

Perbandingan Akurasi Metode Empiris untuk Pemetaan Batimetri Perairan Benoa, Bali, Menggunakan Citra Satelit SPOT

Syifa'ul Qolbiyatun Nisa^a, I Wayan Gede Astawa Karang^{a*}, I Dewa Nyoman Nurweda Putra^a, Kuncoro Teguh Setiawan^b, Kholifatul Aziz^c

^aProgram Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

^bPusat Riset Penginderaan Jauh, BRIN

^cPusat Data dan Informasi, BRIN

*Corresponding author, email: gedekarang@unud.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 Juli 2022

Received in revised form: 13 Agustus 2022

Accepted: 30 Oktober 2022

Available online: 28 Februari 2023

Keywords:

Accuracy; Bathymetry; Lyzenga;

MLR; Polynomial; RMSE;

Stumpf; VHS

ABSTRACT

Satellite Derived Bathymetry (SDB) is an alternative method to obtain bathymetry information data developed by utilizing image data as data sources. This study aimed to compare the accuracy of five empiric methods: the Stumpf Method, Polynomial Method, Multilinear Regression Method (MLR), Lyzenga Method, and Van Hengel and Spitzer Methods (VHS). This research was located in Benoa, Denpasar, and Bali using SPOT 6 satellite imagery with a spatial resolution of 6 meters as the data source. The acquisition was on August 12, 2017, in situ data. The accuracy test was carried out by calculating the coefficient of determination (R^2) and the RMSE value. The SPOT 6 image requires an image interpretation process, including radiometric correction and atmospheric correction using DOS and land and water masking using the NDWI equation to obtain accuracy test and bathymetric information. Stumpf method has an RMSE of 5.72 meters, R^2 of 0.27. The polynomial method has an RMSE of 6.99 meters R^2 of 0.01. The Multilinear Regression method has an RMSE of 5.75 meters R^2 of 0.34. The Lyzenga method has an RMSE of 7.66 meters R^2 of 0.09. The Van Hengel and Spitzer method has an RMSE of 6.97 meters R^2 of 0.03. Based on the results of calculations from this study, the Stumpf method has the highest accuracy with an RMSE of 5.72.

2023 JMRT. All rights reserved.

1. Pendahuluan

Peta batimetri merupakan data spasial yang berisi informasi kedalaman (informasi batimetri) suatu wilayah perairan. Pemetaan batimetri menjadi hal yang dibutuhkan untuk mengelola kawasan tepi perairan karena batimetri perairan dangkal merupakan bagian penting dalam studi morfologi, penelitian lingkungan, dan pengelolaan sumber daya pantai (Setiawan *et al.* 2014; Harianto dan Takwir. 2019). Kebutuhan informasi estimasi batimetri diperlukan oleh aktifitas yang berada di wilayah dekat dengan pantai seperti: kegiatan pembangunan, aktifitas pelabuhan, pemancingan/pencarian ikan, pengerukkan, tambang minyak, dan juga akuakultur serta pada laut dalam sebagai kebutuhan untuk survei pendahuluan untuk menentukan landas kontinen (Pushparaj dan Hegde, 2017; Khafid, 2007).

Salah satu metode untuk memperoleh informasi batimetri yakni memanfaatkan informasi dari citra satelit yang disebut dengan *Satellite Derived Bathymetry* (SDB). Teknologi penginderaan jauh dalam melakukan perolehan informasi titik kedalaman pada

perairan dangkal dengan memanfaatkan panjang gelombang yang memiliki respon spektral yang baik terhadap perairan serta dapat menembus kedalaman tertentu bergantung pada kemampuan masing-masing sensor satelit (Nugraha *et al.*, 2017). Metode SDB memanfaatkan citra multispektral serta dalam pemerolehan informasi batimetri, beberapa algoritma dan model inversi telah dirancang untuk menyempurnakan dan membantu hasil rekaman sensor jarak jauh yang pastinya dipengaruhi oleh kedalaman air, kejernihan air, tipe reflektansi, serta pengaruh dari atmosfer (Aji *et al.*, 2020; Cahalane *et al.*, 2019; Dobrinic *et al.*, 2018).

Algoritma atau metode yang digunakan pada estimasi batimetri sudah banyak ditemukan dan diuji. Adapun beberapa metode empiris yang digunakan untuk memperoleh informasi batimetri yakni algoritma Lyzenga merupakan salah satu metode sederhana untuk memperkirakan kedalaman air dari citra multispektral berdasarkan perkiraan reflektansi air (Lyzenga *et al.*, 1981). Metode Stumpf yang dikembangkan oleh Stumpf dan Kristiane (2003) merupakan salah satu metode yang

menggunakan model rasio pada 2 panjang gelombang yang berbeda (Masykur, 2021). Metode Van Hengel dan Spitzer (1991), Metode *Multilinear Regression* atau Regresi Multi Liner (MLR) merupakan metode yang mencakup pembahasan mengenai heterogenitas dengan memanfaatkan semua *band multispectral* (Kanno dan Tanaka, 2012). Metode Polinomial diperoleh dengan mengkorelasikan data insitu atau data lapangan dengan penjumlahan nilai reflektansi antara dua band pada citra yang digunakan (Arief *et al.*, 2013).

