupan lahan tahun 2017 dan tahun 2022 dengan metode on-screen dan *random forest*.
(Land cover area in 2017 and 2022 using the on-screen and random forest methods)

No	Penutupan Lahan (Land cover)	Tahun (Year) 2017		Tahun (Year) 2022	
		Luas (Area) (ha)	Proporsi (%) (Proportion)	Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion) (%)
1	Badan air	2,70	0,04	2,70	0,04
2	Hutan lahan kering primer	2020,99	29,28	2020,99	29,28
3	Hutan tanaman	1211,49	17,55	1200,63	17,40
4	Ladang	1.316,25	19,07	1.683,07	24,38
5	Lahan kosong	2,93	0,04	61,78	0,90
6	Permukiman	613,58	8,89	649,44	9,41
7	Sawah	204,34	2,96	9,14	0,13
8	Padang rumput	360,12	5,22	360,66	5,22
9	Semak belukar	1.169,68	16,95	914,21	13,25
Total		6.902,08	100	6.902,08	100

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

D. Analisis Perubahan Penutupan Lahan

Analisis dilakukan pada dua citra yang telah diidentifikasi dengan perpaduan metode visual dan digital (Tabel 8). Analisis ini mencakup seluruh kelas penutupan lahan untuk mengetahui perubahan yang terjadi di Kecamatan Nagrak dalam periode 2017 – 2022. Perubahan penutupan lahan dihitung menggunakan matriks (Tabel 9). Untuk mengetahui luas perubahan yang terjadi serta arah perubahan antar kelas, apakah terjadi peningkatan atau penurunan luasan.

Berdasarkan Tabel 9, perubahan luas penutupan lahan terbesar pada kelas ladang yaitu 366,82 ha, sementara semak belukar mengalami penurunan sebesar 255,47 ha. Badan air dan padang rumput tidak mengalami perubahan luas. Selain untuk mengetahui perubahan luas, analisis dengan matriks dapat memberikan informasi mengenai arah perubahan yang terjadi. Matriks perubahan penutupan lahan Kecamatan Nagrak tahun 2017 – 2022 terdapat pada Tabel 10.

Tabel (Table) 8. Luas perubahan penutupan lahan di tahun 2017 – 2022 dengan metode visual dan digital (Area of land cover change in 2017–2022 using visual and digital methods)

No	Penutupan Lahan (land cover)	Tahun (Year) 2017		Tahun (Year) 2022		Luas Perubahan (Extent of change)	
		Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion) (%)	Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion) (%)	(+)	(-)
1	Badan air	2,70	0,04	2,70	0,04	-	-
2	Hutan lahan kering primer	2020,99	29,28	2020,99	29,28	-	-
3	Hutan tanaman	1211,49	17,55	1200,63	17,40	-	10,86
4	Ladang	1.316,25	19,07	1.683,07	24,38	366,82	-
5	Lahan kosong	2,93	0,04	61,78	0,90	58,84	-
6	Permukiman	613,58	8,89	649,44	9,41	35,86	-
7	Sawah	204,34	2,96	9,14	0,13	-	195,20
8	Padang rumput	360,12	5,22	360,66	5,22	-	-
9	Semak belukar	1.169,68	16,95	914,21	13,25	-	255,47
Total		6.902,08	100	6.902,08	100		

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

Tabel (Table) 9. Matriks perubahan penutupan lahan 2017 – 2022 (Land cover change matrix 2017 – 2022)

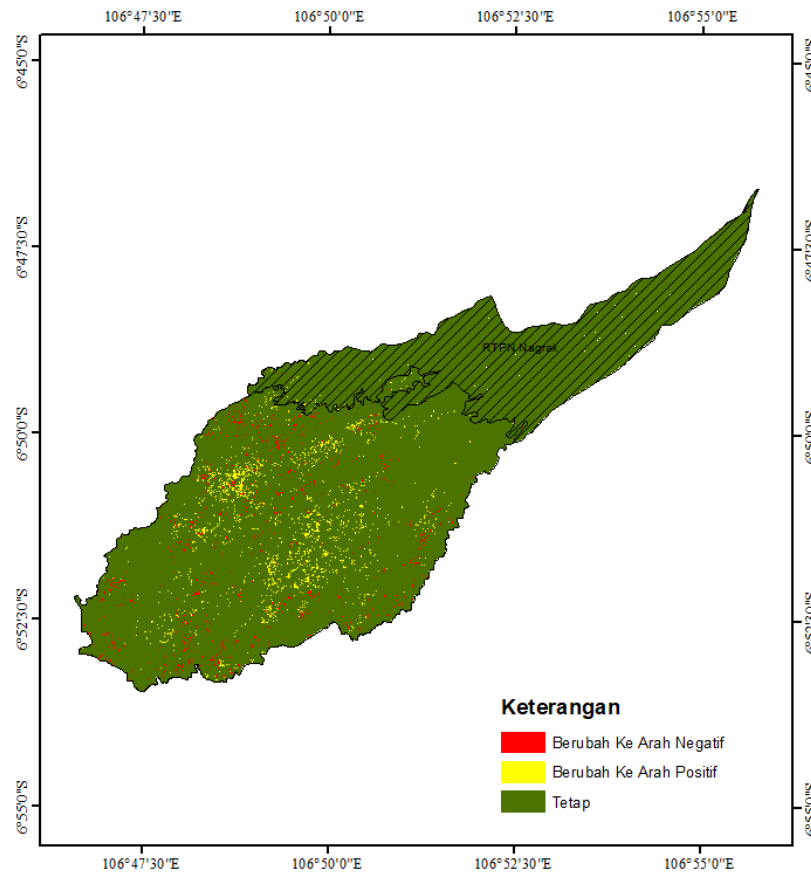
		2022									
		KET	BA	HLP	HT	LP	LK	PK	SW	PR	SB
2017	BA		2,70	-	-	-	-	-	-	-	-
	HLP		-	2020,99	-	-	-	-	-	-	-
	HT		-	-	1168,78	30,88	-	-	-	-	11,83
	LP		-	-	866,89	-	43,52	21,00	-	-	384,84
	LK		-	-	1,31	1,62	-	-	-	-	6,72
	PK		-	-	-	-	-	606,86	-	-	-
	SW		-	-	121,97	5,52	1,74	-	9,14	-	65,97
	PR		-	-	-	-	-	-	-	360,12	-
	SB		-	-	11,83	692,90	11,89	19,94	-	-	413,09

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

Keterangan: BA : Badan air, PK : Permukiman, HLP : Hutan lahan kering primer, SW : Sawah, HT : Hutan tanaman, PR : Padang rumput, LP : Ladang, SB : Semak belukar, dan LK : Lahan kosong

Perubahan penutupan lahan di Kecamatan Nagrak dalam lima tahun terakhir disebabkan oleh faktor alami dan aktivitas manusia. Faktor alami meliputi proses suksesi, pertumbuhan vegetasi, dan bencana alam seperti tanah longsor. Namun demikian, aktivitas manusia merupakan penyebab utama, terutama berupa pembukaan lahan untuk pertanian serta ekspansi permukiman yang dipicu oleh pertumbuhan penduduk dan pembangunan infrastruktur. Luas perubahan lahan yang teridentifikasi mencapai 6.902,08 ha, dengan dominasi perubahan pada hutan lahan kering primer seluas 2.020,99 ha (29,28%). Periode 2017–2022 menunjukkan laju perubahan tertinggi, yang berkorelasi erat dengan peningkatan jumlah penduduk dan dinamika penggunaan lahan di sekitar kawasan TNGGP. Perluasan kawasan TNGGP yang berlangsung pada tahun 2008 hingga 2018 dinilai cukup berhasil, namun pada beberapa bagian perbatasan atau wilayah di dalam kawasan masih ditemukan aktivitas pertanian yang tidak dapat teridentifikasi secara detail melalui citra satelit.

Analisis perubahan penutupan lahan dalam penelitian ini tidak hanya mencakup informasi mengenai luasan, tetapi juga arah perubahan yang terjadi. Arah perubahan dimaknai sebagai perubahan yang bersifat positif atau negatif berdasarkan manfaat dan tekanan yang ditimbulkan terhadap keberlanjutan lahan. Perubahan yang dianggap positif meliputi peralihan dari lahan kosong atau terlantar menjadi lahan yang memiliki fungsi produktif seperti permukiman terencana, kebun campuran, atau ladang yang dikelola, karena hal ini dapat meningkatkan nilai guna lahan. Sebaliknya, perubahan negatif mengacu pada alih fungsi dari hutan atau vegetasi alami menjadi lahan terbuka, lahan pertanian tidak terkendali, atau lahan terbangun tanpa perencanaan, yang berpotensi menimbulkan degradasi lahan, penurunan tutupan vegetasi, dan perubahan fungsi ruang yang tidak sesuai peruntukannya. Sebaran spasial perubahan penutupan lahan Kecamatan Nagrak tahun 2017 – 2022 disajikan pada Gambar 7 dan luasan perubahan penutupan lahan ditunjukkan pada Tabel 11.



Gambar (Figure) 1. Peta perubahan penutupan lahan Kecamatan Nagrak tahun 2017–2022 (Map of land cover change in Nagrak Sub-district 2017-2022)

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

Tabel (Table) 10. Perubahan penutupan lahan tahun 2017–2022 berdasarkan analisis *overlay intersect* (Land cover change during 2017-2022 based on *overlay intersect* analysis)

No.	Penutupan Lahan (<i>land cover</i>)		Luas (Area) (ha)	Proporsi (Proportion)(%)
	2017	2022		
Berubah ke arah negatif			214,08	3,10
1	Hutan Tanaman	Semak belukar	42,72	0,62
2	Ladang	Lahan kosong	43,52	0,63
3	Permukiman	Lahan kosong	5,52	0,08
4	Sawah	Lahan kosong	1,74	0,03
5	Sawah	Permukiman	65,97	0,96
6	Sawah	Semak belukar	11,89	0,17
7	Semak belukar	Lahan kosong	42,72	0,62
Berubah ke arah positif			54,17	0,78
1	Lahan kosong	Ladang	1,31	0,02
2	Ladang	Permukiman	21,00	0,30
3	Semak belukar	Hutan tanaman	31,86	0,46
Tetap			6.633.83	96,12
Total			6.902,08	100

Sumber (Source): Pengolahan data 2024 (Data analysis 2024)

Berdasarkan peta perubahan tutupan lahan dan data pada Tabel 11 dan Gambar 7, Kecamatan Nagrak mengalami dinamika penggunaan lahan dalam periode tahun 2017–2022. Perubahan ke arah negatif tercatat seluas 214,0812 ha (3,10%) yang didominasi oleh perubahan sawah menjadi permukiman (0,96%) dan ladang menjadi lahan kosong (0,63%). Kategori negatif ini mencerminkan penurunan fungsi lahan produktif. Perubahan semak belukar menjadi lahan kosong juga tergolong negatif karena mengindikasikan degradasi vegetasi. Secara spasial, perubahan negatif tersebar di bagian tengah dan selatan wilayah, yang erat kaitannya dengan tekanan pembangunan dan ekspansi permukiman. Sebaliknya, perubahan ke arah positif tercatat sebesar 54,17 ha (0,78%), terutama berupa semak belukar yang berubah menjadi hutan tanaman (0,46%). Ini menunjukkan adanya peningkatan tutupan vegetasi dan perbaikan fungsi ekologis di beberapa bagian wilayah, khususnya di barat dan selatan. Luasan lahan yang tidak mengalami perubahan (tetap) mendominasi dengan total 6.637,85 ha atau sekitar 96,13%

IV. KESIMPULAN

Penelitian yang dilakukan mengklasifikasikan penutupan lahan di Kecamatan Nagrak menggunakan metode visual (*on-screen digitizing*) dan digital (*random forest*), dengan akurasi masing-masing 94% dan 89%. Untuk meningkatkan hasil, kedua metode digabungkan menggunakan *identity* sehingga diperoleh kelas penutupan lahan yang lebih akurat.

Analisis perubahan penutupan lahan dari tahun 2017 hingga 2022 menunjukkan adanya dinamika penggunaan lahan dengan perubahan positif seluas 54,17 ha (0,78%) yang mencerminkan peningkatan fungsi lahan tidak produktif menjadi produktif, serta perubahan negatif seluas 214,08 ha (3,10%) yang mengindikasikan adanya tekanan terhadap keberlanjutan lahan.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai dinamika penutupan lahan di Kecamatan Nagrak dan dapat dijadikan acuan dalam perencanaan tata ruang serta pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Taman Nasional Gunung Gede Pangrango (TNGGP). Dosen pembimbing, keluarga remote sensing IPB University, dan rekan-rekan program studi IPH Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB.

KONTRIBUSI

SR berkontribusi terhadap pengolahan data, penulisan manuskrip, peninjauan pustaka dan desain penelitian. MBS dan NP berkontribusi terhadap pembahasan serta pengolahan data, hasil, dan revisi draf.

DAFTAR PUSTAKA

Ario, R., Darmawan, A., & Wicaksono, R. (2021). *Evaluasi Program Pemulihan Ekosistem di Taman Nasional Gunung Gede Pangrango (TNGGP) Melalui Kemitraan dengan Masyarakat dan*

- Industri*. Bogor: Balai Besar Taman Nasional Gunung Gede Pangrango bekerja sama dengan Conservation International dan Daikin Industries.
- Azhari, M., Situmorang, Z., & Rosnelly, R. (2021). Perbandingan Akurasi, Recall, dan Presisi Klasifikasi pada Algoritma C4.5, Random Forest, SVM dan Naive Bayes. *Jurnal Media Informatika Budidarma*, 5(2), 640. <https://doi.org/10.30865/mib.v5i2.2937>
- BPS. (2023). *Jumlah Penduduk Di Kabupaten Sukabumi Tahun 2017-2023*. Badan Pusat Statistik.
- BSN. (2010). SNI 7645:2010. In *SNI 7645:2010*. Badan Standardisasi Nasional
- BBNTGP. (2022). *Balai Besar Taman Nasional Gunung Gede Pangrango*.
- Breiman, L. (2001). A Hybrid Data Mining Approach for Intrusion Detection on Imbalanced NSL-KDD Dataset. *Statistic Departement, University of California*, 1–33. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2016.070603>
- Chen, Y. (2023). Monitoring Land Use/Land Cover Change (LULCC) Using Remote Sensing. *E3S Web of Conferences*, 424. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342403002>
- Dwi, M., As, A., Ambarwati, A. B., Kamila, T. N., Nabila, S. H., Alviandi, R., Putra, A. A., Ridwan, M., Somantri, L., & Himayah, S. (2025). *Perbandingan Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan dan Penggunaan Lahan Menggunakan Citra Satelit Landsat , Sentinel , dan Pleiades*. 13(1), 60–67.
- Fauzi, R. M., Joko, N. R., & Herawatiningsih, R. (2016). Analisa Perubahan Penutupan Lahan Pada Kawasan Hutan Lindung Gunung Naning Kabupaten Sekadau Provinsi Kalimantan Barat. *Jurnal Hutan Lestari*, 4(4), 520–526. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jmfkh/article/view/17865>
- Fitriawan, D. (2020). Uji Akurasi Klasifikasi Terbimbing Berbasis Piksel Pada Citra Sentinel 2-A Menggunakan Citra Tegak Resolusi Tinggi Tahun 2019 di Kota Padang. *Jurnal Azimut*, 3(01), 21. <https://doi.org/10.31317/jaz.v3i01.633>
- Hassan, F. M., & Abdelwahab Mossa, H. (2021). Image Mosaicking Using Low-Distance High-Resolution Images Captured by an Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Informatics, Information System and Computer Engineering (INJIISCOM)*, 2(2), 44–52. <https://doi.org/10.34010/injiiscom.v2i2.6668>
- Hazazi, G., Sasmito, B., & Firdaus, H. S. (2019). Analisis Perubahan Garis Pantai Terhadap Eksistensi Mangrove Menggunakan Penginderaan Jauh Dan Aplikasi Digital Shoreline Analysis System (Dsas) Tahun 2014-2018 (Studi Kasus : Kabupaten Kendal). *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1), 19–27.
- Jaya, I. N. S. (2015). *Analisis citra digital perspektif penginderaan jauh untuk*

- pengelolaan sumberdaya alam*.
Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (3rd ed., pp. 505–512). Prentice Hall.
- Lasmi, R., Sawitri, S., & Yuwono, B. D. (2015). Kajian Pemanfaatan Data Penginderaan Jauh untuk Identifikasi Objek Pajak Bumi dan Bangunan. *Jurnal Geodesi Undip*, 4(1), 20–31.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Purwanto, E. H., & Lukiawan, R. (2019). Parameter Teknis Dalam Usulan Standar Pengolahan Penginderaan Jauh: Metode Klasifikasi Terbimbing. *Jurnal Standardisasi*, 21(1), 67. <https://doi.org/10.31153/js.v21i1.737>
- Rakuasa, H. (2022). Analisis Spasial - Temporal Perubahan Tutupan Lahan di Kabupaten Maluku Barat Daya. *GEOGRAPHIA : Jurnal Pendidikan Dan Penelitian Geografi*, 3(2), 115–122. <https://doi.org/10.53682/gjppg.v3i2.5262>
- Rawat, J. S., & Kumar, M. (2015). Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.02.002>
- Romadloni, P., Adhi Kusuma, B., & Maulana Baihaqi, W. (2022). Komparasi Metode Pembelajaran Mesin Untuk Implementasi Pengambilan Keputusan Dalam Menentukan Promosi Jabatan Karyawan. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 6(2), 622–628. <https://doi.org/10.36040/jati.v6i2.5238>
- Rosyani, P., Saprudin, S., & Amalia, R. (2021). Klasifikasi Citra Menggunakan Metode Random Forest dan Sequential Minimal Optimization (SMO). *Jurnal Sistem Dan Teknologi Informasi (Justin)*, 9(2), 132. <https://doi.org/10.26418/justin.v9i2.44120>
- Saleem, A., Awange, J. L., & Corner, R. (2021). Exploiting a texture framework and high spatial resolution properties of panchromatic images to generate enhanced multi-layer products: Examples of Pleiades and historical CORONA space photographs. *International Journal of Remote Sensing*, 42(3), 929–963. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1820617>
- Sampurno, R., & Thoriq, A. (2016). Klasifikasi Tutupan Lahan Menggunakan Citra Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) Di Kabupaten Sumedang. *Jurnal Teknotan*, 10(2), 61–70. <https://doi.org/10.24198/jt.vol10n2.9>
- Silva, S.H.M.E.B., Nogueira, A.P.S. Matos, L.L Parente, L. Teixeira, L. S. Almeida.

- (2020). No Title. *A Definition of Visual Interpretation Criterias to Mapping Land-Use and Land Cover in The Brazilian Biomes*, 17, 9–12.
- Suni, M. A., Kurniawan Borman, A., Fahrul Himalaya Umar, M., & Dwi Kurniawan, A. (2023). Pemetaan Penggunaan Lahan Di Kota Palu Menggunakan Citra Sentinel 2-a. *Jurnal Pengabdian Kolaborasi Dan Inovasi IPTEKS*, 1(4), 384–391.
- Teluguntla, P., Thenkabail, P., Oliphant, A., Xiong, J., Gumma, M. K., Congalton, R. G., Yadav, K., & Huete, A. (2018). A 30-m landsat-derived cropland extent product of Australia and China using random forest machine learning algorithm on Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144(August), 325–340.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.017>
- Toure, S. I., Stow, D. A., Shih, H. chien, Weeks, J., & Lopez-Carr, D. (2018). Land cover and land use change analysis using multi-spatial resolution data and object-based image analysis. *Remote Sensing of Environment*, 210(January 2017), 259–268.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.023>
- Tuakora, M. A., Mardiatmoko, G., & Lelloltery, H. (2022). Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Perubahan Penutupan Lahan Di Dalam Kawasan Hutan Lindung Gunung Sirimau. *Makila*, 16(1), 60–68.
<https://doi.org/10.30598/makila.v16i1.5234>
- Wang, Y., He, M.-Y., Xiang, J., & Zhou, Z.-M. (2017). *Review of Land Cover Classification Based on Remote Sensing Data*. 44(Wcsn 2016), 751–756. <https://doi.org/10.2991/icwscn-16.2017.152>
- Zulfajri, Danoedoro, P., & Heru Murti, S. (2021). Klasifikasi Penutup/Penggunaan Lahan Data Landsat-8 OLI Menggunakan Metode Random Forest. *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 03(01), 1–7.
<http://jurnal.mapin.or.id/index.php/pji/issue/archive>
- Zulfikar, A. M., & Nasdian, F. T. (2018). Analisis Konflik Pengelolaan Sumberdaya Alam Di. *Jurnal Sains Komunikasi Dan Pengembangan Masyarakat Sains Komunikasi Dan Pengembangan Masyarakat*, 2(5), 639–652.

ANALISIS BASEFLOW DAS SETAIL MENGGUNAKAN METODE GRAFIS

(Baseflow Analysis of Setail Watershed Using Graphical Method)

Mohamad Wawan Sujarwo¹, Gigik Nurbaskoro², Indarto Indarto^{1*}, Audia Chairani¹, Diana Nurhayati³

¹ Prodi Teknik Pertanian, Universitas Jember, Jl. Kalimantan Tegalboto No.37, 68121, Indonesia

² BMKG Meteorologi Klas III Banyuwangi, Jl. Jaksa Agung Suprpto No.152, Kabupaten Banyuwangi, Indonesia

³ Prodi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Jember, Jl. Kalimantan Tegalboto No.37, 68121, Indonesia

* indarto.ftp@unej.ac.id

Diterima: 18 Juni 2025, Direvisi 13 Oktober 2025: , Disetujui : 24 Oktober 2025

ABSTRACT

Baseflow separation methods are widely applied in hydrological studies; however, they are rarely implemented in small- to medium-scale catchments in tropical monsoonal climates. Understanding baseflow dynamics in this area is essential for sustainable watershed management, especially under increasing hydrometeorological stress. This study evaluates the performance of three graphical HYSEP algorithms (Fixed Interval, Sliding Interval, and Local Minimum) applied to the Setail Watershed in Banyuwangi Regency, Indonesia. This area experiences recurrent downstream flooding and seasonal drought. Daily streamflow data from Automatic Water Level Recorders (AWLR) in Jambewangi (upstream) and Kradenan (downstream) were used as input. Calibration was performed using a trial-and-error approach in the BFI+ software to obtain the optimal parameters that best fit the observed and estimated baseflow. Model performance was assessed using coefficient of determination (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), and Flow Duration Curve (FDC) analysis. The Local Minimum algorithm demonstrated the highest R^2 value (up to 0.98) and the lowest RMSE (0.38) during both the calibration and validation periods, performing best overall. A high Baseflow Index (BFI) indicates that baseflow significantly contributes to total streamflow. This reflects the permeable characteristics of the watershed and its capacity to maintain discharge during the dry seasons. These findings confirm the applicability of the HYSEP method for tropical watersheds and emphasize the importance of local-scale calibration to improve model reliability and support adaptive water resource management under monsoonal climate variability.

Keywords: *Baseflow; Graphical; HYSEP; Watershed; Setail*

ABSTRAK

Berbagai metode pemisahan aliran dasar telah banyak diterapkan secara luas dalam studi hidrologi; namun penerapannya pada DAS skala kecil hingga menengah di iklim tropis masih terbatas. Pemahaman mengenai dinamika aliran dasar di areal ini sangat penting pada pengelolaan daerah aliran sungai yang berkelanjutan, terutama menghadapi tekanan hidrometeorologi yang semakin meningkat. Penelitian ini mengkaji kinerja tiga algoritma HYSEP (*Fixed Interval*, *Sliding Interval*, dan *Local Minimum*) pada DAS Setail Kabupaten Banyuwangi. DAS Setail mengalami tekanan hidrologis akibat banjir di hilir dan kekeringan musiman di wilayah tropis dengan iklim monsunal. Data debit harian dari AWLR Jambewangi (hulu) dan Kradenan (hilir) digunakan sebagai *input* utama. Kalibrasi dilakukan melalui pendekatan *trial-and-error* menggunakan perangkat lunak BFI+ untuk memperoleh parameter optimal yang menghasilkan kesesuaian antara *baseflow* terukur dan terhitung. Evaluasi kinerja dilakukan menggunakan koefisien determinasi (R^2), *Root Mean Square Error* (RMSE), serta analisis *Flow Duration Curve* (FDC). Hasil menunjukkan bahwa algoritma *Local Minimum* memberikan kinerja terbaik dengan nilai R^2 tertinggi (hingga 0,98) dan RMSE terendah (0,38) pada periode kalibrasi maupun validasi. Nilai *Baseflow Index* (BFI) yang tinggi menunjukkan dominasi aliran dasar terhadap total debit sungai dan mencerminkan karakteristik DAS yang permeabel dan mampu mempertahankan aliran pada musim kering. Temuan ini menegaskan relevansi metode HYSEP pada DAS tropis serta pentingnya kalibrasi skala lokal untuk mendukung pengelolaan sumber daya air secara adaptif terhadap variabilitas iklim.

Kata kunci: Aliran dasar; Grafis; HYSEP; DAS; Setail

I. PENDAHULUAN

Aliran dasar (*baseflow*) adalah komponen penting dalam siklus hidrologi yang berfungsi untuk menjaga kelangsungan aliran sungai di daerah aliran sungai (DAS) terutama di musim kemarau (Chen, Li, et al., 2024; Yang et al., 2020). Aliran dasar terbentuk dari proses infiltrasi air hujan yang tersimpan di dalam tanah dan kemudian mengalir perlahan menuju sungai (Helfer et al., 2025; Lei et al., 2021). Berbeda dengan limpasan permukaan langsung (*direct runoff*) yang berasal dari aliran air hujan di permukaan tanah dan mengalir langsung menuju sungai (*quick flow*) (Guo et al., 2019). Kontribusi keduanya (*baseflow* dan *quick flow*) akan

membentuk total aliran (debit sungai) yang menunjukkan interaksi kompleks yang secara kuantitatif sulit untuk dipisahkan pada pengukuran debit di lapangan (Cao et al., 2024; Mao et al., 2024). Oleh karena itu, metode pemisahan aliran dasar sangat dibutuhkan guna mengetahui besaran kontribusi aliran dasar terutama saat musim hujan sebagai salah satu indikator yang menunjukkan kondisi kesehatan suatu DAS.

Umumnya terdapat dua macam metode pemisahan aliran dasar yaitu metode grafis dan digital filter. Metode grafis seperti UKIH (Institute of Hydrology, 1980) dan HYSEP (local, Fixed, sliding) (Sloto & Crouse, 1996) menggunakan prinsip

identifikasi titik minimum pada hidrograf untuk menghasilkan interpolasi linier pada kurva aliran dasar. Metode Digital filter seperti Lyne-Hollick (Lyne & Hollick, 1979; Nathan & McMahon, 1990), Chapman (Chapman, 1999), Chapman and Maxwell (Chapman & Maxwell, 1996), Boughton-Chapman (Chapman, 1999), dan Eckhardt filtering (Eckhardt, 2005) menggunakan prinsip menyaring sinyal debit sungai berdasarkan frekuensinya. Keandalan metode yang digunakan bergantung pada morfologi DAS yang dimodelkan dan ketersediaan data. Studi menunjukkan bahwa kedua teknik ini dapat memodelkan aliran dasar dengan baik. Mao *et al.*, (2024) mengatakan bahwa metode grafis UKIH dan HYSEP memiliki kinerja terbaik dibandingkan metode digital filter di beberapa DAS yang diteliti. Sebaliknya Duncan, (2019) dan Xie *et al.*, (2020) mengatakan bahwa metode digital filter Lyne-Hollick dan Eckhardt memiliki kinerja terbaik dibandingkan metode grafis.

Penelitian ini menggunakan metode grafis HYSEP untuk melakukan pemisahan aliran dasar. Metode ini memiliki keunggulan seperti mudah penerapan dan cukup dapat diandalkan untuk memodelkan aliran dasar. Beberapa penelitian yang menggunakan metode ini seperti Xie *et al.*, (2020) di DAS Tizinafu China; Poernomo *et al.*, (2020) mengkombinasikan metode UKIH dan HYSEP; (Chen & Teegavarapu, 2020) membandingkan berbagai metode grafis di DAS Atlantik Teluk Selatan benua Amerika Serikat; (Kang & Lee, 2021) di DAS Nakdong Korea Selatan; dan (Indarto & Herlinda, 2020) di DAS Brantas Indonesia dengan

kinerja paling baik dengan algoritma *local minimum*.

Metode pemisahan aliran dasar secara grafis digital dikembangkan oleh Pettyjohn & Henning (1979) dan dimasukkan ke dalam program *HYSEP (Hydrologi Separation)* oleh (Sloto & Crouse, 1996), dengan tiga algoritma pemisahan aliran dasar yaitu: *Fixed Interval*, *Sliding Interval*, dan *Local Minimum* (Chen *et al.*, 2024). Ketiga algoritma ini menggunakan hidrograf aliran untuk menemukan titik aliran rendah sebagai acuan garis aliran dasar, perbedaannya terletak pada formulasi dalam memilih titik aliran rendah. Algoritma *Fixed Interval* (FI) bekerja dengan menentukan debit terendah pada setiap interval (N) di semua hari di setiap interval waktu dengan rumus $[(2N \times \text{Hari}); N = A^{0,2} \text{an mil}^2]$ (Sloto & Crouse, 1996). Cara kerja algoritma ini dengan memberikan tarikan vertikal ke atas sampai bersinggungan dengan debit terendah di setiap interval pada diagram batang (Narimani *et al.*, 2023). Algoritma *Sliding Interval* (SI) bekerja dengan menentukan debit terendah dalam setengah interval dengan pengurangan satu hari $[0,5(2N-1) \text{ hari}]$ yang dihitung dengan persamaan $[0,5(2N^*-1) \text{ hari}]$ (Sloto & Crouse, 1996). Algoritma *Local Minimum* (LM) bekerja dengan mengamati debit per hari untuk menentukan debit tersebut debit terendah dalam interval waktu (Narimani *et al.*, 2023) dengan persamaan $[0,5(2N^*-1) \text{ hari}]$ (Sloto & Crouse, 1996).

Proses pemisahan aliran dasar perlu dilakukan kalibrasi dan validasi untuk menentukan nilai parameter dari suatu algoritma yang paling optimal. Optimal ini

diartikan bahwa nilai tersebut dapat digunakan sepanjang waktu dengan tingkat kesalahan prediksi (perhitungan) yang dapat ditoleransi (Indarto, 2016). Parameter yang terdapat pada metode grafis yaitu parameter N dan f. Parameter tersebut sensitif terhadap perubahan debit. Parameter N adalah banyak hari setelah *runoff* terhenti. Parameter f adalah penentuan mulai hari dan berakhirnya aliran dasar yang berkontribusi terhadap debit (Gregor, 2010; Sloto & Crouse, 1996). Nilai *baseflow* dinyatakan dalam *Baseflow Index* (BFI). *Baseflow Index* merupakan perbandingan antara aliran dasar dengan debit terukur yang dapat digunakan sebagai indikator kinerja DAS (Gregor, 2010). Nilai BFI yang tinggi merupakan sinyal debit sungai terdistribusi dari cadangan air bawah tanah, sehingga metode ini mudah digunakan untuk menganalisis kondisi ketersediaan air di DAS.

Setail merupakan salah satu DAS penting di yang memiliki peran utama dalam sistem hidrologi dan pengelolaan sumber daya air di Kabupaten Banyuwangi. DAS Setail berfungsi sebagai sumber air bersih dan kegiatan domestik di sekitar aliran sungai, serta pemenuhan kebutuhan air irigasi. Di sisi lain, DAS Setail memiliki potensi bencana banjir (Arifki & Erwanto, 2023) dan kekeringan di beberapa wilayah seperti Kecamatan Cluring, Bangorejo, Purwoharjo, dan Tegaldlimo (Kominfo Jatim, 2024; Nuryadi & Agustiarini, 2018; Sari, 2023) yang sebagian wilayahnya masuk di DAS Setail. Bencana kekeringan membuat warga kesulitan untuk mendapat akses air bersih dan pemenuhan air irigasi terutama musim kemarau. Adanya analisis

aliran dasar dapat digunakan untuk evaluasi suplai air sungai pada periode kemarau dan acuan dalam perencanaan sumberdaya air mendatang.

Berbagai metode pemisahan aliran dasar telah banyak diaplikasikan di berbagai DAS di dunia. Mayoritas studi dilakukan di wilayah beriklim subtropis, sementara karakteristik DAS tropis dengan pola hujan monsun seperti di Indonesia masih terbatas pada DAS skala kecil hingga menengah. Secara prinsip, metode HYSEP mudah diterapkan di berbagai kondisi DAS, namun keandalannya sangat bergantung pada karakteristik fisik dan hidrologis serta teknik kalibrasi dan validasi masing-masing DAS. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh dari DAS Setail sebagai representasi DAS tropis beriklim monsun tidak dapat secara langsung digeneralisasikan untuk DAS lain dengan kondisi iklim yang serupa. Dengan demikian, setiap penerapan metode ini memerlukan proses kalibrasi ulang guna menyesuaikan parameter algoritma dengan karakteristik hidrologis DAS setempat.

Penelitian ini mengkaji terkait: (1) kalibrasi dan validasi tiga algoritma pemisahan aliran dasar, (2) analisis BFI, dan (3) menentukan kinerja terbaik dari tiga algoritma metode grafis tersebut menggunakan data debit Jambewangi (bagian hulu) dan Kradenan (bagian hilir) DAS Setail.

II. BAHAN DAN METODE

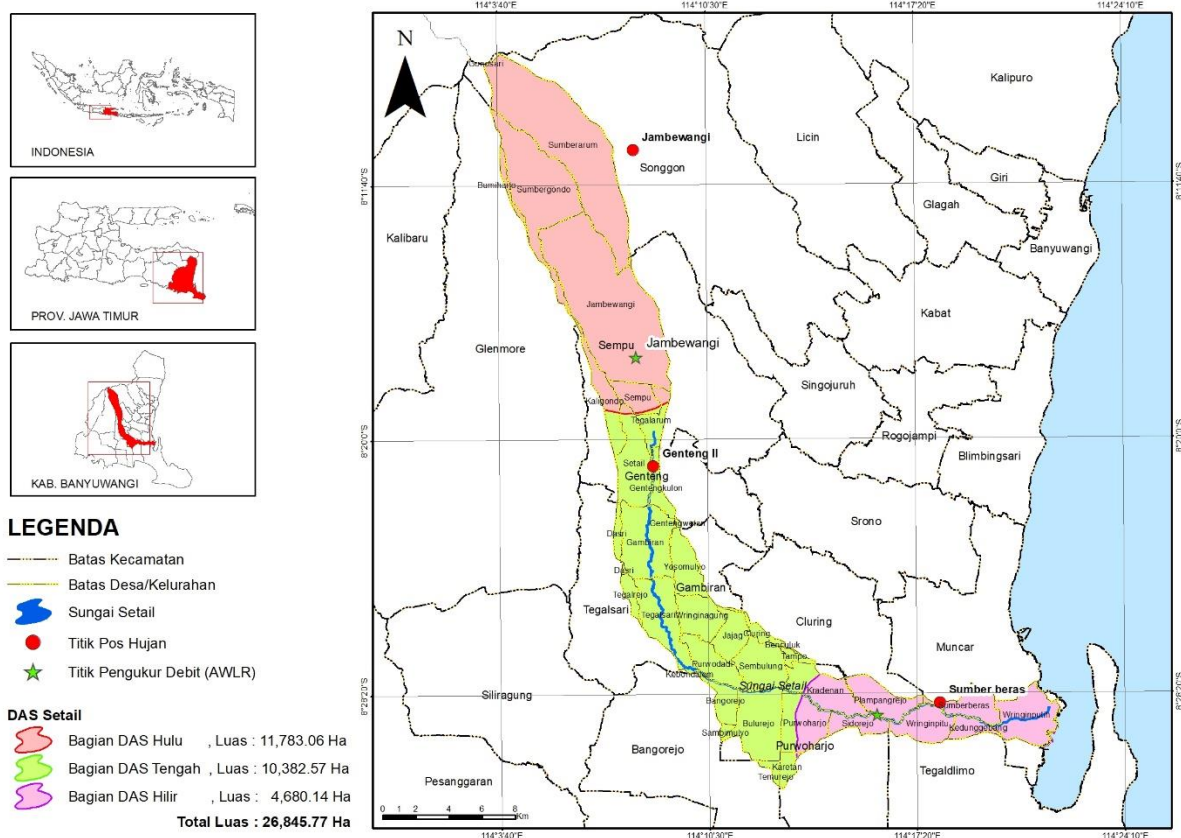
A. Waktu dan Lokasi

Lokasi pengamatan dilakukan di DAS Setail Kabupaten Banyuwangi. DAS Setail memiliki luas sebesar 284,89 km², mencakup 10 kecamatan meliputi:

Songgon, Glenmore, Sempu, Genteng, Gambiran, Cluring, Bangorejo, Purwoharjo, Muncar, dan Tegaldimo (Gambar 1). Hulu DAS Setail berada di Kecamatan Songgon, dengan tutupan lahan hulu DAS Setail didominasi oleh vegetasi dan sedikit ladang. Hilir DAS Setail berada di Kecamatan Muncar, dengan tutupan lahan hilir DAS Setail didominasi oleh sawah dan terbangun (Mandala *et al.*, 2024).

B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan yaitu data debit harian pada 2 pos AWLR (*Automatic Water Level Recorder*) yang berada di Jambewangi (hulu) dan Kradenan (hilir) (Tabel 1). Data pendukung dalam penelitian ini yaitu data hujan (Tabel 2), data fisik DAS (lokasi stasiun hujan dan AWLR, batas DAS, dan jaringan sungai).



Gambar (Figure) 1. Lokasi penelitian (Study site)
Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

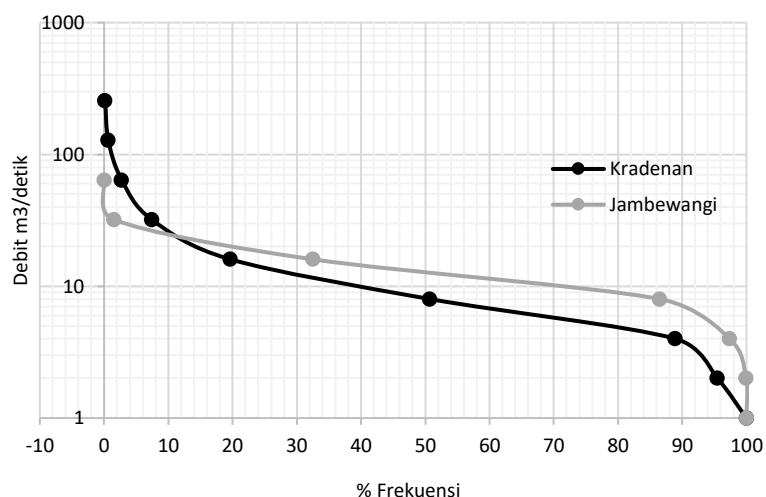
Tabel (Table) 1. Data debit (Streamflow data)

	Kradenan	Jambewangi
Mulai (Start)	2005	1996
Akhir (end)	2023	2023
Panjang Data (tahun) [Data Length (years)]	18	27
Data Hilang (Data Lost)	01/01/2011 - 31/12/2011 01/12/2012 - 31/12/2012 01/01/2017 - 31/05/2017 01/01/2020 - 31/12/2020	01/01/2010 - 31/12/2011 01/11/2012 - 31/12/2012 01/01/2020 - 31/12/2020

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Pada pengolahan data hidrologi DAS Setail, data debit dan hujan yang hilang diestimasi menggunakan perangkat lunak River Analysis Package (RAP). Proses dimulai dengan identifikasi nilai yang tidak tercatat melalui input data hidrologi, lalu sistem menunjukkan periode dengan data kosong. Selanjutnya pola kehilangan data dianalisis (acak atau terstruktur) menggunakan fitur grafik dan statistik dalam RAP. Estimasi nilai hilang dilakukan

dengan metode interpolasi linier, yaitu pengisian berdasarkan tren antara data sebelum dan sesudahnya. Dataset hasil estimasi kemudian disimpan sebagai basis data lengkap untuk analisis hidrologi lanjutan. Metode interpolasi linier sering digunakan dalam hidrologi untuk gap filling karena sederhana dan kinerja yang cukup baik, terutama untuk celah data pendek (Niedzielski & Halicki, 2023).



Gambar (Figure) 2. FDC debit di 2 AWLR (FDC streamflow at 2 AWLR)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Tabel (Table) 2. Data hujan harian (Daily rainfall data)

Pos Hujan (Rainfall Station)	Mulai (Start)	Akhir (End)	Panjang Data (tahun) [Data Length (years)]	Data Hilang (Data Lost)
Sumber Beras	1993	2023	30	1993, 1994, 1995, 1998, 2011
Kaliploso Plosorejo	1993	2023	30	1993, 1994, 1995, 1998, 2001, 2003, 2011
Purwoharjo	1993	2023	30	1993, 1994, 1998
Cluring	1993	2023	30	1993, 1994, 1995, 1998, 2011, 2012
Kp Genteng	1993	2023	30	1993-2012
Genteng I	1993	2023	30	1993, 1994, 1995, 2005, 2011
Genteng II	1993	2023	30	1993, 1994, 1995, 2003, 2004, 2005
Jambewangi	1993	2023	30	1993-1994

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Karakteristik hidrologi suatu DAS dapat dianalisa berdasarkan pola dan bentuk dari FDC (*Flow Duration Curve*). Diketahui bahwa 90% kejadian debit DAS Setail nilainya ≥ 1 m³/detik (Gambar 2). Menandakan 90% debit tersedia minimal adalah 1 m³/detik di sungai Setail. Debit Jambewangi (hulu) menunjukkan FDC yang lebih landai menandakan ketersediaan debit air yang memadai dan kontribusi air tanah cukup baik. Sebaliknya, debit Kradenan (hilir) merupakan akumulasi aliran di hulu yang berdampak pada debit puncak lebih tinggi (banjir) saat terjadi hujan dan debit *baseflow* lebih rendah yang menandakan kontribusi air tanah berkurang.

Peralatan penelitian ini mencakup: (1) Seperangkat PC (*Personal Computer*) digunakan untuk mengolah data, (2) *Microsoft Excel* digunakan untuk mengolah data serta menampilkan grafik, (3) *Software BFI+* digunakan untuk mengolah data debit menghasilkan nilai *baseflow* dan *baseflow index* (BFI) dari metode grafis, (4) *Software RAP* digunakan untuk menghitung data yang hilang.

