

Peramalan Nilai Transaksi Uang Elektronik Di Indonesia Menggunakan Double Exponential Smoothing Brown Dengan Optimasi Nonlinier

Forecasting the Value of Electronic Money Transactions in Indonesia Using Brown's Double Exponential Smoothing with Nonlinear Optimization

Anna Putri Aritonang¹, Meiliyani Siringoringo^{2a)}, Wiwit Pura Nurmayanti³, Sri Wahyuningsih⁴, Suyitno⁵

^{1,2,3,4,5} Program Studi S1 Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Indonesia

^{a)} Corresponding author: meiliyani.siringoringo@gmail.com

ABSTRACT

The Double Exponential Smoothing (DES) Brown method is one of the forecasting methods used for data that exhibited a trend pattern, in which the smoothing process was performed twice. The determination of the optimal smoothing parameter in the DES Brown method is usually carried out through a trial-and-error process. Another way to obtain the optimal smoothing parameter value more quickly and accurately is by using nonlinear optimization. In this study, two optimization methods were used: the Golden Section and the Levenberg-Marquardt methods. The objectives of this research were to obtain the optimal smoothing parameter of the DES Brown method using the Golden Section and Levenberg-Marquardt optimizations, to forecast the value of electronic money transactions in Indonesia for the period of January to March 2025 using the DES Brown method with the optimal smoothing parameter, and to identify the best optimization method for determining the optimal smoothing parameter of DES Brown method were obtained based on the MAPE value. The results of the study showed that the optimal smoothing parameter of the DES Brown method using the Golden Section optimization was 0.4634178 and the Levenberg-Marquardt optimization was 0.3498674. The best optimization method for determining the optimal smoothing parameter of the DES Brown method was the Golden Section, as it produced the smallest MAPE value of 8.384391%. The forecasting results of electronic money transaction values in Indonesia using the optimal smoothing parameter of the DES Brown method with the Golden Section optimization for the next three periods were: January 2025 at Rp244,358.692 billion, February 2025 at Rp250,954.744 billion, and March 2025 at Rp257,550.796 billion.

Keywords: DES Brown, electronic money transaction value, forecasting, nonlinear optimization

1. Pendahuluan

Peramalan merupakan aktivitas yang bertujuan untuk memperkirakan kejadian di masa mendatang dengan memperhatikan serta menganalisis data historis yang telah tersedia. Salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam peramalan adalah metode analisis runtun waktu (Khotijah, Samaniyah, Sarifah, & Faisol, 2023). Analisis runtun waktu merupakan teknik peramalan yang menganalisis data runtun waktu yang diamati di masa lalu, dimana pengaruh waktu secara beraturan terhadap data tersebut dipertimbangkan dalam proses analisisnya. Analisis runtun waktu bertujuan untuk memperoleh nilai peramalan, dimana untuk menghasilkan peramalan yang baik perlu memperhatikan tipe atau pola data (Maulana, 2018). Salah satu metode dalam analisis runtun waktu adalah *Double Exponential Smoothing Brown* (DES Brown) yang dirancang untuk mengatasi perbedaan antara data actual dan hasil peramalan ketika pola atau plot datanya menunjukkan adanya tren (Bidangan, Purnamasari, & Hayati, 2016).

Penentuan parameter pemulusan dalam metode DES Brown pada umumnya menggunakan proses *trial and error* yang memakan waktu. Oleh karena itu, digunakan optimasi nonlinier yang menghasilkan nilai parameter α optimum dengan cepat dan tepat. Salah satu metode yang dianggap relevan ialah optimasi nonlinier *golden section* yang menerapkan konsep pengurangan batas untuk memperoleh nilai rasional optimum (baik maksimum maupun minimum) sekala berkala, serta optimasi nonlinier Levenberg-Marquardt, yang berfungsi meminimalkan jumlah kuadrat residual antara data pengamatan dengan fungsi kurva (Gavin, 2019). Penelitian yang dilakukan oleh Sitompul (2018), mengenai hasil optimasi pemulusan eksponensial dengan algoritma Levenberg-Marquardt pada volume penjualan thermostat menunjukkan nilai MAPE kurang dari 10%. Penelitian lain mengenai optimasi parameter yang dilakukan oleh Yani, Wahyuningsih, dan Siringoringo (2022), mengenai tingkat akurasi dari hasil peramalan menggunakan metode DES Holt dengan *golden section* pada NTPT Provinsi Indonesia menunjukkan nilai MAPE yang diperoleh sebesar 0,885%. Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, algoritma Levenberg-Marquardt dan *golden section* dapat menghasilkan parameter pemulusan yang optimal berdasarkan MAPE sehingga pada penelitian ini kedua algoritma tersebut akan diterapkan dalam menghasilkan parameter pemulusan DES Brown dan dibandingkan hasil peramalannya berdasarkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) pada data transaksi uang elektronik di Indonesia

