

Kajian *Total Suspended Solid* (TSS) Pada Waduk Gajah Mungkur Berdasarkan Analisis Citra Landsat

Nurul Astuti¹, Sigit Heru Murti², Prima Widayani²

¹Magister Penginderaan Jauh, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

²Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

*Email korespondensi: nurulastuti@mail.ugm.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v21i2.17749>

Submitted: 01st November 2023; Accepted: 29th May, 2024

ABSTRAK- *Total Suspended Solid* (TSS) Waduk Gajah Mungkur (WGM) telah didapatkan berdasarkan Analisa Citra Landsat. Secara fisika perubahan kualitas perairan terjadi karena adanya penambahan zat padat organik dan anorganik yang berakibat meningkatnya kekeruhan air sehingga cahaya matahari masuk berkurang ke badan air. Metode penginderaan jauh mampu memperkirakan dan memetakan TSS pada perairan secara tidak langsung. Citra Landsat telah banyak digunakan dalam kajian TSS selain mampu mengidentifikasi kekeruhan air Landsat juga memiliki rentang deret waktu yang panjang serta mudah dalam mengakses data. Penelitian ini mengkaji persamaan TSS berupa *Normalized Suspended Material Index* (NSMI) dan Algoritma *Syarif Budhiman* untuk memperoleh perbandingan hasil yang sesuai diterapkan pada perairan WGM menggunakan citra Landsat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persamaan *Syarif Budhiman* dinilai lebih sesuai diterapkan pada lokasi kajian berdasarkan analisis statistik menggunakan data citra Landsat dan data sampel TSS lapangan. Hasil uji akurasi untuk kedua persamaan tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, persamaan *Syarif Budhiman* menunjukkan nilai sebesar 37,87 dan persamaan NSMI sebesar 37,47. Namun pada nilai koefisien determinasi model diperoleh hasil 0,251 untuk NSMI dan 0,340 untuk *Syarif Budhiman*. Sebaran TSS pada lokasi kajian secara umum tersebar secara homogen dengan konsentrasi kecil berkisar 0-20 mg/L di sisi tengah waduk. Sementara kelas TSS > 100 mg/L tersebar di sisi pinggir waduk Sub DAS Pondok, Keduang, Kepuh Wiroko, Temon, Bengawan Solo Hulu, Alang dan Kedungguling.

KATA KUNCI: algoritma *Syarif Budhiman*; *normalized suspended material index*; waduk Gajah Mungkur.

ABSTRACT- *Total Suspended Solid* (TSS) as one of the physical parameters of water quality can also become an indicator in more comprehensive research themes. TSS is closely related to the process of erosion and sedimentation. One of the reservoirs that is experiencing serious problems with sedimentation is WGM. In terms of physical changes, alterations in water quality involve the introduction of both organic and inorganic solid particles, leading to elevated water turbidity and diminished penetration of sunlight into the water body. Remote sensing techniques can indirectly estimate and map TSS in bodies of water. Landsat imagery has been widely used in TSS studies, not only is it able to identify water turbidity, but it also has a long time series and as well as convenient data accessibility. The purpose of this research is to examine the TSS equation in the form of *Normalised Suspended Material Index* (NSMI) and the *Syarif Budhiman* Algorithm to obtain a comparison of results that are suitable for application to the waters of WGM using Landsat imagery. The results showed that the *Syarif Budhiman* Algorithm is considered more suitable to be applied to the study site based on statistical analysis using Landsat image data and field TSS sample data. The accuracy test results for the two equations did not show significant differences, the *Syarif Budhiman* equation showed a value of 37.87 and the NSMI equation of 37.47. However, the coefficient of model determination was 0.251 for NSMI and 0.340 for *Syarif Budhiman*. The distribution of TSS at the study site is generally homogeneously distributed with small concentrations ranging from 0-20 mg/L in the middle side of the reservoir. While the TSS class > 100 mg/L is scattered on the edge of the reservoir in Pondok, Keduang, Kepuh Wiroko, Temon, Bengawan Solo Hulu, Alang, and Kedungguling sub-watersheds.

KEY WORDS: *Syarif Budhiman* algorithm; *normalized suspended material index*; Gajah Mungkur reservoir.

PENDAHULUAN

Total Suspended Solid (TSS) merupakan salah satu faktor penting dalam indikator penentuan kualitas air. Seiring perkembangan zaman dan pengaruh perubahan iklim, kualitas air pada area laut, sungai, danau, waduk dan wadah-wadah alam penampung air lainnya menjadi terganggu. Menurunnya kualitas perairan dapat menyebabkan perubahan secara fisika, kimia dan biologi (Bilotta & Brazier, 2008). Faktor yang berperan dalam menyumbang dan mendistribusikan TSS pada sebuah perairan dapat dibedakan menjadi dua kategori yaitu faktor alam dan faktor kegiatan manusia. Faktor alam dapat meliputi curah hujan, angin, vegetasi, sementara pada faktor manusia dapat meliputi penggunaan pupuk, pembuangan limbah domestik, pembuangan limbah industri (Du *et al.*, 2022) dan kegiatan lainnya.

Konsentrasi TSS berperan langsung terhadap sifat optis air melalui penyerapan dan hamburan sinar matahari (Hou *et al.*, 2017). Secara fisik, perubahan dalam kualitas perairan melibatkan peningkatan zat padat organik dan anorganik di dalamnya, yang mengakibatkan peningkatan kekeruhan air serta penurunan intensitas cahaya matahari yang masuk ke dalam tubuh air. Pembatasan cahaya matahari karena kekeruhan dapat menghambat aktivitas organisme air, terutama proses fotosintesis pada fitoplankton yang berperan sebagai produsen utama. Hal tersebut berkaitan dengan jumlah cahaya yang tersedia di zona tempat produksi primer berlangsung (Chen *et al.*, 2010; Havens *et al.*, 2011). Dampak lain dari tingginya konsentrasi TSS di perairan adalah penumpukan endapan di dasar perairan, baik di bagian hulu sungai, waduk, maupun di pelabuhan (Opdyke, 2008; Priscoli, 2008).

