

DAMPAK DEFORESTASI TERHADAP PRODUKSI LISTRIK PLTA BAKARU SULAWESI SELATAN

(An Impact of Deforestation on Electricity Production of The Bakaru Hydropower, South Sulawesi)

Rosmaeni^{1,*}, Irlan¹, dan Widyanti Utami Adhisti¹

¹Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian dan Kehutanan, Universitas Sulawesi Barat, Jalan Prof. Dr. Baharuddin Lopa,S.H., Talumung, Majene, Sulawesi Barat

*Email: rrose4304@gmail.com

Diterima: 15 Januari 2024, Direvisi : 30 April 2024, Disetujui : 16 Juni 2024

ABSTRACT

Deforestation affects the hydrological response of a watershed. Changes in forest land cover to non-forest can degrade watershed functions, especially the condition of water discharge. This research aims to analyze the impact of deforestation in the Mamasa Sub-watershed on the electricity production of the Bakaru Hydroelectric Power Plant. This research method uses the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) modeling system. The SWAT model is used to analyze the impact of deforestation on watershed discharge conditions. The deforestation scenario is determined based on the spatial analysis (overlay) results to obtain data on changes in forest land cover to non-forest. Four deforestation scenarios will be generated: no deforestation or zero deforestation (0%), low deforestation (20%), medium deforestation (40%), and high deforestation (60%). The simulation results show that the number of Hydrological Response Units (HRU) will be lower when deforestation increases. This research also succeeded in analyzing the impact of various deforestation scenarios on the electricity production of the Bakaru Hydroelectric Power Plant. The simulation results of the Bakaru hydroelectric power plant's monthly average electricity production tend to be greater when compared to the actual monthly average electricity production. The highest difference in electricity production from the Bakaru hydroelectric power plant for all scenarios occurs in the dry months with an average difference between 802,709.64–2,222,293.19 kWh.

Keywords: *deforestation scenario; SWAT; rainfall, discharge, electrical energy*

ABSTRAK

Deforestasi akan memengaruhi respon hidrologi suatu Daerah Aliran Sungai (DAS). Perubahan tutupan lahan hutan menjadi non hutan akan mendegradasi fungsi DAS seperti keadaan debit. Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak deforestasi di Sub DAS Mamasa terhadap produksi listrik PLTA Bakaru. Metode penelitian ini menggunakan sistem pemodelan

Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Model SWAT digunakan untuk menganalisis dampak deforestasi terhadap kondisi debit DAS. Skenario deforestasi ditentukan berdasarkan hasil analisis spasial (*overlay*) untuk memperoleh data perubahan tutupan lahan hutan menjadi non-hutan. Terdapat empat skenario deforestasi yang akan digunakan yaitu tidak terjadi deforestasi (0%), deforestasi rendah (20%), deforestasi sedang (40%) dan deforestasi tinggi (60%). Hasil simulasi menunjukkan bahwa jumlah Hydrological Response Unit (HRU) akan semakin rendah jika deforestasi semakin meningkat. Penelitian ini juga berhasil menganalisis dampak berbagai macam skenario deforestasi terhadap produksi listrik PLTA Bakaru. Hasil simulasi produksi listrik rata-rata bulanan PLTA Bakaru cenderung lebih besar jika dibandingkan dengan produksi listrik rata-rata bulanan aktual. Perbedaan produksi listrik PLTA Bakaru untuk semua skenario paling tinggi terjadi pada pada bulan kering dengan rata-rata perbedaan berkisar antara 802.709,64–2.222.293,19 kWh.

Kata kunci: skenario deforestasi; SWAT; curah hujan; debit; energi listrik

I. PENDAHULUAN

Sumber daya air memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia. Selain sebagai sumber kehidupan seluruh makhluk, air dapat pula digunakan sebagai sumber energi listrik. Terdapat beberapa alasan mengapa sumberdaya air menjadi pilihan energi yang menarik. Stickler *et al.* (2013) menyebutkan alasan-alasan tersebut seperti (1) lebih murah daripada bentuk listrik terbarukan lainnya; (2) dapat menyediakan energi lebih mudah dan lebih sedikit gangguan; (3) berpotensi menyediakan energi listrik dengan tingkat emisi gas rumah kaca (GRK) yang lebih rendah. Tren pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) negara-negara di dunia semakin meningkat termasuk Indonesia. Pada tahun 2019, kebutuhan energi listrik Indonesia mencapai 158,38 juta setara barel minyak (SBM) atau 16 persen dari total kebutuhan energi nasional. Diproyeksikan akan meningkat tiga kali lipat pada tahun 2050 (BPPT, 2021). Di Indonesia, potensi energi yang dapat dimanfaatkan dengan menggunakan

sumber daya air yaitu 75.091 MW dan hanya termanfaatkan sebesar 9 persen dari total energi yang tersimpan (Erinofiardi *et al.*, 2017).

Produktivitas PLTA dipengaruhi oleh besarnya debit sungai yang dihasilkan suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) (Stickler *et al.*, 2013). Debit sungai merupakan input utama PLTA dalam menghasilkan energi listrik (Singh & Singal, 2017; Stickler *et al.*, 2013). Salah faktor yang memengaruhi debit sungai suatu DAS adalah kondisi tutupan lahan (Schilling, Jha, Zhang, Gassman, & Wolter, 2008). Tutupan lahan hutan dinilai berpengaruh besar dalam siklus iklim dan hidrologi (Ellison *et al.*, 2017; Guimberteau *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2014). Dengan kata lain, hilangnya tutupan hutan menjadi non-hutan (deforestasi) memiliki dampak besar terhadap produktivitas PLTA.

Studi terkait deforestasi dan pengaruhnya terhadap siklus hidrologi suatu DAS telah banyak dilakukan khususnya pada daerah hutan tropis. Penelitian yang dilakukan Coe, Costa, &

Soares-Filho (2009) menunjukkan bahwa deforestasi skala besar dapat berdampak signifikan terhadap peningkatan debit tahunan sebesar 25 persen. Hal yang sama juga ditunjukkan Arias, Lee, Farinosi, Pereira, & Moorcroft (2018) dalam penelitiannya di hutan tropis Brazil bahwa perubahan tutupan hutan skala besar hingga 80 persen menjadi penyebab terhadap peningkatan aliran air (aliran langsung). Peningkatan aliran ini dipengaruhi oleh hilangnya fungsi hidrologis hutan untuk mengembalikan air ke atmosfer (Chambers & Artaxo, 2017). Perubahan tutupan hutan menjadi lahan pertanian dapat menyebabkan berkurangnya tingkat evapotranspirasi dan meningkatkan aliran permukaan serta debit tahunan pada musim penghujan (Chacuttrikul, Kiguchi, & Oki, 2018; Ellison *et al.*, 2017; Guimberteau *et al.*, 2017; Panday, Coe, Macedo, Lefebvre, & de Almeida Castanho, 2015; Peña-Arancibia, Bruijnzeel, Mulligan, & van Dijk, 2019). Penelitian yang dilakukan Kaura, Arias, Benjamin, Oeurng, & Cochrane (2019) menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan hutan menjadi non-hutan seperti lahan pertanian juga dapat meningkatkan hasil sedimen akibat erosi yang menyebabkan gangguan terhadap sistem produksi listrik di PLTA.

