

Analisis Variasi Musiman Kualitas Air sebagai Dampak Aktivitas Pertanian di Kawasan Waduk Darma

Nurdin Nurdin^{1*}, Dede Kosasih², Ing Nasihin¹, Ika Karyaningsih², Nina Herlina¹, Mohamad Rizal¹, dan Zidan Hidsa Kiat¹

¹Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Universitas Kuningan, Indonesia; e-mail: nurdin@uniku.ac.id

²Program Studi Kehutanan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Universitas Kuningan, Indonesia

ABSTRAK

Waduk Darma di Kabupaten Kuningan, Jawa Barat, berfungsi sebagai sumber irigasi, perikanan, dan pariwisata, tetapi terancam oleh aktivitas pertanian intensif. Penelitian ini bertujuan menganalisis variasi musiman kualitas air kualitas air Waduk Darma sebagai dampak aktivitas pertanian, khususnya beban nutrisi Total Nitrogen (TN) dan Total Phosphorus (TP), serta kontribusinya terhadap eutrofikasi. Sampel air diambil selama musim hujan (Februari–April 2024) dan kemarau (Mei–Juli 2024) di lima titik (inlet, outlet, tengah, KJA, PDAM). Analisis tanah lahan pertanian dilakukan di laboratorium ICBB, PT Biodiversitas Bioteknologi Indonesia. status mutu air menggunakan Indeks STORET (PPRI No. 22/2021), dan sifat kimia tanah berdasarkan kriteria PPT Bogor (1995). Hasil menunjukkan variasi musiman ekstrem: pada musim hujan, TN 0,4–2,3 mg/L (melebihi baku mutu Kelas I dan II) berdampak buruk bagi lingkungan dan TP 0,10–0,18 mg/L (melebihi Kelas III) berdampak buruk bagi lingkungan, sedangkan pada kemarau kedua parameter di bawah ambang batas. Skor STORET mencapai -40 (tercemar berat) di puncak hujan, membaik menjadi tidak tercemar di kemarau. Analisis tanah mengungkap P_2O_5 tersedia sangat rendah (2,44 mg/kg) tetapi P_2O_5 potensial sangat tinggi (102,32 mg/100g), menunjukkan akumulasi fosfor akibat pemupukan berlebihan di tanah masam (pH 5,6) bertekstur liat (54% klei) dengan kejenuhan basa rendah (15%). Kondisi ini mendorong pemupukan lebih intensif, memperparah beban nutrisi ke badan air melalui limpasan hujan. Pengelolaan terpadu berbasis DAS diperlukan, meliputi perbaikan kesuburan tanah, konservasi lahan, pengendalian KJA, dan pemantauan kualitas air berkala.

Kata kunci: eutrofikasi, stok fosfor, Indeks STORET, kualitas air musiman, Waduk Darma

ABSTRACT

Darma Reservoir in Kuningan, West Java, is a multipurpose water body that supports irrigation, fisheries, and tourism. However, its ecological health is increasingly threatened by runoff from nearby intensive farming. This study was conducted to examine seasonal changes in water quality, focusing on nutrient loads, specifically Total Nitrogen and Total Phosphorus, and their role in driving eutrophication. Water sampling took place during the rainy season from February to April 2024 and the dry season from May to July 2024 at five locations, including the inlet, outlet, central basin, floating net cage area, and municipal water intake zone. Soil samples from surrounding farmland were analyzed at the ICBB Laboratory. Water quality was assessed using the STORET Index, while soil characteristics followed the Bogor Soil Research Center guidelines. The results revealed sharp seasonal contrasts. In the rainy season, TN and TP concentrations frequently exceeded safety thresholds, causing environmental concern. During the dry season, however, both nutrients dropped to acceptable levels. The STORET score reached -40 during peak rains, indicating heavy pollution, before recovering to an unpolluted state in the dry months. Soil tests showed an interesting pattern, as available phosphorus was extremely low, yet total potential phosphorus was very high. This suggests a long-term buildup of residual fertilizer in the acidic clay soil. When heavy rains arrive, this stored phosphorus washes into the reservoir, worsening water quality. Effective solutions require integrated watershed management that covers soil restoration, land conservation, cage controls, and ongoing monitoring.

Keywords: eutrophication, legacy phosphorus, STORET Index, seasonal water quality, Darma Reservoir

Citation: Nurdin, N., Kosasih, D., Nasihin, I., Karyaningsih, I., Herlina, N., Rizal, M., dan Kiat, Z. H. (2026). Analisis Variasi Musiman Kualitas Air sebagai Dampak Aktivitas Pertanian di Kawasan Waduk Darma. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1132-1139, doi:10.14710/jil.24.5.1132-1139

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan PP RI 2021 Lampiran 6 berdasarkan peruntukannya dapat ditentukan kelas mutu air yang harus dipenuhi dari kualitas air Waduk Darma sebagai sumber air permukaan. Waduk Darma menjadi salah satu sumberdaya air permukaan strategis, berfungsi sebagai air irigasi yang mengairi areal pertanian dan perkebunan di Kab. Kuningan dan Kab. Cirebon, perikanan, dan pariwisata. (Pratama et al., 2018). Waduk Darma terletak pada 6°59'48,80" LS sampai 7°01'48,81" LS dan 108°23'45,03"BT sampai 108°25'20,71"BT berada di ketinggian 700 meter di atas permukaan laut (mdpl), dikelilingi oleh pemukiman padat penduduk dengan berbagai aktivitas pertanian yang menunjang pemenuhan kebutuhan ekonominya. Namun, peningkatan aktivitas antropogenik di luar dan di dalam kawasan waduk telah menunjukkan gejala terhadap penurunan kualitas air waduk (Kustanto, 2020). Aktivitas antropogenik di dalam kawasan waduk salah satunya pemanfaatan lahan yang timbul pada waktu volume air surut di musim kemarau untuk menanam padi dan tanaman palawija. Aktivitas antropogenik pada badan air menyebabkan perubahan kualitas air yang berdampak buruk bagi lingkungan (Yulia et al., 2022). Pengolahan lahan dilakukan secara intensif dengan menggunakan pupuk kimia dan organik untuk meningkatkan hasil produksi pertanian.