C. Prosedur Penelitian

1. Menentukan musim kemarau

Penentuan musim kemarau dilakukan dengan menghitung rata-rata bulanan curah hujan setiap tahun mulai tahun 1993 hingga tahun 2023 kemudian dibuat plot dalam diagram batang (Gambar 3). Musim kemarau ditandai dengan penurunan curah hujan kurang dari 50 mm dalam tiga dasarian secara berturut-turut (Qothrunada & Risnayah, 2020), sehingga

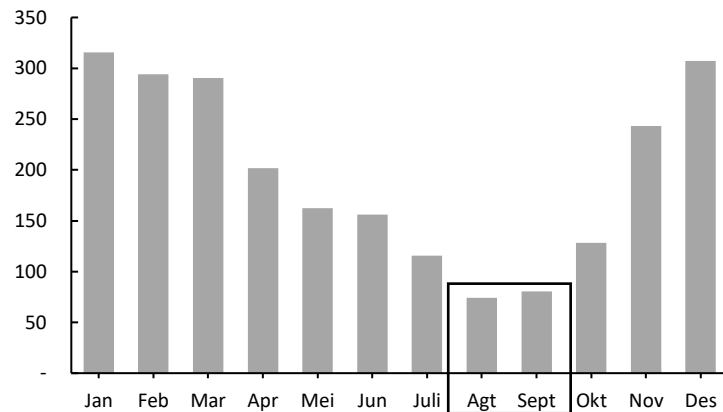
ditentukan periode kalibrasi DAS Setail pada bulan Agustus dan September dimasa bulan paling kering, dengan asumsi sedikit turun hujan dan air sungai berasal dari *baseflow*. Metode bisa dianggap efektif dalam memisahkan aliran dasar jika menghasilkan *baseflow* yang hampir setara dengan debit yang diukur pada periode paling kering (Oktavia *et al.*, 2021).

2. Pembagian periode kalibrasi dan validasi

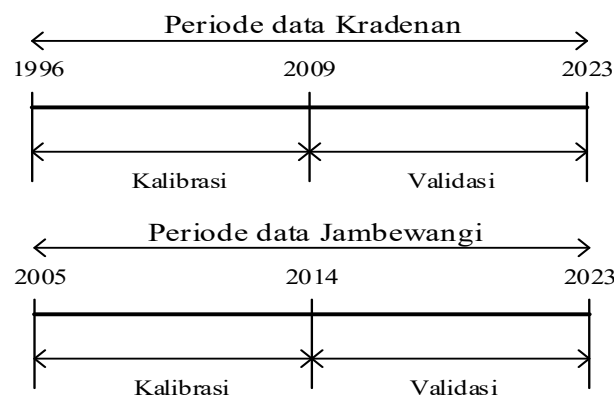
Data debit dipisahkan berdasarkan tahun seperti pada Gambar 4. Penentuan periode kalibrasi dan validasi yaitu dengan membagi dua panjang data yang dimiliki. Pada AWLR Kradenan memiliki panjang data selama 27 tahun, kemudian pada 13 tahun pertama masuk pada periode kalibrasi dan untuk 14 tahun setelahnya masuk pada periode validasi. Sama seperti pada AWLR Kradenan, pada AWLR Jambewangi panjang data juga dibagi menjadi 2 periode (Gambar 4).

3. Kalibrasi

- a. Menentukan parameter optimal
Nilai parameter optimal ditentukan berdasarkan teknik *trial and error* hingga grafik debit terukur dan debit terhitung berhimpitan menggunakan *tool parameter calibration* yang ada pada *software BFI+* (Gregor, 2010). Nilai parameter optimal yang diperoleh dari kalibrasi digunakan untuk proses pemisahan aliran dasar di periode validasi.



Gambar (Figure) 3. Hujan bulanan stasiun Jambewangi (Monthly rainfall at Jambewangi station)
 Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)



Gambar (Figure) 4. Periode kalibrasi dan validasi (Calibration and validation period)
 Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

b. Menghitung nilai BFI+ dari data kalibrasi

Parameter optimal yang telah diperoleh digunakan untuk menjalankan metode perhitungan nilai BFI periode kalibrasi. Nilai BFI dihitung dengan memasukkan debit pada *software* BFI+ dan mengatur filter perhitungan dengan 3 algoritma metode grafis yaitu *Local Minimum* (LM), *Fixed Interval* (FI), dan *Sliding Interval* (SI) (Gregor, 2010; Sloto & Crouse, 1996). Berikut merupakan persamaan

untuk menghitung interval hari setiap algoritma.

$$\text{Algoritma FI} = (2N * \text{Hari}) \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Algoritma SI} = 0,5(2N * -1) \text{ hari} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Algoritma LM} = 0,5(2N * -1) \text{ hari} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan (Remarks) :

$$N = A^{0,2}$$

A = luas DAS dengan satuan mil²
 (Gregor, 2010)

4. Validasi

Validasi adalah menguji performa 3 algoritma setelah dilakukan proses kalibrasi guna mengetahui apakah algoritma model akan bekerja dengan baik

pada data baru (Mai, 2023). Langkah ini menjadi kunci untuk memastikan keandalan dan generalisasi metode sebelum diterapkan ke berbagai data di DAS Setail.

5. Uji Kinerja

Performa ketiga algoritma model diuji menggunakan *Root Mean Square Error* Dan *R square* berikut:

a. *Root Mean Square Error* (RMSE)

RMSE berfungsi mengetahui besaran nilai *error* setiap algoritma metode grafis (Indarto, 2010). Semakin kecil RMSE (mendekati 0) maka prediksinya lebih akurat (Hodson, 2022) dan algoritma tersebut semakin baik untuk digunakan. RMSE merupakan rasio antara debit terukur dengan debit terhitung. Berikut ini adalah persamaan RMSE:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum(Q_0 - Q_m)^2}}{n} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan (*Remarks*) :

Q_m = baseflow terhitung

Q_0 = baseflow terukur

n = jumlah sampel (Indarto & Herlinda, 2020)

Nilai *Normalized Root Mean Square Error* (NRMSE) diperoleh dengan mengekspresikan RMSE sebagai persentase terhadap rentang data debit hasil pengamatan. Kinerja model kemudian dievaluasi menggunakan kriteria tertentu berdasarkan nilai NRMSE (Tabel 3).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Q_0 \max - Q_0 \min} \dots\dots\dots(5)$$

Q_{max} = baseflow maksimum terukur

Q_{min} = baseflow minimum terukur

Tabel 3. Kriteria keandalan model berdasarkan nilai NRMSE (*Model reliability criteria based on NRMSE values*)

Nilai NRMSE (<i>NRMSE Value</i>)	performa model (<i>Model performance</i>)
< 10 %	Sangat Baik (<i>Excellent</i>)
10-20 %	Baik (<i>Good</i>)
> 20%	Buruk (<i>Poor</i>)

Sumber (*Source*): (Chowdhury et al., 2025)

b. *R square* (R^2)

R square menunjukkan tingkat hubungan kesesuaian antara nilai terukur dan hasil perhitungan (Indarto, 2010). Selain RMSE, analisa ini berguna untuk menilai kesesuaian algoritma pada saat proses kalibrasi maupun validasi terhadap suatu data setelah melalui proses perhitungan (Reis et al., 2022). Kinerja metode dikatakan meningkat jika nilai *R square* mendekati 1 (Tabel 4). Rincian persamaan *R square* dijelaskan berikut:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y - \hat{Y})}{\sum(Y - \bar{Y})} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

R^2 = tingkat kesesuaian debit terukur dan debit terhitung

Y = observasi respon ke-i

\bar{Y} = rata-rata

\hat{Y} = ramalan respon ke I (Indarto & Herlinda, 2020)

Tabel 4. Karakterisasi intensitas korelasi berdasarkan nilai R^2 (*Characterization of correlation intensity based on R^2 value*)

Nilai R^2 (R^2 Value)	Intensitas Korelasi (Correlation Intensity)
0,00	Tidak ada korelasi
0,00 – 0,09	Lemah
0,09 – 0,36	Sedang
0,36 – 0,81	Kuat
0,81 – 0,98	Sangat kuat
1,00	Sempurna

Sumber (Source): (de Matos *et al.*, 2016)

6. Visualisasi *Flow Duration Curve* (FDC)

Dalam menentukan FDC hal yang pertama dilakukan yaitu menghitung frekuensi kejadian debit. Dari frekuensi debit kemudian dihitung hari kejadian dengan menghitung selisih dari banyak data debit dan frekuensi debit. Kemudian dihitung persentase kejadian debit dengan perbandingan antara hari kejadian debit dengan banyaknya data debit dan dikali seratus. Karakteristik Aliran DAS akan tergambar dari pola FDC. Kemiringan FDC yang cukup curam mengindikasikan terdapat lebih banyak aliran dengan debit besar (banjir), sehingga berpengaruh terhadap rerata serta tingginya nilai *skewness* (Indarto, 2016).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Parameter optimal

Nilai parameter optimal dari tiga algoritma metode grafis ditunjukkan pada Tabel 5. Pada proses trial and error, metode grafis digunakan untuk memvisualisasikan hubungan antar titik minimum pada hidrograf aliran sungai guna memisahkan komponen aliran dasar. Pada DAS Setail yang memiliki debit rerata

relatif rendah, penggunaan parameter dengan nilai yang tidak terlalu tinggi terbukti mampu menghasilkan parameter optimal dalam pemodelan besarnya aliran dasar (*baseflow*). Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa metode HYSEP memberikan kinerja yang baik pada berbagai kondisi pengamatan, termasuk pada DAS berskala kecil dengan pola aliran yang relatif sederhana (Cheng *et al.*, 2022; Mao *et al.*, 2024). Lebih lanjut, hasil analisis sensitivitas pada model lain dengan parameter serupa juga mengindikasikan bahwa pada DAS dengan karakteristik aliran sederhana (misalnya *low-flow dominated* atau berukuran kecil), penggunaan parameter moderat umumnya sudah menghasilkan estimasi baseflow yang memadai tanpa memerlukan kalibrasi yang intensif (Abbas *et al.*, 2024; Mei *et al.*, 2024).

B. R square (R^2)

R square digunakan untuk menunjukkan kecocokan antara debit terhitung dan debit terukur, ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel (Table) 5. Nilai parameter optimal (Optimal parameter values)

Algortima (Algorithm)	LM		FI	SI
Parameter	N	f	N	N
KD	2	0,9	3	3
JW	5	0,9	5	4

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Keterangan (Remarks): LM= Local Minimum, FI= Fixed Interval, SI= Sliding Interval, JW= Jambewangi, KD=Kradenan

Tabel (Table) 6. Nilai R² periode kalibrasi dan validasi (R² value of the calibration and validation period)

Algortima (Algorithm)	R Square (Periode Kalibrasi) [R Square (Calibration Period)]		R Square (Periode Validasi) [R Square (Validation Period)]	
	JW	KD	JW	KD
LM	0,85	0,98	0,93	0,79
FI	0,73	0,94	0,85	0,68
SI	0,64	0,86	0,80	0,66

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Keterangan (Remarks): LM= Local Minimum, FI= Fixed Interval, SI= Sliding Interval, JW= Jambewangi, KD=Kradenan

Algortima LM menghasilkan nilai R² yang menunjukkan korelasi yang sangat kuat hingga kuat sesuai nilai karakterisasi intensitas korelasi (Tabel 4), hal ini menunjukkan jika algortima LM dapat memodelkan debit *baseflow* terhitung dengan mengikuti pola nilai debit *baseflow* aktual. Pada periode kalibrasi, nilai R² di Jambewangi sebesar 0,85 dan Kradenan sebesar 0,98. Pada periode validasi yaitu 0,93 (mendekati 1) pada Jambewangi dan Kradenan sebesar 0,79. Debit terhitung DAS Setail dapat merepresentasikan debit aktual di lapangan, serta membuktikan jika algortima tersebut dapat bekerja dengan baik dalam memperkirakan besarnya *baseflow*.

C. Nilai Root Mean Square (RMSE)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa algoritma Local Minimum (LM) memberikan nilai RMSE yang relatif kecil (mendekati nol) dibandingkan dengan algoritma Fixed Interval (FI) dan Sliding Interval (SI). Pada periode kalibrasi, nilai RMSE algoritma LM di Stasiun

Jamberwangi tercatat sebesar 1,48 dan di Kradenan sebesar 0,38, sedangkan pada periode validasi diperoleh masing-masing sebesar 0,55 dan 0,57.

Selain itu, jika dilihat dari kriteria NRMSE, algoritma LM juga menunjukkan performa terbaik dengan nilai 10% (Jamberwangi) dan 2% (Kradenan) pada periode kalibrasi, serta 7% (Jamberwangi) dan 4% (Kradenan) pada periode validasi. Nilai yang relatif kecil ini mengindikasikan bahwa algoritma LM mampu menghasilkan estimasi *baseflow* dengan kesalahan yang lebih rendah dibandingkan algoritma FI dan SI. Hal ini juga diperkuat oleh hasil grafik yang menunjukkan kesesuaian antara debit aktual dan debit terhitung pada musim kemarau, sehingga memperlihatkan kinerja model yang baik. Suatu model dapat dikatakan memiliki kinerja baik ketika nilai RMSE rendah, karena semakin kecil RMSE maka semakin kecil pula tingkat kesalahannya (Hodson, 2022). Hasil pengujian nilai RMSE dan NRMSE ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel (Table) 7. Nilai RMSE periode kalibrasi dan validasi (RMSE value of calibration and validation periods)

Algoritma (Algorithm)	RMSE (Periode Kalibrasi) [RMSE (Calibration Period)]		NRMSE (Periode Kalibrasi) [NRMSE (Calibration Period)]		RMSE (Periode Validasi) [RMSE (Validation Period)]		NRMSE (Periode Kalibrasi) [NRMSE (Calibration Period)]	
	JW	KD	JW	KD	JW	KD	JW	KD
	LM	1,48	0,38	10%	2%	0,55	0,57	7%
FI	1,98	0,68	13%	3%	0,88	0,71	12%	5%
SI	2,59	1,05	17%	5%	1,11	0,73	15%	5%

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Keterangan (Remarks): LM= Local Minimum, FI= Fixed Interval, SI= Sliding Interval, JW= Jambewangi, KD=Kradenan

Nilai rerata *baseflow* hasil pemodelan dengan algoritma LM hampir menyerupai dengan debit terukur pada 2 bulan puncak musim kemarau (Tabel 8). Sehingga algoritma LM dapat dinyatakan sangat baik memodelkan *baseflow* di DAS Setail berdasarkan uji NRMSE dan kriteria keandalan model.

Metode HYSEP dengan algoritma LM masih banyak digunakan dalam kajian hidrologi modern karena sederhana serta mudah dalam mengidentifikasi titik minimum lokal pada hidrograf terutama DAS dengan luasan kecil sampai menengah. Penelitian terbaru di wilayah subtropis juga menunjukkan bahwa metode HYSEP dengan algoritma LM memberikan estimasi *baseflow* yang

cenderung konservatif, namun tetap menghasilkan performa yang konsisten dibandingkan algoritma grafis lainnya (Wang *et al.*, 2021). Selain itu, penelitian di mikro DAS ekosistem Andean menunjukkan bahwa pendekatan titik minimum lokal cukup relevan digunakan pada DAS skala kecil dengan karakteristik aliran sederhana, terutama ketika dianalisis bersamaan dengan faktor biofisik yang memengaruhi dinamika aliran dasar (Cuadros *et al.*, 2025).

D. Flow Duration Curve (FDC)

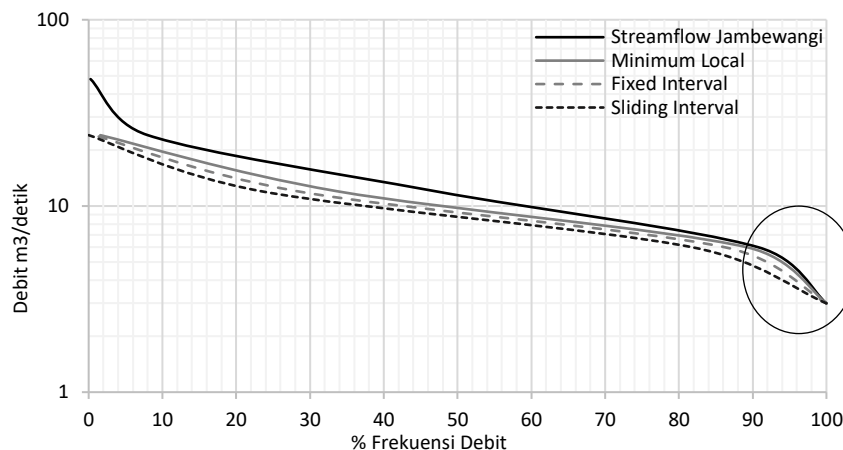
Hasil dari analisis FDC *Baseflow* DAS Setail disajikan dalam grafik pada Gambar 5 dan 6.

Tabel (Table) 8. Perbandingan nilai rerata *baseflow* sebelum dan setelah kalibrasi (Comparison of *baseflow* average before and after calibration)

Bulan (Month)	Debit (Stream Flow)	Jambewangi						Kradenan						
		BF awal (Initial BF)			BF kalibrasi (Calibration BF)			BF awal (Initial BF)			BF kalibrasi (Calibration BF)			
		LM	FI	SI	LM	FI	SI	LM	FI	SI	LM	FI	SI	
Agustus	2,35	2,18	2,24	2,30	2,13	2,11	2,12	2,01	1,51	1,57	1,58	1,62	1,30	1,05
September	2,25	2,04	2,12	2,16	2,02	2,05	1,56	1,25	1,04	1,07	1,12	1,04	1,01	0,96

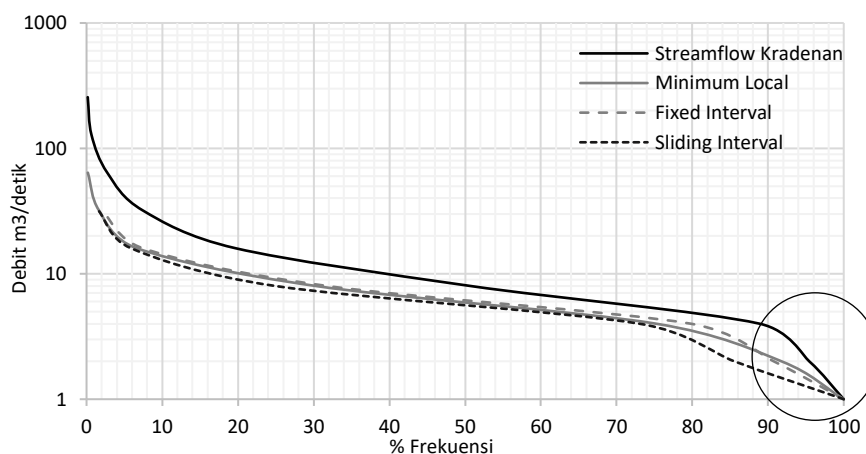
Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Keterangan (Remarks): LM= Local Minimum, FI= Fixed Interval, SI= Sliding Interval, BF = Baseflow



Gambar (Figure) 5. FDC Baseflow Jambewangi (FDC Baseflow at Jambewangi)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)



Gambar (Figure) 6. FDC Baseflow Kradenan (FDC Baseflow at Kradenan)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Metode pemisahan aliran dasar yang dapat diandalkan akan menghasilkan bentuk grafik yang berhimpitan antara debit aktual dan debit terhitung pada bagian kanan-bawah (Indarto & Herlinda, 2020). Algoritma LM menunjukkan performa yang baik di Pos AWLR Jambewangi maupun Kradenan. Di antara tiga algoritma, LM memiliki selisih *baseflow* lebih sedikit dengan grafik berhimpitan dengan *streamflow* Jambewangi maupun Kradenan.

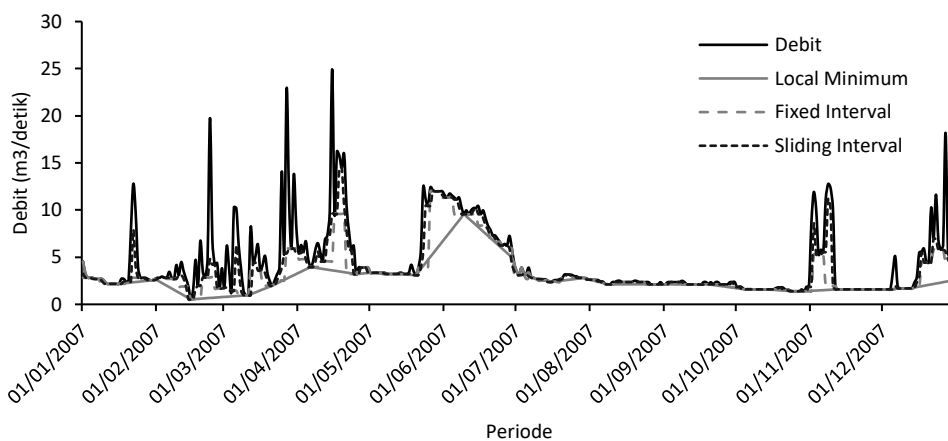
E. Visualisasi Hidrograf

Hasil pemisahan aliran dasar awal sebelum kalibrasi (Gambar 7 dan 9) menunjukkan ketiga algoritma cenderung menunjukkan fluktuasi *baseflow* yang tidak stabil, dimana estimasi *baseflow* terlalu tinggi dan mengikuti pola fluktuasi debit, terutama pada FI dan SI yang tampak terlalu responsif terhadap lonjakan debit.

Setelah dilakukan kalibrasi dengan memasukkan parameter optimal, ketiga algoritma menunjukkan perubahan garis

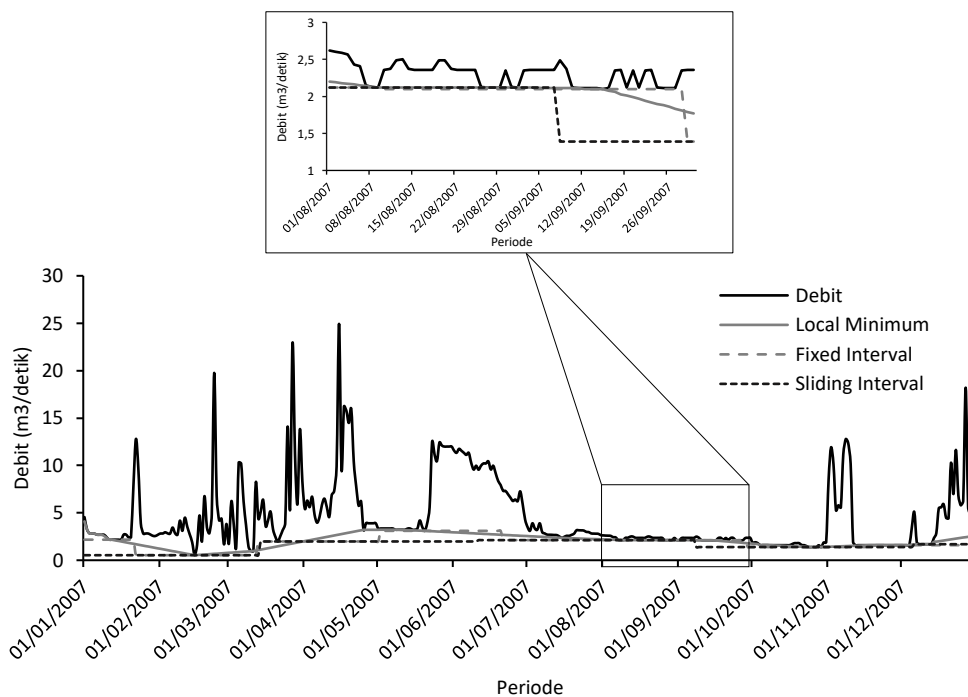
estimasi yang lebih stabil dan mencerminkan aliran dasar di DAS Setail. Algoritma LM menunjukkan konsistensi yang lebih baik di bandingkan algoritma lainnya terhadap nilai batas bawah debit (debit musim kemarau). Metode pemisahan aliran dasar yang efektif menghasilkan garis baseflow berhimpit

dengan debit terukur periode kemarau (Indarto & Herlinda, 2020). Gambar 8 dan 10 merupakan aliran dasar setelah kalibrasi yang menunjukkan grafik debit terukur bersamaan dengan grafik algoritma LM saling bersinggungan pada bulan Agustus dan September.



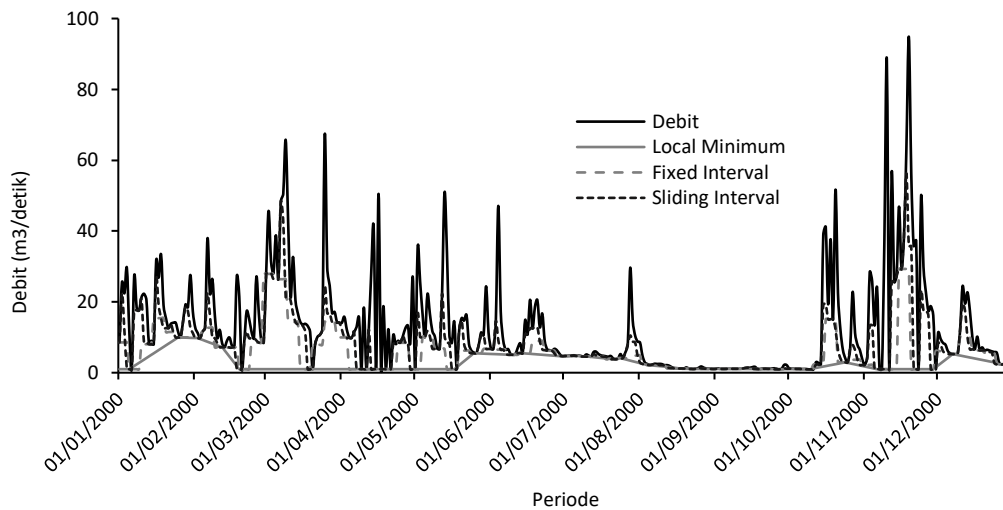
Gambar (Figure) 7. Hasil pemisahan aliran dasar awal di Jambewangi (*Initial baseflow separation results at Jambewangi*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)



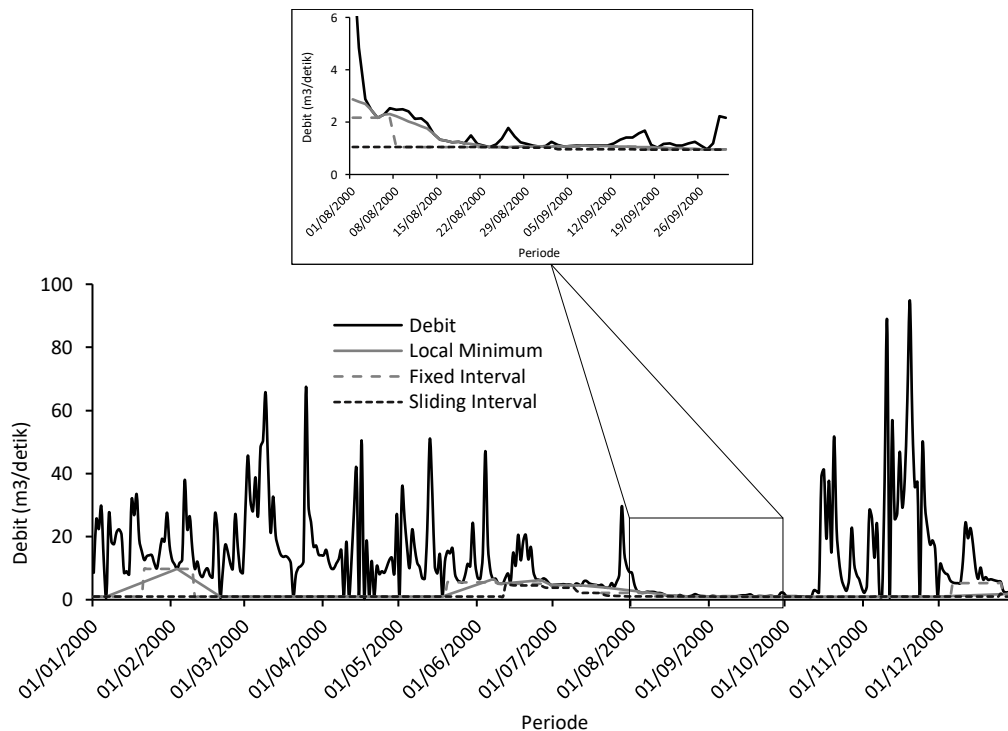
Gambar (Figure) 8. Hasil pemisahan aliran dasar setelah kalibrasi di Jambewangi (*Results of baseflow separation after calibration at Jambewangi*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)



Gambar (Figure) 9. Hasil pemisahan aliran dasar awal di Kradenan (*Initial baseflow separation results at Kradenan*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)



Gambar (Figure) 10. Hasil pemisahan aliran dasar setelah kalibrasi di Kradenan (*Results of baseflow separation after calibration at Kradenan*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

F. Baseflow Index (BFI)

Baseflow Index (BFI) merupakan laju rata-rata *baseflow* terhadap *streamflow*

dalam jangka waktu yang panjang (Zhao *et al.*, 2022). Nilai BFI dari tiga algoritma tahun 1996-2023 ditampilkan Tabel 9.

Tabel (Table) 9. Hasil perhitungan nilai BFI (*BFI calculation results*)

	<i>LM</i>		<i>FI</i>		<i>SI</i>	
	<i>JW</i>	<i>KD</i>	<i>JW</i>	<i>KD</i>	<i>JW</i>	<i>KD</i>
Min	0,65	0,05	0,47	0,05	0,41	0,05
Maks	1	1	1	1	1	1
Rerata	0,94	0,86	0,90	0,82	0,83	0,74

Sumber (*Source*): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

Keterangan (*Remarks*): *LM*= *Local Minimum*, *FI*= *Fixed Interval*, *SI*= *Sliding Interval*, *JW*= Jambewangi, *KD*=Kradenan

Estimasi nilai BFI akan menggambarkan ketersediaan air di DAS selama musim kemarau (Zhang *et al.*, 2020). Pada musim kemarau ketersediaan air sungai sebagian besar dipengaruhi oleh nilai *baseflow* (Helfer *et al.*, 2025). Tabel 9 menunjukkan algoritma LM memberikan nilai BFI paling baik dibandingkan dengan algoritma lainnya (Jambewangi = 0,94 dan Kradenan = 0,86) dengan rata-rata 0,9 yang menandakan bahwa 90% debit diperkirakan berasal dari aliran air tanah (*Groundwater*) dan aliran tunda (*Delayed Flow*) (Singh *et al.*, 2019). Selain itu, BFI dengan nilai 0,9 menunjukkan DAS yang permeabel (Tallaksen *et al.*, 2004). Nilai BFI yang tinggi menunjukkan bahwa DAS memiliki aliran yang cukup stabil dan dapat menyuplai air ke sungai selama musim kering. (Indarto & Herlinda, 2020).

IV. KESIMPULAN

Metode grafis algoritma *Local Minimum* (LM) memberikan kinerja terbaik dan dapat digunakan untuk memisahkan aliran dasar (*baseflow*) di DAS Setail berdasarkan uji R square yang tinggi (mendekati 1) dengan intensitas korelasi kuat sampai sangat kuat, nilai RMSE yang rendah (mendekati 0), serta kriteria NRMSE sangat baik (*Excellent*) pada Tahap kalibrasi maupun validasi di AWLR Jambewangi

(hulu) dan Kradenan (hilir). Nilai *baseflow Index* (BFI) juga menunjukkan bahwa DAS Setail memiliki sifat aliran yang cukup konstan dengan rata-rata nilai BFI jambewangi = 0,94 dan Kradenan = 0,86 serta mampu memberikan pasokan air sungai saat musim kering. Oleh karena itu, algoritma LM bisa diterapkan untuk mengevaluasi ketersediaan air di DAS Setail terutama untukantisipasi kekeringan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pembiayaan penelitian ini melalui Hibah PPS-PTM DPPM Dikti Tahun 2025 an. INDARTO. Judul penelitian "Pemodelan Hidrologi dan Banjir di Kawasan DAS Setail Banyuwangi" dengan Surat Keputusan Nomor 072/C3/DT.05.00/PL/2025 dan Perjanjian / Kontrak Nomor 4596/UN25.3.1/LT/2025.

KONTRIBUSI

Kontribusi Tiap Penulis: Mohamad Wawan Sujarwo mengonsep isi draft artikel, literatur review dan menulis draft artikel. Gigik Nurbaskoro menyediakan data hidrologi, memfasilitasi mahasiswa S1 TEP untuk magang dan penelitian di Kantor BMKG Banyuwangi, serta menulis Draft artikel. Indarto mengarahkan, membimbing, finishing dan pembiayaan penelitian. Audia Chairani mengecek,

memformat dan mengolah data hidrologi menggunakan BFI+3, visualisasi grafik dan menulis draft skripsi. Diana Nurhayati membantu revisi dan perbaikan penulisan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, S. A., Bailey, R. T., White, J. T., Arnold, J. G., White, M. J., ÄÄEerkasova, N., & Gao, J. (2024). A framework for parameter estimation, sensitivity analysis, and uncertainty analysis for holistic hydrologic modeling using SWAT+. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(1), 21–48. <https://doi.org/10.5194/hess-28-21-2024>
- Arifki, I. R., & Erwanto, Z. (2023). Penentuan karakteristik hidraulik sungai detail berdasarkan angka reynold dan angka froude. *Journal of Applied Civil Engineering and Infrastructure Technology*, 4(2), 01–10. <https://doi.org/10.52158/jaceit.v4i2.433>
- Cao, W., Li, Q., Xu, H., & Zhang, Z. (2024). Vegetation dynamics regulate baseflow seasonal patterns of the Chaohe watershed in North China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53(April). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101797>
- Chapman, T. (1999). A comparison of algorithms for streamflow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 13(July 1998), 701–714. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2)
- Chapman, T. G. G., & Maxwell, A. I. (1996). Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments. *23rd Hydrology and Water Resources Symposium, May*, 539–545. <http://search.informit.com.au/documentSummary>
- Chen, H., Huang, S., Xu, Y. P., Teegavarapu, R. S. V., Guo, Y., Nie, H., & Xie, H. (2024). Using baseflow ensembles for hydrologic hysteresis characterization in humid basins of southeastern china. *Water Resources Research*, 60(4). <https://doi.org/10.1029/2023WR036195>
- Chen, H., Li, Q., Wang, Q., Chai, X., & Wang, Y. (2024). Applying baseflow approach to the environmental flow needs of the Similkameen River Watershed in British Columbia, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57(November 2024), 102137. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102137>
- Chen, H., & Teegavarapu, R. S. V. (2020). Comparative analysis of four baseflow separation methods in the South Atlantic-gulf region of the U. S. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010120>
- Cheng, S., Tong, X., & Illman, W. A. (2022). Evaluation of baseflow separation methods with real and synthetic streamflow data from a watershed. *Journal of Hydrology*, 613, 128279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128279>
- Chowdhury, R. M., Ahn, J., Torlapati, J., & Jahan, K. (2025). Enhancing management of flood forecasting in Southern New Jersey: a HEC-HMS model development for Maurice River and Raccoon Creek Watersheds. *Applied Water Science*, 15(9), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02594-z>
- Cuadros, Q. N., Wei, Y., & Patil, R. J. (2025). Effects of hydrological and catchment biophysical factors on baseflow dynamics in two neighbouring micro-

- catchments of the andean ecosystems. *Hydrological Processes*, 39(7).
<https://doi.org/10.1002/hyp.70196>
- de Matos, E. O., Soares, T. M., Bezerra, U. H., Tostes, M. E. de L., Manito, A. R. A., & Costa, B. C. (2016). Using linear and non-parametric regression models to describe the contribution of non-linear loads on the voltage harmonic distortions in the electrical grid. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 10(8), 1825–1832.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0948>
- Duncan, H. P. (2019). Baseflow separation – a practical approach. *Journal of Hydrology*, 575(May), 308–313.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.040>
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), 507–515.
<https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- Gregor, M. (2010). User's manual: BFI+ 3.0. *HydroOffice Software Package for Water Sciences*, 21.
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, T., Wang, K., Ding, J., & Gao, H. (2019). Surface runoff BT - observation and measurement of ecohydrological processes (X. Li & H. Vereecken, Eds.; pp. 241–306). *Springer Berlin Heidelberg*.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-48297-1_8
- Helfer, F., Bernardi, F., Alessandra, C., Barros, P. De, Allasia, D. G., Minella, P. G., Tassi, R., & Scariot, N. (2025). Enhanced baseflow separation in rural catchments : event-specific calibration of recursive digital filters with tracer-derived data. *March*, 1–36.
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487.
<https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Indarto, I. (2010). Hidrologi – dasar teori dan contoh aplikasi model hidrologi (ISBN: 978-979-010-579-9). Bumi Aksara.
- Indarto, I. (2016). *Hidrologi: Metode analisis dan tool untuk interpretasi hidrograf aliran sungai* (II, Issue October 2016). Bumi Aksara.
- Indarto, I., & Herlinda, N. D. (2020). Aplikasi metode pemisahan aliran dasar berbasis grafis digital: studi pendahuluan di wilayah DAS Brantas. *Jurnal Sumber Daya Air*, 16(1), 11–22.
<https://doi.org/10.32679/jsda.v16i1.487>
- Institute of Hydrology. (1980). Low Flow Studies (Issue January).
- Kang, T., & Lee, N. (2021). Case study on application of graphical method for baseflow separation. *Journal of Korea Water Resources Association*, 54(4), 217–227.
<https://doi.org/10.3741/JKWRA.2021.54.4.217>
- Kominfo Jatim. (2024). Antisipasi Kekeringan, Pemkab Banyuwangi Terus Distribusikan Air Bersih. Dinas Komunikasi Dan Informatika Provinsi Jawa Timur.
<https://kominfo.jatimprov.go.id/berita/antisipasi-kekeringan-pemkab-banyuwangi-terus-distribusikan-air-bersih>
- Lei, Y., Jiang, X., Geng, W., Zhang, J., Zhao, H., & Ren, L. (2021). The variation characteristics and influencing factors of base flow of the hexi inland rivers. *Atmosphere*, 12(3).

- <https://doi.org/10.3390/atmos12030356>
- Lyne, V. D., & Hollick, M. (1979). Hydrology and Water Resources Symposium: Vol. null (null, Ed.).
- Mai, J. (2023). Ten strategies towards successful calibration of environmental models. *Journal of Hydrology*, 620(PA), 129414. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129414>
- Mandala, M., Indarto, I., Rodhi, N. N., Saputra, A. A., & Hakim, F. L. (2024). Land use and land cover change in East Java from 2015 to 2021 : Use optical imagery and Google Earth engine. 69–80. <https://doi.org/10.2478/envi-2024-0007>
- Mao, B., Wang, X., Jia, S., & Liu, Z. (2024). Multi-methods to investigate the baseflow: Insight from watershed scale spatiotemporal variety perspective. *Ecological Indicators*, 158(February 2023). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111573>
- Mei, Y., Wang, D., Zhu, J., Tang, G., Cai, C., Shen, X., Hong, Y., & Zhang, X. (2024). Optimal baseflow separation through chemical mass balance: comparing the usages of two tracers, two concentration estimation methods, and four baseflow filters. *Water Resources Research*, 60(7), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2023WR036386>
- Narimani, R., Jun, C., Nezhad, S. M., Bateni, S. M., Lee, J., & Baik, J. (2023). The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47(April), 101383. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101383>
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Niedzielski, T., & Halicki, M. (2023). Improving linear interpolation of missing hydrological data by applying integrated autoregressive models. *Water Resources Management*, 37(14), 5707–5724. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03625-7>
- Nuryadi, N., & Agustiarini, S. (2018). Analisis rawan kekeringan lahan padi kabupaten Banyuwangi Jawa Timur. *Jurnal Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika*, 5(2), 29–36. <https://doi.org/10.36754/jmkg.v5i2.56>
- Oktavia, S. R., Mantika, O. A., & Rugaiyah, R. (2021). Studi pemisahan aliran dasar metode local minimum method daerah aliran sungai Miu. *REKONSTRUKSI TADULAKO: Civil Engineering Journal on Research and Development*, 143–148. <https://doi.org/10.22487/renstra.v2i2.336>
- Pettyjohn, W. A., & Henning, R. J. (1979). *preliminary estimate of ground-water recharge rates related streamflow and water quality in Ohio*. <https://books.google.co.id/books?id=2iL4zwEACAAJ>
- Poernomo, I., Suripin, & Kodoatie, R. J. (2020). Annual baseflow estimation by combining hydrological models and graphic hydrograph methods. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(7), 426–434. <https://doi.org/10.35940/ijitee.g5129.059720>

- Qothrunada, D. T., & Risnayah, S. (2020). Tinjauan klimatologis kejadian hujan di musim kemarau pada dasarian I september 2020 Di Sulawesi Tenggara. *2(2)*, 38–40.
- Reis, A. A. dos, Weerts, A., Ramos, M. H., Wetterhall, F., & Fernandes, W. dos S. (2022). Hydrological data and modeling to combine and validate precipitation datasets relevant to hydrological applications. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *44*, 101200. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101200>
- Sari, Y. A. (2023). Pemetaan sebaran daerah rawan kekeringan menggunakan citra landsat 8 Oli/Tirs Di Kabupaten Banyuwangi. *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, *10(3)*, 233–242. <https://doi.org/10.23887/jjpg.v10i3.44750>
- Singh, S. K., Pahlow, M., Booker, D. J., Shankar, U., & Chamorro, A. (2019). Towards baseflow index characterisation at national scale in New Zealand. *Journal of Hydrology*, *568*, 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.025>
- Sloto, R. a., & Crouse, M. Y. (1996). Hysep: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040*, 54.
- Tallaksen, L.; Lanen, H. A. J. van. (2004). Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Elsevier (Developments in water science).
- Wang, S., Li, J., & Russell, H. A. J. (2021). A novel method for cold-region streamflow hydrograph separation using GRACE satellite observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25(5)*, 2649–2662. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2649-2021>
- Xie, J., Liu, X., Wang, K., Yang, T., Liang, K., & Liu, C. (2020). Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. *Journal of Hydrology*, *583*(December 2019), 124628. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124628>
- Xie, W., Zeng, X., Gui, D., Wu, J., & Wang, D. (2020). Modeling the snowmelt runoff process of the tizinafu river basin, northwest china, with gldas data and bayesian uncertainty analysis. *Journal of Hydrometeorology*, *22(1)*, 169–182. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0162.1>
- Yang, Q., Li, Z., Han, Y., & Gao, H. (2020). Responses of baseflow to ecological construction and climate change in different geomorphological. *Water*, *12(1)*, 1–15. file:///D:/Data D/Semester 7/Skripsi/dapus pendahuluan/water-12-00304.pdf
- Zhang, J., Zhang, Y., Song, J., Cheng, L., Kumar Paul, P., Gan, R., Shi, X., Luo, Z., & Zhao, P. (2020). Large-scale baseflow index prediction using hydrological modelling, linear and multilevel regression approaches. *Journal of Hydrology*, *585*(August 2019), 124780. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124780>
- Zhao, G., Kong, L., Li, Y., Xu, Y., & Li, Z. (2022). Investigating historical baseflow characteristics and variations in the Upper Yellow River Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19(15)*. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159267>

EVALUASI KINERJA TEKNIK KOREKSI BIAS UNTUK MENINGKATKAN AKURASI *GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT* (GPM) DI DAERAH ALIRAN SUNGAI REJOSO, INDONESIA

(Performance Evaluation of Bias Correction Techniques for Enhancing Global Precipitation Measurement (GPM) Accuracy in the Rejoso Watershed, Indonesia)

Alyavara Mayang Ferynandari^{1*}, Ery Suhartanto², Linda Prasetyorini³
¹²³Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, 65145, Indonesia

*alyavaraferynandari@gmail.com

Diterima: 29 Juni 2025, Direvisi: 15 Oktober 2025, Disetujui: 31 Oktober 2025

ABSTRACT

Enhancing the accuracy of satellite rainfall data from the Global Precipitation Measurement (GPM) satellite is essential to support its vital role in hydrological applications and disaster management. This study aims to identify biases and inaccuracies in GPM data, particularly in regions characterized by complex terrain and extreme rainfall, which significantly impact the reliability. To address this, various bias-correction techniques, including Linear Scaling, Regression Analysis, and Correction Factor Methods, were applied and evaluated using metrics such as the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and correlation coefficients. The results indicate that the Linear Scaling method outperforms the others, achieving the greatest NSE of 0.906 and a correlation coefficient of 0.904. Simultaneously, the Regression and Correction Factor methods exhibited robust performance with NSE values ranging from 0.79 to 0.80. The application of the correction arises from the merging of the Linear Scaling method with the IDW-based spatial interpolation technique, facilitating the validation of the spatial distribution of adjusted rainfall data. This hybrid methodology enhances comprehension of spatial-temporal variability and extreme phenomena. This study enhances the precision of satellite rainfall data and lays a foundation for hydrological modeling and disaster risk mitigation.