Studi terkait pembangkit listrik tenaga air masih mengabaikan kondisi tutupan hutan di masa depan. Diasumsikan bahwa deforestasi memiliki efek positif pada debit sungai dan pembangkit energi listrik akibat penurunan evapotranspirasi (ET) terkait konversi hutan (Stickler *et al.*, 2013). Deforestasi dapat meningkatkan total aliran tahunan karena tingginya debit

banjir di musim hujan. Namun disatu sisi, hilangnya tutupan hutan juga dapat mengurangi aliran dasar (*baseflow*) terutama pada bulan kering, sebab salah satu fungsi hutan dapat menahan air hujan dan menjaga kestabilan debit sungai sepanjang tahun.

Penelitian ini akan menggunakan pendekatan analisis *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) untuk memperoleh debit simulasi Sub DAS Mamasa. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis dampak deforestasi terhadap produksi listrik PLTA Bakaru Sub DAS Mamasa. Namun, penelitian ini hanya menganalisis dampak deforestasi dari aspek debit sungai dan jumlah produksi listrik PLTA Bakaru. Kajian tentang hubungan deforestasi dengan produksi energi listrik saat ini menjadi hal penting dilakukan. Hal tersebut berkaitan dengan upaya menjaga kontinuitas produksi listrik PLTA melalui perencanaan kegiatan rehabilitasi dan pengendalian deforestasi di dalam DAS.

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilakukan pada bulan September sampai November 2023 di Sub DAS Mamasa. Sub DAS Mamasa merupakan bagian dari DAS Saddang, salah satu DAS terluas di Pulau Sulawesi yang melintasi dua provinsi yaitu Provinsi Sulawesi Barat dan Sulawesi Selatan. Selain sebagai sumber debit Pembangkit Listrik Tenaga Air Bakaru, sub DAS Mamasa menjadi sumber air baku dan irigasi bagi masyarakat yang bermukim di sekitarnya. (Gambar 1).

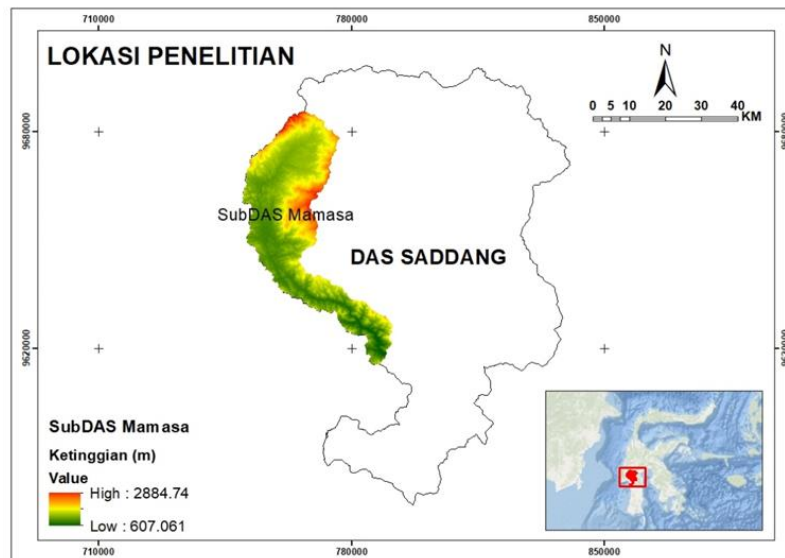
B. Bahan dan Alat

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tutupan lahan tahun 2012-2021, *Digital Elevation Model* Nasional (DEMNAS), data jenis tanah dan data iklim tahun 2012-2021. Selengkapnya disajikan pada Tabel 1.

C. Metode Penelitian

Analisis spasial (*overlay*) dilakukan untuk memperoleh data perubahan tutupan lahan yang terjadi di Sub DAS

Mamasa (perubahan tutupan lahan hutan menjadi non-hutan) (Tabel 2). Analisis ini menggunakan plugin Mollusce pada software QGIS 2.18. Data perubahan tutupan lahan hutan menjadi non-hutan akan digunakan sebagai indikator utama dalam penentuan skenario deforestasi. Terdapat empat skenario deforestasi yang akan dihasilkan meliputi tidak terjadi deforestasi (0%), deforestasi rendah (20%), deforestasi sedang (40%) dan deforestasi tinggi (60%).



Gambar (Figure) 1. Peta Lokasi Penelitian (*The research site map*)
 Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (*Data analysis 2023*)

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

No.	Jenis Data (<i>Data type</i>)	Format	Sumber Data (<i>Data source</i>)
1.	Tutupan lahan (2012-2021)	Raster	Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK)
2.	<i>Digital Elevation Model</i> Nasional (DEMNAS)	Raster	https://tanahair.indonesia.go.id/
3.	Tanah	Raster	Food and Agriculture Organization (FAO)
4.	Data iklim 2011-2021	Text file	https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/
	<ul style="list-style-type: none"> • Curah hujan • Kelembaban relatif • Temperatur rata-rata • Kecepatan angin • Radiasi matahari 		
5.	Debit Observasi	Text file	PLTA Bakaru
6.	Produksi listrik aktual	Text file	PLTA Bakaru

Sumber (source): Pengolahan data 2023 (*Data analysis 2023*)

Tabel (Table) 2. Perubahan tutupan lahan hutan menjadi non-hutan (deforestasi) di Sub DAS Mamasa 2012-2021
 (Changes in forest to non-forest (deforestation) in the Mamasa Sub-watershed 2012-2021)

No.	Perubahan tutupan lahan (Land cover change)	Luas (Ha)	Persentase
1.	Hutan ke Semak/belukar	72.58777	11.88%
2.	Hutan ke Pertanian	473.8358	77.56%
3.	Hutan ke Sawah	5.837386	0.96%
4.	Hutan ke Padang Rumput	56.40407	9.23%
5.	Hutan ke Badan air	2.235191	0.37%
Total		610.9002	100%

