

PERBANDINGAN METODE NUMERIK DALAM ESTIMASI *IMPLIED VOLATILITY* SAHAM TESLA

COMPARISON OF NUMERICAL METHODS FOR ESTIMATING THE IMPLIED VOLATILITY OF TESLA STOCK OPTIONS

Alfani Nur Azizah¹, Via Amanda^{2*}, Anggraini Puspita Sari³, Sischa Wahyuning Tyas⁴

E-mail: alfaninur35@gmail.com, amandavyaa@gmail.com, anggraini.puspita.if@upnjatim.ac.id,
sischa_wahyuning.sada@upnjatim.ac.id

^{1,2,4} Program Studi Sains Data Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pembangunan Nasional
"Veteran" Jawa Timur

³ Program Studi Informatika Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pembangunan Nasional
"Veteran" Jawa Timur

Abstrak

Tesla merupakan perusahaan otomotif dan teknologi terkemuka dengan saham yang memiliki volatilitas tinggi akibat dinamika industri kendaraan listrik dan evaluasi spekulatif, sehingga opsi saham Tesla menjadi instrumen penting bagi investor. Tingginya volatilitas tersebut memengaruhi harga opsi, sehingga implied volatility (IV) digunakan sebagai parameter utama untuk merepresentasikan ekspektasi pasar dan diestimasi melalui penyelesaian masalah balik volatilitas. Dengan menggunakan model *Black-Scholes* tanpa dividen, penelitian ini membandingkan metode *Newton-Raphson*, *Bisection*, dan *Brent* dalam mengestimasi *implied volatility* (IV) pada opsi saham Tesla. Dataset diperoleh dari repositori publik Zenodo dengan total 1.182.194 data, kemudian difilter pada periode Agustus hingga Oktober 2018 sehingga menghasilkan 82.113 data yang digunakan dalam penelitian. Masalah akar non-linear dari fungsi selisih harga opsi pasar dan harga teoritis diselesaikan untuk melakukan estimasi IV. Tingkat keberhasilan konvergensi, jumlah iterasi, dan waktu komputasi digunakan untuk mengevaluasi secara menyeluruh kinerja tiga metode numerik pada data saham dengan volatilitas tinggi, yang masih terbatas dalam penelitian sebelumnya. Hasil menunjukkan bahwa metode *Newton-Raphson* memiliki kecepatan tinggi dengan rata-rata 1,45 iterasi dan waktu 0,000812 detik. Namun, karena sensitif terhadap tebakan awal, tingkat keberhasilannya hanya 41,29%. Metode *Bisection* sangat stabil dengan tingkat keberhasilan 82,95%, tetapi membutuhkan iterasi lebih banyak yakni 37,39 iterasi dan waktu komputasi lebih lama 0,002326 detik. Metode *Brent* memiliki keseimbangan terbaik dengan tingkat keberhasilan 82,68%, iterasi rata-rata 9,07 iterasi, dan waktu komputasi 0,002326 detik. Sehingga berdasarkan hasil, salah satu implikasi praktis pada penelitian ini adalah metode *Brent* lebih direkomendasikan untuk estimasi implied volatility pada data opsi dengan karakteristik volatilitas tinggi seperti saham Tesla.

Kata kunci: *implied volatility, newton-raphson, bisection, brent, opsi saham, tesla*

Abstract

Tesla is a leading automotive and technology company whose stock exhibits high volatility due to the dynamics of the electric vehicle industry and speculative market sentiment, making Tesla stock options a key instrument for investors. This high volatility affects option prices, so implied volatility (IV) is used as the primary parameter to represent market expectations and is estimated through the inverse volatility problem. Using the dividend-free Black-Scholes model, this study compares the Newton-Raphson, Bisection, and Brent methods in estimating implied volatility (IV) for Tesla stock options. The dataset was

obtained from the Zenodo public repository with a total of 1,182,194 records, filtered to the period August–October 2018, yielding 82,113 contracts used in this study. The nonlinear root problem of the difference between the market option price and the theoretical price is solved to estimate IV. The convergence success rate, number of iterations, and computation time are used to comprehensively evaluate the performance of the three numerical methods on high-volatility stock data, which has been limited in previous research. The results show that the Newton-Raphson method is fast, with an average of 1.45 iterations and a runtime of 0.000812 seconds. However, because it is sensitive to the initial guess, its success rate is only 41.29%. The Bisection method is very stable with a success rate of 82.95%, but requires more iterations—namely 37.39 iterations—and a longer computation time of 0.002326 seconds. The Brent method offers the best balance with a success rate of 82.68%, an average of 9.07 iterations, and a computation time of 0.002326 seconds. Therefore, based on the results, one practical implication of this study is that the Brent method is more recommended for estimating implied volatility in option data with high volatility characteristics, such as Tesla stock.

