

## PENENTUAN HARGA OPSI FOREIGN EXCHANGE MENGGUNAKAN MODEL HESTON STOCHASTIC VOLATILITY

**Libelda Aldinaduma Harahap**

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

e-mail : libeldaaldinaduma.21039@mhs.unesa.ac.id

**Rudianto Artiono**

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

e-mail : rudiantoartiono@unesa.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini mengkaji penentuan harga opsi valuta asing USD/IDR menggunakan model Heston, yang menangkap volatilitas berubah-ubah (stokastik), dengan dua metode: transformasi Fourier dan simulasi Monte Carlo. Data nilai tukar USD/IDR periode 2020–2024 digunakan untuk analisis. Model Heston disesuaikan dengan memasukkan dua suku bunga berbeda untuk menghitung dinamika nilai tukar. Metode Fourier memberikan solusi semi-analitik yang efisien secara komputasi, sedangkan Monte Carlo menangkap dinamika stokastik melalui simulasi jalur acak. Hasil menunjukkan pola harga opsi *call* dan *put* yang konsisten terhadap nilai tukar, volatilitas, dan selisih suku bunga. Perbandingan menggunakan MAPE menunjukkan bahwa hasil keduanya relatif konsisten, terutama pada opsi *put* (galat <7%) dan opsi *call* (sekitar 14–17%). Penelitian ini memperluas penerapan model Heston dalam konteks opsi valuta asing dan menunjukkan bahwa Fourier dan Monte Carlo dapat digunakan secara saling melengkapi dalam penetapan harga derivatif.

**Kata Kunci:** Model Heston, Opsi Valuta Asing, Transformasi Fourier, Monte Carlo, Volatilitas Stokastik

### Abstract

*This study examines the pricing of USD/IDR foreign exchange options using the Heston model, which captures stochastic volatility, through two methods: Fourier transform and Monte Carlo simulation. Using USD/IDR exchange rate data from 2020 to 2024, the model incorporates two interest rates to reflect exchange rate dynamics. The Fourier method provides a semi-analytical and computationally efficient solution, while Monte Carlo simulates stochastic paths. Results show consistent pricing patterns for call and put options in relation to exchange rates, volatility, and interest differentials. The comparison using MAPE shows relatively consistent results, particularly for put options (error <7%) and call options (around 14–17%). This study expands the application of the Heston model in foreign exchange options and demonstrates the complementarity of Fourier and Monte Carlo methods in derivative pricing.*

**Keywords:** Heston Model, Foreign Exchange Option, Fourier Transform, Monte Carlo, Stochastic Volatility

## PENDAHULUAN

Pasar valuta asing (*foreign exchange*) merupakan salah satu komponen utama dalam sistem keuangan global yang mendukung aktivitas perdagangan dan investasi antarnegara. Nilai tukar mata uang, khususnya USD/IDR, mengalami fluktuasi signifikan akibat faktor ekonomi, kebijakan moneter, dan ketidakstabilan global (Pardasia & Syafri, 2024; Samosir & Arka, 2024). Dalam periode Januari 2020 hingga Desember 2024, nilai tukar USD/IDR menunjukkan depresiasi sekitar 17,9%, dengan pola *volatility clustering* yang menandakan bahwa volatilitas bersifat stokastik dan tidak konstan.

Ketidakstabilan ini menciptakan kebutuhan mendesak akan instrumen pengelolaan risiko, seperti opsi valuta asing (*foreign exchange options*), yang memberikan hak (tanpa kewajiban) untuk membeli atau menjual mata uang tertentu di masa depan.

Penentuan harga opsi secara tepat menjadi krusial dalam praktik keuangan. Model klasik seperti Black-Scholes mengasumsikan volatilitas konstan, sehingga tidak mampu menangkap dinamika volatilitas riil di pasar (Hull, 2012; Juliarini et al., 2021). Oleh karena itu, model Heston digunakan karena mampu menggambarkan volatilitas stokastik dengan proses *mean-reverting* yang lebih realistis (Heston, 1993;

Ahlip & Rutkowski, 2013). Model ini diterapkan dalam konteks opsi valuta asing, dengan mempertimbangkan pengaruh dua suku bunga yang berbeda (domestik dan asing).