Sumber(Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

Pola deforestasi yang terjadi di Sub DAS Mamasa diperoleh dari data perubahan tutupan lahan 2012-2021. Terdapat lima pola deforestasi yang terjadi dalam kurung waktu 10 tahun (Tabel 2). Perubahan tutupan lahan hutan menjadi non-hutan paling besar oleh peningkatan penggunaan lahan pertanian. Hal ini disebabkan terjadinya peningkatan kebutuhan lahan pertanian oleh masyarakat Mamasa sebesar 7,76% per tahun. Untuk mengetahui dampak deforestasi terhadap kondisi debit sungai, menggunakan pendekatan analisis *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). SWAT adalah alat yang banyak digunakan untuk menganalisis kondisi hidrologi DAS di berbagai belahan dunia (Aloui, Mazzoni, Elomri, Aouissi, Boufekane, & Zghibi, 2023). Model ini dikembangkan oleh *United States Department of Agriculture* (USDA) *Agriculture Research Service* (ARS) (Wang, Jiang, Xie, Zhao, Yan, & Yang, 2019). Model SWAT ini dapat digunakan secara gratis dan fleksibel untuk diterapkan pada berbagai ukuran DAS serta memungkinkan pengguna untuk melakukan simulasi dengan mempertimbangkan faktor yang dinamis seperti perubahan penggunaan lahan (Janjić & Tadić, 2023). Namun salah satu tantangan penggunaan model SWAT

adalah ketersediaan dan keandalan data (Tan, Gassman, Srinivasan, Arnold, & Yang, 2019). Variabel yang digunakan di dalam pemodelan debit sungai meliputi *Digital Elevation Model* (DEM), tutupan lahan, data jenis tanah, data iklim seperti curah hujan, kelembaban relatif, temperature rata-rata, radiasi matahari dan kecepatan angin (de Oliveira Serrão *et al.*, 2020). Tahapan dalam pemodelan ini meliputi deliniasi batas DAS dan pembagian sub-basin, pembentukan *hydrologic response units* (HRU), simulasi model SWAT dan validasi model. Untuk mengetahui tingkat ketergantungan PLTA terhadap hutan maka setiap skenario deforestasi akan dilakukan perhitungan energi PLTA yang dihasilkan berdasarkan masing-masing skenario. Persamaan yang digunakan untuk menghitung energi PLTA adalah sebagai berikut (Lukas, Rohi, & Tumbelaka, 2017; Stickler *et al.*, 2013):

$$P_m = \Delta h \times Q_m \times g \times EF \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan (Remarks):

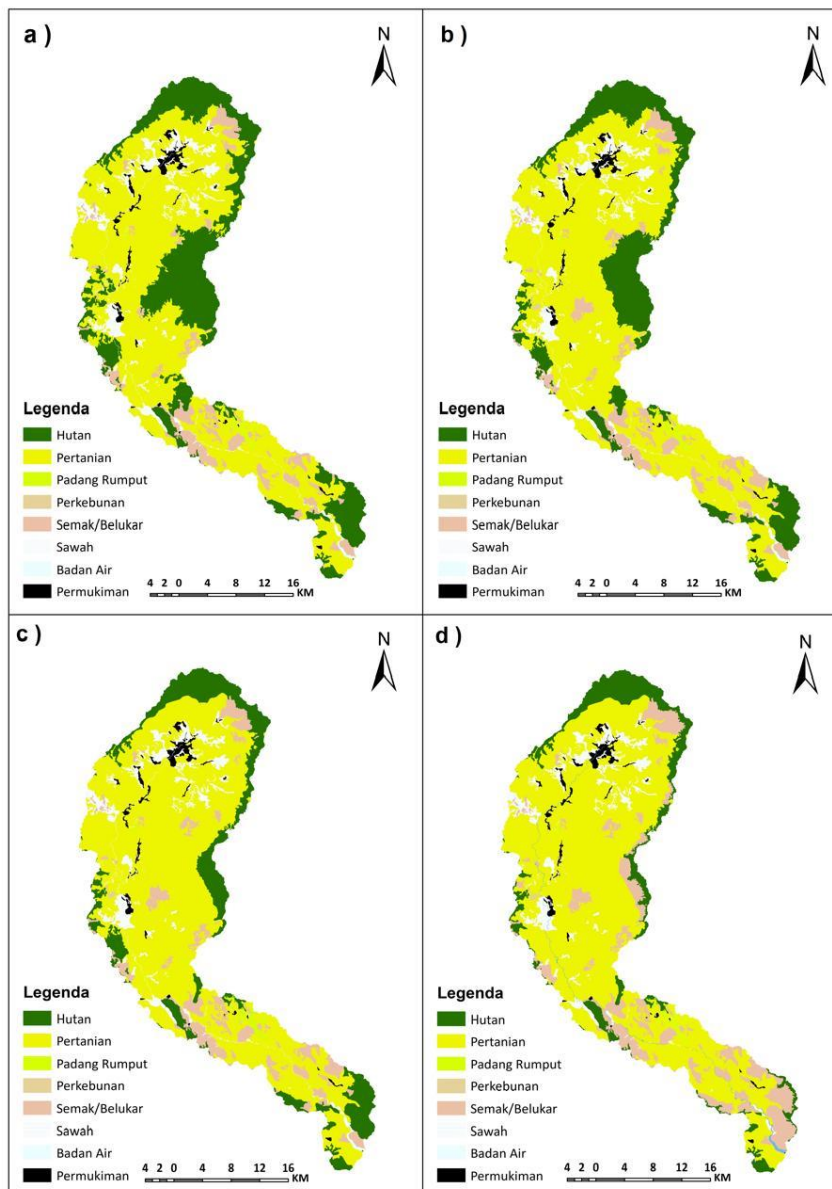
- P_m = Produksi Listrik rata-rata bulanan (Kwh)
- Δh = Tinggi jatuh air efektif (m)
- Q_m = Debit rata-rata bulanan (m³/s)
- g = Gaya gravitasi (9,81 m/s²)
- EF = Faktor efisiensi turbin dan generator (0,918)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Skenario Deforestasi

Berdasarkan pola perubahan tutupan lahan pada Tabel 2, maka diperoleh empat skenario deforestasi Sub DAS Mamasu (Gambar 2). Keempat skenario deforestasi yang digunakan dalam pemodelan SWAT dapat dilihat pada Tabel 3. Pertama, skenario deforestasi 0% yang mengacu

pada tutupan lahan tahun 2021 dengan luas hutan sebesar 27.725,67 ha. Kedua, skenario deforestasi 20% (deforestasi rendah) dengan luas tutupan hutan sebesar 22.016,95 ha. Ketiga, skenario deforestasi 40% (deforestasi sedang) dengan luas tutupan hutan sebesar 16.453,52 ha. Keempat, skenario deforestasi 60% (deforestasi tinggi) dengan luas tutupan hutan sebesar 10.805 ha.



