

Estimasi Produksi Padi Menggunakan Model Verhulst Pada Provinsi Sumatera Utara

Melinda Aprianingsih*, Siti Aisyah, Tia Mutiara, Dian Darmawan, Rima Aprilia

Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara Medan

Email: aprianingsihmelinda@gmail.com

ABSTRAK

Padi adalah salah satu tanaman pangan utama yang memiliki peran strategis dan memberikan dampak signifikan dalam aspek ekonomi, lingkungan, serta sosial politik. Permasalahan penelitian ini adalah banyak petani bergantung pada teknik tradisional yang kurang efisien sehingga produksi padi kurang baik, dan alih fungsi lahan juga dapat mengurangi luas area tanam dan produksi padi. Tujuan penelitian untuk memperkirakan atau memprediksi hasil produksi padi pada tahun 2024–2026. Model Verhulst dengan metode Milne-Simpson dipilih karena hasil lebih akurat dan efektif dalam menyelesaikan permasalahan memprediksi hasil produksi, serta mampu menghasilkan estimasi yang lebih stabil, presisi tinggi, dan efisien dalam mengolah data nonlinier dibandingkan metode lain. Hasil menunjukkan bahwa penerapan Model Verhulst dengan metode Milne-Simpson diperoleh hasil produksi padi di Provinsi Sumatera Utara tahun 2024, 2025, 2026 berturut-turut sebesar 2.122.538,599 ton; 2.124.823,212 ton; dan 2.127.100,869 ton. Artinya, terdapat peningkatan hasil produksi padi setiap tahunnya.

Kata kunci: Model Verhulst; Padi; Milne Simpson.

ABSTRACT

Rice is one of the staple food crops that has strategic value and has a major influence in the economic, environmental, and socio-political fields. The problem of this research is that many farmers depend on traditional techniques that are less efficient so that rice production is not good and land conversion can also reduce the area of planting and rice production. The purpose of the research is to estimate or predict rice production in the year 2024-2026. The Verhulst Model with the Milne-Simpson method was chosen because the results are more accurate and effective in solving the problem of predicting production results, and are able to produce estimates that are more stable, highly precise, and efficient in processing nonlinear data compared to other methods. The results show that the application of the Verhulst Model with the Milne-Simpson method obtained rice production results in North Sumatra Province in 2024, 2025, 2026 respectively of 2,122,538.599 tons; 2,124,823.212 tons; and 2,127,100.869 tons. This means that there is an increase in rice production every year.

Keywords: Verhulst Models; Rice; Milne Simpson

Copyright © 2025 by Authors, Published by CAUCHY Group. This is an open access article under the CC BY-SA License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara agraris terbesar di Asia Tenggara yang memiliki wilayah luas, tanah subur, dan sumber daya alam melimpah [1], [2]. Mayoritas penduduk Indonesia menggantungkan hidup pada sektor pertanian atau bercocok tanam sebagai sumber penghidupan utama [3], [4]. Sektor pertanian memiliki peran krusial dalam meningkatkan kesejahteraan masyarakat sekaligus mendorong pertumbuhan ekonomi negara [5]. Salah satu komoditas utama yang berpengaruh dalam sektor ini adalah padi, yang menjadi makanan pokok dan berkontribusi besar terhadap aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan [6], [7].

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), total produksi padi di Indonesia pada tahun 2023 mencapai 53,63 juta ton GKG dengan luas panen sebesar 10,20 juta hektar [8]. Salah satu provinsi penghasil utama adalah Sumatera Utara, yang mencatat produksi sebesar 2,087 juta ton GKG pada tahun 2023 [9]. Meskipun demikian, terdapat penurunan produksi sebesar 1,11 ribu ton (0,05%) dibandingkan tahun 2022 [8].

Penurunan ini disebabkan oleh ketidakmampuan sebagian petani dalam menggunakan benih unggul, mengadopsi teknologi irigasi modern, dan memanfaatkan alat pertanian canggih [10]. Selain faktor teknis, alih fungsi lahan pertanian menjadi kawasan non-pertanian, seperti untuk perumahan dan industri, juga memperburuk situasi ini [11]. Fenomena konversi lahan berdampak langsung terhadap ketidakstabilan ketahanan pangan nasional [12], [13]. Oleh sebab itu, dibutuhkan upaya prediksi produksi padi di masa depan guna mendukung perencanaan kebijakan pertanian berbasis data [14].