Keywords: implied volatility, newton-raphson, bisection, brent, stock options, tesla

Submitted : 31 Desember 2025 Revised : 1 May 2026 Accepted : 8 May 2026

1. PENDAHULUAN

Tesla merupakan salah satu perusahaan teknologi dan otomotif paling berpengaruh yang telah mengubah paradigma industri kendaraan listrik global [1]. Saham Tesla dikenal memiliki tingkat volatilitas yang sangat tinggi akibat dinamika industri kendaraan listrik, reaksi pasar terhadap informasi, serta penilaian perusahaan yang sering bersifat spekulatif [2] sehingga instrumen turunan seperti opsi saham Tesla menjadi semakin penting bagi investor dan trader [3]. Dalam penentuan harga opsi, implied volatility (IV) merupakan parameter krusial yang mencerminkan ekspektasi pasar terhadap perubahan harga di masa depan [4]. Secara matematis, IV diperoleh dengan menyelesaikan persamaan balik (*inverse problem*) dari model Black-Scholes:

$$f(\sigma) = C_{BS}(\sigma) - C_{market} = 0 \quad [1]$$

Di mana $C_{BS}(\sigma)$ adalah harga opsi teoritis model Black-Scholes dan C_{market} adalah harga opsi pasar. Karena $f(\sigma)$ bersifat non-linear terhadap σ , solusinya tidak dapat diperoleh secara analitik, melainkan memerlukan metode numerik iteratif.

Berdasarkan penelitian sebelumnya pada jurnal “Menguji Keefisienan Metode Newton-Raphson, Metode Secant, dan Metode Bisection dalam Memprediksi Implied Volatilities Saham PT. Bank Central Asia Tbk” [5], membandingkan Newton-Raphson, Secant, dan Bisection, dengan hasil bahwa Newton-Raphson unggul dalam kecepatan konvergensi namun rentan gagal ketika nilai vega mendekati nol [6]. Hal serupa ditemukan pada penelitian saham Apple Inc. [7], di mana Bisection terbukti lebih stabil meskipun memerlukan iterasi lebih banyak [8]. Namun, kedua penelitian tersebut berfokus pada saham dengan volatilitas moderat dan tidak mengikutsertakan metode Brent, yang secara teoritis menggabungkan keunggulan Bisection, Secant, dan interpolasi invers kuadrat sehingga menjamin konvergensi sekaligus memberikan kecepatan superlinear.

Tidak ada penelitian yang secara eksplisit membandingkan Newton-Raphson, Bisection, dan Brent pada saham bervolatilitas tinggi seperti Tesla, di mana kondisi pasar ekstrem dapat menyebabkan ketidakstabilan numerik dan kegagalan konvergensi lebih sering daripada pada saham bervolatilitas rendah. Untuk mengisi celah ini, penelitian ini menggunakan 82.113 data opsi saham Tesla dari Agustus hingga Oktober 2018. Studi ini

mengevaluasi ketiga metode estimasi IV berdasarkan tingkat keberhasilan konvergensi, jumlah iterasi, dan waktu komputasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan rekomendasi metode estimasi IV yang paling efisien dan efektif bagi akademisi dan praktisi pasar keuangan.

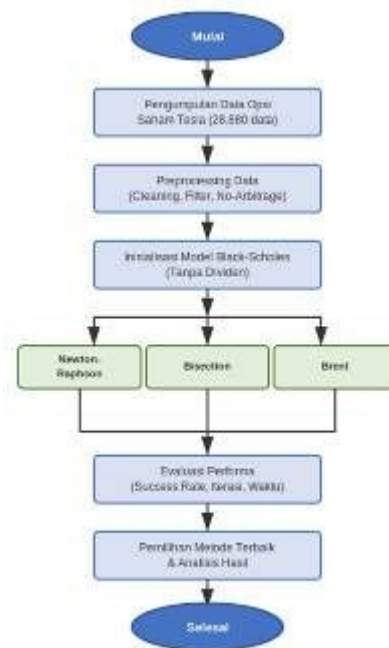
Tujuan penelitian ini untuk menganalisis dan membandingkan cara kerja metode Newton-Raphson, Bisection, dan Brent dalam menghitung volatilitas implisit pada saham Tesla yang memiliki tingkat volatilitas tinggi. Penelitian ini juga bertujuan menilai seberapa cepat metode-metode tersebut konvergen, seberapa stabil mereka, berapa banyak langkah perhitungan yang dibutuhkan, serta berapa lama waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan perhitungan. Dari hasil evaluasi tersebut, penelitian ingin mengetahui metode mana yang paling efektif dan dapat diandalkan untuk digunakan dalam menentukan volatilitas implisit di tengah kondisi pasar yang terus berubah.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis dan membandingkan efektivitas tiga algoritma pencarian akar numerik, yaitu Newton-Raphson, Bisection, dan Brent, dalam proses mengestimasi *implied volatility* pada opsi saham Tesla. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari repositori publik Zenodo [16] yang menyediakan dataset historis opsi saham Tesla (TSLA) dengan total 1.182.194 data. Dataset tersebut mencakup informasi harga opsi, *implied volatility*, serta Greeks. Dari keseluruhan data tersebut, penelitian ini hanya menggunakan data pada periode Agustus hingga Oktober 2018, yang berjumlah 157.248 data. Setelah melalui tahap preprocessing, diperoleh 82.113 data akhir yang digunakan untuk proses estimasi IV. Penelitian ini dilakukan secara komputasi menggunakan bahasa pemrograman Python. Variabel yang digunakan mencakup harga aset dasar, harga *strike*, jumlah hari hingga masa berakhir (*days to expiry/DTE*), harga *bid*, harga *ask*, dan harga terakhir. Penelitian ini menggunakan kontrak opsi call dan put secara bersamaan — keduanya diproses dalam satu pipeline estimasi IV tanpa pemisahan berdasarkan tipe kontrak, mengikuti pendekatan yang umum digunakan dalam literatur estimasi IV berbasis Black-Scholes. Alur penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.1. Penelitian dimulai dengan pengumpulan data pasar opsi saham Tesla.

