

ANALISIS PERUBAHAN PENGGUNAAN LAHAN DAN KUALITAS AIR DI DAS CITARUM HULU

NIRMAYANTI¹, MARIANA MARSELINA²

1,2 Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Email : nirmayantitaha@gmail.com

ABSTRAK

Kualitas air perlu dievaluasi kelayakannya untuk memenuhi kebutuhan domestik, industri, pertanian dan lingkungan. Degradasi kualitas air terus terjadi, yang dipengaruhi oleh perubahan penggunaan lahan termasuk badan air, hutan, permukiman dan pertanian serta konfigurasi lanskap. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dampak perubahan penggunaan lahan terhadap kualitas air di Sungai Citarum Hulu dengan area tangkapan Wangisagara, Koyod, Cisirung dan Nanjung, dengan menggunakan analisis statistik multivariat. Proporsi penggunaan lahan dari tahun 2014, 2017, dan 2022 menunjukkan perubahan yang signifikan. Parameter kualitas air DHL, suhu, pH, TSS, NH₃-N, BOD, COD, DO, NO₃-N dan klorin bebas mengalami efek spasial dan musiman. Hasil regresi linear berganda mengidentifikasi hubungan antara variabel penggunaan lahan dan satu variabel kualitas air. DHL dan klorin bebas berkorelasi negatif dengan hutan, sedangkan DO berkorelasi positif. Permukiman berkorelasi positif dengan COD, BOD, dan suhu. Pertanian berkorelasi positif dengan NO₃-N, NH₃-N, dan TSS, namun negatif dengan DO. Badan air berkorelasi negatif dengan suhu dan positif dengan klorin bebas. Analisis ini juga menunjukkan CONTAG berkorelasi positif dengan BOD dan negatif dengan DO, sementara LSI berkorelasi negatif dengan COD, dan ED berkorelasi negatif dengan klorin bebas. Analisis redundansi memberikan gambaran keseluruhan variabel penggunaan lahan terhadap variabel kualitas air. Hasil analisis menunjukkan area tangkapan Cisirung menghasilkan varians terbaik dibanding lainnya.

Kata kunci: *kualitas air, perubahan penggunaan lahan, regresi linear berganda, analisis redundansi.*

ABSTRACT

Water quality must be evaluated to determine its adequacy for domestic, industrial, agricultural, and environmental needs. Degradation of water quality occurs over time, influenced by land use changes, including water, forest, settlement, farmland, and landscape configurations. This study aims to evaluate the impact of land use changes on water quality in the Upper Citarum River, focusing on Wangisagara, Koyod, Cisirung, and Nanjung catchment areas using the multivariate statistical analysis. The proportion of land use has undergone significant changes, while the water parameters, including EC, WT, pH, TSS, NH₃-N, BOD, COD, DO, NO₃-N and free chlorine, exhibit spatial and seasonal variations. Multiple linear regression analysis identifies relationships between land use variables and water quality variables. EC and free chlorine are negatively correlated with forest, while DO is positively correlated. Settlement are positively correlated with COD, BOD and WT. Water is negatively correlated with WT and positively correlated with free chlorine. The analysis also reveals that CONTAG is positively correlated with BOD and negatively correlated with DO, LSI is negatively correlated with COD, and ED is negatively correlated with free chlorine. Redundancy analysis provides a comprehensive overview of the entire land use and water quality variables. The result of analysis show that the Cisirung catchment area produced the best variance compared to the others.

Keywords: *water quality, land use change, multiple linear regression, redundancy analysis.*

1. PENDAHULUAN

Air memiliki peranan krusial dalam segala aspek kehidupan makhluk hidup di bumi. Kualitas air dapat mengalami degradasi akibat faktor alami dan antropogenik, termasuk pencemaran dari sumber titik dan bukan titik. Sumber titik relatif mudah diidentifikasi, sedangkan sumber bukan titik sulit karena penyebarannya melalui aliran permukaan yang kompleks di Daerah Aliran Sungai (DAS). Hal ini diperparah oleh perubahan lahan yang meningkatkan permukaan kedap air, dan limpasan, misalnya di sektor pertanian melalui penggunaan intensif pupuk, pestisida, herbisida, dan limbah hewan. Penilaian kualitas air diperlukan untuk menentukan kelayakannya sekaligus memahami hubungan penggunaan lahan terhadap kualitas air (Zhang dkk., 2020).

Penurunan kualitas air akibat alih fungsi lahan berdampak signifikan bagi masyarakat, sehingga studi penggunaan lahan dan kualitas air sangat penting untuk perencanaan, pengelolaan air, dan prediksi masa depan demi pembangunan berkelanjutan. Penelitian Odgaard dkk., (2019) di Denmark menunjukkan peningkatan lahan pertanian menyebabkan peningkatan $\text{NO}_3\text{-N}$, sumber utama eutrofikasi, selanjutnya dilakukan penargetan lokasi berkonsentrasi $\text{NO}_3\text{-N}$ tinggi. Sebesar 23% lahan pertanian disisihkan, dan membebaskan 35% area untuk kebutuhan pangan. Hasilnya efektif mengurangi konsentrasi $\text{NO}_3\text{-N}$.

Bagian hulu Sungai Citarum mengalami pertumbuhan populasi dan aktivitas ekonomi. Hal ini menyebabkan perubahan pola penggunaan lahan di DAS Citarum Hulu, sehingga kualitas sumber daya alam memburuk seiring waktu dan menyebabkan berbagai masalah seperti banjir, longsor, erosi, sedimentasi, dan pencemaran sungai (Puslitbang, 2018). Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengontrol dan memantau perubahan kondisi Sungai Citarum Hulu. Studi-studi ini mencakup pemantauan jangka panjang terhadap perubahan kualitas air dari tahun ke tahun (Marselina dkk., 2022; Ginkel dkk., 2015), perubahan penggunaan lahan (Fadhil dkk., 2021; Siswanto dan Frances., 2019), berbagai solusi untuk mengatasi dampak pencemaran (Puslitbang, 2018) dan penerapan program Citarum Harum. Metode, dan analisis terus dilakukan untuk memahami serta memitigasi dampak.