Salah satu permasalahan akibat aktivitas pertanian adalah meningkatnya konsentrasi nutrisi, khususnya total nitrogen (TN) dan total phosphorus (TP) yang berasal dari penggunaan pupuk nitrogen dan fosfat sebagai sumber peningkatan konsentrasi TN dan TP. Penggunaan pupuk yang berlebihan serta pembuangan air limbah ke badan air dapat menyebabkan penurunan kualitas ekosistem perairan atau tekanan ekologis (Soumaila et al., 2021). Nutrien yang berasal dari aplikasi pupuk dapat terakumulasi atau tertahan dalam tanah dan berpotensi ditransfer ke badan air melalui limpasan permukaan selama periode curah hujan tinggi. Limbah pertanian salah satu penyebab penurunan kualitas air (Nurdin et al., 2025). Nutrien terakumulasi di lahan pertanian dan terbawa masuk ke perairan ketika musim hujan tiba melalui proses limpasan permukaan (*runoff*) (Akinawo, 2023). Limpasan pertanian menyebabkan peningkatan unsur hara dan bahan organik (Ding et al., 2015) pada badan air. Konsentrasi TN dan TP yang tinggi dalam perairan, meskipun belum tentu melampaui baku mutu lingkungan, tetap berpotensi meningkatkan tekanan eutrofikasi yang pada akhirnya dapat memicu ledakan pertumbuhan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) (Ajayi & Ogunbayio, 2012).

Eutrofikasi adalah pertumbuhan tanaman dan alga yang tidak terkendali sebagai akibat melimpahnya nutrisi dan komponen yang dibutuhkan dalam proses fotosintesis (Zhang et al., 2023), terjadi secara alam dan melalui proses antropogenik (Akinawo, 2023).

Eutrofikasi menyebabkan penurunan konsentrasi oksigen, mempercepat sedimentasi, dan menurunkan daya tampung waduk (Zhang, 2022). Dalam jangka panjang, kondisi ini berpotensi berdampak negatif terhadap fungsi ekosistem dan produktivitas ekonomi Waduk Darma.

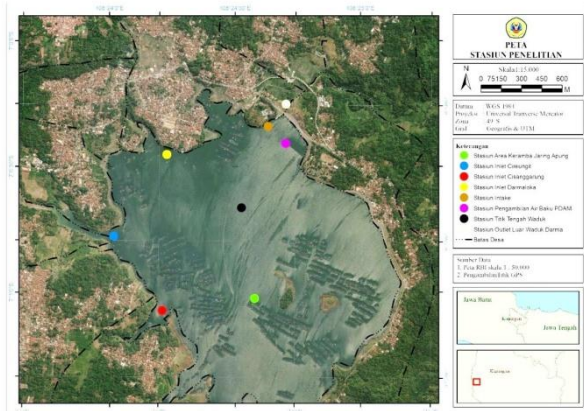
Pada musim hujan, eutrofikasi terutama dipicu oleh meningkatnya massa total unsur hara yang terbawa limpasan permukaan dari lahan pertanian dan pemukiman. Gejala eutrofikasi juga cenderung menguat pada musim penghujan seiring dengan *runoff* yang membawa limbah pertanian dan domestik (Akinawo, 2023). Sebaliknya, pada musim kemarau, meskipun masukan polutan dari luar berkurang, volume air yang rendah menurunkan daya pengenceran, sehingga polutan yang tetap masuk menjadi lebih pekat karena terakumulasi dalam perairan. Pada musim kemarau, meskipun suplai polutan menurun akan tetapi volume air yang rendah menyebabkan akumulasi zat pencemar yang lebih pekat (Lukhele & Msagati, 2024).

Permasalahan tersebut perlu mendapatkan perhatian secara serius dan sistematis untuk dapat menganalisis hubungan antara variasi musiman, aktivitas pertanian dalam kawasan waduk, dan proses eutrofikasi yang merupakan permasalahan krusial yang harus diteliti. Pemahaman ilmiah terhadap dinamika tersebut sangat diperlukan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan waduk. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi musiman kualitas air Waduk Darma sebagai dampak dari aktivitas pertanian di dalam kawasannya, dengan fokus terhadap dinamika proses eutrofikasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam upaya perlindungan Waduk Darma yang berkelanjutan

2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Waduk Darma yang terletak pada ketinggian 717 mdpl dengan titik koordinat 6°59'48,80" LS sampai 7°01'48,81" LS dan 108°23'45,03"BT sampai dengan 108°25'20,71"BT, Kabupaten Kuningan, Jawa Barat. Waktu penelitian selama 6 bulan, mulai Bulan Juli 2025 hingga Desember 2025. Berada di wilayah Kecamatan Darma, berada 14 km di sebelah barat Ibu Kota Kabupaten Kuningan, Waduk Darma yang dibangun pada tahun 1965 dan dioperasikan sejak 1972 memiliki kedalaman minimal 9,55 hingga maksimal 16,40 meter dengan luas genangan mencapai 420 hektare, serta mampu melayani kebutuhan irigasi seluas 6.400 hektare di Kabupaten Kuningan dan 13.284 hektare di Kabupaten Cirebon, terkendali (Nurdin et al., 2025) seperti terlihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta Lokasi Waduk Darma

2.2. Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui teknik sampling, yang terdiri atas data sekunder dan data primer. Data sekunder, yang meliputi data perubahan tutupan lahan di daerah tangkapan air dan data cuaca, dihimpun dari lembaga dan instansi terkait, serta dilengkapi dengan tinjauan pustaka terhadap jurnal-jurnal penelitian bereputasi, baik nasional maupun internasional. Data primer diperoleh dari pengamatan lapangan yang diperlukan untuk mengetahui faktor-faktor yang memengaruhi kualitas air.