Data kemudian melalui tahap *preprocessing*, meliputi pembersihan data (*data cleaning*), penyesuaian variabel, dan pemfilteran kontrak berdasarkan empat kriteria berikut. Pertama, kontrak dengan harga opsi pasar (midpoint bid-ask) $C_{market} \leq 0,1$ dikeluarkan karena mencerminkan kontrak yang tidak likuid atau tidak aktif diperdagangkan. Kedua, kontrak dengan harga bid dan harga ask keduanya bernilai nol ($best_bid = 0$ dan $best_offer = 0$) juga dikeluarkan karena tidak memiliki kuota pasar yang valid. Ketiga, kontrak yang tidak memenuhi syarat batas bawah no-arbitrage dikeluarkan, yaitu: untuk opsi call, harga opsi pasar harus memenuhi $C \geq \max(S-K, 0)$, dan untuk opsi put harus memenuhi $P \geq \max(K-S, 0)$. Kontrak yang harga pasarnya berada di bawah batas bawah teoretis ini melanggar kondisi bebas-arbitrase sehingga dikeluarkan. Keempat, kontrak dengan time to maturity $T \leq 0,0001$ tahun dikeluarkan karena masa jatuh tempo yang hampir habis menyebabkan ketidakstabilan numerik. Dari 157.248 data awal periode tiga bulan, setelah seluruh filter diterapkan diperoleh 82.113 data yang digunakan untuk proses estimasi IV. Selanjutnya, persamaan harga opsi Black-Scholes diinversikan dan diselesaikan secara numerik menggunakan tiga metode, yaitu Newton-Raphson, Bisection, dan Brent. Hasil estimasi *implied volatility* dari setiap metode dibandingkan berdasarkan tiga kriteria performa: tingkat keberhasilan konvergensi (*success rate*), jumlah iterasi rata-rata, dan waktu komputasi (*execution time*). Pada tahap akhir, dipilih metode yang paling efektif dan dapat diandalkan. Untuk memudahkan pemahaman mengenai cara penerapan dan

karakteristik setiap metode, pembahasan akan dijelaskan secara lebih jelas dan rinci pada subbab di bawah ini.



Gambar 2.1 alur metodologi penelitian estimasi implied volatility opsi saham Tesla

2.1 Implied Volatility

Implied Volatility (IV) adalah volatilitas yang “tersirat” dalam harga opsi yang terlihat di pasar [9]. Pada model Black–Scholes untuk opsi *call* yang tidak menerima dividen, sehingga asumsi menunjukkan bahwa saham Tesla tidak membayar dividen selama periode penelitian Agustus hingga Oktober 2018, yang secara empiris dapat diverifikasi karena Tesla memang tidak pernah memberikan dividen kepada pemegang saham selama periode tersebut. Oleh karena itu, bagian keuntungan dividen yield q diasumsikan sama dengan nol ($q = 0$), sehingga persamaan harga opsi ditulis sebagai berikut [10]:

$$C_{BS} = S\Phi(d_1) - K_e^{-rT}\Phi(d_2) \quad [2]$$

Dengan:

$$d_1 = \frac{\ln(S/K) + (r + \frac{1}{2}\sigma^2)T}{\sigma\sqrt{T}} \quad [3]$$

$$d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{T} \quad [4]$$

Keterangan:

S = Harga aset dasar

K = *Strike price*

σ = Volatilitas aset

Sepanjang penelitian, *risk-free rate* (r) diasumsikan konstan sebesar 4,5% per tahun, mengacu pada rata-rata US Treasury Bill 3 bulan yang berlaku pada periode Agustus hingga Oktober 2018. Pencarian *implied volatility* dapat dilakukan dengan metode numerik terhadap fungsi persamaan sebagai berikut:

$$f(\sigma) = C_{BS}(S, K, T, r, \sigma) - C_{market} = 0 \quad [5]$$

Artinya, *implied volatility* adalah nilai σ yang membuat harga teoritis Black-Scholes sama dengan harga opsi.