Penggunaan teknik penginderaan jauh untuk mengevaluasi kualitas air telah banyak digunakan, di mana data citra satelit dari berbagai sensor dan interval waktu telah diterapkan secara luas. Meskipun demikian, data dari sensor pesawat udara dan sensor komersial yang memiliki resolusi spasial tinggi masih memiliki biaya yang signifikan untuk

digunakan secara luas dan reguler. Ketersediaan data dari citra Landsat 8 dan Sentinel 2 telah mengubah situasi dengan menyediakan data secara gratis dengan ketersediaan data resolusi temporal yang memadai (Mishra *et al.*, 2017). Dengan menggunakan teknik penginderaan jauh, penelitian pada area yang luas dapat dilakukan tanpa perlu melakukan survei lapangan secara menyeluruh. Dalam studi TSS yang menggunakan rumus tertentu, diperlukan beberapa contoh data lapangan untuk memverifikasi keakuratannya. Hal ini didukung oleh studi yang dilakukan oleh Balasubramanian *et al.*, (2020), yakni perlu dilakukan uji validasi menggunakan data lapangan sebelum mengadopsi algoritma TSS untuk kondisi lingkungan berbeda.

Penelitian yang dilakukan oleh Iswari (2016) membandingkan indeks tersuspensi pada Sungai Opak dan Arisanty dan Nur Saputra (2017) di Delta Sungai Barito, dengan menerapkan persamaan indeks serupa diantaranya *Normalize Difference Suspended Sediment Index* (NDSSI), *Normalized Suspended Material Index* (NSMI) dan *band ratio*. Hasilnya menunjukkan bahwa NSMI memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih baik secara konsisten. Selanjutnya pada penelitian Indeswari *et al.*, (2018) membuat perbandingan lima algoritma (Algoritma Syarif Budhiman, Algoritma Parwati, Algoritma Guzman – Santaella, Algoritma Nurahida Laili dan Algoritma Jaelani) di muara Sungai Porong Sidoarjo Provinsi Jawa Timur dengan menggunakan citra Landsat 7 dan 8. Hasil yang diperoleh yakni, algoritma Syarif Budhiman dipilih pada analisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi TSS, dengan mempertimbangkan analisis statistik.

Keberadaan TSS berhubungan erat dengan proses erosi dan sedimentasi yang terjadi di wilayah aliran sungai, termasuk di sungai, waduk, dan muara sungai. Waduk Gajah Mungkur, yang terletak di Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah, merupakan salah satu waduk yang menghadapi masalah serius terkait sedimentasi. Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat pada

tahun 2013, Waduk Gajah Mungkur mengalami penurunan kapasitas penyimpanan air akibat adanya erosi dan sedimentasi yang mengakibatkan pendangkalan di dasar waduk. Hal tersebut diperkuat oleh Sukmono (2018) di lokasi yang sama, penerapan teknologi penginderaan jauh dengan menggunakan algoritma *Syarif Budhiman* menunjukkan peningkatan nilai TSS yang cukup signifikan pada tahun-tahun pengamatan 2013, 2015, dan 2017.

Penelitian ini akan mengadopsi persamaan NSMI dengan memanfaatkan panjang gelombang cahaya tampak dan menerapkan algoritma TSS yang dikembangkan oleh *Syarif Budhiman*. Algoritma ini dikembangkan untuk menganalisis distribusi materi yang tersuspensi di perairan Delta Mahakam menggunakan teknologi penginderaan jauh, terutama dengan memanfaatkan reflektansi pada *band* merah. Sementara, Indeks sedimentasi tersuspensi bekerja dengan menggunakan beberapa *band* yang sensitif terhadap sedimen tersuspensi, termasuk *band* hijau dan merah, serta *band* lain yang kurang responsif terhadap sedimen tersuspensi. Prinsipnya adalah menggunakan gelombang

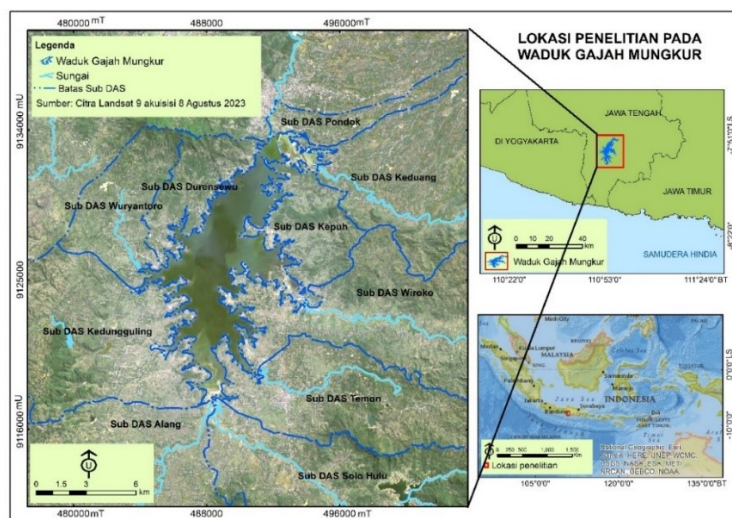
elektromagnetik dari gelombang tampak yang dipantulkan atau diserap oleh objek air sesuai sifat optis air, yang kemudian terdeteksi oleh sensor satelit.