Keywords: *Global Precipitation Measurement (GPM); Bias correction techniques; Rejoso Watershed; rainfall estimation accuracy; hydrological modeling*

ABSTRAK

Peningkatan akurasi data curah hujan satelit dari *Global Precipitation Measurement* (GPM) sangat penting dilakukan untuk mendukung peran krusial dalam aplikasi hidrologi dan pengelolaan bencana. Studi ini mengidentifikasi bias dan ketidakakuratan data GPM, terutama pada daerah dengan medan kompleks dan curah hujan ekstrem, yang memengaruhi keandalannya secara signifikan. Untuk mengatasi hal ini, berbagai teknik koreksi bias, seperti *Linear Scaling*, Analisis Regresi, dan Metode Faktor Koreksi diterapkan dan dievaluasi

menggunakan metrik seperti Efisiensi Nash-Sutcliffe (NSE) dan koefisien korelasi. Hasilnya menunjukkan bahwa Metode *Linear Scaling* lebih akurat dibandingkan dengan metode lainnya, dengan mencapai NSE tertinggi sebesar 0,906 dan koefisien korelasi sebesar 0,904. Sementara, Metode Regresi dan Faktor Koreksi juga menunjukkan kinerja yang kuat dengan nilai NSE sekitar 0,79 – 0,80. Penggunaan hasil koreksi dari metode *Linear Scaling* yang diintegrasikan dengan interpolasi spasial berbasis IDW memungkinkan validasi distribusi spasial data curah hujan yang telah dikoreksi. Pendekatan hibrida ini memperbaiki pemahaman tentang variabilitas spasial-temporal dan kejadian ekstrem. Studi ini berkontribusi pada peningkatan akurasi data curah hujan satelit serta menyediakan dasar untuk pengembangan pemodelan hidrologi dan mitigasi risiko bencana.

Kata kunci: *Global Precipitation Measurement (GPM)*; teknik koreksi bias; DAS Rejoso; akurasi estimasi curah hujan; pemodelan hidrologi

I. PENDAHULUAN

Data satelit *Global Precipitation Measurement (GPM)* menghadapi tantangan signifikan terkait bias dan ketidakakuratan, terutama pada topografi kompleks dan wilayah tropis. Sumber utama kesalahan meliputi keterbatasan kemampuan sensor, yang dapat mengakibatkan estimasi curah hujan yang tidak akurat akibat variasi sifat curah hujan dan efek orografis. Keterbatasan dalam pengambilan sampel data gelombang mikro pasif dapat menyebabkan kesalahan acak yang signifikan dalam estimasi curah hujan, terutama jika pola curah hujan bersifat heterogen (Mahmood *et al.*, 2018). Penerapan data curah hujan satelit GPM di medan yang kompleks seperti DAS Rejoso menghadapi tantangan yang signifikan karena bias dan ketidakakuratan yang disebabkan oleh ketidaksesuaian skala antara pengukuran alat pengukur hujan berbasis titik dan piksel satelit yang dirata-ratakan secara spasial (Iryani *et al.*, 2022). Meskipun GPM IMERG v6 menunjukkan korelasi sedang dengan pengamatan di lapangan (Andari *et al.*, 2024), GPM IMERG v6 seringkali mengabaikan kejadian curah

hujan ekstrem (Dembélé & Zwart, 2016). Selain itu, kompleksitas geografis wilayah ini turut memperburuk bias tersebut, sehingga perlu mempertimbangkan variasi lokal dalam karakteristik hidrometeorologi.

Berbagai metode koreksi bias telah diterapkan untuk mengatasi ketidakakuratan tersebut, antara lain *Linear Scaling*, Analisis Regresi, dan Metode Faktor Koreksi. Teknik pemetaan kuantil terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi estimasi curah hujan dengan memanfaatkan fungsi distribusi kumulatif untuk menyesuaikan bias, terutama pada model yang mengandalkan distribusi data jangka panjang (Burnama *et al.*, 2023). Analisis regresi yang mempertimbangkan kondisi iklim lokal juga menunjukkan potensi untuk memperbaiki estimasi curah hujan dari satelit, dengan memberikan penyesuaian yang lebih baik terhadap data pengamatan (Bhatti *et al.*, 2016). Keberhasilan metode koreksi ini, bagaimanapun sangat bergantung pada kondisi iklim dan jenis curah hujan yang ada.

Meskipun teknik koreksi bias saat ini meningkatkan akurasi, metode tersebut

sering menghadapi kesulitan dalam menangani kejadian curah hujan ekstrem dan variabilitas spasial-temporal yang terkandung dalam data satelit (Baig *et al.*, 2025). Performa GPM terhadap hujan ekstrem belum konsisten: estimasi sering *overestimate* pada intensitas sedang namun *underestimate* pada puncak kejadian ekstrem, sehingga rekonstruksi intensitas peristiwa ekstrem kurang akurat (Lyu *et al.*, 2024).

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja teknik koreksi bias pada data curah hujan satelit GPM, mengukur peningkatan akurasi terhadap kebenaran di lapangan, dan mengidentifikasi faktor yang memengaruhi kualitas koreksi. Penelitian ini menggunakan interpolasi spasial dengan GIS dan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW), yang memberikan hasil lebih akurat pada data heterogen dengan memberi bobot lebih pada titik yang lebih dekat. Metrik validasi seperti *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) dan koefisien korelasi digunakan untuk menilai kinerja metode dalam kondisi iklim dan medan yang bervariasi. Selain itu, penggunaan IDW dalam penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi dan memetakan distribusi spasial data curah hujan yang telah dikoreksi, sehingga menghasilkan analisis yang lebih akurat terhadap variabilitas spasial-temporal di daerah dengan kondisi ekstrem (Wang *et al.*, 2017).

II. BAHAN DAN METODE

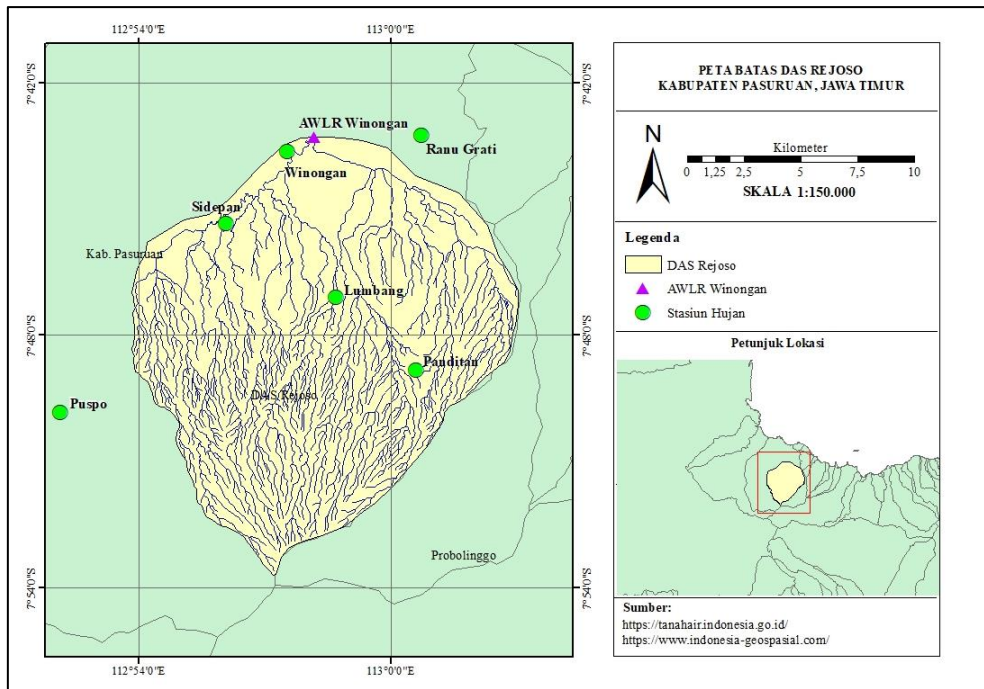
A. Waktu dan Lokasi

Penelitian difokuskan pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Rejoso di Kabupaten

Pasuruan, Jawa Timur ($\approx 210,451 \text{ km}^2$), bagian dari sistem DAS Welang-Rejoso (Gambar 1), terletak pada $112^{\circ}33'55''$ – $113^{\circ}30'37''$ BT dan $7^{\circ}32'34''$ – $8^{\circ}30'20''$ LS. Hulu DAS Rejoso berada di sekitar Gunung Bromo dan hilir bermuara ke pantai utara Pasuruan. Wilayah ini beriklim monsun dengan puncak hujan umumnya November – Maret dan kemarau pada Juni – September, sedangkan variabilitas antartahun dipengaruhi ENSO dan IOD. Zona hulu didominasi tanah vulkanik muda (*Andisol*) yang berangsur menjadi *Inceptisol* ke tengah–hilir, berimplikasi pada infiltrasi dan penyimpanan air tanah. Tutupan lahan berupa mosaik hutan–agroforestri–pertanian–permukiman, di mana agroforestri pada lereng vulkanik cenderung lebih ramah-infiltrasi dan menjaga fungsi hidrologi. Topografi pegunungan menajamkan gradien presipitasi orografis dan ketidakseragaman spasial, sehingga aplikasi data GPM/IMERG di medan kompleks memerlukan koreksi bias dan validasi spasial berbasis metode yang peka skala (Kurniadi *et al.*, 2021).

B. Bahan dan Alat

Bahan penelitian mencakup data curah hujan DAS Rejoso yang diperoleh dari PUSDA Jawa Timur, UPT Pasuruan, serta data satelit GPM dari website NASA. Rincian data disajikan pada Tabel 1. Proses analisis data dan pembuatan peta dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak ArcGIS, Google Earth Pro, dan Microsoft Office sebagai alat pendukung penelitian.



Gambar (Figure) 1. Peta lokasi daerah kajian DAS Rejoso (Map of the Rejoso Watershed study area)
 Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Tabel (Table) 1. Data penelitian (Research data)

No. (Number)	Jenis Data (Data Types)	Tahun (Year)	Sumber Data (Data source)
1	Data curah hujan stasiun	20 tahun	Dinas PU Sumber Daya Air Jawa Timur
2	Data curah hujan satelit GPM	(2004-2023)	Situs Web NASA Giovanni https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/

Sumber (Source): Hasil analisis, 2025 (Analysis results, 2025)

C. Metode Penelitian

Pemanfaatan data curah hujan satelit GPM pada wilayah bertopografi kompleks seperti DAS Rejoso rentan menyisakan bias dan ketidakakuratan, salah satunya akibat ketidakselarasan skala antara observasi penakar hujan berbasis titik dan piksel satelit yang berupa rata-rata spasial (Yang *et al.*, 2020). Beberapa metode koreksi bias yang diterapkan dalam penelitian ini adalah Metode *Linear Scaling* (LSM), Analisis Regresi, dan Metode Faktor Koreksi. Selain itu, dikembangkan pendekatan *Hybrid Correction* yang mengintegrasikan *Genetic Algorithm* (GA) dan implementasi metode spasial berbasis

GIS untuk memperoleh konfigurasi koreksi yang optimal (Pan *et al.*, 2023). Alur proses koreksi disajikan pada Gambar 2.

1. Metode *Linear Scaling* (LSM)

Metode *Linear Scaling* (LSM) merupakan teknik koreksi bias yang banyak digunakan untuk menyesuaikan estimasi curah hujan satelit jangka panjang dengan curah hujan yang teramati, khususnya pada skala bulanan (Ryazanova *et al.*, 2021). Teknik ini menghitung faktor skala dengan membandingkan rasio rata-rata curah hujan yang teramati terhadap rata-rata curah hujan satelit selama periode dasar (Londhe *et al.*, 2023), kemudian

diterapkan pada data satelit untuk menghasilkan hasil yang telah dikoreksi bias. Berdasarkan efisiensi komputasinya, LSM sangat sesuai diterapkan dalam aplikasi *real-time* di bidang pertanian dan manajemen bencana (Mahmood *et al.*, 2018). Metode *Linear Scaling* dapat dihitung menggunakan persamaan dari Londhe *et al.* (2023).

$$P_{cor,m,d} = P_{raw,m,d} \times \frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{raw,m})} \quad (1)$$

dengan $P_{cor,m,d}$ adalah curah hujan yang telah dikoreksi pada hari ke- d bulan ke- m , sedangkan $P_{raw,m,d}$ adalah curah hujan i sebelum koreksi pada hari ke- d bulan ke- m . Nilai μ menunjukkan nilai rata-rata faktor koreksi.

2. Metode Regresi

Metode Regresi mengoreksi bias dengan memodelkan hubungan antara curah hujan yang teramati dan data satelit menggunakan regresi linier atau regresi berganda, dengan koefisien yang diperoleh melalui metode kuadrat terkecil untuk meminimalkan kesalahan (Hariri, 2022). Pendekatan ini dapat menggabungkan beberapa prediktor untuk meningkatkan akurasi koreksi (Xiang Soo *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2017). Metode Analisa Regresi dapat dihitung menggunakan persamaan dari Bal *et al.* (2023).

$$P_{cor,m,d} = m_{m(h)} \times P_{est,m,d} + C_{m,(h)} \quad (2)$$

dengan $P_{cor,m,d}$ dan $P_{est,m,d}$ masing-masing merupakan curah hujan yang telah dikoreksi bias dan hasil estimasi ntuk jam ke- h pada hari ke- d bulan ke- m dan $C_{m,(h)}$ adalah nilai kemiringan dan intersep.

3. Metode Faktor Koreksi dan Pengembangan Faktor Koreksi dengan Algoritma Genetik

Metode Faktor Koreksi digunakan untuk mengatasi heterogenitas spasial dengan menggunakan teknik interpolasi seperti kriging untuk membuat permukaan koreksi yang memperbaiki bias dalam data curah hujan satelit (Xiang Soo *et al.*, 2020). Penggunaan Algoritma Genetik dalam metode ini bertujuan untuk lebih mengoptimalkan faktor koreksi yang dihasilkan, dengan mempertimbangkan faktor lingkungan tambahan yang mungkin berpengaruh terhadap pola curah hujan lokal (Jabbari & Bae, 2018).

Metode Faktor Koreksi dan Algoritma Genetik sebenarnya merupakan dua metode yang berbeda, meskipun dapat digabungkan dalam satu pendekatan hibrid untuk memperoleh hasil koreksi yang lebih akurat. Faktor koreksi dihitung menggunakan fungsi interpolasi spasial yang memperbaiki bias curah hujan satelit berdasarkan data observasi. Algoritma Genetik digunakan untuk mengoptimalkan nilai faktor koreksi ini dengan melakukan pencarian solusi terbaik melalui proses seleksi, persilangan, dan mutasi dalam ruang parameter.

Di beberapa implementasi, Metode Faktor Koreksi yang nilai faktor koreksinya diperoleh dari Algoritma Genetik menunjukkan performa yang lebih baik, terutama dalam menangkap variabilitas spasial yang lebih kompleks dan kejadian curah hujan ekstrem, berkat kemampuannya dalam menyesuaikan parameter berdasarkan kondisi lingkungan spesifik.

Metode ini secara matematis dihitung melalui dua persamaan dari Xiang Soo *et al.* (2020) dan Jabbari & Bae (2018).

$$P_{cor}(x, y) = P_{sat}(x, y) \times F(x, y) \quad (3)$$

$$P_{cor}(x, y) = P_{sat}(x, y) \times f(x, y, E) \quad (4)$$

$P_{cor}(x, y)$ merupakan curah hujan satelit yang telah dikoreksi pada titik koordinat (x, y) , $P_{sat}(x, y)$ nilai curah hujan satelit sebelum dikoreksi, $F(x, y)$ adalah faktor koreksi hasil dari fungsi interpolasi spasial berdasarkan rasio antara data observasi dan data satelit, dan $f(x, y, E)$ merupakan fungsi koreksi nonlinier yang tergantung pada lokasi spasial dan parameter lingkungan.

Pada keseluruhan metode koreksi dilakukan validasi evaluasi metode dengan menggunakan metrik seperti R^2 dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) untuk menilai akurasi (ouga *et al.*, 2024). Berikut ini adalah metode yang digunakan untuk menilai akurasi.

1. *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

Pengujian *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) yaitu untuk mengestimasi kesamaan data estimasi dan data lapangan (Melsen *et al.*, 2025). Kriteria terkait interpretasi NSE dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel (Table) 2. Distribusi kelas *Nash-Sutcliffe Efficiency* (*Nash-Sutcliffe Efficiency class distribution*)

NSE (NSE)	Intrepretasi (Interpretation)
0,75 s/d 1,00	Sangat Baik
0,65 s/d 0,75	Baik
0,50 s/d 0,65	Memuaskan
Kurang dari 0,50	Kurang Memuaskan

Sumber (Source): Melsen (2025)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (5)$$

P_i merupakan curah hujan observasi, Q_i merupakan curah hujan satelit setelah dikoreksi, \bar{P}_i adalah rata-rata curah hujan observasi, dan N merupakan jumlah data pengamatan yang digunakan dalam evaluasi.

2. Koefisien Korelasi (R)

Analisis ini dilakukan untuk memahami pola yang terbentuk serta mengetahui keterikatan nilai antara dua atau lebih variabel (Melsen *et al.*, 2025). Nilai analisis ini berkisar antara nol hingga satu, dengan interpretasi hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3. Berikut persamaan guna menentukan besarnya koefisien korelasi:

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N AB - \sum_{i=1}^N Ax \sum_{i=1}^N B}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N A^2 - (\sum_{i=1}^N A)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N B^2 - (\sum_{i=1}^N B)^2}} \quad (6)$$

A merupakan curah hujan observasi, B merupakan curah hujan satelit setelah dikoreksi, dan n merupakan jumlah pasangan data yang dianalisis untuk mengetahui tingkat keeratan hubungan antara data observasi dan data satelit.

Tabel (Table) 3. Distribusi kelas Koefisien Korelasi (Correlation Coefficient class distribution)

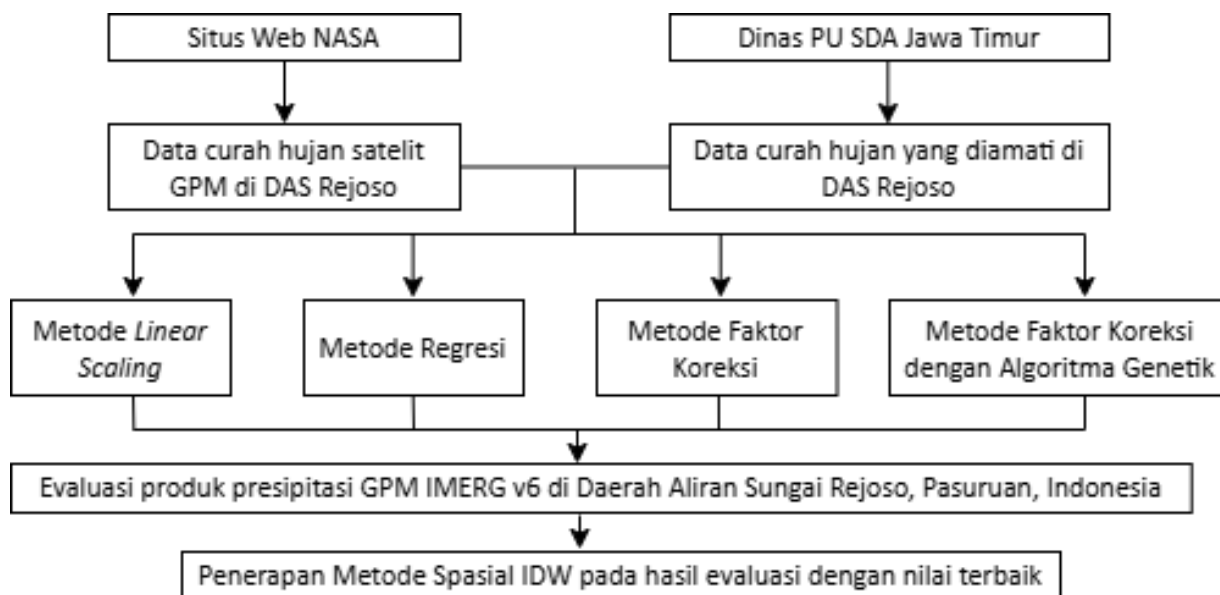
Koefisien Korelasi (Correlation Coefficient)	Interpretasi (Interpretation)
0 s/d 0,19	Sangat Rendah
0,20 s/d 0,39	Rendah
0,40 s/d 0,59	Sedang
0,60 s/d 0,79	Kuat
0.8 s/d 1	Sangat Kuat

Sumber (Source): Melsen (2025)

Metode Spasial GIS digunakan untuk merepresentasikan distribusi curah hujan secara spasial dengan pendekatan interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW). Pendekatan ini diterapkan setelah diperoleh nilai validasi terbaik dari indikator statistik seperti *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) dan koefisien korelasi (R), sehingga hasil visualisasi dapat memperkuat interpretasi pola curah hujan di wilayah studi (Liu *et al.*, 2020).

Secara umum, prosedur metode ini meliputi:

1. Menyiapkan data curah hujan dari stasiun pengamatan beserta koordinatnya.
2. Melakukan interpolasi spasial menggunakan pendekatan IDW untuk menghasilkan permukaan sebaran curah hujan yang kontinu.
3. Memvisualisasikan hasil interpolasi ke dalam peta tematik guna menampilkan variasi spasial curah hujan secara lebih komprehensif.



Gambar (Figure) 2. Diagram alir metode koreksi bias yang diterapkan pada GPM (Flowchart of bias correction method applied to GPM)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Perbandingan Metode Koreksi Bias

Hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan kinerja yang signifikan antar metode koreksi bias. Metode *Linear Scaling* (LSM) memberikan tingkat akurasi tertinggi dengan nilai NSE sebesar 0,906 dan koefisien korelasi (R) sebesar 0,904, diikuti oleh Metode Faktor Koreksi dengan Algoritma Genetik (NSE = 0,801; R = 0,895), Metode Regresi (NSE = 0,793; R = 0,891), dan Metode Faktor Koreksi (NSE = 0,781; R = 0,887). Pola ini menegaskan bahwa penyesuaian skala rata-rata memiliki peran dominan dalam mengurangi bias sistematis curah hujan satelit (Pan *et al.*, 2023). Ringkasan nilai disajikan pada Tabel 4, sedangkan kurva dan sebaran hasil per metode ditunjukkan pada Gambar 3–6.

A. Metode *Linear Scaling*

Metode *Linear Scaling* menghasilkan akurasi tertinggi (NSE = 0,906; R = 0,904) melalui penerapan faktor skala bulanan yang terkalibrasi terhadap data observasi. Sisi komputasi, LSM menunjukkan waktu pemrosesan koreksi sekitar 25–35% lebih cepat dibandingkan metode regresi atau hibrida karena hanya menggunakan operasi aritmatika dasar tanpa iterasi optimasi (Ramadhan *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2020). Keunggulan lainnya adalah kestabilan hasil koreksi dengan deviasi standar kesalahan di bawah 10% untuk seluruh rentang data, menjadikannya efisien dan dapat diterapkan dalam sistem hidrologi waktu nyata (Londhe *et al.*, 2023).

Temuan ini konsisten dengan studi yang menunjukkan peningkatan korelasi IMERG terhadap data penakar hujan di wilayah

tropis hingga $r > 0,90$ setelah penerapan LSM (Ramadhan *et al.*, 2024). Namun, sensitivitas metode ini terhadap hujan ekstrem masih terbatas karena pendekatan berbasis momen rendah tidak memperbaiki bentuk distribusi intensitas tinggi (Luo *et al.*, 2020). Oleh karena itu, meskipun LSM unggul untuk mengoreksi bias rata-rata, metode berbasis distribusi seperti *Quantile Mapping* (QM) lebih tepat digunakan untuk memperbaiki ekor distribusi kejadian ekstrem. Gambar 3 memperlihatkan perbandingan antara data observasi curah hujan dan hasil koreksi GPM menggunakan metode *Linear Scaling*. Grafik ini menunjukkan bahwa faktor skala bulanan mampu menurunkan bias rata-rata jangka panjang secara signifikan dan mempertahankan pola temporal curah hujan.

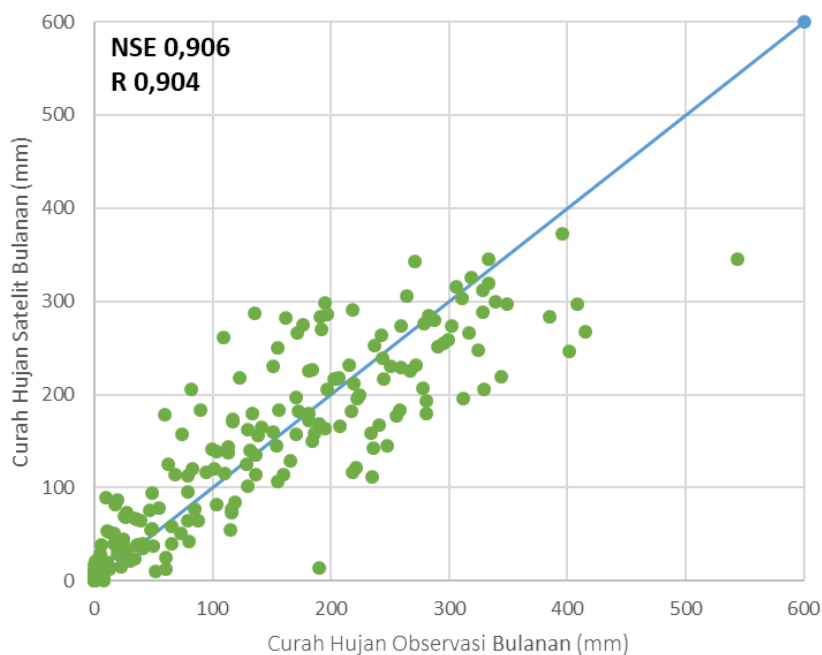
B. Metode Regresi

Metode Regresi memberikan kinerja baik dengan nilai (NSE = 0,793; R = 0,891). Meski demikian, performa ini menurun pada area bertopografi kompleks dan saat intensitas hujan tinggi. Regresi linier memiliki keterbatasan dalam menangkap hubungan nonlinier antar variabel, terutama pada kondisi spasial yang heterogen. Akurasi regresi dapat menurun hingga 20–30% pada kejadian hujan ekstrem (Yang *et al.*, 2020).

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa model regresi efektif untuk mengoreksi bias linier pada skala bulanan, tetapi kurang optimal dalam memperbaiki distribusi intensitas tinggi atau ketidaksesuaian spasial antara piksel satelit dan titik observasi. Pengembangan model regresi adaptif dengan variabel prediktor tambahan berpotensi meningkatkan hasil

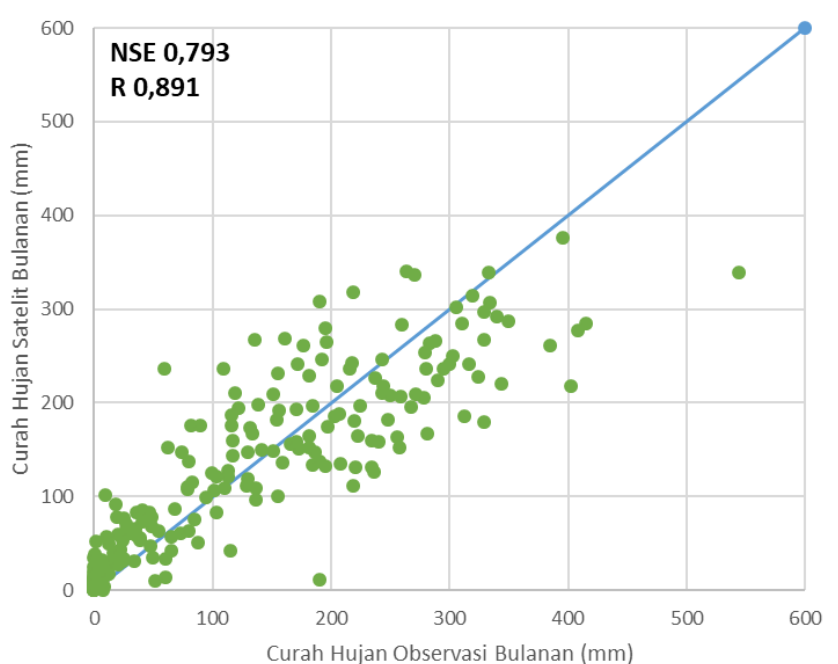
koreksi, meskipun memerlukan proses validasi dan regularisasi yang ketat (Z. Liu *et al.*, 2022). Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara curah hujan hasil observasi dan data satelit yang telah

dikoreksi menggunakan metode Regresi. Sebaran data menunjukkan kecenderungan linier dengan variabilitas yang relatif kecil.



Gambar (Figure) 3. Grafik hasil analisis curah hujan dengan Metode *Linear Scaling* (Graph of rainfall analysis results using the *Linear Scaling Method*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)



Gambar (Figure) 4. Grafik hasil analisis curah hujan dengan Metode Regresi (Graph of rainfall analysis results using the *Regression Method*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

C. Metode Faktor Koreksi

Metode ini menunjukkan kemampuan menangkap variasi spasial curah hujan dengan nilai (NSE = 0,781; R = 0,887). Namun, fluktuasi hasil koreksi masih terlihat pada wilayah dengan gradien curah hujan tajam dan heterogenitas tutupan lahan tinggi. Metode ini juga cenderung menghasilkan *overcorrection* hingga $\pm 15\%$ pada area dengan densitas stasiun rendah (Luo *et al.*, 2020).

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa metode faktor koreksi efektif untuk wilayah dengan bias homogen dan jaringan pengamatan padat, namun kurang sesuai untuk daerah bertopografi kompleks. Oleh sebab itu, pendekatan ini lebih tepat diterapkan pada skala regional dengan kondisi geospasial relatif seragam (Yuan *et al.*, 2017). Gambar 5 menampilkan hasil koreksi menggunakan Metode Faktor Koreksi yang mengandalkan rasio antara data observasi dan satelit untuk membentuk permukaan koreksi spasial. Pendekatan ini memberikan gambaran mengenai distribusi spasial curah hujan pada wilayah studi.

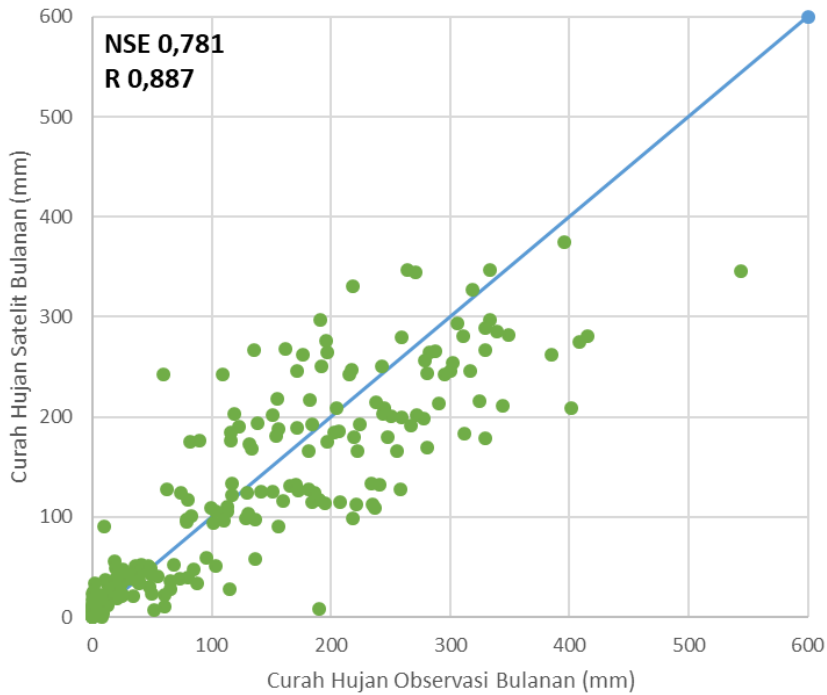
D. Metode Faktor Koreksi dengan Algoritma Genetik

Metode Faktor Koreksi dengan Algoritma Genetik memperlihatkan (NSE = 0,801; R = 0,895) dibandingkan dengan metode Faktor Koreksi konvensional. Penerapan algoritma evolusioner meningkatkan akurasi koreksi sebesar 0,03–0,05 NSE melalui proses optimasi iteratif (Camera *et al.*, 2020). Meskipun demikian, akurasi LSM tetap lebih tinggi karena bias dominan di wilayah studi

bersifat pergeseran rata-rata, bukan pola nonlinier lokal. Dengan demikian, metode GA paling bermanfaat untuk kondisi bias yang kompleks atau ekstrem, sementara untuk bias linier, LSM lebih efisien baik secara komputasi maupun akurasi (Liu *et al.*, 2022). Gambar 6 menunjukkan hasil koreksi curah hujan menggunakan Metode Faktor Koreksi yang dioptimasi dengan *Genetic Algorithm* (GA) untuk menentukan parameter koreksi yang paling sesuai.

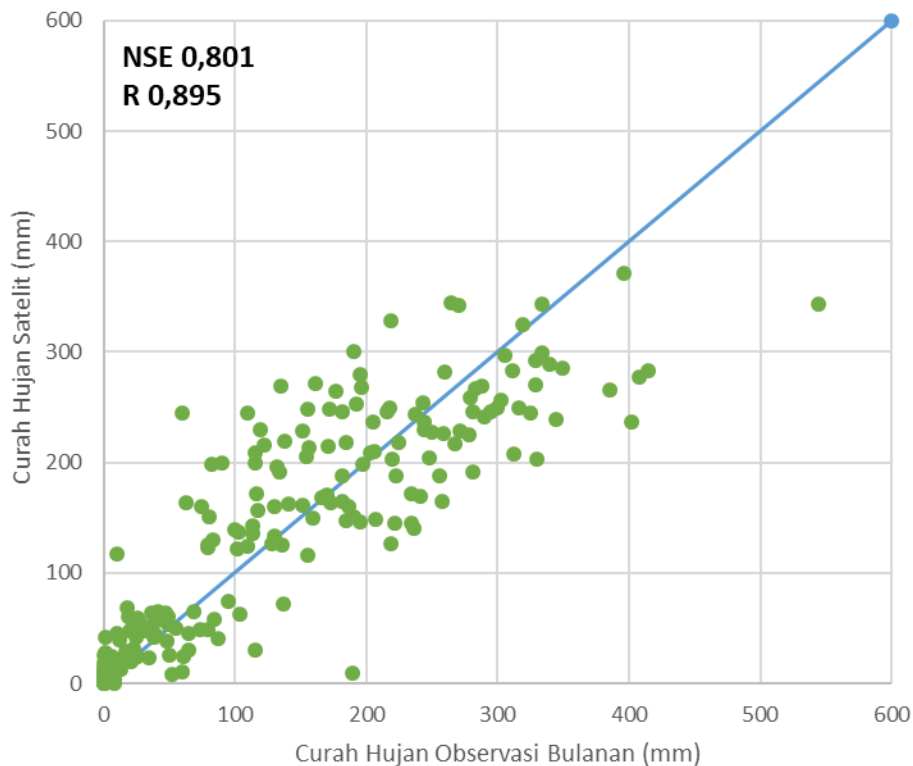
E. Implementasi GIS-IDW

Setelah keluaran terbaik Metode *Linear Scaling* (LSM) ditetapkan, interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) digunakan untuk memetakan distribusi spasial curah hujan yang telah terkoreksi. Penerapan metode IDW menghasilkan pola spasial curah hujan yang lebih halus dan sesuai dengan distribusi observasi. Metode ini menunjukkan efisiensi komputasi sekitar 40% lebih cepat dibanding kriging karena tidak memerlukan pemodelan variogram (Wang *et al.*, 2023). IDW sangat sesuai untuk wilayah dengan jumlah stasiun terbatas dan variasi topografi tinggi karena memberikan bobot lebih besar pada pengamatan terdekat sehingga menghasilkan peta yang representatif dan minim distorsi. Penerapan IDW pada hasil koreksi LSM memperkuat validitas spasial hasil koreksi dan meningkatkan keandalan interpretasi hidrologi di wilayah studi (Ramadhan *et al.*, 2022). Gambar 7 menampilkan hasil interpolasi spasial menggunakan *Inverse Distance Weighting* (IDW) terhadap data hasil koreksi LSM untuk memetakan distribusi curah hujan pascakoreksi.



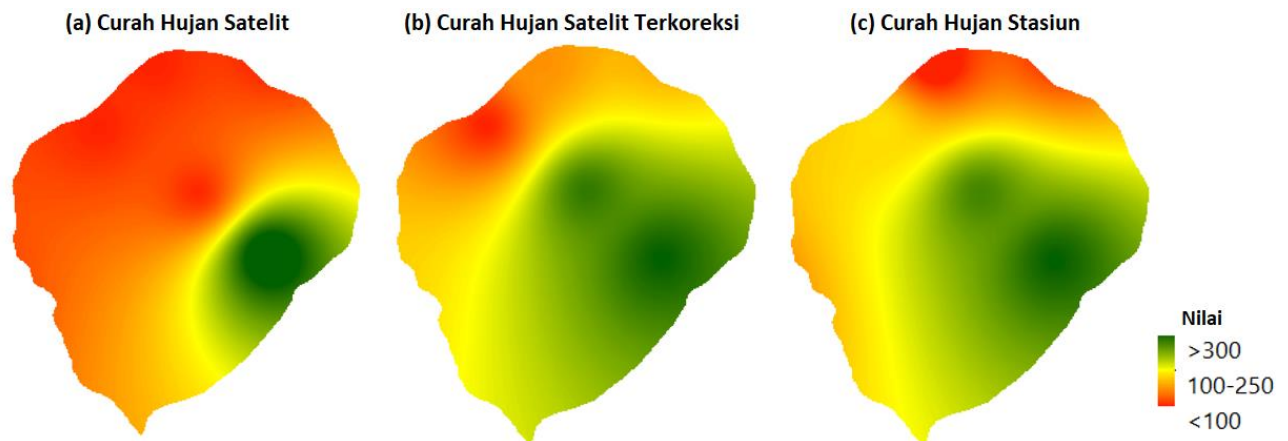
Gambar (Figure) 5. Grafik hasil analisis curah hujan dengan Metode Faktor Koreksi (Graph of rainfall analysis results using the Correction Factor Method)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)



Gambar (Figure) 6. Grafik analisis curah hujan menggunakan Metode Faktor Koreksi dengan Algoritma Genetik (Graph of rainfall analysis results using the Correction Factor Method with Genetic Algorithm)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)



Gambar (Figure) 7. Distribusi spasial curah hujan yang terkoreksi menggunakan Metode Spasial GIS (*Corrected spatial distribution of rainfall using GIS Spatial Method*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

Pengaruh Topografi terhadap Akurasi Prediksi Hujan

Konteks kewilayahan DAS Rejoso yang terletak di sekitar Gunung Bromo, nampak bahwa faktor topografi sangat memengaruhi distribusi curah hujan. Keberadaan pegunungan yang menjulang tinggi berperan besar dalam menciptakan pola curah hujan yang sangat bervariasi secara spasial. Metode *Linear Scaling* menunjukkan ketahanan lebih baik terhadap variabilitas ini karena faktor koreksi yang diterapkan pada skala bulanan mampu mengurangi bias rata-rata jangka panjang yang disebabkan oleh ketidaksesuaian skala antara pengukuran titik dan piksel satelit (Ramadhan *et al.*, 2022).

Meskipun *Linear Scaling* menunjukkan performa terbaik secara umum, bias residual pada kejadian ekstrem tetap menjadi perhatian, terutama dalam curah hujan ekstrem yang sering terjadi di wilayah pegunungan. Hal ini mengindikasikan bahwa skema berbasis rata-rata jangka panjang mungkin kurang efektif untuk menangani ekor distribusi curah hujan yang ekstrim, yang cenderung

lebih dipengaruhi oleh kondisi lokal seperti kemiringan tanah dan tutupan lahan (Andari *et al.*, 2024).

Implikasi Kebijakan dari Koreksi Bias Data GPM

Berdasarkan hasil Tabel 4. ditemukan bahwa Metode *Linear Scaling* ditetapkan konsisten unggul pada skala bulanan dan memberikan dasar praktis bagi lembaga teknis untuk operasionalisasi data GPM terkoreksi dalam tiga ranah kebijakan:

(i) Peringatan dini banjir

Akurasi input hujan yang lebih baik menurunkan ketidakpastian debit prakiraan, sehingga ambang siaga dan rencana evakuasi dapat disetel lebih presisi pada DAS yang memiliki topografi kompleks seperti Rejoso (Iryani *et al.*, 2022).

(ii) Perencanaan dan prioritas infrastruktur air

Pemetaan IDW atas hujan terkoreksi memungkinkan identifikasi kantong intensitas tinggi dan defisit, yang berguna untuk penentuan lokasi, kapasitas, dan urutan pembangunan bangunan air, drainase, serta proteksi lereng;

Tabel (Table) 4. Perbandingan Efisiensi Nash-Sutcliffe (NSE) dan Koefisien Korelasi (R) Antara Metode Koreksi (Comparison of Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Correlation Coefficient (R) Between Correction Methods)

Metode (Method)	NSE	Interpretasi Nilai NSE	R	Interpretasi Nilai R
Metode <i>Linear Scaling</i>	0,906		0,904	
Metode Analisa Regresi	0,793	Sangat Baik	0,891	Sangat
Metode Faktor Koreksi	0,781		0,887	Kuat
Metode Faktor Koreksi dengan Algoritma Genetik	0,801		0,895	

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

(iii) Adaptasi pertanian dan tata-guna lahan

Pola spasial hujan yang lebih kredibel mendukung penentuan kalender tanam, varietas tahan, dan skema irigasi hemat, khususnya pada wilayah dengan variabilitas antarmusim tinggi. Untuk wilayah yang sering mengalami hujan ekstrem, strategi hibrida layak dipertimbangkan, misalnya mengombinasikan LSM dengan pemetaan kuantil atau pembelajaran mesin untuk mengatasi bias pada ekor distribusi (Pan *et al.*, 2023; Ougahi & Rowan, 2024).