Transaksi uang elektronik di Indonesia semakin menjadi bagian dari budaya masyarakat, sehingga terus mengalami pertumbuhan nominal transaksi. Uang elektronik (*electronic money*) atau *e-money* adalah alat pembayaran yang memenuhi unsur-unsur sebagai berikut, yaitu diterbitkan atas dasar nilai uang yang disetor terlebih dahulu oleh pemegang terhadap penerbit, nilai uang disimpan secara elektronik dalam suatu media seperti server atau cip, digunakan sebagai alat pembayaran kepada pedagang yang bukan merupakan penerbit uang elektronik tersebut (Yulianto & Ferdinand, 2016). Berdasarkan data Bank Indonesia, nilai transaksi uang elektronik dari Januari hingga Agustus 2024 mencapai Rp1,6 kuadriliun, meningkat sebesar 35,76% dibandingkan periode yang sama tahun sebelumnya. Tren positif ini mencerminkan semakin luasnya adopsi pembayaran digital di Indonesia, sejalan dengan perkembangan teknologi finansial dan kebijakan pemerintah dalam mendorong transaksi non tunai (Bank Indonesia, 2024). Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi peramalan nilai transaksi menggunakan uang elektronik di Indonesia dengan menggabungkan metode DES Brown dan optimasi nonlinier *golden section* dan Levenberg-Marquardt. Penggunaan uang elektronik yang terus berkembang pesat di era ekonomi digital memerlukan model peramalan yang dapat mendukung pengambilan keputusan yang tepat. Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan parameter pemulusan yang optimum menggunakan metode DES Brown dengan optimasi nonlinier, serta memperoleh peramalan nilai transaksi uang elektronik secara lebih akurat, sebagai dasar untuk membuat kebijakan yang sesuai dalam mendorong masyarakat menggunakan pembayaran non-tunai.

2. Metodologi

2.1 Double Exponential Smoothing Brown (DES-Brown)

Metode DES Brown adalah salah satu teknik peramalan yang diterapkan dalam analisis data runtun waktu, khususnya pada data yang menunjukkan pola tren tanpa mempertimbangkan faktor musiman. Metode ini menggunakan parameter pemulusan yang berfungsi sebagai konstanta bernilai antara 0 dan 1, dan berperan sebagai variabel pembantu dalam proses pemodelan (Farida, Sulistiani, dan Ulinnuha, 2021).

Langkah yang digunakan dalam proses peramalan dengan pendekatan DES- Brown ditunjukkan sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai pemulusan pertama (S'_t) berdasarkan persamaan berikut:

$$S'_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)S'_{t-1} \tag{1}$$

- b. Menentukan nilai pemulusan kedua (S''_t) berdasarkan persamaan berikut:

$$S''_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)S''_{t-1} \tag{2}$$

- c. Menentukan nilai komponen level (a_t) berdasarkan persamaan berikut:

$$a_t = 2S'_t - S''_t \tag{3}$$

- d. Menentukan nilai komponen tren (b_t) berdasarkan persamaan berikut:

$$b_t = \frac{\alpha}{1 - \alpha} (S'_t - S''_t) \tag{4}$$

- e. Menentukan nilai peramalan berdasarkan persamaan berikut:

$$\hat{Z}_{t+k} = a_t + b_t(k) \tag{5}$$

dimana,

- α : Parameter pemulusan eksponensial
- Y_t : Data riil selama periode waktu ke t
- S'_t : Nilai pemulusan pertama periode ke- t
- S'_{t-1} : Nilai pemulusan pertama periode ke- $t - 1$
- S''_t : Nilai pemulusan kedua periode ke- t
- S''_{t-1} : Nilai pemulusan kedua periode ke- $t - 1$
- a_t : Nilai komponen level pada periode ke- t
- b_t : Nilai komponen tren pada periode ke- t
- k : Banyaknya periode ke depan yang akan diramalkan dengan nilai $k \geq 1$
- \hat{Z}_{t+k} : Nilai peramalan periode ke $t + k$

Pada metode pemulusan eksponensial, nilai S'_{t-1} dan S''_{t-1} diperlukan agar rumus dapat diterapkan secara tepat. Namun, pada periode awal $t = 1$, kedua nilai tersebut belum tersedia. Untuk mengatasi keterbatasan ini, nilai data aktual Y_t digunakan sebagai pendekatan awal atau pengganti bagi S'_1 dan S''_1 . (Makridakis, Wheelwright, dan Megee, 1995).

2.2 Ukuran Kesalahan Peramalan

MAPE merupakan indikator statistik yang digunakan untuk menilai sejauh mana hasil peramalan suatu model mendekati nilai aktual. Ukuran ini banyak dipilih karena perhitungannya sederhana serta hasilnya mudah

dipahami dan diinterpretasikan (Febrianti, Iskandar, dan Andrianti, 2024).