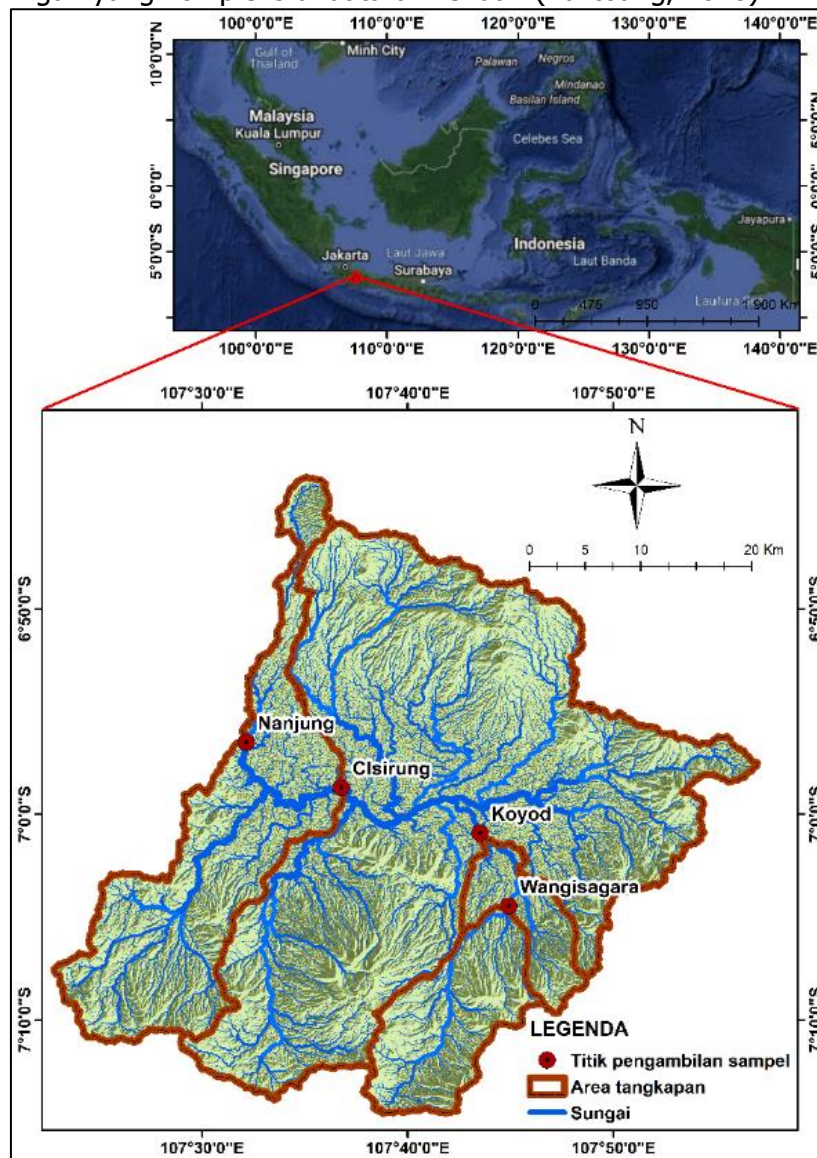
Penelitian berfokus pada area tangkapan Wangisagara, Koyod, Cisirung, dan Nanjung. Pendekatan yang digunakan mengacu pada skala buffer (Zhang, 2020) berdasarkan arah dan sebaran aliran air. Area tangkapan digunakan untuk mengevaluasi pengaruh dan dampak yang terjadi seiring perubahan skala. Beberapa penelitian sebelumnya di bagian hulu Sungai Citarum masih terbatas pada sub DAS dengan pendekatan analisis yang berbeda. Analisis dilakukan dengan menggunakan perpaduan dari regresi linear berganda dan analisis redundansi. Penggabungan metodologi regresi linear berganda dan analisis redundansi memberikan gambaran yang lebih detail mengenai pengaruh penggunaan lahan terhadap kualitas air melalui area tangkapan tersebut. Regresi Linear Berganda menentukan tingkat interaksi antara satu variabel kualitas air dan variabel-variabel penggunaan lahan. Analisis redundansi merupakan metode analisis gradien langsung yang menggambarkan variasi antara keseluruhan variabel prediktor (penggunaan lahan) dan variabel respon (kualitas air) (Zhang dkk., 2020).

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pengaruh spasial dan musiman kualitas air sungai serta hubungan spesifik antara perubahan penggunaan lahan dengan kualitas air, menggunakan metode regresi linear berganda dan analisis redundansi di area tangkapan Wangisagara, Koyod, Cisirung, dan Nanjung, yang memberikan pemahaman mengenai dinamika berbagai skala area tangkapan antara penggunaan lahan dan kualitas air.

2. METODE

Studi Area

Area tangkapan Wangisagara, Koyod, Cisirung dan Nanjung terletak di DAS Citarum Hulu. Keseluruhan area tangkapan memiliki luas 1.808,50 km² dengan topografi berbentuk cekung sekitar ± 650 m sampai ± 700 m dan dikelilingi oleh gunung dengan elevasi mencapai lebih dari ± 3.000 m di atas muka laut. Secara geologis, batuan yang tersingkap cukup bervariasi, termasuk batuan sedimen seperti batu pasir, lempung dan batu gamping serta batuan vulkanik yang berasal dari aktivitas gunung berapi di masa lampau. Kombinasi dari karakteristik geologis dan topografi wilayah ini memberikan kondisi yang unik dan kompleks, yang berpengaruh pada hidrologi dan kualitas air sungai serta anak-anak sungainya. Pola aliran sungai ini bersifat dendritik, dengan sungai-sungai kecil bermuara ke sungai utama dari sub-sub DAS utara, timur dan selatan. Aliran-aliran ini berasal dari pengunungan, membentuk jaringan yang kompleks di dataran rendah (Pulitbang, 2018).



Gambar 1. Lokasi penelitian dan titik sampel

Cakupan area tangkapan disesuaikan dengan titik pengambilan sampel air. Dasar penentuan sebagai berikut :

1. Titik 1 : Aliran sungai di Wangisagara
Titik ini merupakan bagian hulu dari aliran Sungai Citarum. Pada titik ini mengalami perubahan kualitas air sungai oleh aktivitas industri dan peternakan.
2. Titik 2 : Aliran sungai di Koyod
Titik ini merupakan bagian hulu dari aliran Sungai Citarum. Pada titik ini mengalami perubahan kualitas air sungai oleh industri tekstil yang berada di sekitar lokasi sampling.
3. Titik 3 : Aliran sungai di Cisirung
Titik sampling ini menerima limbah domestik dan limbah industri dari Kota Bandung, Kab. Bandung, Bandung Selatan dan IPAL gabungan Cisirung. Titik samping ini merupakan daerah potensial terkontaminasi.
4. Titik 4 : Aliran sungai di Nanjung
Pada titik ini terdapat banyak industri yang berada di sekitaran aliran sungai. Lokasi ini merupakan daerah potensial terkontaminasi (Pratiwi dan Noviana, 2016).