Berdasarkan hasil tersebut, produk curah hujan GPM yang telah dikoreksi menggunakan metode *Linear Scaling* dan divalidasi secara spasial melalui IDW terbukti memberikan dasar yang andal bagi penerapan kebijakan berbasis bukti. Produk ini dapat digunakan sebagai sumber data operasional untuk validasi hidrologi dan peringatan dini, dengan mekanisme pembaruan dan validasi silang secara berkala agar tetap adaptif terhadap dinamika iklim lokal serta perubahan ekstrem yang terjadi di wilayah tropis seperti DAS Rejoso.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi berbagai metode koreksi bias pada data curah hujan satelit GPM untuk meningkatkan akurasi

estimasi curah hujan. Keterbaruan penelitian ini terletak pada penerapan teknik koreksi bias melalui metode *Linear Scaling* yang dikombinasikan dengan interpolasi spasial menggunakan IDW, yang secara signifikan meningkatkan akurasi estimasi curah hujan GPM di wilayah dengan topografi dan iklim kompleks. Metode *Linear Scaling* menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai NSE sebesar 0,906 dan koefisien R sebesar 0,904, sementara Metode Regresi dan Faktor Koreksi memiliki kinerja yang lebih rendah dengan nilai NSE sekitar 0,79–0,80. Penggunaan hasil koreksi *Linear Scaling* yang terintegrasi dengan interpolasi spasial berbasis IDW memungkinkan validasi distribusi spasial yang lebih akurat, dan pendekatan hibrida ini efektif dalam mengatasi variabilitas spasial-temporal serta kejadian ekstrem, sehingga memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan akurasi data curah hujan satelit. Penelitian ini secara khusus difokuskan pada prediksi curah hujan skala bulanan berbasis data satelit dengan akurasi yang baik. Namun, model yang dikembangkan belum diuji untuk data curah hujan harian, sehingga diperlukan pengujian lebih lanjut guna menilai keandalannya pada skala temporal yang

lebih tinggi. Saran pengembangan berikutnya adalah penerapan metode hibrida yang menggabungkan pembelajaran mesin guna memperbaiki akurasi serta memperluas kumpulan data validasi untuk mendukung aplikasi hidrologi dan mitigasi bencana.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dinas Pekerjaan Umum dan Sumber Daya Air (PU SDA) Provinsi Jawa Timur atas dukungan dan kerjasama yang luar biasa dalam menyediakan data curah hujan yang sangat berguna bagi kelancaran penelitian ini. Tanpa bantuan tersebut, penelitian ini tidak dapat terlaksana dengan baik.

KONTRIBUSI

Penulis pertama (1) bertanggung jawab atas penyusunan konseptualisasi, metodologi, pengumpulan data curah hujan, serta interpretasi hasil penelitian; penulis kedua (2) berkontribusi dalam analisis teknik koreksi bias, evaluasi akurasi data, dan penyusunan model interpolasi; penulis ketiga (3) mengumpulkan data lapangan, melakukan pemetaan geospasial, serta analisis citra satelit GPM.

DAFTAR PUSTAKA

- Andari, R., Nurhamidah, N., Daoed, D., & Marzuki, M. (2024a). Evaluation of Bias Correction Methods for Multi-Satellite Rainfall Estimation Products. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1317/1/012008>
- Andari, R., Nurhamidah, N., Daoed, D., & Marzuki, M. (2024b). Validation of TRMM and GPM Satellite Data Using

Daily Precipitation Observations. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.18980>

- Baig, F., Ali, L., Faiz, M. A., Chen, H., & Sherif, M. (2025). From bias to accuracy: Transforming satellite precipitation data in arid regions with machine learning and topographical insights. *Journal of Hydrology*, 653(January). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132801>
- Bal, S. K., Pramod, V. P., Sandeep, V. M., Manikandan, N., Sarath Chandran, M. A., Subba Rao, A. V. M., Vijaya Kumar, P., Vanaja, M., & Singh, V. K. (2023). Identifying appropriate prediction models for estimating hourly temperature over diverse agro-ecological regions of India. *Scientific Reports*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34194-9>
- Bhatti, H., Rientjes, T. H. M., Haile, A. T., Habib, E., & Verhoef, W. (2016). Evaluation of Bias Correction Method for Satellite-Based Rainfall Data. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s16060884>
- Burnama, N. S., Wira Rohmat, F. I., Farid, M., & Wijayasari, W. (2023). Utilization of Quantile Mapping Method Using Cumulative Distribution Function (CDF) to Calibrated Satellite Rainfall GSMaP in Majalaya Watershed. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1165/1/012006>
- Camera, C., Bruggeman, A., Zittis, G., Sofokleous, I., & Arnault, J. (2020). Simulation of Extreme Rainfall and Streamflow Events in Small Mediterranean Watersheds With a One-

- Way-Coupled Atmospheric–hydrologic Modelling System. *Natural Hazards and Earth System Science*.
<https://doi.org/10.5194/nhess-20-2791-2020>
- Dembélé, M., & Zwart, S. J. (2016). Evaluation and Comparison of Satellite-Based Rainfall Products in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Remote Sensing*.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1207258>
- Hariri, K. R. (2022). Increasing Teachers Creativity Through Strengthening Learning Supervision and Achievement Motivation. *JHSS (Journal of Humanities and Social Studies)*.
<https://doi.org/10.33751/jhss.v6i3.6380>
- Iryani, S. Y., Alia, F., Tauhid, M. A., Muhtarom, A., & Usman, A. P. (2022). Utilization of GPM Satellite and PERSIANN Satellite Data for Estimated Monthly Rainfall in South Sumatera. *Ukarst*.
<https://doi.org/10.30737/ukarst.v6i2.3482>
- Jabbari, A., & Bae, D. (2018). Application of Artificial Neural Networks for Accuracy Enhancements of Real-Time Flood Forecasting in the Imjin Basin. *Water*.
<https://doi.org/10.3390/w10111626>
- Kurniadi, A., Weller, E., Min, S., & Seong, M. (2021). Independent <sc>ENSO</sc> and <sc>IOD</sc> impacts on rainfall extremes over Indonesia. *International Journal of Climatology*, 41(6), 3640–3656. <https://doi.org/10.1002/joc.7040>
- Liu, J., Du, J., Yang, Y., & Wang, Y. (2020). Evaluating Extreme Precipitation Estimations Based on the GPM IMERG Products Over the Yangtze River Basin, China. *Geomatics Natural Hazards and Risk*.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1734103>
- Liu, Z., Hou, H., Zhang, L., & Hu, B. (2022). Event-Based Bias Correction of the GPM IMERG V06 Product by Random Forest Method over Mainland China. *Remote Sensing*, 14(16), 3859.
<https://doi.org/10.3390/rs14163859>
- Londhe, D. S., Katpatal, Y. B., & Bokde, N. D. (2023). Performance Assessment of Bias Correction Methods for Precipitation and Temperature From CMIP5 Model Simulation. *Applied Sciences*.
<https://doi.org/10.3390/app13169142>
- Luo, X., Fan, X., Li, Y., & Ji, X. (2020). Bias correction of a gauge-based gridded product to improve extreme precipitation analysis in the Yarlung Tsangpo–Brahmaputra River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2243–2254.
<https://doi.org/10.5194/nhess-20-2243-2020>
- Lyu, X., Li, Z., & Li, X. (2024). Evaluation of GPM IMERG Satellite Precipitation Products in Event-Based Flood Modeling Over the Sunshui River Basin in Southwestern China. *Remote Sensing*.
<https://doi.org/10.3390/rs16132333>
- Mahmood, R., Jia, S., Tripathi, N. K., & Shrestha, S. (2018). Precipitation Extended Linear Scaling Method for Correcting GCM Precipitation and Its Evaluation and Implication in the Transboundary Jhelum River Basin. *Atmosphere*.
<https://doi.org/10.3390/atmos9050160>
- Melsen, L. A., Puy, A., Torfs, P. J. J. F., & Saltelli, A. (2025). The rise of the Nash-Sutcliffe efficiency in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 70(8), 1248–1259.

- <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2475105>
- Ougahi, J. H., & Rowan, J. S. (2024). *Enhancing Streamflow Forecasting in Glacierized Basins: A Hybrid Model Integrating Glacio-Hydrological Outputs, Deep Learning, and Wavelet Transformation*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5296614/v1>
- Pan, X., Wu, H., Chen, S., Nanding, N., Huang, Z., Chen, W., Li, C., & Li, X. (2023). Evaluation and Applicability Analysis of GPM Satellite Precipitation Over Mainland China. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs15112866>
- Ramadhan, R., Marzuki, M., Suryanto, W., Sholihun, S., Yumnaini, H., Hashiguchi, H., & Shimomai, T. (2024). Bias Correction of IMERG Data in the Mountainous Areas of Sumatra Based on a Single Gauge Observation. *Trends in Sciences*. <https://doi.org/10.48048/tis.2024.7592>
- Ramadhan, R., Yumnaini, H., Marzuki, M., Muharsyah, R., Suryanto, W., Sholihun, S., Vonnisa, M., Harmadi, H., Ningsih, A. P., Battaglia, A., Hashiguchi, H., & Tokay, A. (2022). Evaluation of GPM IMERG Performance Using Gauge Data Over Indonesian Maritime Continent at Different Time Scales. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs14051172>
- Ryazanova, A. A., Voropay, N. N., & Dyukarev, E. (2021). Bias-Corrected Monthly Precipitation Data Over South Siberia for 1979-2019. *Data in Brief*. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107440>
- Wang, H., Zhang, Q., & Wang, J. (2023). Spatial variation in soil water on a hillslope with ephemeral gullies restored by different vegetation restoration modes on the Loess Plateau. *CATENA*, 224, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107001>
- Wang, K., He, P. C., Dong, Y., & Chen, L. (2011). The application of Cluster analysis and Inverse Distance-weighted Interpolation to appraising the water quality of Three Forks Lake. *Procedia Environmental Sciences*, 10(PART C), 2511–2517. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.391>
- Xiang Soo, E. Z., Wan Jaafar, W. Z., Lai, S. H., Othman, F., El-Shafie, A., Islam, T., Srivastava, P. K., & Othman Hadi, H. S. (2020). Precision of Raw and Bias-Adjusted Satellite Precipitation Estimations (TRMM, IMERG, CMORPH, and PERSIANN) Over Extreme Flood Events: Case Study in Langat River Basin, Malaysia. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.180>
- Yang, X., Yang, L., Tan, M. L., Li, X., Wang, G., & He, R. (2020). Nine-Year Systematic Evaluation of the GPM and TRMM Precipitation Products in the Shuaishui River Basin in East-Central China. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs12061042>
- Yuan, F., Li-min, Z., Win, K. M., Ren, L., Zhao, C., Zhu, Y., Jiang, S. S., & Liu, Y. (2017). Assessment of GPM and TRMM Multi-Satellite Precipitation Products in Streamflow Simulations in a Data-Sparse Mountainous Watershed in Myanmar. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs9030302>

PEMODELAN SEDIMENTASI DI SUB DAS KEDUANG TAHUN 2022 - 2024: APLIKASI SOIL AND WATER ASSESMENT TOOL (SWAT)

(Sedimentation Modeling in the Keduang Sub-Watershed for 2022- 2024: Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT))

Bandi Sasmito^{1*}, Bambang Darmo Yuwono¹, Candrakanti Cahyaning Putri¹, dan Smilya Sheren Reynalda¹

¹Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Soedarto, S.H., Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275

*Email: bandisasmito@live.undip.ac.id

Diterima: 18 Juni 2025, Direvisi : 22 Oktober 2025, Disetujui : 4 November 2025

ABSTRACT

The Gajah Mungkur Reservoir is a strategic infrastructure that plays a vital role in flood control and the irrigation water supply in Wonogiri and the surrounding areas. However, the reservoir's storage capacity continues to decline due to sedimentation from the surrounding watershed. It experiences an annual increase in sedimentation of approximately 3.2 million m³, with the Keduang Sub-watershed being the main contributor at 40%, or equivalent to 1.2 million m³ per year. This study uses the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to provide a comprehensive overview of sedimentation and hydrological processes in the Keduang Sub-watershed that affect sedimentation during the 2022–2024 period. Data used in this study include Sentinel-2A satellite imagery, Digital Elevation Model (DEM), soil type maps, climate data, and river discharge data. These data are processed using QGIS 3.16 with the QSWAT3 plugin. Simulation results indicate that the SWAT model accurately represents hydrological and sedimentation dynamics, achieving the highest accuracy in 2024 with a coefficient of determination (R^2) of 0.956 and a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.888. During the study period, the sedimentation rate significantly increased, reaching a peak sediment yield of 119,543.18 tons per hectare in 2023 and a maximum sediment accumulation of 86,030 tons at the outlet in 2024. The increase in sedimentation was triggered by landcover conversion for residential areas and reduced forest cover, which led to increased surface runoff and decreased infiltration.

Keywords: *hydrology; watershed; landcover change; sedimentation; soil and water assessment tool*

ABSTRAK

Waduk Gajah Mungkur merupakan infrastruktur strategis yang berperan penting dalam pengendalian banjir, dan penyediaan air irigasi di Wonogiri dan sekitarnya. Namun, kapasitas tampung waduk terus menurun akibat sedimentasi dari Daerah Aliran Sungai (DAS) dan lokasi sekitarnya. Waduk Gajah Mungkur mengalami peningkatan sedimentasi sebesar 3,2 juta m³ per tahun dengan Sub DAS Keduang menjadi kontributor utama sebesar 40% atau setara 1,2 juta m³ per tahun. Penelitian ini menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai sedimentasi dan proses hidrologi di Sub DAS Keduang yang mempengaruhi proses sedimentasi selama periode 2022–2024. Data yang digunakan meliputi citra satelit Sentinel-2A, *Digital Elevation Model* (DEM), peta jenis tanah, data iklim, dan data debit sungai, yang diolah melalui QGIS 3.16 dengan *plugin* QSWAT3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model SWAT mampu merepresentasikan dinamika hidrologi dan sedimentasi dengan akurasi tertinggi pada tahun 2024 dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,956 dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) sebesar 0,888. Selama periode penelitian, laju sedimentasi meningkat signifikan, dengan *sediment yield* tertinggi sebesar 119.543,18 ton/ha pada tahun 2023 dan akumulasi sedimentasi tertinggi di *outlet* sebesar 86.030 ton pada tahun 2024. Peningkatan sedimentasi ini dipicu oleh alih fungsi lahan menjadi permukiman dan berkurangnya tutupan hutan, yang menyebabkan peningkatan limpasan permukaan dan penurunan infiltrasi.

Kata kunci: hidrologi; daerah aliran sungai; alih fungsi lahan; sedimentasi; *soil and water assessment tool*

I. PENDAHULUAN

Sedimentasi merupakan salah satu permasalahan penting dalam pengelolaan sumber daya air di Indonesia. Fenomena ini tidak hanya menyebabkan berkurangnya kapasitas tampung waduk (Asdak, 2010) tetapi juga memicu peningkatan risiko banjir di daerah hilir serta menurunkan efektivitas waduk dalam menyediakan air untuk irigasi dan pembangkit listrik tenaga air (Hasnawir, 2012; Wahidin, 2020). Salah satu contoh nyata adalah Waduk Gajah Mungkur yang memegang peran krusial sebagai penyedia pembangkit listrik tenaga air (PLTA), sumber irigasi untuk pertanian, destinasi pariwisata, dan pengembangan budidaya perikanan (Purnamasari *et al.*, 2021). Namun, manfaat multi-sektor ini

terancam oleh masalah serius pendangkalan yang disebabkan oleh tingginya laju sedimentasi yang masuk ke waduk, terutama dari Sub DAS Keduang (Hadi dan Wibowo, 2018). Ancaman ini telah diakui oleh pemerintah sebagai masalah yang memerlukan penanganan segera, seperti dengan pembangunan sabo dam untuk mengurangi laju sedimentasi (Kementerian PUPR, 2021). Tingkat sedimentasi di Waduk Gajah Mungkur sangat tinggi, mencapai sekitar 3,2 juta meter kubik per tahun (Hadi dan Wibowo, 2018). Kontributor utama sedimentasi tersebut adalah Sub DAS Keduang, yang menyumbang sekitar 40% dari total volume sedimen (Kementerian PUPR, 2021) Kondisi ini mempercepat

pendangkalan waduk dan berpotensi mengurangi umur teknis waduk yang dirancang untuk 100 tahun (Aisy *et al.*, 2023).

Sub DAS Keduang mengalami degradasi lahan yang signifikan, yang diperparah oleh perubahan penggunaan lahan dan aktivitas pertanian yang tidak terkendali, terutama pada lahan dengan kemiringan curam (Aisy *et al.*, 2023). Jika tidak segera ditangani, sedimentasi ini dapat menurunkan kapasitas tampung waduk dan mengurangi efektivitasnya dalam pengendalian banjir dan penyediaan air (Wahidin, 2020).

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menganalisis sedimentasi dan kondisi hidrologi di suatu DAS adalah pemodelan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). SWAT merupakan model berbasis fisik yang mampu mensimulasikan proses hidrologi, erosi, dan sedimentasi secara spasial dan temporal (Neitsch *et al.*, 2011). Model ini juga efektif untuk mengevaluasi dampak perubahan penggunaan lahan dan aktivitas manusia terhadap keseimbangan air dan sedimen di DAS (Lin *et al.*, 2020). Kinerja dan akurasi model SWAT itu sendiri dapat dioptimalkan melalui integrasi data meteorologi yang lebih komprehensif dan teknik penskalaan DAS (Polanco *et al.*, 2017). Kepercayaan terhadap hasil model SWAT telah divalidasi dalam berbagai penelitian, termasuk dengan menggunakan statistik Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) yang menunjukkan hasil yang memuaskan (Motovilov, 1999; Nash dan Sutcliffe, 1970). Aplikasi SWAT untuk prediksi umur waduk (reservoir lifespan) telah sukses dilakukan di berbagai belahan dunia, seperti untuk memprediksi laju

sedimentasi Waduk Nekemte di Ethiopia (Banti *et al.*, 2020) dan mengevaluasi efektivitas praktik konservasi di Waduk Adaena, Ghana (Kumi *et al.*, 2022). Di Indonesia, model ini juga telah diaplikasikan untuk kajian sedimentasi di Waduk Jatibarang (Herlambang *et al.*, 2021), analisis fungsi hidrologi dan sedimentasi di DAS Ngrancah (Ramadhan, 2020), dan Danau Tondano (Rombang *et al.*, 2022). Melihat keberhasilan aplikasi tersebut, penerapan model SWAT untuk mensimulasikan laju sedimentasi dan memprediksi umur guna Waduk Gajah Mungkur, dengan fokus pada kontributor utama yaitu Sub DAS Keduang, menjadi sangat penting dan mendesak untuk dilakukan. Hasil penelitian ini akan memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi perencanaan strategis dan implementasi kebijakan konservasi yang tepat sasaran guna menyelamatkan fungsi strategis waduk.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai sedimentasi dan proses hidrologi di Sub DAS Keduang yang mempengaruhi proses sedimentasi selama periode 2022–2024 menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar perencanaan dan strategi mitigasi sedimentasi guna mendukung keberlanjutan fungsi Waduk Gajah Mungkur, Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah.

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi

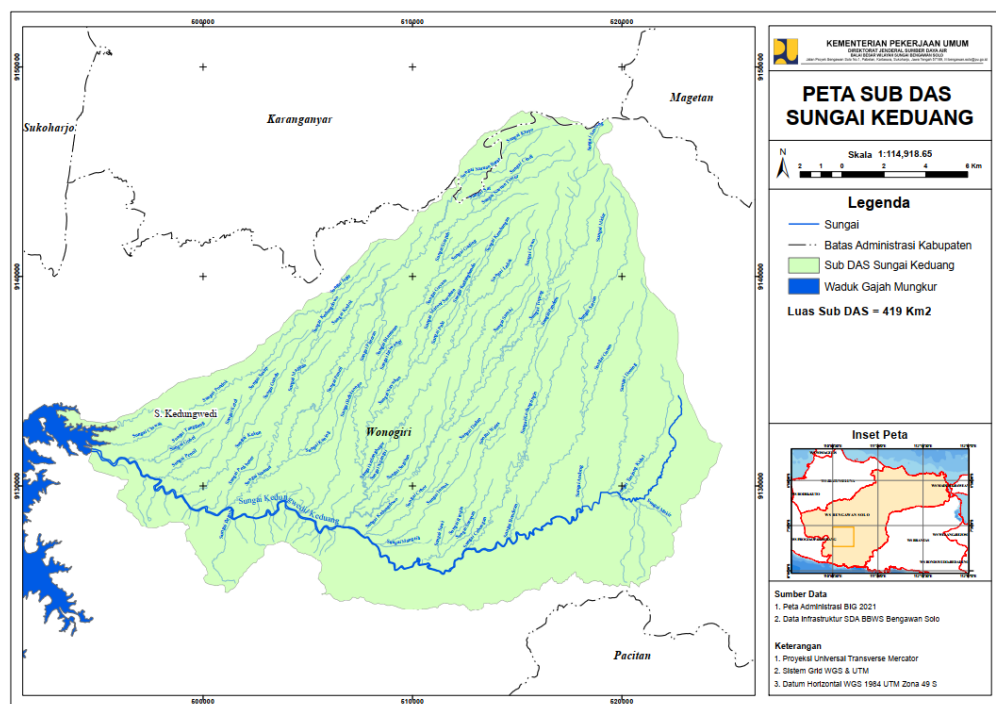
Penelitian ini dilakukan untuk periode tahun 2022 hingga 2024 di Sub Daerah

Aliran Sungai (Sub DAS) Keduang, yang merupakan bagian dari DAS Bengawan Solo yang terletak di Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia. DAS ini dikenal sebagai sungai terpanjang di Jawa Tengah dengan luas wilayah sekitar ±16.100 km² dan panjang total sungai sekitar ±600 Km yang terletak di bagian tenggara Jawa Tengah. Lokasi geografis Sub DAS Keduang adalah 7°40' - 7°56' LS dan 110°56' - 111°10' BT. Sub DAS Keduang memiliki luas 419 km² dan secara administratif mencakup dua kabupaten,

yaitu Kabupaten Wonogiri dan Kabupaten Karanganyar. Gambar 1 adalah peta lokasi penelitian Sub DAS Keduang.

B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data spasial dan data klimatologi yang dibutuhkan untuk menjalankan model SWAT, disajikan pada Tabel 1. Alat yang digunakan dalam pengolahan data dan pemodelan meliputi Perangkat Lunak QGIS (Quantum GIS) versi 3.16.16, dan Perangkat Lunak QSWAT3.



Gambar (Figure) 1. Lokasi Penelitian Sub DAS Keduang (*Keduang Sub-watershed Research Location*)
Sumber (Source): Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo

Tabel (Table) 1. Data Penelitian (*Research data*)

No.	Data (data)	Sumber (Source)
1.	Data DEM resolusi spasial 8,23 m wilayah Sub DAS Keduang	DEMNAS
2.	Peta tutupan lahan tahun 2022-2024 skala 1 : 20.000	Citra Sentinel 2-A
3.	Data iklim tahun 2022-2024 di Wilayah Sub DAS Keduang	BBWS Bengawan Solo
4.	Peta administrasi wilayah Sub DAS Keduang skala 1:50.000	BBWS Bengawan Solo
5.	Data Debit Sungai Tahun 2022-2024 di aliran sungai <i>outlet</i> Sub DAS Keduang	BBWS Bengawan Solo
6.	Peta Jenis Tanah skala 1 : 150.000	BPDAS Solo

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data processing 2025*)

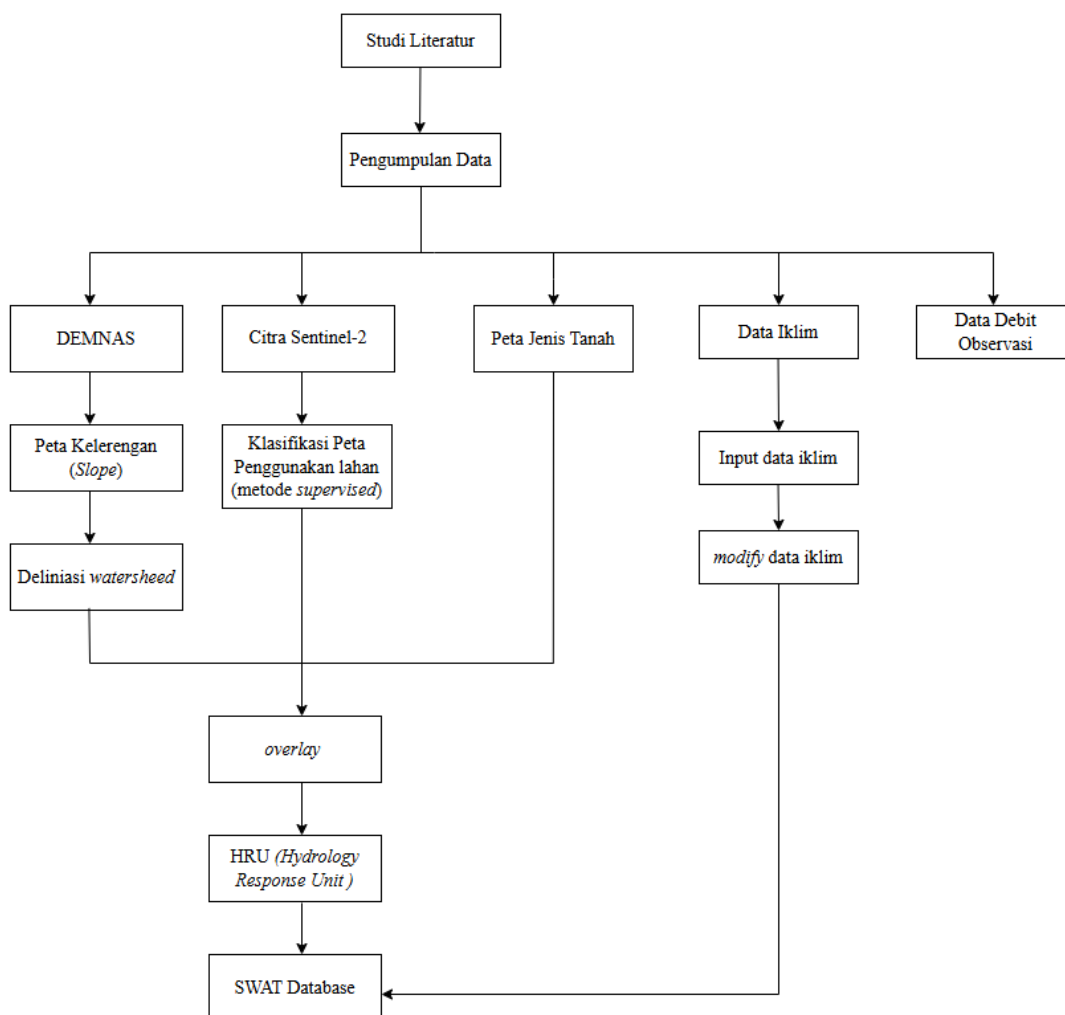
C. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode pemodelan hidrologi dan sedimentasi berbasis *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) yang diintegrasikan dalam platform QSWAT3 pada perangkat lunak QGIS. Tahapan penelitian secara umum meliputi:

1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan terdiri dari DEM untuk mendapatkan informasi topografi bentuk wilayah DAS, citra satelit Sentinel-2 tahun 2022-2024

untuk memperoleh penggunaan lahan secara spasial dan temporal, peta jenis tanah untuk mengetahui karakteristik distribusi tanah yang mempengaruhi proses sedimentasi, data iklim harian, dan data debit sungai. Data iklim yang digunakan mencakup curah hujan, temperatur, kecepatan angin, kelembapan, dan radiasi matahari yang digunakan untuk mendapatkan hasil proses hidrologi (Neitsch *et al.*, 2011), seperti tersaji pada Gambar 2.



Gambar (Figure) 2. Diagram Alir Pengumpulan dan Pengolahan Data (Data Collection and Processing Flowchart)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Pengolahan data parameter dalam SWAT meliputi:

a. Pengolahan Data Penggunaan Lahan

Pengolahan data penggunaan lahan dilakukan untuk mendapatkan peta tutupan lahan yang akurat sebagai *input* utama dalam model SWAT. Proses ini diawali dengan tahapan *pre-processing* citra Sentinel-2 yang bertujuan memperbaiki kualitas data citra, seperti koreksi geometrik dan koreksi atmosferis. Setelah itu, dilakukan pembuatan *training sample* dengan cara memilih contoh piksel yang mewakili masing-masing kelas tutupan lahan, seperti sawah, hutan, pemukiman, perkebunan, sungai, dan lahan terbuka (Neitsch *et al.*, 2011). Klasifikasi citra dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest*, yaitu metode berbasis *machine learning* yang memiliki tingkat akurasi tinggi dalam pengolahan citra. Hasil klasifikasi kemudian diuji akurasinya menggunakan matriks konfusi untuk mengetahui tingkat ketepatan klasifikasi dan nilai Kappa.

b. Pengolahan Data Topografi dan Jenis Tanah

Data topografi dan jenis tanah yang telah dikumpulkan kemudian diolah lebih lanjut untuk keperluan pemodelan. Data DEM digunakan untuk delineasi Daerah Aliran Sungai (DAS), yang

mencakup penentuan batas DAS, identifikasi jaringan aliran, serta pembentukan sub-DAS. Selain itu, dilakukan analisis kemiringan lereng yang dibagi ke dalam beberapa kelas untuk melihat variasi tingkat kemiringan lereng yang mempengaruhi potensi erosi. Peta jenis tanah yang semula berbentuk vektor dikonversi ke dalam format raster agar dapat dibaca dan digunakan dalam sistem SWAT. Proses ini penting karena karakteristik tanah berpengaruh pada kemampuan tanah dalam menyerap air dan mengontrol laju limpasan permukaan.

c. Penyusunan Parameter SWAT

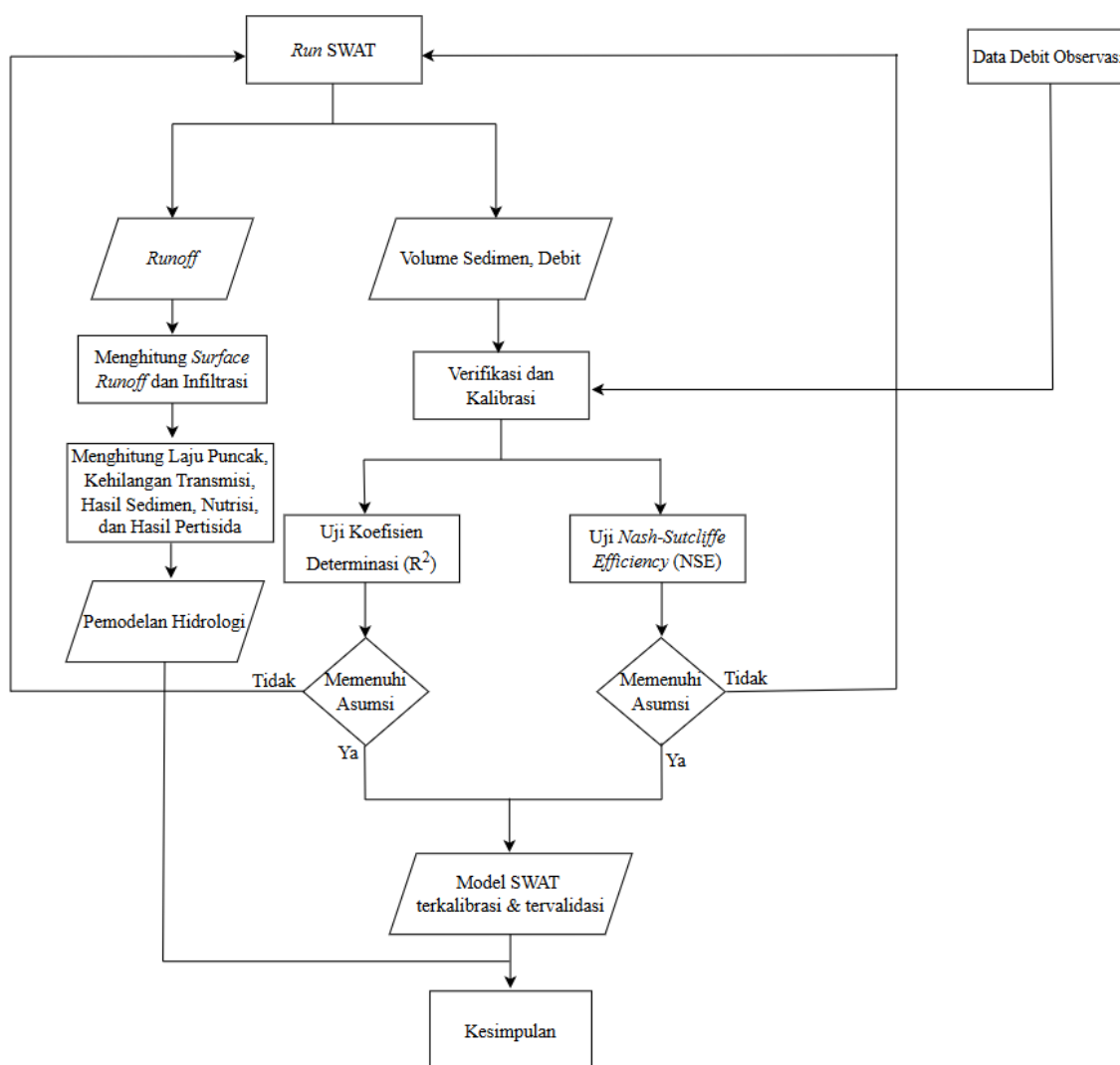
Langkah selanjutnya menyusun parameter SWAT dengan membentuk *Hydrologic Response Unit* (HRU). HRU merupakan kombinasi unik dari penggunaan lahan, jenis tanah, dan kelas kemiringan lereng yang merepresentasikan unit terkecil dalam pemodelan. Peta penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng diintegrasikan untuk membentuk HRU yang menjadi dasar perhitungan debit dan sedimentasi di masing-masing sub-DAS. Data iklim harian yang telah dikonversi ke dalam format *.txt* lalu *input* ke dalam *data base* SWAT untuk memberikan informasi cuaca harian yang mempengaruhi proses hidrologi,

seperti presipitasi, evaporasi, dan aliran permukaan.

2. Simulasi Model SWAT

Model SWAT dijalankan untuk periode 2022–2024 dengan memanfaatkan seluruh data yang telah disiapkan (Gambar 3). Model ini digunakan untuk mensimulasikan debit aliran (*streamflow*), *sediment yield* (total sedimen yang terangkut hingga ke outlet sub-DAS), dan *sediment out*

(*load* sedimen yang keluar dari outlet utama DAS setelah mengalami proses deposisi dan transportasi di jaringan sungai). Hasil simulasi ini memberikan gambaran tentang kondisi hidrologi dan pola sedimentasi yang terjadi di Sub DAS Keduang selama periode penelitian. Simulasi yang dihasilkan menjadi analisis dan evaluasi performa model (Neitsch *et al.*, 2011).



Gambar (Figure) 3. Diagram Alir Pengolahan SWAT (SWAT Processing Flowchart)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Rumus *sediment yield* :

$$Sed = 11,8 (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0,56} \times K_{USLE} \times LS_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times CFR \quad (1)$$

Keterangan (*remarks*):

- Sed : Sediment *yield* (ton/ha/waktu)
- Q_{surf} : Volume *limpasan* permukaan (mm H₂O/hari)
- q_{peak} : Laju *limpasan* puncak (m³/s)
- $area_{hru}$: Luas HRU(ha)
- 11,8 : Faktor konversi satuan untuk menghasilkan *output* dalam ton
- 0,56 : Eksponen empiris yang digunakan untuk menghitung hubungan non-linear antara Q_{surf} , q_{peak} , $area_{hru}$
- K_{USLE} : Faktor erodibilitas tanah
- LS_{USLE} : Faktor panjang dan kemiringan lereng
- C_{USLE} : Faktor penggunaan lahan dan pengelolaan tanaman
- P_{USLE} : Faktor praktik konservasi
- CFRG : Faktor fragmen kasar

Rumus *sediment out* :

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (2)$$

Keterangan (*remarks*):

- sed_{out} : sedimen yang diangkut keluar dari suatu aliran (ton)
- sed_{ch} : Jumlah sedimen tersuspensi di dalam suatu aliran (ton),
- V_{out} : Volume aliran keluar dalam suatu waktu (m³ H₂O),
- V_{ch} : Volume air di segmen aliran (m³ H₂O).

3. Validasi Model

Hasil simulasi debit dari model SWAT diverifikasi dengan data debit observasi menggunakan koefisien determinasi (R²) dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) untuk mengukur tingkat akurasi model. Uji koefisien Determinan merupakan suatu ukuran dalam analisis regresi yang menunjukkan besaran variabel independen yang mampu menjelaskan variabel dependen (Zaka dan Sutopo, 2017). R² mengukur seberapa baik

variabel independen dapat menjelaskan variasi dalam variabel dependen. Nilai R² berkisar antara 0 hingga 1, dimana nilai yang lebih tinggi dapat menunjukkan bahwa model regresi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menjelaskan variasi data.

Rumus Koefisien Determinasi (R²):

$$R^2 = \frac{(x-\bar{x})^2 - (x-y)^2}{(x-\bar{x})^2} \quad (3)$$

Keterangan (*remarks*):

- x = Data observasi
- \bar{x} = Data observasi rata-rata
- y = Data simulasi dari model

Uji *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi model dalam memprediksi data, khususnya dalam konteks hidrologi dan pengelolaan sumber daya air. NSE memberikan ukuran seberapa baik prediksi model mendekati nilai observasi aktual (Nash dan Sutcliffe, 1970). Uji NSE mengacu pada penelitian (Sujarwo *et al.*, 2020).

Rumus *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sin,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

Keterangan (*remarks*):

- $Q_{obs,t}$: nilai observasi pada waktu t
- $Q_{sin,t}$: nilai simulasi pada waktu t
- \bar{Q}_{obs} : rata-rata nilai observasi

Kategori NSE dibagi menjadi tiga, antara lain NSE = 1 sebagai model sempurna yang sesuai dengan

observasi, $NSE = 0$ sebagai model tidak lebih baik dari rata-rata observasi, dan $NSE < 0$ sebagai model lebih buruk dari rata-rata observasi. Nilai efisiensi NSE dikelompokkan menjadi 3 kelas yang terdapat pada Tabel 2.

Tabel (Table) 2. Nilai Efisiensi NSE (*NSE value*)

Nilai NSE (<i>NSE values</i>)	Kategori (<i>Categories</i>)
$NSE > 0,75$	Sangat Memuaskan
$0,36 < NSE < 0,75$	Memuaskan
$NSE < 0,36$	Tidak Memuaskan

Sumber (Source): Motovilov, 1999

4. Optimasi Hasil Pemodelan

Hasil simulasi yang sudah terbentuk akan dikalibrasi dengan parameter CN (*curve number*) untuk mendapatkan hasil pemodelan yang mendekati dengan hasil observasi. Menurut Neitsch (2011), nilai CN berpengaruh terhadap tiga parameter yaitu *landuse*, *slope*, dan *soil type* yang berperan penting dalam menentukan tingkat akurasi dan hasil keseluruhan pemodelan. Nilai *curve number* menjadi acuan dalam proses kalibrasi model yang dapat dilihat pada hasil pemodelan hidrologi. Nilai CN memiliki rentang dari 0 – 100. Apabila nilai CN semakin mendekati 100 maka pemodelan hidrologi lebih banyak berada proses *runoff*, sedangkan apabila mendekati 0 maka proses hidrologi lebih banyak terinfiltrasi.

5. Analisis Data

Tahapan terakhir melakukan analisis hasil simulasi yang telah dikalibrasi dan divalidasi. Analisis difokuskan pada sebaran spasial sedimentasi di

wilayah Sub DAS, laju sedimentasi tahunan, serta evaluasi hubungan antara debit hasil simulasi dan debit observasi untuk mengukur performa model. Selain itu, dilakukan analisis keterkaitan antara *sediment yield* dan *sediment out* untuk mengetahui seberapa besar sedimen yang terangkut dari wilayah sub-DAS menuju *outlet* utama. Hasil analisis ini memberikan proses sedimentasi yang terjadi di Sub DAS Keduang selama periode tahun 2022-2024.

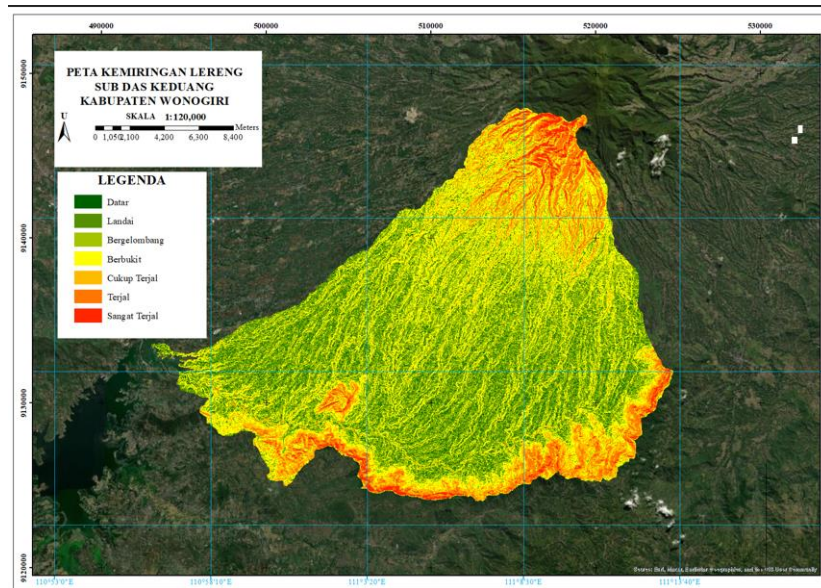
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Sub DAS Keduang

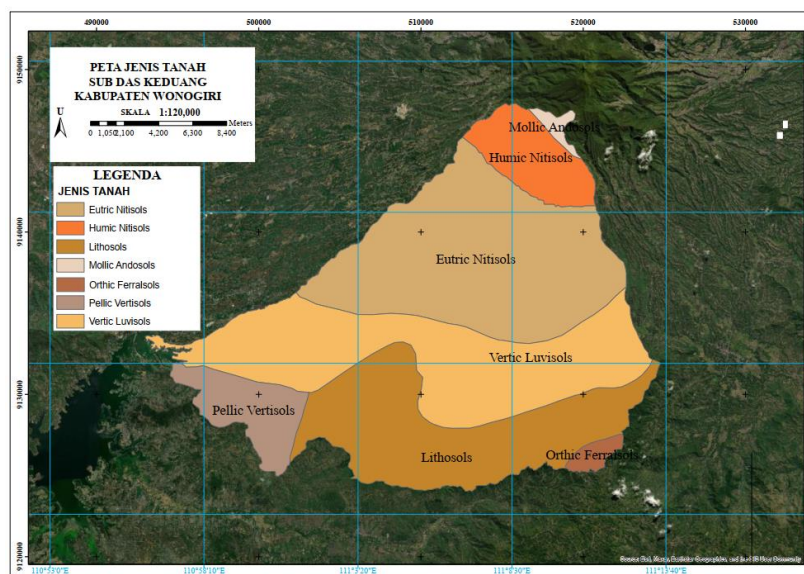
Sub DAS Keduang memiliki karakteristik kemiringan lereng yang mempengaruhi laju sedimentasi. Karakteristik kemiringan lereng di dominasi pada kelas agak miring dengan luas 12401,93 Ha, untuk kelas berbukit seluas 10808,03 Ha, kelas berombak seluas 8507,16 Ha, kelas cukup terjal seluas 4356,89 Ha, kelas terjal seluas 2857,05 Ha, kelas datar seluas 2,197,57 Ha, dan kelas sangat terjal seluas 742,05 Ha. Hasil peta kemiringan lereng divisualisasikan dengan gradasi warna yang merepresentasikan tingkat kemiringan lahan. Warna pada peta berkorelasi dengan kelas kemiringan, dimana area berwarna hijau cenderung mewakili kelas datar hingga agak miring, kuning mewakili kelas berbukit hingga cukup terjal, dan merah mengindikasikan kelas terjal hingga sangat terjal. Berdasarkan interpretasi visual dari peta kemiringan lereng pada Gambar 4, dapat diidentifikasi distribusi kelas kemiringan lereng di Sub DAS Keduang.