Secara matematis, dari ukuran kesalahan MAPE dapat dituliskan sebagai berikut:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{Y_t - \hat{Z}_t}{Y_t} \right| \times 100\% \tag{6}$$

dimana Y_t adalah data riil selama periode waktu ke t , \hat{Z}_t merupakan peramalan pada periode ke- t dimana $t = 1, 2, \dots, n$ serta n merupakan banyaknya periode waktu. Adapun kriteria peramalan berdasarkan nilai akurasi MAPE dapat sebagai berikut:

Tabel 1. Interpretasi Nilai MAPE

Nilai MAPE	Kriteria Peramalan
$MAPE < 10\%$	Sangat Akurat
$10\% \leq MAPE < 20\%$	Akurat
$20\% \leq MAPE < 50\%$	Cukup Akurat
$MAPE \geq 50\%$	Tidak Akurat

Sumber : (Makridakis dkk., 1999)

2.3 Optimasi Nonlinier Golden Section

Dalam memperkecil interval pencarian secara efisien dan memperoleh titik perbandingan yang konstan, optimasi *golden section* memanfaatkan rasio emas (*golden ratio*), yang dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$R_1 = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2} = 0,618034. \tag{7}$$

Agar interval menjadi semakin kecil, diperlukan syarat $0 \leq R \leq 1$, sehingga nilai yang dipakai adalah R_1 yaitu 0,618034 (Mahkya, Yasin, dan Mukid, 2014). Dalam optimasi *golden section* akan dibuat titik simetris α_1 dan α_2 dalam interval $[x_1, x_2]$ yang batas intervalnya ditentukan terlebih dahulu. Nilai α_1 dan α_2 didapatkan dengan rumus sebagai berikut :

$$\alpha_1 = R x_1 + (1 - R) x_2. \tag{8}$$

$$\alpha_2 = x_1 + x_2 - \alpha_1. \tag{9}$$

Selanjutnya dilakukan pengurangan batas interval berdasarkan kriteria *golden section*, yaitu :

- a Jika $f(\alpha_1) > f(\alpha_2)$, maka $x_{1,s+1} = \alpha_{1,s}$
- b Jika $f(\alpha_1) < f(\alpha_2)$, maka $x_{2,s+1} = \alpha_{2,s}$,

dimana $f(\alpha_1)$ dan $f(\alpha_2)$ merupakan fungsi tujuan dari DES Brown dengan masing – masing parameter α_1 dan α_2 . Lalu dilakukan iterasi hingga

$$|x_2 - x_1| < e, \tag{10}$$

dengan e adalah batas ketelitian yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah mencapai nilai e yang ditentukan, maka akan dicari nilai minimum diantara $f(\alpha_1)$ dan $f(\alpha_2)$ (Luknanto, 2000).

2.4 Optimasi Nonlinier Levenberg-Marquardt

Dalam algoritma Levenberg-Marquardt, masalah optimisasi nonlinier di mana fungsi $F: R^n \rightarrow R^m$ dapat didiferensialkan secara kontinu. Tujuannya adalah untuk menemukan titik $x \in R^n$ yang meminimalkan fungsi kuadrat terkecil. Masalah kuadrat terkecil dapat ditulis sebagai :

$$\phi(x) = \frac{1}{2} \|F(x)\|^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (f_i(x))^2, \tag{11}$$

untuk menyelesaikan masalah ini, Levenberg (1944) dan Marquardt (1963) mengembangkan algoritma yang kini dikenal sebagai optimasi Levenberg-Marquardt. Optimasi ini menggabungkan dua algoritma minimalisasi numerik yaitu metode *gradient descent* dan metode Gauss-Newton. Optimasi Levenberg-Marquardt bertindak

lebih seperti metode *gradient decscent* ketika parameternya jauh dari nilai optimumnya, dan bertindak lebih seperti metode Gauss-Newton ketika parameternya mendekati nilai optimumnya (Gavin, 2019).

More (1978) menyempurnakan algoritma Levenberg–Marquardt dengan pendekatan *trust region* untuk meningkatkan kestabilan numerik, pemilihan parameter redaman (λ) menggunakan algoritma Hebden (1973), serta skala variabel adaptif untuk memperhitungkan sensitivitas parameter. Pendekatan ini memungkinkan penyederhanaan sifat nonlinier fungsi melalui pendekatan linier lokal menggunakan ekspansi Taylor orde pertama, sehingga langkah perbaikan diformulasikan sebagai masalah kuadrat terkecil dalam batas *trust region*. Parameter λ berperan penting dalam menyeimbangkan stabilitas dan kecepatan konvergensi jika nilai λ besar membuat algoritma menyerupai *gradient descent*, sedangkan jika nilai λ kecil algoritma bertansisi ke metode *Gauss–Newton*. Dengan penyesuaian λ secara adaptif pada tiap iterasi, algoritma ini dapat menjaga kestabilan, memastikan arah perbaikan menuju penurunan fungsi objektif, dan mencapai konvergensi secara efisien. Kriteria penghentian algoritma Levenberg-Marquardt dirancang agar sesuai dengan karakteristik solusi optimum, yaitu ketika norma gradien cukup kecil, yaitu $\|\nabla\phi(x_k)\| \leq \varepsilon_1$, perubahan langkah kecil $\|p_k\| \leq \varepsilon_2, (\|x_k\| + \varepsilon_2)$, penurunan nilai fungsi objektif sangat kecil $|\phi(x_{k+1}) - \phi(x_k)| \leq \varepsilon_3$. Diperlukan pula batas maksimum jumlah iterasi yang diizinkan dalam proses iteratif, agar algoritma tidak berjalan tanpa henti. Oleh karena itu, digunakan kriteria $m \geq m_{\max}$ (More, 1978; Madsen, Nielsen, & Tingleff, 2004; Gavin, 2024).