Berdasarkan pemaparan di atas maka tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji persamaan *Total Suspended Solid (TSS)* berupa *Normalized Suspended Material Index (NSMI)* dan Algoritma *Syarif Budhiman* untuk memperoleh perbandingan hasil yang sesuai diterapkan pada perairan Waduk Gajah Mungkur.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada perairan Waduk Gajah Mungkur yang berada di Kabupaten Wonogiri Provinsi Jawa Tengah dengan luas perairan 1.202,7 km², peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Sumber pembuatan peta berasal dari peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dan citra Landsat 9 akuisisi tanggal 8 Agustus 2023. Terdapat beberapa sub DAS yang mengitari wilayah perairan waduk, diantaranya: Sub DAS Keduang, Kepuh, Wiroko, Temon, Bengawan Solo Hulu, Alang, Kedungguling, Wuryantoro, Durensewu dan Pondok.



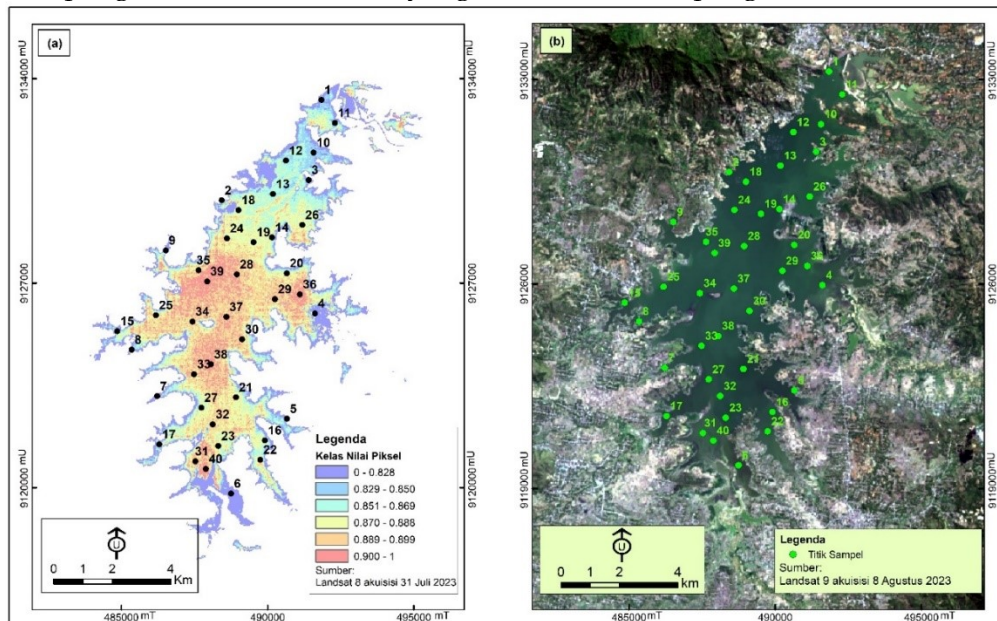
Gambar 1. Lokasi Penelitian

Teknik penelitian dalam kajian TSS ini menggunakan metode penginderaan jauh dengan memanfaatkan data citra satelit Landsat dan data uji sampel air lapangan. Data citra Landsat yang digunakan adalah citra

Landsat 8 perekaman tanggal 31 Juli 2023 dan citra Landsat 9 perekaman tanggal 8 Agustus 2023. Citra Landsat 8 digunakan sebagai pedoman dalam menentukan titik uji lapangan sementara citra Landsat 9 digunakan dalam

analisis TSS lebih lanjut ditunjukkan pada Gambar 2b. Penggunaan dua seri citra Landsat tersebut mempertimbangkan tanggal perekaman citra yang waktunya berdekatan dengan kegiatan lapangan sebelum dan saat berada di lapangan. Landsat 9 yang

digunakan merupakan data citra yang proses perekamannya bertepatan dengan pengambilan sampel air waduk. Sehingga penggunaan data citra Landsat 9 diharapkan dapat memberi hasil yang mendekati kondisi aktual di lapangan.



Gambar 2. Sebaran titik sampel penelitian, (a) sebaran titik sampel pada kelas nilai piksel, (b) sebaran titik sampel pada citra landsat 9

Pra Pemrosesan Citra Landsat

Terdapat beberapa tahap pra pemrosesan data yang bertujuan untuk menyesuaikan atau mengoreksi data citra. Pada buku Danoedoro (2012) menyebutkan bahwa kualitas citra dapat dikategorikan menjadi dua garis besar yaitu kualitas geometri dan kualitas radiometri. Dua kualitas citra ini perlu dipertimbangkan kesesuaiannya melalui koreksi. Tahap pra pemrosesan pertama ialah melakukan koreksi radiometrik dan koreksi atmosferik. Koreksi radiometrik *Top of Atmosphere* (TOA) dilakukan melalui dua tahap, tahap pertama adalah konversi nilai *digital number* (DN) menjadi nilai spektral radian kemudian tahap kedua adalah konversi nilai spektral radian menjadi nilai spektral reflektan (Kustiyo, 2014).