2.2 Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson merupakan metode pendekatan yang menggunakan satu titik awal dan mendekatinya dengan menggunakan gradien pada titik tersebut [11]. Pada model Black-Scholes, turunan $f'(\sigma)$ adalah Vega atau sensitivitas harga opsi terhadap *volatility*. Persamaan vega adalah sebagai berikut.

$$\text{Vega} = S\phi(d_1)\sqrt{T} \quad [6]$$

Kemudian persamaan iterasi untuk mencari akar adalah sebagai berikut.

$$\sigma_{n+1} = \sigma_n - \frac{C_{BS}(\sigma_n) - C_{market}}{S\phi(d_1)\sqrt{T}} \quad [7]$$

Keterangan:

σ_n = *Volatility* pada iterasi ke- n

σ_{n+1} = Nilai volatilitas dari hasil keluaran berikutnya

C_{market} = Harga opsi aktual yang diperdagangkan.

Iterasi dihentikan dengan melakukan pembatasan pada banyaknya iterasi atau dengan cara mensyaratkan kedua titik jepit hampiran akar berjarak dekat, yakni jarak tersebut kurang dari $\varepsilon > 0$; dengan nilai ε positif yang disebut dengan toleransi kesalahan [12]. Nilai toleransi $\varepsilon = 10^{-6}$ dengan maksimum iterasi 1.000 dan initial guess $\sigma_0 = 0,2$ adalah nilai volatilitas yang umumnya dianggap sebagai titik awal yang wajar.

2.3 Metode Bisection

Metode ini masuk ke dalam kategori metode *bracketing*, di mana akar fungsi dicari dengan cara memperkecil interval secara berulang. Untuk menghitung iterasi dilakukan dengan menghitung titik tengah $= \frac{1}{2}(a + b)$, kemudian jika $f(a) \cdot f(m) < 0$, akar berada di $[a, m]$, jika tidak maka di $[m, b]$, ulangi hingga interval sangat kecil [13]. Parameter

numerik pada metode ini batas interval awal ditetapkan $[\sigma_a, \sigma_b] = [10^{-6}, 5.0]$, yang mencakup berbagai tingkat ketidakpastian yang mungkin terjadi pada opsi saham yang memiliki tingkat volatilitas tinggi. Nilai toleransi $\varepsilon = 10^{-6}$ dengan maksimum iterasi 1.000. Keunggulan pada metode ini adalah tidak bergantung pada turunan fungsi. metode ini dapat digunakan untuk menemukan akar [14] fungsi yang tidak mulus. Metode Bisection lebih perlahan dibandingkan metode lain yang memakai kelengkungan fungsi untuk mencari akar, tetapi mempunyai kelebihan tertentu dalam kondisi tertentu .

2.4 Metode Brent

Metode ini merupakan hibrida dari Bisection, Secant dan *Inverse Quadratic Interpolation*, sehingga mampu mengeksploitasi keunggulan masing-masing metode [15]. Metode Brent cocok jika variabel x sebagai fungsi kuadrat dari y , kemudian menggunakan persamaan interpolasi sebagai berikut.

$$\sigma_{k+1} = \sigma_{k-1} - g(\sigma_{k-1}) \frac{\sigma_{k-1} - \sigma_{k-2}}{g(\sigma_{k-1}) - g(\sigma_{k-2})} \quad [8]$$

Keterangan:

σ_{kg} = Perkiraan akar pada iterasi ke- k

σ_{k-1} = Perkiraan akar iterasi sebelumnya

$g(\sigma_{(k)})$ = Nilai fungsi pada σ

Metode Brent menjamin konvergensi seperti bisection, tetapi karena menggunakan interpolasi ketika kondisi fungsi memungkinkan, berkonvergensi lebih cepat. Adapun parameter numerik yakni batas interval awal memiliki kesamaan dengan metode Bisection yaitu $[\sigma_a, \sigma_b] = [10^{-6}, 5.0]$, dengan nilai toleransi $\varepsilon = 10^{-6}$ dengan maksimum iterasi 1.000.

Estimasi *implied volatility* dilakukan dengan menghitung perbedaan antara harga opsi pasar dan harga opsi model menggunakan beberapa metode numerik. Pada metode Newton-Raphson, proses dimulai dengan memilih nilai volatilitas awal yang kemudian diperbarui secara bertahap menggunakan turunan fungsi hingga mencapai kondisi yang memenuhi kriteria konvergensi. Metode Bisection bekerja dengan menentukan rentang volatilitas yang menyebabkan perubahan tanda pada fungsi perbedaan harga, lalu rentang tersebut dibagi dua berulang kali hingga diperoleh nilai volatilitas yang stabil. Metode Brent menggabungkan pendekatan Bisection, Secant, dan interpolasi kuadratik terbalik untuk menjaga stabilitas dan mempercepat proses konvergensi. Nilai volatilitas akhir dari masing-masing metode digunakan sebagai estimasi volatilitas implisit dan dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitas setiap metode.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil perhitungan *implied volatility* menggunakan tiga metode numerik, yaitu Newton-Raphson, Bisection, dan Brent. Evaluasi dilakukan berdasarkan tiga aspek, yaitu tingkat keberhasilan (*success rate*), jumlah iterasi rata-rata, dan kecepatan komputasi (*execution time*).