Penelitian sebelumnya oleh Dunn et al. (2014), Han (2007), dan Azencott et al. (2020) telah menunjukkan bahwa model Heston lebih akurat dalam menangkap fenomena pasar, serta metode transformasi Fourier dapat menghasilkan solusi semi-analitik yang efisien (Carr & Madan, 1999). Di sisi lain, simulasi Monte Carlo menawarkan fleksibilitas tinggi dalam menangani dinamika stokastik (Glasserman, 2004; Andersen, 2008; Chalimatusadiah et al., 2021). Namun, studi sebelumnya belum banyak yang mengintegrasikan kedua pendekatan ini secara bersamaan untuk menghitung harga opsi valuta asing, khususnya USD/IDR, dan mengevaluasi hasilnya secara kuantitatif menggunakan metrik seperti *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan membandingkan hasil perhitungan harga opsi USD/IDR menggunakan dua pendekatan penyelesaian model Heston, yaitu transformasi Fourier dan simulasi Monte Carlo. Data yang digunakan mencakup nilai tukar dan suku bunga periode Januari 2020 hingga Desember 2024 (Yahoo Finance, n.d.; Bank Indonesia, n.d.), mencerminkan dinamika ekonomi mulai dari pandemi hingga pemulihan dan perubahan kebijakan moneter (Kementerian Koordinator Perekonomian, 2015). Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi dalam menilai konsistensi relatif kedua metode dalam praktik valuasi derivatif, serta membuka peluang pengembangan model dan strategi manajemen risiko keuangan yang lebih akurat dan adaptif terhadap kondisi pasar yang fluktuatif.

## KAJIAN TEORI

Opsi valuta asing merupakan kontrak derivatif yang memberikan hak kepada pemegangnya untuk membeli atau menjual suatu mata uang pada harga dan waktu tertentu (Hull, 2015; Wibowo, 2022). Dalam konteks ini, opsi valuta asing tipe Eropa adalah opsi yang hanya dapat dieksekusi pada saat jatuh tempo. Salah satu tantangan utama dalam menentukan harga opsi adalah mempertimbangkan

volatilitas yang tidak konstan, karena volatilitas pasar cenderung berubah seiring waktu akibat dinamika ekonomi dan sentimen pasar global (Pangestuti et al., 2022; Juliarini et al., 2021). Untuk mengatasi keterbatasan model klasik seperti Black-Scholes yang mengasumsikan volatilitas konstan, digunakan model stokastik seperti model Heston (Heston, 1993; Ahlip & Rutkowski, 2013).

Model Heston merupakan model stokastik dua dimensi yang terdiri dari proses stokastik untuk harga aset dan variansnya. Volatilitas diasumsikan mengikuti proses mean-reverting yang dimodelkan menggunakan proses Cox-Ingersoll-Ross (CIR). Dalam konteks opsi valuta asing, model ini dimodifikasi dengan memasukkan dua tingkat suku bunga, yaitu suku bunga domestik dan asing (Dunn et al., 2014; Azencott et al., 2020). Model ini terbukti dapat menangkap volatilitas pasar yang berubah-ubah secara lebih realistis dibanding model deterministik.

Metode transformasi Fourier digunakan untuk memperoleh solusi semi-analitik dari model Heston, terutama dalam kasus opsi Eropa. Teknik ini mengubah fungsi karakteristik dari log-return menjadi bentuk integral dalam domain frekuensi (Carr & Madan, 1999; Han, 2007). Transformasi Fourier dipilih karena efisiensinya dalam menghitung harga opsi dengan kompleksitas komputasi yang lebih rendah dibanding metode numerik langsung. Di sisi lain, simulasi Monte Carlo menawarkan fleksibilitas tinggi dalam menangani berbagai kondisi pasar, termasuk struktur pembayaran opsi yang kompleks. Skema simulasi seperti *Quadratic Exponential (QE) Scheme* telah dikembangkan untuk memastikan kestabilan numerik dalam mensimulasikan proses Heston (Andersen, 2008; Glasserman, 2004).

Untuk mengevaluasi konsistensi antara dua metode ini, digunakan MAPE, yang mengukur deviasi relatif rata-rata absolut antara harga opsi dari kedua metode (Taylor, 2022). Nilai MAPE yang rendah menunjukkan bahwa kedua pendekatan menghasilkan estimasi harga yang konsisten meskipun secara pendekatan matematis sangat berbeda.

## METODE

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif dalam bidang matematika keuangan terapan yang menggunakan pendekatan pemodelan stokastik untuk menentukan harga opsi valuta asing tipe Eropa USD/IDR dengan model Heston. Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan eksploratif-komputasional untuk menganalisis dua teknik penentuan harga opsi, yakni metode transformasi Fourier dan simulasi Monte Carlo. Sasaran penelitian adalah nilai tukar mata uang USD terhadap IDR dalam kurun waktu Januari 2020 hingga Desember 2024. Data yang digunakan mencakup data historis nilai tukar bulanan yang diperoleh dari *Yahoo Finance*, suku bunga domestik (*BI-Rate*) dari Bank Indonesia, serta suku bunga asing (*Federal Funds Rate*) dari *Federal Reserve Bank of St. Louis*. Data ini dipilih karena mencerminkan dinamika ekonomi global, terutama selama masa pandemi hingga pasca pemulihan ekonomi.