Lokasi penelitian menerima curah hujan yang cukup tinggi sepanjang tahun, terutama selama musim hujan. Hal ini menyebabkan sungai dan anak-anak sungainya memiliki debit air yang relatif tinggi, serta mengalami banjir secara periodik. Pola aliran sungai yang kompleks juga memengaruhi laju aliran air dan distribusi air di area tersebut, yang pada gilirannya dapat memengaruhi kualitas air. Tekanan penduduk dan aktivitas ekonomi yang terus meningkat telah menyebabkan perubahan penggunaan lahan. Indikasi kerusakan ini dirasakan dengan semakin menurunnya debit ekstrim minimum dan meningkatnya debit ekstrim maksimum, serta meningkatnya nilai koefisien limpasan air (Pulitbang, 2018) (Gambar 1).

Delineasi penggunaan lahan

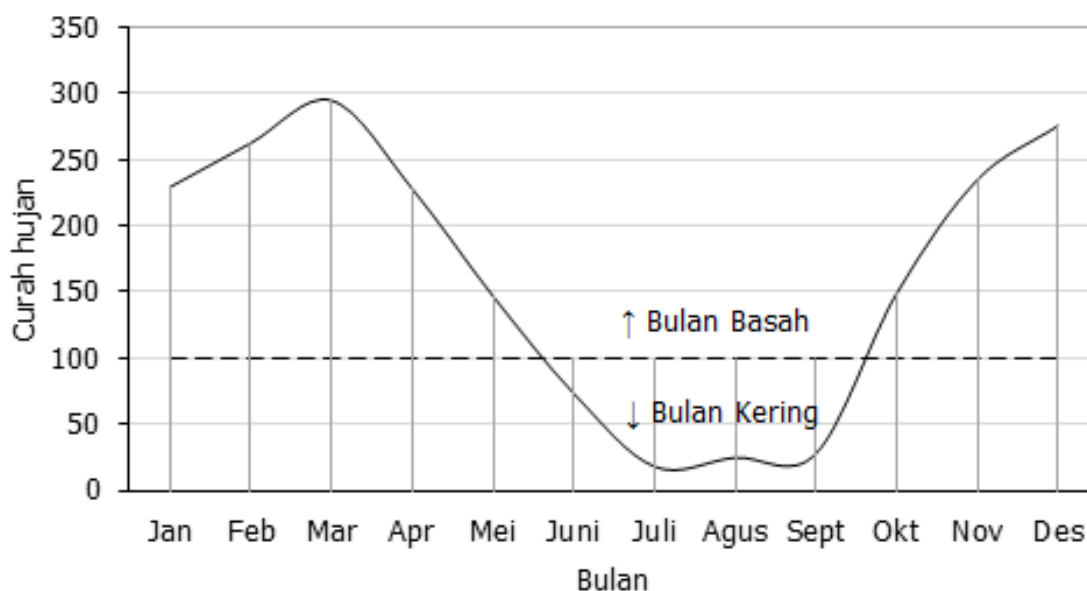
Google Earth Engine (GEE) digunakan untuk membantu memperoleh peta penggunaan lahan dengan satelit Landsat 8. Ini menerapkan algoritma dalam bahasa *JavaScript* untuk eksplorasi hasil analisis data eksperimental secara *real-time*. *Coding* ini mencakup praproses data seperti *masking* awan, *mosaic*, dan indeks vegetasi dan indeks permukaan (NDVI, NDWI, NDBI) sesuai kebutuhan. Klasifikasi terdiri atas empat jenis berdasarkan SNI 7645:2010 termasuk badan air, hutan, permukiman dan pertanian. Nilai metrik konfigurasi penggunaan lahan ED, CONTAG dan ED (Tabel 1) diperoleh dari perangkat lunak Fragstats dengan mengimpor peta penggunaan lahan sebelumnya.

Analisis Data Hujan

Klasifikasi dua tipe musim berupa bulan basah dan kering, berguna untuk mengelompokkan data kualitas air. Tahap dimulai dengan menghitung bobot rata-rata curah hujan setiap stasiun, menggunakan metode poligon thiessen. Metode poligon thiessen memberikan proporsi luas daerah pengaruh setiap stasiun hujan guna mengakomodasi variasi jarak antar stasiun. Metode ini berasumsi bahwa perubahan curah hujan antar stasiun hujan bersifat linear, dengan setiap stasiun hujan dianggap mewakili wilayah terdekatnya (Ajr dan Dwirani, 2019). Curah hujan dibagi menjadi bulan kering ($P < 10$ mm/bulan) dan bulan basah ($P > 100$ mm/bulan) (Murray-Tortarolo dkk., 2017). Hasil analisis diperoleh bulan Juni, Juli, Agustus, dan September merupakan bulan kering sedangkan bulan Januari, Februari, Maret, April, Mei, Oktober, November, dan Desember merupakan bulan basah (Gambar 2).

Tabel 1. Konfigurasi lahan (Mcgarigal, 2015)

Metrik	Singkatan	Deskripsi
<i>Edge Density/</i> Densitas tepi	ED	$\frac{E}{A} (10.000)$ E = Panjang total (dalam meter) dari semua tepi di lanskap. A = Total luas area lanskap (dalam meter persegi). Unit : meter/hektar
<i>Contagion/</i> Indeks kontagion	CONTAG	$\left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \left[\ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \right]}{2 \ln(m)} \right] 100\%$ P = Proporsi lanskap yang ditempati oleh tipe <i>patch</i> (kelas) i. g_{ik} = Jumlah keterhubungan (penyatuan) antara piksel dari tipe <i>patch</i> (kelas) i dan k berdasarkan metode hitungan ganda. m = Jumlah tipe <i>patch</i> (kelas) yang ada di lanskap, termasuk batas lanskap. Unit : %
<i>Landscape</i> <i>Shape Index/</i> Indeks bentuk lanskap	LSI	$\frac{0,25 E^*}{\sqrt{A}}$ E* = Panjang total (m) dari tepi di lanskap; termasuk seluruh batas lanskap. A = Total luas lanskap (m²). Unit : tidak ada