2.5 Nilai Transaksi Belanja Menggunakan Uang Elektronik

Nilai transaksi merupakan jumlah keseluruhan pembayaran yang sesungguhnya dikeluarkan atas barang dan jasa, baik yang telah dibayarkan maupun yang masih akan dibayarkan oleh pembeli kepada penjual atau atas nama penjual (Febriaty, 2019). Uang elektronik adalah alat pembayaran yang diterbitkan berdasarkan sejumlah dana yang sebelumnya disetorkan oleh pemegang kepada penerbit. Nilai uang dalam format digital ini diperoleh melalui proses penukaran uang tunai atau pendebetan rekening bank, kemudian disimpan dalam media penyimpanan dana seperti server atau kartu berbasis chip (Yulianto dan Ferdinand, 2016).

2.6 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan data terkait nilai transaksi uang elektronik di Indonesia selama periode Januari 2019 hingga Desember 2024. Data tersebut diperoleh dari laporan Sistem Pembayaran dan Infrastruktur Pasar Keuangan (SPIP) yang dipublikasikan oleh Bank Indonesia dan dapat diakses pada laman <https://www.bi.go.id/id/statistik/ekonomi-keuangan/spip/Default.aspx>. Adapun tahapan analisis data dalam penelitian ini meliputi:

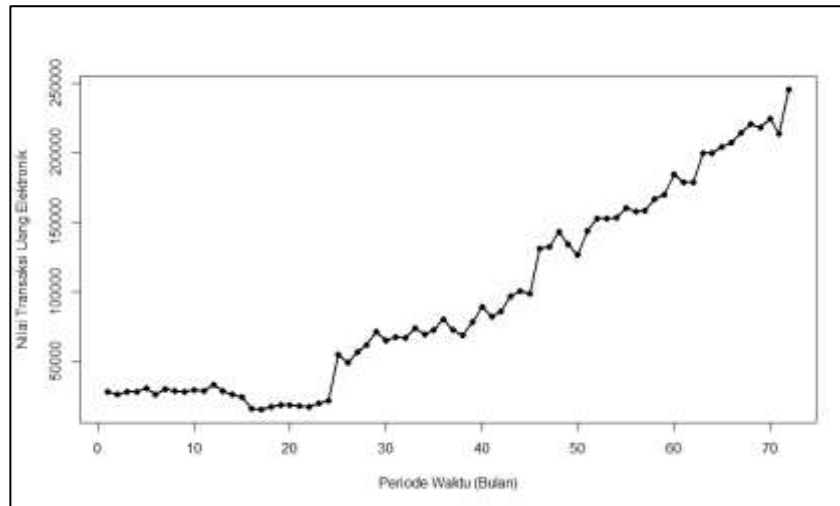
1. Melakukan analisis statistika deskriptif, yakni membuat grafik runtun waktu untuk melihat pola dan gambaran dari data penelitian.
2. Mencari nilai parameter pemulusan α optimum menggunakan optimasi *golden section* dengan uraian sebagai berikut:
 - a. Menentukan nilai *golden ratio* dengan menggunakan persamaan (7).
 - b. Menentukan batas bawah $(x_{1,0})$, batas atas $(x_{2,0})$, dan e . Dalam penelitian ini digunakan nilai $x_{1,0} = 0,00001$; $x_{2,0} = 0,99999$; dan $e = 10^{-5}$.
 - c. Menghitung nilai $\alpha_{1,s}$ menggunakan persamaan (8) dan nilai $\alpha_{2,s}$ menggunakan persamaan (9).
 - d. Menghitung nilai $f(\alpha_{1,s})$ dan $f(\alpha_{2,s})$. Dalam penelitian ini, $f(\alpha_{1,s})$ dan $f(\alpha_{2,s})$ merupakan nilai MAPE dari DES Brown dengan masing-masing parameter nilai $\alpha_{1,s}$ dan $\alpha_{2,s}$, sehingga pada perhitungannya digunakan persamaan (6) dimana nilai \hat{Z}_t merupakan hasil ramalan dari DES Brown pada waktu ke- t .
 - e. Mengurangi batas interval berdasarkan kriteria *golden section*.
 - f. Mengulangi langkah c sehingga e sampai memenuhi persamaan (10)
 - g. Mencari nilai $f(\alpha^*)$ minimum diantara $f(\alpha_{1,s})$ dan $f(\alpha_{2,s})$.
3. Mencari nilai parameter pemulusan α optimum menggunakan optimasi Levenberg-Marquardt dengan uraian sebagai berikut:
 - a. Menentukan nilai parameter α awal yaitu sebesar 0,00001.
 - b. Menghitung nilai residual $\hat{Z}(\alpha_k)$ dan Jacobian $J(\alpha_k)$
 - c. Menghitung langkah koreksi p

