

Estimasi Volume Pengerukan Pelabuhan Tanjung Laut Dengan Metode Integrasi Numerik

FITRI SUCIATY^{1*}, MUHAMAD HEAQUAL IFRIYANTO¹,
SITI RANIA USEMAHU²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Itenas Bandung

² PT Marindo Utama Penata Kawasan, Bandung

Email: fitrisuciaty@itenas.ac.id

ABSTRAK

Perhitungan volume pengerukan pada suatu pelabuhan diketahui dapat dilakukan dengan berbagai metode. Pada penelitian ini, algoritma perhitungan integrasi numerik klasik diaplikasikan untuk mengestimasi volume pengerukan Pelabuhan Tanjung Laut. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan berbagai metode dasar pada integrasi numerik, yaitu dengan tiga pendekatan yang berbeda: aturan titik tengah (midpoint rule), aturan trapesium (trapezoidal rule), dan aturan simpson (Simpson's rule). Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data batimetri Pelabuhan Tanjung Laut hasil survey yang dilakukan oleh PT Marindo Utama Penata Kawasan pada tahun 2016. Hasil perhitungan dengan menggunakan pendekatan integrasi numerik dibandingkan dengan data volume pengerukan yang didapatkan dari PT Marindo Utama Penata Kawasan. Estimasi volume pengerukan dengan pendekatan integrasi numerik tersebut menghasilkan nilai galat dan kecepatan konvergensi yang bervariasi. Analisis perbandingan ketiga pendekatan yang berbeda dalam menghitung volume pengerukan dilakukan pada penelitian ini untuk mengetahui metode mana yang paling akurat.

Kata kunci: Integrasi Numerik, Volume Pengerukan

ABSTRACT

The volume of dredging at a port can be calculated using various methods. In this study, the classic numerical algorithm of integration was applied to estimate the dredging volume of Tanjung Laut Port. Calculations are performed using basic methods of numerical integration, differing in a way of approximation: the midpoint rule, the trapezoidal rule, and Simpson's rule. The data used in this research is the bathymetric survey data of Tanjung Laut Port from PT Marindo Utama Penata Kawasan in 2016. The calculation results using the approximation methods of numerical integration are compared with the dredging volume data obtained from PT Marindo Utama Penata Kawasan. The approximated value of the dredging volume obtained, but they are determined with various errors and speed of convergence to the correct result. A comparative analysis of three different approaches to estimating dredging volume was carried out in this study to find out which method is the most accurate.

Keywords: Numerical Integration, Dredging Volume

1. PENDAHULUAN

Dalam analisis matematika, integral merupakan bagian yang sangat penting. Integral terbagi menjadi dua tipe, yaitu *indefinite integral* dan *definite integral*. *Indefinite integral* sering disebut juga sebagai fungsi primitif dan merupakan kebalikan dari turunan (*derivative*). *Definite integral* bisa didapatkan setelah digunakan batas $[a,b]$. Luas area antara grafik fungsi dan sumbu OX dapat diketahui dengan menggunakan integral. Dalam pengaplikasiannya, integral sangat berguna tidak hanya untuk analisis matematika, namun juga dapat digunakan untuk menghitung fenomena fisika [5].

Namun terdapat banyak fungsi dan permasalahan integral yang tidak dapat dihitung dengan metode matematika analitik. Untuk itu digunakan metode integrasi numerik. Metode integrasi numerik ini bertujuan untuk melakukan pendekatan dari fungsi ataupun permasalahan integral. Saat ini berbagai penelitian menggunakan metode integrasi numerik dalam bidang industri dan juga informatika telah banyak dipublikasikan. Metode integrasi numerik telah diaplikasikan untuk memperkirakan kelimpahan populasi [2] atau dalam merekonstruksi gambar medis [3] ataupun dalam bidang ilmu Fisika [6]. Pada penelitian ini, metode integrasi numerik diaplikasikan pada bidang rekayasa pelabuhan, yaitu untuk mengestimasi volume pengerukan di Pelabuhan Tanjung Laut.