Stasiun pengamatan dan titik pengambilan sampel ditentukan pada lima area, yaitu *inlet*, *outlet*, area tengah, area Keramba Jaring Apung (KJA), dan area Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM). Titik pengambilan sampel setiap stasiun penelitian ditandai dengan warna berbeda pada peta (**Gambar 1**) menggunakan bantuan *global positioning system* (GPS), serta didokumentasikan melalui foto menggunakan kamera.

Pengambilan 8 (delapan) sampel air dilakukan dengan teknik komposit kedalaman pada setiap stasiun penelitian, meliputi musim kemarau selama tiga bulan dan musim hujan selama tiga bulan. Khusus untuk pengujian konsentrasi total nitrogen (TN) dan total fosfor (TP), pengambilan sampel air dilakukan sesuai SNI 6989.57:2008 tentang Metode Pengambilan Contoh Air Permukaan. Sampel yang diperoleh selanjutnya dianalisis di laboratorium bersertifikat untuk memperoleh data kualitas air.

Untuk mengetahui kualitas tanah timbul yang dijadikan lahan pertanian dilakuakn dengan mengambil sampel tanah secara komposit dari 5 areal tanah timbul.

2.3. Teknik Analisis Data

Kualitas air Waduk Darma ditentukan berdasarkan kriteria baku mutu yang tercantum dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PPRI) Nomor 22 Tahun 2021. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan Indeks STORET guna mengevaluasi status mutu air (**Tabel 1**). Metode STORET menentukan status mutu air melalui sistem skor, dengan nilai negatif diberikan pada parameter yang melampaui baku mutu dan bobotnya bervariasi

menurut jenis parameter (fisika, kimia, biologi) serta jumlah sampel. Total skor menentukan klasifikasi status mutu air, semakin negatif nilainya, semakin buruk kualitas airnya (Kepmen LH No. 115 Tahun 2003, lampiran 1).

Selanjutnya, dilakukan penentuan karakteristik kualitas air Waduk Darma secara musiman (**Tabel 2**) serta identifikasi faktor – faktor yang memengaruhinya, termasuk kontribusi aktivitas pertanian terhadap beban nutrien. Kesesuaian peruntukan pemanfaatan air Waduk Darma disajikan pada **Tabel 3**.

Untuk mengetahui kandungan Nitrogen dan Fosfor di tanah timbul perlu dilakukan analisis laboratorium. Analisis tanah dilakukan di Laboratorium ICBB-PT Biodiversitas Bioteknologi Indonesia dengan hasil secara lengkap disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 1. Penentuan Status Mutu Air

Jumlah sampel ^{a)}	Nilai	Parameter		
		Fisika	Kimia	Biologi
< 10	Maksimum	-1	-2	-3
	Minimum	-1	-2	-3
	Rata-rata	-3	-6	-9
≥ 10	Maksimum	-2	-4	-6
	Minimum	-2	-4	-9
	Rata-rata	-6	-12	-18

Sumber: Kepmen LH No. 115 Tahun 2003

Tabel 2. Klasifikasi Kualitas Air

Skor	Kelas	Kondisi Kualitas Air
0	A (baik sekali)	Memenuhi baku mutu
-1 hingga -10	B (baik)	Tercemar ringan
-11 hingga -30	C (sedang)	Tercemar sedang
≥ -31	D (buruk)	Tercemar berat

Sumber: Kepmen LH No. 115 Tahun 2003

Tabel 3. Klasifikasi Peruntukan Air Tawar

Kelas	Peruntukan Air
I	Air baku air minum
II	Rekreasi air
III	Budidaya ikan, peternakan
IV	Irigasi pertanian

Sumber: PPRI No.21 Tahun 2022

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan sampel air Waduk Darma dilakukan 3 bulan berturut-turut pada musim hujan dan musim kemarau. Pada musim hujan dilakukan pada Bulan Februari-April 2024 dan musim kemarau pada bulan Mei-Juli 2024. Parameter kualitas air terdiri dari parameter fisika, kimia dan biologi. Namun untuk kebutuhan analisis hanya difokuskan pada parameter kimia Totan Nitrogen (TN) dan Total Pospat (TP), seperti terlihat pada **Tabel 4**. Parameter Total Phosphate (TP) dan TDS merupakan komponen utama sangat mempengaruhi kondisi kualitas air dan memicu pertumbuhan tumbuhan air yang tidak terkendali (Nurdin et al., 2025).

3.1. Variasi Konsentrasi Total Nitrogen (TN) Secara Musiman

Hasil pengukuran Total Nitrogen (TN) di Waduk Darma menunjukkan perbedaan antara musim hujan dan musim kemarau. Pada musim hujan (Februari-

April 2024), konsentrasi TN berkisar antara 0,4 hingga 2,3 mg/L, dengan nilai tertinggi tercatat pada Bulan Februari sebesar 2,3 mg/L. Kondisi ini melampaui baku mutu air Kelas I (0,65 mg/L), berpotensi memperburuk kualitas air dan Kelas II (0,75 mg/L) berdasarkan PPRI Nomor 22 Tahun 2021. Sebaliknya, pada musim kemarau (Mei-Juli 2024), konsentrasi TN turun drastis menjadi berkisar antara 0,003 hingga 0,01 mg/L, jauh di bawah ambang batas baku mutu Kelas I yang mengindikasikan kualitas air lebih baik. Hal ini dikarenakan tanah timbul yang dijadikan lahan pertanian tidak memberikan limpasan yang mengandung TN dan TP.

