



**UNIVERSITAS GADJAH MADA  
FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO DAN TEKNOLOGI INFORMASI**

---

**TUGAS METODE NUMERIS**

**INTEGRASI NUMERIK DENGAN METODE  
TRAPEZOIDAL, RICHARDSON, ROMBERG, ADAPTIVE,  
DAN GAUSSIAN QUADRATURE**

Ditulis oleh:

**Kelompok:**

- 1. Nathanael Satya Saputra (NIM NAEL)**
- 2. Muhammad Nafal Zakin Rustanto (24/535255/TK/59364)**
- 3. Yohanes Anthony Saputra (NIM ANTHONY)**
- 4. Johannes De Deo Dimas Aryobimo (24/540351/TK/59948)**

## **BAGIAN 1: Dasar Teori**

### **1.1. Integrasi Analitik (Metode Eksak)**

Integrasi analitik adalah metode perhitungan integral menggunakan rumus-rumus kalkulus secara langsung. Metode ini memberikan nilai eksak (tepat) dari suatu integral jika fungsi yang diintegralkan memiliki antiturunan yang dapat ditentukan.

**Definisi Integral Tentu:**

Integral tentu dari fungsi  $f(x)$  pada interval  $[a, b]$  didefinisikan sebagai:

$$I = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

di mana  $F(x)$  adalah antiturunan dari  $f(x)$ , yaitu  $F'(x) = f(x)$ .

**Teorema Fundamental Kalkulus:**

Jika  $f(x)$  kontinu pada interval  $[a, b]$  dan  $F(x)$  adalah antiturunan dari  $f(x)$ , maka:

$$\int_a^b f(x) dx = F(x) \Big|_a^b = F(b) - F(a)$$

**Kegunaan:**

Hasil dari integrasi analitik digunakan sebagai nilai pembanding (nilai eksak) untuk mengevaluasi akurasi metode-metode integrasi numerik. Error dari metode numerik dihitung sebagai selisih absolut antara hasil numerik dengan nilai eksak ini.

### Algoritma:

1. Tentukan fungsi  $f(x)$  dan batas integrasi  $[a, b]$
2. Cari antiturunan  $F(x)$  dari  $f(x)$
3. Hitung  $F(b) - F(a)$
4. Hasil adalah nilai eksak integral

### Implementasi Python:

```

1 import numpy as np
2
3 # Contoh untuk f(x) = cos(x) pada [0, pi/2]
4 a = 0
5 b = np.pi / 2
6 # Antiturunan cos(x) adalah sin(x)
7 exact = np.sin(b) - np.sin(a) # = 1.0
8
9 # Contoh untuk f(x) = x^2 pada [0, 1]
10 a = 0
11 b = 1
12 # Antiturunan x^2 adalah x^3/3
13 exact = (b**3 / 3) - (a**3 / 3) # = 1/3

```

## 1.2. Metode Trapezoidal Rule

Metode *Trapezoidal Rule* merupakan salah satu metode numerik untuk menghitung pendekatan integral tentu dari suatu fungsi yang sulit atau tidak dapat diintegalkan secara analitik. Ide dari metode ini adalah dengan membagi daerah di bawah kurva fungsi  $f(x)$  pada interval  $[a, b]$  menjadi sejumlah bagian kecil yang berbentuk trapesium, kemudian menjumlahkan luas seluruh trapesium tersebut untuk memperoleh nilai pendekatan dari integral.

Secara matematis, integral tentu dari  $f(x)$  pada interval  $[a, b]$  dapat ditulis sebagai:

$$\int_a^b f(x) dx$$

Jika interval  $[a, b]$  dibagi menjadi  $n$  subinterval yang sama panjang dengan lebar  $h = \frac{b-a}{n}$ , maka dengan pendekatan *Trapezoidal Rule* nilai integral yakni

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} \left[ f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right]$$

dengan  $x_0 = a$ ,  $x_n = b$ , dan  $x_i = a + i \cdot h$  untuk  $i = 1, 2, \dots, n - 1$ .

### Algoritma:

- Input: fungsi  $f(x)$ , batas  $a$  dan  $b$ , jumlah subinterval  $n$
1. Hitung  $h = (b - a) / n$

2. Buat array  $x$  dengan  $n+1$  titik:  $x[i] = a + i \cdot h$
  3. Hitung nilai fungsi  $y[i] = f(x[i])$  untuk semua  $i$
  4.  $result = h * (0.5 * y[0] + \sum(y[1] \text{ sampai } y[n-1]) + 0.5 * y[n])$
- Output: result

### Implementasi Python:

```

1 import numpy as np
2
3 def trapezoidal_rule(f, a, b, n):
4     """
5         Metode Trapezoidal Rule
6         f: fungsi yang akan diintegralkan
7         a: batas bawah
8         b: batas atas
9         n: jumlah subinterval
10    """
11    h = (b - a) / n
12    x = np.linspace(a, b, n + 1)
13    y = f(x)
14
15    result = h * (0.5 * y[0] + np.sum(y[1:-1]) + 0.5 * y[-1])
16    return result
17
18 # Contoh penggunaan
19 def f(x):
20     return np.cos(x)
21
22 result = trapezoidal_rule(f, 0, np.pi/2, 4)

```

## 1.3. Metode Richardson Extrapolation

**Richardson Extrapolation** adalah teknik numerik untuk meningkatkan akurasi hasil pendekatan dengan mengkombinasikan beberapa hasil pendekatan yang memiliki ukuran langkah berbeda. Metode ini sangat efektif untuk mempercepat konvergensi hasil numerik.