Berbagai penelitian terdahulu telah berupaya memperkirakan produksi padi di Provinsi Sumatera Utara. Fuji Hidayah dan Mardiningsih (2023) menggunakan analisis regresi data panel dan menunjukkan bahwa produksi padi selama periode 2020–2022 mengalami pertumbuhan berturut-turut sebesar 39,88%, 10,68%, dan 9,89% [5]. Penelitian lain oleh Dimas Bagus Arjuna dan Riri Syahfitri Lubis (2024) menerapkan metode Milne-Simpson untuk memperkirakan hasil produksi padi dan beras, dengan hasil yang memperkirakan kenaikan produksi pada tahun 2024 [6]. Selain itu, studi oleh Pranoto et al. (2021) juga menggarisbawahi pentingnya penggunaan model matematis untuk meningkatkan akurasi prediksi hasil panen [15].

Dalam penelitian ini, digunakan pemodelan matematika yaitu Model Verhulst dengan metode Milne-Simpson. Model ini dinilai lebih akurat dan efektif dalam prediksi hasil produksi pertanian dibandingkan dengan metode lainnya [4], [16]. Hal ini diperkuat oleh penelitian Irma Suryani dkk. (2024) yang membandingkan metode Milne-Simpson dengan Adams-Bashforth-Moulton dan menunjukkan keunggulan Milne-Simpson dalam akurasi [4].

Model Verhulst pertama kali diperkenalkan oleh Pierre Verhulst pada tahun 1838 [17]. Model ini secara luas diterapkan dalam berbagai studi pertumbuhan populasi, termasuk dalam bidang agrikultur [18]. Melalui penelitian ini, diharapkan prediksi produksi padi untuk tahun 2024–2026 dapat menjadi landasan bagi perumusan kebijakan pemerintah, khususnya dalam menjaga ketahanan pangan di Sumatera Utara [19].

METODE

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian terapan, dengan data yang digunakan berupa data sekunder dan didapatkan dari publikasi Kementerian Pertanian Republik Indonesia mengenai hasil panen padi di Provinsi Sumatera Utara pada periode 2018–2023. Penerapan Model Verhulst diterapkan dengan menggunakan metode Milne-Simpson pada penelitian ini bertujuan untuk memprediksi pertumbuhan hasil panen padi di daerah tersebut.[4] Berikut merupakan bentuk umum Model Verhulst:

$$\frac{dp}{dt} = rP \left(1 - \frac{P}{K}\right) \quad (1)$$

Keterangan:

- r = Laju Pertumbuhan Kapasitas Padi
 P = Jumlah Hasil Produksi Padi Per Tahun
 K = Kapasitas Tampung

Berikut merupakan bentuk dari solusi Model Verhulst, yaitu:

$$P_n = \frac{K}{1 + \left(\frac{K - P_0}{P_0}\right) e^{-rt}} \quad (2)$$

Keterangan:

- P_n = Nilai fungsi P pada n
 K = Kapasitas Tampung
 P_0 = Nilai Awal Untuk Fungsi P pada n
 e = Nilai Awal
 r = Laju Pertumbuhan Kapasitas Padi
 t = Periode Waktu

Tahapan Penelitian

Adapun tahapan-tahapan penelitian menggunakan Model Verhulst pada Metode Milne-Simpson, yaitu:

1. Mengumpulkan materi referensi yang diperoleh dari berbagai sumber. Sedangkan data akan terkumpul dengan memperolehnya dari publikasi Kementerian Pertanian Republik Indonesia berupa hasil panen padi dari Tahun 2018-2023 di Perovinsi Sumatera Utara.
2. Menerapkan model Verhulst untuk memperoleh solusi numerik yang dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (1).
3. Solusi awal dari P_0, P_1 , dan P_3 akan ditentukan. Setelah memperoleh solusi numerik untuk Model Verhulst, langkah berikutnya adalah menghitung empat nilai solusi

awal P_0, P_1 , dan P_3 dengan penerapan metode Runge-Kutta orde-4 melalui persamaan (5). Rumus dari metode Runge-Kutta orde empat yang sering digunakan yakni, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_r, y_r) \\ k_2 &= hf\left(x_r + \frac{1}{2}h, y_r + \frac{1}{2}k_1\right) \\ k_3 &= hf\left(x_r + \frac{1}{2}h, y_r + \frac{1}{2}k_2\right) \\ k_4 &= hf\left(x_r + h, y_r + \frac{1}{2}k_3\right) \\ \text{Untuk } r &= 0, 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

$$y_{r+1} = y_r + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3)$$

Keterangan:

- y_{r+1} = Nilai setelahnya
- y_r = Nilai sebelumnya
- k_1, k_2, k_3, k_4 = Ketetapan

4. Nilai-nilai dari f_r, f_{r-1}, f_{r-2} dan f_{r-3} akan ditentukan. Jika solusi awal P_0, P_1 , dan P_3 telah diperoleh, berikutnya akan ditentukan nilai-nilai dari f_r, f_{r-1}, f_{r-2} dan f_{r-3} berdasarkan $r = 3, 4, \dots, n$ pada persamaan (1). [6]
5. Solusi numerik dengan metode Milne-Simpson akan dihitung yaitu untuk persamaan prediktor seperti dibawah ini:

$$y_{r+1}^{(0)} = y_{r-3} + \frac{4h}{3}(2f_{r-2} - f_{r-1} + 2f_r) \quad (4)$$

6. Uji coba metode Milne-Simpson yang diiterasikan pada r dilakukan sehingga memenuhi persamaan berikut ini:

$$\frac{|y_{r+1} - y'_{r+1}|}{|y_{r+1}|} < \varepsilon \quad (5)$$

Keterangan:

- y_{r+1} = Nilai setelahnya untuk ukuran langkah h

- ε = Toleransi error

7. Kemudian bandingkan hasil perhitungan dengan metode Milne-Simpson dengan data aktual yang telah ada, untuk menunjukkan keakuratan data dengan penerapan metode Milne-Simpson tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data mengenai hasil produksi padi di Provinsi Sumatera Utara yang diperoleh dari publikasi Kementerian Pertanian Republik Indonesia, yang mencakup produksi padi dari tahun 2018 hingga 2023, akan digunakan untuk memperkirakan hasil produksi padi pada tahun 2024 hingga 2026. Informasi tentang hasil produksi padi dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Data Jumlah Produksi Padi di Sumatera Utara

No	Tahun	Produksi Padi (ton)
1.	2018	2.108.284,72
2.	2019	2.078.901,59
3.	2020	2.040.500,19
4.	2021	2.004.142,51
5.	2022	2.088.583,81
6.	2023	2.090.475,17
Total		12.410.887,99

Tabel diatas merupakan data perolehan hasil produksi padi pada tahun 2018-2023 di Sumatera Utara dengan total produksi sekitar 12.410.887,99 ton.

Penerapan Model Verhulst

Berikutnya, hasil produksi padi untuk tiga tahun mendatang akan dihitung berdasarkan model Verhulst dengan menggunakan Metode Milne-Simpson. Langkah pertama yang harus dilakukan yaitu menghitung nilai dari kapasitas tampung (K), yang diperoleh dari nilai hasil produksi dibagi luas wilayah panen pertahun.

$$K = \left(\frac{\text{Jumlah hasil produksi padi pertahun}}{\text{Luas wilayah panen}} \right) = 2.300.000 \text{ ton}$$

Adapun laju pertumbuhan (r) yang diperoleh yaitu 0,014 dengan panjang intervalnya [0,6] dan jumlah iterasi $n=6$,

$$h = \frac{b-a}{n} = \frac{6-0}{6} = 1$$

Sebelum ditentukan perhitungan nilai awal menggunakan metode Runge Kutta orde-4, nilai dari laju pertumbuhan serta kapasitas tampung padi di Provinsi Sumatera Utara disubstitusikan kedalam persamaan logistik, sehingga:

$$\frac{dP}{dt} = rP \left(1 - \frac{P}{K} \right) = 0,014P \left(1 - \frac{P}{2.300.000} \right)$$