3.1 Hasil Perhitungan *Implied Volatility*

3.1.1 Metode Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson diterapkan untuk menghitung *implied volatility* pada setiap observasi dalam dataset. Metode ini memanfaatkan turunan pertama (vega) sehingga proses iterasi sangat bergantung pada kestabilan nilai turunan tersebut. Pada beberapa jenis opsi, terutama yang berada jauh dari kondisi ATM, nilai vega dapat menjadi sangat kecil

sehingga proses pembaruan nilai dapat menjadi tidak stabil. Hasil dari metode Newton–Raphson, termasuk tingkat keberhasilannya dan bagaimana proses iterasi berlangsung dapat dilihat pada Gambar 3.1.

```
*** === NR ===  
Success Rate : 41.29%  
Iteration    : 1.46  
Execution    : 0.000686
```

Gambar 3.1 Hasil Performa Distribusi Metode Newton-Raphson

Berdasarkan Gambar 3.1, dapat diketahui bahwa metode Newton-Raphson memiliki tingkat keberhasilan sebesar 41,29%, waktu eksekusi yang cepat dan membutuhkan iterasi yang relatif sedikit. Namun, tingkat keberhasilannya yang rendah menunjukkan bahwa metode ini sensitif terhadap kondisi awal dan karakteristik fungsi, terutama ketika nilai vega kecil atau opsi berada jauh dari titik ATM sehingga iterasi tidak stabil. Hasil ini konsisten dengan temuan Rahayuni et al. [10] dan Dennaya et al. [5] yang menunjukkan bahwa Newton-Raphson rentan mengalami kegagalan konvergensi pada kondisi vega mendekati nol. Pada saham bervolatilitas tinggi seperti Tesla, fenomena ini lebih sering terjadi karena sebaran harga opsi yang lebar menghasilkan lebih banyak kontrak deep OTM dengan nilai vega yang sangat kecil sehingga langkah Newton menjadi sangat besar dan tidak terkendali (divergen). Secara teoritis, konvergensi Newton-Raphson dijamin hanya jika tebakan awal berada cukup dekat dengan akar sejati, suatu kondisi yang sulit dipenuhi secara konsisten pada dataset berskala besar.

3.1.2 Metode Bisection

Metode Bisection diterapkan untuk menghitung *implied volatility* dengan melakukan pencarian akar melalui pembagian interval secara berulang. Berbeda dengan Newton-Raphson yang bergantung pada turunan pertama, metode ini hanya membutuhkan evaluasi fungsi tanpa informasi turunan. Oleh karena itu, proses iterasinya lebih stabil, terutama ketika struktur harga opsi menyebabkan fungsi tidak memiliki gradien yang jelas atau ketika vega mendekati nol. Hasil pada metode numerik metode Bisection dapat dilihat pada gambar 3.2.

```
*** === Bisection ===  
Success Rate : 82.95%  
Iteration    : 37.39  
Execution    : 0.002326
```

Gambar 3.2 Hasil Performa Distribusi Metode Bisection

Dari hasil pengujian pada Gambar 3.2, metode Bisection mencapai tingkat keberhasilan sebesar 82,95%. Meskipun kecepatan rata-rata waktu eksekusi lebih lambat dibandingkan dengan Newton-Raphson yang merupakan metode berbasis turunan, stabilitas interval pada Bisection membuatnya lebih andal dalam menangani variasi harga opsi Tesla. Secara teoritis, metode Bisection menjamin konvergensi selama terdapat perubahan tanda fungsi dalam interval awal, yaitu $f(a) \cdot f(b) < 0$, kondisi yang dapat dipenuhi secara deterministik dengan memilih interval $[0,001; 10]$ untuk IV. Hal ini menjelaskan mengapa tingkat keberhasilannya jauh lebih tinggi dibandingkan Newton-Raphson. Tingkat kegagalan sekitar 17,05% yang tersisa umumnya disebabkan oleh kontrak opsi di mana harga pasar berada di luar jangkauan model Black-Scholes, bukan karena kegagalan algoritmik. Temuan ini selaras dengan hasil penelitian Pratama et al. [8] pada saham Apple Inc. yang juga menunjukkan superioritas stabilitas Bisection atas Newton-Raphson pada data opsi skala besar, meskipun dengan biaya jumlah iterasi yang lebih banyak akibat konvergensi linier (*linear convergence*) yang menjadi karakteristik inheren metode ini.

