

Model Regresi Spasial untuk Pendugaan Intrusi Air Laut Berdasarkan Relasi Pengukuran Salinitas terhadap Vegetation Soil Salinity Index

Ananda Dermawan^{1*}, Mochamad Firman Ghazali², Choirunnisa Salsabila³, Lauditta Zahra⁴, Mila Aulia⁵, Ni Made Mega M⁶

^a Teknik Geodesi dan Geomatika, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

¹ ananda.dermawan.3023@students.unila.ac.id *; ² firman.ghazali@eng.unila.ac.id; ³ choirunnisa.salsabila3024@students.unila.ac.id; ⁴ lauditta.zahra3009@students.unila.ac.id; ⁵ mila.aulia3006@students.unila.ac.id; ⁶ ni.made3003@students.unila.ac.id

*korespondensi penulis

Informasi artikel	A B S T R A K
<p><i>Sejarah artikel</i> Diterima : 14 Juli 2022 Revisi : 16 Mei 2023 Dipublikasikan : 31 Mei 2023</p> <p>Kata kunci: Intrusi air laut Salinitas Analisis regresi Sentinel-2 VSSI</p>	<p>Intrusi air laut di wilayah pesisir sering menjadi permasalahan bagi lingkungan sekitarnya sehingga perlu dilakukan upaya untuk mengidentifikasi keberadaan intrusi tersebut. Hal ini dapat dinilai menggunakan teknologi penginderaan jauh. penelitian ini dilakukan dengan menganalisis Citra Satelit Sentinel-2, data salinitas dari pengukuran lapangan, dan perhitungan statistik. Salinitas tanah akan diperkirakan menggunakan <i>vegetation soil salinity index</i> (VSSI). Penelitian ini mengintegrasikan data pengukuran salinitas lapangan dengan VSSI untuk membangun model persamaan regresi linear dan nonlinear. Ada tiga model regresi yang digunakan yaitu linear, eksponensial, dan polynomial. Analisis ketiga model tersebut menunjukkan bahwa regresi polynomial merupakan model yang paling sesuai untuk estimasi salinitas berdasarkan VSSI dengan nilai koefisien determinasi (R^2) 11,04%. Hasil estimasi salinitas berdasarkan VSSI menggunakan model polynomial memiliki korelasi yang cukup baik terhadap observasi salinitas dengan nilai koefisien determinasi (R^2) 42,49%, sedangkan validasi estimasi tersebut memiliki akurasi cukup tinggi dengan nilai RMSE 0,0013% dan MAE 0,0011%.</p>
<p>Keywords: Saltwater Intrusion Salinity Regression analysis Sentinel-2 VSSI</p>	<p>A B S T R A C T</p> <p>Seawater intrusion in coastal areas is often a problem for the surrounding environment, so efforts need to be made to identify the presence of such intrusions. This can be assessed using remote sensing technology. This research was conducted by analyzing the Sentinel-2 Satellite Imagery, salinity data from field measurements, and statistical calculations. Soil salinity will be estimated using the vegetation soil salinity index (VSSI). This study integrates field salinity measurement data with VSSI to build linear and nonlinear regression equation models. There are three regression models used: linear, exponential, and polynomial. The analysis of the three models shows that polynomial regression is the most suitable model for salinity estimation based on VSSI with a coefficient of determination (R^2) 11.04%. Salinity estimation results based on VSSI using the polynomial model have a fairly good correlation with salinity observations with a coefficient of determination (R^2) 42.49%, while the</p>

Pendahuluan

Wilayah pesisir merupakan wilayah yang memiliki banyak potensi dalam pembangunan. Kondisi tersebut terbukti dengan banyaknya kota-kota besar di dunia yang terletak di pesisir (Marfai, 2011). Beberapa kota di Indonesia juga banyak berkembang di wilayah pesisir seperti Jakarta, Surabaya, Palembang, dan Bandar Lampung. Wilayah pesisir memiliki banyak fungsi untuk penggunaan lahan, sehingga pemanfaatan sumber daya khususnya sumber daya air menjadi sangat banyak.

Berkembangnya industri dan pemukiman di wilayah pesisir akan menimbulkan ketergantungan manusia pada pemanfaatan air tanah. Pemanfaatan air tanah yang tidak memperhitungkan daya dukung lingkungan akan merusak system hidrolika seperti masuknya air laut menggantikan keberadaan air tawar pada aquifer atau intrusi air laut (Simuningkalit & Lumbantoruan, 2016). Kondisi geografis daerah pesisir yang memiliki air tanah dangkal rentan akan kenaikan salinitas karena kondisi air tawarnya tidak sebanyak dengan perariran dalam, sehingga saat penguapan menyebabkan terjadinya peningkatan konsentrasi kadar garam (Karolinoerita & Annisa, 2020). Hal ini diprediksi di kemudian hari akan menimbulkan dampak negatif terhadap kualitas dan kuantitas air tanah, serta terhadap lingkungan sekitar.

Banyak riset terdahulu yang berusaha mempelajari adanya kejadian intrusi air laut di wilayah pesisir. Penelitian oleh Wilopo et al., (2021) mengkaji potensi intrusi air laut di kawasan Pantai Parangtritis, Indonesia. Identifikasi pengaruh intrusi air laut terhadap air tanah di wilayah pesisir Pulau Selat Malaka (Putra et al., 2021). Analisis Kajian pola aliran intrusi air laut ke dalam sistem akuifer di Kota

Semarang (Wijatna et al., 2019). Analisis hubungan antara luas mangrove dengan intrusi air laut di pesisir Jakarta Utara (Hilmi et al., 2017). Identifikasi salinitas tanah pada area persawahan di Pesisir Utara Indramayu (Erfandi & Rachman, 2011). Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, tingkat intrusi air laut lebih dominan di daerah yang dekat dengan pantai. Selain itu, pengaruh penggunaan lahan seperti keberadaan mangrove, lahan tambak, dan irigasi juga menjadi faktor terjadinya intrusi.