Menentukan Nilai Awal Menggunakan Metode Range Kutta Orde-4

Setelah ditentukan model verhulst, dengan demikian perhitungan nilai awal dapat dilakukan menggunakan metode Runge-Kutta orde-4 dengan $P_0 = 2.108.284,72$ pada interval [0,6] dan $h=1$, yaitu:

a. Untuk $n = 0, t_0 = 1, P_0 = 2.108.284,72$

$$\begin{aligned} f_1 &= hf(t_n, P_n) \\ &= hf(t_0, P_0) \\ &= hf(1; 2.108.284,72) \\ &= 1 \left[0,014(2.108.284,72) \left(1 - \frac{2.108.284,72}{2.300.000} \right) \right] \\ &= 2.460,289 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_2 &= hf(t_n + \frac{1}{2}h, P_n + \frac{1}{2}K_1) \\
 &= hf(t_0 + \frac{1}{2}h, P_0 + \frac{1}{2}K_1) \\
 &= hf\left(1,5;(2.108.284,72 + \frac{1}{2}(2.460,289))\right) \\
 &= hf(1,5;2.109.514,864) \\
 &= 1\left[0,014(2.109.514,864)\left(1 - \frac{2.109.514,864}{2.300.000}\right)\right] \\
 &= 2.445,929
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_3 &= hf(t_n + \frac{1}{2}h, P_n + \frac{1}{2}K_2) \\
 &= hf(t_0 + \frac{1}{2}h, P_0 + \frac{1}{2}K_2) \\
 &= hf\left(1,5;(2.108.284,72 + \frac{1}{2}(2.445,929))\right) \\
 &= hf(1,5;2.109.507,684) \\
 &= 1\left[0,014(2.109.507,684)\left(1 - \frac{2.109.507,684}{2.300.000}\right)\right] \\
 &= 2.446,013
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_4 &= hf(t_n + h, P_n + K_3) \\
 &= hf(t_0 + h, P_0 + K_3) \\
 &= hf(2;(2.108.284,72 + 2.446,013)) \\
 &= hf(2;2.110.730,733) \\
 &= 1\left[0,014(2.110.730,733)\left(1 - \frac{2.110.730,733}{2.300.000}\right)\right] \\
 &= 2.431,718
 \end{aligned}$$

Setelah nilai dari f_1, f_2, f_3 , dan f_4 didapatkan, substitusi kedalam persamaan Range kutta orde-4 yaitu:

$$\begin{aligned}
 P_{n+1} &= P_n + \frac{1}{6}(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4) \\
 P_1 &= P_0 + \frac{1}{6}(2.460,289 + 2(2.445,929) + 2(2.446,013) + 2.431,718) \\
 P_1 &= 2.110.730,702
 \end{aligned}$$

b. Untuk $n = 1, t_1 = 2, P_1 = 2.110.730,702$

$$\begin{aligned}
 t_{n+1} &= t_n + h \\
 t_{1+1} &= t_0 + h = 1 + 1 = 2
 \end{aligned}$$

sehingga:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= hf(t_1, P_1) \\
 &= f(2;2.110.730,702) \\
 &= 2.431,718
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_2 &= hf(t_1 + \frac{1}{2}h, P_1 + \frac{1}{2}K_1) \\&= f(2,5; 2.111.946,561) \\&= 2.417,488\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_3 &= hf(t_1 + \frac{1}{2}h, P_1 + \frac{1}{2}K_2) \\&= f(2,5; 2.111.939,446) \\&= 2.417,572\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_4 &= hf(t_1 + h, P_1 + K_3) \\&= hf(3; 2.113.148,274) \\&= 2.403,406\end{aligned}$$

Kemudian akan dihitung nilai P_2 :

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{6} (f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4)$$

$$P_2 = 2.113.148,242$$

c. Untuk $n = 2, t_2 = 3, P_2 = 2.108.284,72$

$$\begin{aligned} t_{n+1} &= t_n + h \\ t_{2+1} &= t_1 + h = 2 + 1 = 3 \end{aligned}$$

Sebelum menentukan nilai solusi awal P_3 , tentukan terlebih dahulu nilai f_1, f_2, f_3 , dan f_4 :

$$\begin{aligned} f_1 &= hf(t_2, P_2) \\ &= f(3; 2.113.148,242) \\ &= 2.403,407 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_2 &= hf(t_2 + \frac{1}{2}h, P_2 + \frac{1}{2}K_1) \\ &= f(3,5; 2.114.349,946) \\ &= 2.389,308 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_3 &= hf(t_2 + \frac{1}{2}h, P_2 + \frac{1}{2}K_2) \\ &= f(3,5; 2.114.342,896) \\ &= 2.389,391 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_4 &= hf(t_2 + h, P_2 + K_3) \\ &= f(4; 2.115.537,633) \\ &= 2.375,356 \end{aligned}$$