3.1.3 Metode Brent

Metode Brent merupakan gabungan dari metode Bisection, Secant, dan Inverse Quadratic Interpolation. Pendekatan ini memungkinkan algoritma beralih secara adaptif antara langkah yang aman (bisection) dan langkah yang cepat (secant/interpolasi) sehingga mampu menjaga keseimbangan antara stabilitas dan efisiensi. Kombinasi ini menjadikan Brent salah satu metode pencarian akar yang paling fleksibel untuk berbagai bentuk fungsi. Berikut hasil performa metode Brent yang terlihat pada gambar 3.3.

```
*** --- Brent ---  
Success Rate      : 82.68%  
Iteration         : 9.87  
Execution         : 0.002326
```

Gambar 3.3 Hasil Performa Distribusi Metode Brent

Berdasarkan Gambar 3.3, metode Brent mencapai tingkat keberhasilan sebesar 82,68%. Performa yang dimiliki oleh Brent seringkali sangat mendekati metode Bisection, tetapi kemampuan adaptifnya membuat Brent mencapai solusi dengan lebih sedikit iterasi. Metode ini sesuai untuk karakteristik data Tesla ditunjukkan dengan stabilitas yang tetap terjaga meskipun menghadapi variasi harga opsi. Keunggulan komputasi Brent dibandingkan Bisection (9,07 vs. 37,39 iterasi rata-rata) dapat dijelaskan melalui mekanisme *switching* adaptifnya. Ketika kondisi fungsi memungkinkan, Brent menggunakan *inverse quadratic interpolation* yang memberikan konvergensi superlinear, dan beralih ke Bisection hanya ketika diperlukan untuk menjaga stabilitas. Hal ini konsisten dengan analisis teoritis [4] yang menyimpulkan bahwa Brent unggul secara efisiensi pada fungsi yang memiliki akar ganda atau karakteristik non-linear kompleks. Dengan keseimbangan antara stabilitas (sama dengan Bisection) dan efisiensi (mendekati Newton-Raphson), Brent merupakan pilihan yang optimal untuk estimasi *implied volatility* pada dataset opsi berskala besar dengan karakteristik volatilitas tinggi seperti saham Tesla.

3.2 Perbandingan Kinerja Metode

Perbandingan dilakukan untuk menilai metode mana yang paling efektif dalam menghitung *implied volatility* pada saham opsi Tesla. Evaluasi mencakup tiga aspek utama, yaitu tingkat keberhasilan (*success rate*), jumlah iterasi rata-rata, dan kecepatan komputasi (*execution time*). Ketiga aspek ini digunakan untuk menilai stabilitas dan efisiensi setiap metode sehingga dapat ditentukan algoritma yang paling sesuai untuk data yang digunakan. Perbandingan kinerja metode Newton–Raphson, Bisection, dan Brent ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 3.1 Perbandingan Performa Metode

Metode	Success Rate (%)	Iterasi Rata-rata (Iterasi)	Waktu Eksekusi (Detik)
Newton	45.14	1.61	0.000963
Bisection	87.24	34.24	0.007321
Brent	87	9.90	0.002703

Berdasarkan hasil perbandingan pada Tabel 1, dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan besar dalam stabilitas dan efisiensi perhitungan *implied volatility* pada ketiga metode tersebut. Metode Newton-Raphson memiliki waktu eksekusi dan jumlah iterasi rata-rata terendah, tetapi tingkat keberhasilannya hanya 41,29% sehingga metode ini tidak dapat

diandalkan untuk estimasi *implied volatility* pada data opsi Tesla yang bersifat sangat non-linear dan bervolatilitas tinggi. Rendahnya tingkat keberhasilan ini disebabkan oleh sensitivitas Newton-Raphson terhadap nilai vega yang kecil pada opsi deep OTM, konsisten dengan temuan penelitian sebelumnya [5][10]. Sementara itu, metode Bisection dan Brent menunjukkan tingkat keberhasilan yang jauh lebih tinggi, masing-masing sebesar 82,95% dan 87%, karena keduanya tidak bergantung pada informasi turunan dan menggunakan pendekatan berbasis *bracket* yang menjamin konvergensi. Namun, jika dilihat dari efisiensi komputasi, metode Brent unggul secara signifikan dengan rata-rata 9,07 iterasi dibandingkan Bisection yang membutuhkan 37,39 iterasi, serta waktu eksekusi lebih cepat (0,002326 detik vs. 0,002326 detik). Selisih efisiensi ini mencerminkan keunggulan mekanisme adaptif Brent yang mampu beralih antara inverse quadratic interpolation dan bisection secara otomatis sehingga menghasilkan konvergensi superlinear dibandingkan konvergensi linier milik Bisection. Dengan kombinasi stabilitas tinggi dan efisiensi komputasi yang superior, metode Brent dapat dianggap sebagai pendekatan terbaik dalam mengestimasi *implied volatility* untuk opsi saham Tesla.

3.3 Hasil Estimasi Implied Volatility

Berdasarkan hasil pada Tabel 1, algoritma Brent dipilih sebagai metode terbaik karena memiliki tingkat keberhasilan tinggi, iterasi lebih sedikit, dan waktu eksekusi yang lebih efisien. Oleh karena itu, seluruh analisis pada bagian ini disajikan nilai *implied volatility* (IV) yang dihasilkan oleh metode Brent terlihat pada gambar 3.4.