Instrumen utama dalam penelitian ini adalah sistem pemodelan matematis berbasis perangkat lunak Python. Perangkat lunak pendukung meliputi Visual Studio Code sebagai platform pengkodean, serta pustaka Python seperti NumPy, SciPy, Pandas. *Microsoft Excel* juga digunakan sebagai alat bantu pengolahan awal data dan visualisasi dasar. Bahan utama penelitian berupa data kuantitatif sekunder yang diperoleh secara daring dari lembaga keuangan resmi.

Pengumpulan data dilakukan melalui pengambilan data historis nilai tukar dan suku bunga dari situs *web* resmi dengan frekuensi bulanan. Data nilai tukar digunakan untuk menghitung *log-return* dan varians bulanan, sedangkan data suku bunga digunakan dalam perhitungan diskonto dan diferensial suku bunga. Estimasi parameter model Heston seperti kecepatan *reversion* ( $\kappa$ ), rata-rata jangka panjang varians ( $\theta$ ), volatilitas dari volatilitas ( $\sigma$ ), dan korelasi antara dua sumber ketidakpastian ( $\rho$ ) dilakukan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) berdasarkan data varians bulanan.

Proses analisis dilakukan dalam dua pendekatan. Pada pendekatan transformasi Fourier, rumus karakteristik model Heston disusun dan diselesaikan secara semi-analitik melalui penyelesaian dua persamaan Riccati yang menghasilkan fungsi  $A(\tau, u)$

dan  $B(\tau, u)$ . Fungsi karakteristik yang diperoleh digunakan untuk menghitung probabilitas risiko-netral  $\Pi_1$  dan  $\Pi_2$ , yang selanjutnya dimasukkan ke dalam rumus harga opsi *call* dan *put*. Perhitungan integral numerik dilakukan dengan metode trapesium menggunakan banyak titik evaluasi agar hasil lebih stabil.

Pendekatan kedua yaitu simulasi Monte Carlo, dilakukan dengan mendiskretkan proses stokastik dari harga dan varians menggunakan skema *Quadratic-Exponential* (QE). Jalur simulasi dilakukan dalam jumlah besar (500.000 jalur) untuk meningkatkan akurasi, dengan mempertimbangkan korelasi antar proses Wiener. Nilai akhir jalur digunakan untuk menghitung *payoff* opsi pada saat jatuh tempo, kemudian dihitung rata-rata dan didiskontokan untuk mendapatkan harga opsi. Seluruh hasil perhitungan kemudian divalidasi dengan memeriksa logika ekonomi (positivitas harga, konsistensi dengan paritas *call-put*), dan dibandingkan dengan pendekatan lain menggunakan ukuran error simetris yaitu MAPE dua arah, guna mengukur konsistensi hasil dari dua metode tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### HASIL PENELITIAN

Penelitian ini menghasilkan harga opsi valuta asing USD/IDR menggunakan model Heston dengan pendekatan transformasi Fourier dan simulasi Monte Carlo, serta mengevaluasi konsistensi kedua metode melalui metrik MAPE. Hasil meliputi statistika deskriptif data historis, estimasi parameter model, solusi analitik fungsi karakteristik, harga opsi untuk 60 periode, validasi hasil, dan perbandingan antar metode.

### DATA HISTORIS DAN PRA-PEMROSESAN

Data historis bulanan nilai tukar USD/IDR, suku bunga domestik, dan suku bunga asing untuk periode Januari 2020–Desember 2024 (60 observasi) telah dibersihkan untuk memastikan tidak ada nilai yang hilang. Statistika deskriptif (Tabel 1) menunjukkan rata-rata nilai tukar sebesar 14.986,2146 (standar deviasi 690,3793), volatilitas historis 2,34%, dan varians awal 0,0007, mencerminkan stabilitas pasar pasca pandemi. Pra-pemrosesan menghasilkan *log return* bulanan,

volatilitas historis (menggunakan *rolling window* 12 bulan), dan varians awal.