### Prinsip Dasar:

Misalkan  $N(h)$  adalah pendekatan numerik dari nilai eksak  $N$  dengan ukuran langkah  $h$ . Jika error dapat dinyatakan sebagai deret pangkat dari  $h$ :

$$N(h) = N + a_1 h^p + a_2 h^{2p} + a_3 h^{3p} + \dots$$

Maka dengan menggunakan dua pendekatan dengan ukuran langkah berbeda ( $h$  dan  $\frac{h}{2}$ ), kita dapat mengeliminasi suku error orde terendah.

### Rumus Richardson Extrapolation:

Untuk integrasi numerik menggunakan Trapezoidal Rule, formula Richardson Extrapolation diberikan oleh:

$$R_{i,j} = R_{i,j-1} + \frac{R_{i,j-1} - R_{i-1,j-1}}{4^j - 1}$$

di mana:

- $R_{i,0}$  adalah hasil Trapezoidal Rule dengan  $n = 2^i$  subinterval
- $R_{i,j}$  adalah hasil ekstrapolasi pada level  $i$  dan kolom  $j$
- Setiap kolom  $j$  mengeliminasi error orde  $O(h^{2j+2})$

### Tabel Richardson:

Tabel Richardson memiliki struktur:

$i$	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
0	$R_{0,0}$			
1		$R_{1,0}$	$R_{1,1}$	
2		$R_{2,0}$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$
3		$R_{3,0}$	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$
				$R_{3,3}$

Nilai pada diagonal utama ( $R_{0,0}, R_{1,1}, R_{2,2}, \dots$ ) menunjukkan peningkatan akurasi yang signifikan.

### Algoritma:

Input: fungsi  $f(x)$ , batas  $a$  dan  $b$ ,  $\text{max\_level}$   
1. Inisialisasi matriks  $R$  berukuran  $\text{max\_level} \times \text{max\_level}$   
2. Untuk  $i = 0$  sampai  $\text{max\_level}-1$ :  
    a.  $n = 2^i$   
    b.  $R[i][0] = \text{trapezoidal\_rule}(f, a, b, n)$   
3. Untuk  $j = 1$  sampai  $\text{max\_level}-1$ :  
    a. Untuk  $i = j$  sampai  $\text{max\_level}-1$ :  
         $R[i][j] = R[i][j-1] + (R[i][j-1] - R[i-1][j-1]) / (4^j - 1)$   
4. Hasil terbaik adalah  $R[\text{max\_level}-1][\text{max\_level}-1]$   
Output: matriks  $R$

### Implementasi Python:

```
1 import numpy as np
2
3 def richardson_extrapolation(f, a, b, max_level=5):
4     """
5         Metode Richardson Extrapolation
6         Menggunakan trapezoidal rule sebagai basis dan melakukan
7         ekstrapolasi
8     """
9     R = np.zeros((max_level, max_level))
10
11    # Kolom pertama: hasil trapezoidal rule dengan  $n = 2^i$ 
12    for i in range(max_level):
13        n = 2**i
14        R[i][0] = trapezoidal_rule(f, a, b, n)
15
16    # Richardson extrapolation untuk kolom-kolom berikutnya
17    for j in range(1, max_level):
18        for i in range(j, max_level):
19            R[i][j] = R[i][j-1] + (R[i][j-1] - R[i-1][j-1]) / (4**j)
```

```

20         - 1)
21
22     return R
23
24 # Contoh penggunaan
25 richardson = richardson_extrapolation(f, 0, np.pi/2, max_level=5)
26 result = richardson[4][4] # Hasil terbaik

```

## 1.4. Metode Romberg Integration

**Romberg Integration** adalah metode integrasi numerik yang menggabungkan Trapezoidal Rule dengan Richardson Extrapolation. Perbedaan utama dengan Richardson standar adalah cara menghitung kolom pertama menggunakan teknik rekursif yang lebih efisien.

### Rumus Romberg:

Kolom pertama dihitung dengan:

$$R_{0,0} = \frac{b-a}{2}[f(a) + f(b)]$$

$$R_{i,0} = \frac{1}{2}R_{i-1,0} + h_i \sum_{k=1}^{2^{i-1}} f(a + (2k-1)h_i)$$

di mana  $h_i = \frac{b-a}{2^i}$ .

Untuk kolom berikutnya, menggunakan Richardson Extrapolation:

$$R_{i,j} = R_{i,j-1} + \frac{R_{i,j-1} - R_{i-1,j-1}}{4^j - 1}$$

### Algoritma:

Input: fungsi  $f(x)$ , batas  $a$  dan  $b$ ,  $\text{max\_level}$

1. Inisialisasi matriks  $R$  berukuran  $\text{max\_level} \times \text{max\_level}$
2.  $R[0][0] = 0.5 * (b - a) * (f(a) + f(b))$
3. Untuk  $i = 1$  sampai  $\text{max\_level}-1$ :
  - a.  $h = (b - a) / 2^i$
  - b.  $\text{sum\_val} = 0$
  - c. Untuk  $k = 1$  sampai  $2^{i-1}$ :
  $\text{sum\_val} += f(a + (2*k - 1) * h)$
  - d.  $R[i][0] = 0.5 * R[i-1][0] + h * \text{sum\_val}$
4. Untuk  $i = 1$  sampai  $\text{max\_level}-1$ :
  - a. Untuk  $j = 1$  sampai  $i$ :
  $R[i][j] = R[i][j-1] + (R[i][j-1] - R[i-1][j-1]) / (4^j - 1)$