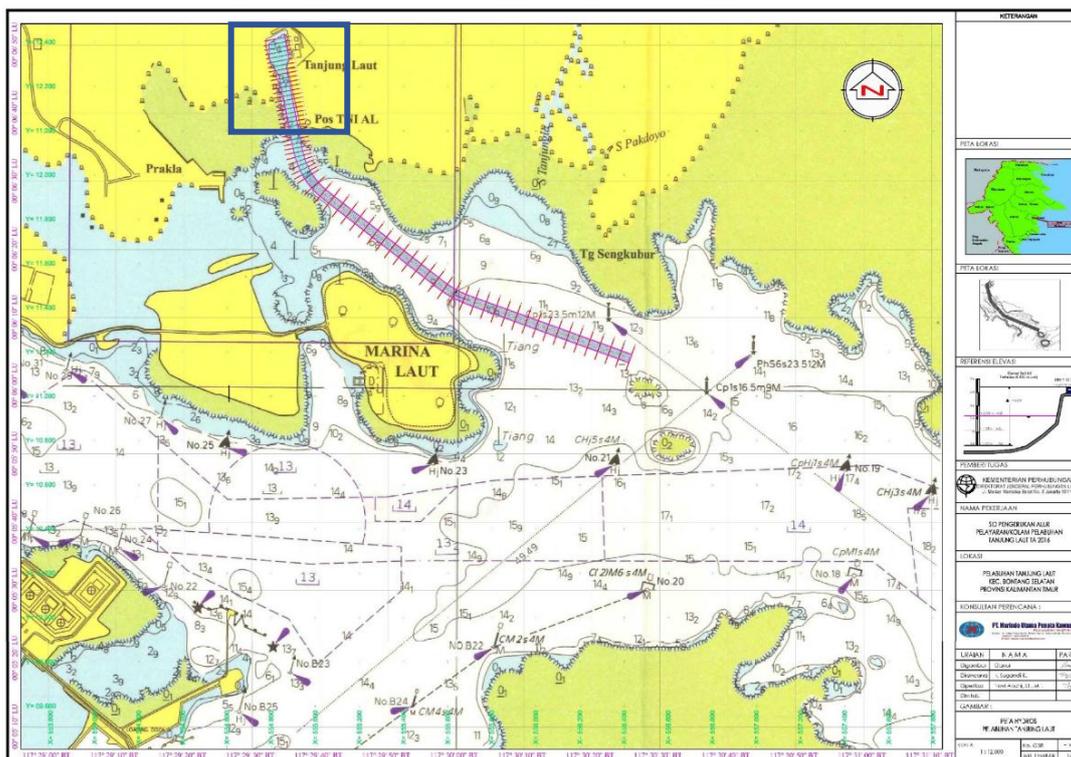
Pelabuhan Tanjung Laut diketahui memiliki luas area sebesar 4.481 m^2 dan direncanakan akan dilakukan pengembangan pelabuhan dari segi kapasitas pelayaran [4]. Pada pengembangan tersebut, kapal yang direncanakan akan bertambat pada Pelabuhan Tanjung Laut memiliki bobot 1.000 DWT dengan draft sebesar 3,9 m. Berdasarkan hasil pemodelan transport sedimen yang dilakukan oleh PT Marindo Utama Penata Kawasan pada tahun 2016, terjadi sedimentasi pada alur pelayaran dan juga kolam pelabuhan sebesar 0,03 m dalam kurun waktu 1 tahun. Untuk itu diperlukan pengerukan di kolam pelabuhan dan alur pelayaran kapal pada Pelabuhan Tanjung Laut dengan kedalaman desain alur sebesar 4 m dari permukaan air laut sesuai dengan draft kapal yang diperlukan.

Pehitungan estimasi volume pengerukan di alur pelayaran dan kolam pelabuhan dilakukan dengan menggunakan berbagai metode dasar pada integrasi numerik, yaitu dengan tiga pendekatan yang berbeda: aturan titik tengah (*midpoint rule*), aturan trapesium (*trapezoidal rule*), dan aturan simpson (*Simpson's rule*). Dengan menggunakan ketiga pendekatan tersebut didapatkan pendekatan nilai integral namun ketiganya akan menghasilkan nilai galat dan kecepatan konvergensi yang bervariasi. Pada ketiga metode pendekatan tersebut dilakukan penentuan interval $[a,b]$ yang kemudian dibagi menjadi n subinterval dengan panjang yang sama. Luas area pada setiap subinterval dapat dihitung dengan menggunakan persamaan masing-masing metode. Luas area tersebut kemudian digunakan untuk menghitung volume. Analisis perbandingan ketiga metode pendekatan dilakukan untuk mengetahui metode mana yang lebih akurat dan lebih cepat konvergen terhadap nilai volume pengerukan yang didapatkan dari PT Marindo Utama Penata Kawasan.

2. METODOLOGI

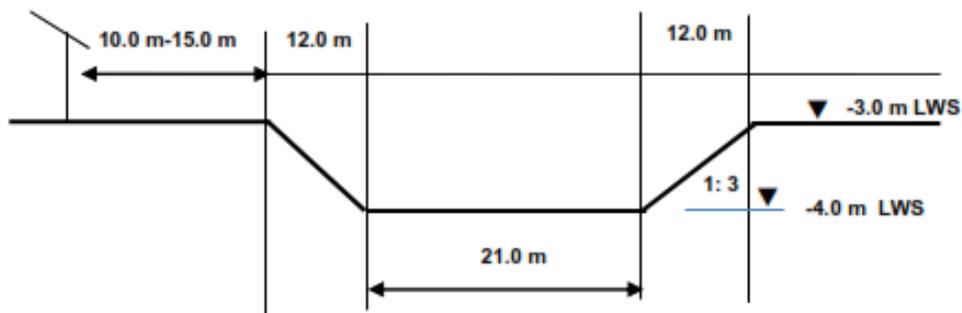
2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Pelabuhan Tanjung Laut Kecamatan Bontang Selatan Kota Bontang Provinsi Kalimantan Timur. **Gambar 1** menunjukkan peta lokasi penelitian dan rencana alur dan kolam pelabuhan, dimana pada alur pelayaran dan juga kolam pelabuhan tersebut dibagi menjadi 31 segmen dengan jarak antar segmen sebesar 20 m.