Gambar (Figure) 2. Skenario deforestasi: a) tidak terjadi deforestasi (0%); b) deforestasi rendah (20%); c) deforestasi sedang (40%); d) deforestasi tinggi (60%) (Deforestation scenarios: a) no deforestation (0%); b) low deforestation (20%); c) moderate deforestation (40%); d) high deforestation (60%).

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

Tabel (Table) 3. Luas tutupan hutan masing-masing skenario deforestasi (Forest cover area for each deforestation scenario)

Tutupan lahan (Land cover)	Skenario Deforestasi (Deforestation scenario) (ha)			
	0%	20%	40%	60%
Hutan	27.725,67	22.016,95	16.453,52	10,805.11
Non-Hutan	77.332,59	83.041,31	88.604,74	94,253.14

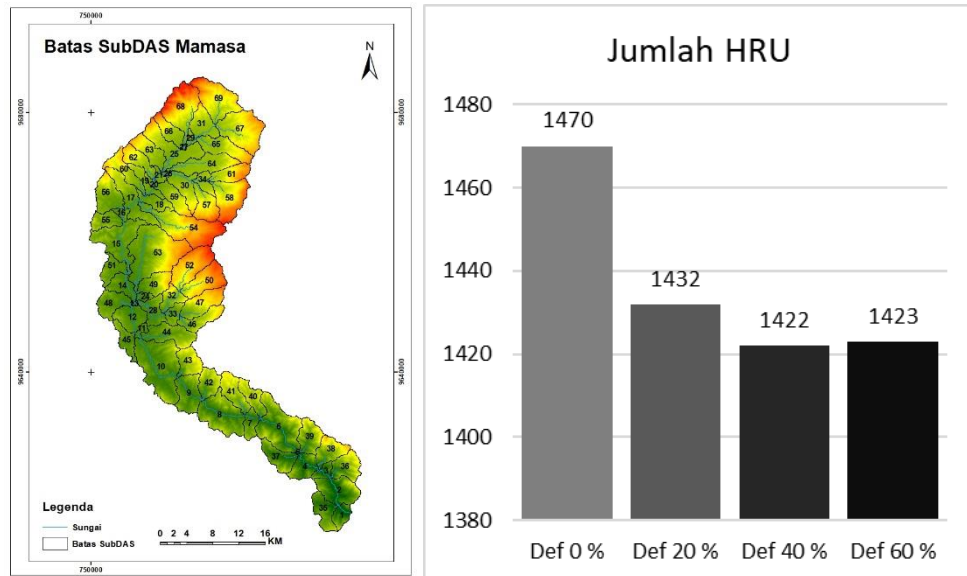
Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

B. Debit Sungai Sub DAS Mamasa

Berdasarkan hasil delineasi, luas wilayah Sub DAS Mamasa yang diperoleh sebesar 105.058,26 ha. Penggunaan model SWAT juga akan dihasilkan sub-basin, dimana wilayah tersebut terdiri atas 69 sub-basin. Nilai elevasi tertinggi dan terendah pada wilayah Sub DAS Mamasa masing-masing sebesar 2.884,74 mdpl dan 607,06 mdpl. Dalam pembentukan HRU didapatkan jumlah yang berbeda untuk setiap skenario. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh adanya perubahan kelas tutupan lahan, dimana tutupan lahan merupakan salah satu faktor utama dalam pembentukan HRU (Kenea, Adeba, Regasa, & Nones, 2021; Martínez-Retureta, Aguayo, Stehr, Sauvage, Echeverría, & Sánchez-Pérez, 2020). Penelitian ini juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan jumlah HRU jika wilayah DAS mengalami peningkatan deforestasi. Perubahan HRU ini terjadi akibat adanya perubahan tutupan lahan yang menjadi salah satu faktor dalam penentuan area HRU (Emiyati, Kusratmoko, & Sobirin, 2016). Hasil delineasi batas sub DAS dan pembentukan HRU dapat dilihat pada Gambar 3.

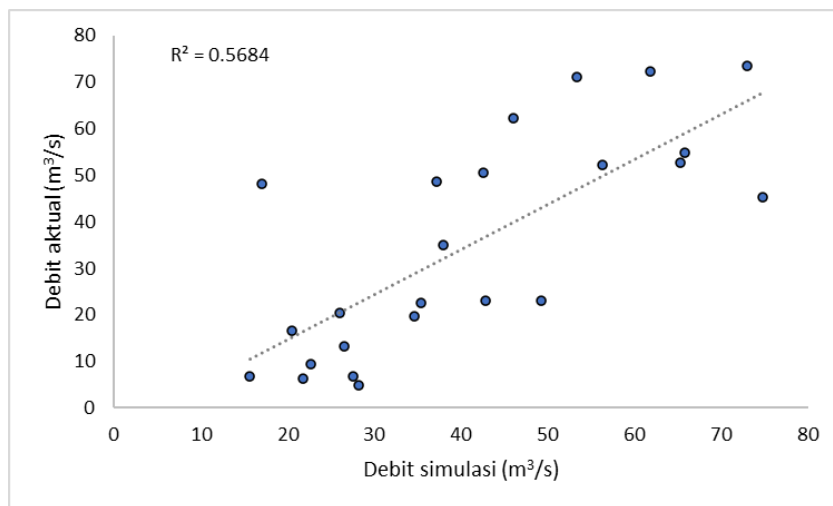
Perbedaan jumlah dan distribusi HRU pada setiap skenario deforestasi menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan hutan menjadi non-hutan, secara teori akan memengaruhi respon hidrologi yang dihasilkan oleh suatu DAS (Ismoyojati, Sujono, & Jayadi, 2019). Perubahan jumlah dan distribusi HRU berdampak pada akumulasi limpasan permukaan dan debit aliran suatu DAS (Emiyati *et al.*, 2016). Deforestasi dapat mendegradasi fungsi suatu DAS seperti peningkatan erosi tanah, peningkatan *run off*, penurunan evapotranspirasi dan menurunnya air simpanan yang berdampak pada penurunan produktivitas lahan (Posada-Marín & Salazar, 2022; Salim, Dharmawan, & Narendra, 2019).

Validasi model telah dilakukan untuk mengetahui kinerja model dengan menghitung nilai koefisien determinasi (R^2). Data yang digunakan untuk validasi model adalah data debit aktual tahun 2018–2019. Hasil validasi menunjukkan nilai koefisien determinasi dengan nilai R^2 0,568 (Gambar 4). Nilai koefisien determinasi tersebut mengindikasikan bahwa kinerja model cukup memuaskan (Gracelli, Magalhães, Santos, & Calijuri, 2020).