Lahan pertanian menjadi salah satu bidang yang terkena dampak dari intrusi air laut. Aliran air dari bawah permukaan yang mengandung air laut menuju ke permukaan mengakibatkan banyak lahan pertanian di daerah pesisir yang mengalami peningkatan kadar garam atau salinasi (Sukarman, dkk., 2018). Secara global, sekitar 20% dari 300 juta ha lahan pertanian irigasi diperkirakan terpengaruh oleh salinitas (Scudiero et al., 2016). Riset berbasis pemanfaatan data penginderaan jauh banyak dilakukan untuk menjelaskan fenomena tersebut. Davis et al., (2019) mengungkapkan Citra Satelit Sentinel-2 dan Landsat 8 mampu memetakan salinitas tanah di lahan pertanian Pesisir Carolina. Al-Khakani & Yousif, (2019) menunjukkan bahwa Citra Satelit Landsat ETM+ dan OLI mampu mendeteksi perubahan lahan bervegetasi dan salinitas tanah dan ada hubungan yang kuat antara keduanya. Allbed et al., (2018) menyimpulkan bahwa ada hubungan kuat antara perubahan daerah bervegetasi dengan perubahan salinitas tanah dan menemukan hubungan negatif yang kuat antara nilai *normalized difference vegetation index* (NDVI) dan *salinity index* (SI).

Mempertimbangkan kondisi geografis dari beragam riset, Kecamatan Kalianda dimungkinkan akan mengalami hal yang sama. Oleh karenanya, penting untuk mengetahui

ada tidaknya intrusi air laut di wilayah ini. Terlebih, Kalianda merupakan salah satu kecamatan yang terletak di pesisir pantai di sepanjang Teluk Lampung. Kalianda memiliki banyak objek wisata pantai serta mayoritas penduduk mengelola pertanian seperti jagung, sawah dan padi (Puspitasari, 2020). Kondisi demikian menunjukkan bahwa penyediaan data terkait dengan kualitas air permukaan, khususnya sebaran spasial salinitas menjadi sangat penting. Penelitian ini bermaksud untuk mengetahui sebaran spasial salinitas di Kecamatan Kalianda dengan pengukuran salinitas di lapangan dan transformasi *vegetation soil salinity index* (VSSI), serta menganalisis relasi keduanya. Analisis ini akan memberikan pengetahuan tingkat relasi VSSI terhadap data salinitas di lapangan dan menjadi referensi dalam penggunaan VSSI untuk mengidentifikasi intrusi air laut.

Metode

Kajian salinitas dan relasinya dengan *vegetation soil salinity index* (VSSI) dilakukan di Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung, Indonesia. Menurut Puspitasari, (2020) daerah ini merupakan wilayah pesisir dengan luas 226,06 km², terdiri dari 29 desa dan kelurahan dihuni oleh 116.157 jiwa. Daerah daratan merupakan daerah pertanian padi palawijaya, dengan status tanah Kawasan hutan produksi dan tanah marga. Penggunaan tanah di daerah ini meliputi lahan kering peladangan, sawah tadah hujan, hutan negara, dan perkebunan rakyat.

Pada lokasi penelitian yang dilaksanakan, tidak terdapat tutupan lahan berupa hutan mangrove. Sehingga pengaruh adanya intrusi air laut sangat dimungkinkan karena ketiadaan mangrove. Menurut Hilmi et al., (2017) ekosistem mangrove memiliki kemampuan untuk mengurangi intrusi air laut karena mangrove dapat menghilangkan pengaruh salinitas, pH, pirit, dan kondisi anaerob. Selain itu, berdasarkan hasil penelitian Damayanti et

al., (2020) ditemukan bahwa ketebalan vegetasi dan ukuran pohon mangrove mempengaruhi tingkat intrusi air laut. Daerah penelitian yang tidak memiliki ekosistem mangrove terindikasi intrusi air laut sangat tinggi (nilai resistivitas : 1,4-9,2 Ω m).

Teknik Pengumpulan Data

Suvei lapangan dan citra satelit diperlukan untuk memperkirakan salinitas di lokasi kajian. Citra satelit Sentinel 2 diperoleh dengan waktu yang spesifik yang mencakup wilayah studi pada *path* 123 dan *row* 64. Citra tersebut dapat diakses secara gratis dari situs web USGS. Data satelit diperlukan untuk melakukan analisis salinitas dengan transformasi VSSI. Selain itu, peta batas administrasi wilayah studi juga diperlukan sebagai referensi batas citra satelit. Seluruh data yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 1.