Pola peningkatan TN pada musim hujan sejalan dengan temuan penelitian di daerah reservoir pegunungan Asia Timur, yang menemukan bahwa konsentrasi TN meningkat terus-menerus seiring dengan meningkatnya intensitas curah hujan, di mana curah hujan lebat dan badai berkontribusi lebih dari 30% dari total beban nitrogen tahunan hanya dalam 5,20% dari total periode hujan (Wagner & Erickson, 2017). Temuan ini mengindikasikan bahwa limpasan permukaan berperan penting sebagai jalur masuknya nitrogen ke badan air waduk. Namun, kontribusi deposisi atmosfer sebagai bagian dari siklus nitrogen tidak dapat diabaikan, sehingga untuk menentukan jalur utama diperlukan analisis lebih lanjut mengenai proporsi masing-masing sumber. Limpasan pertanian yang terjadi pada musim hujan membawa serta residu pupuk kimia yang telah terakumulasi di lahan pertanian dalam kawasan waduk selama musim kemarau sebelumnya (Akinawo, 2023).

Pada musim kemarau, konsentrasi TN tercatat sangat rendah, yaitu 0,003–0,01 mg/L, volume air waduk mencapai 33.386.847 m³ berpotensi menurunkan konsentrasi relatif zat pencemar secara proporsional. Fenomena ini tidak sejalan dengan temuan studi (Chen et al., 2024) di DAS pertanian *Three Gorges*, yang menunjukkan bahwa konsentrasi nitrogen dan fosfor pada musim kemarau justru lebih tinggi secara proporsional karena perbedaan aliran permukaan, di mana volume air yang rendah menyebabkan akumulasi nutrisi menjadi lebih pekat

3.2. Variasi Konsentrasi Total Fosfat (TF) Secara Musiman

Konsentrasi Total Phosphorus (TP) pada musim hujan berkisar antara 0,10 hingga 0,18 mg/L, dengan nilai tertinggi pada Bulan April (0,18 mg/L). Konsentrasi ini melampaui baku mutu air Kelas III (0,1 mg/L). Pada musim kemarau, konsentrasi TP relatif lebih stabil berkisar antara 0,09 hingga 0,11 mg/L, masih berada di sekitar ambang batas baku mutu Kelas III. Hal ini mengindikasikan adanya akumulasi fosfor yang persisten di kolom air, bahkan pada kondisi hidrologi rendah.

Dinamika TP ini berkaitan erat dengan mekanisme transport partikel. Fosfor dalam DAS pertanian sebagian besar terdapat dalam bentuk fosfor partikulat (PP), di mana kekuatan erosi hujan mencuci permukaan tanah sehingga fosfor yang

terserap pada tanah permukaan ikut terbawa bersama sedimen (City, 2024). Sementara itu, nitrat nitrogen jarang terserap oleh partikel tanah dan terutama terdapat dalam larutan tanah sebagai zat terlarut yang mudah termobilisasi melalui limpasan (Chen et al., 2024). Perbedaan mekanisme mobilisasi ini menjelaskan mengapa pola variasi musiman antara TN dan TP memiliki karakteristik yang sedikit berbeda, khususnya terkait kestabilan TP pada musim kemarau.

Analisis statistik dalam studi lahan pertanian di China Utara mengidentifikasi lahan sawah sebagai kontributor dominan beban TN dan TP yang menunjukkan tingkat pencemaran tertinggi (City, 2024). Temuan di China Utara mengenai dominasi lahan sawah terhadap beban TN dan TP tidak dapat digeneralisasi ke DAS Cisanggarung sebelum dikonfirmasi melalui kajian spesifik lokasi, mengingat perbedaan hidrologi, iklim, dan pengelolaan lahan sangat memengaruhi dinamika nutrisi. Meskipun temuan ini relevan dengan kondisi Waduk Darma, dimana pemanfaatan lahan timbul untuk pertanian padi dan palawija berlangsung secara intensif setiap musim kemarau seperti ditunjukkan oleh **Gambar 2**.



Gambar 2. Pertanian di Lahan Timbul Waduk Darma
Sumber: dokumentasi lapang

Namun demikian, diperlukan kajian spesifik lokasi untuk mengonfirmasi kontribusi relatif masing-masing penggunaan lahan. Lahan tersebut akan terendam pada musim hujan dan berpotensi menjadi penyumbang terhadap konsentrasi TN dan TP dengan kadar sangat tinggi (102,32 mg/100g) di perairan waduk Darma. Dengan demikian, rendahnya TN dan tingginya TP pada musim kemarau mencerminkan perbedaan perilaku biogeokimia kedua unsur: nitrogen hilang melalui denitrifikasi dan serapan biota, sedangkan fosfor terakumulasi dan bersirkulasi antara sedimen, kolom air, dan biota. Hasil analisis tanah timbul lahan pertanian secara lengkap disajikan pada **Tabel 5**.

3.3. Satus Mutu Air Waduk Darma Berdasarkan Indeks STORET

Pada musim hujan, total skor Indeks STORET mencapai -40 untuk Bulan Februari dan Maret, mengkategorikan status air sebagai Tercemar Berat (Kelas D), kemudian sedikit membaik menjadi -20

pada Bulan April dengan kategori Tercemar Sedang (Kelas C). Perbaikan ini bertepatan dengan menurunnya curah hujan dari 516 mm/bulan (Maret) menjadi 267 mm/bulan (April), yang secara langsung mengurangi intensitas limpasan polutan dari lahan pertanian. Pada musim kemarau (Mei-Juli 2024), status mutu air berubah menjadi Tidak Tercemar seiring dengan curah hujan yang menurun drastis hingga 17,5 mm/bulan (Juni).