Output: matriks  $R$

### Implementasi Python:

```

1 import numpy as np
2
3 def romberg_integration(f, a, b, max_level=5):

```

```

4      """
5      Metode Romberg Integration
6      Menghasilkan tabel Romberg R[i][j]
7      """
8
9
10     R = np.zeros((max_level, max_level))
11
12
13     # R[0][0] menggunakan trapezoidal rule dengan 1 interval
14     R[0][0] = 0.5 * (b - a) * (f(a) + f(b))
15
16     for i in range(1, max_level):
17         h = (b - a) / (2**i)
18
19         # Hitung sum untuk titik-titik baru
20         sum_val = 0
21         for k in range(1, 2**i + 1):
22             sum_val += f(a + (2*k - 1) * h)
23
24         R[i][0] = 0.5 * R[i-1][0] + h * sum_val
25
26     # Richardson extrapolation
27     for j in range(1, i + 1):
28         R[i][j] = R[i][j-1] + (R[i][j-1] - R[i-1][j-1]) / (4**j - 1)
29
30
31     return R
32
33
34 # Contoh penggunaan
35 romberg = romberg_integration(f, 0, np.pi/2, max_level=5)
36 result = romberg[4][4] # Hasil terbaik

```

## 1.5. Metode Adaptive Integration

**Adaptive Integration** adalah metode integrasi numerik yang secara otomatis menyesuaikan ukuran interval berdasarkan perilaku fungsi. Metode ini menggunakan Simpson's Rule sebagai basis dan membagi interval menjadi subinterval yang lebih kecil jika diperlukan untuk mencapai toleransi error yang ditentukan.

### Simpson's Rule:

Untuk interval  $[a, b]$ :

$$S = \frac{h}{6}[f(a) + 4f(c) + f(b)]$$

di mana  $c = \frac{a+b}{2}$  dan  $h = b - a$ .

### Kriteria Adaptif:

Interval dibagi dua jika:

$$|S_2 - S| > 15 \times \text{tol}$$

di mana  $S$  adalah hasil Simpson untuk keseluruhan interval dan  $S_2 = S_{\text{left}} + S_{\text{right}}$  adalah hasil dari dua subinterval.

### Algoritma:

Input: fungsi  $f(x)$ , batas  $a$  dan  $b$ , toleransi  $tol$ ,  $max\_depth$

1. Fungsi `simpson_rule(a, b):`  
 $c = (a + b) / 2$   
 $h = b - a$   
`return (h/6) * (f(a) + 4*f(c) + f(b))`
2. Fungsi `adaptive_aux(a, b, tol, S, fa, fb, fc, depth):`
  - a. Hitung titik tengah:  $d = (a+c)/2$ ,  $e = (c+b)/2$
  - b. Hitung nilai fungsi:  $fd = f(d)$ ,  $fe = f(e)$
  - c.  $S_{left} = (c-a)/6 * (fa + 4*fd + fc)$
  - d.  $S_{right} = (b-c)/6 * (fc + 4*fe + fb)$
  - e.  $S_2 = S_{left} + S_{right}$
  - f. Jika  $depth \leq 0$  atau  $|S_2 - S| \leq 15*tol$ :  
`return S2 + (S2 - S)/15`
  - g. Jika tidak:  
`return adaptive_aux(a, c, ...) + adaptive_aux(c, b, ...)`
3.  $c = (a + b) / 2$
4. Hitung  $S = simpson\_rule(a, b)$
5. `return adaptive_aux(a, b, tol, S, f(a), f(b), f(c), max_depth)`

Output: hasil integral

### Implementasi Python:

```
1 import numpy as np
2
3 def adaptive_simpson(f, a, b, tol=1e-10, max_depth=50):
4     """
5         Metode Adaptive Integration menggunakan Simpson's Rule
6     """
7     def simpson_rule(f, a, b):
8         """Simpson's rule untuk interval [a, b]"""
9         c = (a + b) / 2
10        h = b - a
11        return (h / 6) * (f(a) + 4 * f(c) + f(b))
12
13    def adaptive_aux(f, a, b, tol, S, fa, fb, fc, depth):
14        """
15            Fungsi rekursif untuk adaptive integration"""
16        c = (a + b) / 2
17        d = (a + c) / 2
18        e = (c + b) / 2
19
20        fd = f(d)
21        fe = f(e)
22
23        Sleft = (c - a) / 6 * (fa + 4 * fd + fc)
24        Sright = (b - c) / 6 * (fc + 4 * fe + fb)
25        S2 = Sleft + Sright
```

```

26     if depth <= 0 or abs(S2 - S) <= 15 * tol:
27         return S2 + (S2 - S) / 15
28
29     return (adaptive_aux(f, a, c, tol/2, Sleft, fa, fc, fd,
30                          depth-1) +
31             adaptive_aux(f, c, b, tol/2, Sright, fc, fb, fe,
32                          depth-1))
33
34     c = (a + b) / 2
35     fa = f(a)
36     fb = f(b)
37     fc = f(c)
38     S = simpson_rule(f, a, b)
39
40 # Contoh penggunaan
41 result = adaptive_simpson(f, 0, np.pi/2)

```

## 1.6. Metode Gaussian Quadrature

**Gaussian Quadrature** adalah metode integrasi numerik yang menggunakan titik-titik sampling optimal (nodes) dan bobot (weights) yang telah ditentukan secara matematis untuk memberikan akurasi maksimal dengan jumlah evaluasi fungsi minimal.

### Rumus Umum:

Untuk interval  $[-1, 1]$ :

$$\int_{-1}^1 f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n w_i f(x_i)$$

di mana  $x_i$  adalah nodes (Gauss-Legendre) dan  $w_i$  adalah weights.