Identifikasi Tubuh Air dan Darat

Masking perlu dilakukan untuk memisah area tubuh air yakni perairan waduk terhadap daratan di sekitarnya. Tahap *masking* tubuh air dalam penelitian ini menggunakan indeks MNDWI dengan nilai yang dihasilkan berkisar

antara -1 sampai dengan +1, semakin tinggi nilai piksel semakin menunjukkan kenampakan tubuh air. Persamaan MNDWI dituliskan dengan Pers 1 (Xu, 2006):

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{SWIR}_1}{\text{Green} + \text{SWIR}_1} \quad (1)$$

Keterangan:

Green = *band* hijau pada citra

SWIR 1= *band* SWIR₁ pada citra

Penentuan Titik Pengamatan Lapangan

Titik sampel pengamatan ditentukan dengan menggunakan metode *stratified purposive sampling* dengan tujuan agar kelas-kelas yang telah dibagi dapat mewakili area penelitian. Setiap kelas diperhitungkan luas areanya untuk mendapatkan jumlah titik sampel yang dapat mewakili lokasi penelitian. Kelas tingkat kekeruhan berdasarkan nilai piksel dibagi menjadi enam dengan jumlah titik sampel sebanyak 40 yang dapat dilihat sebarannya pada Gambar 2a. Kelas nilai piksel tersebut merupakan hasil dari pengolahan citra pada pemisahan tubuh air dan daratan menggunakan persamaan MNDWI dimana nilai piksel semakin rendah menunjukkan

kondisi air yang bercampur dengan tanah.

Identifikasi TSS

Penelitian ini membandingkan dua persamaan untuk identifikasi TSS, diantaranya adalah sebagai berikut:

a) *Normalized Suspended Material Indeks (NSMI)*

Penelitian ini dikembangkan oleh Montalvo (2010) di perairan pantai Cabo Rojo berada di Barat Daya pulau Puerto Riko - Samudera Karibia ditunjukkan pada Pers. 2.

$$NSMI = \frac{B_{merah} + B_{hijau} - B_{biru}}{B_{merah} + B_{hijau} + B_{biru}} \quad (2)$$

Keterangan:

B_{merah} adalah *band* merah, B_{hijau} *band* hijau dan B_{biru} adalah *band* biru

Rentang nilai NSMI adalah -1 sampai dengan +1, semakin mendekati -1 menandakan air semakin jernih dan sebaliknya pada air keruh bernilai mendekati +1.

b) *Algoritma Syarif Budhiman*

Persamaan ini dikembangkan oleh Budhiman (2005) pada perairan delta Mahakam dalam satuan (mg/L) pada Pers. 3.

$$TSS = ((8.1429 * (\exp^{(23.704 * 0.94 * Red\ Band)})) \quad (3)$$

Keterangan:

Red *Band* = reflektansi *band* 4

Exp = eksponensial pangkat

Uji Statistik

Hasil pengolahan citra untuk kedua persamaan identifikasi TSS perlu dilakukan proses analisis statistik untuk membangun model dalam identifikasi TSS. Beberapa uji statistik yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya uji normalitas, uji korelasi, uji regresi dan uji akurasi model. Uji normalitas digunakan untuk mengetahui distribusi data yang selanjutnya berguna sebagai dasar penentuan dalam memilih jenis uji regresi. Data terdistribusi normal jika nilai signifikansi yang dihasilkan lebih besar dari 0,05. Uji korelasi dapat menggunakan korelasi Pearson dengan menganalisis nilai r hitung, jika nilai r hitung lebih besar dari r tabel maka disimpulkan ada hubungan antara variabel x dan y . Variabel x yang merupakan data hasil pengolahan citra dari kedua persamaan TSS yang digunakan dan data variabel y

merupakan data hasil TSS lapangan. Pembuatan model untuk identifikasi TSS menggunakan jenis regresi, dalam membuat regresi memerlukan asumsi data terdistribusi normal sehingga uji normalitas diperlukan. Persamaan regresi yang diperoleh dapat digunakan sebagai identifikasi dan pendugaan TSS pada tubuh air Waduk Gajah Mungkur.

Uji akurasi digunakan untuk mengevaluasi hasil model regresi yang telah diimplementasikan untuk menduga kandungan TSS pada tubuh air dengan menggunakan *Standard Error of Estimate* (SE) atau kesalahan baku. Dengan melakukan uji akurasi SE maka akan dapat diperoleh informasi mengenai seberapa besar penyimpangan atau kesalahan yang terjadi pada sampel, semakin kecil nilai kesalahan baku maka tingkat kepercayaan estimasi model semakin baik. Persamaan kesalahan baku dapat ditulis dengan Pers. 4. (Wirawan, 2016):

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum \frac{N}{i} (y' - y)^2}{N - 2}} \quad (4)$$

Keterangan:

y' , y , dan N berturut-turut adalah model data, data lapangan dan jumlah sampel

Uji Laboratorium Sampel Air

Uji laboratorium terhadap sampel air TSS diproses dengan berpedoman pada SNI 06-6989.3-2004 yang membahas tentang: Air dan Air Limbah-Bagian 3: cara uji TSS secara gravimetri. Prinsipnya adalah; contoh uji yang telah homogen disaring dengan kertas saring yang telah ditimbang. Residu yang tertahan pada saringan dikeringkan sampai mencapai berat konstan pada suhu 103°C sampai dengan 105°C. Kenaikan berat saringan mewakili padatan tersuspensi total (TSS).

$$TSS \left(\frac{mg}{l} \right) = (A - B) \times \frac{1000}{V} \quad (5)$$

Keterangan:

A = berat kertas saring + residu kering (mg)

B = berat kertas saring (mg)