Gambar 1. Alur dan kolam pelabuhan Pelabuhan Tanjung Laut dan rea perhitungan estimasi volume (ditandai oleh garis biru) [4]

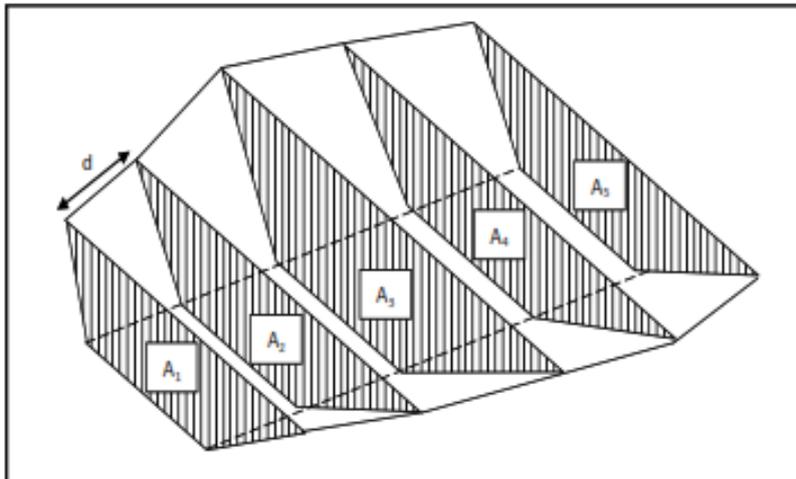
Berdasarkan hasil survey yang dilakukan oleh PT. Marindo Utama Penata Kawasan, alur dan kolam pelabuhan direncanakan memiliki kedalaman -4 m seperti terlihat pada **Gambar 2** dibawah. Area yang ditandai dengan garis biru adalah area yang akan dihitung volume pengerukannya. Diketahui dari hasil survey batimetri, diluar area tersebut kedalaman *draft* kapal yang diperlukan sudah memenuhi, sehingga untuk saat ini tidak diperlukan lagi pengerukan. Jenis tanah yang terdapat pada area penelitian adalah lempung dengan konsistensi lunak, maka kemiringan yang digunakan dalam perencanaan pengerukan volume kolam labuh dan alur pelayaran ini adalah 1:3.



Gambar 2. Profil melintang rencana alur dan kolam pelabuhan Pelabuhan Tanjung Laut [4]

Dengan data existing awal area pengerukan dan desain rencana pengerukan yang telah ditentukan, maka dapat dihitung volume rencana pengerukannya. Volume pengerukan dihitung berdasarkan potongan-potongan melintang pada areal yang akan dikeruk. Pada setiap potongan dihitung jumlah area yang akan dikeruk [m²], kemudian dikalikan dengan jarak antar segmen [m], sehingga didapatkan volume pada setiap segmen. Volume

keseluruhan pengerukan didapatkan dengan menjumlahkan volume pengerukan pada setiap segmen seperti diilustrasikan oleh sketsa pada **Gambar 3** berikut:



Gambar 3. Sketsa Volume area [7]

2.2 Integrasi Numerik

Penghitungan estimasi volume pengerukan di alur pelayaran dan kolam pelabuhan dilakukan dengan tiga pendekatan integrasi numerik, yaitu aturan titik tengah (*Midpoint rule*), aturan trapesium (*Trapezoidal rule*), dan aturan simpson (*Simpson's rule*) untuk perhitungan luas area. Pada ketiga metode pendekatan tersebut dilakukan penentuan interval $[a, b]$ yang kemudian dibagi menjadi n subinterval dengan panjang yang sama. Luas area pada setiap subinterval dapat dihitung dengan menggunakan persamaan masing-masing metode.

Aturan Titik Tengah (*Midpoint rule*)

Asumsikan $f : [a, b] \rightarrow R$ sebagai fungsi yang akan diintegrasikan. Pada aturan titik tengah, digunakan $f\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right)$ sebagai pendekatan untuk nilai pada subinterval. Sehingga didapatkan:

$$h = \frac{b-a}{n} \quad \dots(1)$$

$$p_i = f\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right) \quad \dots(2)$$

dengan:

h merupakan panjang dari subinterval, x_i adalah batas akhir ke- i subinterval untuk $i=0, \dots, n-1$, $x_0 = a$, dan p_i adalah nilai pendekatan untuk seluruh subinterval.

Maka, perhitungan luas suatu persegi panjang dapat didefinisikan sebagai $h \times f\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right)$.