### Transformasi ke Interval $[a, b]$ :

Untuk interval  $[a, b]$ , gunakan transformasi:

$$x = \frac{1}{2}[(b-a)t + (a+b)]$$

sehingga:

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \frac{b-a}{2} \int_{-1}^1 f\left(\frac{1}{2}[(b-a)t + (a+b)]\right) dt \\ &\approx \frac{b-a}{2} \sum_{i=1}^n w_i f\left(\frac{1}{2}[(b-a)x_i + (a+b)]\right) \end{aligned}$$

### Nodes dan Weights untuk 5-point Gauss-Legendre:

$x_i$ (nodes)	$w_i$ (weights)
-0.9061798459	0.2369268851
-0.5384693101	0.4786286705
0.0	0.5688888889
0.5384693101	0.4786286705
0.9061798459	0.2369268851

### Algoritma:

Input: fungsi  $f(x)$ , batas a dan b, jumlah titik n

1. Tentukan nodes dan weights untuk n-point:

- Jika  $n=5$ , gunakan tabel di atas
- Jika tidak, hitung dari polinomial Legendre

2.  $result = 0$

3. Untuk  $i = 1$  sampai n:

- a.  $x = 0.5 * ((b - a) * nodes[i] + (a + b))$
- b.  $result += weights[i] * f(x)$

4.  $result *= 0.5 * (b - a)$

Output: result

### Implementasi Python:

```

1 import numpy as np
2
3 def gaussian_quadrature(f, a, b, n=5):
4     """
5         Metode Gaussian Quadrature
6         Menggunakan n-point Gauss-Legendre quadrature
7     """
8     if n == 5:
9         # 5-point Gauss-Legendre nodes dan weights
10        nodes = np.array([
11            -0.9061798459386640,
12            -0.5384693101056831,
13            0.0,
14            0.5384693101056831,
15            0.9061798459386640
16        ])
17
18        weights = np.array([
19            0.2369268850561891,
20            0.4786286704993665,
21            0.5688888888888889,
22            0.4786286704993665,
23            0.2369268850561891
24        ])
25    else:
26        # Untuk n lain, gunakan numpy (opsional)
27        nodes, weights = np.polynomial.legendre.leggauss(n)
28
29    # Transformasi dari [-1, 1] ke [a, b]
30    result = 0

```

```

31     for i in range(len(nodes)):
32         x = 0.5 * ((b - a) * nodes[i] + (a + b))
33         result += weights[i] * f(x)
34
35     result *= 0.5 * (b - a)
36     return result
37
38 # Contoh penggunaan
39 result = gaussian_quadrature(f, 0, np.pi/2, n=5)

```

## BAGIAN 2: Langkah Perhitungan pada Program

### 2.1. Perhitungan Integrasi Analitik (Nilai Eksak)

**Fungsi 1:**  $f(x) = \cos(x)$  pada interval  $[0, \frac{\pi}{2}]$

Langkah perhitungan:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \int_0^{\pi/2} \cos(x) dx \\
&= \sin(x) \Big|_0^{\pi/2} \\
&= \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) - \sin(0) \\
&= 1 - 0 \\
&= 1
\end{aligned}$$

**Nilai Eksak:**  $I_1 = 1.0$

**Fungsi 2:**  $f(x) = x^2$  pada interval  $[0, 1]$

Langkah perhitungan:

$$\begin{aligned}
I_2 &= \int_0^1 x^2 dx \\
&= \frac{x^3}{3} \Big|_0^1 \\
&= \frac{1^3}{3} - \frac{0^3}{3} \\
&= \frac{1}{3} - 0 \\
&= \frac{1}{3}
\end{aligned}$$

**Nilai Eksak:**  $I_2 = 0.333333\dots$  atau  $\frac{1}{3}$

### 2.2. Perhitungan Metode Trapezoidal Rule

**Fungsi 1:**  $f(x) = \cos(x)$  pada interval  $[0, \frac{\pi}{2}]$

**Fungsi 2:**  $f(x) = x^2$  pada interval  $[0, 1]$

Langkah perhitungan dengan program Python:

Pertama, impor library numpy agar mempermudah melakukan perhitungan

```
1 import numpy as np
```

Kemudian, mendeklarasi fungsi untuk melakukan perhitungan metode *Trapezoidal Rule*, fungsi ini menerima input :

- f: fungsi yang akan diintegralkan, yaitu fungsi 1 :  $f(x) = \cos(x)$  dan fungsi 2 :  $f(x) = x^2$
- a: batas bawah, yaitu 0 untuk fungsi 1 dan fungsi 2
- b: batas atas, yaitu  $\frac{\pi}{2}$  untuk fungsi 1 dan 1 untuk fungsi 2
- n: jumlah subinterval, yaitu  $n = [4, 8]$

```
1 def trapezoidal_rule(f, a, b, n):
```

Fungsi ini bekerja dengan tiga langkah utama: menentukan lebar trapezoid, menghasilkan grid titik evaluasi, dan mengukur tinggi fungsi di setiap titik

```
1 h = (b - a) / n
2 x = np.linspace(a, b, n + 1)
3 y = f(x)
```

Perhitungan akhir dilakukan dengan menerapkan rumus inti trapezoidal rule: mengalikan lebar trapezoid dengan penjumlahan nilai fungsi di semua titik, dimana nilai di ujung-ujung interval diberi bobot 0.5 dan nilai di titik-titik tengah diberi bobot penuh, kemudian hasilnya langsung dikembalikan sebagai solusi integral numerik

```
1 result = h * (0.5 * y[0] + np.sum(y[1:-1]) + 0.5 * y[-1])
2 return result
```