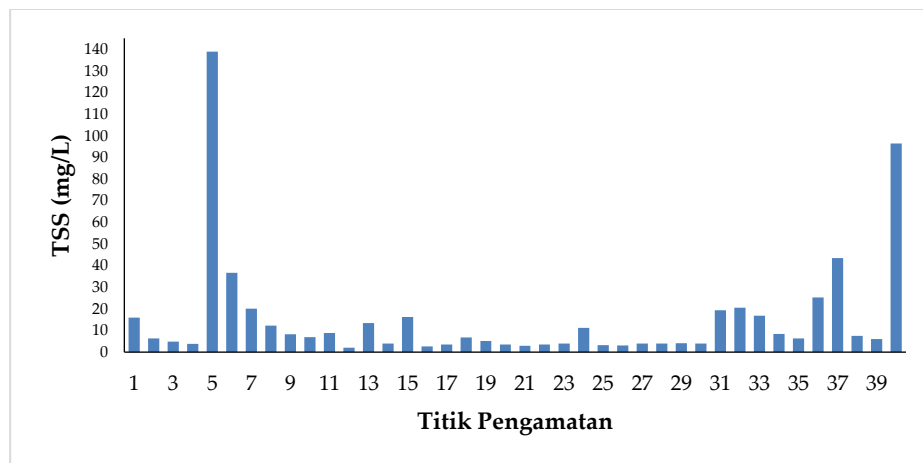
V = volume contoh uji (ml)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data sampel air lapangan dilakukan pada tanggal 8 Agustus 2023, hal ini diatur bertepatan dengan waktu perekaman

data citra Landsat 9 yang akan digunakan. Harapannya hasil TSS citra dapat merepresentasikan nilai TSS di lapangan.

Gambar 3 adalah grafik hasil uji laboratorium dengan jumlah sampel 40 titik pengamatan.



Gambar 3. Hasil TSS uji laboratorium

Berdasarkan hasil uji laboratorium pada sampel lapangan, diperoleh hasil TSS dengan dua titik pengamatan yang nilainya cenderung tinggi dari pada titik pengamatan lainnya. TSS pada nomor titik pengamatan 5 memiliki nilai paling tinggi sebesar 138,9 (mg/L) dan nilai TSS tinggi selanjutnya berada pada titik pengamatan 40 sebesar 96,4 (mg/L). Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup membagi nilai TSS terbagi menjadi empat kelas, pada titik sampel nomor 5 masuk pada kategori ke 3 sesuai baku mutu air danau dan sejenisnya. Kelas 3 menunjukkan bahwa air tersebut dapat digunakan untuk kegiatan seperti budidaya air tawar, peternakan, penyiraman tanaman dan atau keperluan yang membutuhkan mutu air serupa dengan kegunaan tersebut.

Tabel 1 menunjukkan analisa statistik pada hasil uji normalitas menggunakan *Kolmogorof-Smirnof*:

Tabel 1. Uji Normalitas

Data	Kolmogorov-Smirnov
TSS	0,025
NSMI	0,200
Syarif Budhiman	0,200

Analisis statistik dimulai dengan membagi jumlah data titik pengamatan secara acak menjadi dua bagian, sehingga diperoleh 20 sampel untuk membuat model dan 20 sampel untuk uji akurasi. Uji normalitas data

menghasilkan nilai signifikansi pada NSMI dan Syarif Budhiman bernilai lebih dari 0,05 berdasarkan uji normalitas *Kolmogorof-Smirnof*, sehingga dapat disimpulkan bahwa data terdistribusi normal. Namun pada uji normalitas untuk data TSS lapangan diperoleh nilai signifikansi tidak lebih besar dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa data tidak terdistribusi normal. Pada proses selanjutnya data TSS lapangan perlu melalui proses *bootstrapping*. *Bootstrapping* adalah metode dalam statistika yang memungkinkan pembuatan kesimpulan yang handal terhadap parameter data, bahkan saat terdapat data yang sangat tidak terdistribusi normal (Mair, 2020).

Prosedur *bootstrapping* dilakukan dengan cara *resampling* data atau melakukan replikasi data yang dimiliki secara acak dan berulang untuk dapat memberikan perkiraan distribusi sampel. Pada penelitian ini pengulangan *bootstrapping* dilakukan sebanyak 1000 kali pada data sampel uji. Uji korelasi bertujuan untuk mengetahui keeratan hubungan pada variabel yang digunakan. Tabel 2 menyajikan data hasil pengolahan uji korelasi antar variabel dependen dan independen.

Terdapat dasar keputusan dalam menentukan korelasi antar variabel yang bisa dianalisis dari Tabel 2 dengan sampel N berjumlah 20. Menurut nilai sig.(2-tailed) untuk variabel TSS lapangan terhadap variabel TSS citra hasil NSMI maupun Syarif Budhiman

memiliki nilai kurang dari 0,05. Nilai sig.(2-tailed) kurang dari 0,05 menandakan adanya korelasi antara variabel TSS lapangan terhadap

NSMI dan *Syarif Budhiman*. Selain itu pada nilai r hitung TSS citra bernilai lebih besar dari nilai r tabel yakni 0,444 pada taraf signifikansi 5%.

Tabel 2. Uji korelasi antar variabel

		TSS	NSMI	<i>Syarif Budhiman</i>
TSS	Pearson Correlation	1	0,501	0,583
	Sig. (2-tailed)		0,024	0,007
	N	20	20	20
	Bootstrap Bias	0	-.015	-.006
	Std. Error	0	0,173	0,135
	BCa 95% Confidence Lower	.	0,087	0,191
	Interval Upper	.	0,789	0,810

Berdasarkan analisa tersebut maka dapat dikatakan bahwa ada hubungan antara TSS lapangan terhadap TSS hasil citra NSMI dengan tingkat korelasi hubungan yang cukup kuat sebesar 0,501 dan ada hubungan antara TSS lapangan terhadap TSS hasil citra algoritma *Syarif Budhiman* dengan tingkat korelasi hubungan cukup kuat sebesar 0,583. *Bootstrapping* pada tabel dapat dianalisa dengan melihat nilai taraf kepercayaan (*confidence interval*) pada nilai batas bawah (*lower*) dan nilai batas atas (*upper*), jika nilai *lower* dan *upper* variabel sama-sama berada pada bilangan positif atau negatif maka data dapat dikatakan signifikan atau terdistribusi normal. Hasil

bootstrapping menunjukkan bahwa sebetulnya data TSS lapangan memiliki hubungan yang signifikan terhadap variabel lain atau data TSS terdistribusi normal, ditunjukkan dengan nilai *lower* dan *upper* yang sama-sama bernilai positif. Namun pada hasil uji normalitas sebelumnya menunjukkan data TSS tidak terdistribusi normal, hal ini dapat terjadi karena jumlah sampel uji kurang memadai.