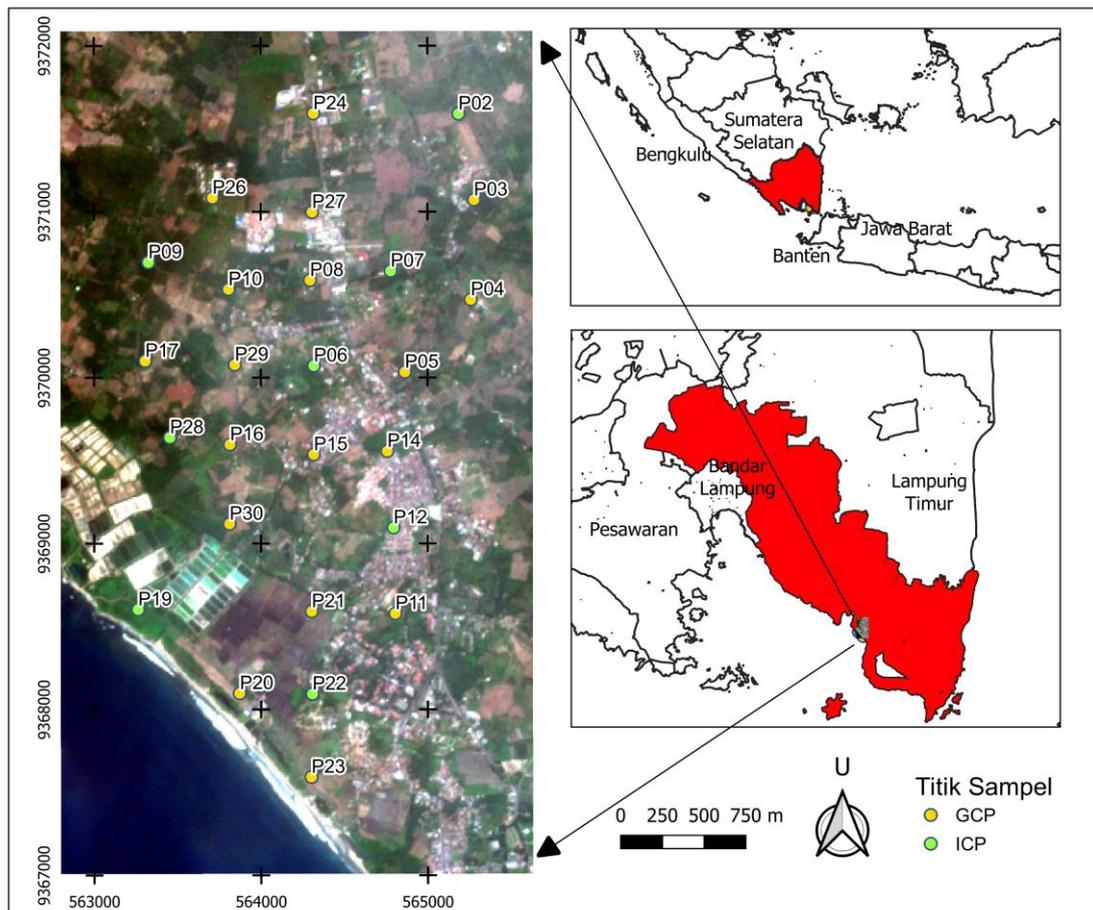
Survei lapangan dilakukan untuk mengukur salinitas di 30 titik sampel. Teknik penentuan titik sampel menggunakan *stratified sampling* dengan ketentuan jarak setiap 500 meter. Setelah dilakukan analisis *outlier*, maka 4 dari 30 sampel dikeluarkan dari data penelitian ini. Pada akhirnya, penelitian ini menggunakan 26 titik sampel yang tersebar di lokasi penelitian seperti pada Gambar 1. Pengukuran salinitas menggunakan *water quality tester* dengan satuan persen (%). Alat tersebut bekerja dengan cara memasukkan probe logam langsung ke dalam tabung berisi air yang bercampur tanah. Teknik pengambilan sampel merujuk pada (Nguyen et al., 2020), sampel tanah yang diambil pada kedalaman 10-20 cm dicampur dengan aquades dengan perbandingan 1:5. Klasifikasi tingkat salinitas tanah mengacu pada Tabel 2.

Hasil pengukuran salinitas pada 26 titik sampel akan dibagi menjadi dua yaitu *ground control point* (GCP) dan *independent control point* (ICP). Titik GCP adalah 70% dari total sampel yaitu 18 GCP dan 8 ICP.

Model regresi spasial untuk pendugaan intrusi air laut berdasarkan relasi pengukuran salinitas terhadap vegetation soil salinity index

Tabel 1. Data sekunder

No.	Nama	Akuisisi	Path/Row	Sumber
1	Citra Satelit Sentinel-2	19 April 2022	123/64	https://earthexplorer.usgs.gov/
2	Peta Batas Administrasi Kalianda	2020	-	https://www.big.go.id/
3	Peta Batas Provinsi Indonesia	2020	-	https://www.big.go.id/



Gambar 1. Peta lokasi studi

Tabel 2. Klasifikasi tingkat salinitas tanah

Kelas Salinitas	Efek pada Tanah	Salinitas (%)
Tidak asin	Garam tidak tampak	< 0,2
Sedikit asin	Garam sedikit tampak	0,2 – 0,5
Cukup asin	Garam cukup terlihat	0,5 – 1,0
Sangat asin	Garam tersebar luas	>1,0

Sumber : (Aslam et al., 2015)

Model Indeks Salinitas

Data Citra Satelit Sentinel-2 harus dikalibrasi sebelum dianalisis. Proses ini disebut preprocessing untuk kalibrasi nilai

digital number (biner) menjadi nilai reflektan, untuk koreksi TOA (*Top of Atmosphere*) serta reflektan permukaan dengan menggunakan DOS (*Dark Object Substraction*) (Sari, dkk,

2019). Keseluruhan tapan *preprocessing* pada data citra sentinel-2 dilakukan menggunakan *semi-automatic classification plugin* pada aplikasi QGIS 3.16 (Congedo, 2021).

Metode untuk melihat salinitas permukaan bumi dilakukan dengan data satelit merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Sakai et al., 2021), (Nguyen et al., 2020), dan (Asfaw et al., 2018). Berdasarkan penelitian tersebut, indeks salinitas *vegetation soil salinity index* (VSSI) memiliki relasi yang kuat untuk membuat model salinitas.

Vegetation soil salinity index (VSSI) dihitung dengan pita hijau, merah, dan inframerah dekat. Rumus ini (Persamaan 1) digunakan oleh Dehni & Lounis, (2012). Berdasarkan penelitian sebelumnya, semakin tinggi nilai VSSI menunjukkan semakin salin daerah tersebut.

$$VSSI = 2 \times Green - 5 \times (red + NIR) \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

- Green* : pita hijau (*Band 3*)
- Red* : pita merah (*Band 4*)
- NIR* : pita inframerah dekat (*Band 8*)

Analisis Regresi VSSI dan Salinitas

Analisis regresi pada umumnya digunakan untuk membuat model relasi antara dua variabel, dimana variabel satu biasanya sulit untuk diukur (misalnya, salinitas dari pengukuran lapangan), dan variabel lainnya relatif mudah diperoleh (misalnya, indeks vegetasi dari sentinel-2) (Sakai et al., 2021). Dalam kajian ini, evaluasi dilakukan untuk mengetahui apakah indeks vegetasi dari sentinel-2 dapat digunakan untuk memperkirakan salinitas di pesisir Kalianda.