**Hasil Akhir :**

**Soal 1:**  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(x)dx$

Integral fungsi  $\cos(x)$  pada interval  $[0, \frac{\pi}{2}]$  memiliki nilai eksak 1.000000000000000. Berikut hasil aproksimasi dengan metode *Trapezoidal Rule*:

- $n = 4$ : Nilai 0.987115809972776 dengan error  $1.288420 \times 10^{-2}$
- $n = 8$ : Nilai 0.996785171886169 dengan error  $3.214828 \times 10^{-3}$

**Soal 2:**  $\int_0^1 x^2 dx$

Integral fungsi  $x^2$  pada interval  $[0, 1]$  memiliki nilai eksak 0.333333333333333. Berikut hasil aproksimasi dengan metode *Trapezoidal Rule*:

- $n = 4$ : Nilai 0.343750000000000 dengan error  $1.041667 \times 10^{-2}$
- $n = 8$ : Nilai 0.335937500000000 dengan error  $2.604167 \times 10^{-3}$

Terlihat bahwa dengan penambahan jumlah subinterval  $n$ , nilai aproksimasi semakin mendekati nilai eksak dan error semakin mengecil.

### 2.3. Perhitungan Metode Richardson Extrapolation

[Isi langkah-langkah perhitungan menggunakan metode Richardson Extrapolation]

### 2.4. Perhitungan Metode Romberg Integration

**Fungsi 1:**  $f(x) = \cos(x)$  pada interval  $[0, \frac{\pi}{2}]$

**Fungsi 2:**  $f(x) = x^2$  pada interval  $[0, 1]$

Langkah perhitungan dengan program Python:

Impor *Library NumPy*

```
1 import numpy as np
```

Mendeklarasikan fungsi romberg integration dengan menerima input:

- **f:** fungsi yang akan diintegalkan, fungsi 1 :  $f(x) = \cos(x)$  dan fungsi 2 :  $f(x) = x^2$
- **a:** batas bawah integral, yaitu 0 untuk fungsi 1 dan fungsi 2
- **b:** batas atas integral, yaitu  $\frac{\pi}{2}$  untuk fungsi 1 dan 1 untuk fungsi 2
- **max\_level=3:** jumlah level ekstrapolasi (opsional, default 3)

```
1 def romberg_integration(f, a, b, max_level=3):
```

Kode ini membuat tabel berbentuk matriks nol dengan ukuran  $maxlevel \times maxlevel$ . Tabel ini akan menyimpan semua perhitungan integral pada berbagai tingkat akurasi. Setiap elemen  $R[i, j]$  mewakili aproksimasi integral di level trapezoidal i dan level ekstrapolasi j.

```
1 R = np.zeros((max_level, max_level))
```

Metode Romberg menggunakan dua loop: pertama menghitung aproksimasi trapezoidal dengan subinterval  $2^i$  yang disimpan di  $R[i, 0]$ , lalu loop kedua melakukan ekstrapolasi Richardson dengan rumus  $R[i, j] = R[i, j - 1] + \frac{R[i, j - 1] - R[i - 1, j - 1]}{4^{j-1}}$  untuk meningkatkan akurasi secara eksponensial melalui eliminasi error berurutan.

```
1 R = np.zeros((max_level, max_level))
2 for i in range(max_level):
3     n = 2**i
4     R[i, 0] = trapezoidal_rule(f, a, b, n)
5
6     for j in range(1, i + 1):
7         R[i, j] = R[i, j-1] + (R[i, j-1] - R[i-1, j-1]) / (4**j
8             - 1)
8
9 return R, R[max_level-1, max_level-1]
```

Tabel Romberg yang dihasilkan berbentuk segitiga, dimana elemen diagonal  $R[i,i]$  memberikan aproksimasi terbaik. Nilai di pojok kanan bawah tabel merupakan hasil integral paling akurat yang diperoleh dari metode ini.

**Soal 1:**  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(x) dx$

Integral fungsi  $\cos(x)$  pada interval  $[0, \frac{\pi}{2}]$  memiliki nilai eksak  $1.000000000000000$ . Berikut hasil aproksimasi dengan metode *Romberg Integration*:

$$\text{Tabel Romberg: } \begin{bmatrix} 0.78539816 \\ 0.94805945 & 1.00227988 \\ 0.98711580 & 1.00013458 & 0.99999157 \end{bmatrix}$$

$$\text{Hasil} = 0.99999157$$

$$\text{Error} = |1.000000000000000 - 0.99999157| = 8.43 \times 10^{-6}$$

Metode ini menunjukkan konvergensi cepat melalui penyempurnaan nilai pada setiap iterasi tabel Romberg. Nilai pada kolom terakhir mendekati hasil eksak dengan sangat baik, menandakan bahwa estimasi integral semakin akurat pada tingkat iterasi yang lebih tinggi.

**Soal 2:**  $\int_0^1 x^2 dx$

Integral fungsi  $x^2$  pada interval  $[0, 1]$  memiliki nilai eksak  $0.333333333333333$ . Berikut hasil aproksimasi dengan metode *Romberg Integration*:

$$\text{Tabel Romberg: } \begin{bmatrix} 0.50000000 \\ 0.37500000 & 0.33333333 \\ 0.34375000 & 0.33333333 & 0.33333333 \end{bmatrix}$$

$$\text{Hasil} = 0.33333333$$

$$\text{Error} = 0$$

Metode *Romberg Integration* memberikan hasil eksak untuk fungsi polinomial sederhana seperti  $x^2$ . Hal ini terjadi karena proses *Richardson extrapolation* mampu menghilangkan seluruh komponen error pada pendekatan aturan trapezoidal, sehingga hasil konvergen tepat pada nilai integral sebenarnya.