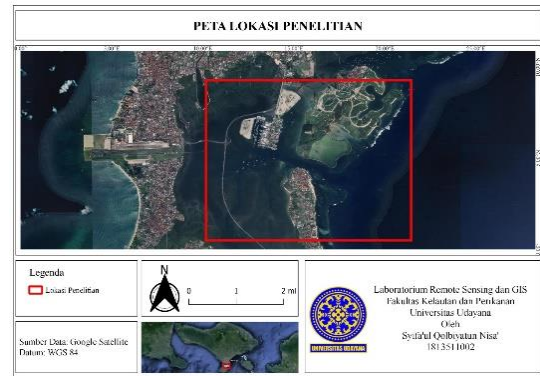
Salah satu citra satelit yang digunakan yakni data citra satelit yang digunakan yakni citra satelit SPOT 6 dengan resolusi spasial 6 meter dengan 4 *band* yaitu *band* merah (*Red*), *band* hijau (*Green*), *band* biru (*blue*) dan *band* inframerah dekat (*Near infrared/NIR*), citra SPOT 6 dipilih karena termasuk dalam citra resolusi menengah dan dari penelitian sebelumnya dengan metode dan bahan yang digunakan seperti Metode Polinomial yang digunakan pada penelitian ini memanfaatkan metode polinomial orde 3. Pada penelitian Nugraha *et al.* (2017) menggunakan algoritma Stumpf menggunakan SPOT 7 menghasilkan R² sebesar 0,48 dan RMSE sebesar 2,07, pada penelitian Arief *et al.*, (2013) menggunakan citra satelit SPOT 4 menghasilkan R² sebesar 0,77. Pada penelitian Safi'i dan Dewi (2020), menggunakan data citra SPOT 6 menggunakan metode MLR mendapatkan RMSE sebesar 0,3. Sehingga pemilihan citra SPOT 6 dimaksudkan untuk mendapat hasil maksimal pada Perairan Benoa.

Teluk Benoa merupakan perairan intertidal yang mengalami perubahan bentuk morfologi. Hal tersebut dapat diketahui pada Al Tanto *et al.* (2017) bahwa selama tahun 2012 hingga 2015 terjadi sedimentasi yang signifikan yang berimbas pada terjadinya pendangkalan dan batimetri di Teluk Benoa dan perairan sekitarnya (Pulau Serangan dan Tahura) tiap tahunnya. Oleh karena itu, diperlukan pengamatan secara berkala serta kombinasi beberapa metode estimasi batimetri juga diperlukan salah satunya dengan metode SDB yang dipadukan dengan algoritma terbaru untuk menguji keakuratan sehingga didapatkan perbandingan hasil yang akurat dari metode-metode yang telah dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai akurasi kelima metode (Metode Stumpf, Metode Polinomial, Metode *Multilinear Regression* (MLR), Metode Lyzenga, Metode Van Hengel dan Spitzer (VHS) serta nilai akurasi tertinggi dalam memprediksi kedalaman Perairan Teluk Benoa, Provinsi Bali, menggunakan citra stelit SPOT.

2. Metode Penelitian

a. Waktu dan Tempat Penelitian

Lokasi penelitian berada di wilayah Perairan Benoa, Kecamatan Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Provinsi Bali (Gambar 1). Pengolahan data pada penelitian ini dilaksanakan pada Maret - Mei 2022 di Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Jakarta, dan Laboratorium Geographic Information System (GIS) dan Remote Sensing, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

b. Pra-Pengolahan Citra

Koreksi radiometrik bertujuan untuk memperbaiki nilai-nilai piksel yang mengalami penyimpangan serta menyusun kembali nilai-nilai piksel agar sesuai dengan objek yang sebenarnya (Parman, (2010); Sasmito *et al.*, (2021)). Koreksi radiometrik yang dilakukan pada penelitian ini yaitu koreksi radiometrik *Top of Atmosphere* (ToA) dengan mengonversi *digital number* (DN) ke ToA reflektan kemudian dilanjutkan dengan koreksi atmosferik menggunakan metode *Dark Object Substraction* (DOS) dimana nilai reflektan pada satelit dikonversikan menjadi nilai reflektan permukaan (*surface reflectance*) dengan asumsi bahwa terdapat objek gelap yang mempunyai nilai pantulan mendekati 0. Adapun persamaan yang digunakan pada kalibrasi radiometerik ToA ditunjukkan pada persamaan (1) dan koreksi atmosferik DOS pada persamaan (2):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \sin \theta} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- ρ_{λ} = reflektan diatas atmosfer
- L_{λ} = radians diatas atmosfer
- d = jarak matahari dan bumi
- $ESUN_{\lambda}$ = radiasi matahari
- θ = sudut elevasi matahari

$$\text{Koreksi Atmosferik DOS} = L_i - L_{si} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- L_i : nilai piksel awal kanal i
- L_{si} : nilai piksel terendah kanal i

Pemotongan citra atau *cropping* merupakan salah satu cara untuk mengambil area tertentu yang akan diamati atau dianalisis isebut dengan *Area of Interest* (AOI). Pemotongan citra juga memiliki tujuan untuk mempermudah penganalisan dan memperkecil ukuran penyimpanan citra. Citra yang telah terkoreksi dan telah dilakukan pemotongan (*cropping*) kemudian dilakukan proses pemisahan darat dan air. Pemrosesan wilayah perairan dangkal dibutuhkan pemisahan antara darat dan lautan.hal ini bertujuan agar proses penganalisan yang hanya dilakukan pada wilayah perairan tidak terganggu oleh piksel yang berada di wilayah daratan. Untuk

mempermudah pengolahan pada perairan dangkal, pada penelitian ini citra yang sudah terkoreksi radiometrik dan terkoreksi atmosferik perlu dilakukan pemisahan obyek perairan dan daratan atau yang disebut dengan image masking. Pada penelitian ini masking didapatkan dari rasio antara pengurangan *band* hijau, *band near infrared* (NIR) dan penjumlahan *band* hijau, *band near infrared*. *Band* NIR digunakan untuk memisahkan batas digital antara wilayah daratan dan perairan dangkal sedangkan *band* hijau digunakan untuk memisahkan batas digital antara perairan dangkal dan laut dalam (Kholil *et al.*, 2010). Nilai piksel suatu citra satelit akan dideteksi sebagai perairan jika nilai NDWI > 0 dan akan dideteksi sebagai daratan jika memiliki nilai NDWI ≤ 0. Adapun pada penelitian ini, masking darat dan laut memanfaatkan persamaan dari NDWI (*Normalized Difference Water Index*) berikut merupakan persamaan NDWI yang digunakan:

$$NDWI = (B2 - B4) / (B2 + B4) \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:
 B2 = *band* hijau (*Green*)
 B4 = *band* inframerah dekat (*Near Infrared/NIR*)

c. *Metode Stumpf*

Model ini menerapkan prinsip dasar bahwa setiap *band* memiliki tingkat penyerapan kolom air yang berbeda. Tingkat penyerapan yang berbeda ini secara konseptual akan menghasilkan rasio antar *band* dan rasio ini akan secara konsisten berubah secara bersamaan ketika kedalaman berubah (Stumpf dan Kristine, 2003).