Hubungan antara VSSI dengan salinitas dilihat berdasarkan tiga model regresi yaitu linear, eksponensial, dan polynomia. Titik GCP sejumlah 18 sampel digunakan sebagai data latih sedangkan sisanya 8 sampel digunakan untuk validasi. Kemudian, dilakukan analisis untuk membandingkan koefisien determinasi (R^2) dari seluruh model yang dikalibrasi untuk

menentukan model yang memiliki hubungan paling kuat. Perhitungan R^2 digunakan untuk menentukan kekuatan model estimasi yang dituangkan dalam rentang nilai antara 0 hingga 1. Uji akurasi model estimasi salinitas menggunakan perhitungan *root mean square error* (RMSE) dan *mean absolute error* (MAE) dengan rumus pada Persamaan 2 dan Persamaan 3. RMSE menunjukkan nilai standar deviasi berdasarkan perbedaan antara nilai estimasi dan nilai aktual, sedangkan MAE digunakan untuk menganalisis tingkat kedekatan nilai estimasi dan nilai aktual.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (At - Ft)^2}{n}} \dots \dots \dots (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Ai - Fi| \dots \dots \dots (3)$$

Dimana :

- At : nilai Aktual
- Ft : nilai estimasi
- Ai : nilai data aktual ke-i
- Fi : nilai data estimasi ke-i
- n : jumlah sampel

Hasil dan Pembahasan

Sebaran Intrusi Air Laut Berdasarkan Pengukuran Salinitas

Secara garis besar, hasil pengukuran lapangan terhadap salinitas di Kecamatan Kalianda menunjukkan bahwa nilai salinitas masih < 0,2% (Tabel 3). Kondisi ini menunjukkan bahwa Kecamatan Kalinda memiliki tingkat salinitas yang cukup rendah. Secara garis besar, hasil pengukuran lapangan terhadap salinitas di Kecamatan Kalianda menunjukkan bahwa nilai salinitas masih < 0,2% (Tabel 3). Kondisi ini menunjukkan bahwa Kecamatan Kalinda memiliki tingkat salinitas yang cukup rendah. Secara garis besar, hasil pengukuran lapangan terhadap salinitas di Kecamatan Kalianda menunjukkan bahwa nilai salinitas masih < 0,2% (Tabel 3). Kondisi ini menunjukkan bahwa Kecamatan Kalinda memiliki tingkat salinitas yang cukup rendah. Secara garis besar, hasil pengukuran lapangan terhadap salinitas di Kecamatan Kalianda menunjukkan bahwa nilai salinitas masih < 0,2% (Tabel 3). Kondisi ini menunjukkan bahwa Kecamatan Kalinda memiliki tingkat salinitas yang cukup rendah.

Model regresi spasial untuk pendugaan intrusi air laut berdasarkan relasi pengukuran salinitas terhadap vegetation soil salinity index

menunjukkan bahwa nilai salinitas masih < 0,2% (Tabel 3). Kondisi ini menunjukkan bahwa Kecamatan Kalianda memiliki tingkat salinitas yang cukup rendah.

Meskipun tergolong dalam kelas tidak salin, namun tanah di Kalianda tetap mengandung kadar garam walaupun dalam jumlah sedikit. Hal ini menguntungkan masyarakat Kalianda yang mayoritas berprofesi dalam bidang pertanian dan perkebunan. Tingkat salinitas akan mempengaruhi kualitas pertumbuhan

tanaman. Tanah salin dapat menghambat pergerakan air dari akar tanaman sehingga tanaman tidak dapat mengambil air yang cukup untuk proses pertumbuhan (Muliawan dkk., 2016). Kondisi salinitas yang cukup rendah tentu akan meningkatkan kualitas hasil pertanian di Kecamatan Kalianda.

Tabel 3. Pengukuran salinitas dan VSSI dari 26 titik sampel

No.	Code	Salinity (%)	VSSI	Keterangan
1	P2 ^a	0,0058	-1,3876	Tidak salin
2	P3	0,0029	-1,4770	Tidak salin
3	P4	0,0043	-1,3325	Tidak salin
4	P5	0,0025	-1,4007	Tidak salin
5	P6 ^a	0,0035	-1,4064	Tidak salin
6	P7 ^a	0,0046	-1,5063	Tidak salin
7	P8	0,0048	-1,5108	Tidak salin
8	P9 ^a	0,0061	-1,3420	Tidak salin
9	P10	0,0036	-1,5150	Tidak salin
10	P11	0,0047	-1,2702	Tidak salin
11	P12 ^a	0,0044	-1,3391	Tidak salin
12	P14	0,0042	-1,2926	Tidak salin
13	P15	0,0045	-1,2555	Tidak salin
14	P16	0,0027	-1,3552	Tidak salin
15	P17	0,0025	-1,6039	Tidak salin
16	P19 ^a	0,0052	-1,4803	Tidak salin
17	P20	0,0060	-1,2681	Tidak salin
18	P21	0,0054	-0,9936	Tidak salin
19	P22 ^a	0,0025	-1,5969	Tidak salin
20	P23	0,0063	-1,2646	Tidak salin
21	P24	0,0038	-1,2141	Tidak salin
22	P26	0,0042	-1,3315	Tidak salin
23	P27	0,0049	-1,3595	Tidak salin
24	P28 ^a	0,0063	-1,4806	Tidak salin
25	P29	0,0068	-1,3836	Tidak salin
26	P30	0,0065	-1,4968	Tidak salin