***	strike_price	time_to_maturity	option_price	IV_Brent
187966	425.0	0.005479	153.275	2.493820
28380	250.0	0.238356	86.375	2.290986
35418	292.5	0.082192	53.000	2.095615
93790	560.0	0.136986	256.975	1.025283
137696	290.0	0.786301	99.425	1.236936
26743	255.0	0.063014	86.025	4.408708
30900	300.0	0.197260	78.900	1.954148
75456	425.0	0.005479	103.650	1.851628
18243	190.0	0.810959	131.400	2.712600
133016	205.0	0.210959	70.875	2.419878

Gambar 3.4 Estimasi IV Brent

Berdasarkan Gambar 3.4, nilai IV yang diperoleh berada pada kisaran 1,0 hingga 4,4 pada berbagai kombinasi *strike price* dan *time to maturity*. Rentang nilai tersebut mencerminkan karakteristik data opsi saham Tesla yang memang dikenal bervolatilitas tinggi. Nilai IV rendah umumnya ditemukan pada opsi yang berada dekat dengan kondisi *at-the-money* (ATM) dengan *time to maturity* yang cukup panjang, di mana ekspektasi pasar relatif stabil. Sebaliknya, nilai IV tinggi (mendekati 4,4 atau setara 44%) dijumpai pada opsi *deep out-of-the-money* (OTM) dengan masa berlaku sangat pendek yang lazimnya mencerminkan premi risiko ekstrem atau likuiditas rendah. Perlu dicatat bahwa dalam tahap pra-pemrosesan (preprocessing) data, telah dilakukan pembersihan data dari *noise* dengan memfilter kontrak opsi yang tidak memenuhi kondisi *no-arbitrage*, yaitu filter harga opsi (midpoint > 0,1), filter kuotasi valid (bid atau offer > 0), filter batas bawah *no-arbitrage* Black-Scholes, dan filter *time to maturity* ($T > 0,0001$). Dengan demikian, nilai IV tinggi yang tersisa bukan merupakan artefak numerik, melainkan mencerminkan ekspektasi volatilitas pasar yang sesungguhnya untuk kontrak opsi spesifik tersebut. Temuan ini konsisten dengan fenomena *volatility skew* yang telah didokumentasikan dalam literatur, di mana opsi OTM cenderung memiliki IV lebih tinggi dibandingkan opsi ATM. Oleh

karena itu, metode Brent dinilai mampu menghasilkan estimasi *implied volatility* yang masuk akal dan dapat diandalkan dalam penelitian ini.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan tiga metode numerik, yaitu Newton-Raphson, Bisection, dan Brent, dalam mengestimasi *implied volatility* opsi saham Tesla menggunakan model Black-Scholes. Hasil menunjukkan bahwa metode Brent memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas dan efisiensi: tingkat keberhasilan 82,68% dengan hanya 9,07 iterasi rata-rata dan waktu eksekusi 0,002326 detik, jauh lebih efisien dibandingkan Bisection (37,39 iterasi) meskipun dengan stabilitas yang setara. Newton-Raphson, meskipun tercepat per iterasi, hanya mencapai tingkat keberhasilan 41,29% akibat sensitivitasnya terhadap nilai vega kecil pada opsi deep out-of-the-money. Keterbatasan penelitian ini meliputi cakupan satu saham, periode tiga bulan, dan penggunaan model Black-Scholes tanpa dividen. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan memperluas cakupan aset dan periode, mengeksplorasi model stokastik seperti Heston atau SABR, serta membandingkan metode Brent dengan algoritma lain seperti Illinois Method. Temuan ini juga memiliki implikasi praktis bagi pengembangan sistem trading otomatis yang membutuhkan estimasi *implied volatility* secara *real-time*.