- d. Mengevaluasi nilai fungsi $F(\alpha + p)$ dan menghitung nilai ρ
 - e. Jika $\rho > 0$, terima langkah koreksi dengan memperbarui parameter ($\alpha_{k+1} = \alpha_k + p$) dan kurangi nilai λ .
 - f. Jika $\rho \leq 0$, tolak langkah koreksi ($\alpha_{k+1} = \alpha_k + p$) dan perbesar λ .
 - g. Mengulangi langkah b – f hingga memenuhi kriteria konvergensi
 - h. Setelah konvergen, hitung nilai MAPE menggunakan nilai parameter pemuluan optimum yang telah diperoleh.
4. Menghitung peramalan nilai transaksi menggunakan uang elektronik di Indonesia untuk 3 periode ke depan menggunakan metode DES Brown pada parameter pemuluan optimum *golden section* dan Levenberg-Marquardt menggunakan persamaan (5) dengan parameter pemuluan yang optimum.
 5. Membandingkan optimasi berdasarkan hasil peramalan pada metode DES Brown berdasarkan nilai MAPE.
 6. Membuat kesimpulan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Statistika Deskriptif

Grafik runtun waktu untuk data nilai transaksi belanja menggunakan uang elektronik di Indonesia disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Nilai transaksi uang elektronik di Indonesia pada Bulan Januari 2019 sampai dengan Desember 2024

Berdasarkan Gambar 1. bahwa nilai transaksi uang elektronik di Indonesia selama periode Bulan Januari 2019 sampai dengan Desember 2024 menunjukkan pola kecenderungan naik (tren naik). Hal ini disebabkan oleh masyarakat yang semakin banyak yang menggunakan dompet digital, QRIS, dan metode pembayaran elektronik lainnya. Berdasarkan pola data tersebut, metode DES Brown dapat digunakan karena terdapat pola tren yang jelas dalam data penelitian.

3.2 Pencarian Parameter Pemuluan yang Optimum DES Brown dengan *Golden Section*

Pada penelitian ini optimasi parameter pemuluan α pada metode DES Brown dengan menggunakan optimasi *golden section*. Nilai *golden ratio* yang digunakan adalah 0,6180384 berdasarkan persamaan (7). Dalam penelitian ini digunakan nilai batas bawah untuk parameter pemuluan ($x_{1,0}$) sebesar 0,00001, nilai batas atas untuk parameter pemuluan ($x_{2,0}$) sebesar 0,99999, dan nilai batas ketelitian (e) sebesar 10^{-5} . Pada proses optimasi parameter pemuluan α optimum, iterasi berhenti pada iterasi ke-24 dengan perhitungan selisih $x_{1,24}$ dan $x_{2,24}$ sebesar 0,0000095. Dengan $\alpha_{1,24}$ dan $\alpha_{2,24}$ yang diperoleh berturut-turut adalah 0,4634142 dan 0,4634178. Dari $\alpha_{1,24}$ dan $\alpha_{2,24}$ yang telah diperoleh, maka akan dicari nilai $f(\alpha)$ minimum diantara $\alpha_{1,24}$ dan $\alpha_{2,24}$. Karena $f(\alpha_{1,24}) > f(\alpha_{2,24})$, dimana $f(\alpha_{1,24}) = f(0,4634142) = 8,384393\%$ dan $f(\alpha_{2,24}) = f(0,4634178) = 8,384391\%$, maka $f(\alpha_{2,24})$ adalah nilai parameter pemuluan yang optimum

yaitu α^* yang diperoleh adalah sebesar 0,4634178. Kombinasi bobot pada masing-masing orde ditampilkan pada Tabel sebagai berikut:

Tabel 3.1 Hasil Perhitungan Lengkap Pencarian Paramater Pemulusan DES Brown Dengan Optimasi Golden Section

S	$\alpha_{1,s}$	$\alpha_{2,s}$	$f(\alpha_{1,s})$	$f(\alpha_{2,s})$	$x_{1,s}$	$x_{2,s}$	E_s
1	0,3843267	0,6156733	8,627670	9,072144	0,0100000	0,6156733	0,605673
2	0,2413466	0,3843267	9,521259	8,627670	0,2413466	0,6156733	0,374326
3	0,3843267	0,4726932	8,627670	8,391309	0,3843267	0,6156733	0,231346
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	0,4634084	0,4634178	8,384394	8,384391	0,4634084	0,4634331	0,000024
23	0,4634178	0,4634237	8,384391	8,384395	0,4634084	0,4634237	0,000015
24	0,4634142	0,4634178	8,384393	8,384391	0,4634237	0,4634142	0,0000095

3.3 Pencarian Parameter Pemulusan yang Optimum DES Brown dengan Levenberg-Marquardt

Dalam proses optimasi Levenberg-Marquardt, nilai awal parameter pemulusan α yang digunakan adalah sebesar 0,00001 yang kemudian dimasukkan ke dalam perhitungan algoritma Levenberg-Marquardt. Algoritma Levenberg-Marquardt memiliki fungsi-fungsi implisit dan melibatkan proses iteratif yang kompleks, sehingga perhitungannya sulit dilakukan secara manual dan memerlukan bantuan komputasi menggunakan *Software R* dengan bantuan *package library (minpack.lm)*. Nilai RSS yang dihasilkan pada setiap iterasi menjadi dasar dalam menentukan nilai parameter pemulusan yang optimum berdasarkan persamaan (15). Hasil proses iterasi dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Hasil Iterasi Nilai RSS dan Parameter Pemulusan Optimum Menggunakan Optimasi Levenberg-Marquardt