Hasil ini memiliki kesamaan pola dengan penelitian pada waduk lain di Indonesia. Studi pada Waduk Penjalin yang berada di sekitar permukiman, peternakan, sawah, dan keramba jaring apung, tergolong tercemar berat berdasarkan metode STORET (Handayani et al., 2023). Pola serupa turut ditemukan pada Waduk Cengklik di Kabupaten Boyolali, dengan skor STORET yang mencapai -38 pada musim hujan dan membaik menjadi -24 pada musim kemarau (Ariyani et al., 2024). Temuan ini memperkuat indikasi bahwa limpasan permukaan pada musim hujan menjadi faktor pendorong utama penurunan mutu air pada reservoir yang menerima tekanan aktivitas antropogenik, termasuk pertanian, di kawasan tangkapannya. Analisis menggunakan Indeks STORET menunjukkan perbedaan status mutu air yang kontras antara musim hujan dan musim kemarau. Hasil selengkapnya disajikan pada **Tabel 4**.

Penting diketahui bahwa status Tidak Tercemar pada musim kemarau tidak serta-merta berarti kualitas air dalam kondisi ideal secara ekologis.

Rendahnya konsentrasi nutrisi pada musim kemarau seiring dengan volume air Waduk Darma yang lebih banyak dibanding musim hujan (**Tabel 6**) yang berarti daya pengenceran (dilution capacity) waduk pun meningkat, namun demikian dampak kumulatif pencemaran tetap harus diwaspadai (Abdullah et al., 2025). Selain itu, fenomena sedimentasi dan akumulasi nutrisi di dasar waduk berpotensi menjadi sumber internal (internal loading) yang menyuplai nutrisi ke kolom air pada kondisi stratifikasi termal di musim kemarau.

3.4. Kontribusi Aktivitas Pertanian terhadap Beban Nutrien

Aktivitas pertanian di dalam kawasan Waduk Darma, terutama pemanfaatan lahan timbul (*emerging land*) saat musim kemarau untuk menanam padi dan palawija, merupakan sumber beban nutrisi yang potensial. Lahan pertanian yang digarap secara intensif dengan pupuk kimia (urea, TSP, KCl) dapat berfungsi sebagai reservoir nutrisi residual yang berpotensi dimobilisasi selama kejadian hujan. Penelitian di DAS Waduk Mrica Banjarnegara menyimpulkan bahwa penggunaan lahan sawah merupakan yang tertinggi dalam mentransport total fosfor ke waduk, diikuti oleh tegalan, kebun, pemukiman, dan hutan (Piranti et al., 2015), pola yang kemungkinan besar berlaku pula di Waduk Darma mengingat dominasi lahan sawah di kawasan tangkapan airnya.

Tabel 4. Hasil Uji dan Klasifikasi Kualitas Air Waduk Darma pada Musim Hujan dan Kemarau

Parameter	Waktu/Hasil Uji						Klasifikasi Kualitas Air (PPRI.21-2022)			
	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	I	II	III	IV
Total Nitrogen (mg/L)	2,3	0,4	1,15	0,01	0,003	0,01	0,65	0,75	1,9	-
Total Phosphate (mg/L)	0,14	0,1	0,18	0,09	0,11	0,09	0,01	0,03	0,1	-
Curah Hujan (mm/bulan)	459	516	267	91	17,5	80				
Cuaca	Hujan	Hujan	Hujan	Kemarau	Kemarau	Kemarau				
Total Skor Indeks STORET							-40	-40	-20	-
Status Kualitas Air*)							TB	TB	TS	TDT

Keterangan: TB= Tercemar Berat; TS=Tercemar Sedang; TDT=Tidak Tercemar; Sumber data diolah dari hasil uji Laboratorium SUCOFINDO

Tabel 5. Hasil Analisis dan Interpretasi Karakteristik Tanah Lahan Pertanian Kawasan Waduk Darma

Parameter	Nilai	Satuan	Kriteria PPT Bogor (1995)
pH H ₂ O	5,6	-	Agak Masam
C-Organik	1,05	%	Rendah
N-Total	0,11	%	Rendah
C/N Ratio	10	-	Sedang
P ₂ O ₄ Tersedia (Olsen)	2,44	mg/kg	Sangat Rendah
P ₂ O ₄ Potensial	102,32	mg/100g	Sangat Tinggi
KTK	18,84	cmol(+)/Kg	Sedang
Kejenuhan Basa (KB)	15	%	Sangat Rendah

Sumber: Laboratorium ICBB-PT BBI (No. LHP: 0604/LHP/PTBBI.Mark/IV/2024); Interpretasi berdasarkan PPT Bogor (1995)

Tabel 6. Volume Air Waduk Darma pada Musim Hujan-Kemarau

No.	Bulan Pengamatan	Curah Hujan (mm/bulan)	Musim	Volume (m ³)
1	Februari	459	Hujan	22.360.600
2	Maret	516	Hujan	28.458.000
3	April	267	Hujan	32.712.400
4	Mei	91	Kemarau	33.760.000
5	Juni	17,5	Kemarau	34.344.300
6	Juli	80	Kemarau	32.056.240