Gambar (Figure) 3. Hasil delineasi batas sub DAS, sub basin dan HRU (Results of delineation of sub-watershed, sub-basin and HRU boundaries)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

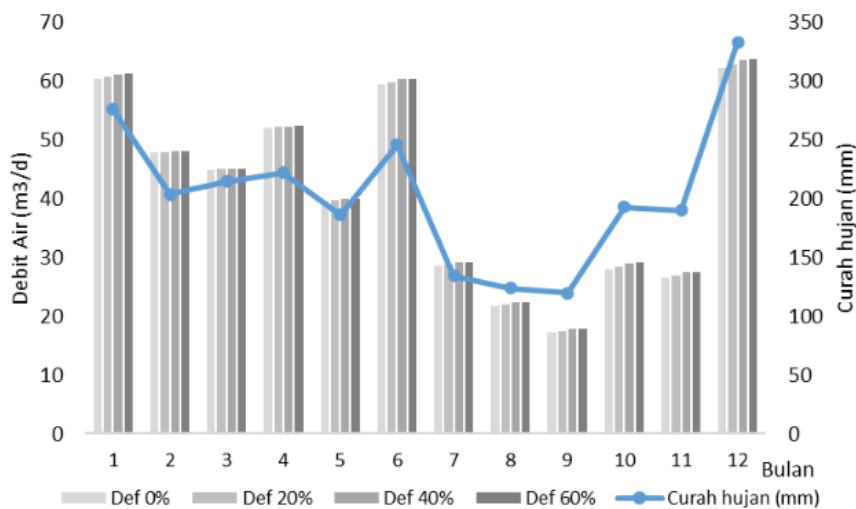


Gambar (Figure) 4. Grafik yang menggambarkan hasil validasi model SWAT (Graph illustrating the results of SWAT model validation)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

Hasil simulasi debit *inflow* PLTA Bakaru berdasarkan skenario deforestasi dan hubungannya dengan curah hujan dapat dilihat pada Gambar 5. Debit rata-rata bulanan tertinggi Sub DAS Mamasa terjadi pada periode bulan basah (Desember hingga Juni) dan cenderung mengalami penurunan pada periode bulan kering (Juli hingga November). Kondisi ini disebabkan oleh tingginya curah hujan rata-rata

bulan pada periode bulan basah yang mencapai 300–340 mm. Sementara itu, periode dengan curah hujan yang rendah memiliki hasil debit rata-rata bulanan yang rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat hubungan yang signifikan antara curah hujan dengan debit rata-rata bulanan suatu DAS (Camici, Massari, Ciabatta, Marchesini, & Brocca, 2020; Gunawan, Muslim, & Rahardjo, 2020).



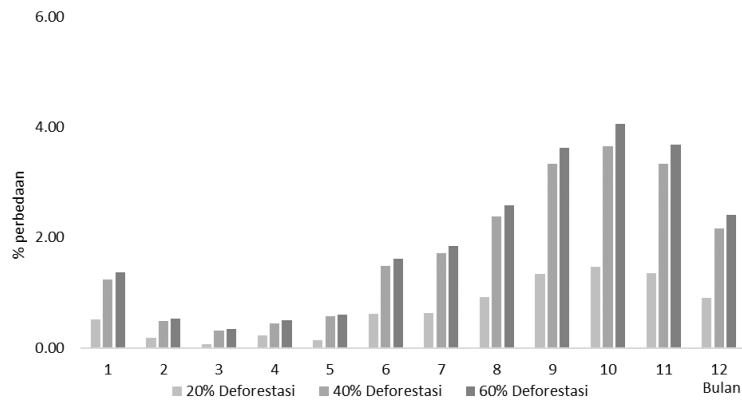
Gambar (Figure) 5. Grafik debit simulasi berdasarkan skenario deforestasi dan curah hujan (*Simulated discharge graph based on deforestation and rainfall scenarios*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (*Data analysis 2023*)

Selain curah hujan, besarnya debit sungai juga dipengaruhi oleh faktor tutupan lahan (Adeyeri, Laux, Lawin, & Arnault, 2020; Ebodé *et al.*, 2022). Berdasarkan skenario deforestasi terhadap debit rata-rata bulanan, peningkatan debit rata-rata bulanan sub DAS Mamasa terjadi pada semua skenario deforestasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat deforestasi maka debit rata-rata yang dihasilkan suatu DAS akan meningkat (Lyra & Rigo, 2019). Peningkatan tutupan hutan memberikan dampak positif terhadap hidrologi DAS, sedangkan peningkatan tutupan lahan pertanian memberikan dampak negatif terhadap kesehatan hidrologi DAS (Wariunsora, Kusuma, & Suprayogo, 2024). Deforestasi menjadi penyebab air hujan lebih banyak menjadi limpasan permukaan yang akan mengalir langsung ke sungai (Anwar, Pawitan, Murtalaksono, & Jaya, 2011; Salim *et al.*, 2019). Selain itu, porositas tanah yang rendah akibat perakaran pohon yang

sedikit akan menurunkan kemampuan tanah dalam menyimpan air hujan melalui proses infiltrasi. Tanah-tanah hutan porositasnya lebih tinggi disebabkan perakaran yang kompleks sehingga kapasitas infiltrasi menjadi lebih tinggi (Budianto, Wirosodarmo, & Suharto, 2014; Utami, Lestariningsih, Wicaksono, Anggara, & Lathif, 2024). Keberadaan hutan juga berpengaruh terhadap banyaknya serasah dapat memperbaiki sifat fisik tanah (Utami *et al.*, 2024; Yusnita, 2023) seperti struktur dan tekstur tanah. Tanah hutan bertekstur kasar dan berpori lebar sehingga air hujan lebih mudah meresap ke dalam lapisan-lapisan tanah.

Deforestasi memiliki dampak yang berbeda-beda terhadap debit bulanan, terutama antara bulan basah dan kering (Gracelli *et al.*, 2020). Dampak deforestasi terhadap debit yang dihasilkan sub DAS Mamasa juga dapat dilihat pada perbedaan debit rata-rata bulan seperti terlihat pada Gambar 6 dan Tabel 4.