^atitik ICP yang digunakan untuk validasi

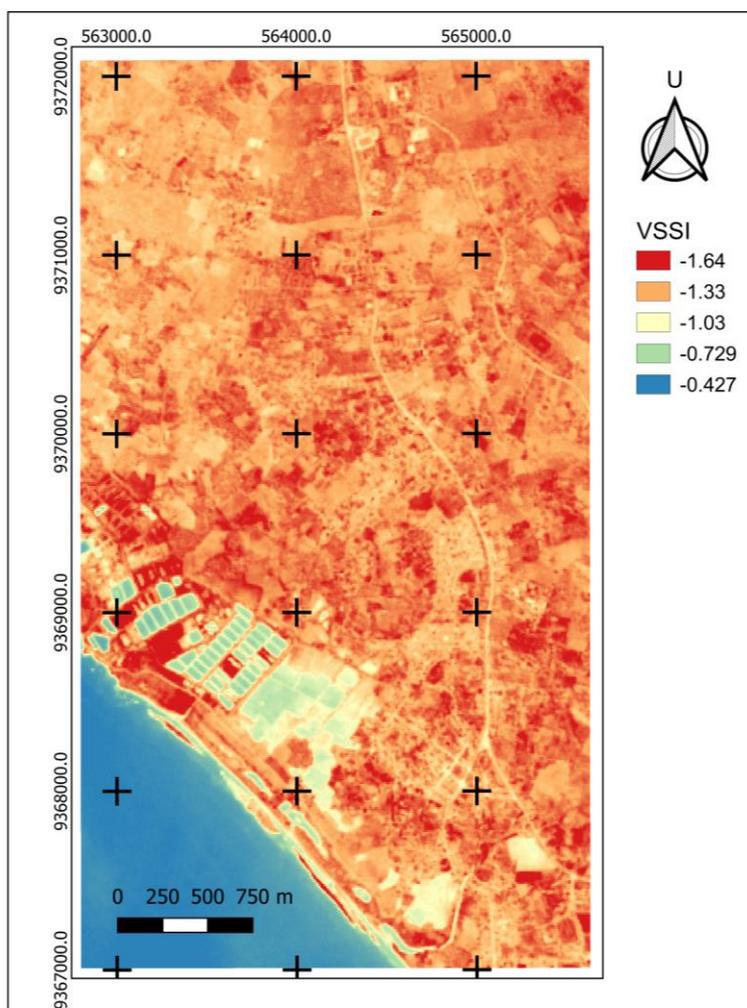
Identifikasi Salinitas Berdasarkan VSSI

Indeks penginderaan jauh telah banyak dimanfaatkan sebagai alat penelitian, serta memiliki fasilitas seperti sensor operasional dan

algoritma (Zhang et al., 2017). Dalam studi ini, Sentinel-2 dimanfaatkan untuk memperkirakan salinitas dengan transformasi *vegetation soil salinity index* (VSSI).

Penggunaan VSSI untuk mengidentifikasi salinitas tanah telah dilakukan oleh beberapa peneliti dan menunjukkan hubungan yang cukup kuat terhadap data pengukuran lapangan. Semakin tinggi nilai VSSI maka semakin tinggi pula tingkat salinitasnya. Hal ini ditandai dengan perbedaan warna pada peta klasifikasi VSSI (Gambar 2). Tingkat salinitas tertinggi ditandai dengan warna biru, sedangkan merah gelap menunjukkan tingkat salinitas paling rendah.

Berdasarkan peta tersebut, area tambak, lahan sawah, dan beberapa lahan pertanian yang dekat dengan laut memiliki nilai salinitas yang lebih tinggi. Kondisi tersebut bisa terjadi karena penyusupan air laut melalui aliran irigasi, sungai, dan luapan dari lahan tambak (Darmanto & Cahyadi, 2013). Nilai VSSI berdasarkan titik sampel dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 2. Peta Klasifikasi VSSI

Relasi antara salinitas dan VSSI

Model regresi yang dikembangkan untuk melihat relasi antara salinitas dan VSSI ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil statistiknya dirangkum untuk menunjukkan seberapa baik VSSI dapat memprediksi salinitas berdasarkan

ketiga model regresi yaitu linear, eksponensial, dan polynomial. Nilai R^2 tertinggi menandakan hubungan yang paling kuat. Hasil ketiga model regresi ini menunjukkan hubungan positif yang lemah antara salinitas dengan VSSI. Regresi polynomial dinilai paling mampu untuk memprediksi salinitas dengan nilai $R^2 = 0.1104$.

Model regresi spasial untuk pendugaan intrusi air laut berdasarkan relasi pengukuran salinitas terhadap vegetation soil salinity index