Model regresi yang digunakan adalah model regresi linier sederhana dengan mempertimbangkan analisa statistik pada tahap sebelumnya. Hasil analisa regresi linear sederhana terangkum pada Tabel 3 .

Tabel 3. Analisa TSS lapangan dan pengolahan citra dengan regresi linear

Regresi Linear	Variabel Independen		Keterangan
	NSMI	<i>Syarif Budhiman</i>	
<i>Model Summary</i>			
R	0,501	0,583	$r_{hitung} > r_{tabel} (0,444)$
R ²	0,251	0,340	
<i>Anova</i>			
Sig.	0,024	0,007	sig. < 0,05
<i>Coefficients</i>			
Constanta	-118,120	-56,923	$t_{hitung} > t_{tabel} (2,093)$
Variabel independen	291,416	3,478	
t	2,457	3,043	

Analisa regresi dapat dengan membandingkan nilai r hitung terhadap nilai r tabel sebesar 0,444 dengan taraf signifikansi 5%, diketahui nilai r hitung pada tabel di atas lebih besar dari nilai r tabel. Selain itu dapat membandingkan nilai signifikansi *anova* lebih kecil dari 0,05 yang menandakan bahwa

variabel independen mempengaruhi variabel dependen secara signifikan. Analisa lain dapat dengan membandingkan nilai t hitung terhadap nilai t tabel sebesar 2,093 dengan taraf signifikansi 5%, dari kedua variabel independen tersebut diperoleh nilai t hitung lebih besar dari nilai t tabel yang menandakan

adanya pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model regresi yang dibuat dapat dilanjutkan kepada tahap analisa selanjutnya. Berdasarkan hasil pengolahan model regresi diperoleh persamaan untuk setiap variabel independen, persamaan yang diperoleh dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Y_{\text{NSMI}} = -118,12 + 291,416X \quad (6)$$

$$Y_{\text{Syarif Budhiman}} = -56,923 + 3,478 X \quad (7)$$

Hasil pengolahan citra menggunakan persamaan model 6 dan 7 untuk menggambarkan sebaran TSS pada wilayah kajian ditampilkan pada Gambar 4. Uji akurasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan model yang dibangun menggunakan SEE yang tertulis pada persamaan 4. Nilai SEE mengindikasikan tingkat kesalahan dalam model, semakin kecil nilai SEE maka semakin akurat estimasi yang diberikan. Hasil perhitungan akurasi SEE yang diperoleh untuk nilai NSMI berdasarkan persamaan 6 sebesar 37,47 mg/L dan untuk algoritma *Syarif Budhiman* berdasarkan persamaan 7 diperoleh sebesar 37,87 mg/L. Menurut hasil uji SEE dari kedua persamaan TSS tersebut, menunjukkan nilai SEE yang tidak berbeda secara signifikan meskipun akurasi NSMI sedikit lebih kecil yakni 37,47 mg/L. Nilai tersebut menunjukkan adanya perbedaan $\pm 37,47$ mg/L pada kondisi TSS model dan lapangan.

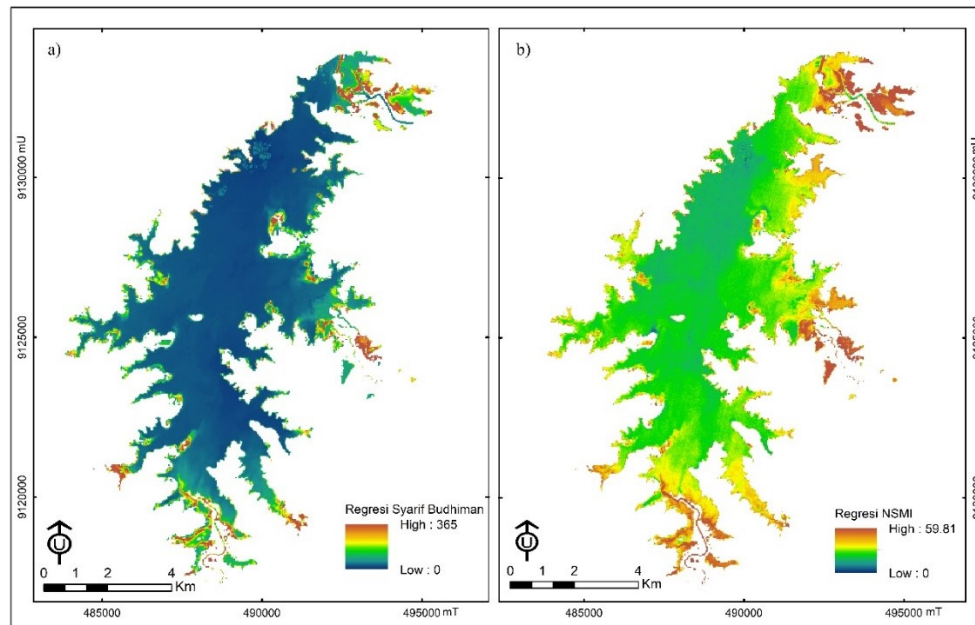
Sementara jika dianalisis pada nilai koefisien determinasi dari kedua persamaan tersebut 34% persamaan *Syarif Budhiman* mampu mempengaruhi nilai TSS lapangan dan pada persamaan NSMI hanya mampu mempengaruhi keberadaan TSS lapangan sebesar 25,1 % serta sisanya dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak masuk dalam pengamatan.