Iterasi	RSS	Parameter Pemulusan Optimum
0	3.408,24	0,00001
1	3.259,01	0,00101
2	2.993,69	0,00292455
3	2.566,82	0,00645568
⋮	⋮	⋮
15	70,2988	0,463259
16	70,2984	0,463347

Berdasarkan Tabel 3.2 diketahui bahwa nilai RSS terus mengalami penurunan pada setiap iterasi hingga mencapai nilai minimum sebesar 70,2984 pada iterasi ke-16 dengan parameter pemulusan α yang optimum sebesar 0,463347. Hal ini menunjukkan bahwa proses optimasi telah konvergen. Selanjutnya menghitung nilai peramalan metode DES Brown menggunakan parameter pemulusan yang optimum.

Tabel 3.3 Hasil Perhitungan Lengkap Metode DES Brown dengan $\alpha^* = 0,4633474$

t	S_t^-	S_t^+	a_t	b_t	\hat{Z}_{t+k}
1	28,02300	28,02300	28,023,00	-	-
2	27,00039	27,54918	26,45161	-0,47382262	28,02300
3	27,50526	27,52883	27,48169	-0,02034938	25,97778
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	219,65252	215,15355	224,15148	3,88441614	223,94251
71	216,74292	215,88998	217,59585	0,73642762	228,03589
72	230,12304	222,48483	237,76125	6,59484988	218,33228

Setelah memperoleh nilai peramalan \hat{Z}_{t+k} pada tabel 3.3, dapat dihitung nilai akurasi peramalannya. Perhitungan nilai MAPE untuk paramater pemulusan optimum metode DES Brown dengan $\alpha^* = 0,4633474$ menggunakan rumus MAPE pada persamaan (6) adalah sebesar 8,384413%.

3.4 Perbandingan Metode Optimasi

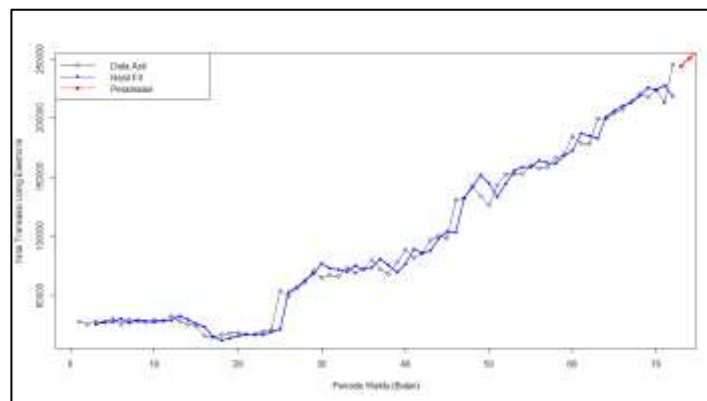
Masing-masing parameter pemulusan optimum optimasi *golden section* dan Levenberg-Marquardt memiliki nilai parameter pemulusan optimum, nilai MAPE, jumlah iterasi dan hasil peramalan yang berbeda.

Tabel 3.4 MAPE hasil peramalan DES Brown dengan parameter pemulusan optimum

Optimasi	Parameter Pemulusan Optimum	MAPE (%)	Jumlah Iterasi
Golden Section	0,4634178	8,384391	24
Levenberg-Marquardt	0,4633474	8,384413	16

Tabel 3.4 membandingkan optimasi *golden section* dan Levenberg–Marquardt dalam menentukan parameter pemulusan optimum pada metode DES Brown untuk peramalan transaksi uang elektronik di Indonesia. Keduanya menghasilkan MAPE kurang dari 10%, menunjukkan akurasi sangat baik, *golden section* menghasilkan nilai MAPE terkecil sebesar 8,384391%, hanya 0,000022% lebih baik dari nilai MAPE Levenberg–Marquardt sebesar 8,384413%. Namun, Levenberg–Marquardt lebih efisien untuk mencapai konvergensi dengan 16 iterasi sedangkan optimasi *golden section* memerlukan 24 iterasi. Jadi, meskipun *golden section* lebih akurat, Levenberg–Marquardt lebih unggul dalam kecepatan konvergensi.

Berikut visualisasi berupa garfik runtun waktu hasil peramalan menggunakan parameter pemulusan yang telah dioptimasi dapat disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan data aktual dan hasil peramalan nilai transaksi uang elektronik di Indonesia