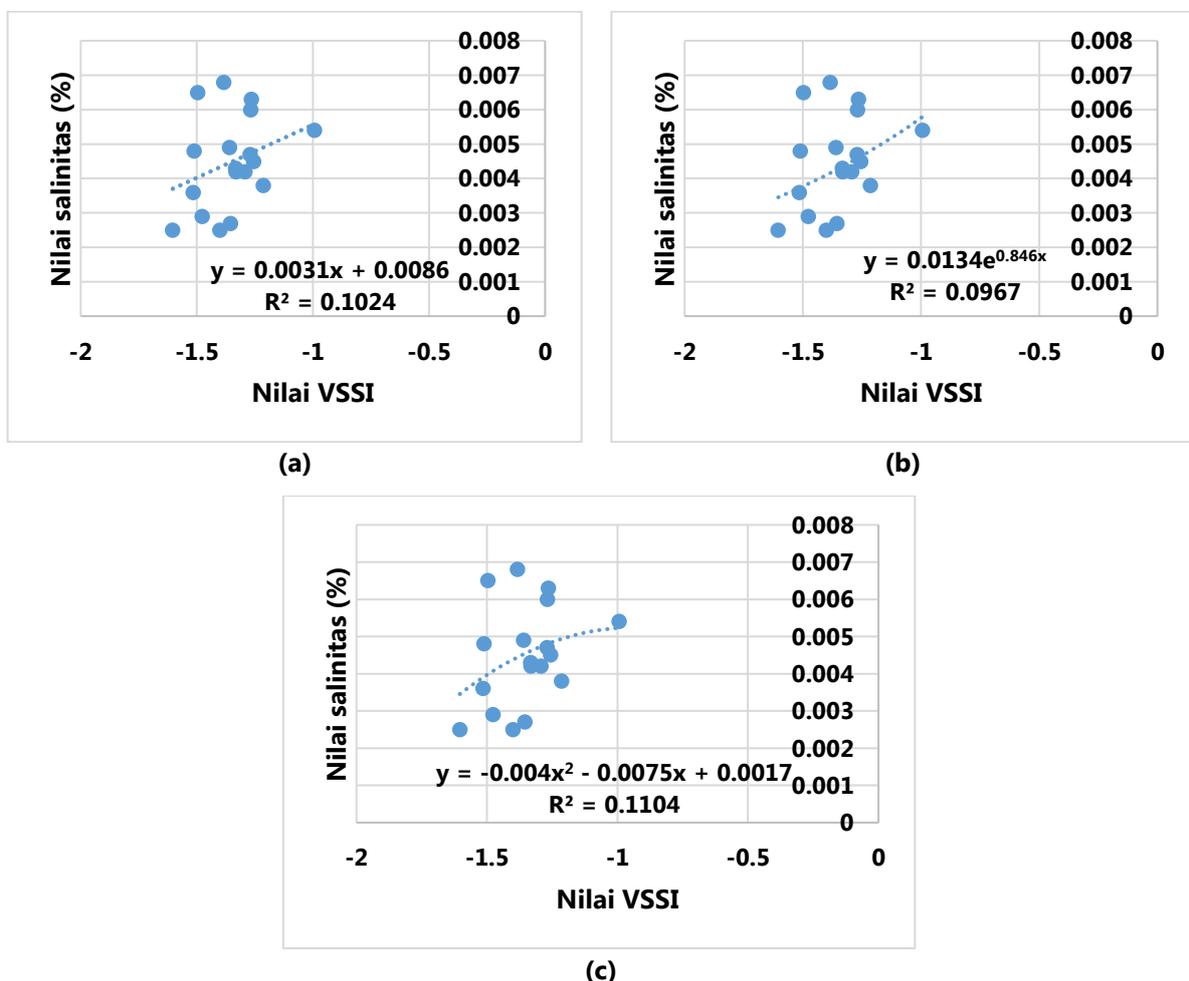
Nilai tersebut tergolong dalam kategori lemah, dimana hanya 11.04% varians dalam data salinitas di lapangan dapat dijelaskan oleh model ini. Hasil analisis tiga model regresi ditunjukkan pada Tabel 4 .

Hasil ini sejalan dengan penelitian Kilic et al., (2022) dan Asfaw et al., (2018), keduanya menunjukkan bahwa *vegetation soil salinity index* memiliki hubungan yang lemah terhadap pengukuran salinitas di lapangan. Berbeda dengan Nguyen et al., (2020) dan Asfaw et al., (2018), hasil penelitian menunjukkan bahwa VSSI berhasil mengestimasi salinitas tanah

dengan koefisien determinasi (R^2) yang cukup tinggi.

Tabel 4. Informasi model regresi antara salinitas dan VSSI

Jenis Model	Persamaan Regresi	R^2
Regresi linier	$y = 0,0031x + 0,0086$	0,1024
Regresi eksponensial	$y = 0,0134e^{0,846x}$	0,0967
Regresi polynomial	$y = -0,004x^2 - 0,0075x + 0,0017$	0,1104



Gambar 3. Pemodelan salinitas menggunakan tiga metode regresi. (a) regresi linear, (b) regresi eksponensial, dan (c) regresi polynomial

Estimasi Salinitas Berdasarkan VSSI

Setelah menggunakan tiga metode regresi (linier, eksponensial, dan polynomial), ditemukan bahwa koefisien determinasi (R^2)

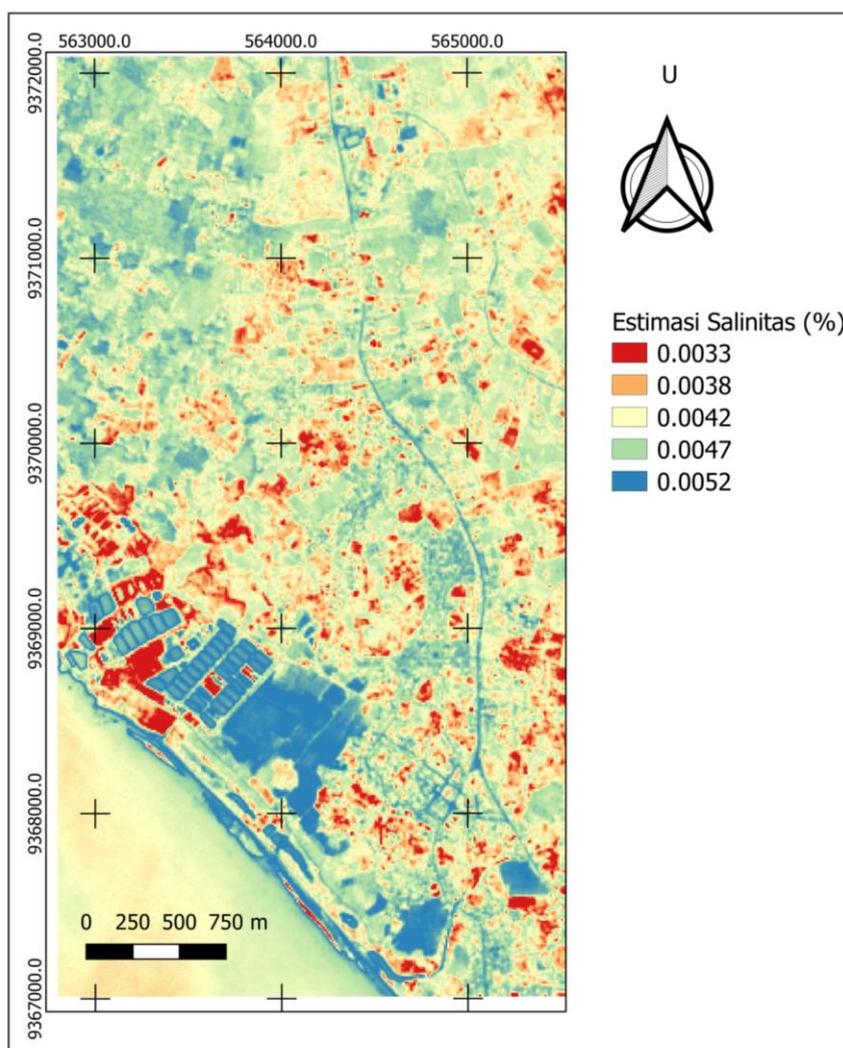
polynomial antara salinitas hasil obsevasi dan salinitas hasil transformasi VSSI menunjukkan hubungan positif yang lemah 0,1104. Hasil