Gambar (Figure) 6. Grafik perbedaan debit air sungai setiap skenario deforestasi (%) terhadap kondisi awal (Graph of the difference in river water discharge for each deforestation scenario (%) compared to initial conditions)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

Tabel (Table) 4. Perbedaan debit rata-rata bulanan setiap skenario deforestasi (%) terhadap kondisi awal (Difference in average monthly discharge for each deforestation scenario (%) compared to initial conditions)

Bulan	% Perbedaan		
	Deforestasi 20%	Deforestasi 40%	Deforestasi 60%
Januari	0,52	1,23	1,37
Februari	0,18	0,49	0,52
Maret	0,06	0,31	0,34
April	0,22	0,45	0,50
Mei	0,13	0,57	0,60
Juni	0,62	1,48	1,61
Juli	0,62	1,71	1,84
Agustus	0,93	2,38	2,58
September	1,33	3,33	3,63
Oktober	1,47	3,65	4,06
November	1,35	3,34	3,68
Desember	0,90	2,16	2,41

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

Pada bulan basah (curah hujan > 200 mm), debit rata-rata bulanan sub DAS Mamasa memiliki perbedaan yang relatif lebih rendah untuk berbagai skenario deforestasi. Kondisi yang berbeda terjadi pada bulan kering dengan curah hujan rata-rata bulanan <200 mm, dimana perbedaan debit rata-rata bulanan berada pada tingkat tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa debit rata-rata bulanan relatif lebih stabil pada bulan basah. Deforestasi yang terjadi di wilayah sub DAS Mamasa akan

berdampak pada bulan kering yang ditunjukkan dengan tingginya perbedaan debit rata-rata bulanan. Semakin tinggi tingkat deforestasi maka perbedaan debit rata-rata bulanan akan semakin besar. Perubahan tutupan hutan (deforestasi atau reforestasi) berpengaruh pada evapotranspirasi dan limpasan permukaan yang terjadi pada bulan basah dan kering sehingga berdampak pada jumlah debit (Gracelli *et al.*, 2020; Zeilhofer, Alcantara, & Fantim-Cruz, 2018).

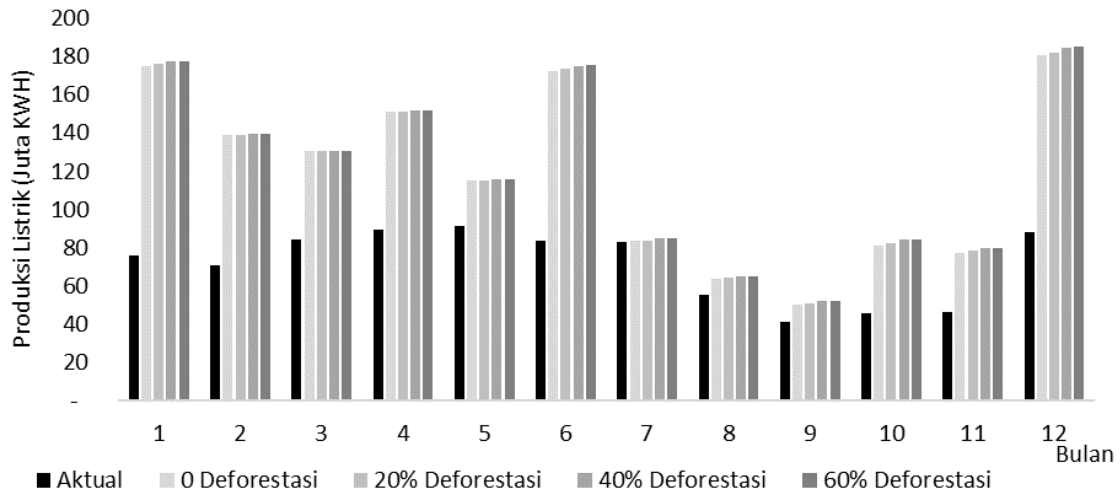
C. Produksi Energi PLTA Bakaru

Produksi listrik PLTA Bakaru ditentukan berdasarkan debit simulasi rata-rata bulanan Sub DAS Mamasa. Nilai debit secara langsung berpengaruh terhadap produksi energi listrik (Hakim, Yuniarti, Sukir, & Damarwan, 2020). Semakin besar debit air maka tegangan listrik yang dihasilkan semakin besar pula, demikian sebaliknya (Hakim *et al.*, 2020). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa produksi listrik rata-rata bulanan hasil simulasi PLTA Bakaru memiliki jumlah yang lebih besar jika dibandingkan dengan produksi listrik rata-rata bulanan aktual (Gambar 7). Hal ini mengindikasikan bahwa potensi debit air yang dihasilkan oleh sub DAS Mamasa mampu untuk mendukung produksi listrik PLTA Bakaru secara maksimal. Namun harus dicatat bahwa perhitungan produksi listrik yang dilakukan dalam penelitian tidak memperhitungkan kapasitas generator PLTA Bakaru. Generator PLTA Bakaru hanya dapat menampung debit air maksimal sebesar 45 m³/s (Ode, Yiyin, & Rudi, 2020). Sementara itu, hasil simulasi debit rata-rata bulanan Sub DAS Mamasa dapat mencapai 63,76 m³/s. Produksi listrik hasil simulasi pada bulan basah lebih besar jika dibandingkan dengan produksi listrik pada bulan kering (Hadiani, Solichin, Rosyid, Pariyanto, & Hadi, 2021). Pada bulan basah, potensi produksi listrik PLTA Bakaru berkisar antara 114.996.127,02–185.006.751,05 kWh. Potensi produksi listrik PLTA bakaru pada bulan kering hanya berkisar antara 50.115.266,89–84.719.403,98 kWh.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa peningkatan jumlah debit rata-rata bulanan meningkatkan jumlah produksi

listrik PLTA Bakaru. Kondisi ini telah dijelaskan oleh Obahoundje & Diedhiou (2022) bahwa penurunan tutupan lahan alami seperti hutan akan meningkatkan aliran permukaan yang akhirnya akan berdampak langsung pada peningkatan produksi listrik PLTA. Peningkatan produksi listrik rata-rata bulanan untuk masing-masing skenario yaitu sebesar 701.538,66 kWh (deforestasi 20%), 1.763.153,53 kWh (deforestasi 40%) dan 1.939.290,19 kWh (deforestasi 60%). Perbedaan produksi listrik rata-rata PLTA Bakaru paling besar terjadi pada pada bulan kering seperti terjadi pada bulan Juli hingga November. Kondisi ini ditunjukkan dengan rata-rata peningkatan produksi listrik PLTA Bakaru pada bulan kering akibat deforestasi dapat mencapai kisaran 802.709,64–2.222.293,19 kWh. Jumlah ini 27,56–28,79% lebih besar dari persentase perbedaan rata-rata produksi listrik yang terjadi pada bulan basah. Peningkatan ini lebih kecil dari yang telah ditemukan oleh Arias *et al.* (2020) pada simulasi yang dilakukan di DAS Amazon sebesar 50–69 %.

Perlu diketahui bahwa penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu hanya menganalisis dampak deforestasi dari aspek debit tanpa memperhatikan dampak lainnya, terutama potensi sedimentasi yang akan mengganggu kapasitas daya tampung waduk dan mengganggu kinerja turbin. Kedepannya, dampak lain deforestasi seperti erosi dan sedimentasi yang berpengaruh nyata terhadap kinerja PLTA perlu dilakukan. Dengan melakukan analisis menyeluruh diharapkan dapat memberikan penjelasan yang lebih detail terkait produksi listrik PLTA yang berkelanjutan.