5. DAFTAR RUJUKAN

- [1] S. Xuan, W. Qin, and H. Yang, "Business Analysis and Future Development of an Electric Vehicle Company--Tesla," Adv. Soc. Sci. Educ. Humanit. Res., vol. 586, no. 395-402, 2021, doi:<https://doi.org/10.2991/assehr.k.211209.065>.
<https://doi.org/10.2991/assehr.k.211209.065>
PMCID:PMC8316057
- [2] M. F. Salami, "Empirical examination of the Black-Scholes model: evidence from the United States stock market," Math. Financ., vol. 10, 2024, doi:<https://doi.org/10.3389/fams.2024.1216386>.
<https://doi.org/10.3389/fams.2024.1216386>
- [3] N. Zulfiqar and S. Gulzar, "Implied volatility estimation of bitcoin options and the stylized facts of option pricing," Financ. Innov., vol. 7, no. 67, 2021, doi:<https://doi.org/10.1186/s40854-021-00280-y>.
<https://doi.org/10.1186/s40854-021-00280-y>
PMid:35024288 PMCID:PMC8418903
- [4] Stephen Roach, "Comparative Analysis of Root Finding Algorithms for Implied Volatility Estimation of Ethereum Options," Oper. Res. Lett., vol. 64, no. 1, pp. 515-550, 2024, doi:<https://doi.org/10.1007/s10614-023-10446-8>.
<https://doi.org/10.1007/s10614-023-10446-8>
- [5] F. Dennaya, Y. F. Sari, and F. Tyasari, "Menguji keefisienan metode Newton-Raphson, metode Secant, dan metode Bisection dalam memprediksi implied volatilities saham PT Bank Central Asia Tbk (BBCA)," J. Komput. dan Teknol. Indones., vol. 1, no. 1, 2023, doi:<https://doi.org/10.26714/v1i1.11287>.
<https://doi.org/10.26714/v1i1.11287>
- [6] N. Rohmawati, A. Wibowo, and I. S. N. Inayah, "Perbandingan Penggunaan Python dan Excel dalam Menyelesaikan Persamaan Tak Linear Metode Newton-Raphson," Numer. J. Mat. dan Pendidik. Mat., vol. 09, no. 01, pp. 87-97, 2025, doi:<https://doi.org/10.25217/numerical.v9i1.5798>.
<https://doi.org/10.25217/numerical.v9i1.5798>
- [7] H. A. Pratama, F. B. Laksono, M. Muhammad, and M. H. Isnaen, "Analisis Keefisienan Metode Newton-Raphson, Metode Secant, dan Metode Bisection dalam Mengestimasi

- Implied Volatilities Saham Apple Inc., Aapl.," J. Kompter dan Teknol. Inf., vol. 1, no. 1, 2023, doi:<https://doi.org/10.26714/v1i1.11787>
- [8] K. A. Sujaya, S. Prayitno, N. Kurniati, and N. Sridana, "Efektivitas metode Brent dalam penyelesaian masalah Break Even Point menggunakan pemrograman Pascal," *Mandalika Math. Educ. J.*, vol. 06, no. 01, 2024, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.29303/jm.v6i1.6923>
<https://doi.org/10.29303/jm.v6i1.6923>
- [9] A. Alfajriyah, E. R. . Putri, D. B. Utomo, and T. Hakiki, "Penentuan Harga Opsi Saham dengan Menggunakan Binomial Trees dengan Penyertaan Implied Volatility," *J. Mat. Stat. dan Komputasi*, vol. 20, no. 03, pp. 724-742, 2024, doi: <https://doi.org/10.20956/j.v20i3.34476>
<https://doi.org/10.20956/j.v20i3.34476>
- [10] I. A. E. Rahayuni, K. Dharmawan, and L. P. I. Harini, "Perbandingan keefisienan metode Newton-Raphson, metode Secant, dan metode Bisection dalam mengestimasi implied volatilities saham," *E-Jurnal Mat.*, vol. 05, no. 01, 2016, doi: <https://doi.org/10.24843/MTK.2016.v05.i01.p113>
<https://doi.org/10.24843/MTK.2016.v05.i01.p113>
- [11] R. D. Estuningsih and T. Rosita, "Perbandingan metode Biseksi dan metode Newton-Raphson dalam penyelesaian persamaan non-linear," *War. Akab*, vol. 43, no. 02, pp. 21-23, 2019, doi: <https://doi.org/10.52060/wa.v43i2.125>
<https://doi.org/10.55075/wa.v43i2.125>
- [12] J. L. Nikolajsen, "New stopping criteria for iterative root finding," vol. 1, no. 2, <https://doi.org/10.1098/rsos.140206>
PMid:26064544
2016, doi: <https://doi.org/10.1098/rsos.140206>
<https://doi.org/10.1098/rsos.140206>
PMid:26064544
- [13] U. Fitriani, S. Ahadiyah, and A. Wibowo, "Penyelesaian Persamaan Non Linear Dengan Metode Bagi Dua Dan Posisi Palsu Menggunakan Excel Dan Matlab," *J. Deriv.*, vol. 12, no. 2, 2025, doi: <https://doi.org/10.31316/j.derivat.v12i2.7772>
<https://doi.org/10.31316/j.derivat.v12i2.7772>
- [14] R. Etasami, M. Madadi, M. Mashinci, and R. A. Ganjoei, "A new method for rooting nonlinear equations based on the Bisection method," vol. 8, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101502>
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101502>
PMid:34754773 PMCID:PMC8563467
- [15] W. Wunkaew, Y. Liu, and K. V. Goloubnichy, "Using the Newton-Raphson method with Automatic Differentiation to numerically solve the implied volatility of stock options via the Binomial model," *Commun. Anal. Comput.*, vol. 5, pp. 43-52, 2025, doi: <https://doi.org/10.3934/cac.2025012>
<https://doi.org/10.3934/cac.2025012>
- [16] V. Amanda, A. N. Azizah, A. P. Sari, and S. W. Tyas, "Tesla Option Chain Data," Zenodo, 2025, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15496947>.