estimasi salinitas menggunakan model polynomial ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Berdasarkan peta tersebut, area lahan yang berjarak dekat dengan laut cenderung memiliki tingkat salinitas lebih tinggi. Kondisi ini didominasi oleh pasir pantai, lahan tambak dan sawah irigasi yang dekat dengan laut. Area ini ditunjukkan dengan warna biru yang dominan seperti pasir pantai, lahan tambak, dan sawah. Nilai estimasi salinitas pada lahan tersebut mencapai 0,0052%. Jarak yang dekat dengan laut menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi kondisi tersebut. Selain itu, kepentingan lahan tambak terhadap air asin juga berpotensi untuk mempengaruhi

tingkat salinitas di lingkungan sekitarnya. Sedangkan, Lahan sawah yang terindikasi salin merupakan dampak dari saluran irigasi yang mengalami penyusupan air laut. Walaupun demikian, peta estimasi salinitas berdasarkan VSSI masih tergolong dalam kelas tidak salin dengan nilai $< 0,2\%$ (**Tabel 2**).

Hasil peta estimasi salinitas juga menunjukkan ada bagian objek lain yang terdeksi memiliki salinitas tinggi seperti jalan raya. Karakteristik jalan beraspal tidak memungkinkan untuk mengambil sampel pada objek ini, sehingga penelitian ini memiliki keterbatasan untuk memvalidasi nilai salinitas pada objek tersebut.

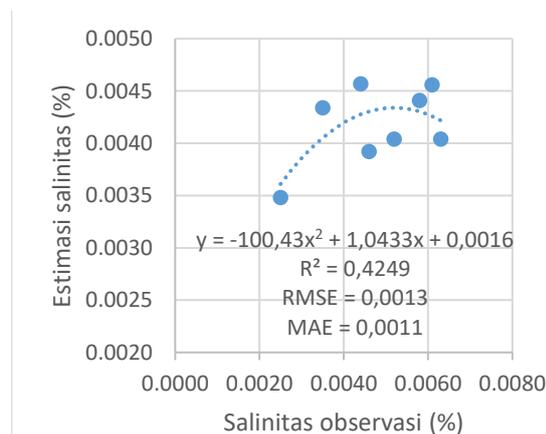


Gambar 4. Peta estimasi salinitas berdasarkan VSSI menggunakan model regresi polynomial

Uji Akurasi Model Estimasi Salinitas

Model regresi spasial untuk pendugaan intrusi air laut berdasarkan relasi pengukuran salinitas terhadap vegetation soil salinity index

Validasi model estimasi salinitas berdasarkan VSSI menggunakan uji akurasi Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Error (MAE). Grafik pada Gambar 5 menunjukkan bahwa terdapat relasi yang positif antara estimasi salinitas dan observasi salinitas dengan nilai $R^2 = 0,4249$. Akurasi dari estimasi salinitas memiliki nilai RMSE dan MAE masing-masing 0,0013% dan 0,0011%. Berdasarkan hasil uji akurasi tersebut dapat diketahui bahwa untuk estimasi salinitas menggunakan VSSI dengan model regresi polynomial memiliki akurasi dengan data salinitas lapangan yang cukup baik.



Gambar 5. Hasil uji akurasi estimasi salinitas

Simpulan

Salinitas tanah berhasil diestimasi berdasarkan VSSI dengan hubungan yang cukup ($R^2 = 0,4249$ dan hasil akurasi cukup tinggi (RMSE dan MAE masing-masing 0,0013% dan 0,0011%). Dalam penelitian ini, model regresi polynomial merupakan model yang paling sesuai untuk mengestimasi nilai VSSI. Pengukuran salinitas di lapangan berguna untuk memvalidasi hasil estimasi salinitas berdasarkan VSSI. Hasil penelitian menunjukkan pentingnya pemilihan model estimasi salinitas, alternatif indeks

penginderaan jauh lainnya, serta mempertimbangkan teknik pengambilan sampel untuk menentukan salinitas tanah menggunakan penginderaan jauh. Peta estimasi salinitas menunjukkan bahwa Pesisir Kalianda belum terindikasi intrusi air laut dengan nilai salinitas $<0,2\%$.

Studi lebih lanjut perlu dilakukan untuk menghasilkan hasil estimasi yang lebih baik dengan memperbaiki metode pengukuran salinitas di lapangan (mempertimbangkan cuaca, kedalaman tanah, teknik *sampling*, dan perbandingan campuran tanah dengan aquades), penggunaan indeks salinitas lainnya juga perlu diperhitungkan. Selain itu, citra satelit sentinel-2 memiliki resolusi spectral dan spasial yang terbatas, sehingga data penginderaan jauh dengan resolusi lebih tinggi perlu menjadi pertimbangan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Tentunya, perlu dilakukan penelitian secara berkala terkait dengan intrusi air laut di Pesisir Kalianda karena tingkat intrusi sangat bergantung pada perubahan musim di wilayah tersebut.

Ucapan terima kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberi arahan terkait penelitian hingga penyusunan artikel. Terima kasih pula kepada rekan-rekan mahasiswa yang ikut serta dalam pengumpulan data-data yang diperlukan dalam artikel ini.