Sehingga untuk menghitung fungsi integral dengan aturan titik tengah dapat dilakukan dengan menggunakan **Persamaan 3**, sebagai berikut:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=0}^{n-1} p_i h \quad \dots(3)$$

Winnicka (2023) menyatakan bahwa aturan titik tengah merupakan salah satu metode pendekatan yang paling tidak akurat, namun dapat menjadi metode yang lebih akurat jika fungsi tidak banyak berubah pada suatu subinterval.

Aturan Trapezium (*Trapezoidal rule*)

Aturan trapesium mirip dengan aturan titik tengah, hanya saja bentuk yang digunakan bukan persegi panjang, namun menggunakan trapesium. Panjang dari setiap subinterval (h) dapat dihitung dengan **Persamaan 1**. Area trapesium P_i untuk $[x_{i-1}, x_i]$ dihitung dengan menggunakan **Persamaan 4**, sebagai berikut:

$$p_i = \frac{y_i + y_{i-1}}{2} h \quad \dots(4)$$

dengan:

$y_i = f(x_i)$ untuk $i=1, \dots, n$. Sehingga integral dari fungsi dengan batas $[a, b]$ dapat dihitung dengan **Persamaan 5**.

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^n p_i \quad \dots(5)$$

Aturan Simpson (*Simpson's rule*)

Aturan Simpson didasarkan pada interpolasi polinomial dan menggunakan polinomial derajat dua. Aturan Simpson adalah metode pendekatan yang paling akurat dibandingkan dua metode pendekatan sebelumnya [1]. Aturan simpson mirip dengan aturan trapesium, karena pada metode ini digunakan h , y_{i-1} dan y_i sebagai tiga sisi bentuk trapesium yang akan dihitung luasnya, dimana sisi keempat adalah parabola yang didekati dengan grafik dari fungsi. Nilai awal dan akhir subinterval digunakan sebagai titik yang diperlukan untuk mendekati fungsi parabola tersebut. Luas area yang dibatasi oleh $[x_{i-1}, x_i]$ dapat dihitung dengan **Persamaan 6** berikut:

$$p_i = h \left(f(x_i) + 4f\left(x_i + \frac{1}{2}h\right) + f(x_i + h) \right) \quad \dots(6)$$

dimana $i=1, \dots, n$ dan $h = \frac{b-a}{n}$. Sehingga integral dari fungsi dengan batas $[a, b]$ dapat dihitung dengan **Persamaan 7**.

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n p_i h \quad \dots(7)$$

Aturan simpson yang digunakan pada penelitian ini adalah aturan 1/3 simpson, dimana integral fungsi dapat didekati dengan menggunakan **Persamaan 8**, sebagai berikut:

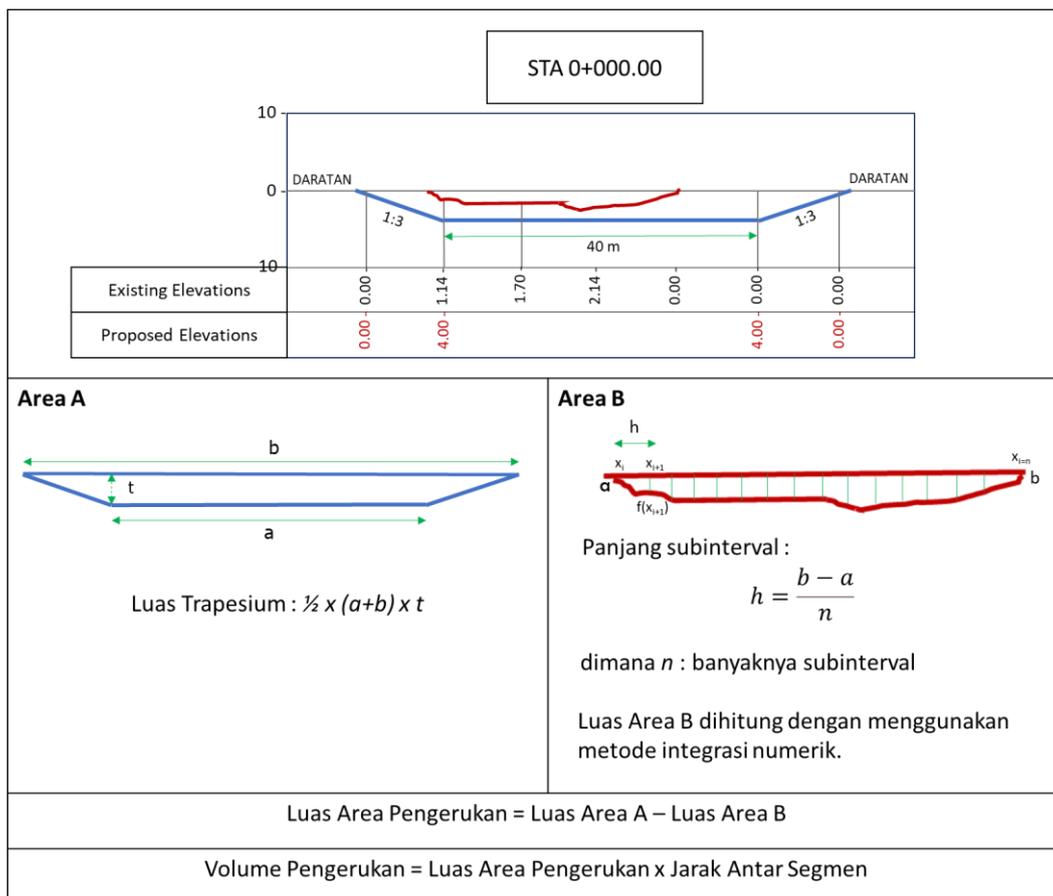
$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{1}{3} h \sum_{i=1}^{n/2} [f(x_{2i-2}) + 4f(x_{2i-1}) + f(x_{2i})] \quad \dots(8)$$