Berikut merupakan rumus untuk mendapatkan hasil rasio *band* hijau dan biru:

$$X = \frac{\ln(R(B3))}{\ln(R(B2))} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:
 X: indeks kedalaman
 B3: kanal biru
 B2: kanal hijau

$$Z = M_0X + M_1 \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:
 Z: kedalaman absolut
 X: indeks kedalaman
 M₀ dan M₁: koefisien konstanta model yang diperoleh dari hasil regresi rasio *band* terhadap data lapangan

d. *Metode Polinomial*

Metode polinomial merupakan sebuah metode pengembangan dari suatu metode yang megorelasikan *band spectral* (*band* merah dan *band* biru) dengan kedalaman perairan. Indeks kedalaman didapatkan melalui perhitungan penjumlahan *band* biru dan *band* merah dilakukan dengan menggunakan rumus akar

pangkat dua dari penjumlahan kuadrat kedua *band* yang dituliskan pada persamaan berikut:

$$X = \sqrt{(B3^2) + (B1^2)} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:
 X: indeks kedalaman metode Polinomial
 B3: kanal biru (*band* biru)
 B1: kanal merah (*band* merah)

$$Z = M_1X^2 + M_2X - M_3 \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:
 Z: kedalaman absolut
 X: indeks kedalaman
 M₁, M₂, M₃: koefisien dan konstanta model yang diperoleh hasil regresi dari indeks kedalaman dan data lapangan

e. *Metode Multilinear Regression (MLR)*

Konsep dasar estimasi batimetri di perairan dangkal dengan memanfaatkan citra satelit terdapat 3 komponen penyusun yaitu kondisi atmosfer, refletansi tutupan dasar perairan, dan sakter kolom air. Komponen reflektansi permukaan dasar laut merupakan komponen utama yang digunakan sebagai nilai untuk menghasilkan kedalaman laut. Metode MLR menganalisis citra menggunakan metode regresi berganda antara kedalaman lapangan dan data multispektral yang digunakan untuk mendapatkan koefisien regresi yang didapatkan melalui pemanfaatan *software* SPSS dan kemudian digunakan untuk memperkirakan nilai kedalaman: Refleksi dari semua komponen dapat diartikan dalam rumus berikut:

$$Z = M_0 + M_{biru} \cdot B_{biru} + M_{hijau} \cdot B_{hijau} + M_{merah} \cdot B_{merah} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:
 Z: kedalaman absolut
 M₀: konstanta
 M_{biru}: koefisien untuk *band* biru
 M_{hijau}: koefisien untuk *band* hijau
 M_{merah}: koefisien untuk *band* merah
 B_{biru}: nilai spektral reflektansi dari *band* biru citra SPOT
 B_{hijau}: nilai spektral reflektansi dari *band* hijau citra SPOT
 B_{merah}: nilai spektral reflektansi dari *band* merah citra SPOT

f. *Metode Lyzenga*

Metode Lyzenga di penelitian ini memanfaatkan kanal merah, hijau, dan biru dari citra SPOT 6. Pada masing-masing kanal dilakukan pengambilan *sample* laut dalam sebanyak 5 titik memanfaatkan aplikasi QGIS yang kemudian didapatkan rata-rata nilai reflektan dari laut dalam pada masing-masing saluran. Untuk mendapatkan rata-rata yang diperoleh menggunakan plugin yang ada pada *software* QGIS

yakni *tools Zonal Statistic*. *Tools* ini memiliki fungsi untuk menghitung statistik pada masing-masing kanal, dimana pada metode *Lyzenga Zonal Statistic* ini akan menghasilkan rata-rata reflektansi laut dalam. Adapun dalam pengolahan *Zonal Statistic* ini sebagai input yakni 5 *polygon* pada reflektan laut dalam dengan indikator warna gelap pada *layer* reflektan. Dikarenakan output yang dibutuhkan merupakan angka rata-rata maka dipilih “*Mean*” pada bagian *Statistics to Calculate* sehingga didapatkan hasil rata-rata dari masing-masing sejumlah 5 *polygon* dari tiap kana. Adapun hasil dari rata-rata reflektan laut dalam masing-masing kanal yaitu pada kanal merah mendapat rata-rata reflektan laut dalam sebesar 0,14, pada kanal hijau sebesar 0,11, pada kanal biru sebesar 0,09. Untuk mendapat kedalaman relatif dan kedalaman absolut dapat diperoleh memanfaatkan persamaan dari Lyzenga (1981) berikut:

$$Z = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \ln[R(B_i) - R_{\infty}(B_i)] \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan

Z: kedalaman absolut

a₀: Konstanta

a₁: koefisien dari regresi multilinear *band* biru

a₂: koefisien dari regresi multilinear *band* hijau

a₃: koefisien dari regresi multilinear *band* merah

Adapun persamaan tersebut dapat dijabarkan melalui persamaan:

$$Z = a_0 + a_1 \ln(RB_1 - R_{\infty}B_1) + a_2 \ln(RB_2 - R_{\infty}B_2) + a_3 \ln(RB_3 - R_{\infty}B_3) \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

a₀: koefisien konstanta

RB₁: reflektan *band* biru di laut dangkal

RB₂: reflektan *band* hijau di laut dangkal

RB₃: reflektan *band* merah di laut dangkal

R_∞B₁: nilai rata – rata laut dalam *band* biru

R_∞B₂: nilai rata – rata laut dalam *band* hijau

R_∞B₃: nilai rata – rata laut dalam *band* merah

g. *Metode Van Hengel dan Spitzer*

Algoritma Van Hengel dan Spitzer dijalankan melalui penggunaan 3 *band* yakni biru, hijau, dan merah. Dalam prosesnya, algoritma ini membuat indeks kedalaman sebanyak 50 region secara acak yang secara visual (algoritma transformasi rotasi V-S). berikut merupakan perhitungan untuk algoritma Van Hengel dan Spitzer:

$$U_r = \frac{\text{VarGreen} + \text{VarBlue}}{2 * \text{CovarGreenBlue}} \dots\dots\dots (11)$$

$$U_s = (\text{VarRed} + \text{VarBlue}) / (2 * \text{CovarRedBlue}) \dots\dots\dots (12)$$

$$R = \text{Arctan}(U_r + \sqrt{(U_r^2) + 1}) \dots\dots\dots (13)$$

$$S = \text{Arctan}(U_s + \sqrt{(U_s^2) + 1}) \dots\dots\dots (14)$$

Keterangan:

R: sudut arah rotasi

S: sudut arah rotasi

VarGreen: Variansi 50 data *band* hijau

VarBlue: Variansi 50 data *band* biru

VarRed: Variansi 50 data *band* merah

CovarGreenBlue: Kovarians *band* hijau dan *band* biru

CovarRedBlue: Kovarians *band* merah dan *band* biru

Hasil perhitungan sudut R dan S digunakan untuk menghitung indeks kedalaman yang didapat melalui persamaan berikut:

$$X = (\text{Cos}(R) * \text{Sin}(S) * B1) + (\text{Sin}(R) * \text{Cos}(S) * B2) + (\text{Sin}(S) * B3) \dots\dots\dots (15)$$

Keterangan:

X: kedalaman relatif

B1: Nilai Reflektansi dari *band* biru

B2: Nilai Reflektansi dari *band* hijau

B3: Nilai Reflektansi dari *band* merah

h. *Pengolahan Data Lapangan*

Pada penelitian ini data in situ lapangan dibagi menjadi dua bagian yakni data model dan data uji akurasi. Data model berisi 70% dari keseluruhan data in situ lapangan dan data akurasi berisi 30% dari data lapangan. Data kedalaman lapangan pada penelitian ini menggunakan petal laut dimana untuk untuk mendapat koordinat pada suatu titik diperlukan proses digitasi secara manual. Data model pada penelitian ini sejumlah 155 titik dan data akurasi sebanyak 66 titik. Data lapangan pada penelitian ini diperoleh dari digitasi memanfaatkan aplikasi QGIS dari peta laut yang dipublikasi oleh PUSHIDROSAL dengan skala 1: 5000 dan pemerolehan data kedalaman ini dilakukan sepanjang awal tahun 2020.

i. *Analisis Regresi*

Pada penelitian ini yang menjadi variabel bebas yakni *band* merah, hijau, biru pada citra satelit yang digunakan dan variabel yang dipengaruhi yakni data kedalaman in situ.

j. *Uji Kualitas Data*

Pada penelitian ini dilakukan Uji Normalitas Komorgolov – Smirnov yang bertujuan untuk mengetahui apakah nilai residual terdistribusi normal atau tidak. Pada penelitian ini, uji normalitas dilakukan dengan bantuan software SPSS sehingga dasar pengambilan keputusan dalam uji normalitas K-S yakni jika nilai signifikansi yang didapat lebih besar (>) dari 0,05 maka data penelitian terdistribusi normal. Apabila nilai signifikansi lebih kecil (<) daripada 0,05 maka data penelitian tidak terdistribusi normal.

Uji T berpasangan bertujuan untuk mengetahui adanya perbedaan rata-rata dari data kedalaman

lapangan yang sebenarnya dengan data kedalaman dihasilkan oleh citra.

k. Uji RMSE

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan akar dari rata-rata jumlah kuadrat antara selisih nilai kedalaman actual hasil pengukuran lapangan dengan nilai kedalaman hasil estimasi pengolahan citra penginderaan jauh yang digunakan untuk mengukur perbedaan nilai yang dihasilkan oleh prediksi sebuah model sebagai estimasi atas nilai yang telah diobservasi. Keakuratan pada pengukuran hasil metode estimasi kesalahan ini ditandai dengan nilai akhir RMSE yang kecil maka semakin kecil (mendekati nol) (Sutawinaya et al., 2017). Pada penelitian ini uji RMSE dioperasikan pada Microsoft Excel. Lebih kecil nilai RMSE mengartikan bahwa model persamaan estimasi kedalaman lebih baik daripada nilai RMSE yang lebih besar (Nurkhayati dan Khakim, 2013).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y)^2}{n}} \dots\dots\dots (16)$$

Keterangan

n = Jumlah titik kedalaman yang digunakan dalam validasi model

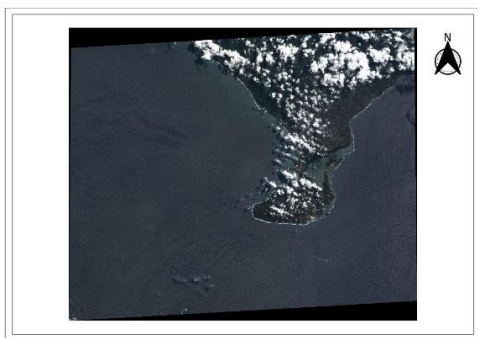
Y_i = Nilai kedalaman hasil estimasi pengolahan citra