Berdasarkan Gambar 2, grafik hasil peramalan nilai transaksi uang elektronik di Indonesia menunjukkan kecenderungan yang mendekati pola data aktual, disertai adanya peningkatan nilai pada periode Januari, Februari, dan Maret 2025.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa nilai parameter pemulusan optimum metode DES Brown untuk meramalkan nilai transaksi uang elektronik di Indonesia pada optimasi *golden section* sebesar 0,4634178 dan pada optimasi Levenberg-Marquardt nilai parameter pemulusan optimum sebesar 0,4633474, hasil peramalan nilai transaksi uang elektronik di Indonesia untuk 3 periode ke depan menggunakan DES Brown pada parameter pemulusan optimum optimasi *golden section* pada bulan Januari 2025 adalah sebesar Rp244.358,692 miliar, pada bulan Februari 2025 adalah sebesar Rp250.954,744 miliar dan pada bulan Maret 2025 adalah sebesar Rp257.550,796 miliar dan pada optimasi Levenberg-Marquardt hasil peramalan nilai transaksi uang elektronik di Indonesia untuk 3 periode ke depan menggunakan DES Brown pada bulan Januari 2025 adalah sebesar Rp244.356,099 miliar, pada bulan Februari 2025 adalah sebesar Rp250.950,949 miliar, dan pada bulan Maret 2025 adalah sebesar Rp257.545,799 miliar. Metode optimasi terbaik dalam menentukan parameter pemulusan dengan metode DES Brown adalah optimasi *golden section* karena menghasilkan nilai MAPE terkecil sebesar 8,384391%, namun optimasi Levenberg-Marquardt memerlukan iterasi yang lebih sedikit dibandingkan dengan *golden section*. Penelitian selanjutnya dapat metode peramalan lain seperti BWMA (*Brown's Weighted Exponential Moving Average*) atau menggunakan optimasi lain seperti PSO (*Particle Swarm Optimization*) atau GA (*Genetic Algorithm*).

5. Daftar Pustaka

- Al Mahkya, D., Yasin, H., & Mukid, M. A. (2014). Aplikasi Metode *Golden Section* Untuk Optimasi Parameter pada Metode *Exponential Smoothing*. *Jurnal Gaussian*, 3(4), 605-614. <https://doi.org/10.14710/j.gauss.3.4.605-614>
- Arez, A. R. P. S. (2021). Application Of The Hybrid Method Nonlinier Regression

- With Modified Logistic Growth Model-Exponential Double Smoothing For Forecasting Covid-19 Cases In Indonesia And Armenia. *Jurnal Matematika, Statistika dan Komputasi*, 17(2), 252-266.
<https://doi.org/10.20956/jmsk.v17i2.11747>
- Aswi, & Sukarna. (2006). *Analisis Runtun Waktu Aplikasi dan Teori*. Andira Publisher.
- Bank Indonesia. (2018). Peraturan Bank Indonesia Nomor 20/6/PBI/2018 tentang Uang Elektronik. www.bi.go.id diakses tanggal 09 Oktober 2019.
- Bank Indonesia. (2024). Sistem Pembayaran dan Pengelolaan Uang Rupiah (SPIP). <https://www.bi.go.id/id/statistik/ekonomi-keuangan/spip/Pages/SPIP-Juni-2024.aspx>
- Bidangan, J., Purnamasari, I., & Hayati, M. N. (2016). Perbandingan peramalan Metode *Double Exponential Smoothing* Satu Parameter Brown dan Metode *Double Exponential Smoothing* Dua Parameter Holt. *Jurnal Statistika Universitas Muhammadiyah Semarang*, 4(1).
- Budiasih, L. K. (2009). Metode Levenberg-Marquardt Untuk Masalah Kuadrat Terkecil Nonlinear. *Semin. Nas. Mat. dan Pendidik. Mat. Jur. Pendidik. Mat. FMIPA UNY*, 1152-1161.
- Farida, Y., Sulistiani, D. A., & Ulinnuha, N. (2021). Peramalan Indeks Pembangunan Manusia (IPM) Kabupaten Bojonegoro Menggunakan Metode Double Exponential Smoothing brown. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 6(2). <http://dx.doi.org/10.25157/teorema.v6i2.5521>
- Febriaty, H. (2019). Pengaruh Sistem Pembayaran Non Tunai Dalam Era Digital Terhadap Tingkat Pertumbuhan Ekonomi Indonesia. *Prosiding FRIMA (Festival Riset Ilmiah Manajemen Dan Akuntansi)*, (2), 307-313.
- Febrianti, I., Iskandar, R. A., & Andrianti, I. (2024). Analisis Pengadaan Chemical Oase Purple (aMDEA) Menggunakan Metode Peramalan *Moving Avarage* Dan *Exponential Smoothing*. *JURNAL TEKNO SAINS KODEPENA*, 5(1), 41-56.
<https://doi.org/10.54423/teknosains.v5i1.82>
- Gavin, H. P. (2019). The *Levenberg-Marquardt* Algorithm For Nonlinier Least Squares Curve-Fitting Problems. Department of Civil and Environmental Engineering *Duke University*, 1-19.
- Habsari, H. D. P., Purnamasari, I., & Yuniarti, D. (2020). Forecasting Uses Double Exponential Smoothing Method and Forecasting Verification Uses Tracking Signal Control Chart (Case Study: Ihk Data of East Kalimantan Province). *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika Dan Terapan*, 14(1), 013-022.
<https://doi.org/10.30598/barekengvol14iss1pp013-022>
- Hyndman, R., Koehler, A. B., Ord, J. K., & Snyder, R. D. (2008). *Forecasting with exponential smoothing: the state space approach*. Springer Science & Business Media.
- Heizer, J., dan Render, B. (2015). *Dasar-Dasar Manajemen Produksi dan Operasi*. Jakarta: Salemba Empat.
- Khotijah, S., Samaniyah, S., Sarifah, L., & Faisol, F. (2023). Peramalan Jumlah Penduduk Kecamatan Pragaan Menggunakan Metode Statistical Staight Line. *Zeta-Math Journal*, 8(2), 55-59.
<https://doi.org/10.31102/zeta.2023.8.2.55-59>
- Kotler, P., Keller, K. L., Brady, M., Goodman, M., & Hansen, T. (2016). *Marketing Management 3rd edn PDF eBook*. Pearson Higher Ed.
- Kurniagara, K. (2017). Penerapan Metode Exponential Smoothing Dalam Memprediksi Jumlah Siswa Baru (Studi Kasus: Smk Pemda Lubuk Pakam). *Pelita Informatika: Informasi dan Informatika*, 6(1), 19-25.
- Licker, M. D. 2003. *Dictionary of Mathematics Second Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Luknanto, D. (2000). *Pengantar Optimasi Nonlinier*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Madsen, K., Nielsen, H. B., & Tingleff, O. (2004). *Methods for nonlinear least squares problems* (2nd ed.). Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.
- Manullang, S., & Mansyur, A. (2023). Peramalan Penjualan Beras Di Perum Bulog Sub Divre Medan Menggunakan Metode Double Exponential Smoothing. *Jurnal Riset Rumpun Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 2(1), 26-36.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., dan Mcgee, V. E. (1995). *Metode dan Aplikasi Peramalan, Jilid 1 Edisi Kedua*. Jakarta: Erlangga.
- Maulana, H. A. (2018). Pemodelan deret waktu dan peramalan curah hujan pada dua belas stasiun di Bogor. *Jurnal Matematika, Statistika dan Komputasi*, 15(1), 50-63. <https://doi.org/10.20956/jmsk.v15i1.4424>
- More, J. J. (1978). *The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory*. In G. A. Watson (Ed.), *Lecture Notes in Mathematics* (Vol. 630, pp. 105-116). Berlin: Springer.
- Novalia, D., Sugiman, S., & Sunarmi, S. (2018). Perbandingan Hasil Optimasi Pada Metode Brown's *One-Parameter Double Exponential Smoothing* Menggunakan Algoritma Non-Linear Programming Berbantuan Matlab. *Unnes Journal of Mathematics*, 7(1), 18-27.
<https://doi.org/10.15294/ujm.v7i1>
- Putra, R. A. A., Zahro, H. Z., & Rudhistiar, D. (2023). Penerapan Metode *Double Exponential Smoothing*