Estimasi volume pengerukan dihitung berdasarkan potongan-potongan melintang pada areal yang akan dikeruk. Batimetri yang digunakan merupakan batimetri hasil survey yang dilakukan oleh PT. Marindo Utama Penata Kawasan pada tahun 2016. Pada penelitian ini diasumsikan tidak ada sedimen yang keluar/masuk pada kolam pelabuhan dan alur

pelayaran Pelabuhan Tanjung Laut. Sebelum menghitung nilai volume keruk, terlebih dahulu dilakukan perhitungan luas area berdasarkan profil melintang seperti terlihat pada **Gambar 3**. Perhitungan tersebut dilakukan mulai dari STA 0+000.0 hingga STA 0+600.0, dengan jarak antar STA/segmen sebesar 20 m.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis perbandingan metode untuk perhitungan estimasi volume pengerukan dilakukan untuk ketiga metode pendekatan. Luas area dan volume hasil perhitungan dengan integrasi numerik dibandingkan dengan perhitungan luas area dan volume pengerukan dari PT Marindo Utama Penata Kawasan pada setiap segmen, mulai dari STA 0+0.000 sampai STA 0+600.0. PT Marindo Utama Penata Kawasan mengestimasi nilai volume pengerukan dengan menggunakan *software* AutoCAD untuk mendapatkan luas area, yang selanjutnya dikalikan dengan jarak antar segmen (20 m) untuk mendapatkan nilai volume pengerukan. Banyaknya subinterval (n) yang digunakan pada ketiga metode pendekatan seragam, yaitu sebanyak 31 subinterval. Sehingga masing-masing segmen panjang subinterval (h) yang bervariasi. memiliki nilai galat diperoleh berdasarkan persentase perbedaan antara estimasi luas area dan volume yang dihitung oleh PT Marindo Utama Penata Kawasan dengan total keseluruhan luas dan volume pada semua segmen yang dihitung dengan tiga metode pendekatan. Nilai galat yang dibandingkan pada masing-masing metode merupakan nilai galat dari total luas area dan nilai galat total volume pengerukan.



Gambar 3. Perhitungan Luas Area Berdasarkan Profil Melintang

Estimasi Volume Pengerukan dengan Persamaan Aturan Titik Tengah

Hasil perhitungan estimasi volume pengerukan pada kolam pelabuhan dan alur pelayaran Pelabuhan Tanjung Laut dengan menggunakan aturan titik tengah ditunjukkan oleh **Tabel 1**.

Hasil perhitungan estimasi luas area dan volume dengan menggunakan metode aturan titik tengah dibandingkan dengan perhitungan estimasi luas area dan volume yang berasal dari PT Marindo Utama Penata Kawasan. Estimasi total luas area yang didapatkan dengan menggunakan aturan titik tengah yaitu sebesar 1.852,190 m², sehingga menghasilkan total volume pengerukan sebesar 35.476,196 m³. Dibandingkan dengan luas dan volume yang dihitung oleh PT Marindo Utama Penata Kawasan, hasil perhitungan dengan aturan titik tengah memiliki nilai galat yang cukup besar, yaitu sebesar 5,75% untuk luas area dan 6,02% untuk volume. Luas area yang terwakili dapat dihitung oleh pendekatan dengan aturan titik tengah ini sebesar 94,25%. Nilai galat pada masing-masing segmen bervariasi, hal ini disebabkan karena *range* $[a,b]$ pada setiap segmen berbeda sehingga menghasilkan panjang subinterval yang bervariasi. Pada perhitungan dengan aturan titik tengah ini, nilai galat minimum didapatkan jika kondisi batrimetri perairan tidak banyak perubahan pada setiap subintervalnya.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Estimasi Volume Pengerukan dengan Menggunakan Aturan Titik Tengah