Y = Nilai kedalaman aktual hasil pengukuran lapangan

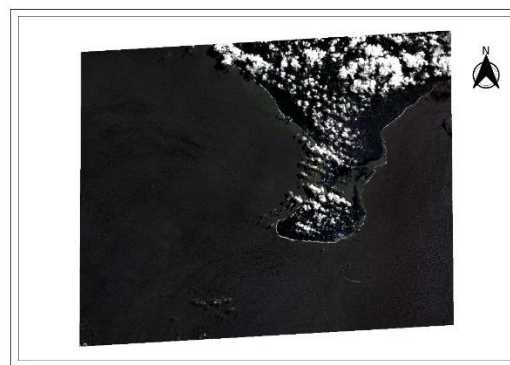
3. Hasil dan Pembahasan

a. Koreksi Radiometrik dan Atmosferik

Pada Gambar 3a merupakan citra asli yang memperlihatkan citra dalam tampilan (Red, Green, Blue) RGB dengan format digital number, sedangkan pada Gambar 3b menampilkan citra dalam format reflectance. Perbedaan yang terlihat pada keduanya yaitu citra dalam format reflectance terlihat lebih tajam dan cerah dibandingkan dengan citra asli dalam format digital number. Citra dengan format reflectance kemudian dilakukan konversi ke format surface reflectance (SR) memanfaatkan Dark-Object Substraction (DOS). Pada metode koreksi atmosferik DOS menggunakan pendekatan bahwa nilai reflektan piksel seluruh citra dikurangi oleh nilai reflektan objek ter-gelap (dark object).



Gambar 3a. Citra sebelum terkoreksi



Gambar 3b. Citra setelah terkoreksi

b. Pemisahan darat dan air

Gambar 4 menunjukkan warna hitam sebagai wilayah daratan, dan warna putih sebagai wilayah perairan. Dalam proses berikutnya, nilai spektral pada piksel dengan area berwarna putih yang dimanfaatkan untuk memperoleh informasi kedalaman sementara wilayah daratan diabaikan.



wilayah daratan diabaikan.

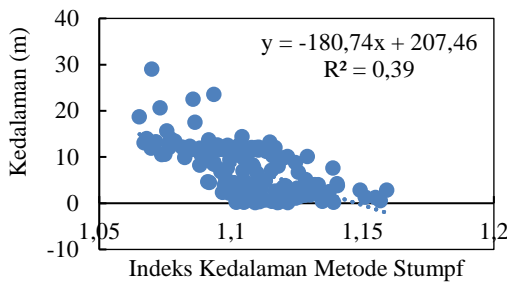
Gambar 4. Hasil masking darat - air

c. Hasil Regresi Linear

Pada hasil regresi linear, hasil dari Metode Stumpf yang didapatkan dengan merasiokan 2 kanal yakni kanal biru dan kanal hijau menghasilkan persamaan regresi y = -180,74X + 207,46 serta Metode Stumpf ini menghasilkan R² sebesar 0,27. Metode Polinomial pada proses memanfaatkan akar penjumlahan dari kanal biru dan kanal merah menghasilkan persamaan regresi y = -670,83X² + 273,23X - 20,07 menghasilkan R² sebesar 0,01. Pada Metode Van Hengel dan Spitzer pada proses pengolahannya memanfaatkan algoritma rotasi V-S dan memanfaatkan 3 kanal yakni RGB menghasilkan persamaan regresi y = -659,98X² + 269,04X - 19,69 dengan R² sebesar 0,03. Pada Metode Lyzenga memanfaatkan 3 kanal (RGB) serta persamaan linear berganda menghasilkan persamaan y = 7,294X¹ - 11,013X² + 2,686X³ + 6,46 dan menghasilkan R² sebesar 0,10. Pada metode terakhir yakni metode regresi linear berganda atau multilinear regression (MLR) dengan memanfaatkan 3 kanal RGB menghasilkan persamaan y = 387,830X¹ - 522,46X² + 216,19X³ + 2,32 dengan R² sebesar 0.343. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa korelasi akan meningkat seiring

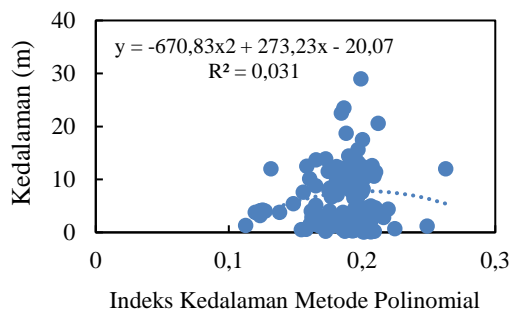
dengan meningkatnya hasil koefisien determinasi yang dimana hubungan data lapangan dan data ekstraksi citra paling baik yakni pada Metode Stumpf.

Pada Metode Stumpf untuk memperoleh hasil persamaan regresi dan koefisien determinasi, metode ini memanfaatkan rasio dari 2 band (biru dan hijau). Sehingga kedalaman absolut dari metode ini diperoleh dari hasil regresi linear seperti pada Gambar 5. dengan persamaan regresi $y = -180,74x + 207,46$ sesuai dengan persamaan 4 dalam menentukan kedalaman absolut dimana 180,74 merupakan m_0 dan 207,46 berperan sebagai m_1 yang merupakan koefisien dan konstanta yang diperoleh dari persamaan regresi.



Gambar 5. Grafik Regresi Metode Stumpf

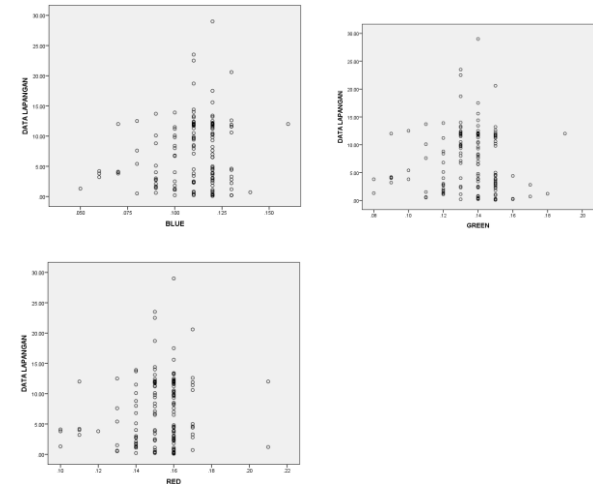
Untuk mengestimasi kedalaman, metode polinomial memanfaatkan band biru dan merah. Menurut Muchlisin (2013), band merah dan biru digunakan karena tidak berkorelasi linear atau memiliki koefisien koefisien korelasi yang kecil. Untuk metode polinomial didapatkan hasil koefisien determinasi sebesar 0,01 dengan nilai korelasi 0,11. Untuk mendapatkan persamaan regresi terbaik setelah dilakukan beberapa uji coba pada persamaan polinomial berbagai orde, pada penelitian ini memanfaatkan persamaan polinomial orde 2 dengan persamaan yang dihasilkan melalui grafik yakni $y = -670,83X^2 + 273,23X - 20,07$. Adapun persamaan ini digunakan untuk mendapatkan kedalaman absolut. Pada metode polinomial kedalaman yang dapat diestimasi yakni hingga kedalaman 5 meter.