Karakteristik jenis tanah di wilayah Sub DAS Keduang didominasi oleh *eutric nitisols* sebesar 33,30% yang berpotensi baik untuk pertanian dan kehutanan karena drainase baik, struktur stabil, dan kesuburan sedang hingga tinggi. Luasan signifikan juga dimiliki *vertic luvisols* sebesar 28,87% dengan kandungan liat tinggi yang mempengaruhi air dan drainase, serta *lithosols* sebesar yang

merupakan area tanah tipis dan berbatu. Jenis tanah lain seperti *mollic andosols* dan *orthic ferralsols* memiliki luasan lebih kecil, namun keseluruhan keberagaman ini mencerminkan variasi karakteristik fisik dan kimia tanah yang perlu dipertimbangkan dalam pengelolaan lahan dan sumber daya alam di Sub DAS Keduang. Peta jenis tanah Sub DAS Keduang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar (Figure) 4. Peta Kemiringan Lereng Sub DAS Keduang (Slope Map of Keduang Sub-watershed) Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



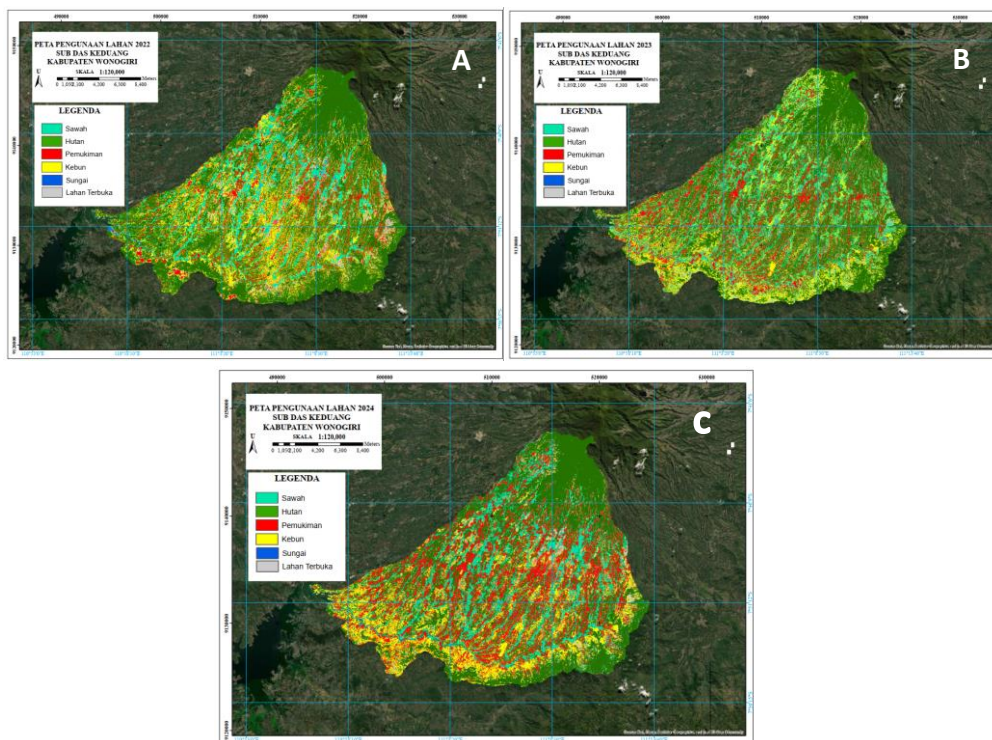
Gambar (Figure) 5. Peta Jenis Tanah Sub DAS Keduang (Soil Map of Keduang Sub-watershed) Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Perubahan penggunaan lahan memengaruhi karakteristik wilayah Sub DAS Keduang. Berdasarkan hasil klasifikasi citra tahun 2022 yang disesuaikan dengan klasifikasi resmi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), tutupan lahan di wilayah ini didominasi oleh kelas vegetasi berkayu yang teridentifikasi sebagai hutan dengan luas sekitar 21.919,44 hektar. Kelas tersebut mencakup berbagai bentuk tutupan vegetasi seperti hutan rakyat dan kebun campuran yang memiliki karakteristik menyerupai hutan, sehingga luas totalnya lebih besar dibandingkan dengan data tutupan hutan resmi dari KLHK atau BPDAS Solo. Pada tahun 2023 mengalami peningkatan tutupan lahan yang pesat pada permukiman sebesar 7603,67 hektar dan penurunan pada luasan hutan menjadi

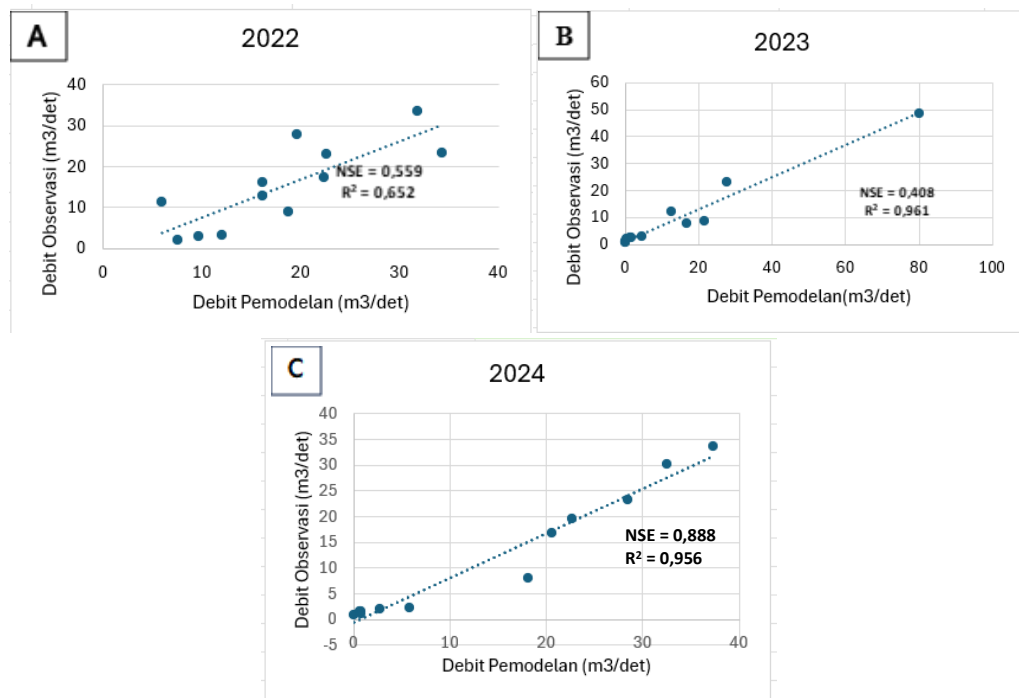
19670,38 hektar. Sedangkan pada tahun 2024 terjadi peningkatan tutupan lahan pada permukiman sebesar 9636,08 hektar dan penurunan pada hutan sebesar 17008,89 hektar. Hasil peta tutupan lahan tahun 2022-2024 di Sub DAS Keduang dapat dilihat pada Gambar 6.

2. Hasil Validasi dan Verifikasi Model SWAT

Validasi dan verifikasi model dilakukan untuk memastikan kesesuaian hasil pemodelan SWAT dengan data debit observasi di lapangan. Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan dua parameter statistik yaitu koefisien determinasi (R^2) dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE). Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai R^2 dan NSE pada Gambar 7.



Gambar (Figure) 6. Peta Tutupan Lahan: (a) tahun 2022; (b) tahun 2023; dan (c) tahun 2024 (Landcover Maps: (a) year 2022; (b) year 2023; and (c) year 2024)
Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



Gambar (Figure) 7. Hasil Uji R^2 dan NSE: (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (R^2 and NSE Test Results: (a) year 2022; (b) year 2023; and (c) year 2024)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Hasil analisis menunjukkan bahwa kinerja model SWAT bervariasi setiap tahun. Pada 2022, nilai R^2 sebesar 0,652 dan NSE 0,559 menunjukkan hubungan linier yang cukup baik dengan akurasi moderat. Tahun 2023, R^2 meningkat menjadi 0,961, tetapi NSE menurun menjadi 0,408, mengindikasikan hubungan linier kuat namun akurasi prediksi menurun. Kinerja terbaik dicapai pada 2024 dengan R^2 sebesar 0,956 dan NSE 0,888, menunjukkan hubungan linier yang kuat dan akurasi tinggi. Variasi ini dipengaruhi oleh proses kalibrasi nilai *Curve Number* (CN), yang berpengaruh pada hasil pemodelan. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Rombang (2022), menyatakan bahwa penggunaan R^2 dan NSE secara bersamaan penting karena masing-masing mengukur kekuatan hubungan linier dan tingkat akurasi model secara menyeluruh.

3. Hasil Optimasi Pemodelan

Pemodelan sedimentasi yang terbentuk dalam SWAT akan menghasilkan nilai *Curve Number* (CN). Nilai CN ini digunakan untuk mengoptimalkan hasil pemodelan. Hasil kalibrasi yang telah dilakukan terdapat perubahan nilai *curve number*. CN dalam perhitungan parameter retensi (S) mempengaruhi kemampuan tanah dan penutup lahan untuk menyerap air sebelum terjadi limpasan yang dipengaruhi oleh jenis tanah, penggunaan lahan, manajemen lahan, kemiringan, dan kadar air tanah. Sehingga, nilai CN berpengaruh terhadap tiga parameter yaitu *landuse*, *slope*, dan *soil type* yang berperan penting dalam menentukan tingkat akurasi dan hasil keseluruhan pemodelan. Tahap kalibrasi model dilakukan menggunakan data observasi debit bulanan dan hasil data simulasi model debit yang didapat dari

pemodelan SWAT. Pada tahun 2022 memiliki nilai CN sesudah kalibrasi sebesar 42,94 dimana sesuai dengan siklus hidrologi air lebih banyak terinfiltrasi ke dalam tanah. Sedangkan tahun 2023 dengan nilai CN sesudah kalibrasi 79,84 lebih banyak proses *surface runoff*, dan tahun 2024 memiliki nilai CN 80,33 sesuai dengan siklus hidrologi air yang lebih banyak pada proses *surface runoff*. Perubahan nilai CN ini menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan hasil pemodelan yang sesuai. Perubahan nilai CN terdapat pada Tabel 3.

4. Hasil Pemodelan Laju Sedimentasi

Laju sedimentasi (*sediment yield*) menunjukkan jumlah sedimen yang terangkut hingga ke outlet sub-DAS (Tatipata *et al.*, 2015). Hasil pemodelan *sediment yield* di Sub DAS Keduang selama tahun 2022-2024 terdapat pada Gambar 8 dan Gambar 9.

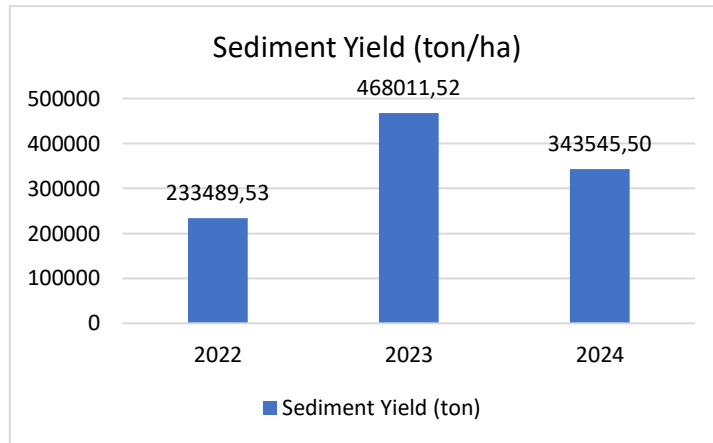
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa laju sedimen di Sub DAS Keduang mengalami peningkatan selama periode 2022–2024, dengan puncaknya pada tahun 2023 sebesar 468.011,52 ton/ha. Peningkatan ini disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan, khususnya perluasan area permukiman dan penurunan tutupan hutan yang

mengurangi kemampuan infiltrasi dan meningkatkan limpasan permukaan. Sebaliknya, laju sedimen terendah tercatat pada tahun 2022 sebesar 233.489,53 ton/ha, saat tutupan lahan masih didominasi oleh hutan yang mampu menahan limpasan dan menekan erosi. Penurunan *sediment yield* pada tahun 2024 dibandingkan tahun 2023 terutama dipengaruhi oleh perubahan data tutupan lahan. Dominannya pengaruh positif dari perubahan lain ditunjukkan oleh berkurangnya signifikan lahan terbuka yang memiliki kerentanan erosi sangat tinggi. Selain itu, peningkatan luas sawah memberikan kontribusi positif melalui peran vegetasinya dalam menahan butiran tanah dan memperlambat aliran permukaan, serta kemampuannya sebagai area resapan. Meskipun secara umum permukiman cenderung meningkatkan aliran permukaan akibat sifat permukaannya yang kedap air, peningkatan luas permukiman dalam simulasi ini diduga tidak cukup signifikan untuk mengimbangi pengaruh penurunan lahan terbuka dan penambahan sawah. Dengan demikian, perubahan komposit tutupan lahan ini secara keseluruhan berdampak pada penurunan potensi erosi dan *sediment yield*.

Tabel (Table) 3. Perubahan Nilai CN Optimasi Pemodelan (*Changes in CN Values Optimization Modeling*)

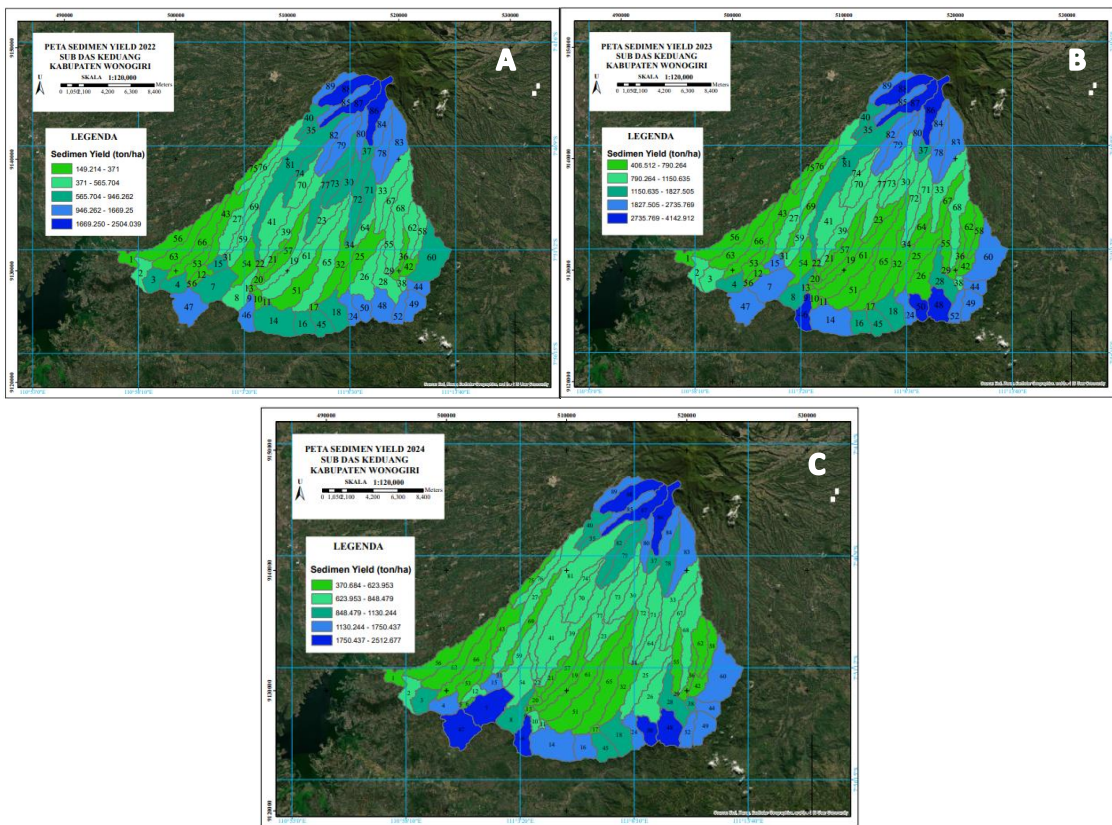
Tahun (year)	Nilai CN Sebelum Kalibrasi (CN Value Before Calibration)	Nilai CN Setelah Kalibrasi (CN Value After Calibration)
2022	79,32	42,94
2023	77,91	79,84
2024	80,33	80,33

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)



Gambar (Figure) 8. Grafik Hasil *Sediment Yield* Sub DAS Keduang (*Sediment Yield Graph of Keduang Sub-watershed*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)



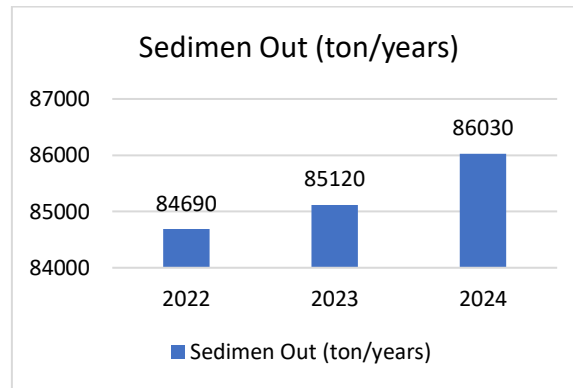
Gambar (Figure) 9. Peta *Sediment Yield* Sub DAS Keduang: (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (*Sediment Yield Map of the Keduang Sub-DAS in (a) 2022; (b) 2023; and (c) 2024*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)

5. Hasil Pemodelan Sedimentasi di *Outlet*

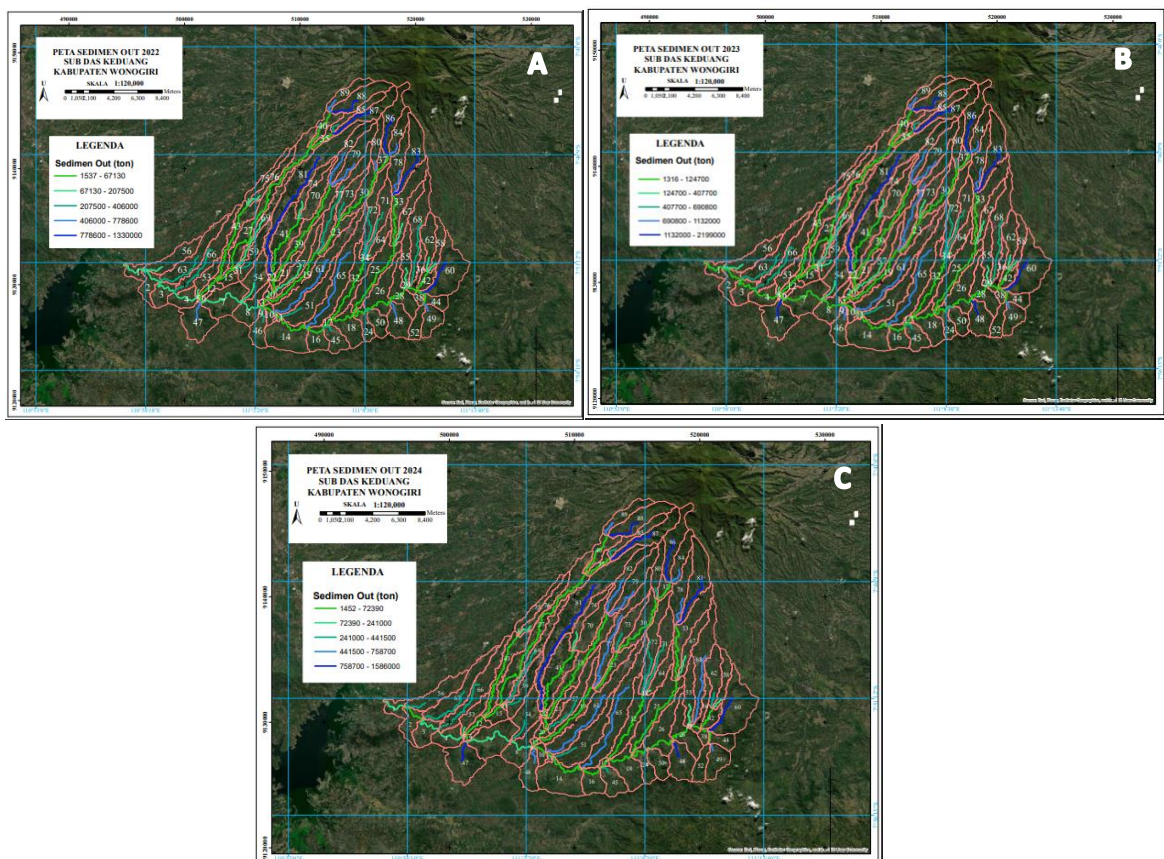
Sediment out menunjukkan jumlah sedimen yang keluar dari outlet utama DAS setelah mengalami proses deposisi dan

transportasi di jaringan sungai (Wijayanto, 2013). Hasil pemodelan *Sediment out* selama periode 2022-2024 terdapat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar (Figure) 10. Grafik Hasil *Sediment Out* Sub DAS Keduang (*Sediment Out Result Graph for Keduang Sub-watershed*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)



Gambar (Figure) 11. Peta *Sediment Out* Sub DAS Keduang : (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (*Sediment Out Map of the Keduang Sub-DAS in : (a) 2022; (b) 2023; and (c) 2024*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)

Hasil pemodelan sedimentasi di Sub DAS Keduang menunjukkan peningkatan dari tahun 2022 hingga 2024. Sedimentasi tertinggi terjadi pada tahun 2024 sebesar

86.030 ton, dipengaruhi oleh perluasan permukiman dan curah hujan tinggi yang meningkatkan pengangkutan sedimen ke *outlet*. Sedimentasi terendah tercatat pada

tahun 2022 sebesar 84.690 ton, disebabkan oleh dominasi tutupan hutan yang meningkatkan infiltrasi dan menurunkan ketahanan erosi lahan.

6. Hubungan Perubahan *Sediment Yield* Terhadap *Sediment Out*

Berdasarkan hasil pemodelan *sediment yield* dan *sediment out* dengan metode SWAT maka dapat diketahui perbandingan pola transportasi sedimen yang terjadi pada Sub DAS Keduang. Sebelumnya, perlu dilakukan konversi satuan *sediment yield* (ton/hektar) ke satuan massa dalam ton untuk menyesuaikan satuan *sediment out*, dengan cara mengalikan nilai *sediment yield* dengan luasan Sub DAS Keduang (hektar). Pada Tabel 4 dan Gambar 12 dapat dilihat perbandingan nilai antara

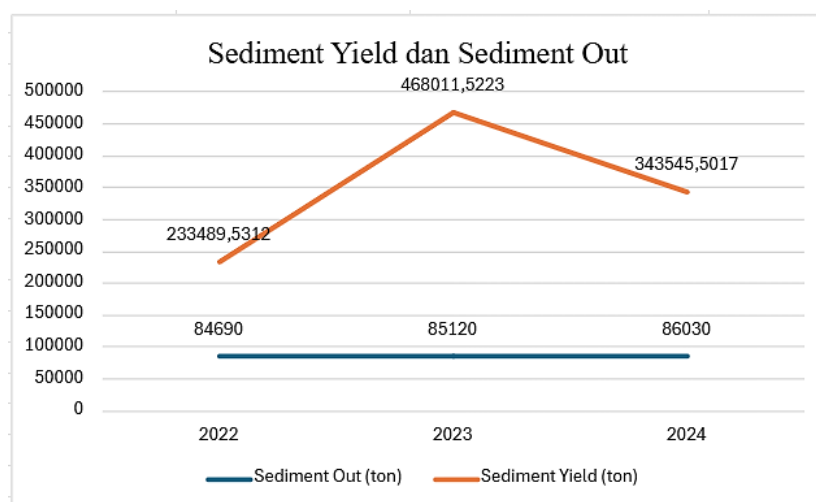
sediment yield, *sediment out*, presipitasi, dan hasil debit pemodelan.

Berdasarkan Gambar 12, terdapat perbedaan pola peningkatan sedimentasi antara *sediment yield* dan *sediment out* tahun 2022-2024. Pada hasil *sediment yield* terjadi peningkatan pesat pada tahun 2023 sedangkan *sediment out* terjadi peningkatan yang stabil dari tahun 2022 sampai 2024. Peningkatan *sediment yield* pada 2023 terjadi meskipun curah hujan dan debit menurun dibandingkan tahun 2022. Kondisi ini menunjukkan bahwa kenaikan suplai sedimen tidak semata-mata disebabkan oleh faktor hidrologis, melainkan oleh peningkatan erosi di hulu akibat perubahan penggunaan lahan dan menurunnya tutupan vegetasi.

Tabel (Table) 4. Hubungan *Sediment Yield* dan *Sediment Out* (Relationship between *Sediment Yield* and *Sediment Out*)

Tahun (Year)	<i>Sediment Yield</i> (ton)	<i>Sediment Out</i> (ton)	Presipitasi (Precipitation) (mm)	Debit Pemodelan (Modelling debit) (m ³ /detik)
2022	233489,53	84690	2700	18,04
2023	468011,52	85120	1862	14,31
2024	343545,50	86030	2343,5	14,30

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



Gambar 12. Pola Hubungan *Sediment Yield* dan *Sediment Out*

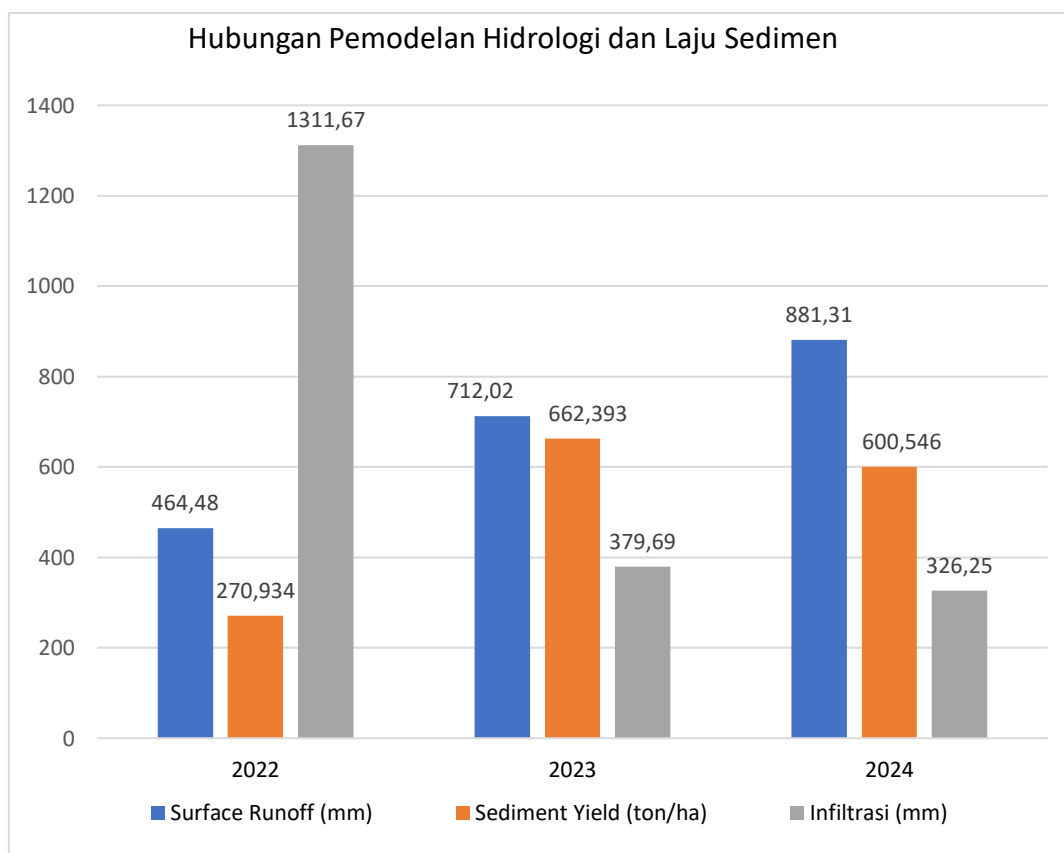
Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Hasil ini sejalan dengan temuan Neitsch *et al.* (2011) bahwa sediment yield pada SWAT sangat sensitif terhadap kondisi lahan dan faktor sumber sedimen, sementara sediment out lebih dipengaruhi oleh proses transportasi dan deposisi di sepanjang saluran. Perbedaan ini terjadi karena sedimen yang dihasilkan dari proses erosi dan masuk ke aliran sungai tidak seluruhnya mencapai outlet Sub DAS Keduang. Sebagian sedimen mengendap di lereng, saluran kecil, sawah, atau genangan lokal sebelum mencapai outlet. Sediment yield yang masuk ke dalam suatu aliran hingga berakhir di outlet Sub DAS Keduang sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran sungai yang membawa material sedimen.

Penurunan presipitasi curah hujan di tahun 2023 yang menyebabkan debit aliran menurun sehingga memengaruhi hasil sediment out di tahun 2023. Pada Tabel 4 terjadi penurunan presipitasi curah hujan di tahun 2023 sebesar 1862 mm yang menyebabkan debit aliran menurun sehingga memengaruhi hasil sedimen out di 2023.

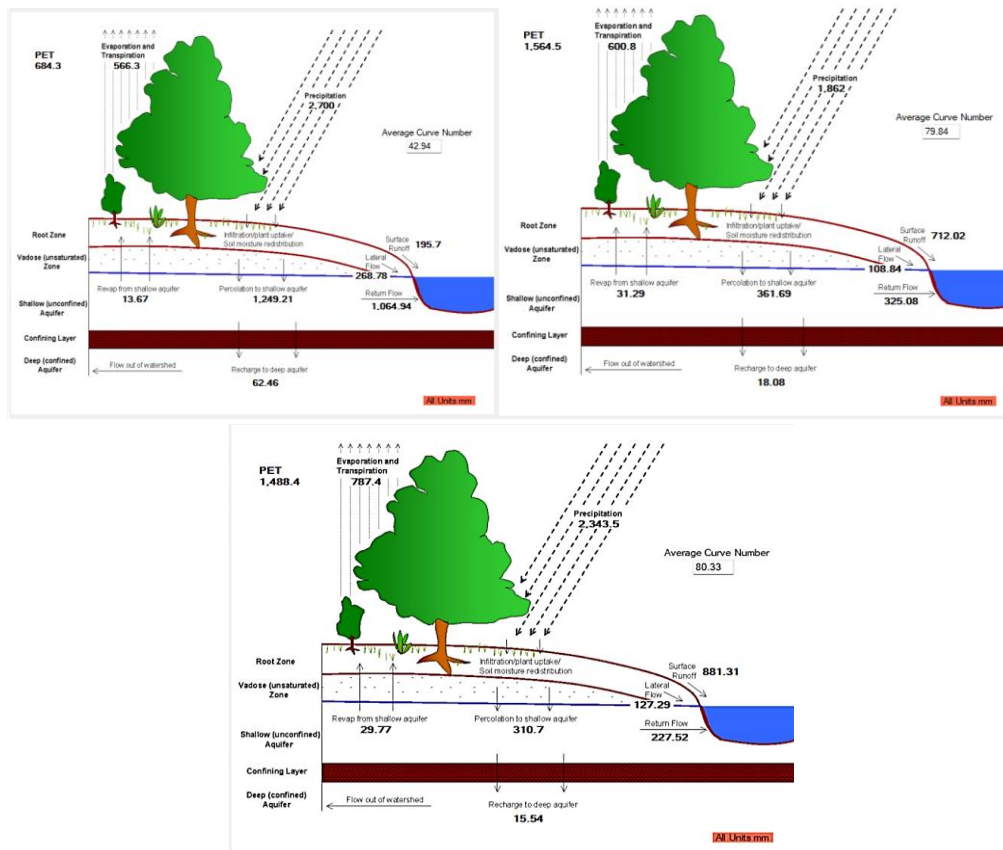
7. Hasil Pemodelan Hidrologi

Perubahan terjadi pada komponen neraca air terjadi selama periode penelitian. Hasil pemodelan hidrologi yang mencakup infiltrasi, *surface runoff*, dan penguapan terdapat pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar (Figure) 13. Grafik Hubungan Pemodelan Hidrologi dengan Sedimentasi (Graph of the Relationship between Hydrological Modeling and Sedimentation)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



Gambar (Figure) 14. Hasil Pemodelan Hidrologi Sub DAS Keduang pada : (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (Results of the Keduang Sub-watershed Hydrological Modeling in : (a) 2022; (b) 2023; and (c) 2024)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Hasil pemodelan hidrologi dengan laju sedimentasi di Sub DAS Keduang menunjukkan adanya keterkaitan antara komponen hidrologi dan tingkat sedimentasi. Pada tahun 2022, infiltrasi mendominasi dengan nilai tertinggi sebesar 1311,67 mm, disertai dengan limpasan permukaan yang rendah dan *sediment yield* terendah sebesar 270,934 ton/ha. Kondisi ini mencerminkan peran tutupan hutan yang efektif dalam menahan air dan mengurangi erosi. Pada tahun 2023 dan 2024, terjadi penurunan signifikan pada infiltrasi seiring dengan peningkatan luas permukiman, yang menyebabkan limpasan permukaan dan laju sedimentasi meningkat tajam. Tahun 2023 mencatat *sediment yield* tertinggi sebesar 662,393

ton/ha, sedangkan limpasan permukaan terus meningkat hingga mencapai 881,31 mm pada tahun 2024. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sahar (2021), diketahui bahwa pengurangan kemampuan infiltrasi akibat perubahan tata guna lahan mendorong peningkatan limpasan yang secara langsung berkontribusi pada percepatan laju sedimentasi. Temuan ini menunjukkan pentingnya pengelolaan penggunaan lahan dan penerapan konservasi tanah untuk mengurangi dampak sedimentasi yang semakin besar di Sub DAS Keduang.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, model SWAT mampu memberikan gambaran

menyeluruh mengenai sedimentasi dan proses hidrologi di Sub DAS Keduang selama 2022–2024. Hasil menunjukkan sediment yield tertinggi terjadi pada 2023 sebesar 119.543,18 ton/ha dan terendah pada 2022 sebesar 59.639,72 ton/ha, sedangkan sediment out di outlet DAS menunjukkan adanya kenaikan dari 84.690 ton (2022) menjadi 86.030 ton (2024). Perbedaan keduanya dipengaruhi oleh morfologi DAS, penggunaan lahan, erodibilitas tanah, curah hujan, dan debit aliran. Verifikasi model menunjukkan kinerja terbaik pada 2024 ($R^2 = 0,956$; $NSE = 0,888$), menegaskan bahwa SWAT efektif dalam memodelkan dan memprediksi dinamika hidrologi dan sedimentasi. Perubahan penggunaan lahan terbukti berdampak langsung pada neraca air, dengan penurunan infiltrasi dan peningkatan limpasan permukaan yang mempercepat erosi dan pengangkutan sedimen. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan strategi konservasi tanah dan pengelolaan tata guna lahan yang berkelanjutan untuk mengendalikan sedimentasi dan menjaga fungsi Waduk Gajah Mungkur. Model SWAT efektif digunakan sebagai alat perencanaan dalam pengelolaan DAS di masa depan. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mensimulasikan berbagai skenario konservasi (seperti pembangunan sabo dam, perubahan pola tanam, atau restorasi lahan kritis) menggunakan model SWAT guna mengevaluasi efektivitasnya dalam mengurangi sedimentasi sebelum diimplementasikan di lapangan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih seluruh rekan dan Laboraturium di Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, atas semua bantuan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

KONTRIBUSI

Kontribusi setiap penulis yakni: Bandi Sasmito (penulis pertama) menyusun literatur *review*, konseptualisasi, dan penulisan naskah; Bambang Darmo Yuwono (penulis kedua) analisis hidrologi dan interpretasi hasil; Candrakanti Cahyaning Putri (penulis ketiga) mengumpulkan data dan, analisis citra; Smilya Sheren Reynalda (penulis keempat) pemetaan dan penyunting naskah

DAFTAR PUSTAKA

- Aisy, R., Sukmono, A., Firdaus, S.H., 2023. Analisis Perubahan Laju Erosi pada Sub DAS Keduang Tahun 2016-2021 dengan Metode Universal Soil Loss Equation (USLE). *J. Geod. Undip* 12(2), 111–120.
- Asdak, C., 2010. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Banti, M., Asfaw, D., Mengistu, D., 2020. *Modeling Sediment Yield and Reservoir Sedimentation Using (SWAT) Model: A Case of (Nekemte) Watershed, Ethiopia*. *J. Eng. Res. Reports* 15, 1–13.
- Hadi, M.P., Wibowo, S.B., 2018. Pemodelan Spasial Erosi dan Sedimentasi pada (Sub DAS) Keduang Wonogiri dengan Menggunakan USLE dan ArcGIS. *J. Bumi Indones.* 7.

- Hasnawir, 2012. Mitigasi Bencana Sedimen: Teori dan Aplikasi. Balai Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Makassar.
- Herlambang, H.L., Putri, M.R., Santosa, B., Suwarno, D., 2021. Kajian Potensi Sedimentasi Pada Waduk Jatibarang dengan Pemodelan SWAT (Soil and Water Assesment Tool). J. Tek. Sipil Unika Soegijpranata Semarang.
- Kementerian PUPR, 2021. Menuju (Waduk Gajah Mungkur) Bebas Sedimen, (Kementerian PUPR) Bangun Sabo Dam di (Sub DAS) Keduang.
- Kumi, E.N., Anornu, G.K., Owusu, E.S., Agyapong, E., 2022. *Application of {SWAT} Model to Assess the Impact of Land Use and Best Management Practices on Reservoir Sedimentation in the {Adaena} Watershed, Ghana*. J. Water Clim. Chang. 13, 2091–2111.
- Lin, B., Chen, X., Yao, H., 2020. *Threshold of Sub-Watersheds for SWAT to Simulate Hillslope Sediment Generation and Its Spatial Variations*. Ecological Indicators.
- Motovilov, Y.G., 1999. *Validation of a Distributed Hydrological Model Against Spatial Observations*. *Agric. For. Meteorol.* 257–277. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00083-5)
- Nash, J.E., Sutcliffe, J. V, 1970. *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. J. Hydrol.
- Neitsch, S.L., Jeff, A., Kiniry, J.R., Williams, R.J., 2011. *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute, Texas.
- Polanco, E.I., Fleifle, A., Ludwig, R., Disse, M., 2017. *Improving SWAT Model Performance in the Upper Blue Nile River Basin Using Meteorological Data Integration and Catchment Scaling*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 1–28.
- Purnamasari, R., Djaenudin, D., Muhlish, A., 2021. Dampak Pendangkalan {Waduk Gajah Mungkur} terhadap Kinerja {PLTA} dan Lingkungan Sekitar. J. Tek. Hidro 14, 1–10.
- Rombang, J., Kalangi, J., Rantung, M., 2022. Penggunaan Model SWAT Untuk Prediksi Erosi dan Sedimen di Area Tangkapan Air Danau Tondano. J. Ilm. Sains 144–150.
- Sahar, A.A., Hassan, M.A., Jasim, A., 2021. *Estimating the volume of sediments and assessing the water balance of the Badra Basin, Eastern Iraq, using Swat Model and Remote Sensing Data*. Iraqi Geol. J. 88–99.
- Sujarwo, M.W., Indarto, Mandala, M., 2020. Pemodelan Erosi dan Sedimentasi di DAS Bajulmati: Aplikasi Soil dan Water Assesment Tool (SWAT). J. Ilmu Lingkung. 18(2), 2018–227.
- Tatipata, W.H., Soekarno, I., Sabar, A., Legowo, S., 2015. Analisis Volume Sedimen yang Mengendap Setelah T-Tahun Waduk Beroperasi (Studi Kasus: Waduk Cirata). J. Tek. Sipil ITB 22(3), 235–242.
- Wahidin, W., 2020. Analisis Laju Sedimentasi dan Konservasi di Hulu Waduk Malahayu. Infratech Build. J. 1(02).
- Zaka, A.R., Sutopo, 2017. Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kepuasan Pelanggan Pada LBB Antologi Semarang. Diponegoro Journal Of Management. DIPONEGORO J. Manag.

**FRAGMENTASI JARINGAN DAN KOALISI ADVOKASI DALAM TATA KELOLA DAERAH
ALIRAN SUNGAI: PELAJARAN DARI DAS PAGUYAMAN, INDONESIA**

***(Network Fragmentation and Advocacy Coalitions in Watershed Governance: Lessons from
the Paguyaman Basin, Indonesia)***

Ivan Taslim^{1,2,*}, Sambas Basuni³, Yanuar Jarwadi Purwanto⁴, I Putu Santikayasa⁵

¹Natural Resources and Environmental Management Study Program, IPB University, Bogor

²Geography Study Program, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Gorontalo

³Department of Forest Resources Conservation and Ecotourism, IPB University, Bogor

⁴Department of Civil and Environmental Engineering, IPB University, Bogor

⁵Department of Geophysics and Meteorology, IPB University, Bogor,

*ivantaslim@apps.ipb.ac.id

Diterima: 22 November 2025, Direvisi : 8 Januari 2026, Disetujui : 17 Februari 2026

ABSTRACT

Watershed management in developing countries often faces persistent implementation gaps, despite the existence of sound environmental policies. This study investigates how stakeholder structure and coalition dynamics contribute to governance challenges in the Paguyaman Watershed, Gorontalo, Indonesia. Using a descriptive-exploratory approach, the MACTOR method was applied to analyze the relational structure among 15 key actors and 22 strategic objectives, based on a structured questionnaire, focus group discussions, and influence mapping. The results reveal a polarized stakeholder network divided into two coherent coalitions: a Government-Academic coalition oriented towards technocratic goals and a Civil Society coalition focused on socio-ecological justice. Divergence scores between the coalitions ranged from 0.81 to 0.87, indicating a high significant ideological conflict. Industry actors are found structurally isolated, with low convergence scores (<0.3), undermining collaborative efforts. The influence-dependence analysis identified four Driving Actors, seven Linking Actors, one Dependent Actor, and three Autonomous Actors. These imbalanced relational explain the failure of institutional coordination and the limited policy legitimacy. These findings emphasize that technical solutions alone are insufficient; effective watershed governance requires strategic interventions to bridge polarized coalition, engage isolated industry sectors, and strengthen coordinating actors to promote inclusive, and collaborative governance.