Sumber: BBWS Cimanuk- Cisaragarung, 2024

Hasil analisis laboratorium terhadap sampel tanah lahan pertanian di kawasan Waduk Darma oleh Laboratorium ICBB-PT Biodiversitas Bioteknologi Indonesia (No. Laporan: 0604/LHP/PTBBI.Mark/IV/2024, tanggal 22 April 2024) menyajikan gambaran komprehensif mengenai potensi tanah sebagai sumber beban nutrisi bagi perairan waduk. Seluruh parameter kimia dan fisika tanah dievaluasi berdasarkan Kriteria Penilaian Sifat-Sifat Kimia Tanah menurut Pusat Penelitian Tanah (PPT) Bogor (1995), sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Pemupukan nitrogen secara berlebihan dan rendahnya efisiensi pemanfaatan nitrogen menyebabkan sebagian nitrogen dari lahan pertanian langsung masuk ke limpasan dan mengakibatkan pencemaran nitrogen yang tersebar (*non-point source pollution*) pada air permukaan, meningkatkan beban TN pada badan air (Wang et al., 2019). Pada musim hujan konsentrasi nutrisi khususnya nitrogen dan fosfor secara signifikan lebih tinggi akibat hilangnya kawasan berhutan yang menyebabkan berkurangnya filtrasi alami terhadap limpasan (Luna et al., 2023). Korelasi positif yang kuat antara curah hujan dan TN menunjukkan adanya keterkaitan antara kondisi hidrologis dan dinamika nitrogen, yang konsisten dengan kemungkinan peningkatan transport nitrogen melalui limpasan selama periode hujan. Studi terkait menunjukkan bahwa irigasi banjir (*flood irrigation*) yang umum diterapkan pada sawah di kawasan waduk dapat memperburuk masalah kualitas air dengan meningkatkan aliran air dan membawa kelebihan nutrisi serta sedimen ke perairan (City, 2024).

3.4.1. Karakteristik Kimia Tanah Lahan Pertanian Kawasan Waduk Darma

a. Reaksi Tanah (pH)

Tanah pada lahan pertanian kawasan Waduk Darma memiliki pH H₂O sebesar 5,6 yang tergolong agak masam dan pH KCl 4,5 yang tergolong masam berdasarkan kriteria PPT (1995). Selisih ΔpH (pH H₂O – pH KCl) sebesar 1,1 mengindikasikan adanya muatan negatif neto yang dominan pada koloid tanah, konsisten dengan tekstur liat bermuatan tinggi. Kondisi tanah agak masam ini memiliki dua implikasi penting terhadap dinamika nutrisi. Pertama, pada pH di bawah 6,0, ketersediaan fosfor bagi tanaman menurun akibat fiksasi oleh ion Al³⁺ dan Fe³⁺ yang aktif pada kondisi masam (Enggalmulia et al., 2024). Aplikasi pupuk fosfat oleh petani yang melebihi kebutuhan aktual tanaman menyebabkan surplus fosfor terakumulasi dalam tanah dan membentuk cadangan fosfor laten. Temuan ini diperkuat oleh data pola penggunaan pupuk yang menunjukkan tren aplikasi berlebih secara konsisten, serta analisis profil tanah yang mengindikasikan adanya akumulasi fosfor pada lapisan tertentu. Kedua, kondisi masam mendorong mobilitas Al³⁺ (<0,04 cmol(+)/kg) dan H⁺ (0,15 cmol(+)/kg) yang memperlemah kemampuan

tanah menahan kation lain, mempercepat pencucian nitrogen ke badan air.

b. Kandungan C-Organik dan N-Total

C-organik tanah sebesar 1,05% tergolong rendah dan N-Total sebesar 0,11% juga tergolong rendah berdasarkan kriteria PPT (1995) yang menetapkan C-organik rendah pada kisaran 1,00–2,00% dan N-Total rendah pada kisaran 0,10–0,20% (Enggalmulia & Masnang, 2024).

Rendahnya kedua parameter ini mencerminkan degradasi bahan organik tanah akibat pengolahan lahan yang intensif dan terus-menerus, sebuah kondisi umum pada lahan sawah yang mengalami tekanan intensifikasi pertanian (PPT, 1995). Fakta di lapang, petani mengaplikasikan pupuk nitrogen (urea, ZA) dalam dosis tinggi untuk memenuhi kebutuhan tanaman, namun kadar nitrogen rendah. Hal ini disebabkan laju kehilangan nitrogen melalui air jauh lebih cepat daripada laju akumulasi nitrogen di dalam tanah.

Rasio C/N sebesar 10 tergolong sedang, mengindikasikan bahwa bahan organik tanah sedang dalam proses dekomposisi aktif. Ini berarti mineralisasi nitrogen yaitu konversi nitrogen organik menjadi nitrogen anorganik (NH₄⁺ dan NO₃⁻) yang mudah larut berlangsung dengan laju sedang. Nitrogen anorganik yang terbentuk sangat rentan terbawa limpasan permukaan menuju badan air waduk, terutama NO₃⁻ yang bersifat anionik sehingga sulit diserap koloid tanah bermuatan negatif (Chen et al., 2024).

c. Kandungan Fosfor (P₂O₄)

Temuan paling krusial dari analisis tanah ini adalah kontras yang sangat tajam antara P₂O₅ tersedia dan P₂O₅ potensial. Nilai P₂O₅ tersedia (*metode Olsen*) hanya 2,44 mg/kg yang tergolong sangat rendah (< 4,5 ppm menurut PPT, 1995), sementara P₂O₅ potensial mencapai 102,32 mg/100g yang masuk kategori sangat tinggi (> 60 mg/100g). Kesenjangan ekstrem ini — rasio P potensial terhadap P tersedia sekitar 42:1 — merupakan indikator kuat terjadinya akumulasi fosfor laten (*legacy phosphorus*) dalam tanah akibat pemupukan berlebihan yang berlangsung selama bertahun-tahun.