| SECTION | STA | PT MARINDO UTAMA PENATA KAWASAN | | ATURAN TITIK TENGAH | |
|--------------|-------|------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | AREA [m ²] | VOLUME [m ³] | AREA [m ²] | VOLUME [m ³] |
| 1 | 0+000 | 156,625 | 3.263,390 | 156,760 | 3.270,702 |
| 2 | 0+020 | 169,714 | 2.628,380 | 170,310 | 2.635,823 |
| 3 | 0+040 | 93,124 | 1.965,850 | 93,272 | 1.966,946 |
| | | | ⋮ | | |
| 29 | 0+560 | 8,512 | 148,600 | 9,455 | 154,371 |
| 30 | 0+580 | 6,348 | 101,600 | 5,982 | 130,986 |
| 31 | 0+600 | 3,812 | 35,109 | 7,064 | 70,638 |
| TOTAL | | 1.751,526 | 33.461,259 | 1.852,190 | 35.476,196 |
| GALAT | | | | 5,75% | 6,02% |

Estimasi Volume Pengerukan dengan Persamaan Aturan Trapesium

Hasil perhitungan estimasi volume pengerukan pada kolam pelabuhan dan alur pelayaran Pelabuhan Tanjung Laut dengan menggunakan aturan trapesium ditunjukkan oleh **Tabel 2**, sebagai berikut:

Hasil perhitungan estimasi total volume pengerukan yang didapatkan dengan menggunakan aturan trapesium yaitu sebesar 33.720,209 m³. Dibandingkan dengan perhitungan oleh PT Marindo Penata Kawasan, hasil perhitungan dengan aturan trapesium memiliki nilai galat sebesar 0,77%. Estimasi volume yang terwakili dapat dihitung oleh pendekatan dengan aturan trapesium ini sebesar 99,23%. Nilai perhitungan dengan metode pendekatan aturan trapesium jauh lebih baik jika dibandingkan dengan perhitungan dengan aturan titik tengah. Nilai galat yang dihasilkan $< 10^{-1}$, sehingga dapat dibuktikan bahwa aturan trapesium lebih akurat dibandingkan aturan titik tengah dalam menghitung estimasi volume pengerukan.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Estimasi Volume Pengerukan dengan Menggunakan Aturan Trapezium

| SECTION | STA | PT MARINDO UTAMA PENATA KAWASAN | | ATURAN TRAPESIUM | |
|--------------|-------|------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | AREA [m ²] | VOLUME [m ³] | AREA [m ²] | VOLUME [m ³] |
| 1 | 0+000 | 156,625 | 3.263,390 | 156,760 | 3.270,702 |
| 2 | 0+020 | 169,714 | 2.628,380 | 170,310 | 2.635,823 |
| 3 | 0+040 | 93,124 | 1.965,850 | 93,272 | 1.966,946 |
| | | | ⋮ | | |
| 29 | 0+560 | 8,512 | 148,600 | 9,455 | 154,371 |
| 30 | 0+580 | 6,348 | 101,600 | 5,982 | 130,458 |
| 31 | 0+600 | 3,812 | 35,109 | 7,064 | 70,638 |
| TOTAL | | 1.751,526 | 33.461,259 | 1.764,391 | 33.720,209 |
| GALAT | | | | 0,73% | 0,77% |

Estimasi Volume Pengerukan dengan menggunakan Aturan Simpson

Hasil perhitungan estimasi volume pengerukan pada kolam pelabuhan dan alur pelayaran Pelabuhan Tanjung Laut dengan menggunakan aturan 1/3 Simpson ditunjukkan oleh **Tabel 3**, sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Perhitungan Estimasi Volume Pengerukan dengan Menggunakan Aturan 1/3 Simpson

| SECTION | STA | PT MARINDO UTAMA PENATA KAWASAN | | 1/3 SIMPSON | |
|--------------|-------|------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | AREA [m ²] | VOLUME [m ³] | AREA [m ²] | VOLUME [m ³] |
| 1 | 0+000 | 156,625 | 3.263,390 | 156,810 | 3.277,731 |
| 2 | 0+020 | 169,714 | 2.628,380 | 170,963 | 2.646,000 |
| 3 | 0+040 | 93,124 | 1.965,850 | 93,637 | 1.978,308 |
| | | | ⋮ | | |
| 29 | 0+560 | 8,512 | 148,600 | 9,460 | 153,975 |
| 30 | 0+580 | 6,348 | 101,600 | 5,938 | 129,032 |
| 31 | 0+600 | 3,812 | 35,109 | 6,966 | 69,656 |
| TOTAL | | 1.751,526 | 33.461,259 | 1.754,282 | 33.589,804 |
| GALAT | | | | 0,38% | 0,49% |

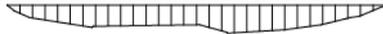
Terjadinya perbedaan besaran volume antara hasil perhitungan oleh PT Marindo Utama Penata Kawasan dengan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan 1/3 Simpson. Total volume yang dihasilkan dalam penggunaan persamaan 1/3 Simpson lebih besar dibanding hasil perhitungan PT. Marindo Utama Penata Kawasan dengan nilai galat sebesar 0,49%. Nilai galat ini menunjukkan hasil perhitungan dengan menggunakan aturan Simpson lebih akurat dibandingkan perhitungan menggunakan aturan titik tengah dan aturan trapesium. Pada studi kasus penelitian ini, pernyataan bahwa aturan Simpson lebih akurat dibandingkan dengan aturan titik tengah dan aturan trapesium telah dapat dibuktikan untuk menghitung estimasi volume pengerukan.