Gambar 2. Rata-rata hujan bulanan (Balai Kerairan, 2023)

Analisis statistik

Analisis variasi spasial dan musim dilakukan untuk memahami tren perubahan data kualitas air dari bulan basah dan kering di stasiun Wangisagara, Koyod, Cisirung, dan Nanjung. Tahapan pengujian statistik dimulai dengan uji normalitas menggunakan kolmogorov-

smirnov (Kikuda dkk., 2022). Uji korelasi pearson digunakan untuk mengevaluasi variabel yang memiliki hubungan signifikan antara penggunaan lahan terhadap kualitas air, diikuti dengan uji multikolinearitas dengan nilai VIF < 10. Regresi linear berganda digunakan untuk menguji pengaruh satu variabel kualitas air terhadap penggunaan lahan (Zhang dkk., 2020), analisis dilakukan menggunakan SPSS 23. Analisis redundansi dilakukan menggunakan R Studio dengan menginstal paket vegan untuk mengungkapkan proporsi (%) dari total varians parameter kualitas air dan penggunaan lahan (Lei dkk., 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Area tangkapan Wangisagara terbatas pada area tersebut, yang mencerminkan karakteristik penggunaan lahan di bagian hulu. Area tangkapan Koyod mencakup lahan di Wangisagara dan Koyod, sementara area tangkapan Cisirung meliputi Wangisagara, Koyod dan Cisirung. Area tangkapan Nanjung, sebagai area hilir, mencakup seluruh area tangkapan sebelumnya, memberikan gambaran menyeluruh tentang penggunaan lahan di seluruh area tangkapan. Hal ini didasarkan konsep aliran air hujan yang mengalir ke area yang lebih rendah. Rozi dan Rosadi (2022) menyatakan bahwa peningkatan luas area tangkapan air berkorelasi positif dengan volume curah hujan yang diterima serta jumlah limpasan yang harus ditampung oleh badan air. Sebaliknya, semakin kecil area tangkapan, semakin sedikit jumlah limpasan yang dihasilkan. Faktor-faktor yang memengaruhi jumlah limpasan di area tangkapan meliputi kondisi topografi, kerapatan vegetasi dan karakteristik geologi.

Penggunaan Lahan

Kondisi area telah mengalami berbagai intervensi dari aktivitas manusia, yang berdampak pada perubahan penggunaan lahan. Seluruh area tangkapan dari tahun 2014-2022 mengalami penurunan luasan air dan hutan, sementara permukiman dan pertanian mengalami peningkatan yang signifikan.

Tabel 2. Hasil penggunaan lahan

Daerah tangkapan	Badan air (km)	Hutan (km)	Permukiman (km)	Pertanian (km)	ED (m/ha)	LSI	CONTAG (%)
Wangisagara							
2014	0,20	63,94	9,92	84,96	116,526	38,306	49,042
2017	0,20	54,51	11,47	92,84	89,764	29,872	52,867
2022	0,17	41,41	14,96	102,48	97,299	32,247	52,452
Koyod							
2014	0,32	77,12	22,55	134,62	212,078	61,075	100,407
2017	0,28	65,84	24,48	144,02	186,152	52,8231	105,447
2022	0,21	51,48	31,06	151,88	189,065	54,193	107,429
Cisirung							
2014	4,89	420,46	208,56	772,85	308,751	146,070	147,300
2017	4,73	400,04	221,93	780,08	281,612	136,779	152,301
2022	4,51	348,61	254,92	798,73	303,5961	154,469	151,918
Nanjung							
2014	7,79	531,55	292,14	977,03	410,821	199,835	191,080
2017	6,77	508,01	306,07	987,67	381,707	189,555	196,946
2022	6,29	433,32	353,12	1015,78	427,452	219,145	193,934

Keempat area tangkapan menunjukkan tren penurunan lahan hutan yang diimbangi dengan peningkatan lahan permukiman dan pertanian. Hal ini mencerminkan peningkatan aktivitas manusia dan urbanisasi di area ini. Perubahan dalam konfigurasi penggunaan lahan ini

mempengaruhi nilai-nilai indeks ED, LSI, dan CONTAG. LSI berkaitan dengan ketidakaturan bentuk lanskap. CONTAG mengukur tingkat kedekatan antara jenis *patch* berbeda. ED adalah kepadatan tepi *patch* dalam suatu lanskap (McGarigal, 2015). Nilai ED (*Edge Density*), LSI (*Landscape Shape Index*), dan CONTAG (*Contagion*) cenderung mengalami fluktuasi dari tahun 2014, 2017 dan 2022.