Keywords: stakeholder analysis; watershed governance; MACTOR; coalition dynamics; implementation gap

ABSTRAK

Tata kelola daerah aliran sungai (DAS) di negara berkembang sering menghadapi kesenjangan implementasi, meskipun telah tersedia kebijakan lingkungan yang baik. Studi ini mengkaji bagaimana struktur pemangku kepentingan dan dinamika koalisi berkontribusi terhadap tantangan tata kelola di DAS Paguyaman, Gorontalo, Indonesia. Dengan pendekatan deskriptif-eksploratif, metode MACTOR digunakan untuk menganalisis hubungan antar 15 aktor kunci dan 22 tujuan strategis, berdasarkan kuesioner terstruktur, diskusi kelompok terfokus, dan pemetaan pengaruh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jaringan aktor terpolarisasi menjadi dua koalisi utama: koalisi Pemerintah-Akademisi yang berorientasi teknokratis, dan koalisi Masyarakat Sipil yang menekankan keadilan sosial-ekologis. Skor divergensi antara koalisi mencapai 0,81–0,87, menandakan potensi konflik ideologis yang tinggi. Aktor industri berada dalam posisi terisolasi secara struktural, dengan skor konvergensi rendah ($<0,3$), sehingga menghambat upaya kolaboratif. Analisis pengaruh-ketergantungan mengidentifikasi empat Aktor Penggerak, tujuh Aktor Penghubung, satu Aktor Tergantung, dan tiga Aktor Otonom. Ketimpangan relasi ini menjelaskan lemahnya koordinasi institusional dan rendahnya legitimasi kebijakan. Temuan ini menekankan bahwa solusi teknis saja tidak cukup; tata kelola DAS yang efektif memerlukan intervensi strategis untuk menjembatani polarisasi koalisi, melibatkan sektor industri yang terisolasi, serta memperkuat aktor pengoordinasi dalam membangun tata kelola yang kolaboratif dan inklusif.

Kata kunci: analisis pemangku kepentingan; tata kelola DAS; MACTOR; dinamika koalisi; kesenjangan implementasi

I. INTRODUCTION

Since the early 2000s, watershed management has increasingly shifted from a hydrological–engineering focus to a socio-ecological systems perspective, triggered by global water governance reforms emphasizing participation, decentralization, and adaptive management (Saraswat & Gupta, 2024; Waldt, 2025; B. Wang, Wang, Zeng, & Li, 2022). This paradigm shift has driven watershed management beyond a narrow focus on water quantity and quality, moving toward holistic governance approaches that must integrate ecological integrity, social equity, and economic viability (GWP (Global Water Partnership), 2021; B. Wang et al., 2022). Yet, translating the

concept of integrated watershed management into practical, effective implementation remains a persistent global challenge, particularly in developing countries where economic acceleration intersects with environmental conservation imperatives (Gebregergs, Teka, Taye, Gidey, & Dikinya, 2022; Narendra et al., 2021; Tinoco et al., 2022). This challenge is also reflected nationally in water governance in Indonesia, which still faces the problem of institutional fragmentation and multi-stakeholder coordination (Mulyana & Prasojo, 2020; Sulistyaningsih, Nurmandi, Kamil, et al., 2021; Valette, 2024).

A major difficulty stems from the constellation of stakeholders involved in

watershed governance, including government agencies, private industries, academic institutions, Non-Governmental Organization (NGOs), and local communities. They have divergent interests that shape policy interpretation and implementation (Kadoma, Perry, & Renaud, 2023; R. Y. Wang, van Rijswijk, & Dai, 2022). Watersheds are increasingly understood as “wicked problems” (Cao, Wang, Luo, Xie, & Zhu, 2022; Rittel & Webber, 1973; van den Ende, Hegger, Mees, & Driessen, 2023), due not only to ecological complexity but also to conflicting stakeholder worldviews, making purely technical solutions insufficient (Ben-Daoud et al., 2023; Bianchi, Nasi, & Rivenbark, 2021; Esmailzadeh, Bagherzadeh, Dehkordi, & Mianabadi, 2025; Fallon, Lankford, & Weston, 2021; Weible, Ingold, Nohrstedt, Henry, & Jenkins-Smith, 2020). In Indonesia, previous studies have documented institutional fragmentation and regulatory contradictions in regions such as DAS Citarum and DAS Brantas, revealing persistent coordination failures across agencies (Sulistyaningsih, Nurmandi, Salahudin, et al., 2021).

This has created an implementation gap where well-designed policies fail to make effective field outcomes which are consistent with findings in other watershed governance contexts (Hudson, Hunter, & Peckham, 2019; Supangat et al., 2023; Ulibarri, Imperial, Siddiki, & Henderson, 2023; Valette, 2024). This gap is often rooted in an inadequate understanding of stakeholder dynamics, especially their power relations, strategic alignments, and latent conflicts (Newig, Jager, Challies, &

Kochskämper, 2023; Stout & Love, 2018). Although stakeholder participation is widely promoted to enhance environmental governance, its effectiveness depends heavily on political and structural conditions of governance networks (Rivera-Torres & Gerlak, 2021).

Although many studies list relevant actors or map their roles, a major gap persists in structural analysis that reveals how stakeholder relationships and network positions either support or hinder collective governance (Ulibarri et al., 2023). Although the literature on stakeholder analysis has advanced to include tools for analyzing power asymmetries and coalition behavior, applications of these tools in Indonesian watershed contexts remain rare (Basuki et al., 2022; Roestamy & Fulazzaky, 2022; Warastuti, Sitopu, & Heka Ardana, 2025).

Without a clear understanding of stakeholder structures, governance often fragments into isolated “silos” that limit information exchange, reduce trust, and hinder coordinated action (Musacchio, Re, Mas-Pla, & Sacchi, 2020). These governance barriers are not merely administrative; rather, they stem from the relational and political structure of stakeholder networks, where power asymmetries and misaligned values shape decision-making (Fischer & Ingold, 2020; Hu, Medina, Siciliano, & Wang, 2023).

The Matrix of Cross-Impact Multiplications Applied to Classification (MACTOR) method is a robust tool for capturing these dynamics by mapping actor influence, dependence, convergence, and divergence (Godet, 1991, 2000). Despite its widespread use in strategic

foresight, MACTOR application in watershed governance studies in Indonesia remains limited (Darmastuti, Rustiadi, Fauzi, & Purwanto, 2023), representing a missed opportunity to uncover the structural roots of governance failure and reveal intervention points.

The Paguyaman watershed, located in Gorontalo Province, is designated as a strategic area in the Provincial Spatial Plan (Pemerintah Provinsi Gorontalo, 2024) and is included in the national list of priority watersheds (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015). It faces increasing pressure from land-use conversion and illegal gold mining. Despite its strategic importance, no structural stakeholder analysis has been conducted to date.

We hypothesize that governance failures in Paguyaman partly arise from stakeholder polarization, reflecting the formation of competing advocacy coalitions documented in other contested natural resource systems (Gabehart, Nam, & Weible, 2022; Hank C. Jenkins-Smith, Daniel Nohrstedt, Christopher M. Weible, & Karin Ingold, 2018; Morales-Giner et al., 2023; Weible et al., 2020; Wesche, Dütschke, Negro, & Hekkert, 2025). To address this issue, this study applies a prospective structural analysis using the MACTOR method to: (1) identify the structural roles of key actors in the governance network, (2) map potential alliances and axes of conflict based on strategic priorities, and (3) discuss how this structure contributes to implementation gaps and how it might be addressed to support collaborative watershed governance.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Research Time and Study Area

This research was conducted from March–July 2025 in the Paguyaman watershed, located in Gorontalo Province, Indonesia (Figure 1). The watershed is nationally designated as a regional priority area for agricultural development, water supply, and biodiversity conservation. It includes the upstream Nantu Wildlife Reserve and is increasingly threatened by land-use conversion, illegal gold mining, and conflicting development-conservation interests (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2019; Pemerintah Provinsi Gorontalo, 2014), making it an ideal case for analyzing stakeholder dynamics.

B. Materials and Tools

The study utilized both human and documentary resources, including:

1. Respondents:

Fifteen representatives from government, academia, private industry, NGOs/community groups, and media selected via purposive sampling.

2. Documents Reviewed:

NationalRegulatory and planning documents from Gorontalo Province, including Provincial development plans (RPJMD), and relevant legal documents include Law No. 37/2012 (Pemerintah Indonesia, 2012) and Law No. 274/2019 on Paguyaman River Basin Water Resources (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2019)

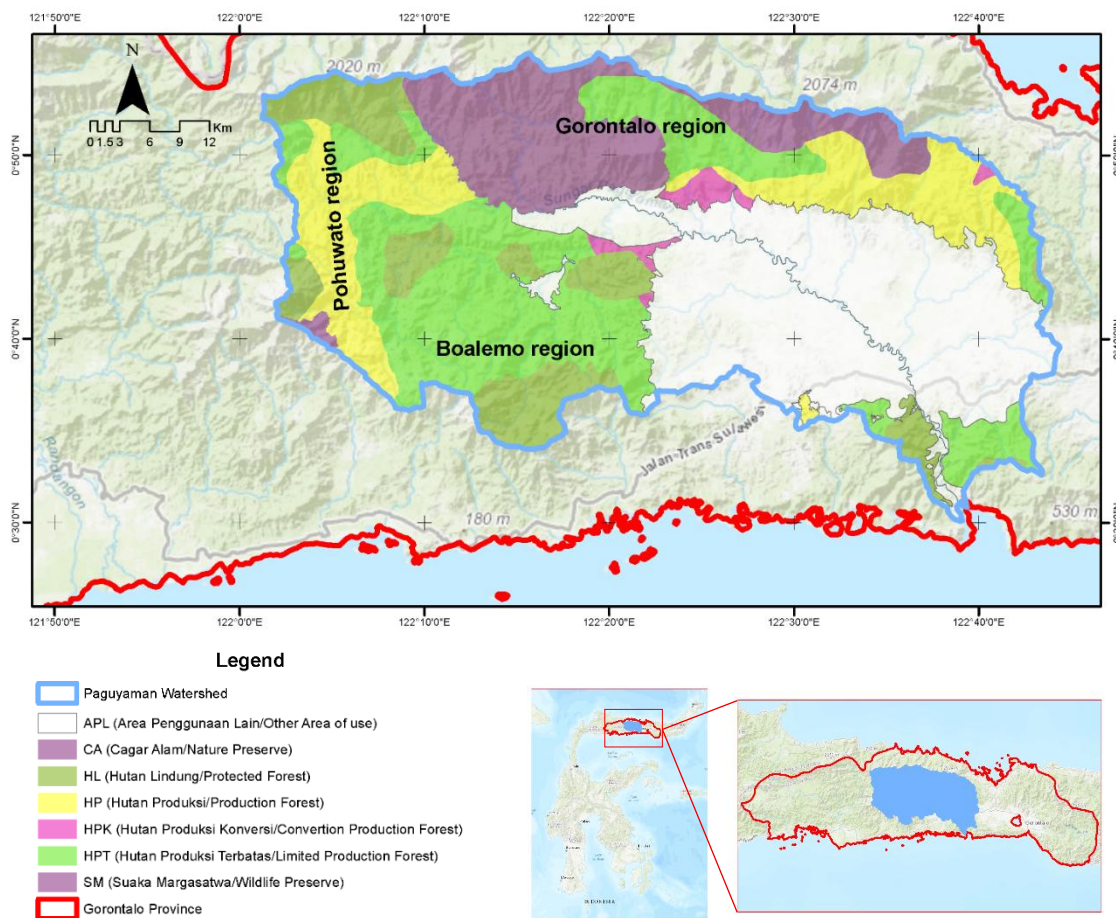


Figure 1. Paguyaman Watershed in Gorontalo Province-Indonesia

3. Instruments:

- Structured questionnaire
- Semi-structured interview guide
- Focus Group Discussion (FGD) protocol.

4. Software and tools:

- MACTOR version 6 developed by the French Computer Innovation Institute Institut d'Innovation Informatique pour l'Entreprise (3IE), under the supervision of its conceptual creators, the LIPSOR Prospective (foresight) Strategic and Organisational Research Laboratory (<http://en.lapro prospective.fr/> (Godet, 2000)).

- MS Excel used for supplementary data coding and triangulation.

C. Research Methodology

This study adopted a descriptive-exploratory research design using a prospective structural analysis approach. This methodology was chosen due to its ability to model influence relations and strategic alignments (Darmastuti et al., 2023).

1. Research design.

The MACTOR method was used to analyze strategic influence and alliance patterns among stakeholders. This method is suitable for identifying actor typologies (drivers, linkages,

dependents, and autonomous actors) and the axes of convergence and divergence regarding shared strategic objectives (Darmastuti et al., 2023; Godet, 1991, 2000). It has been proven to be effective for analyzing complex actor systems in the context of watershed governance, as shown by Ben-Daoud et al. (2023) in the R'Dom sub-watershed in Morocco.

2. Actor and objective determination.

Initial actor and objective lists were generated through:

- A review of local regulatory and planning documents, such as the RPJMD Gorontalo (2017–2022), the RTRW Provinsi of Gorontalo (Perda No. 10/2019), and Government Regulation No. 37/2012 on Watershed Management.
- A literature review of 42 publications (2015–2024) on watershed governance, social-ecological systems, and stakeholder analysis was conducted using a narrative review approach.
- Preliminary consultations with key informants.

These yielded 17 initial actor groups across the Pentahelix framework (Government, Academia, Industry, Community/NGOs, and Media) and 18 strategic objectives. After validation, the final framework included 15 key actors and 22 objectives (see Appendix A).

3. Data collection.

- Respondent: Selected purposively based on organizational role,

influence, and knowledge of watershed governance.

- Main instrument: Structured questionnaire (see Appendix D), pre-tested with 3 representatives.
- Technique: Face-to-face interviews and supervised self-completion of questionnaires.

4. Types of data collected.

- Actor validation and expansion.
- Organizational profiling (roles, partnerships, and conflicts).
- Matrix of Direct Influences (MDI): 0–4 scale of actor-to-actor influence.
- 2MAO (Valued Position Matrix): Actor stance (+1, 0, -1) and priority (0–4) for each objective.
- FGD: Consisted of 18 respondents or participants from five stakeholder categories (pentahelix), while the remaining two were additional stakeholders selected to triangulate and the validate quantitative results.

5. Data analysis (including MACTOR outputs)

We used MACTOR via LIPSOR-MACTOR software to analyze:

- Influence-Dependence Mapping: Actor typology.
- 2CAA (Valued Convergence Analysis): Assessment of potential alliances using convergence value thresholds (Table 1).
- 2DAA (Valued Divergence Analysis): Assessment of potential conflict zones using divergence thresholds (Table 2).

Table 1. Classification and Value Scale of Convergence (2CAA)

Value Range	Interpretation	Meaning in this Study
>0.70	Very High Convergence	Strong strategic alignment; potential stable coalition
0.50–0.70	High Convergence	Shared objectives but possible differences in priorities
0.30–0.50	Moderate Convergence	Partial alignment; issue-specific collaboration
<0.30	Low Convergence	Weak alignment; unlikely coalition

Table 2. Classification and Value Scale of Divergence (2DAA)

Value Range	Interpretation	Meaning in this Study
>0.70	Very High Divergence	Strong conflict potential and value-based opposition
0.50–0.70	High Divergence	Significant differences; contested issues
0.30–0.50	Moderate Divergence	Mild disagreements; manageable through coordination
<0.30	Low Divergence	Minimal opposition

The analyses were based on the following matrices:

- MDI Matrix: 15×15 influence assessment (see Appendix B).
- 2MAO Matrix: 15×22 objective evaluation (see Appendix C).

6. Incomplete data handling.

Incomplete data (e.g., missing MDI rows) was estimated using institutional roles, other respondent inputs, and proxy data. If priority ratings were missing in 2MAO but support (+1) was given, the conservative value of “3 = Important” was assigned. These estimations are acknowledged as a limitation of the study.

7. Ethical consideration.

The study received institutional ethics approval. Written informed consent was obtained from all participants. Identities of non-government sectors have been anonymized to maintain confidentiality.

8. Flowchart of the research procedure (Figure 2)

III. RESULT AND DISCUSSION

A structural stakeholder analysis using the MACTOR method revealed a highly polarized governance landscape in the Paguyaman watershed. The final analytical framework consisted of 15 actors and 22 strategic objectives, providing insight into power asymmetries, coalition dynamics, and potential conflicts. The findings are organized in relation to the objectives of the study.

The Influence-Dependence Map (Figure 3) categorizes stakeholders into four structural roles: Drivers occupied the upper-left quadrant (high influence, low dependence); Linkages in the upper-right quadrant; Dependent actors in the lower-right quadrant; and Autonomous actors in the lower-left quadrant. Four actors were identified as Drivers: The Watershed Forum (COL1), the River Basin Authority (GOV5), the Watershed Management Agency (GOV4), and the NGO1. These actors exert high influence while maintaining relative autonomy, making them key drivers of governance change. Seven actors, including GOV1, GOV2,

GOV3, GOV6, GOV7, ACD1, and COM1, were classified as Linkages due to their centrality in both influencing and being influenced by others. The media (PERS) emerged as a Dependent actor, with low

influence and high susceptibility to external dynamics. Industrial actors (IND1, IND2, IND3) were found to be structurally Autonomous, indicating weak integration in the governance network.

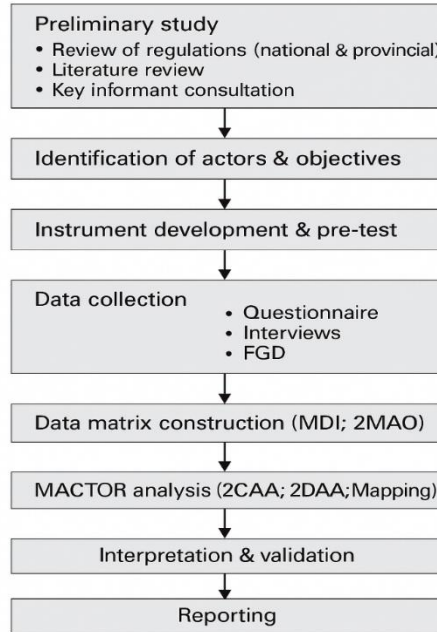


Figure 2. Research Procedure Flowchart

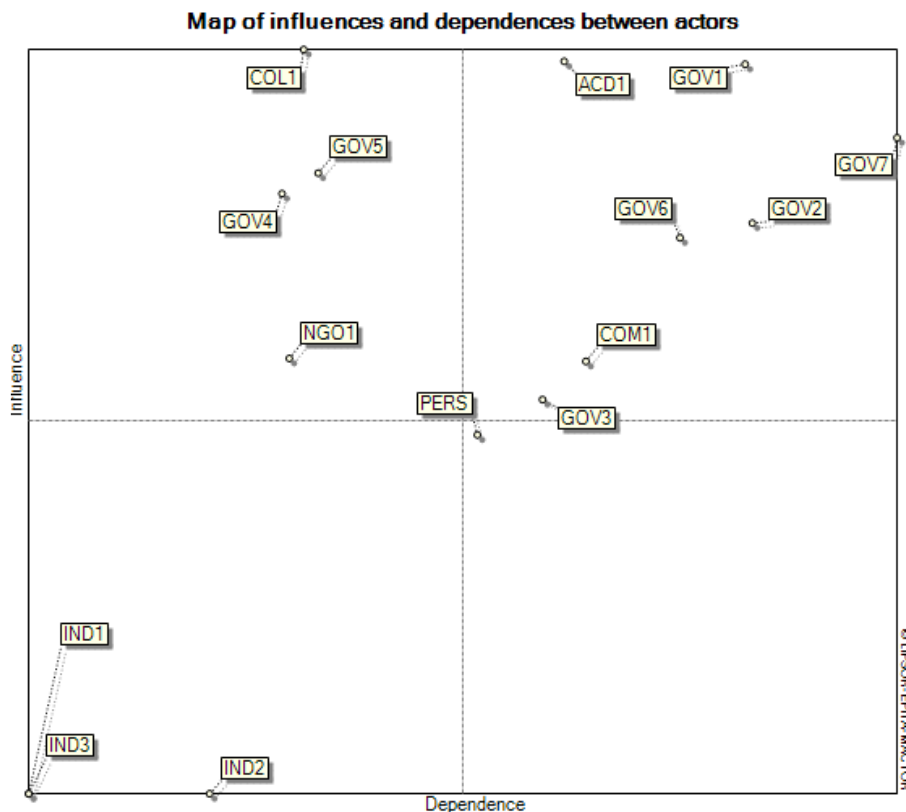


Figure 3. Influence-Dependence Map of Paguyaman Watershed Stakeholders. Source: Primary data analysis, 2025

Two stakeholder coalitions were identified using the 2CAA analysis based on shared objectives and alignment patterns (Figure 4). The Government-Academia Coalition comprising GOV1, GOV2, GOV4, GOV5, GOV3, ACD1, and COL1, with high internal convergence (0.72–0.89), indicating a technocratic orientation. In contrast, the Civil Society Coalition, including NGO1, COM1, and PERS, shares a socio-ecological justice perspective with moderate internal convergence (0.68–0.76). Industrial actors showed weak convergence (<0.3) with either bloc, reinforcing their marginal role in

collaborative governance. Conflict potential was assessed using 2DAA analysis. As shown in Table 1, the highest divergence was between NGO1 and government actors (e.g., 0.87 with GOV5; and 0.84 with GOV4), indicating deep ideological divides. Divergence with industrial actors was also high (0.73 with IND3), pointing to overlapping conflict zones. Internal coalition divergence remained low (<0.2), validating coalition coherence. These results confirm a sharply bipolar stakeholder structure with significant barriers to consensus.

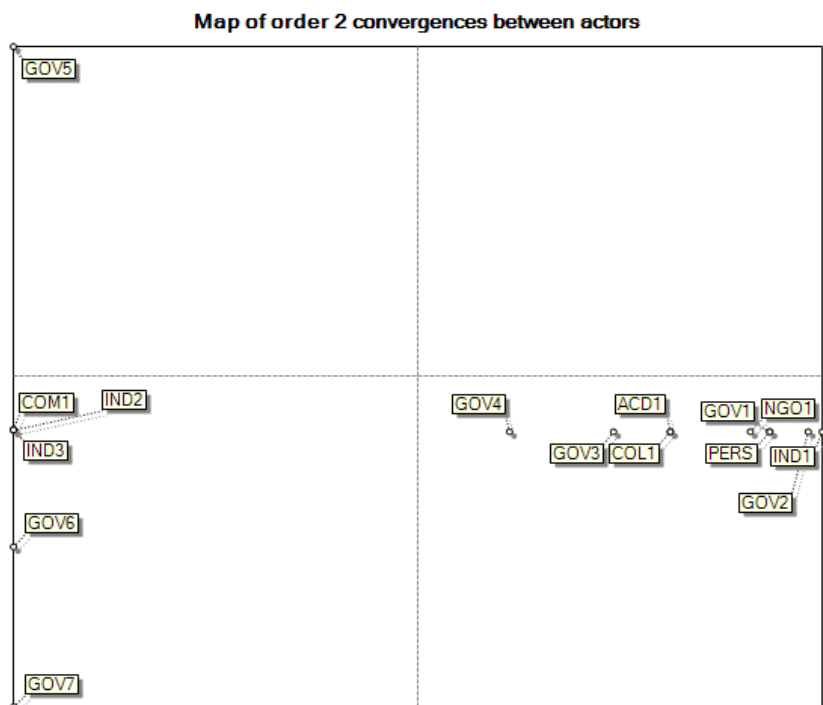


Figure 4. Valued Convergence Map among Actors (2CAA).
 Source: Primary data analysis, 2025

Table 3. Divergence Scores among Key Stakeholders (2DAA).

Actor/Coalition 1	Actor/Coalition 2	Divergence Score	Type of Conflict Potential
Civil Society (NGO1)	Government-Academia (GOV5)	0.87	Very High
Civil Society (NGO1)	Government-Academia (GOV4)	0.84	Very High
Civil Society (NGO1)	Industry (IND3)	0.73	High
Civil Society (COM1)	Industry (IND1)	0.69	High
Government-Academia Internal	Average member score	<0.2	Very Low
Civil Society Internal	Average member score	<0.2	Very Low

Source: Primary data analysis, 2025.

These structural findings offer a compelling explanation for the implementation gap observed in watershed management in Indonesia. The fragmentation of stakeholders into disconnected blocs, or “governance silos,” impedes trust-building and policy alignment (Chatalova, Djanibekov, Gagalyuk, & Valentinov, 2017; Cotler, Cuevas, Landa, & Frausto, 2022). It confirms the patterns reported by Musacchio et al. (2020) and Nonet et al. (2022). The exclusion of industrial actors from decision-making may further undermine sustainability because their cooperation is essential in mitigating land-based pollution and illegal resource extraction (Koebele, 2020; K. Wang, Han, & Tan, 2025). Such network fragmentation has been identified as a major inhibitor of collaboration in cross-regional water governance (Ji, Wan, & Ke, 2024; Rojas, Bennison, Gálvez, Claro, & Castelblanco, 2020), and has also emerged in the Paguyaman watershed system through the coalition separation and isolation of industry actors. Similar evidence has been reported in other transboundary water governance networks (Lee, Yoon, Yang, Namkoong, & Kim, 2024; Mdeleleni et al., 2025; Nava, 2025; Offutt, 2022).

While coherent, the Government-Academia coalition's technocratic model risks legitimacy deficits unless inclusive mechanisms are adopted (Maas, Pauwelussen, & Turnhout, 2022). The GOV6 and GOV7 can play the role of boundary spanners, which are bridging actors in complex socio-ecological systems (Roengtam, Agustiyara, & Nurmandi,

2023). Conversely, the Civil Society bloc plays a critical role in contesting dominant narratives, representing marginalized interests, and holding formal institutions accountable—functions consistent with adversarial participation models (Jalal, 2025). The conflict between the economic development agenda and socio-ecological justice (Leal Filho, Dinis, & Ben Hassen, 2025; Menton et al., 2020), reflects similar dynamics in the marine economy as outlined in the blue justice framework by Bennett et al. (2021). The pattern of coalition formation is in accordance with the Advocacy Coalition Framework (ACF) which has been updated by Cisneros (2021), where the trust system is the main foundation in the formation of policy blocks (Malkamäki, Ylä-Anttila, Brockhaus, Toppinen, & Wagner, 2021; Schmid, Sewerin, & Schmidt, 2020). However, it is not the only solution (Löhr, Markard, & Ohlendorf, 2024; Van Dyke & Amos, 2017).

Strategically, the Watershed Forum (COL1) has potential as a bridging actor, given its Driver status and semi-neutral orientation (Peña-Campello, Espín-Gallardo, López-Sánchez, & Sánchez, 2024). The existence of a multi-stakeholder platform like the Watershed Forum is important; however, its effectiveness depends on the dynamics of internal learning and collaboration (Hovis et al., 2025; Rivera-Torres & Gerlak, 2021). In its formal role as chair of the Water Council (TKPSDA), GOV1 could function as an “orchestrator,” but it requires enhanced bridging capacity to connect polarized blocs. NGO1 emerges as a critical “challenger,” whose oppositional stance

spotlights ideological and justice-oriented concerns often ignored in formal planning (Kahil et al., 2025; Laraswati et al., 2022), although not all NGOs play such a role (Dzhengiz, Barkemeyer, & Napolitano, 2021).

The study's limitations include reliance on respondent judgment and potential exclusion of informal actors. Nevertheless, it contributes to the empirical literature on stakeholder analysis in natural resource governance and aligns with the broader challenges of water governance in Indonesia as identified by (Mulyana & Prasojo, 2020). Future work should explore targeted interventions to bridge coalition divides, activate the industrial sector, and build coordination platforms that promote long-term collaborative engagement (Thapa, Vermeulen, & Deutz, 2022).

IV. CONCLUSION

This study showed that the core challenges of watershed governance in the Paguyaman watershed are not just technical but also deeply embedded in the political and relational configurations among key stakeholders. Using the MACTOR method, the research systematically mapped the structural roles, potential alliances, and conflict lines of 15 actors and 22 strategic objectives. This approach offered an empirical explanation for the persistent implementation gap in watershed policy.

The findings highlight the presence of two polarized and internally coherent coalitions: the Government–Academia Coalition (GOV1: Regional Planning, Research, and Development Agency (Bappeda) of Gorontalo Province, GOV2:

Sulawesi II River Basin Center (BWS), GOV3: Bone-Limboto River Basin Management Center (BPDAS), GOV4: Natural Resources Conservation Agency (BKSDA) Region II Gorontalo, GOV5: Gorontalo Province Environment and Forestry Service (DLHK), ACD1: Academics, and COL1: Watershed Forum (Forum DAS), which converges on technocratic and formal governance objectives; and the Civil Society Coalition (NGO1: Local Environmental Non-Governmental Organization, COM1: Local Forest Farmers Group (KTH), and the PERS: Environmental Media/Journalist), which emphasizes socio-ecological justice and public oversight. The industrial sector remains isolated, showing minimal alignment with either coalition. This condition hampers comprehensive governance integration.

Structurally, the Watershed Forum (COL1), GOV5, GOV4, and NGO1 act as Drivers with high influence and low dependence, while actors such as GOV1 and the Regency Government serve as Linkages that are central to coordination and negotiation. The PERS was identified as a Dependent actor, while industrial actors were deemed Autonomous and detached from the influence network.

These results suggest that the implementation gap stems from governance fragmentation, high divergence scores between coalitions (0.81–0.87), and the absence of bridging mechanisms. The structural map identifies opportunities for strategic intervention, such as strengthening the coordinating role of GOV1, empowering COL1 as a neutral facilitator, and developing engagement models for the industrial sector.

The findings highlight that improving watershed governance in Paguyaman requires strengthening relationships among actors, building cross-coalition trust, and integrating currently isolated groups such as the private sector. Policy reforms and technical interventions will remain limited unless they directly address political misalignment and weak coordination within the stakeholder network.

This study contributes to the literature on environmental governance by demonstrating how structural stakeholder analysis can reveal the underlying political dimensions contributing to institutional failures. The MACTOR-based approach offers a replicable methodology for analyzing multi-actor systems in complex socio-ecological settings and it can serve as a reference for other watershed contexts facing similar fragmentation.

Despite its contributions, this research has limitations. It presents a static snapshot of stakeholder configurations based on expert input, focusing primarily on formal actors, potentially overlooking informal but influential networks. Future research should incorporate dynamic modeling approaches and in-depth qualitative inquiry to track coalition evolution and design practical mechanisms for cross-coalition collaboration and inclusive industrial participation.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Beasiswa Pendidikan Indonesia (Indonesian Education Scholarship); the Center for Higher Education Funding and Assessment (Ministry of Higher Education,

Science, and Technology, Republic of Indonesia); and the Endowment Fund for Education Agency (Ministry of Finance, Republic of Indonesia) for supporting this study.

CONTRIBUTIONS

Ivan Taslim prepared the initial concept of the research, designed the methodology design, collected and analyzed data using the MACTOR approach, and prepared an initial draft of the manuscript. Sambas Basuni contributed to the literature review, deepening the context of natural resource management, and input on the structure of analysis and synthesis of findings. Yanuar Jarwadi Purwanto plays a role in validating instrument design, interpreting the results of actor analysis, and providing critical input in writing and editing methods and discussions. I Putu Santikayasa contributed to the development of a systemic approach in the framework of analysis, as well as improving the narrative of the discussion and conclusion section. All authors have read and approved the final version of the manuscript submitted for this publication.

REFERENCES

- Basuki, T. M., Nugroho, H. Y. S. H., Indrajaya, Y., Pramono, I. B., Nugroho, N. P., Supangat, A. B., ... Simarmata, D. P. (2022). Improvement of Integrated Watershed Management in Indonesia for Mitigation and Adaptation to Climate Change: A Review. *Sustainability*, *14*(16), 9997. doi: 10.3390/su14169997
- Ben-Daoud, M., El Mahrad, B., Moroşanu, G. A., Elhasnaoui, I., Moumen, A., El Mezouary, L., ... Eljaafari, S. (2023). Stakeholders' interaction in water management system: Insights from a

- MACTOR analysis in the R'Dom sub-basin, Morocco. *Environmental Management*, 71(6), 1129–1144. doi: 10.1007/s00267-022-01773-x
- Bennett, N. J., Blythe, J., White, C. S., & Campero, C. (2021). Blue growth and blue justice: Ten risks and solutions for the ocean economy. *Marine Policy*, 125, 104387. doi: 10.1016/j.marpol.2020.104387
- Bianchi, C., Nasi, G., & Rivenbark, W. C. (2021). Implementing collaborative governance: models, experiences, and challenges. *Public Management Review*, 23(11), 1581–1589. doi: 10.1080/14719037.2021.1878777
- Cao, Z., Wang, S., Luo, P., Xie, D., & Zhu, W. (2022). Watershed Ecohydrological Processes in a Changing Environment: Opportunities and Challenges. *Water*, 14(9), 1502. doi: 10.3390/w14091502
- Chatalova, L., Djanibekov, N., Gagalyuk, T., & Valentinov, V. (2017). The Paradox of Water Management Projects in Central Asia: An Institutional Perspective. *Water*, 9(4), 300. doi: 10.3390/w9040300
- Cisneros, P. (2021). The Advocacy Coalition Framework Research Program: An Overview. In *Oxford Research Encyclopedia of Politics*. Oxford University Press. doi: 10.1093/acrefore/9780190228637.013.212
- Cotler, H., Cuevas, M. L., Landa, R., & Frausto, J. M. (2022). Environmental Governance in Urban Watersheds: The Role of Civil Society Organizations in Mexico. *Sustainability*, 14(2), 988. doi: 10.3390/su14020988
- Darmastuti, L., Rustiadi, E., Fauzi, A., & Purwanto, Y. J. (2023). Stakeholder Analysis of Sustainable Wastewater Management: A Case Study of Bogor, Indonesia. *Sustainability*, 15(15), 11826. doi: 10.3390/su151511826
- Dzhengiz, T., Barkemeyer, R., & Napolitano, G. (2021). Emotional framing of NGO press releases: Reformative versus radical NGOs. *Business Strategy and the Environment*, 30(5), 2468–2488. doi: 10.1002/bse.2758
- Esmailzadeh, S., Bagherzadeh, S., Dehkordi, S. S. M., & Mianabadi, H. (2025). Wicked water problems and failure in water policy making: evidence from the Urmia Lake restoration in Iran. *Restoration Ecology*, 33(4), e70000. doi: 10.1111/rec.70000
- Fallon, A. L., Lankford, B. A., & Weston, D. (2021). Navigating wicked water governance in the “solutionscape” of science, policy, practice, and participation. *Ecology and Society*, 26(2), art37. doi: 10.5751/ES-12504-260237
- Fischer, M., & Ingold, K. (2020). Networks in Water Governance. In M. Fischer & K. Ingold (Eds.), *Networks in Water Governance*. Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-46769-2
- Gabehart, K. M., Nam, A., & Weible, C. M. (2022). Lessons from the Advocacy Coalition Framework for climate change policy and politics. *Climate Action*, 1(1), 13. doi: 10.1007/s44168-022-00014-5
- Gebregergs, T., Teka, K., Taye, G., Gidey, E., & Dikinya, O. (2022). Status and challenges of integrated watershed management practices after-project phased-out in Eastern Tigray, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1), 1253–1259. doi: 10.1007/s40808-021-01108-5
- Godet, M. (1991). Actors' moves and strategies: The mactor method: An air transport case study. *Futures*, 23(6), 605–622. doi: 10.1016/0190-5975(91)90067-8

- [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(91\)90082-D](https://doi.org/10.1016/0016-3287(91)90082-D)
- Godet, M. (2000). *The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls*. Retrieved from http://en.lapropective.fr/dyn/anglais/articles/art_of_scenarios.pdf/,
- GWP (Global Water Partnership). (2021). *Progress on Integrated Water Resources Management (IWRM) in the Asia-Pacific Region 2021: Learning exchange on monitoring and implementation towards SDG 6.5.1*.
- Hank C. Jenkins-Smith, Daniel Nohrstedt, Christopher M. Weible, & Karin Ingold. (2018). The Advocacy Coalition Framework: An Overview of the Research Program. In C. M. Weible & P. A. Sabatier (Eds.), *Theories of the Policy Process* (4th Editio, p. 37). Routledge. Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429962837>
- Hovis, M., Gerlak, A. K., Heikkila, T., Rittelmeyer, P., Koebele, E., Méndez-Barrientos, L. E., & Lubell, M. (2025). Illuminating the collective learning continuum in the <scp>Colorado River Basin Science-Policy Forums</scp>. *Environmental Policy and Governance*, 35(1), 26–47. doi: 10.1002/eet.2125
- Hu, Q., Medina, A., Siciliano, M. D., & Wang, W. (2023). Network structures and network effects across management and policy contexts: A systematic review. *Public Administration*, 101(3), 953–972. doi: 10.1111/padm.12835
- Hudson, B., Hunter, D., & Peckham, S. (2019). Policy failure and the policy-implementation gap: can policy support programs help? *Policy Design and Practice*, 2(1), 1–14. doi: 10.1080/25741292.2018.1540378
- Jalal, A. (2025). Natural Resource Scarcity and Violent Conflict in Post-New Order Indonesia. *Journal of Social Political Sciences*, 10(1). doi: 10.55190/JSPS.2025.412
- Ji, Y., Wan, S., & Ke, S. (2024). The Impact of the Governance Fragmentation of Forestry Communities on the Economic Performance of State-Owned Forest Enterprises in Northeast China: An Empirical Analysis Based on the Transaction Cost Perspective. *Forests*, 15(6), 1035. doi: 10.3390/f15061035
- Kadoma, A., Perry, M., & Renaud, F. G. (2023). Stakeholders' perceptions of wetland conservation and restoration in Wakiso District, Uganda. *Environment, Development and Sustainability*, 27(2), 3177–3200. doi: 10.1007/s10668-023-04008-z
- Kahil, T., Baccour, S., Joseph, J., Sahu, R., Burek, P., Ng, J. Y., ... Wada, Y. (2025). Development of the global hydro-economic model (ECHO-Global version 1.0) for assessing the performance of water management options. *Geoscientific Model Development*, 18(20), 7987–8015. doi: 10.5194/gmd-18-7987-2025
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 04/PRT/M/2015 tentang Kriteria dan Penetapan Wilayah Sungai.* , (2015).
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. *Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 274/KPTS/M/2019 Tentang Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Paguyaman.* , (2019).
- Koebele, E. A. (2020). Cross-Coalition Coordination in Collaborative Environmental Governance Processes.

- Policy Studies Journal*, 48(3), 727–753. doi: 10.1111/psj.12306
- Laraswati, D., Krott, M., Soraya, E., Rahayu, S., Fisher, M. R., Giessen, L., & Maryudi, A. (2022). Nongovernmental organizations as interest groups and their roles in policy processes: Insights from Indonesian forest and environmental governance. *Forest and Society*, 6(2), 570–589. doi: 10.24259/fs.v6i2.19125
- Leal Filho, W., Dinis, M. A. P., & Ben Hassen, T. (2025). Trade-Offs Among SDGs: How the Pursuit of Economic, Food, and Urban Development Goals May Undermine Climate and Equity Targets? *Sustainable Development*, 33(S1), 799–809. doi: 10.1002/sd.70029
- Lee, M., Yoon, J.-H., Yang, J. E., Namkoong, S., & Kim, H. (2024). Stakeholder analysis for effective implementation of water management system: Case of groundwater charge in South Korea. *Heliyon*, 10(3), e24699. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24699
- Löhr, M., Markard, J., & Ohlendorf, N. (2024). (Un)usual advocacy coalitions in a multi-system setting: the case of hydrogen in Germany. *Policy Sciences*, 57(3), 567–597. doi: 10.1007/s11077-024-09536-7
- Maas, T. Y., Pauwelussen, A., & Turnhout, E. (2022). Co-producing the science–policy interface: towards common but differentiated responsibilities. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 93. doi: 10.1057/s41599-022-01108-5
- Malkamäki, A., Ylä-Anttila, T., Brockhaus, M., Toppinen, A., & Wagner, P. M. (2021). Unity in diversity? When advocacy coalitions and policy beliefs grow trees in South Africa. *Land Use Policy*, 102, 105283. doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105283
- Mdleleni, L., Qonono, K., Sobane, K., Lunga, W., Magampa, M., Pindo, A., ... Noe, C. (2025). A Synthesis of Environmental Policies and Identification of Critical Gaps in Critical Zones of South and East Africa. *Environments*, 12(9), 326. doi: 10.3390/environments12090326
- Menton, M., Larrea, C., Latorre, S., Martinez-Alier, J., Peck, M., Temper, L., & Walter, M. (2020). Environmental justice and the SDGs: from synergies to gaps and contradictions. *Sustainability Science*, 15(6), 1621–1636. doi: 10.1007/s11625-020-00789-8
- Morales-Giner, P., Speranza, M. L., Arteaga, M., Baudoin Farah, A., Ferreira da Fonseca Junior, S., García Villacorta, A., ... Perz, S. G. (2023). Political ecology explanations for ineffective environmental governance for sustainability in the Amazon: A comparative analysis of cases from Bolivia, Brazil, Colombia, and Peru. *Journal of Political Ecology*, 30(1). doi: 10.2458/jpe.2924
- Mulyana, W., & Prasojo, E. (2020). Indonesia Urban Water Governance: The Interaction Between the Policy Domain of Urban Water Sector and Actors Network. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 15(2), 211–218. doi: 10.18280/ijstdp.150211
- Musacchio, A., Re, V., Mas-Pla, J., & Sacchi, E. (2020). EU Nitrates Directive, from theory to practice: Environmental effectiveness and influence of regional governance on its performance. *Ambio*, 49(2), 504–516. doi: 10.1007/s13280-019-01197-8
- Narendra, B. H., Siregar, C. A., Dharmawan, I. W., Sukmana, A., Pratiwi, Pramono, I. B., ... Yuwati, T. W. (2021). A Review on

- Sustainability of Watershed Management in Indonesia. *Sustainability*, 13(19). doi: 10.3390/su131911125
- Nava, L. F. (2025). Bridging Governance Gaps: A Political Ecology Analysis of Water Challenges in Guanajuato, Mexico. *Sustainability*, 17(7), 3245. doi: 10.3390/su17073245
- Newig, J., Jager, N. W., Challies, E., & Kochskämper, E. (2023). Does stakeholder participation improve environmental governance? Evidence from a meta-analysis of 305 case studies. *Global Environmental Change*, 82, 102705. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2023.102705
- Nonet, G. A.-H., Gössling, T., Van Tulder, R., & Bryson, J. M. (2022). Multi-stakeholder Engagement for the Sustainable Development Goals: Introduction to the Special Issue. *Journal of Business Ethics*, 180(4), 945–957. doi: 10.1007/s10551-022-05192-0
- Offutt, A. (2022). Mixing waters: stakeholder influence in transboundary water conflict and cooperation. *Water International*, 47(4), 583–609. doi: 10.1080/02508060.2022.2059322
- Pemerintah Indonesia. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Daerah Aliran Sungai.*, Pub. L. No. 37, 32 (2012).
- Pemerintah Provinsi Gorontalo. *Peraturan Daerah Provinsi Gorontalo Nomor 11 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Daerah Aliran Sungai PProvinsi Gorontalo.*, Pub. L. No. 11, 1 (2014).
- Pemerintah Provinsi Gorontalo. *Peraturan Daerah (Perda) Provinsi Gorontalo Nomor 2 Tahun 2024 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Provinsi Gorontalo Tahun 2024-2043.*, (2024).
- Peña-Campello, L., Espín-Gallardo, E., López-Sánchez, M. J., & Sánchez, M. (2024). Social Learning for Policy Design: A Bibliometric Analysis. *Social Sciences*, 13(10), 504. doi: 10.3390/socsci13100504
- Rittel, H. W. J., & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4(2), 155–169. doi: 10.1007/BF01405730
- Rivera-Torres, M., & Gerlak, A. K. (2021). Evolving together: transboundary water governance in the Colorado River Basin. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 21(4), 553–574. doi: 10.1007/s10784-021-09538-3
- Roengtam, S., Agustiyara, A., & Nurmandi, A. (2023). Making Network Governance Work in Forest Land-Use Policy in the Local Government. *Sage Open*, 13(3). doi: 10.1177/21582440231194491
- Roestamy, M., & Fulazzaky, M. A. (2022). A Review of The Water Resources Management for The Brantas River Basin: Challenges in The Transition to An Integrated Water Resources Management. *Environment, Development and Sustainability*, 24(10), 11514–11529. doi: 10.1007/s10668-021-01933-9
- Rojas, R., Bennison, G., Gálvez, V., Claro, E., & Castelblanco, G. (2020). Advancing Collaborative Water Governance: Unravelling Stakeholders' Relationships and Influences in Contentious River Basins. *Water*, 12(12), 3316. doi: 10.3390/w12123316
- Saraswat, C., & Gupta, A. K. (2024). *Water Governance Transitions Pathway: Adaptive Water Governance*. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-99-4105-6_16
- Schmid, N., Sewerin, S., & Schmidt, T. S.