Uji Sensivitas Pias

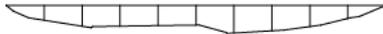
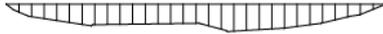
Uji sensitivitas pias adalah pengujian yang dilakukan guna mengetahui pengaruh dari parameter yang digunakan dalam melakukan perhitungan integrasi numerik terhadap tingkat akurasi juga kecepatan konvergensi yang dihasilkan. Perhitungan integrasi numerik dilakukan pada perhitungan luas area. Uji sensitivitas ini dilakukan pada satu contoh profil melintang dari suatu STA/segmen dengan menerapkan beberapa pilihan jumlah subinterval (n), yaitu 10, 30, dan 60. Dengan jumlah subinterval tersebut didapatkan jarak antar subinterval (h) sebesar 3,255 m untuk $n = 10$, 1,086 m untuk $n = 30$, dan 0,543 m untuk $n = 60$, dimana semakin banyak jumlah subinterval maka akan semakin kecil jarak antar subintervalnya.

Hasil perhitungan dengan tiga variasi jumlah subinterval dengan aturan titik tengah ditunjukkan oleh **Tabel 4**, aturan trapesium ditunjukkan oleh **Tabel 5**, dan aturan Simpson ditunjukkan oleh **Tabel 6**.

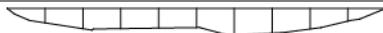
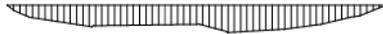
Tabel 4. Hasil Uji Sensitivitas Pias dengan Aturan Titik Tengah pada STA 0+000

| Sketsa Area | n | h [m] | Luas Terhitung [m ²] | Persentase Luas Terwakili [%] |
|---|----|-------|----------------------------------|-------------------------------|
|  | 10 | 3,255 | 157,932 | 99,17% |
|  | 30 | 1,086 | 156,760 | 99,91% |
|  | 60 | 0,543 | 156,612 | 99,99% |

Tabel 5. Hasil Uji Sensitivitas Pias dengan Aturan Trapesium pada STA 0+000

| Area | n | h [m] | Luas Terhitung [m ²] | Persentase Luas Terwakili [%] |
|---|----|-------|----------------------------------|-------------------------------|
|  | 10 | 3,255 | 157,855 | 99,21% |
|  | 30 | 1,086 | 156,760 | 99,91% |
|  | 60 | 0,543 | 156,612 | 99,99% |

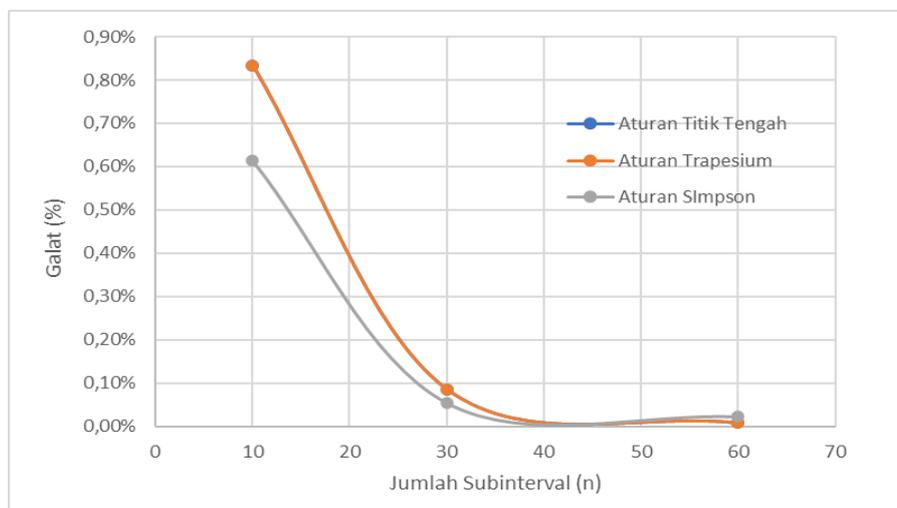
Tabel 6. Hasil Uji Sensitivitas Pias dengan Aturan Simpson pada STA 0+000

| Area | n | h [m] | Luas Terhitung [m ²] | Persentase Luas Terwakili [%] |
|---|----|-------|----------------------------------|-------------------------------|
|  | 10 | 3,255 | 157,587 | 99,39% |
|  | 30 | 1,086 | 156,710 | 99,95% |
|  | 60 | 0,543 | 156,660 | 99,98% |

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan oleh **Tabel 4**, **Tabel 5**, dan **Tabel 6**, dapat diketahui bahwa parameter jumlah subinterval dan jarak antar subinterval berpengaruh terhadap tingkat akurasi dan kecepatan kekonvergensi suatu metode integrasi numerik. Dari ketiga metode yang dilakukan, menunjukkan tingkat akurasi akan semakin bertambah jika jumlah subinterval semakin banyak, sehingga jarak antar subintervalnya menjadi semakin kecil. Nilai galat berkurang seiring dengan bertambahnya jumlah subinterval (n).