Mekanismenya adalah sebagai berikut: pada tanah masam (pH 5,6), fosfor dari pupuk yang diaplikasikan terfiksasi oleh ion Al³⁺ dan Fe³⁺ membentuk senyawa Al-fosfat dan Fe-fosfat yang tidak larut, sehingga tidak tersedia bagi tanaman namun tersimpan dalam jumlah sangat besar dalam tanah. Ketika musim hujan tiba dengan curah hujan sangat tinggi (459–516 mm/bulan), limpasan permukaan yang masif mengikis partikel tanah liat bermuatan fosfor ini dan mentransportnya langsung ke badan air Waduk Darma. Penelitian di DAS Waduk Mrica Banjarnegara menemukan bahwa penggunaan lahan sawah merupakan yang tertinggi dalam mentransport total fosfor ke waduk, diikuti tegalan, kebun, pemukiman, dan hutan (Piranti et al., 2015), pola yang sangat

relevan dengan kondisi Waduk Darma. Kondisi akumulasi fosfor laten ini sepenuhnya menjelaskan mengapa konsentrasi TP air waduk melonjak pada musim hujan (0,10–0,18 mg/L) melampaui baku mutu Kelas III, meskipun pada musim kemarau nilai TP tampak lebih terkendali.

d. Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan Kejenuhan Basa (KB)

KTK tanah sebesar 18,84 cmol(+)/kg tergolong sedang, namun Kejenuhan Basa (KB) hanya 15% yang tergolong sangat rendah. Kombinasi KTK sedang dengan KB sangat rendah mengindikasikan bahwa meskipun tanah memiliki kapasitas menahan kation yang cukup, sebagian besar tapak pertukaran kation justru didominasi oleh ion H^+ dan Al^{3+} (kemasaman dapat tukar), bukan kation basa (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). Nilai Ca^{2+} yang sangat rendah (<0,49 cmol(+)/kg) memperkuat kondisi ini. KB yang sangat rendah mencerminkan tingkat pencucian kation yang intensif, yang secara tidak langsung mempercepat mobilisasi nitrogen anorganik menuju perairan melalui mekanisme leaching dan runoff (Enggalmulia & Masnang, 2024). Kondisi kesuburan kimia yang rendah ini secara struktural mendorong petani menginput pupuk lebih banyak, menciptakan siklus umpan balik yang memperparah akumulasi nutrisi dalam tanah.

e. Potensi Eutrofikasi dan Implikasinya

Tingginya beban TN dan TP yang bersumber dari lahan pertanian sebagaimana dibuktikan oleh data kualitas air dan data kimia tanah yang memiliki implikasi serius terhadap proses eutrofikasi Waduk Darma. Eutrofikasi terjadi ketika pengkayaan nutrisi menyebabkan pertumbuhan tumbuhan air yang tidak terkendali, menurunkan oksigen terlarut, mempercepat sedimentasi, dan mengurangi daya tampung waduk (Nurdin et al., 2024). Indikator visual paling nyata adalah pertumbuhan masif eceng gondok (*Eichornia crassipes*) yang mengancam fungsi irigasi, perikanan, dan pariwisata Waduk Darma.

Jika proses eutrofikasi berlanjut, terdapat risiko terbentuknya senyawa toksik yang berdampak langsung pada operasional PDAM dan biaya penyediaan air bersih bagi masyarakat Kabupaten Kuningan dan Cirebon. Air baku yang kaya bahan organik akibat eutrofikasi, ketika diklorinasi, akan membentuk senyawa sampingan disinfeksi seperti trihalometana (THMs) yang bersifat karsinogenik, sekaligus meningkatkan biaya pengolahan karena kebutuhan klorin yang lebih tinggi (Impact of the algal...). Solusi yang dapat dilakukan adalah solusi terpadu mencakup pengelolaan DAS untuk menekan eutrofikasi serta optimalisasi proses PDAM melalui kontrol oksidasi, filtrasi lanjutan, dan disinfeksi alternatif guna mencegah pembentukan THMs dan menekan biaya pengolahan.

4. KESIMPULAN

Variasi mutu air Waduk Darma antarmusim bukan sekadar akibat perbedaan curah hujan, melainkan cerminan dari fosfor laten yang tersimpan di dalam tanah pertanian kawasan tangkapan. Kontras antara kadar P_2O_5 tersedia yang sangat rendah dan P_2O_5 potensial yang sangat tinggi menunjukkan bahwa pemupukan berlebihan yang berlangsung bertahun-tahun telah membentuk cadangan fosfor terikat pada kompleks tanah masam berliat. Cadangan inilah yang termobilisasi melalui limpasan permukaan setiap musim hujan, terlepas dari perubahan praktik pemupukan petani pada tahun berjalan. Temuan ini mengoreksi anggapan bahwa eutrofikasi waduk dapat dikendalikan cukup dengan menekan dosis pupuk musim berjalan. Akar masalahnya adalah stok nutrisi historis di dalam tanah, bukan semata laju aplikasi pupuk yang berlangsung saat ini.