Referensi

Al-Khakani, E. T., & Yousif, S. R. (2019). An assessment of soil salinity and vegetation cover changes for a part of An-Najaf governorate using remote sensing data. *Journal of Physics: Conference Series*, 1234(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1234/1/012023>

- Allbed, A., Kumar, L., & Sinha, P. (2018). Soil salinity and vegetation cover change detection from multi-temporal remotely sensed imagery in Al Hassa Oasis in Saudi Arabia. In *Geocarto International*, 33(8), 830-846. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1303090>
- Asfaw, E., Suryabhadgavan, K. V., & Argaw, M. (2018). Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(3), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.05.003>
- Aslam, K., Rashid, S., Saleem, R., & Aslam, R. M. S. (2015). Use of Geospatial Technology for Assessment of Waterlogging & Salinity Conditions in the Nara Canal Command Area in Sindh, Pakistan. *Journal of Geographic Information System*, 7, 438–447.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing image in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Damayanti, C., Amukti, R., & Suyadi, S. (2020). Potensi Vegetasi Hutan Mangrove untuk Mitigasi Intrusi Air Laut di Pulau Kecil. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 5(2), 75. <https://doi.org/10.14203/oldi.2020.v5i2.313>
- Darmanto, D., & Cahyadi, A. (2013). Kajian Intrusi Air Laut melalui Sungai di Pesisir Kabupaten Demak Jawa Tengah. *Majalah Geografi Indonesia*, 27(1), 1–10.
- Davis, E., Wang, C., & Dow, K. (2019). Comparing Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI in soil salinity detection: a case study of agricultural lands in coastal North Carolina. *International Journal of Remote Sensing*, 40(16), 6134–6153. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1587205>
- Dehni, A., & Lounis, M. (2012). Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the oran region of algeria. *Procedia Engineering*, 33, 188–198.
- Erfandi, D., & Rachman, A. (2011). Identification of Soil Salinity Due to Seawater Intrusion on Rice Field in the Northern Coast of Indramayu, West Java. *Jurnal TANAH TROPIKA (Journal of Tropical Soils)*, 16(2), 115–121. <https://doi.org/10.5400/jts.2011.16.2.115>
- Hilmi, E., Kusmana, C., Suhendang, E., & Iskandar. (2017). Correlation Analysis Between Seawater Intrusion and Mangrove Greenbelt. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 4(2), 151–168. <https://doi.org/10.20886/ijfr.2017.4.2.151-168>
- Karolinoerita, V., & Annisa, W. (2020). Salinisasi Lahan dan Permasalahannya di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 14(2), 91. <https://doi.org/10.21082/jsdl.v14n2.2020.91-99>
- Kilic, O. M., Budak, M., Gunal, E., Acir, N., Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Alfarraj, S., & Ansari, M. J. (2022). Soil salinity assessment of a natural pasture using remote sensing techniques in central Anatolia, Turkey. *PLoS ONE*, 17(4), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266915>

- Marfai, M. A. (2011). The hazards of coastal erosion in Central Java, Indonesia: An overview. *Geografia*, 3(3), 1–9.
- Muliawan, N., Sampurno, J., & Jumarang, M. I. (2016). Identifikasi Nilai Salinitas Pada Lahan Pertanian di Daerah Jungkat Berdasarkan Metode Daya Hantar Listrik (DHL). *Prisma Fisika*, IV(02), 69–72.
- Nguyen, K. A., Liou, Y. A., Tran, H. P., Hoang, P. P., & Nguyen, T. H. (2020). Soil salinity assessment by using near-infrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat 8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0311-0>
- Puspitasari, I. (2020). *Kecamatan Kalianda dalam Angka 2020*. Lampung Selatan: BPS Kabupaten Lampung Selatan.
- Putra, D. B. E., Hadian, M. S. D., Alam, B. Y. C. S. S. S., Yuskar, Y., Yaacob, W. Z. W., Datta, B., & Harnum, W. P. D. (2021). Geochemistry of groundwater and saltwater intrusion in a coastal region of an island in Malacca Strait, Indonesia. *Environmental Engineering Research*, 26(2), 0–2. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.006>
- Sakai, T., Omori, K., Oo, A. N., & Zaw, Y. N. (2021). Monitoring saline intrusion in the Ayeyarwady Delta, Myanmar, using data from the Sentinel-2 satellite mission. *Paddy and Water Environment*, 19(2), 283–294. <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00837-0>
- Sari, C. A., Syah, A. F., Prayuda, B., & Salatalohi, A. (2019). Pemetaan Habitat Bentik di Pulau Liki, Papua, Menggunakan Citra Satelit Sentinel-2A. *Seminar Nasional Penginderaan Jauh Ke-6*, 17(1), 335–344.
- Scudiero, E., Corwin, D. L., Anderson, R. G., & Skaggs, T. H. (2016). Moving forward on remote sensing of soil salinity at regional scale. *Frontiers in Environmental Science*, 4(65), 1–5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00065>
- Simuningkalit, N. M., & Lumbantoruan, W. (2016). Analisis Persebaran Intrusi Air Laut Pada Airtanah Freatik di Desa Rugemuk Kecamatan Pantai Labu Kabupaten Deli Serdang. *Jurnal Geografi*, 8(2), 146–155.
- Sukarman, Mulyani, A., & Purwanto, S. (2018). Modifikasi Metode Evaluasi kesesuaian lahan berorientasi perubahan iklim. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(1), 1–11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21082/jsdl.v12n1.2018.1-11>
- Wijatna, A. B., Kayyis, M., Satrio, & Pujiindiyati, E. R. (2019). Study of seawater intrusion in deep aquifers of semarang coast using natural isotopes and hydrochemicals. *Indonesian Journal on Geoscience*, 6(1), 17–28. <https://doi.org/10.17014/ijog.6.1.17-28>
- Wilopo, W., Risanti, Susatio, R., & Putra, D. P. E. (2021). Seawater Intrusion Assessment and Prediction of Sea-freshwater Interface in Parangtritis Coastal Aquifer, South of Yogyakarta Special Province, Indonesia. *J. Degrade. Min. Land Manage*, 8(3), 2709–2718. <https://doi.org/10.15243/jdmlm>
- Zhang, Y., Giardino, C., & Li, L. (2017). water optics and water colour remote sensing. *Remote Sensing*, 9(8), 818. <https://doi.org/8>. <https://doi.org/10.3390/rs908081>