## 2.5. Perhitungan Metode Adaptive Integration

**Soal 1:** Hitung  $\int_0^{\pi/2} \cos(x) dx$  menggunakan Adaptive Simpson

**Penjelasan Metode Simpson:**

Simpson's Rule adalah metode integrasi numerik yang mengaproksimasi fungsi dengan polinomial kuadrat (parabola). Untuk interval  $[a, b]$  dengan titik tengah  $c = \frac{a+b}{2}$ , rumus Simpson adalah:

$$S = \frac{h}{6}[f(a) + 4f(c) + f(b)]$$

di mana  $h = b - a$  adalah lebar interval. Rumus ini memberikan hasil eksak untuk polinomial berderajat  $\leq 3$ , sehingga sangat akurat untuk fungsi yang smooth seperti  $\cos(x)$ .

## Konsep Adaptive (Adaptif):

Metode adaptive berarti algoritma secara otomatis membagi interval menjadi subinterval yang lebih kecil jika diperlukan. Kriterianya: jika  $|S_2 - S| > 15 \times \text{tol}$ , maka interval dibagi lagi, di mana  $S$  adalah hasil Simpson untuk keseluruhan interval dan  $S_2$  adalah hasil dari dua subinterval.

## Implementasi Python:

```
1 a1 = 0
2 b1 = np.pi / 2
3 tol = 1e-10
4 max_depth = 50
```

Inisialisasi parameter integral. Pada kasus ini  $a = 0$  adalah batas bawah,  $b = \frac{\pi}{2} \approx 1.5708$  adalah batas atas,  $\text{tol} = 10^{-10}$  adalah toleransi error yang sangat kecil, dan  $\text{max\_depth} = 50$  adalah kedalaman rekursi maksimal untuk mencegah infinite loop.

```
1 c = (a + b) / 2
2 fa = f(a) # f(0) = cos(0) = 1.0
3 fb = f(b) # f(pi/2) = cos(pi/2) = 0.0
4 fc = f(c) # f(pi/4) = cos(pi/4) = 0.707106...
```

Hitung titik tengah dan nilai fungsi pada tiga titik penting. Pada kasus ini:  $c = \frac{0+\pi/2}{2} = \frac{\pi}{4} \approx 0.7854$ . Nilai fungsi:  $f(0) = \cos(0) = 1.0$ ,  $f(\pi/2) = \cos(\pi/2) = 0.0$ , dan  $f(\pi/4) = \cos(\pi/4) = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0.7071$ .

```
1 def simpson_rule(f, a, b):
2     c = (a + b) / 2
3     h = b - a
4     return (h / 6) * (f(a) + 4 * f(c) + f(b))
5
6 S = simpson_rule(f, a, b)
```

Fungsi Simpson's Rule untuk interval  $[a, b]$ . Pada kasus ini:  $h = \frac{\pi}{2} - 0 = \frac{\pi}{2} \approx 1.5708$ , sehingga  $S = \frac{1.5708}{6}[1.0 + 4(0.7071) + 0.0] = 0.2618 \times 3.8284 \approx 1.0023$ . Ini adalah aproksimasi awal dengan error sekitar 0.0023 dari nilai eksak 1.0.

```
1 def adaptive_aux(f, a, b, tol, S, fa, fb, fc, depth):
2     c = (a + b) / 2
3     d = (a + c) / 2 # titik tengah interval kiri
4     e = (c + b) / 2 # titik tengah interval kanan
5
6     fd = f(d)
7     fe = f(e)
```

Fungsi rekursif adaptive dimulai dengan menghitung 2 titik tambahan untuk membagi interval menjadi dua bagian. Pada iterasi pertama ( $\text{depth}=50$ ):  $d = \frac{0+\pi/4}{2} = \frac{\pi}{8} \approx 0.3927$  dan  $e = \frac{\pi/4+\pi/2}{2} = \frac{3\pi}{8} \approx 1.1781$ . Nilai fungsi:  $f(d) = \cos(\pi/8) \approx 0.9239$  dan  $f(e) = \cos(3\pi/8) \approx 0.3827$ .

```
1 Sleft = (c - a) / 6 * (fa + 4 * fd + fc)
2 Sright = (b - c) / 6 * (fc + 4 * fe + fb)
3 S2 = Sleft + Sright
```

Hitung Simpson's Rule untuk kedua subinterval. Interval kiri  $[0, \pi/4]$ :  $S_{\text{left}} = \frac{\pi/4}{6}[1.0 + 4(0.9239) + 0.7071] \approx 0.5236$ . Interval kanan  $[\pi/4, \pi/2]$ :  $S_{\text{right}} = \frac{\pi/4}{6}[0.7071 + 4(0.3827) + 0.0] \approx 0.4767$ . Total:  $S_2 = 0.5236 + 0.4767 = 1.0003$ .

```

1 if depth <= 0 or abs(S2 - S) <= tol:
2     return S2 + (S2 - S) / 15

```

Cek kriteria konvergensi. Pada iterasi pertama:  $|S_2 - S| = |1.0003 - 1.0023| = 0.0020$  dan  $15 \times \text{tol} = 15 \times 10^{-10} = 1.5 \times 10^{-9}$ . Karena  $0.0020 > 1.5 \times 10^{-9}$ , kondisi tidak terpenuhi, sehingga belum konvergen. Jika sudah konvergen, kembalikan hasil dengan koreksi Richardson:  $S_2 + \frac{S_2 - S}{15}$ .

```

1 return (adaptive_aux(f, a, c, tol/2, Sleft, fa, fc, fd, depth-1) +
2         adaptive_aux(f, c, b, tol/2, Sright, fc, fb, fe, depth-1))

```

Jika belum konvergen, lakukan rekursi pada kedua subinterval. Proses ini terus berlanjut sampai kriteria konvergensi terpenuhi atau kedalaman maksimal tercapai. Setiap kali rekursi: toleransi dibagi 2 ( $\text{tol}/2$ ), kedalaman berkurang 1 ( $\text{depth} - 1$ ), dan interval dipecah menjadi lebih kecil.