Pada penelitian ini, didapatkan hasil perhitungan yang lebih cepat konvergen adalah metode integrasi numerik dengan menggunakan aturan Simpson. Dengan $n=10$, sebesar 99,39% perhitungan luas area yang dihitung dengan menggunakan aturan Simpson telah dapat

mewakili perhitungan luas area yang dihitung oleh PT Marindo Utama Penata Kawasan dengan menggunakan *software* AutoCAD. Persentase keterwakilan luas area yang dihitung dengan aturan Simpson lebih akurat dibandingkan dengan aturan titik tengah dan aturan trapesium. Perbandingan nilai galat perhitungan luas area dari ketiga metode dengan variasi jumlah subinterval diperlihatkan oleh grafik pada **Gambar 4**. Nilai galat yang lebih kecil ditunjukkan oleh hasil perhitungan dengan menggunakan metode aturan Simpson.



Gambar 4. Grafik perbandingan nilai galat dari perhitungan luas area dengan metode Aturan Titik Tengah, Aturan Trapesium, dan Aturan Simpson

Perlu diingat, bahwa metode integrasi numerik merupakan metode perhitungan dengan pendekatan/aproksimasi. Sehingga pasti akan terdapat perbedaan dengan perhitungan eksak atau analitik. Semakin kecil perbedaan tersebut, maka semakin akurat metode pendekatan yang dilakukan. Ketiga metode telah dapat menunjukkan nilai galat yang cukup baik dalam perhitungan luas area dan volume pengerukan.

4. KESIMPULAN

Metode integrasi numerik telah dapat diterapkan pada bidang rekayasa Pelabuhan, yaitu pada perhitungan estimasi volume pengerukan di Pelabuhan Tanjung Laut provinsi Kalimantan timur. Metode integrasi numerik dengan aturan titik tengah, aturan trapesium, dan aturan simpson menunjukkan hasil perhitungan dengan akurasi yang sangat baik dalam mengestimasi luas area dan volume pengerukan. Nilai galat pada aturan Simpson berkurang lebih cepat dibandingkan aturan titik tengah dan aturan trapesium, sehingga dapat dikatakan metode yang paling akurat diantara ketiganya yaitu aturan Simpson. Tingkat akurasi metode akan bertambah dengan bertambahnya jumlah subinterval dan semakin kecilnya jarak antar interval.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih diberikan kepada PT Marindo Utama Penata Kawasan yang telah menyediakan data hidro-oseanografi dan data perhitungan volume dredging di Pelabuhan Tanjung Laut, Kalimantan Timur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapra, S. C., & Canale, R. P. 1991. *Metode Numerik Untuk Teknik Dengan Penerapan Pada Komputer Pribadi*. Jakarta: UI-Press.
- [2] G. C. White and E. G. Cooch, "Population abundance estimation with heterogeneous encounter probabilities using numerical integration," *The Journal of Wildlife Management*, vol. 81, no. 2, pp. 322–336, 2017.
- [3] M. Liang and T. Simos, "A new four stages symmetric two-step method with vanished phase-lag and its first derivative for the numerical integration of the schrödinger equation," *Journal of Mathematical Chemistry*, vol. 54, no. 5, pp. 1187–1211, 2016.
- [4] PT Marindo Utama Penata Kawasan. 2016. *SID Pengerukan Alur Pelayaran/Kolam Pelabuhan Tanjung Laut Provinsi Kalimantan Timur T.A.2016*
- [5] Winnicka, A. 2023. *Comparison of numerical integration methods*. Poland. Silesian University of Technology.
- [6] W. Wei, B. Zhou, D. Połap, and M. Woźniak, "A regional adaptive variational pde model for computed tomography image reconstruction," *Pattern Recognition*, vol. 92, pp. 64–81, 2019.
- [7] Zulkarnain, I., Djunarsjah, E., Setiyadi, J., & Jantarto, D. 2016. *Analisis Perbandingan Perhitungan Volume Pengerukan Dengan Perhitungan Manual Dan Program Surfer. Analisis Perbandingan Perhitungan Volume Pengerukan Dengan Perhitungan Manual Dan Program Surfer (Studi Kasus Pelabuhan Khusus Batubara PT. Indominco Mandiri Bontang)*, 21-28.