Gambar 6. Grafik Metode Polinomial

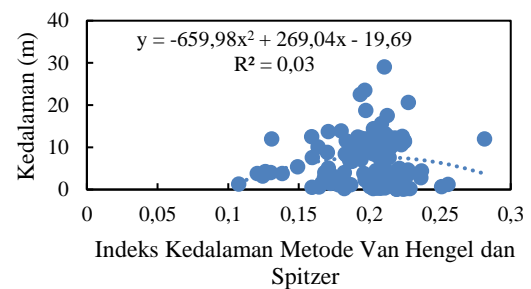
Pada metode *Multilinear Regression* ini membutuhkan 3 band untuk diregresikan agar mendapat persamaan dan R^2 . Band yang digunakan pada metode ini yakni merah, biru, dan hijau (RGB) dan kombinasi yang digunakan yakni band biru, merah, dan hijau. Hasil sampling atau hasil ekstraksi antara raster band RGB

dengan data lapangan diregresikan memanfaatkan software SPSS untuk mendapat persamaan model. Hasil persamaan yang didapat dari metode ini yaitu $y = 387,83X_1 - 522,46X_2 + 216,19X_3 + 2,32$ dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,34 dan hasil korelasi sebesar 0,59.



Gambar 7. Scatter Plot metode MLR

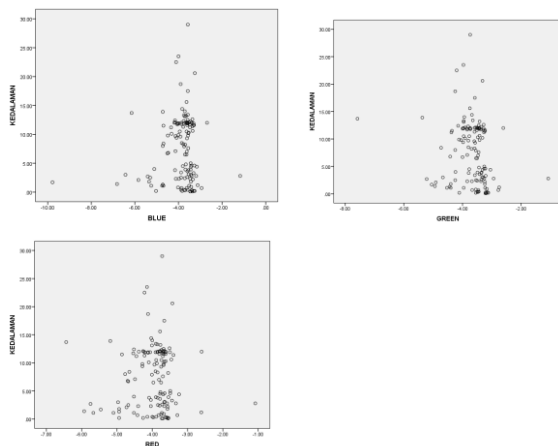
Pada Metode Van Hengel dan Spitzer disebutkan bahwa metode ini bekerja dengan mengasumsikan bahwa reflektansi dasar dan komposisi air adalah konstan dalam semua bagian gambar dan band multispektral gambar dipengaruhi oleh reflektansi dasar perairan. Pada penelitian ini menggunakan algoritma Van Hengel dan Spitzer menggunakan kombinasi 3 band yakni biru, hijau dan merah. Untuk pengolahannya membutuhkan 50 region pada setiap band. Adapun perhitungan $U_r, U_s, r, s, R, S, \cos R, \sin R, \cos S$, pada penelitian ini nilai koefisien determinasi yang didapat yakni 0,028 dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,17 dan persamaan yang didapat yaitu $y = -659,98X^2 + 269,04X - 19,69$.



Gambar 8. Grafik Metode Van Hengel dan Spitzer

Algoritma Lyzenga dalam mengestimasi kedalaman membutuhkan kombinasi dari tiga band yakni biru, hijau, dan merah. Pada penelitian ini sebelum mengoperasikan Metode Lyzenga, terlebih dahulu diperlukan untuk membuat region sebanyak 5 sampel region laut dalam. Kelima sampel region ini digunakan untuk mendapat rata-rata nilai reflektan laut dalam. Kedalaman relatif pada Metode Lyzenga didapatkan melalui analisis regresi multilinier dari band biru, hijau, dan merah dengan data kedalaman in situ lapangan.

Pengoperasin regresi multilinear menggunakan aplikasi SPSS dengan memasukkan *band RGB* sebagai variabel bebas (*independent variable*) dan data *in situ* lapangan sebagai variabel terikat (*dependent variable*). Hasil persamaan regresi yang diperoleh yakni $y = 7,29X_1 - 11,01X_2 + 2,69X_3$ dengan koefisien determinasi sebesar 0,27. koefisien determinasi yang diperoleh termasuk rendah dibandingkan dengan metode lainnya yang digunakan pada penelitian ini. Menurut Aji *et al.* (2020) koefisien determinasi berguna untuk mengetahui pengaruh antara data variabel bebas dan data variabel terikat. Persamaan regresi yang didapat sebelumnya digunakan untuk mendapat kedalaman absolut dan persamaan tersebut diaplikasikan pada tiap *band*.



Gambar 9. Scatter Plot metode Lyzenga

d. Hasil Uji RMSE

Pada uji normalitas Kolmogorov-Smirnov didapatkan bahwa semua data pada 5 metode empiris terdistribusi normal. Hal ini dikarenakan pada tabel signifikansi yang dihasilkan pada pengolahan pada *software* SPSS menghasilkan hasil signifikansi lebih dari 0,05. Adapun hasil signifikansi masing-masing data pada 5 metode yakni Metode Stumpf menghasilkan signifikansi sebesar 0,2. Pada metode Polinomial menghasilkan signifikansi sebesar 0,09. Pada metode Van Hengel dan Spitzer menghasilkan signifikansi sebesar 0,2. Pada Metode Lyzenga menghasilkan signifikansi sebesar 0,2. Pada metode *Multilinear Regression* menghasilkan signifikansi sebesar 0,07. Dengan hasil yang didapatkan maka dapat diketahui bahwa data terdistribusi normal serta dilakukan uji T.