Spasial dan Musiman Kualitas Air

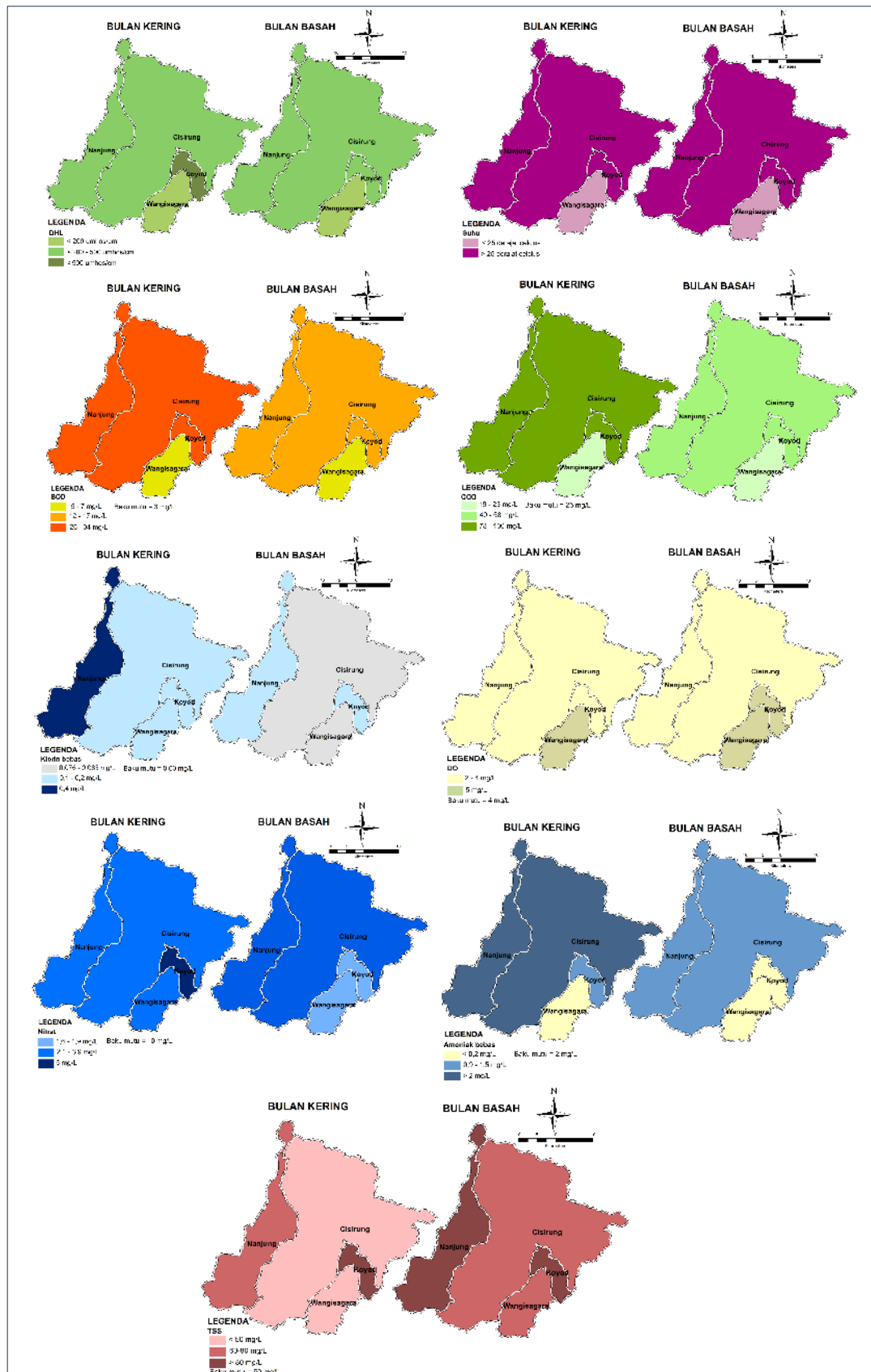
Kualitas air menunjukkan adanya pengaruh konsentrasi polutan pada perubahan spasial dan musiman (Gambar 3). Perbedaan konsentrasi parameter BOD, COD, DHL, pH, NO₃-N, dan NH₃-N cenderung lebih tinggi di bulan kering dibandingkan dengan bulan basah (Gambar 3). Mengutip dari Marselina dkk. (2022) bahwa ini dipengaruhi oleh curah hujan yang lebih tinggi, menyebabkan kualitas air permukaan lebih baik karena pengenceran polutan di air permukaan secara alami, sehingga menyebabkan konsentrasi polutan dalam air menurun dan kualitas air meningkat. Air juga membantu mengencerkan senyawa organik dalam air, dan air yang jatuh dari tempat yang lebih tinggi (misalnya, air hujan) berperan dalam proses penguraian bahan organik.

Parameter DO, TSS, dan klorin bebas memiliki konsentrasi bulan basah lebih tinggi dari bulan kering (Gambar 3). Komposisi TSS dapat terdiri dari pasir, lumpur, tanah liat, mineral terendap, dan bahan biologis. Pembentukan TSS umumnya ditentukan oleh proses fisik yang dipengaruhi oleh kondisi hidrologis. Proses yang memicu terbentuknya, TSS di sungai mencakup erosi tanah di sekitar sungai dan tepian sungai, penggerusan dasar sungai, serta penggabungan materi organik terlarut atau pengendapan padatan anorganik secara kimia dalam kolom air (Butler dan Ford, 2019).

DO bergantung jumlah oksigen gas (O₂) dalam larutan berair. Peningkatan konsentrasi DO di bulan basah menandakan kondisi sungai dalam keadaan baik. Hal ini dipengaruhi oleh difusi dari udara sekitar atau aerasi (pergerakan cepat) oleh curah hujan. Air hujan mengalami pencampuran dan turbulensi massa air (Febiyanto, 2020). Jaringan sungai menyebar secara longitudinal dan lateral sehingga mengakibatkan dampak pembilasan pada jalur aliran sebagai media transportasi material baik fisik maupun kimia ke dalam aliran sungai (Rahman dkk., 2014). Kondisi bulan kering, suhu air berdampak langsung terhadap konsentrasi DO karena peningkatan suhu mengurangi kelarutan DO. Suhu air yang tinggi mendorong dekomposisi sedimen organik oleh bakteri, yang meningkatkan respirasi bakteri sehingga menyebabkan penurunan konsentrasi DO (Luo dkk., 2024).

Konsentrasi klorin bebas menunjukkan peningkatan yang signifikan. Klorin bebas merupakan bentuk klorin yang paling umum diterapkan dalam disinfeksi, dalam proses pengolahan untuk mencegah penyebaran penyakit yang ditularkan melalui air. Peningkatan curah hujan menyebabkan aliran limbah ke perairan permukaan meningkat dan mempercepat transportasi zat-zat terlarut tersebut (Poleneni, 2020). Stasiun pengamatan Wangisagara memiliki konsentrasi lebih rendah dibanding dengan Koyod, Cisirung dan Nanjung, bahkan melewati standar baku mutu sungai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 kelas II, kemungkinan disebabkan oleh kondisi lokasi yang berada di bagian hulu sungai, dengan tingkat sumber pencemar lebih sedikit. Ramadhiani dan Suharyanto (2021) melaporkan area tangkapan Wangisagara sampai Nanjung tergolong tercemar. Ini berkorelasi dengan peningkatan jumlah penduduk dan sektor industri sebagai sumber polutan dominan. Ginkel

(2015) mengungkapkan kondisi daerah yang dikelilingi oleh kegiatan antropogenik mendorong tinggi konsentrasi parameter kualitas air.