Maka, jika nilai-nilai tersebut disubstitusikan kedalam persamaan range kutta orde-4 menjadi:

$$\begin{aligned} P_3 &= P_2 + \frac{1}{6} (f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4) \\ P_3 &= 2.115.537,602 \end{aligned}$$

d. Untuk $n = 3, t_3 = 3, P_3 = 2.115.537,602$

$$\begin{aligned} t_{n+1} &= t_n + h \\ t_{2+1} &= t_2 + h = 3 + 1 = 4 \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned}f_1 &= hf(t_n, P_n) \\&= hf(t_3, P_3) \\&= hf(4; 2.115.537,602) \\&= 1 \left[0,014(2.115.537,602) \left(1 - \frac{2.115.537,602}{2.300.000} \right) \right] \\&= 2.375,356\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh perhitungan metode range kutta orde-4 untuk solusi nilai awal.

Tabel 2. Metode range kutta orde-4 untuk solusi nilai awal

$h = 1$			
n	t	P_n	$f(t, P) = 0,014P \left(1 - \frac{P}{2.300.000}\right)$
0	1	2.108.284,72	2.460,289
1	2	2.110.730,702	2.431,718
2	3	2.113.148,242	2.403,407
3	4	2.115.537,602	2.375,356

Perhitungan dengan Metode Milne Simpson

Setelah diperoleh hasil dari perhitungan metode range-kutta orde-4 untuk memperoleh nilai awal, selanjutnya akan dicari solusi numerik menggunakan Milne Simpson dengan bentuk umum:

$$\text{Predictor: } P_{n+1} = P_{n-3} + \frac{4h}{3} (2f_n - f_{n-1} + 2f_{n-2})$$

$$\text{Corrector: } P_{n+1} = P_{n-1} + \frac{h}{3} (f_{n-1} + 4f_n + f_{n+1})$$

Lalu, substitusikan nilai-nilai $P_0, P_1, P_2, \text{ dan } P_3$ yang didapatkan melalui range kutta orde-4 kedalam persamaan predictor milne simpson:

- Untuk $n = 3$ dan $P_0 = 2.108.284,72$

$$P_{n+1}^{(0)} = P_{n-3} + \frac{4h}{3} (2f_n - f_{n-1} + 2f_{n-2})$$

$$P_{3+1}^{(0)} = P_0 + \frac{4(1)}{3} (2f_3 - f_2 + 2f_1)$$

$$P_4^{(0)} = 2.108.284,72 + \frac{4}{3} (2(2.375,356) - 2.403,407 + 2(2.460,289))$$

$$P_4^{(0)} = 2.117.975,230$$

Sehingga;

$$\begin{aligned} f_4^{(0)}(t_4, P_4) &= f_4(4; 2.117.975,230) \\ &= 0,014(2.117.975,230) \left(1 - \frac{2.117.975,230}{2.300.000}\right) \\ &= 2.346,668 \end{aligned}$$

Setelah nilai dari $f_4^{(0)}$ diperoleh, selanjutnya akan disubstitusikan kedalam persamaan korektor milne Simpson yaitu:

$$P_{n+1} = P_{n-1} + \frac{h}{3} (f_{n-1} + 4f_n + f_{n+1})$$

$$P_{3+1}^{(1)} = P_2 + \frac{1}{3} (f_2 + 4f_3 + f_4)$$

$$P_4^{(1)} = 2.113.148,242 + \frac{1}{3} (2.403,407 + 4(2.375,356) + 2.346,668)$$

$$P_4^{(1)} = 2.117.898,7146$$

Maka, nilai prediktor dan korektor akan digunakan untuk mencari nilai toleransi error yaitu:

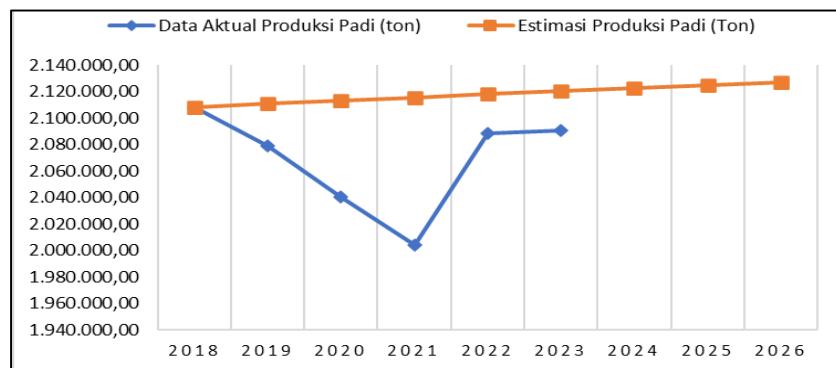
$$\varepsilon = 5 \times 10^{-9}$$

$$\left| \frac{P_4^{(1)} - P_4^{(0)}}{P_4^{(1)}} \right| = \left| \frac{2.117.898,7146 - 2.117.975,230}{2.117.898,7146} \right| = 3,6128 \times 10^{-5}$$

Dengan demikian di Provinsi Sumatera Utara, untuk estimasi jumlah produksi padi ialah:

Tabel 3. Estimasi Hasil Produksi Padi dengan milne Simpson

No	Tahun	Data Aktual Produksi Padi (ton)	Produksi Padi (Ton)
1.	2018	2.108.284,72	2.108.284,72
2.	2019	2.078.901,59	2.110.730,702
3.	2020	2.040.500,19	2.113.148,242
4.	2021	2.004.142,51	2.115.537,602
5.	2022	2.088.583,81	2.117.898,714
6.	2023	2.090.475,17	2.120.231,427
7.	2024		2.122.538,599
8.	2025		2.124.823,212
9.	2026		2.127.100,869
Total			19.060.294,09



Gambar 1. Hasil Estimasi Produksi Padi (Ton)

Perolehan untuk estimasi hasil produksi padi di Provinsi Sumatera Utara, di tahun 2024 mencapai hasil 2.122.538,599 ton, dan pada tahun 2025 mencapai hasil 2.124.823,212 ton serta di tahun 2026 mencapai 2.127.100,869 ton. Sehingga mengalami peningkatan setiap tahunnya. Meskipun pada tahun 2019-2021 hasil perolehan produksi padi berdasarkan data aktual itu turun secara signifikan yang disebabkan oleh faktor pandemi yang membatasi aktivitas petani dan krisis ekonomi pasca pandemi menyebabkan hasil panen juga ikut menurun. Akan tetapi, pada tahun berikutnya hasil perolehan produksi padi pada data aktual mengalami tren peningkatan sampai di tahun 2024 ini dengan faktor perluasan lahan sawah dan pengoptimalan produksi padi tersebut. Sehingga diharapkan untuk produksi tersebut terus meningkat sehingga sejalan dengan estimasi yang dilakukan dengan metode Milne-Simpson.