Pengamatan TSS berdasarkan Gambar 4 ditemukan perbedaan pada rentang nilai yang diperoleh. Pada hasil sebaran TSS menggunakan persamaan *Syarif Budhiman* menghasilkan rentang nilai TSS berkisar 0 (mg/L) (sebagai air jernih) hingga 365(mg/L) (sebagai air dengan kondisi TSS tinggi), sementara pada hasil sebaran TSS

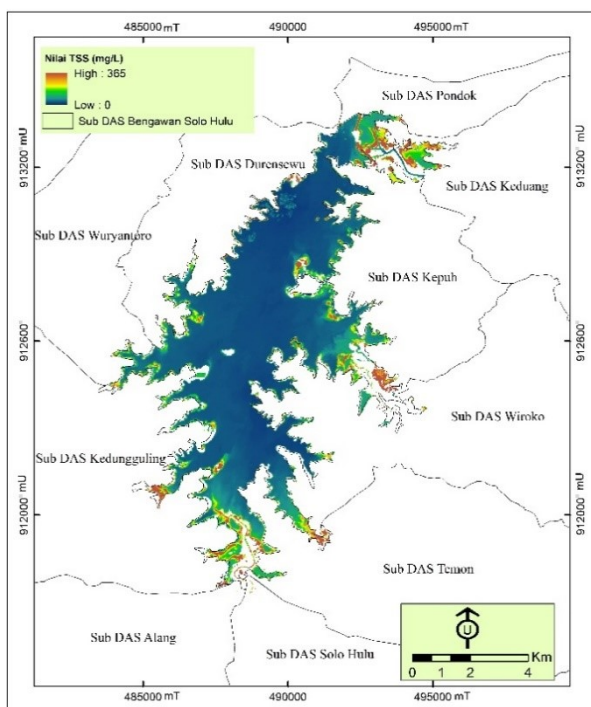
menggunakan persamaan NSMI menghasilkan rentang nilai TSS berkisar 0 (mg/L) (sebagai air jernih) sampai dengan 59 (mg/L) (sebagai air dengan kondisi TSS tinggi). Perbedaan hasil TSS dapat dikaji dengan mengamati dasar pengembangan pada setiap persamaan 2 dan 3.

Dasar pengembangan persamaan pada NSMI adalah dengan memperhatikan sifat optik air. Air dengan kondisi jernih memiliki respon memantulkan energi cahaya pada pita biru, sementara pada kondisi air dengan tingkat kekeruhan beragam akan memberikan respon peningkatan reflektansi sesuai kadar kekeruhannya terutama pada pita merah dan hijau. Sehingga persamaan yang terbentuk adalah dengan menambahkan respon spektral pada pita hijau dan merah yang kemudian dikurangi oleh banyaknya respon spektral pada pita biru, selanjutnya membaginya dengan jumlah respon spektral pada pita merah, hijau dan biru untuk menormalkannya. Sementara untuk persamaan *Syarif Budhiman* dikembangkan dengan metode *bio-optical* model pada lokasi kajian yang berada di perairan Delta Mahakam. Pengembangan persamaan ini mempertimbangkan hasil pengukuran lapangan berupa data *Specific Inherent Optical Properties* (SIOPs) pada setiap sampel air (air, *total suspended matter* (TSM), *Chlorofil* dan *chromophoric dissolved organic matter*). Data citra yang digunakan adalah citra Aster untuk mencari hubungan korelasi antar nilai TSM dengan setiap pita, sehingga persamaan yang diperoleh adalah berdasarkan pada tingkat sensitifitas pita dalam mendeteksi TSM (persamaan 3) (Budhiman, 2005). Maka dengan demikian, hasil sebaran TSS menggunakan persamaan *Syarif Budhiman* memiliki rentang yang lebih besar dari pada NSMI dapat disebabkan karena dalam membentuk persamaan menggunakan sampel lapangan dengan beberapa parameter kualitas air yang diamati. Sementara rentang nilai persamaan hasil NSMI tergolong kecil dapat disebabkan karena dasar pembentukan persamaan ini hanya memperhitungkan sifat optik air terhadap cahaya yang terekam dan

tersedia pada data citra.



Gambar 4. Sebaran TSS menggunakan model regresi linear sederhana, (a) model regresi pada persamaan *Syarif Budhiman* dan (b) model regresi pada persamaan NSMI



Gambar 5. Sebaran TSS hasil pengolahan algoritma *Syarif Budhiman* pada citra Landsat 9 akuisisi tanggal 8 Agustus 2023

Persamaan yang sesuai digunakan di lokasi kajian pada penelitian ini ditentukan dengan mempertimbangkan nilai koefisien determinasi dan hasil uji akurasi. Telah disebutkan sebelumnya bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan pada hasil uji akurasi dari kedua persamaan baik NSMI maupun *Syarif Budhiman*. Namun pada nilai

koefisien determinasi diketahui bahwa persamaan *Syarif Budhiman* mampu menjelaskan kondisi TSS lebih baik dari pada persamaan NSMI. Sehingga persamaan *Syarif Budhiman* yang dipilih untuk identifikasi TSS pada wilayah kajian, sebaran TSS dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar 5 menyajikan sebaran TSS dengan menyertakan daerah sub DAS Bengawan Solo bagian hulu. Sebaran TSS dengan nilai yang tinggi ditandai dengan warna merah tersebar di sisi pinggir waduk yang bersinggungan dengan Sub DAS Pondok, Keduang, Kepuh, Wiroko, Temon, Bengawan Solo Hulu, Alang dan Kedungguling, sementara itu pada sub DAS Wuryantoro dan Durensewu relatif tidak menunjukkan sebaran TSS tinggi.