Hasil dari uji T yang dilakukan pada *software* SPSS menghasilkan bahwa 4 metode menghasilkan keputusan bahwa data kedalaman lapangan yang sebenarnya dan data kedalaman yang diperoleh dari citra tidak berbeda signifikan hal ini ditandai dengan hasil signifikansi uji T yang melebihi 0,05. Adapun keempat metode tersebut yakni Metode Stumpf dengan hasil signifikansi sebesar 0,652, Metode Van Hengel dan Spitzer menghasilkan signifikansi sebesar 0,1, Metode Lyzenga menghasilkan signifikansi sebesar 0,448 dan Metode *Multilinear Regression* menghasilkan signifikansi sebesar 0,25. Dari pemerolehan hasil signifikansi tersebut, mengartikan bahwa perhitungan dapat dilanjutkan ke perhitungan uji *RMSE* untuk mengetahui hasil error.

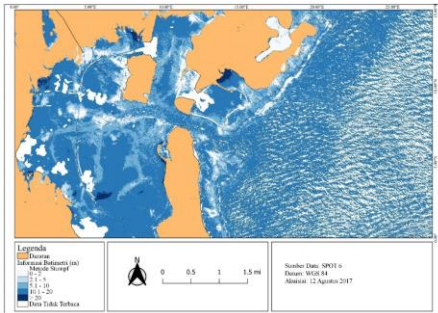
Pada metode Polinomial menghasilkan signifikansi kurang dari 0,05 yakni sebesar 0,01 hal ini mengartikan bahwa perhitungan metode Polinomial tidak dilanjutkan pada tahap uji *RMSE* karena terjadi perbedaan antara kedua data sehingga error yang dihasilkan cukup besar.

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan suatu ukuran yang digunakan untuk mengukur kesalahan (*error*) atau perbedaan nilai prediksi dan pada penelitian ini merupakan proses estimasi batimetri. Uji *RMSE* pada proses estimasi batimetri diperlukan untuk mengetahui perbedaan nilai prediksi antara data *in situ* lapangan yang sebenarnya dengan data ekstraksi citra satelit dan data *in situ* lapangan. Pada penelitian ini, tinggi rendahnya hasil perhitungan *RMSE* digunakan untuk menunjukkan tingkat akurasi dari algoritma atau metode yang digunakan. Uji akurasi menggunakan 30% data lapangan yang telah dipisahkan dengan data model. Dengan sejumlah data lapangan untuk akurasi yang digunakan, didapatkan hasil *RMSE* terendah yaitu pada Metode Stumpf dengan nilai 5,72 m dengan rata-rata kedalaman estimasi sebesar 9,99 m menyebabkan error yang dihasilkan cukup tinggi. Adapun dengan hasil yang didapat, Metode Stumpf menjadi metode yang mampu mengestimasi paling akurat. Pada penelitian ini metode polinomial menghasilkan *RMSE* sebesar 6,99 m dengan hasil kedalaman estimasi rata-rata yakni sebesar 7,47 m, metode Lyzenga sebesar 7,66 m dengan rata-rata kedalaman estimasi sebesar 10,55 m, Metode Van Hengel dan Spitzer sebesar 6,97 m dan rata-rata kedalaman hasil estimasi 7,47, metode *Multilinear Regression* sebesar 5,75 m dengan rata-rata kedalaman estimasi sebesar 8,85 m. Pada penelitian ini memiliki berbagai keterbatasan seperti kawasan laut dangkal di Perairan Benoa cenderung keruh dengan banyaknya sungai yang bermuara pada Perairan Benoa dan data lapangan yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder peta laut sehingga keseluruhan error pada hasil yang didapat cukup tinggi.

e. Hasil Perbandingan Uji Akurasi

Menurut peta informasi batimetri yang dihasilkan, Metode Stumpf mengestimasi kedalaman Perairan Benoa dari kedalaman 2 m hingga kedalaman 20 meter. Adapun informasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 11. Penelitian perbandingan 5 metode empiris yang digunakan untuk mengestimasi batimetri di Perairan Benoa menghasilkan Metode Stumpf merupakan metode dengan tingkat keakuratan tinggi dibanding 4 metode empiris lainnya. Algoritma Stumpf dalam mengestimasi batimetri menggunakan metode *ratio band*. Pada grafik yang dihasilkan Metode Stumpf dapat diketahui bahwa nilai indeks kedalaman yang dihasilkan menandakan bahwa perairan di kedalaman sebenarnya memiliki kedalaman yang dangkal. Hal ini dapat disebabkan karena reflektansi yang diterima oleh sensor akan bernilai lebih besar pada laut dangkal dibandingkan dengan reflektansi pada perairan laut yang lebih dalam. Hal ini didukung dengan Stumpf dan Holdiried (2003), yang menjelaskan bahwa saat kedalaman meningkat, reflektansi hasil dari rasio dari kedua *band* menurun. *Band* yang digunakan pada algoritma ini yaitu biru dan hijau. Menurut Nugraha *et*

al. (2017), band biru pada citra SPOT 6 dapat menembus perairan dan secara substansial berpotensi untuk dikoreksi karena banyak terdapat pengaruh atmosfer sedangkan pada band hijau mampu untuk berfokus lebih akurat pada puncak reflektansi suatu objek. Pada penelitian ini, Metode Stumpf menghasilkan R^2 sebesar 0,39 dan $RMSE$ sebesar 5,72 m. Penelitian estimasi batimetri menggunakan algoritma Stumpf telah banyak dilakukan pada perairan Indonesia. Pada penelitian Nugraha *et al.* (2017) yang dilakukan pada Perairan Lembar, Lombok, menggunakan citra SPOT 7 metode rasio band hijau dan biru dengan menggunakan persamaan eksponensial menghasilkan R^2 sebesar 0,48 dengan $RMSE$ 2,06 m.