- Untuk Peramalan Penjualan Unit Mobil. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 7(4), 2311-2318.
<https://doi.org/10.36040/jati.v7i4.7493>
- Sihotang, E. T. (2016). Faktor penentu yang mempengaruhi penggunaan layanan internet banking. *Kinerja: Jurnal Ekonomi dan Manajemen*, 13(1), 25-36.
- Sitompul, H. A. (2018). Optimasi Pemulusan Eksponensial dengan Algoritma Levenberg-Marquardt. *Jurnal Darma Agung*, 26(1), 583-590.
- Soeharjoto, S. (2018). Kemampuan dan kinerja keuangan provinsi kalimantan. *Akuntabel*, 15(2), 131-138.
- Solikin, & Suseno. (2002). *Pengertian, Penciptaan dan Peranan Uang dalam Perekonomian*. Jakarta: Pusat Pendidikan dan Studi Kebanksentralan (PPSK).
- Subagyo, P. (1986). *Forecasting Konsep dan Aplikasi*, BPFE Yogyakarta: Yogyakarta.
- Walida, N., Wahyuningsih, S. and Fidia Deny Tisna Amijaya (2021) 'Pemilihan Parameter Optimum Menggunakan Exponential', *Jambura Journal of Probability and Statistics*, 2(November), p. 11.
<https://doi.org/10.34312/jjps.v2i2.10416>
- Widiya, W. H., & Arianto, D. B. (2024). Penerapan *Golden section* Terhadap Optimasi Parameter Single Exponential Smoothing Pada Nilai Impor Di Indonesia Tahun 2022-2023. *Apotema: Jurnal Program Studi Pendidikan Matematika*, 10(1), 49-55.
- Yani, T. A. R., Wahyuningsih, S., & Siringoringo, M. (2022). Optimasi Parameter Pemulusan Pada Metode Peramalan Double Exponential Smoothing Holt Menggunakan *Golden section*. *EKSPONENSIAL*, 13(1), 51-56.
<https://doi.org/10.30872/eksponensial.v13i1.880>
- Yulianto, Y., Ferdinand, A. T., & Soesanto, H. (2016). Studi Mengenai Pengaruh Tekanan Waktu Untuk Membeli, Derajat Diferensiasi Produk Dan Customer Value Terhadap Minat Bertransaksi Ulang Menggunakan Uang. Elektronik (*Studi pada Pengguna Uang Elektronik E-Money di Kota Semarang*) (Doctoral dissertation, Diponegoro University). 16(3), 152-167.