Gambar 3. Pola spasial dan musiman kualitas air

Analisis Regresi Linear Berganda (RLB)

Hubungan antara satu parameter kualitas air dan variabel penggunaan lahan diungkapkan oleh RLB (Tabel 3). DHL dan klorin bebas berkorelasi negatif dengan hutan, sebaliknya DO berkorelasi positif. Permukiman berkorelasi positif dengan COD, BOD dan suhu. Pertanian berkorelasi positif dengan $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, dan TSS, sebaliknya DO berkorelasi negatif. Badan air berkorelasi negatif dengan suhu. Analisis juga menunjukkan CONTAG berkorelasi positif dengan BOD, sebaliknya berkorelasi negatif dengan DO. LSI berkorelasi negatif dengan COD. Sementara ED berkorelasi negatif dengan klorin bebas. Hasil RLB dipilih dari variabel kualitas air yang dominan. Meskipun demikian, dampak spasial untuk setiap variabel respon mengalami konsistensi dengan variabel bebas yang berkontribusi.

Degradasi kualitas air terkait dengan penggunaan lahan buatan manusia atau lahan antropogenik seperti lahan pertanian dan permukiman, sedangkan luasan hutan terkait dengan kualitas air yang baik (Zhang dkk., 2020). Kualitas air menunjukkan adanya pengaruh konsentrasi polutan pada perubahan spasial. Lahan pertanian menyebabkan penggunaan pupuk berlebihan dan erosi tanah mengakibatkan tingginya muatan nutrisi, sedimen, bahan organik, dan kontaminan kimia ke badan air (Ding dkk., 2016). Pertanian berkorelasi positif dengan $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, dan TSS (Tabel 3).

Lahan permukiman mengakibatkan adanya peningkatan polutan dan effluent yang menumpuk di permukaan kedap air menuju sungai melalui limpasan sehingga menurunkan kualitas air (Ding dkk., 2016). Permukiman sering kali menunjukkan tingkat aktivitas antropogenik dengan kedap air yang tinggi, sehingga menghasilkan hubungan positif antara luas permukiman dan parameter kualitas air (Zhang dkk., 2020). Sebagian besar parameter kualitas air seperti COD, BOD dan suhu berpengaruh positif terhadap permukiman (Tabel 3). Lanskap hutan memiliki dampak positif mengurangi dan mengendalikan polutan dan sedimen ke aliran permukaan sungai sehingga meningkatkan kualitas air (Zhang dkk., 2022). Beberapa parameter kualitas (DHL dan klorin bebas) berkorelasi negatif dengan hutan (Tabel 3).

Badan air memiliki kemampuan untuk mengdegradasi beberapa nutrisi melalui heterotrofik dan respirasi autotrofik, nitrifikasi dan penyerapan sedimen. Pencemaran lingkungan akibat aktivitas manusia yang intensif memungkinkan adanya hubungan positif antara badan air dan parameter kualitas air (Zhang dkk., 2020). Badan air berkorelasi negatif dengan beberapa parameter misalnya suhu, berkorelasi positif dengan klorin bebas (Tabel 3).

Konfigurasi penggunaan lahan memainkan peran kunci dalam menentukan proses ekologi (aliran energi, siklus nutrisi dan proses hidrologi) terhadap kualitas air. Hasil penelitian ini, parameter kualitas air konsisten berkorelasi negatif dengan konfigurasi penggunaan lahan (misalnya LSI, ED). Hal ini diinterpretasi bahwa semakin besar konfigurasi metrik LSI akan menurunkan konsentrasi parameter kualitas air, arah korelasi LSI memiliki kesamaan dengan penelitian (Zhang dkk., 2020).

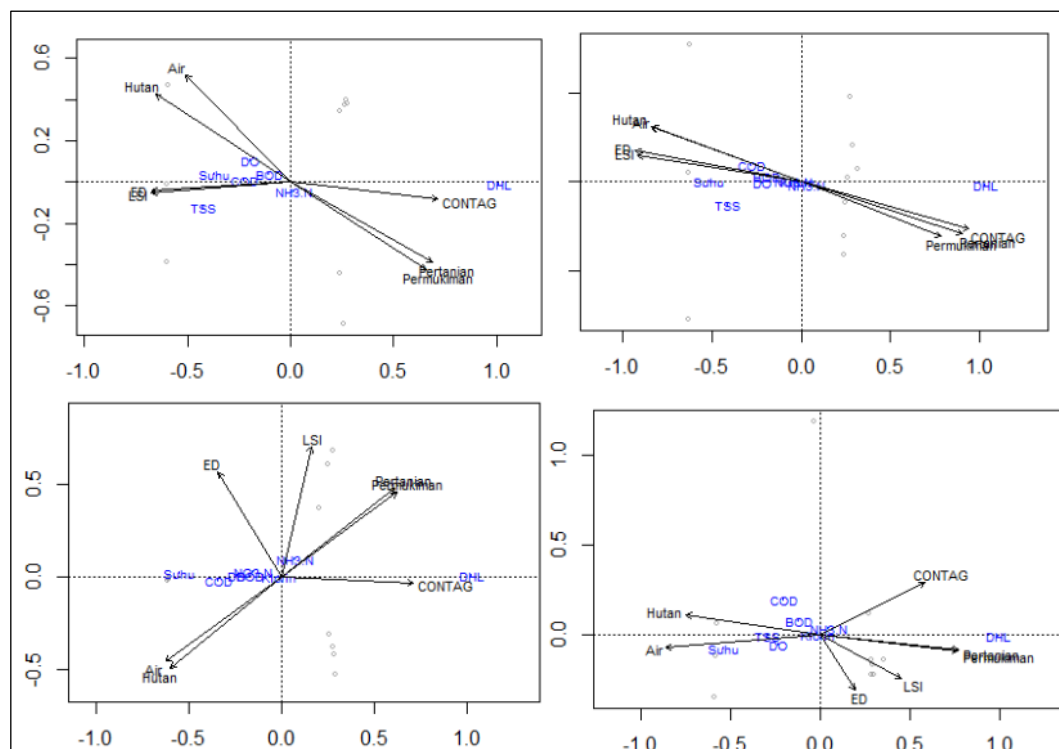
Variabel LSI menunjukkan ketidakaturan bentuk lanskap dan ED mengacu pada batas-batas antara *patch*. Kedua variabel ini diduga berdampak positif terhadap kualitas air dengan menurunkan konsentrasi polutan melalui ketidakaturan dan batas-batas *patch* yang dapat menyaring polutan ke badan air. Sementara CONTAG mengukur tingkat kedekatan antara jenis *patch* berbeda (McGarigal 2015), yang meningkatkan polutan dalam air akibat dari

tingginya fragmentasi sehingga menyebabkan akumulasi campuran dari berbagai jenis penggunaan lahan.