## Hasil Akhir:

Setelah rekursi selesai, hasilnya adalah  $\text{adaptive1} = 1.000000000000000$  (15 digit presisi) dengan error  $\approx 10^{-16}$  (machine precision), jauh lebih kecil dari toleransi  $10^{-10}$ .

**Keunggulan Metode:** Otomatis menyesuaikan ukuran interval berdasarkan kompleksitas fungsi, menghasilkan akurasi tinggi dengan evaluasi fungsi minimal, dan untuk fungsi smooth seperti  $\cos(x)$ , konvergensi sangat cepat dengan hasil hampir sempurna (error  $\sim 10^{-16}$ ).

**Soal 2:** Hitung  $\int_0^1 x^2 dx$  menggunakan Adaptive Simpson

## Implementasi Python:

```

1 a2 = 0
2 b2 = 1
3 tol = 1e-10
4 max_depth = 50

```

Inisialisasi parameter integral. Pada kasus ini  $a = 0$  adalah batas bawah,  $b = 1$  adalah batas atas,  $\text{tol} = 10^{-10}$  adalah toleransi error yang sangat kecil, dan  $\text{max\_depth} = 50$  adalah kedalaman rekursi maksimal.

```

1 c = (a + b) / 2
2 fa = f(a) # f(0) = 0^2 = 0.0
3 fb = f(b) # f(1) = 1^2 = 1.0
4 fc = f(c) # f(0.5) = 0.5^2 = 0.25

```

Hitung titik tengah dan nilai fungsi pada tiga titik penting. Pada kasus ini:  $c = \frac{0+1}{2} = 0.5$ . Nilai fungsi:  $f(0) = 0^2 = 0.0$ ,  $f(1) = 1^2 = 1.0$ , dan  $f(0.5) = (0.5)^2 = 0.25$ .

```

1 def simpson_rule(f, a, b):
2     c = (a + b) / 2
3     h = b - a
4     return (h / 6) * (f(a) + 4 * f(c) + f(b))
5

```

```
6 S = simpson_rule(f, a, b)
```

Fungsi Simpson's Rule untuk interval  $[a, b]$ . Pada kasus ini:  $h = 1 - 0 = 1$ , sehingga  $S = \frac{1}{6}[0.0 + 4(0.25) + 1.0] = \frac{1}{6}[0.0 + 1.0 + 1.0] = \frac{2.0}{6} = 0.333333\dots$ . Ini adalah aproksimasi awal yang sudah sangat akurat karena  $f(x) = x^2$  adalah fungsi polinomial kuadrat, dan Simpson's Rule eksak untuk polinomial derajat  $\leq 3$ .

```
1 def adaptive_aux(f, a, b, tol, S, fa, fb, fc, depth):
2     c = (a + b) / 2
3     d = (a + c) / 2 # titik tengah interval kiri
4     e = (c + b) / 2 # titik tengah interval kanan
5
6     fd = f(d)
7     fe = f(e)
```

Fungsi rekursif adaptive dimulai dengan menghitung 2 titik tambahan untuk membagi interval menjadi dua bagian. Pada iterasi pertama ( $depth=50$ ):  $d = \frac{0+0.5}{2} = 0.25$  dan  $e = \frac{0.5+1}{2} = 0.75$ . Nilai fungsi:  $f(d) = (0.25)^2 = 0.0625$  dan  $f(e) = (0.75)^2 = 0.5625$ .

```
1 Sleft = (c - a) / 6 * (fa + 4 * fd + fc)
2 Sright = (b - c) / 6 * (fc + 4 * fe + fb)
3 S2 = Sleft + Sright
```

Hitung Simpson's Rule untuk kedua subinterval. Interval kiri  $[0, 0.5]$ :  $S_{\text{left}} = \frac{0.5}{6}[0.0+4(0.0625)+0.25] = \frac{0.5}{6}[0.5] = 0.041666\dots$ . Interval kanan  $[0.5, 1]$ :  $S_{\text{right}} = \frac{0.5}{6}[0.25+4(0.5625)+1.0] = \frac{0.5}{6}[3.5] = 0.291666\dots$ . Total:  $S_2 = 0.041666\dots + 0.291666\dots = 0.333333\dots$

```
1 if depth <= 0 or abs(S2 - S) <= 15 * tol:
2     return S2 + (S2 - S) / 15
```

Cek kriteria konvergensi. Pada iterasi pertama:  $|S_2 - S| = |0.333333\dots - 0.333333\dots| \approx 0$  (sangat kecil, mendekati machine precision) dan  $15 \times tol = 15 \times 10^{-10} = 1.5 \times 10^{-9}$ . Karena selisihnya sudah sangat kecil (praktis 0), kondisi terpenuhi dan algoritma langsung konvergen pada iterasi pertama. Kembalikan hasil dengan koreksi Richardson:  $S_2 + \frac{S_2 - S}{15}$ .

```
1 return (adaptive_aux(f, a, c, tol/2, Sleft, fa, fc, fd, depth-1) +
2         adaptive_aux(f, c, b, tol/2, Sright, fc, fb, fe, depth-1))
```

Jika belum konvergen, lakukan rekursi pada kedua subinterval. Namun untuk fungsi  $f(x) = x^2$ , karena Simpson's Rule sudah memberikan hasil eksak untuk polinomial kuadrat, rekursi biasanya langsung terhenti pada iterasi pertama.