Gambar (Figure) 7. Hasil Simulasi Produksi Energi Listrik PLTA Bakaru Berdasarkan skenario deforestasi (*Bakaru Hydroelectric Power Production Simulation Results Based on deforestation scenarios*)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (*Data analysis 2023*)

Deforestasi tidak dapat dilihat hanya pada meningkatnya produksi listrik suatu PLTA. Berbagai dampak negatif juga dapat ditimbulkan dari penurunan atau hilangnya tutupan hutan. Deforestasi dalam jangka panjang akan memengaruhi siklus hidrologi. Penurunan tutupan hutan dapat memengaruhi respon hidrologi suatu wilayah yang akan berdampak pada kestabilan fungsi DAS. Dampak deforestasi adalah dapat memengaruhi perubahan curah hujan, evapotranspirasi, kapasitas infiltrasi (Posada-Marín & Salazar, 2022). Selain itu, deforestasi juga akan meningkatkan erosi tanah, sedimentasi, penurunan umur bendungan dan risiko kejadian banjir (Obahoundje & Diedhiou, 2022).

IV. KESIMPULAN

Deforestasi yang terjadi di wilayah sub DAS Mamasa berdampak pada debit dan produksi listrik di PLTA Bakaru. Hasil validasi model menunjukkan koefisien determinasi yang diperoleh yaitu sebesar 0,57. Nilai ini mengindikasikan bahwa kinerja model cukup memuaskan. Produksi

listrik rata-rata bulanan hasil simulasi PLTA Bakaru cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan produksi listrik rata-rata bulanan aktual. Perbedaan produksi listrik rata-rata bulanan PLTA Bakaru paling tinggi terjadi pada pada bulan kering sebagaimana yang terjadi pada bulan Juli hingga November. Perbedaan produksi listrik PLTA Bakaru pada bulan kering akibat deforestasi berkisar antara 802.709,64–2.222.293,19 kWh. Jumlah ini, 27,56–28,79 persentasinya lebih besar dari perbedaan produksi listrik yang terjadi pada bulan basah. Penelitian ini hanya menganalisis dampak deforestasi terhadap jumlah debit dan produksi listrik PLTA tanpa memperhatikan dampak lainnya. Kedepannya, penting dilakukan penelitian dengan mempertimbangkan dampak lain deforestasi seperti erosi dan sedimentasi yang akan berpengaruh terhadap keberlanjutan kinerja PLTA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada pimpinan Fakultas Pertanian dan Kehutanan, Lembaga Penelitian,

Pengabdian pada Masyarakat dan Penjamin Mutu (LPPM) Universitas Sulawesi Barat atas support dan dukungannya dalam penelitian mengenai Dampak Deforestasi Terhadap Produksi Energi Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Air Bakaru Kabupaten Pinrang Sulawesi Selatan. Terima kasih yang sebesar-besarnya juga kami haturkan kepada pihak PLTA Bakaru atas kesediannya dalam memberikan informasi data-data primer yang dibutuhkan oleh tim peneliti.

KONTRIBUSI

Penulis pertama dan kedua membuat rancangan penelitian dan analisis data hingga penyelesaian artikel ini. Penulis kedua dan ketiga bersama-sama dalam pengumpulan data lapangan. Ketiga penulis memiliki kontribusi secara proporsional dalam penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeyeri, O. E., Laux, P., Lawin, A. E., & Arnault, J. (2020). Assessing the impact of human activities and rainfall variability on the river discharge of Komadugu-Yobe Basin, Lake Chad Area. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1–12.
- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 326, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>
- Anwar, M., Pawitan, H., Murti Laksono, K., & Jaya, I. N. S. (2011). Respons Hidrologi Akibat Deforestasi di DAS Barito Hulu, Kalimantan Tengah. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 17(3), 119–126.

- Arias, M. E., Farinosi, F., Lee, E., Livino, A., Briscoe, J., & Moorcroft, P. R. (2020). Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 3(6), 430–436.
- Arias, M. E., Lee, E., Farinosi, F., Pereira, F. F., & Moorcroft, P. R. (2018). Decoupling the effects of deforestation and climate variability in the Tapajós river basin in the Brazilian Amazon. *Hydrological Processes*, 32(11), 1648–1663. <https://doi.org/10.1002/hyp.11517>
- BPPT. (2021). Outlook energi Indonesia 2021: Perspektif teknologi energi Indonesia. Jakarta.
- Budianto, P. T. H., Wirosoedarmo, R., & Suharto, B. (2014). Perbedaan laju infiltrasi pada lahan hutan tanaman industri pinus, jati dan mahoni. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 1(2), 15–24.
- Camici, S., Massari, C., Ciabatta, L., Marchesini, I., & Brocca, L. (2020). Which rainfall score is more informative about the performance in river discharge simulation? A comprehensive assessment on 1318 basins over Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(10), 4869–4885. <https://doi.org/10.3390/w11122444>
- Chacuttrikul, P., Kiguchi, M., & Oki, T. (2018). Impacts of climate and land use changes on river discharge in a small watershed: a case study of the Lam Chi subwatershed, northeast Thailand. *Hydrological Research Letters*, 12(2), 7–13. <https://doi.org/10.3178/hrl.12.7>
- Chambers, J. Q., & Artaxo, P. (2017). Deforestation size influences rainfall. *Nature Climate Change*, pp. 175–176.
- Coe, M. T., Costa, M. H., & Soares-Filho, B. S. (2009). The influence of historical and potential future deforestation on the