Tabel 3. Persamaan Regresi Linear Berganda

Area tangkapan	Parameter	Persamaan regresi	R ²	Adj R ²	P-value
Wangisagara	DHL	37,7689+22,7534 Badan air-12,8960 Hutan	0,6830	0,5925	0,0179
	Suhu	-0,3806-3,1801 Badan air+0,8273 Pertanian	0,6369	0,5332	0,0288
	NH ₃ -N	-31,2274+9,7885 Badan air+2,6357 Pertanian +0,7952 ED	0,8936	0,8404	0,0025
	BOD	-21,3670+13,4084 CONTAG	0,4674	0,4008	0,0293
	COD	7,0362-13,68616 Badan air+0,8658 Permukiman	0,6217	0,5136	0,0333
	DO	-7,5610+2,7332 Hutan	0,3312	0,2476	0,0817
	NO ₃ -N	-7,4502+9,7725 Badan air+0,5398 Pertanian	0,4926	0,3477	0,0930
	Klorin bebas	1,5246-0,3689 Hutan	0,3298	0,2460	0,0825
Koyod	DHL	17,5142+8,5450 Pertanian-20,7362 LSI	0,8512	0,8087	0,0013
	Suhu	-24,1658+2,0191 Permukiman+13,4439 CONTAG	0,8520	0,8098	0,0012
	TSS	-88,5890+11,9707 Pertanian	0,3708	0,2921	0,0612
	NH ₃ -N	-47,8837+6,2470 Pertanian	0,7083	0,6719	0,0023
	BOD	-23,8581+26,3873 Permukiman	0,8784	0,8632	0,0001
	COD	-5,76755+15,6001 Permukiman-1,7265 LSI	0,8156	0,7630	0,0027
	DO	127,5456+0,9268 Hutan-63,6336 CONTAG	0,7332	0,6570	0,0098
	NO ₃ -N	-9,7977+1,3344 Pertanian	0,5751	0,5220	0,0110
Cisirung	Klorin bebas	1,1692+0,2152 Badan air-0,0748 ED	0,5788	0,4585	0,0485
	DHL	-661,2638-66,2227 Badan air+321,6314 CONTAG	0,8343	0,7869	0,0019
	Suhu	7,1173+0,5749 Permukiman-0,1566 ED	0,5736	0,4518	0,0506
	NH ₃ -N	-227,5244+30,6679 Pertanian	0,8424	0,8227	0,0002
	BOD	-34,1509+31,7842 Permukiman	0,3278	0,2438	0,0837
	COD	-171,0134+55,5960 Pertanian-47,6916 LSI	0,4991	0,3559	0,0890
	DO	437,0062-3,72555 Pertanian-186,9059 CONTAG	0,8022	0,7457	0,0034
	NO ₃ -N	-184,8658-38,9283 Badan air-73,9692 CONTAG	0,5145	0,3758	0,0797
Cisirung	Klorin bebas	0,5720+0,2484 Permukiman-0,0485 ED	0,6143	0,5041	0,0356

Area tangkapan	Parameter	Persamaan regresi	R ²	Adj R ²	p-value
Nanjung	DHL	370,3332-503,9342 Badan air-13,3753 Hutan	0,7207	0,6408	0,0115
	Suhu	1,6092-0,3249 Badan air	0,5162	0,4557	0,0192
	TSS	-10,9290-14,3542 Badan air+3,0785 Pertanian	0,6671	0,5719	0,0213
	NH ₃ -N	32,5573-50,4139 Badan air	0,5793	0,5267	0,0106
	BOD	-711,9607+25,0941 Pertanian+231,917 CONTAG	0,6955	0,6085	0,0156
	COD	-407,8153+76,4229 Pertanian-7,4819 ED	0,6472	0,5464	0,0261
	DO	489,0479-15,96286 Pertanian-161,1592 CONTAG	0,7792	0,7161	0,0051
	NO ₃ -N	-33,6860+1,6946 ED	0,3465	0,2648	0,0734
Nanjung	Klorin bebas	-7,9197+23,9268 Badan air-1,6773 Hutan	0,7044	0,6199	0,0140



Gambar 4 Hubungan antara variabel penggunaan lahan (hitam) dan kualitas air (biru) di Wangisagara (a), Koyod (b), Cisirung (c), Nanjung (d)

Analisis Redundansi (RDA)

Hasil RDA, menggunakan variabel penggunaan lahan dari area tangkapan (Tabel 1). Sumbu pertama umumnya menjelaskan parameter kualitas air, dengan lebih 99%. Variabel bebas utama adalah badan air, yang berkontribusi dominan di area tangkapan. Hasil RDA di seluruh area tangkapan menunjukkan varian keseluruhan kualitas air yang dijelaskan oleh penggunaan lahan cenderung sama (Gambar 4). Sumbu yang paling berpengaruh berbeda.

Secara keseluruhan, varians sumbu sedikit lebih baik dijelaskan di area tangkapan Cisirung daripada di area tangkapan lain (Tabel 3).

Hasil analisis redundansi melaporkan bahwa pengaruh penggunaan lahan terhadap parameter kualitas air, memiliki pengaruh dengan area tangkapan berbeda (Tabel 4). Area tangkapan Cisirung menghasilkan varians yang sedikit lebih baik dengan proporsi (sumbu 1) yang lebih tinggi dibanding lainnya. Hal ini mungkin disebabkan oleh kemampuannya untuk merepresentasikan hubungan antara penggunaan lahan dan heterogenitas pencemar tinggi, yang juga dipengaruhi sifat fisik area dan luas area tersebut. Mengutip dari Zhang dkk., (2020) bahwa skala DAS menunjukkan varians yang lebih signifikan.