Berdasarkan temuan tersebut, pengelolaan daerah aliran sungai Waduk Darma perlu bergeser dari sekadar membatasi input pupuk menuju intervensi terhadap stok fosfor yang telah terakumulasi. Pengapuran untuk memperbaiki pH dan kejenuhan basa tanah berpotensi menurunkan mobilitas fosfor laten tersebut, sementara pengendalian erosi menutup jalur transportasi utamanya menuju badan air. Kesimpulan ini berlaku pada daerah aliran sungai bertanah masam berliat dengan riwayat pemupukan intensif seperti kawasan Waduk Darma. Pemantauan kualitas air musiman tidak akan banyak berarti apabila tidak disertai remediasi kesuburan tanah di kawasan hulu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, S., Alkhadher, A., & Sidek, L. M. (2025). *Seasonal variations in water quality and hydrological dynamics in a tropical reservoir driven by rainfall, runoff, and anthropogenic activities*. 1–16.
- Ajayi, T. O., & Ogunbayo, A. O. (2012). Achieving Environmental Sustainability in Wastewater Treatment by Phytoremediation with Water Hyacinth (*Eichornia Crassipes*). *Journal of Sustainable Development*, 5(7), 80–90. <https://doi.org/10.5539/jsd.v5n7p80>
- Akinawo, S. O. (2023). *Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies*. 12(March). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
- Ariyani, N., Maharani, N. E., & Nurbaya, F. (2024). Kajian Temporal Tingkat Pencemaran Lingkungan Perairan Waduk Cengklik Kabupaten Boyolali – Jawa Tengah. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Indonesia*, 19(3), 6. <https://doi.org/10.26714/jkmi.19.3.2024.6-13>
- Chen, C., Deng, H., Xin, G., & Zhou, Y. (2024). *Characteristics of nitrogen and phosphorus contents in soil and water in an agricultural catchment of the three Gorges reservoir area*. (January), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1327260>
- City, M. (2024). *Rainfall impacts on nonpoint nitrogen and phosphorus dynamics in an agricultural river in subtropical montane reservoir region of southeast*

- Nurdin, N., Kosasih, D., Nasihin, I., Karyaningsih, I., Herlina, N., Rizal, M., dan Kiat, Z. H. (2026). Analisis Variasi Musiman Kualitas Air sebagai Dampak Aktivitas Pertanian di Kawasan Waduk Darma. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1132-1139, doi:10.14710/jil.24.5.1132-1139
- China. (3), 1–25.
- Ding, J., Jiang, Y., Fu, L., Liu, Q., Peng, Q., & Kang, M. (2015). Impacts of land use on surface water quality in a subtropical river basin: A case study of the dongjiang river basin, Southeastern China. *Water (Switzerland)*, 7(8), 4427–4445. <https://doi.org/10.3390/w7084427>
- Enggalmulia, S. H., & Masnang, A. (2024). *Comparative Study Through Soil Fertility Analysis On Andosol , Latosol And Podsolik Soil Types In Bogor District*. 9(1), 1–11.
- Handayani, A. M. T., Samudra, S. R., Hidayati, N. V., & Sarasati, W. (2023). Status Mutu Air Waduk Penjalin Berdasarkan Parameter Fisika-Kimia Menggunakan Metode Storet dan Indeks Pencemaran. *Maiyah*, 2(4), 270. <https://doi.org/10.20884/1.maiyah.2023.2.4.10418>
- Kustanto, A. (2020). Dinamika Pertumbuhan Penduduk Dan Kualitas Air Di Indonesia. *Jiep*, 20(1), 12–20. <https://jurnal.uns.ac.id/jiep/article/download/35143/26922>
- Lukhele, T., & Msagati, T. A. M. (2024). Eutrophication of Inland Surface Waters in South Africa: An Overview. *International Journal of Environmental Research*, 18(2), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00568-8>
- Luna, M. J., Masino, P., Bertone, E., & Stewart, R. A. (2023). Science of the Total Environment Towards nutrient neutrality : A review of agricultural runoff mitigation strategies and the development of a decision-making framework. *Science of the Total Environment*, 874(February), 162408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162408>
- Nurdin, A. Y., Kosasih, D., & Herlina, N. (2024). *Tumbuhan Air Berpotensi sebagai Fitoremediator di Waduk Darma Kuningan*. 22(1), 175–183. <https://doi.org/10.14710/jil.22.1.175-183>
- Nurdin, Piranti, A. S., Lestari, S., Nasihin, I., & Herlina, N. (2025). *Assessing Seasonal Variations in Reservoir Water Quality : Implications for Eutrophication and Pollution Management*. 7(1).
- Piranti, A. S., Waluyo, G., Pertanian, F., & Purwokerto, U. (2015). *Transport Nutrien penyebab Eutrofikasi dari Daerah Tangkapan Air Waduk Mrica Banajrnegara*. 32(1), 66–73.
- Pratama, D. S., Syaikat, Y., & Ekayani, M. (2018). Estimasi Nilai Ekonomi Dan Eksternalitas Negatif Pemanfaatan Waduk Darma. *RISALAH KEBIJAKAN PERTANIAN DAN LINGKUNGAN: Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian Dan Lingkungan*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.20957/jkebijakan.v4i1.20056>
- Soumaila, K. I., Mustapha, N., & Mohamed, C. (2021). Assessment of Surface Water Quality using Indices and Geographic Information System in the Sebou River Basin, Morocco. *European Scientific Journal ESJ*, 17(10). <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n10p249>
- Wagner, T., & Erickson, L. E. (2017). Sustainable Management of Eutrophic Lakes and Reservoirs. *Journal of Environmental Protection*, 08(04), 436–463. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.84032>
- Wang, R., Min, J., Kronzucker, H. J., Li, Y., & Shi, W. (2019). N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices. *Science of the Total Environment*, 663, 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.368>
- Yulia, I. T., Zain, I., Negara, S., Indah, S., Negari, T., & Sholiqin, M. (2022). *The Influence of Community Behavior on Water Quality of the Anyar River in Surakarta City Based on Physical-Chemical Parameters*. 10(October), 1–9.
- Zhang, H. (2022). Lake Management and Eutrophication Mitigation: Coming down to Earth—In Situ Monitoring, Scientific Management and Well-Organized Collaboration Are Still Crucial. *Water (Switzerland)*, 14(18), 14–16. <https://doi.org/10.3390/w14182878>
- Zhang, H., Chen, J., & Haffner, D. G. (2023). Plateau Lake Water Quality and Eutrophication: Status and Challenges. *Water (Switzerland)*, 15(2), 2–7. <https://doi.org/10.3390/w15020337>