- stream flow of the Amazon River–Land surface processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, 369(1–2), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- de Oliveira Serrão, E. A., Silva, M. T., Ferreira, T. R., da Silva, V. de P. R., de Sousa, F. de S., de Lima, A. M. M., ... Wanzeler, R. T. S. (2020). Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Science of The Total Environment*, 744, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140981>
- Ebodé, V. B., Braun, J. J., Nnomo, B. N., Mahé, G., Nkiaka, E., & Riotte, J. (2022). Impact of rainfall variability and land use change on river discharge in South Cameroon. *Water*, 14(6), 941.
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., ... Pokorny, J. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Emiyati, Kusratmoko E, & Sobirin. (2016). Spatial Pattern of Hydrologic Response Unit (Hru) Effect on Flow Discharge of Ci Rasea Watershed Using Landsat Tm in 1997 To 2009. *The International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 13(1), 39–48.
- Erinofiardi, Gokhale, P., Date, A., Akbarzadeh, A., Bismantolo, P., Suryono, A. F., ... Nuramal, A. (2017). A review on micro hydropower in Indonesia. *Energy Procedia*, 110, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.146>
- Gracelli, R. R., Magalhães, I. B., Santos, V. J., & Calijuri, M. L. (2020). Effects on streamflow caused by reforestation and deforestation in a Brazilian Southeast Basin: Evaluation by multicriteria analysis and SWAT model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W12-2020, 225–230. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w12-2020-225-2020>
- Guimberteau, M., Ciais, P., Ducharne, A., Boisier, J. P., Dutra Aguiar, A. P., Biemans, H., ... Langerwisch, F. (2017). Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1455–1475. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017>
- Gunawan, W., Muslim, S., & Rahardjo, I. A. (2020). Pengaruh curah hujan dan debit air terhadap produktivitas energi listrik yang dihasilkan pada pembangkit listrik tenaga air (Studi kasus: Sub Unit PLTA Kracak, Kabupaten Bogor Jawa Barat). *Journal of Electrical Vocational Education and Technology*, 5(1), 56–60. <https://doi.org/10.21009/JEVET.0051.09>
- Hadiani, R., Solichin, Rosyid, M., Pariyanto, D., & Hadi, S. (2021). The changes of the start in the wet season and dry season and potential electrical energy on wet season based on hydrology (Case: Kalijirak River, Karanganyar Regency). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724, null. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/724/1/012048>
- Hakim, M. L., Yuniarti, N., Sukir, S., & Damarwan, E. S. (2020). Pengaruh Debit Air Terhadap Tegangan Output Pada Pembangkit Listrik Tenaga Picohydro. *Jurnal Edukasi Elektro*, 4(1), 75–81.

- Ismoyojati, G., Sujono, J., & Jayadi, R. (2019). Studi pengaruh perubahan tataguna lahan terhadap karakteristik banjir Kota Bima. *Journal of Geography of Tropical Environments*, 2(2), 14–27.
- Janjić, J., & Tadić, L. (2023, June 1). Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review. *Earth (Switzerland)*, Vol. 4, pp. 331–344. MDPI. <https://doi.org/10.3390/earth4020018>
- Kaura, M., Arias, M. E., Benjamin, J. A., Oeurng, C., & Cochrane, T. A. (2019). Benefits of forest conservation on riverine sediment and hydropower in the Tonle Sap Basin, Cambodia. *Ecosystem Services*, 39, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101003>
- Kenea, U., Adeba, D., Regasa, M. S., & Nones, M. (2021). Hydrological Responses to Land Use Land Cover Changes in the Fincha'a Watershed, Ethiopia. *Land*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/land10090916>
- Lima, L. S., Coe, M. T., Soares Filho, B. S., Cuadra, S. V, Dias, L. C. P., Costa, M. H., ... Rodrigues, H. O. (2014). Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: implications for the provision of ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29, 261–274. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>
- Lukas, L., Rohi, D., & Tumbelaka, H. H. (2017). Studi kinerja pembangkit listrik tenaga air (PLTA) di daerah aliran sungai (das) Brantas. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(1), 17–23.
- Lyra, B. U., & Rigo, D. (2019). Deforestation impact on discharge regime in the Doce River Basin. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, null, null. <https://doi.org/10.4136/AMBI-AGUA.2370>
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., & Sánchez-Pérez, J.-M. (2020). Effect of Land Use/Cover Change on the Hydrological Response of a Southern Center Basin of Chile. *Water*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010302>
- Obahoundje, S., & Diedhiou, A. (2022). Potential impacts of climate, land use and land cover changes on hydropower generation in West Africa: a review. *Environmental Research Letters*, 17(4), 1–19. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5b3b>
- Ode, M. La, Yiyin, K., & Rudi, S. (2020). Sistem Monitoring Debit Inflow untuk Operasi Harian Pembangkit PLTA Bakaru. *Sinergi*, 18(1), 70–79.
- Panday, P. K., Coe, M. T., Macedo, M. N., Lefebvre, P., & de Almeida Castanho, A. D. (2015). Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 523, 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.018>
- Peña-Arancibia, J. L., Bruijnzeel, L. A., Mulligan, M., & van Dijk, A. I. J. M. (2019). Forests as 'sponges' and 'pumps': Assessing the impact of deforestation on dry-season flows across the tropics. *Journal of Hydrology*, 574, 946–963. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.064>
- Posada-Marín, J. A., & Salazar, J. F. (2022). River flow response to deforestation: contrasting results from different models. *Water Security*, 15, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100115>

- Salim, A. G., Dharmawan, I. W. S., & Narendra, B. H. (2019). Pengaruh luas tutupan lahan hutan terhadap karakteristik hidrologi DAS Citarum Hulu. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), 333–340.
- Schilling, K. E., Jha, M. K., Zhang, Y., Gassman, P. W., & Wolter, C. F. (2008). Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions. *Water Resources Research*, 44(7), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2007WR006644>
- Singh, V. K., & Singal, S. K. (2017). Operation of hydro power plants-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 610–619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.169>
- Stickler, C. M., Coe, M. T., Costa, M. H., Nepstad, D. C., McGrath, D. G., Dias, L. C. P., ... Soares-Filho, B. S. (2013). Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23), 9601–9606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Srinivasan, R., Arnold, J. G., & Yang, X. Y. (2019, May 1). A review of SWAT studies in Southeast Asia: Applications, challenges and future directions. *Water (Switzerland)*, Vol. 11. MDPI. <https://doi.org/10.3390/w11050914>
- AG. Utami, R. W., Lestariningsih, I. D., Wicaksono, K. S., Anggara, A. D., & Lathif, S. (2024). Pengaruh tutupan lahan dan curah hujan terhadap sifat fisik tanah serta debit mata air di hutan cempaka, Pasuruan, Jawa Timur. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 11(1), 271–281. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.1.29>
- Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D., & Yang, S. (2019). Soil and water assessment tool (SWAT) model: A systemic review. *Journal of Coastal Research*, 93(SI), 22–30. <https://doi.org/10.2112/SI93-004.1>
- Wariunsora, S., Kusuma, Z., & Suprayogo, D. (2024). Analisis hubungan tutupan lahan dan indikator kesehatan hidrologi DAS Rejoso, Jawa Timur. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 11(1), 289–300. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.1.31>
- Yusnita, R. (2023). Estimasi karbon serasah di kawasan manifestasi geotermal Gunung Jaboi Kecamatan Sukajaya Kota Sabang.
- Zeilhofer, P., Alcantara, L. H., & Fantim-Cruz, I. (2018). Effects of deforestation on spatio-temporal runoff patterns in the upper Teles Pires Watershed, Mato Grosso, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(5), 1889–1901.