Tabel 4. Hasil proporsi analisis redundansi dari kontribusi variabel

Area tangkapan	Variasi respon			F	p-value	Variabel bebas utama
	Sumbu 1	Sumbu 2	Semua sumbu			
Wangisagara	97%	2%	99,9%	12,224	0,076	Badan air, Hutan
Koyod	97%	1%	99,97%	158,47	0,003	Pertanian, CONTAG
Cisirung	98%	0,6%	99,6%	87,912	0,006	CONTAG, Permukiman
Nanjung	95%	3%	99,8%	24,432	0,011	Badan air, Pertanian

Direkomendasikan untuk tidak menambah proporsi lahan pertanian dan permukiman. Diperlukan pemulihan sumber daya air melalui pengelolaan air limpasan, penerapan vegetasi alami, serta peningkatan kesadaran pengelolaan limbah dan sampah untuk mendukung kualitas air yang lebih baik dan perencanaan penggunaan lahan berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Kualitas air sangat dipengaruhi oleh spasial dan musiman. Regresi linear berganda melaporkan beberapa kualitas air berkorelasi positif dengan lahan antropogenik, sebaliknya berkorelasi negatif dengan vegetasi alami. Badan air berkorelasi positif dan negatif. Berdasarkan hasil Analisis Redundansi, penggunaan lahan terhadap kualitas air pada area tangkapan Cisirung varians lebih baik dibanding lainnya.

PERSANTUNAN

Ucapan terimakasih kepada Dinas Lingkungan Hidup Jawa Barat dan Balai Hidrologi dan Lingkungan Kerairan yang telah memberikan beberapa data penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajr, E. Q., & Dwirani, F. (2019). Menentukan Stasiun Hujan dan Curah Hujan dengan Metode Polygon Thiessen Daerah Kabupaten Lebak. *Jurnal* 2 (2), 139-146.
- Butler, A. B., & Ford, R.G. (2019). Evaluating Relationships Between Total Dissolved Solids (TDS) and Total Suspended Solids (TSS) in a Mining-Influenced Watershed. *Mine Water Environ*, 37 (1), 18-30.
- Ding, J., Jiang, Y., Liu, Q., Hou, Z., Liao, J., Fu, L., & Peng, Q. (2016). Influences of The Land Use Pattern on Water Quality In Low-Order Streams of The Dongjiang River Basin, China: A Multi-Scale Analysis. *Science of The Total Environment*, 551–552, 205–216.

- Fadhil, M. Y., Hidayat, Y., & Baskoro, D. P. T. (2021). Identifikasi Perubahan Penggunaan Lahan dan Karakteristik Hidrologi DAS Citarum Hulu. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 26 (2), 213-220.
- Febiyanto (2020). Effects of Temperature and Aeration the Dissolved Oxygen (DO) Values in Freshwater Using Simple Water Bath Reactor: A Brief Report. *Walisongo Journal of Chemistry*, 4(1), 25-30.
- Ginkel, K. C. H. V. (2015). Water quality in the Bandung Basin: towards a better understanding of the water quality in the Upper Citarum River Basin, Thesis. University of Twente: 1-55.
- Lei, C., Wagner, P. D., & Fohrer, N. (2021). Effects of Land Cover, Topography, and Soil on Stream Water Quality at Multiple Spatial and Seasonal Scales in a German Lowland Catchment. *Ecological Indicators*, 120.
- Luo, A., Chen, H., Gao, X., Carvalho, L., Zhang, H. (2024). The Impact of Rainfall Events on Dissolved Oxygen Concentrations in A Subtropical Urban Reservoir. *Environmental Research*, 244, 1-9.
- Kikuda, R., Gomes, R.P., Gama, A.R., Silva, J.A.D.P., Santos, A.P.D.S., Alves. K.R., Arruda, P.N., Scalize, P.S., Vieira, J.D.G.V., Carneiro, L.C., dan Pires, D.D.J. (2022). Evaluation of Water Quality of Buritis Lake. *Water*, 14 (1414), 1-23.
- Marselina, M., Wibowo, F., & Mushfiroh, A. (2022). Water quality index assessment methods for surface water: A case study of the Citarum River in Indonesia. *Heliyon*, 8(7).
- McGarigal, K. (2015). *Fragstats Help*. Amherst: University of Massachusetts.
- Murray-Tortarolo, G., Jaramillo, V. J., Maass, M., Friedlingstein, P., & Sitch, S. (2017). The Decreasing Range between Dry and Wet-Season Precipitation Over Land and Its Effect on Vegetation Primary Productivity. *PLoS ONE*, 12(12).
- Odgaard, M. V., Olesen, J. E., Graversgaard, M., Børgesen, C. D., Svenning, J. C., & Dalgaard, T. (2019). Targeted set-aside: Benefits from Reduced Nitrogen Loading in Danish Aquatic Environments. *Journal of Environmental Management*, 247, 633–643.
- Puslitbang (2018). Citarum Hulu Mewujudkan Sungai Citarum yang Sehat untuk Kesejahteraan Masyarakat.
- Poleneni, S.R. (2020). Global Disinfection by-Products Regulatory Compliance Framework Overview, Disinfection by-Products in Drinking Water: Detection and Treatment. Elsevier, 305-335.
- Rahman, M. W., Yanuar, M., Purwanto, J., & Suprihatin, D. (2014). Status Kualitas Air dan Upaya Konservasi Sumberdaya Lahan di DAS Citarum Hulu, Kabupaten Bandung. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 4, 24–34.
- Ramadhiani, A. F., & Suharyanto (2021). Analysis of River Water Quality and Pollution Control Strategies in The Upper Citarum River. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd, 623.
- Rozi, M. F., dan Rosadi, P.E. (2022). Pemodelan Daerah Tangkapan Hujan dengan Menggunakan Aplikasi Global Mapper, *Kurvatek*, 7(1), 19-24.
- Siswanto, Y.S., dan Francés, F. (2019). How Land Use/Land Cover Changes Can Affect Water. Flooding and Sedimentation in A Tropical Watershed: A Case Study Using Distributed Modeling in The Upper Citarum Watershed Indonesia. *Environmental Earth Sciences*, 78 (550), 2-15.
- Zhang, F., Chen, Y., Wang, W., Jim, C. Y., Zhang, Z., Tan, M. L., Liu, C., Chan, N. W., Wang, D., Wang, Z., & Rahman, H. A. (2022). Impact of Land-Use/Land-Cover and Landscape Pattern on Seasonal In-Stream Water Quality in Small Watersheds. *Journal of Cleaner Production*, 357.

Zhang, J., Li, S., & Jiang, C. (2020). Effects of Land Use on Water Quality in A River Basin (Daning) of The Three Gorges Reservoir Area, China: Watershed Versus Riparian Zone. *Ecological Indicators*, 113.