- (2020). Explaining Advocacy Coalition Change with Policy Feedback. *Policy Studies Journal*, 48(4), 1109–1134. doi: 10.1111/psj.12365
- Stout, M., & Love, J. M. (2018). Advancing collaborative governance theory and practice. In *Integrative Governance* (pp. 33–40). Abingdon, Oxon ; New York, NY : Routledge, 2019. | Series: Global law and sustainable development: Routledge. doi: 10.4324/9781315526294-4
- Sulistyaningsih, T., Nurmandi, A., Kamil, M., Roziqin, A., Salahudin, Jainuri, ... Loilatu, M. J. (2021). Formulating Sustainable Watershed Governance Model: A Meta-analysis of Watershed Governance. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 10(2), 90. doi: 10.36941/ajis-2021-0041
- Sulistyaningsih, T., Nurmandi, A., Salahudin, S., Roziqin, A., Kamil, M., Sihidi, I. T., ... Loilatu, M. J. (2021). Public Policy Analysis on Watershed Governance in Indonesia. *Sustainability*, 13(12), 6615. doi: 10.3390/su13126615
- Supangat, A. B., Basuki, T. M., Indrajaya, Y., Setiawan, O., Wahyuningrum, N., Purwanto, ... Anggraeni, I. (2023). Sustainable Management for Healthy and Productive Watersheds in Indonesia. *Land*, 12(11), 1963. doi: 10.3390/land12111963
- Thapa, K., Vermeulen, W. J. V., & Deutz, P. (2022). Science with society: Challenges of early-stage researchers engaging with transdisciplinary research in sustainability science. *Sustainable Development*, 30(6), 1562–1572. doi: 10.1002/sd.2328
- Tinoco, C., Julio, N., Meirelles, B., Pineda, R., Figueroa, R., Urrutia, R., & Parra, Ó. (2022). Water Resources Management in Mexico, Chile and Brazil: Comparative Analysis of Their Progress on SDG 6.5.1 and the Role of Governance. *Sustainability*, 14(10), 5814. doi: 10.3390/su14105814
- Ulibarri, N., Imperial, M. T., Siddiki, S., & Henderson, H. (2023). Drivers and Dynamics of Collaborative Governance in Environmental Management. *Environmental Management*, 71(3), 495–504. doi: 10.1007/s00267-022-01769-7
- Valette, H. (2024). Analysing the Evolution of Water Governance Models in Indonesia Through the Economies of Worth Framework. *Water Alternatives*, 17(1), 121–144. Retrieved from <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol17/v17issue1/739-a17-1-6>
- van den Ende, M. A., Hegger, D. L. T., Mees, H. L. P., & Driessen, P. P. J. (2023). Wicked problems and creeping crises: A framework for analyzing governance challenges to addressing environmental land-use problems. *Environmental Science & Policy*, 141, 168–177. doi: 10.1016/j.envsci.2023.01.006
- Van Dyke, N., & Amos, B. (2017). Social movement coalitions: Formation, longevity, and success. *Sociology Compass*, 11(7), e12489. doi: 10.1111/soc4.12489
- Waldt, G. van der. (2025). Towards a Collaborative-adaptive Network Governance Frame-work for Sustainable Development. *Journal of Public Administration and Development Alternatives*, 10(1). doi: <https://doi.org/10.55190/JPADA.2025.412>
- Wang, B., Wang, H., Zeng, X., & Li, B. (2022). Towards a Better Understanding of Social-Ecological Systems for Basin Governance: A Case Study from the Weihe River Basin, China. *Sustainability*,

- 14(9), 4922. doi: 10.3390/su14094922
- Wang, K., Han, H., & Tan, C. (2025). The Evolution of Urban Environmental Governance Networks: Evidence from China. *Sustainability*, 17(14), 6345. doi: 10.3390/su17146345
- Wang, R. Y., van Rijswijk, M., & Dai, L. (2022). Improving connectivity in water governance: the implementation of water cooperation mechanisms in disparate political and social contexts. *International Journal of Water Resources Development*, 38(4), 545–553. doi: 10.1080/07900627.2022.2071848
- Warastuti, D., Sitopu, J. W., & Heka Ardana, P. D. (2025). Influence of Performance Indicators and Stakeholder Engagement on Policy Success in Urban Water Management in Indonesia. *Sustainable Development Insights*, 1(02), 28–37. doi: 10.58812/sdi.v2i01.1801
- Weible, C. M., Ingold, K., Nohrstedt, D., Henry, A. D., & Jenkins-Smith, H. C. (2020). Sharpening Advocacy Coalitions. *Policy Studies Journal*, 48(4), 1054–1081. doi: 10.1111/psj.12360
- Wesche, J. P., Dütschke, E., Negro, S. O., & Hekkert, M. P. (2025). Coalitions, coordination, and contestation: a systematic review of the advocacy coalition framework and its implications for sustainability transitions research. *Frontiers in Political Science*, 6, 1497731. doi: 10.3389/fpos.2024.1497731

APPENDIX A. ACTOR LIST and STRATEGIC GOALS

APPENDIX A1. List of Actors in Stakeholder Analysis

Kode	Brief Description of Actor	Penta helix Category	Number of Informants
GOV1	Development Planner	Government	1
GOV2	Environment and Forestry Service	Government	1
GOV3	Natural Resources Conservation Authority	Government	1
GOV4	Watershed and Protected Forest Management	Government	1
GOV5	River Basin Center	Government	1
GOV6	Forest Management Unit	Government	1
GOV7	District Government (multi-unit technical sector)	Government	2
ACD1	Academics from Higher Education	Academics	2
IND1	Timber Sector Companies	Industry	1
IND2	Sugar Sector Companies	Industry	1
IND3	Palm Oil Sector Companies	Industry	1
NGO1	Non-Governmental Organization	NGO/Public Community	1
COL1	Watershed Management Multi-Stakeholder Forum	NGO/Public Community	1
COM1	Forest Farmer Group	NGO/Public Community	2
PERS	Environmental Journalists	Media/Pers	1

APPENDIX A2. List of Strategic Objectives in Paguyaman Watershed Management

Code	Strategic Objectives
OBJ1	Spatial planning based on watershed carrying capacity
OBJ2	Strengthening environmental law enforcement
OBJ3	Reducing land conflicts among stakeholders
OBJ4	Improving policy and budget transparency
OBJ5	Determination of River Water Class
OBJ6	Environmental Carrying Capacity & Capacity Study
OBJ7	Multi-Stakeholder Collaboration
OBJ8	Improving the welfare of communities around watersheds
OBJ9	Promoting green economic growth
OBJ10	Reducing land conflicts between communities
OBJ11	Optimizing community participation in watershed management
OBJ12	Raising public awareness through environmental education
OBJ13	Maintaining local wisdom in watershed management
OBJ14	Ensuring sustainable clean water availability
OBJ15	Monitoring environmental quality
OBJ16	Preserving biodiversity and watershed ecosystems
OBJ17	Reducing water pollution from domestic/industrial waste
OBJ18	Coastal Conservation
OBJ19	Reducing the risk of floods and droughts
OBJ20	Improving watershed resilience to climate change
OBJ21	Building environmentally friendly infrastructure
OBJ22	Developing research and innovation in watershed management technology

APPENDIX B. MATRIX OF DIRECT INFLUENCES / MDI

This matrix shows the direct influence score of each actor on other actors based on the perceptions and results of filling out the questionnaire instrument by the informants.

Scale Description:

- 0: No influence
- 1: Operating procedures
- 2: Projects
- 3: Missions
- 4: Existance

MDI	GOV1	GOV2	GOV3	GOV4	GOV5	GOV6	GOV7	ACD1	IND1	IND2	IND3	NGO1	COL1	COM1	PERS
GOV1	0	4	3	3	3	3	4	3	2	2	2	2	3	2	2
GOV2	4	0	4	3	3	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1
GOV3	2	2	0	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	2	1
GOV4	2	2	2	0	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2
GOV5	3	3	2	2	0	2	3	2	2	2	2	1	2	2	1
GOV6	2	2	2	2	2	0	3	1	1	1	1	2	2	3	1
GOV7	3	3	2	2	3	3	0	2	3	3	3	2	2	4	2
ACD1	3	3	2	3	3	3	3	0	2	2	2	3	3	3	3
IND1	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
IND2	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
IND3	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
NGO1	2	2	2	0	0	2	2	2	0	4	0	0	2	2	2
COL1	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	2	3	0	3	3
COM1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	2	0	2
PERS	2	0	2	0	0	2	2	2	0	0	0	3	2	2	0

© LIPSOR-EPIITA-MACTOR

Notes: Rows indicate influencing actors, while columns indicate influenced (dependent) actors

APPENDIX C. MATRIKS POSISI DAN PRIORITAS TUJUAN STRATEGIS (2MAO / VALUED POSITION MATRIX)

The matrix of valued positions Actor X Objective (2MAO) provides information on the actor's stance on each objective (pro, against, neutral, or indifferent) and the hierarchy of its objectives.

2MAO	OBJ1	OBJ2	OBJ3	OBJ4	OBJ5	OBJ6	OBJ7	OBJ8	OBJ9	OBJ10	OBJ11	OBJ12	OBJ13	OBJ14	OBJ15	OBJ16	OBJ17	OBJ18	OBJ19	OBJ20	OBJ21	OBJ22
GOV1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
GOV2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3
GOV3	2	0	2	0	2	2	2	3	2	2	3	3	2	0	0	4	2	2	3	2	2	0
GOV4	0	3	0	0	0	0	3	3	3	0	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	3	0
GOV5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GOV6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GOV7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACD1	3	3	3	3	3	3	3	0	3	0	3	3	3	0	3	3	0	3	0	3	3	3
IND1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4
IND2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IND3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NGO1	4	4	4	3	-4	-4	3	4	0	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	3	4	4
COL1	3	3	3	3	3	3	3	0	3	0	3	3	3	0	3	3	0	3	0	3	3	3
COM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PERS	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

© LIPSOR-EPTA-MACTOR

The sign indicates whether or nor the actor is likely to reach the objective.

- 0 : Objective has a bleak outcome
- 1 : Objective jeopardises the actor's operating procedures (management, etc.) / is vital for its operating procedures
- 2 : Objective jeopardises the success of the actor's projects / is vital for the success of its projects
- 3 : Objective jeopardises the accomplishment of the actor's mission / is indispensable for its missions
- 4 : Objective jeopardises the actor's existence / is indispensable for its existence
- 1 to -4 : Reject, the more negative = the stronger the rejection and high priority

APPENDIX D. RESEARCH INSTRUMENT (IN BAHASA INDONESIA)

The research instrument used in this study was a structured questionnaire written in Bahasa Indonesia. It was developed to collect data on stakeholder validation, actor profiles, direct influence matrices (MDI), and strategic objective prioritization (2MAO). The instrument was pre-tested and administered through interviews and self-completion.

To ensure transparency and reproducibility, the full version of the questionnaire (in Bahasa Indonesia) is archived and openly accessible at the following link:

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16736905>. Researchers working in similar Indonesian contexts are encouraged to consult and adapt this instrument accordingly.

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEBERHASILAN PERTUMBUHAN TANAMAN REHABILITASI HUTAN DAN LAHAN PERIODE 2019-2024 DI DAS SADDANG

(Factors Influencing The Success of Plant Growth in Forest and Land Rehabilitation in the Saddang Watershed from 2019 to 2024)

Asikin Muchtar^{1*}, Muh.Bismar WWS¹, Wahyullah¹, Abd.Kadir¹, Mahmud¹, Ummu Kultsum¹

¹Universitas Indonesia Timur, Jl.Rappocini Raya No.171 Makassar, Sulawesi Selatan

*email: muchtar.asikin@yahoo.com

Diterima: 19 Juni 2025, Direvisi: 15 Juli 2025, Disetujui : 22 Januari 2026

ABSTRACT

Forest and land rehabilitation is carried out annually to restore watershed conditions. In 2019, the BPDAS Jeneberang Saddang planted pine, candlenut, and sugar palm trees in Block 1 and 2, which cover 50 hectares each, in Rosoan Village, Enrekang District, Enrekang Regency, South Sulawesi Province. This study aims to determine the success rate and factors influencing the growth success of Forest and Land Rehabilitation (RHL) plant planted in 2019, and to determine the factors influencing their success. This study was a survei study. Data were collected through observations, interviews, and documentation. Data analysis were carried out using multiple linear regression with three independent variables: soil physical factors, soil chemistry, and socio-economic conditions. The results showed that the growth rate of pine (*Pinus merkusii*) was 36.36% (very low) or 432 trees/ha, candlenut (*Aleurites moluccana*) was 42.7% (very low) or 470 trees/ha, and sugar palm (*Arenga pinnata*) was 39.2% (very low) or 400 trees/ha. Soil physical factors such as clay texture (68.13%), and the solum depth of 20–25 cm have a significant effect on plant growth (F count 14.866 > 2.810; t count 3.856 > 1.679; sig. 0.000). Additionally, soil chemical factors (F count 7.940; sig. 0.007) and community socio-economic factors (F count 18.143; sig. 0.000) also showed a significant effect. This study recommended that BPDAS actively involve the surrounding community in intensive maintenance and budget for plant maintenance cost to optimize plant growth.

Keywords: *growth success; forest rehabilitation; physical; chemical; socio-economic*

ABSTRAK

Rehabilitasi hutan dan lahan setiap tahun dilaksanakan untuk memulihkan kondisi DAS. Tahun 2019 BPDAS Jeneberang Saddang melakukan penanaman pinus, kemiri, dan aren pada Blok 1 dan Blok 2 seluas masing-masing 50 ha di Desa Rosoan, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang Provinsi Sulawesi Selatan. Penelitian bertujuan untuk mengetahui tingkat keberhasilan dan faktor yang mempengaruhi keberhasilan pertumbuhan tanaman

Rehabilitasi Hutan dan Lahan (RHL) yang ditanam tahun 2019 dan mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilannya. Penelitian ini adalah penelitian survei. Data dikumpulkan melalui observasi, wawancara dan dokumentasi. Data diolah dengan regresi linear berganda dengan tiga variabel independen yaitu faktor fisik tanah, kimia tanah, dan kondisi sosial ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pertumbuhan tanaman pinus (*Pinus merkusii*) 36,4, (sangat rendah) atau 432 tanaman/ha, kemudian jenis MPTS kemiri (*Aleurites moluccana*) 42,7% (sangat rendah) atau 470 tanaman/ha, dan aren (*Arenga pinnata*) 39,2% (sangat rendah) atau 400 tanaman/ha. Tingkat pertumbuhan tanaman yang rendah ini dipengaruhi oleh kondisi fisik lahan (tekstur tanah liat 68,1%) dan kedalaman solum tanah 20–25 cm yang secara spasial berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman (nilai F hitung 14,866 > 2,810; t hitung 3,856 > 1,679; signifikansi 0,000). Selain itu, faktor kimia tanah secara spasial juga berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman (F hitung 7,940 > 3,200; t hitung 2,818 > 1,679; signifikansi 0,007), serta faktor sosial ekonomi secara spasial berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan (F hitung 18,143 > 3,200; t hitung 4,259 > 1,679; signifikansi 0,000). Hasil penelitian ini merekomendasikan kepada BPDAS untuk melibatkan masyarakat sekitar dalam pemeliharaan yang intensif dan menganggarkan biaya pemeliharaan tanaman agar pertumbuhan tanaman mencapai optimum.

Kata kunci: keberhasilan tumbuh; rehabilitasi hutan; fisik; kimia; sosial ekonomi

I. PENDAHULUAN

Rehabilitasi lahan pada hakikatnya merupakan suatu upaya untuk memulihkan, memperbaiki, dan meningkatkan mutu lahan yang telah mengalami kerusakan agar dapat kembali berfungsi secara optimal sebagai lahan produksi, pengatur tata air, serta komponen penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan lingkungan (Wahono, 2002). Program Rehabilitasi Hutan dan Lahan (RHL) merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari sistem pengelolaan hutan dan lahan yang berfokus pada pengelolaan daerah aliran sungai. Upaya rehabilitasi ini memiliki peran krusial dalam menyeimbangkan antara fungsi perlindungan lingkungan dengan aktivitas budidaya, sehingga dapat mencegah terjadinya deforestasi dan penurunan fungsi ekologis hutan maupun lahan (Fatmawati, 2020). Oleh karenanya,

Program RHL menjadi langkah strategis dalam memulihkan ekosistem yang rusak, memperbaiki fungsi hidrologi, serta menjaga keberlanjutan lingkungan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2019).

Keberhasilan pelaksanaan program RHL sangat ditentukan oleh kemampuan tanaman untuk bertahan dan tumbuh di area yang telah diperbaiki. Perlu dilakukan perhitungan tingkat keberhasilan tanaman dengan membandingkan jumlah tanaman yang tumbuh sehat dengan jumlah tanaman yang direncanakan sesuai rancangan kegiatan untuk mengetahui tingkat keberhasilan program RHL (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). Indikator tersebut dianggap cukup representatif, sebab hanya tanaman yang sehat yang memiliki kemampuan bertahan dalam jangka panjang (Hatta *et al.*, 2018). Evaluasi

keberhasilan RHL umumnya dilakukan melalui penilaian kondisi lapangan dengan menggunakan indikator persentase tumbuh tanaman, yakni minimal sebesar 75%. Proses evaluasi tersebut dilaksanakan dengan melakukan kunjungan langsung ke lokasi rehabilitasi untuk memantau perkembangan pertumbuhan tanaman pada areal yang direhabilitasi (Kartika, 2019).

Namun demikian, dalam implementasinya, pertumbuhan tanaman kerap dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik dari aspek lingkungan, teknis, maupun sosial (Sudomo, 2017). Dari sisi lingkungan, kondisi tanah seperti kesuburan, ketersediaan air, dan teksturnya merupakan elemen penting yang mempengaruhi perkembangan tanaman (Asdak, 2010). Selain itu, unsur hara yang tersedia dan iklim setempat juga sangat berperan dalam membantu tanaman beradaptasi di lokasi rehabilitasi. Pemilihan jenis tanaman yang selaras dengan karakteristik ekosistem lokal menjadi kunci utama dalam menentukan keberhasilan program RHL (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). Faktor-faktor iklim setempat seperti suhu, kelembaban udara, dan intensitas cahaya, berpengaruh signifikan terhadap kelangsungan hidup tanaman pada lokasi rehabilitasi hutan (Suryanto, 2016).

Kabupaten Enrekang, yang terletak di Provinsi Sulawesi Selatan, termasuk dalam wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) Saddang dan telah menjadi fokus utama dalam upaya pemulihan DAS melalui Program RHL. Pada tahun 2019, BPDAS Jeneberang Saddang melaksanakan

kegiatan penanaman berbagai jenis pohon di kawasan hutan Kecamatan Enrekang dengan total 11.000 bibit (BPDAS Jeneberang Saddang, 2019). Meskipun diharapkan seluruh bibit dapat tumbuh dengan baik (target keberhasilan 100%), namun hasil survei pendahuluan tanaman pada tahun 2024 oleh Asikin (2024) menunjukkan bahwa tingkat keberhasilan tumbuh masih di bawah 100%. Tingkat keberhasilan ini diduga dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kondisi fisik dan kimia tanah, serta aspek sosial ekonomi masyarakat setempat (Asikin, 2024).

Penelitian terdahulu oleh Alfianni (2023) di Desa Baruppu, Kecamatan Parodo, Kabupaten Toraja Utara menunjukkan bahwa penanaman pada areal RHL seluas 50 ha telah terealisasi 100% dengan tingkat tumbuh 91,6% dan rata-rata tinggi tanaman 58,9 cm. Penelitian Putri (2022) melaporkan bahwa kegiatan RHL tahun 2000–2020 memiliki tingkat pertumbuhan 68,8–90%, kecuali tahun 2019 sebesar 70,5% yang tergolong sedang, sehingga masih memerlukan perbaikan. Penelitian Mawaddah (2022) menunjukkan tingkat tumbuh tanaman 79%, melebihi standar minimal 75% dan termasuk kategori “baik”. Sementara itu, penelitian Sunardi, *et al.* (2021) hanya menilai keberhasilan berdasarkan persentase tumbuh, yaitu 60,6%, terdiri atas 28,6% tanaman tumbuh baik dan 26% tanaman merana.

Sementara pada penelitian ini, peneliti tidak hanya menganalisis tingkat pertumbuhan tanaman, tetapi juga mengevaluasi berbagai faktor yang

mempengaruhinya dan mengujinya secara statistik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis tingkat keberhasilan pertumbuhan tanaman yang ditanam tahun 2019-2024 dan faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan pertumbuhan tanaman di lapangan.

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi

Penelitian ini telah dilakukan selama dua bulan, yakni dari bulan Januari hingga Februari 2025. Lokasi penelitian berada di kawasan hutan Desa Rosoan, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang, Provinsi Sulawesi Selatan. Wilayah ini termasuk dalam DAS Saddang dan merupakan bagian dari lokasi program RHL yang dilaksanakan pada tahun 2019. Letak lokasi penelitian berada pada koordinat $3^{\circ} 30' 31,93949''$ Lintang Selatan dan $119^{\circ} 48' 56,04534''$ Bujur Timur. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

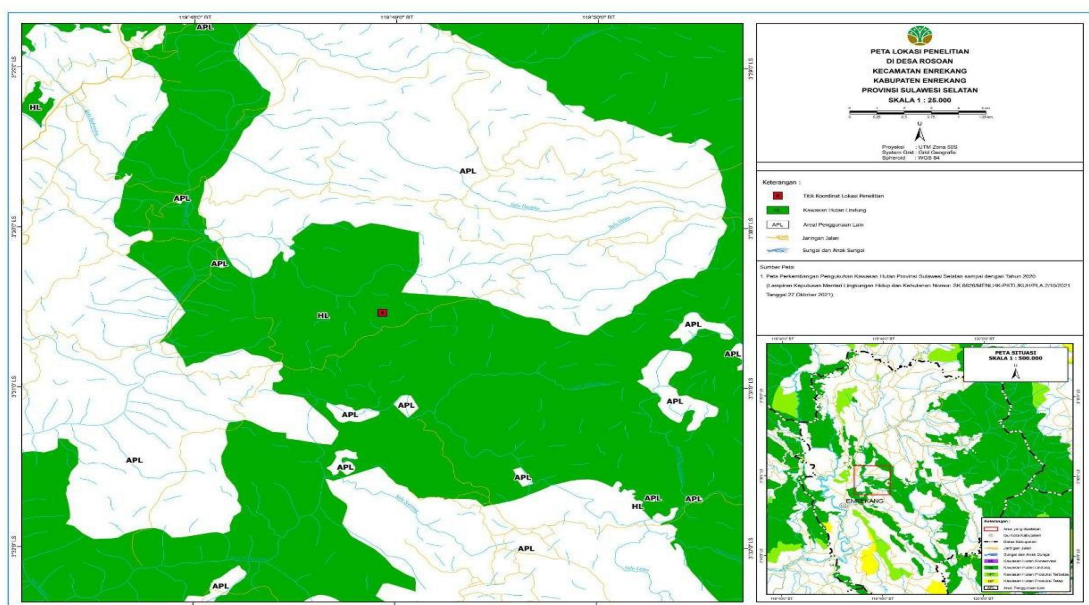
B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi buku *tally sheet*, alat tulis, dan lembar kertas. Peralatan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian terdiri atas meteran rol sepanjang 50 meter, peta lokasi, tali rafia, kompas, serta lembar kuesioner.

C. Metode Penelitian

1. Rancangan penelitian

Rancangan penelitian didesain dengan pendekatan survei yaitu penelitian yang dilakukan untuk mengumpulkan data pertumbuhan tanaman dengan berdasar pada lokasi blok 1 dan blok 2 dengan masing-masing luas 50 ha. Selain itu data dikumpulkan pula dengan menyebarkan kuesioner kepada masyarakat sekitar hutan untuk mengetahui kondisi sosial ekonomi masyarakat yang berpengaruh terhadap keberhasilan tumbuh tanaman.



Gambar (Figure) 1. Lokasi Penelitian (Research Location)
Sumber (Source): Pengolahan Data, 2025 (Data Analysis, 2025)

2. Populasi dan sampel penelitian

Populasi penelitian ini adalah luas keseluruhan lokasi rehabilitasi DAS oleh BPDAS Jeberang Saddang pada blok 1 dan 2 seluas 100 ha. Adapun penentuan sampel penelitian berdasarkan intensitas sampling 25% dari 100 ha, yaitu 25 ha. Luas sampel 25 ha ini terbagi atas 2 blok, yaitu blok 1=12,5 ha, dan blok 2=12,5 ha. Untuk mengetahui kondisi fisik lahan (porositas dan permeabilitas) serta kimia tanah (N-total, N, P, K), maka dilakukan pengambilan sampel tanah, yaitu 2 sampel tanah pada 2 blok tanaman.

Populasi untuk masyarakat yaitu keseluruhan penduduk yang berdomisili di sekitar kawasan hutan Desa Rosoan yakni 37.139 jiwa (BPS Kabupaten Enrekang, 2024). Untuk menentukan besarnya sampel responden, maka digunakan rumus sebagaimana diungkapkan oleh Amirin (2015), yaitu :

$$n = \frac{N}{N(Is)2+1} \quad (1)$$

Keterangan (*remarks*):

n = Besarnya sampel (org)

N = Jumlah populasi (penduduk Kecamatan Enrekang=37.139 jiwa)

Is = Intensitas sampling 15%.

Besaran intensitas sampling 15% mengacu pada pernyataan Sugiyono (2018) bahwa untuk menentukan besarnya sampel maka rentang pengambilan intensitas sampling (presisi) antara 1-20% dari jumlah populasi. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan rumus yang telah ditetapkan, jumlah sampel dalam

penelitian ini ditentukan sebanyak 45 responden (jiwa). Pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling*, yaitu dengan mendatangi masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan hutan tempat Program RHL dilaksanakan. Para responden diminta untuk mengisi kuesioner dengan memberikan tanda centang pada jawaban yang sesuai menggunakan Skala Likert dengan rentang nilai 1 hingga 5. Skor 1 menunjukkan "Sangat Tidak Peduli (STP)", skor 2 "Agak Peduli (AP)", skor 3 "Ragu-ragu (RR)", skor 4 "Peduli (P)", dan skor 5 "Sangat Peduli (SP)".

3. Pengumpulan data

Pengumpulan data primer diperoleh dari pengukuran persentase tumbuh tanaman di lapangan, pengambilan sampel tanah untuk melihat fisik lahan (porositas, permeabilitas) dan kimia tanah (N total, N, P, K), serta penyebaran kuesioner kepada masyarakat sekitar hutan untuk mengetahui sosial ekonomi yang berpengaruh terhadap keberhasilan pertumbuhan tanaman. Pengukuran persentase tumbuh tanaman melalui plot ukur dengan luas 0,1 ha (40m x 25m) masing-masing sebanyak 3 plot ukur pada lokasi sampel blok 1 dan blok 2. Pengumpulan data tingkat pertumbuhan tanaman adalah menghitung jumlah tanaman hidup dan sehat pada masing-masing plot ukur, dengan asumsi bahwa 1 plot berisi total tanaman 40 tanaman. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah observasi langsung di lapangan. Peneliti

mengunjungi lokasi untuk melakukan pengamatan serta pengukuran terhadap parameter penelitian, khususnya pertumbuhan tanaman yang ditanam pada tahun 2019.

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi: 1) tingkat pertumbuhan tanaman pada Program RHL, yang mencakup: a) persentase tanaman yang bertahan hidup (%), b) persentase tanaman dalam kondisi sehat (%); 2) faktor fisik, yang terdiri dari: a) karakteristik tanah (kedalaman solum dan jenis tanah), b) kondisi iklim (jumlah curah hujan, tingkat kelembapan, dan suhu udara); 3) faktor kimia lahan, meliputi: a) kandungan unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), dan b) total kandungan nitrogen (N total); 4) faktor sosial ekonomi, meliputi: a) pemberdayaan masyarakat, dan b) pendapatan masyarakat.

Untuk menentukan luas area yang diwakili oleh plot pengamatan digunakan rumus menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2015) :

$$L = \frac{100}{Is} \times LP \quad (2)$$

Keterangan (*remarks*):

L = Luas terwakili (ha)

Is = Intensitas sampling (2,5%)

LP = Luas plot pengamatan (40 m × 25 m = 0,1 ha)

Perhitungannya sebagai berikut:

$$L = \frac{100}{2,5} \times 0,1$$

$$L = 4 \text{ Ha}$$

Jarak antar plot ukur dihitung dengan rumus:

$$JP = \sqrt{4 \times 10000} \quad (3)$$
$$JP = 200 \text{ m}$$

Jumlah plot ukur yang digunakan setara dengan 25% dari total luas area rehabilitasi hutan dan lahan, yaitu pada Petak 1 (50 ha) dan Petak 2 (50 ha) di Desa Rosoan, Kecamatan Enrekang. Total luas area yaitu 100 ha, sehingga jumlah sampel yang diambil adalah:

$$JS = 25\% \times 100 \text{ ha} \quad (4)$$
$$JS = 25 \text{ ha}$$

Keterangan (*remarks*):

S=Jumlah sampel (ha)

Jadi jumlah sampel luasan area penelitian adalah 25 Ha, terbagi atas 2 blok, yaitu blok 1 seluas 12,5 ha, dan blok 2 seluas 12,5 ha.

Jumlah plot ukur yang dibutuhkan:

$$\sum P = \frac{25 \text{ ha}}{4 \text{ hs}} \quad (5)$$
$$\sum P = 6 \text{ plot}$$

Selanjutnya, dilakukan pencatatan terhadap semua bibit yang tumbuh, termasuk bibit yang sehat maupun yang menunjukkan gejala pertumbuhan yang kurang baik di dalam plot pengamatan yang telah dibuat. Selain itu, juga dicatat faktor-faktor fisik seperti tingkat pemeliharaan, jenis dan solum tanah, serta kondisi iklim. Di samping itu, faktor kimia tanah yang dianalisis adalah kandungan unsur hara (nitrogen total).

Kuesioner dibagikan kepada 45 responden guna mengetahui sejauh mana pengaruh faktor sosial ekonomi.

Responden diminta memberikan jawaban dengan mencentang salah satu dari pilihan angka 1 hingga 5.

Menurut Sugiyono (2018), kuesioner merupakan teknik pengumpulan data yang dilakukan dengan cara memberikan serangkaian pertanyaan atau pernyataan tertulis kepada responden agar dijawab secara langsung. Dalam penelitian ini, responden yang dimaksud adalah masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan hutan dan telah berpartisipasi dalam kegiatan pemeliharaan tanaman pada area Program RHL tahun 2019.

4. Analisis Data

Menurut Sugiyono (2018), skala *Likert* digunakan sebagai alat untuk mengukur sikap, pandangan, serta persepsi individu atau kelompok terhadap suatu fenomena sosial tertentu. Dalam konteks penelitian ini, fenomena sosial tersebut telah dirumuskan secara spesifik dan ditetapkan sebagai variabel penelitian. Skala *Likert* memungkinkan setiap variabel diuraikan ke dalam beberapa indikator, yang masing-masing memiliki lima tingkat pilihan dengan bobot nilai tersendiri. Skala *Likert* yang digunakan

dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1.

Data yang diperoleh dari hasil pengamatan dan pencatatan berupa jumlah tanaman jenis kayu-kayuan yang tumbuh dengan baik dan dalam kondisi sehat, kemudian diolah serta disusun dalam bentuk tabel. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan rumus dari Kementerian Kehutanan RI (2009) sebagai berikut:

$$T = \frac{\sum h_i}{n_i} \times 100\% \quad (6)$$

Keterangan (*remarks*):

T = Persentase (%) keberhasilan pertumbuhan tanaman

Hi = Jumlah tanaman yang hidup pada plot contoh ke-i

Ni = Jumlah tanaman yang seharusnya ada di plot contoh ke-i

Persentase keberhasilan pertumbuhan tanaman yang diperoleh dari hasil pengolahan data selanjutnya dibandingkan dengan standar keberhasilan tumbuh yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.60 Tahun 2009 tentang Pedoman Keberhasilan Reklamasi Hutan (Kementerian Kehutanan RI, 2009). Ketentuan mengenai kriteria persen keberhasilan tumbuh tanaman tersaji pada Tabel 2.

Tabel (Table) 1. Skala *Likert* (*Likert Scale*)

No.	Tanggapan (<i>Response</i>)	Skor (<i>Score</i>)
1.	Sangat Peduli (<i>Very Care</i>) (SP)	5 (<i>Five</i>)
2.	Peduli (<i>Care</i>) (P)	4 (<i>Four</i>)
3.	Ragu-ragu (<i>doubtful</i>) (RR)	3 (<i>Three</i>)
4.	Kurang Peduli (<i>don't care</i>) (KP)	2 (<i>Two</i>)
5.	Sangat Tidak Peduli (<i>very unconcerned</i>)(STP)	1 (<i>One</i>)

Sumber (*Source*): Sugiyono, 2018

Tabel (Table) 2. Kriteria Tingkat Keberhasilan Tumbuh Tanaman (*Criteria for Plant Growth Success Rate*)

No	Persentase Tumbuh (%) (Growth Percentage (%))	Klasifikasi (<i>Classification</i>)
1	>95	Sangat Tinggi (<i>Very high</i>)
2	85-95	Tinggi (<i>High</i>)
3	75-85	Sedang (<i>Moderate</i>)
4	65-75	Kurang (<i>Slightly Low</i>)
5	55-65	Rendah (<i>Low</i>)
6	< 55	Sangat Rendah (<i>Very low</i>)

Sumber (*Source*): Kementerian Kehutanan RI, 2009

Adapun untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat keberhasilan pertumbuhan tanaman digunakan rumus regresi linear berganda sebagaimana dikemukakan oleh Sugiyono (2018), yaitu :

$$Y = \alpha + \beta_1xX_1 + \beta_2xX_2 + \beta_3xX_3 + e \quad (7)$$

Keterangan (*remarks*):

Y: Variabel tingkat pertumbuhan tanaman

a: Konstanta

β_1 : Koefisien regresi faktor fisik lahan

β_2 : Koefisien regresi faktor kimia lahan

β_3 : Koefisien regresi faktor sosial ekonomi

X1: Variabel faktor fisik lahan

X2: Variabel faktor kimia lahan

X3: Variabel faktor sosial ekonomi

E: Error/Sisa

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tingkat Keberhasilan Pertumbuhan Tanaman Kayu-kayuan

Hasil pengumpulan data pertumbuhan tanaman jenis kayu-kayuan ditabulasi dan diolah menjadi bentuk tabel sehingga memberikan data dan informasi mengenai tingkat keberhasilan pertumbuhannya. Data tersebut disajikan Tabel 3.

Tabel (Table) 3. Persentase Tumbuh Tanaman Pinus (*Plant Growth Percentage of Pine*)

Plot (Plots)	Jenis Tanaman (Species of Plant)	Jumlah Tanaman (Number of Plants)		Persentase Tumbuh (%) (Growth Percentage (%))	Kriteria Tingkat Pertumbuhan (Growth Rate Criteria)
		Rencana (Planning)	Tumbuh (Growth)		
1	Pinus (<i>Pine</i>)	110	46	41.82	Sangat Rendah (<i>Very Low</i>)
2	Pinus (<i>Pine</i>)	110	37	33.64	Sangat Rendah (<i>Very Low</i>)
3	Pinus (<i>Pine</i>)	110	43	39.09	Sangat Rendah (<i>Very Low</i>)
4	Pinus (<i>Pine</i>)	110	31	28.18	Sangat Rendah (<i>Very Low</i>)
5	Pinus (<i>Pine</i>)	110	35	31.82	Sangat Rendah (<i>Very Low</i>)
6	Pinus (<i>Pine</i>)	110	48	43.64	Sangat Rendah (<i>Very Low</i>)
Rata-rata (Average)		110	40	36.36	Sangat Rendah (<i>Very Low</i>)

Sumber (*Source*): Pengolahan Data, 2025 (*Data Analysis, 2025*)

Tabel 3 memperlihatkan bahwa plot 6 memiliki persentase pertumbuhan tanaman kayu-kayuan tertinggi yaitu sebesar 43,6%, diikuti oleh plot 1 dengan 41,8%. Meskipun demikian, rata-rata persentase pertumbuhan tanaman pada seluruh plot hanya mencapai 36,4%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat keberhasilan pertumbuhan tanaman tergolong sangat rendah karena masih berada di bawah standar minimum yang ditetapkan oleh Kementerian Kehutanan, yakni sebesar 75%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah dan persentase tanaman Pinus (*Pinus merkusii*) yang berhasil tumbuh per hektar hanya mencapai sekitar 400 pohon atau 36,4% dari total 1.345 pohon yang ditanam. Rendahnya tingkat keberhasilan ini antara lain disebabkan oleh ketiadaan kegiatan pemeliharaan pada tahun kedua setelah penanaman, di mana tanaman yang mati tidak segera diganti akibat tidak tersedianya anggaran pemeliharaan dari pemerintah. Selain itu, kondisi lingkungan seperti cuaca yang sangat panas, lapisan tanah (solum) yang dangkal, serta gangguan gulma berupa alang-alang turut berkontribusi terhadap rendahnya pertumbuhan tanaman tersebut.

Tingkat keberhasilan RHL sangat dipengaruhi oleh kegiatan pemeliharaan pascatanam. Salah satu penyebab rendahnya keberhasilan tumbuh tanaman adalah tidak dilakukannya pemeliharaan

lanjutan pada tahun-tahun berikutnya, seperti penyulaman, penyiangan, dan pemupukan. Tanaman yang mati tidak segera diganti karena keterbatasan anggaran, menyebabkan penurunan persentase tumbuh secara signifikan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020).

Selain faktor manajemen, kondisi lingkungan juga memiliki peran penting. Faktor-faktor seperti suhu yang tinggi, solum tanah yang dangkal, dan keberadaan gulma khususnya alang-alang (*Imperata cylindrica*) dapat menghambat pertumbuhan tanaman muda karena kompetisi terhadap unsur hara, air, dan cahaya (Wulandari & Budiono, 2021). Tanaman pada lahan dengan kondisi tanah dangkal dan minim kelembapan cenderung mengalami stres fisiologis yang mengakibatkan kematian lebih tinggi (Asdak, 2010). Oleh karena itu, keberhasilan RHL tidak hanya ditentukan oleh kegiatan penanaman awal, tetapi juga oleh upaya pemeliharaan dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

B. Tingkat Keberhasilan Pertumbuhan Tanaman MPTS

Berdasarkan hasil pengolahan dan penyusunan data diperoleh informasi mengenai persentase pertumbuhan tanaman dari jenis *Multy Purpose Tree Species* (MPTS), yang tersaji pada Tabel 4.

Tabel (Table) 4. Persentase Tumbuh Tanaman Aren (*Percentage of Sugar Palm Plant Growth*)

Plot (Plots)	Jenis Tanaman (Species of Plants)	Jumlah Tanaman (Number of Species)		Persentase Tumbuh (%) (Growth Percentage (%))	Kriteria Tingkat Pertumbuhan (Growth Rate Criteria)
		Rencana (Planning)	Tumbuh (Growth)		
1	Aren (<i>sugar palm</i>)	110	32	29.09	Sangat Rendah (Very Low)
2	Aren (<i>sugar palm</i>)	110	26	23.64	Sangat Rendah (Very Low)
3	Aren (<i>sugar palm</i>)	110	31	28.18	Sangat Rendah (Very Low)
4	Aren (<i>sugar palm</i>)	110	55	50.00	Sangat Rendah (Very Low)
5	Aren (<i>sugar palm</i>)	110	72	65.45	Sangat Rendah (Very Low)
6	Aren (<i>sugar palm</i>)	110	43	39.09	Sangat Rendah (Very Low)
Rata-rata (Average)		110	43	39.24	Sangat Rendah (Very Low)

Sumber (Source): Pengolahan Data, 2025 (*Data Analysis, 2025*).

Tabel 4 menunjukkan bahwa persentase pertumbuhan tanaman tertinggi terdapat pada plot 5 sebesar 65,5%, diikuti oleh plot 4 dengan 50,00%. Secara keseluruhan, rata-rata persentase pertumbuhan tanaman jenis Aren (*Arenga pinnata*) hanya mencapai 39,2%. Nilai ini mengindikasikan bahwa tingkat keberhasilan pertumbuhan tanaman Aren tergolong sangat rendah, karena berada di bawah ambang batas 75% yang ditetapkan oleh Kementerian Kehutanan RI (2009). Pertumbuhan tanaman Aren yang rendah ini antara lain disebabkan oleh tidak adanya penyulaman setelah tanam, pada tahun kedua, ketiga, keempat, dan kelima. Pertumbuhan tanaman Aren yang rendah ini juga disebabkan oleh faktor lingkungan, yaitu media tanam berupa tanah liat, solum yang dangkal, serta permeabilitas dan porositas yang rendah sehingga mempengaruhi tanaman untuk dapat tumbuh dengan baik.