### Hasil Akhir:

Setelah proses adaptive selesai, hasilnya adalah  $adaptive2 = 0.3333333333333333$  (15 digit presisi) dengan error  $\approx 10^{-16}$  (machine precision). Nilai eksak adalah  $\frac{1}{3} = 0.33333\dots$

**Catatan Penting:** Untuk fungsi polinomial seperti  $x^2$ , metode Adaptive Simpson sangat efisien karena Simpson's Rule sudah memberikan hasil yang sangat akurat (bahkan eksak secara teoritis) sejak iterasi awal, sehingga algoritma cepat konvergen tanpa perlu banyak pembagian interval.

## 2.6. Perhitungan Metode Gaussian Quadrature

**Fungsi 1:**  $f(x) = \cos(x)$  untuk interval  $[0, \frac{\pi}{2}]$

**Fungsi 2:**  $f(x) = x^2$  pada interval  $[0, 1]$

import library numpy

```
1 import numpy as np
```

Definisikan fungsi gaussian\_quadrature yang menerima 4 input

- f: fungsi yang mau diintegalkan, yaitu  $f(x) = \cos(x)$
- a: batas bawah integral, yaitu 0
- b: batas atas integral, yaitu  $\frac{\pi}{2}$
- n: jumlah titik (kita pake  $n = 5$ )

```
1 def gaussian_quadrature(f, a, b, n=5):
```

kami menggunakan pendekatan selektif dalam menentukan nodes dan weights untuk Gaussian Quadrature di mana ketika  $n = 5$ , nilai-nilai nodes dan weights yang telah ditentukan secara matematis dengan presisi tinggi dimasukkan secara eksplisit ke dalam array untuk mengoptimalkan performa komputasi, sementara untuk nilai n lainnya, kami manfaatkan fungsi np.polynomial.legendre.leggauss(n) dari NumPy yang secara otomatis menghasilkan nodes dan weights yang sesuai.

```
1 if n == 5:
2     # 5-point Gauss-Legendre nodes dan weights
3     nodes = np.array([
4         -0.9061798459386640,
5         -0.5384693101056831,
6         0.0,
7         0.5384693101056831,
8         0.9061798459386640
9     ] )
10
11    weights = np.array([
12        0.2369268850561891,
13        0.4786286704993665,
14        0.5688888888888889,
15        0.4786286704993665,
16        0.2369268850561891
17    ] )
18 else:
19     # Untuk n lain, gunakan numpy (opsional)
20     nodes, weights = np.polynomial.legendre.leggauss(n)
```

Bagian ini melakukan proses inti dari integrasi numerik dengan *Gaussian Quadrature*, di mana:

- Setiap node yang awalnya berada dalam interval standar  $[-1, 1]$  ditransformasikan ke dalam interval target  $[a, b]$  menggunakan rumus mapping linear:

$$x = 0.5 \times ((b - a) \times \text{nodes}[i] + (a + b))$$

- Fungsi  $f(x)$  dievaluasi pada setiap titik transformasi tersebut dan dikalikan dengan *weight* yang bersesuaian
- Hasil evaluasi diakumulasi dalam variabel `result`
- Hasil akumulasi tersebut diskalakan dengan faktor:

$$0.5 \times (b - a)$$

yang merepresentasikan setengah dari lebar interval integrasi

- Hasil akhir dikembalikan sebagai output fungsi berupa aproksimasi integral numerik

```

1   result = 0
2   for i in range(len(nodes)) :
3       x = 0.5 * ((b - a) * nodes[i] + (a + b))
4       result += weights[i] * f(x)
5
6   result *= 0.5 * (b - a)
7   return result

```

**Soal 1:**  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(x)dx$

Integral fungsi  $\cos(x)$  pada interval  $[0, \frac{\pi}{2}]$  memiliki nilai eksak  $1.000000000000000$ . Berikut hasil aproksimasi dengan metode *Gaussian Quadrature*:

Hasil =  $1.000000000039565$

Error =  $3.956592 \times 10^{-11}$

Metode memberikan aproksimasi sangat akurat dengan error yang sangat kecil.

**Soal 2:**  $\int_0^1 x^2 dx$

Integral fungsi  $x^2$  pada interval  $[0, 1]$  memiliki nilai eksak  $0.333333333333333$ . Berikut hasil aproksimasi dengan metode *Gaussian Quadrature*:

Hasil =  $0.333333333333333$

Error =  $0.000000 \times 10^0 = 0$

Metode memberikan hasil eksak untuk integral fungsi ini.

[Isi langkah-langkah perhitungan menggunakan metode Gaussian Quadrature]

## BAGIAN 3: Hasil dan Perbandingan Error

### 3.1. Hasil Perhitungan

[Isi tabel hasil perhitungan dari semua metode]

### 3.2. Perbandingan Error

[Isi analisis perbandingan error dari semua metode]

### **3.3. Kesimpulan**

[Isi kesimpulan dari hasil dan perbandingan error]