KESIMPULAN

Estimasi hasil panen produksi padi dengan Model Verhulst untuk tahun 2024-2026 di Sumatera Utara menggunakan metode Milne Simpson menunjukkan perubahan signifikan untuk tahun 2024 menunjukkan hasil 2.122.538,599 ton, sedangkan pada tahun 2025 mencapai hasil 2.124.823,212 ton dan di tahun 2026 mencapai 2.127.100,869 ton. Penelitian ini menunjukkan hasil produksi padi mengalami peningkatan tren setiap tahunnya. Dengan demikian, metode Milne-Simpson terbukti mampu memberikan hasil prediksi yang akurat karena keunggulannya dalam menyelesaikan persamaan differensial dengan tingkat kesalahan yang minimal sehingga dapat menjadi alat yang sangat bermanfaat dalam perencanaan hasil produksi padi di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Haryanto T, Hidayati NA, Djoewito W. Ekonomi Pertanian. Airlangga University Press; 2009.
- [2] Harahap S, Ritonga ZS. Analisis Statistik Telekomunikasi dan Pendidikan di Indonesia Tahun 2022 dan 2023. REKOGNISI: Jurnal Pendidikan dan Kependidikan (E-ISSN 2599-2260). 2024 Jun 3;9(1):29-35.
- [3] Djazuli RA, Hidayat SI. Manajemen Agribisnis Modern. UMG Press. 2024.
- [4] Suryani I, Suprianto A, Wartono W. Solusi Numerik Model Verhulst Pada Estimasi Pertumbuhan Produksi Padi Menggunakan Metode Milne-Simpson dan Metode Adams-Bashforth-Moulton. Jurnal Sains Matematika dan Statistika. 2023;9(1):27-36.
- [5] Hidayah F, Mardiningsih M. Model Estimasi Produksi Padi Menggunakan Analisis Regresi Data Panel Di Provinsi Sumatera Utara Berdasarkan Data Tahun 2015-2019. Jurnal Riset Rumpun Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. 2023 Jan 15;2(1):61-75.
- [6] Arjuna DB, Lubis RS. Solusi Numerik Model Verhulst Pada Estimasi Hasil Panen Melalui Perkembangan Produksi Padi dan Beras dengan Metode Milne-Simpson. Journal of Information System Research (JOSH). 2024;5(2):722-30.
- [7] Lassa J. Politik Ketahanan Pangan Indonesia 1950-2005. ZEF Centre for Development Research. 2005:201950-05.
- [8] Aini LM. Penentuan provinsi-provinsi terbaik dalam produksi jagung nasional melalui analisis kuadran atas variable produksi dan produktivitas per satuan luas lahan. Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis. 2019 Oct 7;3(4):751-60.
- [9] David, Wahyudi, Sukmi Alkausar, and Bibong Widayarti. "Statistik Pertanian Organik Indonesia." (2023).
- [10] Putri, Diah Reka. "Analisis Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Produksi Padi Sawah di Kabupaten Langkat Dengan Metode Backwad Pada Regresi Linier Berganda." PhD diss., Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, 2020.
- [11] JANAH, RIF'ATUL, Bambang Trisetyo Eddy, and Tutik Dalmiyatun. "Alih fungsi lahan pertanian dan dampaknya terhadap kehidupan penduduk di Kecamatan Sayung Kabupaten Demak." *Jurnal Agrisocionomics* 1, no. 1 (2017): 1-10.

- [12] Sihombing, Vista, and Ulidesi Siadari. "Tantangan produksi pertanian terhadap kelangkaan air dan ketersediaan lahan pertanian di masa depan." *Agripriatech* 6, no. 2 (2023): 34-41.
- [13] Rani, Nurkhay, and Ida Martinelli. "Implementasi Peraturan Daerah Nomor 3 Tahun 2015 Tentang Alih Fungsi Lahan di Provinsi Sumatera Utara." *Jurnal Administrasi Publik dan Kebijakan (JAPK)* 4, no. 1 (2024): 20-28.
- [14] Raharusun, Oliver Simon Hardianto, and Alfiansyah Hasibuan. "Sistem Prediksi Produksi Beras Menggunakan Multiple Linear Regression untuk Optimalisasi Ketahanan Pangan di Kabupaten Minahasa." *JOINTER: Journal of Informatics Engineering* 5, no. 02 (2024): 36-40.
- [15] Orlov, Victor, Tatiana Ivanova, Evgeniy Kadyshev, Tatyana Chernyshova, Aleksandr Prokopiev, and Anna Ivanova. "Mathematical modeling in forecasting reproduction processes in agriculture." In *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021" Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 1*, pp. 330-338. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [16] Nurfitriani, Siti Hasna, Try Azisah Nurman, and Ilham Syata. "Perbandingan Metode RK5 dan ABM4 Dalam Penyelesaian Sistem Persamaan Diferensial Nonlinear (Studi Kasus: Laju Transmisi Virus Corona di Sulawesi Selatan)." *Jurnal MSA (Matematika dan Statistika serta Aplikasinya)* 12, no. 2 (2024): 118-131.
- [17] Kyurkchiev, Nikolay, Anton Iliev, and Svetoslav Markov. "Some techniques for recurrence generating of activation functions." *LAP LAMBERT Academic Publishing* (2017).
- [18] Müller, Johannes, and Christina Kuttler. "Methods and models in mathematical biology." *Lecture Notes on Mathematical Modelling in Life Sciences, Springer, Berlin* (2015).
- [19] Ketahanan Pangan dan Model Prediksi Produksi Padi di Indonesia