Faktor lingkungan merupakan komponen penting yang memengaruhi keberhasilan pertumbuhan tanaman, terutama kondisi media tanam dan sifat

fisik tanah. Jenis tanah liat umumnya memiliki tekstur halus dengan porositas dan permeabilitas yang rendah, sehingga menghambat pergerakan air dan udara di dalam tanah. Kondisi ini menyebabkan akar tanaman sulit bernafas dan menyerap unsur hara secara optimal (Sutanto, 2005). Selain itu, ketebalan solum tanah atau lapisan tanah efektif juga berperan besar terhadap perkembangan akar dan ketersediaan air. Solum yang dangkal membatasi ruang tumbuh akar dan cadangan air, sehingga tanaman mudah mengalami stres terutama pada musim kemarau (Hardjowigeno, 2015). Porositas dan permeabilitas tanah yang rendah mengakibatkan drainase yang buruk serta aerasi tanah yang tidak memadai, yang pada akhirnya menurunkan pertumbuhan vegetatif tanaman (Asdak, 2010). Jenis tanaman MPTS lainnya, yaitu Kemiri (*Aleurites moluccana*), hasil dari pengolahan dan tabulasi data menunjukkan persentase pertumbuhannya, yang disajikan dalam Tabel 5.

Tabel (Table) 5. Persentase Tumbuh Tanaman Kemiri (Percentage of Candlenut Plant Growth)

Plot Plots	Jenis Tanaman (Species of Plants)	Jumlah Tanaman (Number of Species)		Persentase Tumbuh (%) (Growth Percentage (%))	Kriteria Tingkat Pertumbuhan (Growth Rate Criteria)
		Rencana (Planning)	Tumbuh (Growth)		
1	Kemiri (Candlenut)	110	39	35.45	Sangat Rendah (Very Low)
2	Kemiri (Candlenut)	110	33	30.00	Sangat Rendah (Very Low)
3	Kemiri (Candlenut)	110	36	32.73	Sangat Rendah (Very Low)
4	Kemiri (Candlenut)	110	58	52.73	Sangat Rendah (Very Low)
5	Kemiri (Candlenut)	110	69	62.73	Sangat Rendah (Very Low)
6	Kemiri (Candlenut)	110	47	42.73	Sangat Rendah (Very Low)
Rata-rata (Average)		110	47	42.73	Sangat Rendah (Very Low)

Sumber (Source): Pengolahan Data, 2025 (Data Analysis, 2025)

Tabel 5 memperlihatkan bahwa persentase pertumbuhan tertinggi tanaman Kemiri terdapat pada plot 5 dengan nilai 62,7%, disusul oleh plot 4 sebesar 52,7%. Secara rata-rata, persentase pertumbuhan tanaman Kemiri hanya mencapai 42,7%. Angka ini menunjukkan bahwa tingkat keberhasilan pertumbuhannya masih sangat rendah, karena belum memenuhi standar minimal 75% yang ditetapkan oleh Kementerian Kehutanan RI (2009). Pertumbuhan tanaman kemiri yang rendah antara lain disebabkan oleh tidak adanya pemeliharaan lanjutan, tidak adanya anggaran yang disediakan pada tahun-tahun berikutnya, faktor cuaca yang sangat panas (ekstrim), lahan ditumbuhi alang-alang yang dominan.

Keberhasilan pertumbuhan tanaman kemiri dalam kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan sangat dipengaruhi oleh kegiatan pemeliharaan pascatanam. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2020), kegiatan pemeliharaan seperti penyulaman, penyiangan, dan pemupukan perlu dilakukan secara berkelanjutan selama dua

tahun pertama setelah penanaman agar tingkat keberhasilan tumbuh tetap tinggi. Ketiadaan kegiatan pemeliharaan lanjutan sering menyebabkan meningkatnya angka kematian tanaman muda, termasuk pada jenis kemiri yang memiliki daya adaptasi sedang terhadap kondisi lingkungan kering (Sutopo, 2013). Faktor cuaca ekstrem seperti suhu yang terlalu panas dan rendahnya curah hujan turut memperburuk kondisi pertumbuhan kemiri. Tanaman muda mudah mengalami stres air sehingga aktivitas fotosintesis dan penyerapan unsur hara menjadi terganggu (Asdak, 2010). Selain itu, keberadaan gulma, terutama alang-alang (*Imperata cylindrica*), menjadi kompetitor utama bagi tanaman kemiri dalam memperoleh cahaya, air, dan unsur hara. Alang-alang memiliki sistem perakaran yang kuat dan cepat menyebar, sehingga mendominasi lahan dan menekan pertumbuhan tanaman kehutanan (Wulandari & Budiono, 2021).

Rekapitulasi persentase pertumbuhan tanaman jenis kayu-kayuan dan MPTS di kawasan hutan RHL Desa Rosoan, Kecamatan Enrekang, Kabupaten

Enrekang, sebagai hasil kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan yang dilaksanakan secara swakelola oleh BPDAS Jeneberang Saddang, ditampilkan dalam Tabel 6.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan tanaman pinus rata-rata 36,36%, aren rata-rata 39,2%, dan kemiri rata-rata 42,7%. Hal ini terjadi disebabkan oleh faktor iklim yang ekstrem akibat dari perubahan iklim dimana saat ditanam pada musim hujan menunjukkan pertumbuhan rata-rata 90,6%, namun menjelang musim kemarau 6 bulan setelah tanam kondisi pertumbuhan tanaman mulai mengalami stress oleh keterbatasan air, kondisi tanah liat padat dan keras, solum tanah yang dangkal, tumbuhnya alang-alang di sekitar tanaman dan tidak ada tindakan pemeliharaan menyebabkan pertumbuhan tanaman mengalami stres dan kemudian mati. Pada lokasi blok 2, terlihat adanya ternak sapi yang berkeliaran dan merusak sebagian tanaman pinus, aren, dan kemiri yang ditanam tahun 2019-2024. Akumulasi tanaman pinus, kemiri, dan aren yang banyak dirusak oleh ternak sapi menyebabkan tanaman banyak yang mati.

Pertumbuhan tanaman hasil rehabilitasi hutan dan lahan sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim dan karakteristik tanah. Perubahan iklim global menyebabkan pola curah hujan menjadi tidak menentu, dengan periode kering yang lebih panjang dan suhu udara yang meningkat. Kondisi ini berdampak langsung pada ketersediaan air di dalam tanah yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman muda. Menurut Asdak (2010), kekeringan akibat curah hujan rendah dapat menyebabkan tanaman mengalami stres air yang berujung pada penurunan aktivitas fotosintesis, pertumbuhan terhambat, bahkan kematian jika tidak diimbangi dengan pengelolaan air yang memadai.

Hasil uji laboratorium Fakultas Kehutanan Unhas, menunjukkan bahwa nilai porositas tanah 49,9% sedangkan nilai harkat porositas tanah total menurut Sutanto (2005) yaitu 50-40% adalah kurang baik. Adapun nilai permeabilitas tanah 17,11 cm/jam, sedangkan nilai kelas permeabilitas tanah menurut United State Department of Agriculture (1993), yaitu 12,8-25,4 cm/jam termasuk permeabilitas sedang.

Tabel (Table) 6. Rekapitulasi Persentase Tumbuh Tanaman Kayu-kayuan dan MPTS (*Recapitulation of Percentage of Woody Plant Growth and MPTS*)

No	Jenis Tanaman (Species of Plants)	Jumlah Tanaman (Number of Species)		Persentase Tumbuh (%) (Growth Percentage (%))	Rata-rata/Ha (Average/Ha)	Kriteria Tingkat Pertumbuhan (Growth Level Criteria)
		Rencana (Planning)	Tumbuh (Growth)			
1	Aren (Palm sugar)	110	43	39.24	432	Sangat rendah (Very Low)
2	Kemiri (Candlenut)	110	47	42.73	470	Sangat rendah (Very Low)
3	Pinus (Pine)	110	40	36.36	400	Sangat rendah (Very Low)
Rata-rata (Average)		110	43	39.44	434	Sangat rendah (Very Low)

Sumber (Source): Pengolahan Data, 2025 (*Data Analysis, 2025*)

Hal tersebut turut mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Selain itu kondisi alam pada musim kemarau di lokasi penelitian sangat panas dan ditumbuhi alang-alang di sekeliling tanaman.

Sifat fisik tanah dapat memberikan pengaruh terhadap pertumbuhan tanaman, baik secara langsung maupun tidak langsung yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman, termasuk sifat fisik, biologis, dan kimianya (Gusmara, 2016). Sifat fisik tanah meliputi struktur, tekstur, dan permeabilitas tanah. Analisis terhadap sifat-sifat tanah tersebut penting demi tercapainya produktivitas tanaman yang maksimal dan kesejahteraan masyarakat (Tewu et al., 2016). Sifat fisik tanah memiliki hubungan erat dengan kesesuaian tanah terhadap beragam penggunaan lahan. Kekuatan dan daya dukung drainase, kemampuan tanah menahan unsur hara, kemudahan akar menembus tanah, aerasi, dan retensi unsur hara bagi tanaman, semuanya bergantung pada kondisi fisik tanah. Beberapa aspek yang termasuk sifat fisik tanah antara lain tekstur, konsistensi, dan porositas tanah (Meli et al., 2018).

C. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Tingkat Keberhasilan Pertumbuhan Tanaman RHL

1. Faktor Fisik Lahan

Berdasarkan hasil analisis varian (Anova), secara spasial pengaruh faktor fisik lahan terhadap pertumbuhan tanaman dapat dilihat pada Lampiran A. Hasil analisis varians secara spasial menunjukkan faktor fisik lahan

memberikan pengaruh yang signifikan terhadap keberhasilan pertumbuhan tanaman. Hal ini ditunjukkan oleh nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel ($14,87 > 2,81$). Selanjutnya, koefisien pengaruh faktor fisik lahan dapat dilihat pada Lampiran B. Lampiran B menunjukkan koefisien pengaruh faktor fisik lahan terhadap pertumbuhan tanaman secara spasial. Hal ini tampak dari nilai t hitung fisik lahan yang lebih besar dibanding t tabel ($3,86 > 1,68$), disertai nilai signifikansi 0,000. Hal ini terjadi disebabkan oleh faktor tanah yang memadat ketika musim kemarau tiba, sehingga porositas dan permeabilitas tanah rendah dimana akar tanaman sulit menyerap unsur hara sehingga mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Tekstur tanah mempengaruhi kecepatan infiltrasi air ke dalam tanah, serta berhubungan dengan kapasitas penyimpanan air, kemudahan dalam pengolahan lahan, kondisi aerasi, dan efektivitas pemupukan (Utomo et al., 2016). Tanah, baik sifat fisik maupun kimianya, sebagai tempat tumbuh tanaman merupakan salah satu yang dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman (Exze et al., 2019).

2. Faktor Kimia Lahan

Berdasarkan hasil uji laboratorium, kadar N total tercatat 0,12%, unsur P 0,50 ppm, dan unsur K 0,35 me/100g. Hasil regresi linier sederhana secara spasial disajikan pada Lampiran C. Lampiran C menunjukkan hasil analisis varians secara parsial yang mengindikasikan bahwa faktor kimia lahan memberikan pengaruh signifikan terhadap keberhasilan pertumbuhan tanaman. Hal ini dibuktikan

oleh nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel ($7,94 > 3,20$). Selanjutnya, koefisien pengaruh faktor kimia lahan dapat dilihat pada Lampiran D. Lampiran D menampilkan koefisien secara spasial yang menunjukkan pengaruh faktor kimia lahan terhadap pertumbuhan tanaman. Hal tersebut tampak dari nilai t hitung faktor kimia lahan yang lebih besar dari t tabel ($2,82 > 1,68$) dan nilai signifikansinya 0,007. Hal ini terjadi karena unsur N total yang rendah serta ketersediaan unsur P dan K yang rendah pula, sehingga tanaman sangat terbatas dalam penyerapan unsur hara untuk menunjang pertumbuhan tanaman. Kandungan nitrogen dalam tanah menunjukkan variasi yang cukup tinggi dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kondisi iklim, jenis vegetasi, topografi, serta karakteristik fisika dan kimia tanah (Nopsagiarti *et al.*, 2020).

3. Faktor Sosial Ekonomi

Berdasarkan hasil analisis varian (Anova) secara spasial pengaruh sosial ekonomi terhadap keberhasilan pertumbuhan tanaman dapat dilihat pada Lampiran E. Hasil analisis varians secara parsial mengindikasikan bahwa faktor sosial ekonomi masyarakat memberikan pengaruh signifikan terhadap keberhasilan pertumbuhan tanaman. Hal ini tampak dari nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel ($18,14 > 3,20$). Sementara itu, koefisien pengaruh faktor sosial ekonomi dapat dilihat pada Lampiran F.

Lampiran F menampilkan koefisien secara parsial yang menunjukkan pengaruh faktor sosial ekonomi masyarakat terhadap pertumbuhan tanaman. Hal ini tampak dari nilai t hitung yang lebih besar dari t tabel ($4,26 > 1,68$) dan tingkat signifikansinya

mencapai 0,000. Selain itu, secara simultan, faktor fisik lahan, kimia lahan, dan sosial ekonomi turut mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Berdasarkan hasil pengolahan data, informasi lengkapnya dapat dilihat pada Lampiran G.

Lampiran G menunjukkan hasil analisis varians secara simultan, yang mengindikasikan bahwa faktor fisik lahan, kimia lahan, dan sosial ekonomi masyarakat secara signifikan turut mempengaruhi keberhasilan pertumbuhan tanaman. Hal ini tampak dari nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel ($11,62 > 3,20$). Sementara itu, koefisien masing-masing faktor fisik lahan, kimia lahan, dan sosial ekonomi dapat dilihat pada Lampiran H.

Lampiran H menyajikan koefisien secara parsial yang menunjukkan pengaruh simultan faktor fisik lahan, kimia lahan, dan sosial ekonomi masyarakat terhadap pertumbuhan tanaman. Hal ini tampak dari nilai t hitung fisik lahan yang lebih besar dari t tabel ($3,17 > 1,68$) dengan signifikansi 0,003. Sementara t hitung kimia lahan lebih kecil dari t tabel ($0,32 < 1,68$) dan signifikansinya 0,75. Adapun t hitung faktor sosial ekonomi lebih besar dari t tabel ($3,47 > 1,68$) dengan signifikansi 0,001. Berdasarkan nilai t hitung tersebut, dapat disimpulkan bahwa faktor fisik lahan dan sosial ekonomi masyarakat merupakan aspek yang paling dominan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor fisik lahan berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman pinus, aren, dan kemiri. Kondisi areal penanaman merupakan lahan kosong dengan jenis tanah liat, solum tanah dangkal, dan ditumbuhi alang-alang serta tempat penggembalaan sapi. Lokasi penanaman

yang kosong dan berbukit dengan kondisi iklim yang ekstrim mempengaruhi keberhasilan pertumbuhan tanaman pinus, aren dan kemiri.

Pada dasarnya, setiap tanaman membutuhkan kondisi tumbuh yang sesuai demi mencapai pertumbuhan dan produksi yang optimal. Hal ini juga berlaku pada pinus, dimana pertumbuhannya bergantung pada kombinasi faktor lingkungan yang seimbang dan mendukung (Ramalia, 2020). Selanjutnya Pathibang dan Rompon (2015) menyatakan bahwa sifat fisik tanah turut mempengaruhi pertumbuhan pinus di kawasan hutan produksi.

Faktor kimia lahan yang turut mempengaruhi pertumbuhan tanaman meliputi kadar N total dan unsur hara makro N, P, dan K. Berdasarkan hasil analisis laboratorium, kesuburan tanah dapat dilihat dari kadar N, P, dan K, juga N total. Hasil uji laboratorium menunjukkan kadar P rendah (3,50 ppm), K rendah (0,35 me/100g), dan N total rendah (0,12%) sehingga dapat menjadi hambatan bagi pertumbuhan tanaman. Kalium berperan penting sebagai aktivator enzim pada proses fotosintesis dan respirasi, turut mengontrol buka-tutup stomata, pembentukan pati, dan proses fisiologis penting lainnya. Selain itu, kalium juga mendukung penyerapan unsur hara lain, meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan, dan mendorong perkembangan akar. Kekurangan kalium dapat membuat tunas menjadi lemah, ukuran lebih kecil, dan pada tanaman berkayu dapat terjadi kematian tunas. Di sisi lain, kelebihan kalium dapat

mengganggu penyerapan kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan mangan (Mn), sehingga dapat turut menghambat pertumbuhan tanaman (Hardjowigeno, 2017).

Selanjutnya Fitriyani (2016) menyatakan bahwa tanah, bersama air dan udara, merupakan sumber daya alam penting yang turut menentukan kelanjutan hidup makhluk hidup. Tanah berperan sebagai media tempat akar tanaman tumbuh dan sumber nutrisi. Kemampuan tanah sebagai media tanam akan maksimal apabila didukung oleh kondisi fisik, kimia, dan biologinya yang baik, yang umumnya tercermin dari tingkat kesuburannya. Keseimbangan unsur hara di dalam tanah juga menjadi aspek penting yang turut menjaga kesuburan tanah. Selain itu, perbedaan ketinggian tempat turut mempengaruhi kesuburan tanah, baik dari aspek kimiawi maupun fisiknya. Beberapa komponen kimia tanah yang dapat terpengaruh meliputi pH tanah, nitrogen (N), fosfor (P), karbon organik (C-organik), kalium (K), dan kapasitas tukar kation (KTK), yang kesemuanya penting dalam menentukan karakteristik kesuburan tanah.

Hasil analisis faktor sosial ekonomi menunjukkan bahwa masyarakat di sekitar hutan turut dilibatkan, terutama pada kegiatan penanaman saat program RHL berjalan. Partisipasi masyarakat terjadi karena ajakan dari teman-teman, sehingga masyarakat aktif bergabung menanam. Selama program RHL masih berlangsung, masyarakat masih terlibat secara aktif, namun setelah program selesai, peran masyarakat mulai menurun dan kegiatan

pemeliharaan tanaman tidak lagi berjalan. Hal ini terjadi akibat tidak tersedia anggaran untuk perawatan, sehingga tanaman tidak terurus dan banyak yang mati, terutama akibat kemarau berkepanjangan. Lahan menjadi panas dan gersang, sehingga kondisi tersebut turut menjadi penyebab rendahnya keberhasilan pertumbuhan tanaman.

IV. KESIMPULAN

Persentase pertumbuhan tanaman dari jenis kayu-kayuan yaitu Pinus (*Pinus mercurii*) sebesar 36,3% (pertumbuhan sangat rendah) dengan jumlah tanaman per ha rata-rata 432 pohon. Persentase tumbuh jenis tanaman MPTS Kemiri (*Aleurites moluccana*) sebesar 42,7% (pertumbuhan sangat rendah) dengan jumlah tanaman per ha rata-rata 470 pohon, dan jenis Aren (*Arenga pinnata*) sebesar 39,2% (pertumbuhan sangat rendah) dengan jumlah tanaman per ha rata-rata 400 pohon. Faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman yang rendah adalah faktor fisik lahan (porositas rata-rata 49,9%, permeabilitas rata-rata 17,1 cm/jam, serta solum tanah 20-25 cm), faktor kimia lahan, dan faktor sosial, yang masing-masing secara spasial berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman. Namun secara simultan hanya faktor fisik lahan dan sosial ekonomi berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada KPH Mata Allo dan BPDAS Jeneberang Saddang yang telah memberikan izin penelitian di lokasi kawasan hutan tempat dilaksanakannya rehabilitasi hutan dan lahan periode 2019-

2024. Terima kasih pula kepada Wahyullah, Ummu Kaltsum, dan Abd.Kadir yang turut membantu dalam penulisan naskah hasil penelitian ini.

KONTRIBUSI

Muhammad Bismar telah menyusun naskah awal, Wahyullah telah menulis dan menyusun konsep naskah, pengumpulan data awal, serta membuat peta lokasi, Ummu Kultsum telah menyusun bagian referensi, pengolahan data dan analisis data, Abd.Kadir telah menyusun hasil penelitian dan kesimpulan, Mahmud telah membantu menganalisis data penelitian. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah sesuai dengan template dan yang diterbitkan dalam publikasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfianni N.H. 2023. Analisis tingkat pertumbuhan tanaman rehabilitasi hutan dan lahan di Desa Barukku Kecamatan Parodo Kabupaten Toraja Utara. Skripsi.
- Amirin T. 2015. Populasi dan Sampel Penelitian 4: Ukuran Sampel Rumus Slovin, Erlangga, Jakarta.
- Asdak, C. 2010. Hydrology and watershed management. Gadjah Mada University Press.
- Asikin, M. 2024. Survei pendahuluan tingkat keberhasilan tumbuh tanaman rehabilitasi hutan dan lahan tahun 2024. Laporan Survei, Universitas Indonesia Timur.
- BPDAS Jeneberang Saddang. 2019. Laporan pelaksanaan kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan tahun 2019. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.

- BPS Kabupaten Enrekang. 2024. Kabupaten Enrekang dalam Angka 2024. BPS Kabupaten Enrekang. Enrekang.
- Exze Erizilina , Prijanto Pamoengkas , dan Darwo. 2019. Hubungan sifat fisik dan kimia tanah dengan pertumbuhan meranti merah di khdtk haurbentes. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Vol. 9 No. 1 (Maret 2019): 68-74.*
- Fatmawati. 2020. Analisis Tingkat keberhasilan pelaksanaan reboisasi hutan dan lahan (RHL) di Desa Parigi Kecamatan Tinggimoncong Kabupaten Gowa. [Skripsi]. Makassar (ID). Universitas Muhammadiyah Makassar.
- Fitriyani. 2016. Kondisi kimia tanah dibawah tegakan Pinus (*Pinus merkusii* Jungh.Et de Vries) di Desa Uwemanje Kecamatan Kinovaro Kabupaten Sigi Sulawesi Tengah. [Skripsi]. Palu : Fakultas Kehutanan Universitas Tadulako, Palu.
- Gusmara, F., Anwar, S., & Yulnafatmawita. 2016. Hubungan sifat fisik tanah terhadap pertumbuhan tanaman pada lahan kering di Sumatera Barat. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 3(2), 467–474.
- Hardjowigeno, S. 2015. Ilmu tanah. Jakarta: Akademika Pressindo
- Hardjowigeno S. 2017. Ilmu Tanah. Jakarta(ID): Pusaka Utama.
- Hatta, G. M., Rauf, A., & Siregar, M. 2018. Evaluasi keberhasilan rehabilitasi hutan dan lahan berdasarkan tingkat kesehatan tanaman. *Jurnal Penelitian Kehutanan*, 12(2), 95–104.
- Kartika, R. 2019. Evaluasi keberhasilan kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan berdasarkan persentase tumbuh tanaman. *Jurnal Rehabilitasi Hutan dan Konservasi Alam*, 6(1), 45–53.
- Kementerian Kehutanan RI. 2009. Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.60/Menhut-II/2009 tentang pedoman penilaian keberhasilan reklamasi hutan. Diambil dari <https://jdih.menlhk.go.id/kiosk/files/P.60%20%286%29.pdf>(<https://jdih.menlhk.go.id/kiosk/files/P.60%20%286%29.pdf>). ([jdih menlhk][1])
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2015. Pedoman monitoring dan evaluasi kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan. Direktorat Jenderal Bina Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Perhutanan Sosial, Kementerian Kehutanan RI.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2019. Laporan kinerja Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2019. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2020. Petunjuk teknis rehabilitasi hutan dan lahan. Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Hutan Lindung.
- Mawaddah. 2022. Evaluasi tingkat keberhasilan RHL di Kabupaten Pulang Pisau. Skripsi
- Meli, V., Sagiman S., & Gafur S. 2018. Identifikasi sifat fisika tanah ultisols pada dua tipe penggunaan lahan di Desa Betenung Kecamatan Nanga Tayap Kabupaten Ketapang. *Jurnal Perkebunan dan Lahan Tropika*. 8(2): 80-90.
- Nopsagiarti, T., D. Okalia, & G. Marlina. 2020. Analisis c-organik, nitrogen dan c/n tanah pada lahan agrowisata Beken

- Jaya. *Jurnal Agrosains dan Teknologi* 5(1): 11-18.
- Pathibang, D., & Rompon, A. 2015. Pengaruh sifat fisik tanah terhadap pertumbuhan tanaman pinus. *Jurnal Penelitian Kehutanan*, 2(1), 1-10.
- Putri D C. 2022. Evaluasi kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan di Kabupaten Barru Periode 2000-2020. Skripsi. Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Ramalia, K. M. 2020. Keragaman kesuburan fisik tanah di sistem agroforestri berbasis kopi dan dampaknya terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman kopi. Skripsi. Universitas Brawijaya, Malang.
- Sudomo, S. 2017. Faktor penentu keberhasilan rehabilitasi hutan dan lahan. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 14(2), 97–108.
- Sugiyono. 2018. Metode penelitian kuantitatif, kualitatif dan RHD. Penerbit : Alfabeta Bandung.
- Sunardi, Peday, H. F. ., & Angrianto, R. 2021. Keberhasilan tumbuh tanaman rehabilitasi di IUPHHK PT Manokwari Mandiri Lestari Kabupaten Bintuni. *Jurnal Kehutanan Papuaasia*, 7(2).
- Suryanto, P. 2016. Ekologi tanaman dan aplikasinya pada rehabilitasi lahan. Bogor: Pustaka IPB.
- Sutanto, R. 2005. Dasar-dasar ilmu tanah. Yogyakarta: Kanisius.
- Sutopo, L. 2013. Teknologi budidaya dan pengelolaan tanaman kemiri (*Aleurites moluccanus*) di lahan kering. Malang: Universitas Brawijaya Press.
- Tewu, R.W.G., Theffie K.L., & Pioh D.D. 2016. Kajian sifat fisik dan kimia tanah pada tanah berpasir di Desa Noongan Kecamatan Langowan Barat. Universitas Sam Ratulangi. Sulawesi Utara.
- Utomo, M., Sudarsono, B. Rusman, T. Sabrina, J. Lumbanraja, & Wawan. 2016. Ilmu tanah dasar-dasar dan pengelolaan. Kencana. Jakarta.
- Wahono, F. (2002). Rehabilitasi lahan sebagai upaya pemulihan fungsi ekosistem pada wilayah terdegradasi. *Jurnal Konservasi Tanah dan Air*, 4(2), 55–63.
- Wulandari, C., & Budiono, R. 2021. Pengaruh gulma alang-alang (*Imperata cylindrica*) terhadap pertumbuhan tanaman kehutanan pada lahan rehabilitasi. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 18(2), 103–112.

Lampiran A. Analisis Varian Secara Spasial Pengaruh Faktor Fisik

Tabel (Table) 6. Analisis Varian Secara Spasial Pengaruh Faktor Fisik Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Spatial Variance Analysis of the Influence of Physical Factors on Plant Growth*)

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	F Table
Regression	34,848	1	34,848	14,866	0.000 ^b	2,81
1 Residual	100,796	43	2,344			
Total	135,644	44				

Sumber (Source): Pengolahan Data 2025 (*Analysis Data 2025*)

Lampiran B. Nilai Koefisien t Hitung Secara Parsial Pengaruh Faktor Fisik Lahan

Tabel (Table) 7. Nilai Koefisien t Hitung Secara Parsial Pengaruh Faktor Fisik Lahan Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Partial Calculation of the Coefficient Value of the Influence of Land Physical Factors on Plant Growth*)

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	F Table
	B	Std. Error	Beta			
1 (Constant)	3,952	1,250		3,163	0,003	1,679
Fisik	0,375	0,097	0,507	3,856	0,000	

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Analysis data 2025*)

Lampiran C. Analisis Varian Secara Spasial Pengaruh Kimia Lahan

Tabel (Table) 8. Analisis Varian Secara Spasial Pengaruh Kimia Lahan Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Partial Variance Analysis of the Effect of Soil Chemistry on Plant Growth*)

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	F Table
Regression	21,142	1	21,142	7,940	0.007 ^b	
1 Residual	114,502	43	2,663			3,20
Total	135,644	44				

Sumber (Source) : Pengolahan Data 2025 (*Analysis Data 2025*)

Lampiran D. Koefisien Nilai t Hitung Secara Spasial terhadap Pengaruh Faktor Kimia Lahan

Tabel (Table) 9. Koefisien Nilai t Hitung Secara Spasial terhadap Pengaruh Faktor Kimia Lahan Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Partial Calculation of t-Value Coefficients on the Influence of Land Chemical Factors on Plant Growth*)

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	F Table
	B	Std. Error	Beta			
1 (Constant)	6,319	0,875		7,219	0,000	1,679
Kimia	0,236	0,084	0,395	2,818	0,007	

Sumber (Source): Pengolahan Data 2025 (*Analysis Data 2025*)

Lampiran E. Analisis Varian Secara Spasial Pengaruh Sosial Ekonomi

Tabel (Table) 10. Analisis Varian Secara Spasial Pengaruh Sosial Ekonomi Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Partial Variance Analysis of Socio-Economic Influences on Plant Growth*)

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	F Table
1 Regression	40,249	1	40,249	18,143	0.000 ^b	3,20
Residual	95,395	43	2,218			
Total	135,644	44				

Sumber (Source): Pengolahan Data 2025 (*Analysis Data 2025*)

Lampiran F. Nilai Koefisien Secara Parsial Pengaruh Sosial Ekonomi

Tabel (Table) 11. Nilai Koefisien Secara Parsial Pengaruh Sosial Ekonomi Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Partial Coefficient Value of Socio-Economic Influence on Plant Growth*)

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	F Table
	B	Std. Error	Beta			
1 (Constant)	2,174	1,545		1,407	0,167	1,679
Sosek	0,662	0,155	0,545	4,259	0,000	

Sumber (Source): Pengolahan Data 2025 (*Analysis Data 2025*)

Lampiran G. Analisis Varian Secara Simultan Faktor Fisik, Kimia Lahan, dan Sosial Ekonomi

Tabel (Table) 12. Analisis Varian Secara Simultan Faktor Fisik, Kimia Lahan, dan Sosial Ekonomi Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Simultaneous Variance Analysis of Physical, Chemical, and Socio-Economic Factors on Plant Growth*)

	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	F Table
1	Regression	62,360	3	20,787	11,629	0.000 ^b	
	Residual	73,284	41	1,787			3,20
	Total	135,644	44				

Sumber (Source): Pengolahan Data 2025 (*Analysis Data 2025*)

Lampiran H. Nilai Koefisien Secara Simultan Faktor Fisik, Kimia Lahan, dan Sosial Ekonomi

Tabel (Table) 13. Nilai Koefisien Secara Simultan Faktor Fisik, Kimia Lahan, dan Sosial Ekonomi Berpengaruh Terhadap Pertumbuhan Tanaman (*Coefficient Values of Simultaneous Physical, Chemical, and Socio-Economic Factors Affecting Plant Growth*)

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	F Table
	B	Std. Error	Beta			
1 (Constant)	-,581	1,615		-,360	0,721	
Fisik (<i>Physique</i>)	0,294	0,093	0,397	3,169	0,003	
Kimia (<i>Chemistry</i>)	0,026	0,081	0,043	0,318	0,752	1,679
Sosial Ekonomi (<i>socio-economic</i>)	0,538	0,155	0,443	3,472	0,001	

Sumber (Source): Pengolahan Data 2025 (*Analysis Data 2025*)

Lampiran I.

Nilai Harkat Porositas Tanah Total

Porositas Total (%)	Harkat
100	Sangat Porous
80-60	Porous
60-50	Baik
50-40	Kurang Baik
40-30	Jelek
<30	Sangat Jelek

Sumber : Sutanto, 2005

Kelas Permeabilitas Tanah Menurut USSCS

Kelas	Permeabilitas (cm/jam)
Sangat lambat	< 0,5
Lambat	0,5-2,0
Lambat sampai sedang	2,1-6,3
Sedang	6,4-12,7
Sedang sampai cepat	12,8-25,4
Cepat	>25,4

Sumber : Kohnke, 1980

Hasil Pengujian Laboratorium Silvikultur Unhas

Lokasi RHL	Porositas (%)	Permeabilitas (cm/jam)
Blok 1	48,76	16,44
Blok 2	51,11	17,77
Rata-rata	49,94	17,11

Sumber : Laboratorium Silvikultur Unhas, 2025

PEDOMAN BAGI PENULIS (AUTHOR GUIDELINES)
JURNAL PENELITIAN PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI

- **BAHASA:** Karya Tulis Ilmiah (KTI) ditulis dalam Bahasa Indonesia atau Bahasa Inggris
- **FORMAT:** Naskah diketik pada kertas A4 (210 x 297 mm), huruf Calibri, ukuran font 12 dan dengan spasi 1,15. Pada semua tepi disisakan ruang kosong 2,5 cm. KTI diserahkan dalam format *Microsoft Words*.
- **JUDUL:** Judul KTI harus singkat dan informatif, tidak lebih dari dua baris dan mencerminkan isi tulisan. Judul ditulis dalam Bahasa Indonesia dengan ukuran font 12 dan menggunakan huruf kapital semua (terjemahan dalam bahasa Inggris ditulis miring dengan huruf kapital hanya pada permulaan judul atau yang menyatakan suatu nama, diletakkan di antara tanda kurung), hindari pemakaian kata kerja, rumus, singkatan, dan bahasa tidak resmi.
- **NAMA PENULIS:** Dicantumkan di bawah judul, ditulis lengkap tanpa gelar akademik, urutan berdasarkan penulis pertama, kedua dan seterusnya, disertai alamat lengkap instansi dan email penulis
- **ABSTRAK:** Penulisan abstrak Bahasa Inggris (*Italic font*) dan Bahasa Indonesia, tidak lebih dari 250 kata, ditulis dalam satu paragraf, secara ringkas, jelas, utuh, mandiri, dan terdiri dari permasalahan, tujuan, metoda, dan hasil penelitian.
- **KATA KUNCI:** Tiga sampai lima kata kunci yang mencerminkan substansi naskah ditulis terpisah dengan menggunakan titik koma.
- **PENDAHULUAN:** Pendahuluan berisi latar belakang permasalahan yang ada, hasil - hasil penelitian terkait sebelumnya (*state of the art*), pentingnya penelitian yang dilakukan dan tujuan penelitian.
- **BAHAN DAN METODE:** Lokasi penelitian diterangkan secara geografis disertai peta lokasi penelitian, bahan dan alat yang digunakan diterangkan dengan jelas. Metode penelitian dijelaskan secara detil (desain penelitian, perlakuan, rancangan percobaan, metode dan skala analisis, dan lain-lain yang terkait metode) sehingga dapat diulang oleh peneliti lain. Metode yang sudah dipublikasikan harus dicantumkan sumbernya.
- **LANGUAGE:** *Scientific paper (KTI) is written in Indonesian or English*
- **FORMAT:** *The manuscript is typed on an A4 paper (210 x 297 mm), calibri size 12, and 1.15 space. Margin on all edges are 2.5 cm. The manuscript is submitted in MS words format.*
- **TITLE:** *Title of the scientific paper should be short and informative, no more than two lines and reflects the contents. The title is in Indonesian and English. The title in Indonesian is written in Calibri, font size 12, bold, uppercase, center. The title in English is written in calibri, font size 12, italics, sentence case, placed between parentheses. Avoid the use of verbs, formulas, abbreviations, and unofficial language.*
- **NAME OF AUTHOR(S):** *Listed below the title, complete name without the academic degrees, the sequence based on the first author, second etc., accompanied by complete institution addresses and email addresses.*
- **ABSTRACT:** *Abstract is written in English (Italic font) and Indonesian, no more than 250 words, written in one paragraph, concise, clear, and complete, . It consists of research problems, methods, and research findings.*
- **KEY WORD:** *Three to five key words reflect the substantive of the research, separated by semicolon.*
- **INTRODUCTION:** *Introduction must contain background of the existing problems, state of the art, important of the research and the purpose of the research.*
- **MATERIALS AND METHODS:** *Location of the research is described geographically completed with a map of the study sites. Materials and instruments used should be clearly defined. Research methods are described in detail (research design, treatments, experimental design, methods and scale of analysis, and other related methods) so that it can be repeated by other researchers. Published methods must be included the source.*

- **HASIL DAN PEMBAHASAN:** Hasil penelitian disampaikan secara singkat dan jelas. Data yang ditampilkan sudah dianalisis dan relevan, disusun sesuai tujuan penelitian. Data dan informasi dalam Tabel, grafik, dan gambar dilengkapi tafsiran yang benar. Dalam pembahasan data hasil penelitian ditafsirkan dan dikaitkan dengan tujuan, hipotesis (jika ada), diberikan penjelasan mengapa hal tersebut terjadi, dikemukakan hubungan dengan hasil penelitian sebelumnya, dan dikemukakan sitasi dari literatur yang sesuai.
- **KESIMPULAN:** Hasil terpenting dari penelitian disampaikan dalam kesimpulan yang digunakan untuk menjawab tujuan, hipotesis serta temuan lain selama penelitian. Kesimpulan bukan merupakan ulangan dari abstrak, tetapi mengelaborasi hasil-hasil penelitian yang signifikan. Kesimpulan memuat saran-saran yang merupakan implikasi penelitian yang harus dilakukan lebih lanjut.
- **TABEL:** Judul tabel, kolom, lajur, dan sumber data serta keterangan ditulis dalam Bahasa Indonesia dan Inggris (*dicetak miring*) dengan singkat tetapi jelas serta tidak tebal. Judul tabel ditulis dengan font ukuran 10, spasi 1 dan huruf capital pada awal kalimat. Tabel diberi nomor urut sesuai dengan keterangan di dalam teks. Penggunaan tanda koma (,) dan titik (.) pada angka di dalam tabel masing-masing menunjukkan nilai pecahan/ desimal dan kebulatan seribu. Keterangan tabel diletakkan di bawah tabel. Tabel harus dalam format *Microsoft Words*. Tabel tidak menggunakan garis vertikal. Garis horizontal terletak pada judul kolom atas, sub judul dan akhir tabel (garis penutup tabel). Apabila tabel terpotong karena pergantian halaman, header ditampilkan kembali pada halaman selanjutnya. Tabel dapat diunggah menggunakan file terpisah (*supplementary materials*) dengan memberi tanda posisi tabel pada naskah. Tabel harus mencantumkan sumber. Apabila tabel merupakan hasil analisis primer, maka dapat ditulis sebagai analisis data beserta tahun.
- **RESULT AND DISCUSSION:** *The research results must be clear and short. The presented data have been analyzed and relevant, prepared according to the purpose of the research. Data and information in the tables, graphs, and pictures need to be conveyed with the correct meaning or interpretation. In the discussion, data are interpreted according to the objectives, the hypothesis (if any), explained why it happened, put forward relationship with the results of previous research, and proposed citation of the appropriate literatures.*
- **CONCLUSIONS:** *The most important results of the research are presented in the conclusions used to answer the objectives, hypotheses and other findings during the study. Conclusion is not a repetition of the abstract, but elaborates of significant research results. The conclusions contain suggestions which are the implications on further research.*
- **TABLES:** *The title of table, column, row, data source and description are written in Indonesian and English (Italic font), short but clear and not bold. The font size of the table title is 10 with spaces 1 and capital letter at the beginning of the sentences. The table is given number according to the description in the text. The use of comma (,) and dot (.) in the table indicate the value of fraction/ decimal and roundness of a thousand. Table descriptions are placed under the table. The table should be in MS Word format. Tables can be uploaded using a separate file (supplementary materials) by giving mark table positions on the manuscript. Table does not use vertical lines. The horizontal line lies in the top column heading, subheadings and at the end of the table (the closing table). If the table is cut off due to page changes, the header is displayed again on the next page. The table should mention its source. If the table is the result of primary data analysis, then it can be written as a data analysis and accompanied with the year.*

- **GRAFIK/GAMBAR/FOTO** : Grafik, peta, dan ilustrasi lain yang berupa gambar garis harus kontras, diberi nomor urut. Judul beserta isinya ditulis dalam dua bahasa (Indonesia dan *Inggris dicetak miring*), diberi nomor urut. Judul gambar ditulis dengan ukuran 10 dengan huruf kapital pada awal kalimat. Grafik dapat diunggah secara terpisah (*supplementary materials*) dari file utama (naskah KTI) dalam format *MS Words* dengan memberi tanda posisi grafik pada naskah. Resolusi gambar minimal 300 dpi. Gambar dan judul diletakkan pada posisi tengah/center. Gambar harus mencantumkan sumber. Apabila gambar berasal dari foto koleksi pribadi maka dapat ditulis sebagai koleksi pribadi beserta tahun.
- **Rumus** :Rumus ditulis dengan ukuran font 10. Setiap rumus yang ditampilkan harus diberi nomor sesuai urutan dalam naskah. Nomor urut diberi tanda kurung dan berada sejajar dengan rumus yang dihubungkan tanda titik sampai batas kanan naskah.
- **UCAPAN TERIMA KASIH** : Disarankan menyampaikan ucapan terimakasih kepada organisasi atau person yang telah membantu penulis dalam bentuk apapun.
- **DAFTAR PUSTAKA** : Memuat pustaka yang benar-benar dirujuk, dengan demikian pustaka yang dimasukkan pada bagian ini akan ditemukan tertulis pada bagian-bagian sebelumnya. Cara penyitiran dan penulisan daftar pustaka merujuk kepada *The American Psychological Association (APA) style 6th*. Untuk mempermudah dan menjaga konsistensi pengutipan serta penulisan daftar pustaka perlu menggunakan aplikasi yang dapat diunduh secara gratis seperti Mendeley (<https://www.mendeley.com/download-mendeley-desktop/>). Daftar pustaka disusun menurut abjad nama pengarang, 80% dari pustaka merupakan terbitan 5 tahun terakhir dan 80% berasal dari sumber acuan primer, kecuali buku teks ilmu-ilmu tertentu.
- **GRAPHS/FIGURES/PHOTOS**: *Graphs, maps and other illustrations in line drawings should be in contrasted, numbered sequentially. Title and contents are written in two languages, Indonesian and English (in italic), numbered sequentially with its explanatory. The title is in font size 10 with capital letter at the beginning of the sentences. Graphs can be uploaded separately (supplementary materials) from the main file (KTI manuscript) in MS word format by giving mark the chart position in the script. Image resolution is at least 300 dpi. The titles and graphs are placed in the center. The image must specify the sources. If the image comes from a private collection, it can be written as a private collection with year.*
- **FORMULA**: *Formula is typed in font size 10. Each presented formula should be numbered sequentially in the script. The sequential number is bracketed and parallel to the formula connected with dots to the right margin of the manuscript.*
- **ACKNOWLEDGEMENT**: *It is recommended to convey gratitudes to the organization or person who has assisted the author in any form.*
- **REFERENCES**: *It contains all references that are actually referred to. Thus the references included in this section will be found written in the previous sections. The way to edit and write a bibliography refers to The American Psychological Association (APA) style 6th. To make it easier and keep consistency of citation and bibliography writing, it is necessary to use free downloadable applications such as Mendeley (<https://www.mendeley.com/download-mendeley-desktop/>). The references are arranged according to author's name alphabet. Eighty % of the literature is published in the last 5 years and 80% comes from primary reference sources, except for textbooks of certain sciences.*

P-ISSN : 2579-6097



9 772579 609007