Gambar 11. Peta informasi batimetri Metode Stumpf

Adapun hasil R atau korelasi yang dihasilkan pada penilitian ini tergolong kecil namun tetap dilanjutkan pada perhitungan $RMSE$ dikarenakan merujuk pada tujuan awal dari pada penelitian ini yakni mengetahui hasil akurasi melalui $RMSE$ dari lima metode yang diujikan. Dapat diketahui dari hasil penelitian ini kelemahan dari 5 metode empiris yakni tidak dapat mengestimasi secara maksimal dalam perairan keruh dan penelitian ini jarang diimplementasikan pada Perairan Benoa dengan kondisi yang cukup keruh. Salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya error yang dihasilkan masing-masing metode yakni kondisi pasang surut pada saat satelit melintas sehingga yang terekam oleh sensor citra yakni dasar laut. Pada tabel 1 dapat diketahui bahwa pasang surut tertinggi yakni 0,7 m dan pasang surut terendah berada pada -1,1 m. Hal ini dapat menyebabkan error tinggi yang disebabkan oleh rendahnya kolom air pada daerah penelitian.

Tabel 1. Kondisi Pasang Surut

No	dd/mm/yy	Ele (m)
1	12/8/2017 1:00	0.7
2	12/8/2017 1:30	0.7
3	12/8/2017 2:00	0.5
4	12/8/2017 2:30	0.4
5	12/8/2017 3:00	0.1
6	12/8/2017 3:30	-0.1
7	12/8/2017 4:00	-0.3
8	12/8/2017 4:30	-0.5
9	12/8/2017 5:00	-0.8
10	12/8/2017 5:30	-0.9
11	12/8/2017 6:00	-1
12	12/8/2017 6:30	-1.1
13	12/8/2017 7:00	-1
14	12/8/2017 8:00	-0.8

15	12/8/2017 8:30	-0.6
16	12/8/2017 9:00	-0.4
17	12/8/2017 9:30	-0.2
18	12/8/2017 10:00	0
19	12/8/2017 10:30	0.2
20	12/8/2017 11:00	0.4
21	12/8/2017 11:30	0.6
22	12/8/2017 12:00	0.7

Sumber: Tides

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai akurasi kelima metode yaitu sebagai berikut: Metode Stumpf menghasilkan persamaan regresi $y = -180,74X + 207,46$ dan $RMSE$ sebesar 5,72 m, Metode Polinomial menghasilkan persamaan regresi sebesar $y = -670,83X^2 + 273,23X - 20,07$ dan hasil $RMSE$ sebesar 6,99 m, Metode Van Hengel dan Spitzer menghasilkan persamaan regresi sebesar $y = -659,98X^2 + 269,04X - 19,69$ dan hasil $RMSE$ sebesar 6,97 m, Metode Lyzenga menghasilkan persamaan regresi multilinear sebesar $y = 7,29X_1 - 11,01X_2 + 2,69X_3$ dan hasil $RMSE$ sebesar 7,66 m, dan Metode *Multilinear Regression* menghasilkan persamaan multilinear sebesar $y = 38,830X_1 - 522,46X_2 + 216,19X_3 + 2,32$ dan besaran $RMSE$ sebesar 5,75 m. Nilai akurasi tertinggi dalam memprediksi kedalaman Perairan Teluk Benoa menggunakan citra satelit SPOT yaitu menggunakan Metode Stumpf dengan nilai $RMSE$ terkecil yakni 5,72 m.

Daftar Pustaka

Al Tanto, T., Putra, A., Kusumah, G., Farhan, A. R., Pranowo, W. S., & Husrin, S. (2017). Pendugaan Laju Sedimentasi Di Perairan Teluk Benoa-Bali Berdasarkan Citra Satelit. *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(3), 101-107.

Harianto, K., & Takwir, A. (2019). Pemetaan Batimetri Perairan Dangkal Menggunakan Algoritma Jupp Pada Citra Spot-7 Di Perairan Tanjung Tiram. *Jurnal Sapa Laut (Jurnal Ilmu Kelautan)*, 4(1), 1-12.

Nugraha, A. Y., Prayudha, B., Ibrahim, A. L., & Riyadi, N. (2017). Pemetaan Batimetri di Perairan Dangkal Menggunakan Data Penginderaan Jauh Spot-7 (Studi Kasus Lembar-Lombok). *Jurnal Chart Datum*, 3(2), 61-80.

Kanno, A., Koibuchi, Y., & Isobe, M. (2011). Shallow water bathymetry from multispectral satellite images: Extensions of Lyzenga's method for improving accuracy. *Coastal Engineering Journal*, 53(04), 431-450.

Khafid, D. (2007). Status Parsial Submisi Landas Kontinen Indonesia di luar 200 mil laut di sebelah barat laut Sumatera. *Teknik*.

Kholil, M., Sukojo, B. M., Wahyudi, Y., & Cahyono, A. B. (2010). Pembuatan Peta Bathymetri Menggunakan Citra Satelit Formosat 2 Di Kepulauan Seribu. *Geoid*, 3(2), 111-119.

Kusumawati, E. D., Handoyo, G., & Hariadi, H. (2015). Pemetaan Batimetri Untuk Mendukung Alur Pelayaran di Perairan Banjarmasin, Kalimantan Selatan. *Journal of Oceanography*, 4(4), 706-712.

Setiawan, K. T., Osawa, T., & Nuarsa, I. W. (2014). Aplikasi algoritma Van Hengel and Spitzer untuk ekstraksi informasi batimetri menggunakan data landsat. In *Seminar Nasional Penginderaan Jauh* (pp. 222-230).

Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1part2), 547-556.

Sutawinaya, I. P., Astawa, I. N. G. A., & Hariyanti, N. K. D. (2017). Perbandingan Metode Jaringan Saraf Tiruan pada Peramalan Curah Hujan. *Logic: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, 17(2), 92-97.

Pushparaj, J., & Hegde, A. V. (2017). Estimation of bathymetry along the coast of Mangaluru using Landsat-8 imagery. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8(2), 71-8