KESIMPULAN

Kajian TSS pada Waduk Gajah Mungkur dengan membandingkan dua persamaan diantaranya persamaan NSMI dan persamaan *Syarif Budhiman* memberikan hasil bahwa persamaan *Syarif Budhiman* dinilai lebih cocok atau sesuai untuk digunakan dengan mempertimbangkan analisa statistik pada hasil uji akurasi dan koefisien determinasi yang dihasilkan. Dalam melakukan kajian TSS diperlukan data uji lapangan untuk memvalidasi keakuratan model yang

dibangun dengan titik pengamatan yang tersebar merata untuk setiap kelas dan dalam jumlah yang cukup banyak. Hasil uji statistik juga berhubungan dengan jumlah sampel yang digunakan, semakin banyak sampel yang digunakan maka hasil uji statistik dapat memberikan hasil yang optimal.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah terlibat dan memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini sejak awal hingga akhir. Terutama kepada orang tua dan Bapak Ibu dosen Fakultas Geografi Universitas Gajah Mada yang selalu memberikan masukan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arisanty, D., & Nur Saputra, A. (2017). Remote Sensing Studies of Suspended Sediment Concentration Variation in Barito Delta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 98, 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/98/1/012058>
- Budhiman, S. 2005. Pemetaan Sebaran Total Suspended Matter (TSM) Menggunakan Data Aster Dengan Pendekatan Bio-Optical Model. Diambil dari: <https://www.researchgate.net/>
- Balasubramanian, S. V., Pahlevan, N., Smith, B., Binding, C., Schalles, J., Loisel, H., Gurlin, D., Greb, S., Alikas, K., Randla, M., Bunkei, M., Moses, W., Nguyễn, H., Lehmann, M. K., O'Donnell, D., Ondrusek, M., Han, T.-H., Fichot, C. G., Moore, T., & Boss, E. (2020). Robust algorithm for estimating total suspended solids (TSS) in inland and nearshore coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111768>
- Bilotta, G. S., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42(12), 2849–2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>
- Chen, X., Lu, J., Cui, T., Jiang, W., Tian, L., Chen, L., & Zhao, W. (2010). Coupling remote sensing retrieval with numerical simulation for SPM study – Taking Bohai Sea in China as a case. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S203–S211. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.10.002>
- Dewanti, R., & Lolitasari, I. (2014). Pengembangan Metoda Koreksi Radiometrik Citra Spot 4 Multi-spektral dan Multi-temporal untuk Mosaik Citra. 9.
- Du, Y., Song, K., Wang, Q., Li, S., Wen, Z., Liu, G., Tao, H., Shang, Y., Hou, J., Lyu, L., & Zhang, B. (2022). Total suspended solids characterization and management implications for lakes in East China. *Science of The Total Environment*, 806, 151374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151374>
- Havens, K. E., Beaver, J. R., Casamatta, D. A., East, T. L., James, R. T., McCormick, P., Philips, E. J., & Rodusky, A. J. (2011). Hurricane effects on the planktonic food web of a large subtropical lake. *Journal of Plankton Research*, 33(7), 1081–1094. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbr002>
- Hou, X., Feng, L., Duan, H., Chen, X., Sun, D., & Shi, K. (2017). Fifteen-year monitoring of the turbidity dynamics in large lakes and reservoirs in the middle and lower basin of the Yangtze River, China. *Remote Sensing of Environment*, 190, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.006>
- Indeswari, L., Hariyanto, T., & Bakti Pribadi, C. (2018). Pemetaan Sebaran Total Suspended Solid (TSS) Menggunakan Citra Landsat Multitemporal dan Data In Situ (Studi Kasus: Perairan Muara Sungai Porong, Sidoarjo). *Jurnal Teknik ITS*, 7(1), 71–76. <https://doi.org/10.12962/j.23373539.v7i1.28698>
- Iswari, M. Y. (2016). *Perbandingan Indeks Sedimen Tersuspensi untuk Identifikasi Total Suspended Solids (TSS) di Muara Sungai Opak Yogyakarta*. 147.
- Mair, P. (2020). Robust statistical methods in R

- using the WRS2 package. *Behavior Research Methods*, 52, 464–488. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01246-w>
- Mishra, D. R., Ogashawara, I., & Gitelson, A. A. (Eds.). (2017). *Bio-optical modelling and remote sensing of inland waters*. Elsevier.
- Montalvo, L. G. (2010). Spectral analysis of suspended material in coastal waters: A comparison between band math equations. *Department of Geology, University of Puerto Rico, Mayaguez*.
- Opdyke, D. (2008). Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(39), 366–366. <https://doi.org/10.1029/2008EO390008>
- Priscoli, D. (2008). *Managing and Transforming Water Conflicts*. 382.
- SNI 06-6989.3-2004. 2004. *Air dan air limbah-Bagian 3: Cara uji padatan tersuspensi total (Total Suspended Solid, TSS) secara gravimetri*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sukmono, A. (2018). Pemantauan Total Suspended Solid (tss) Waduk Gajah Mungkur Periode 2013-2017 dengan Citra Satelit Landsat-8. *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 1(01). <https://doi.org/10.14710/elipsoida.2018.2812>
- Wirawan, Nata. 2016. *Cara Mudah Memahami Statistika Ekonomi dan Bisnis (Statistika Deskriptif)*. Denpasar Keraras: Emas.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely. *International Journal of Remote Sensing*, 27:14, 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>