Tabel 1. Statistika Deskriptif Data Historis, Volatilitas Historis, dan Varians Awal (Januari 2020–Desember 2024)

| Variabel             | Min         | Maks        | Rata-Rata   | Standar Deviasi |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| Nilai Tukar USD/IDR  | 13.643,1807 | 16.346,9619 | 14.986,2146 | 690,3793        |
| Suku Bunga Domestik  | 0,0350      | 0,0625      | 0,0474      | 0,0110          |
| Suku Bunga Asing     | 0,0005      | 0,0533      | 0,0246      | 0,0234          |
| Volatilitas Historis | 0,0095      | 0,0519      | 0,0234      | 0,0139          |
| Varians Awal         | 0,0001      | 0,0027      | 0,0007      | 0,0009          |

Keterangan:

- Nilai tukar dalam Rupiah (IDR), suku bunga dalam desimal (misalnya, 0,0350 = 3,50%).
- Standar deviasi dibulatkan hingga empat angka di belakang koma untuk kejelasan penyajian.

#### ESTIMASI PARAMETER HESTON DAN PENENTUAN HARGA STRIKE

Parameter model Heston ( $\kappa$ ,  $\theta$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$ ) diestimasi menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) berdasarkan log *return* dan varians historis nilai tukar USD/IDR. Harga *strike* ( $K$ ) ditetapkan sebesar 14.986,2146 berdasarkan rata-rata nilai tukar historis (Tabel 2). Nilai  $\sigma$  disesuaikan dari 0,0413 menjadi 0,0349 untuk memenuhi kondisi Feller ( $\frac{\kappa\theta}{\sigma^2} \approx 0,5010$ ), memastikan stabilitas varians. Estimasi dilakukan menggunakan *Python*.

Tabel 2. Estimasi Parameter Heston dan Penentuan Harga Strike

| Parameter            | Nilai          |
|----------------------|----------------|
| $\kappa$             | 0,999477593887 |
| $\theta$             | 0,000609221013 |
| $\sigma$             | 0,034862225325 |
| $\rho$               | 0,153166069808 |
| Harga Strike ( $K$ ) | 14.986,2146    |

#### PENYELESAIAN ANALITIK FUNGSI KARAKTERISTIK MODEL HESTON

Fungsi karakteristik model Heston diselesaikan secara analitik untuk mendukung perhitungan harga opsi dengan transformasi Fourier. Transformasi log-harga  $X_t = \ln Q_t$  menghasilkan dinamika:

$$dX_t = \left(r_t - \hat{r}_t - \frac{1}{2}V_t\right)dt + \sqrt{V_t}dW_t^Q \quad (1)$$

Fungsi karakteristik didefinisikan sebagai:

$$\Phi(t, x, v; u) = \mathbb{E}_Q[e^{iuX_\tau} | X_t = x, V_t = v] = e^{A(\tau, u) + iux + B(\tau, u)v} \quad (2)$$

dengan  $\tau = T - t$ . Persamaan diferensial Parsial (PDP) yang mengatur fungsi ini diselesaikan menggunakan Teorema Feynman-Kac, menghasilkan:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \left(r_t - \hat{r}_t - \frac{1}{2}v\right)\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \kappa(\theta - v)\frac{\partial \Phi}{\partial v} + \frac{1}{2}v\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \rho\sigma v\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial v} + \frac{1}{2}\sigma^2 v\frac{\partial^2 \Phi}{\partial v^2} = 0 \quad (3)$$

Substitusi turunan parsial menghasilkan dua persamaan Riccati., dengan kondisi awal  $A(0, u) = 0$  dan  $B(0, u) = 0$ . Persamaan  $B(\tau, u)$  diselesaikan menggunakan transformasi Riccati  $B(\tau, u) = -\frac{2}{\sigma^2} \frac{w'(\tau)}{w(\tau)}$ , menghasilkan solusi:

$$B(\tau, u) = -\frac{a+d}{\sigma^2} \left( \frac{1-e^{-d\tau}}{1-ge^{-d\tau}} \right) \quad (4)$$

di mana  $a = \rho\sigma iu - \kappa$ ,  $d = \sqrt{(\kappa - \rho\sigma iu)^2 + \sigma^2(u^2 + iu)}$ , dan  $g = \frac{a+d}{a-d}$

Persamaan  $A(\tau, u)$  diintegrasikan, menghasilkan:

$$A(\tau, u) = (r_t - \hat{r}_t)iu\tau - \left( \frac{\kappa\theta(a+d)}{\sigma^2} \right) \left( \tau + \frac{1}{d} \frac{g-1}{g} \ln \left( \frac{1-ge^{-d\tau}}{1-g} \right) \right)$$

Solusi ini mendukung perhitungan harga opsi secara semi-analitik.

#### HASIL PERHITUNGAN HARGA OPSI DENGAN TRANSFORMASI FOURIER

Harga opsi *call* dan *put* untuk 60 periode dihitung menggunakan transformasi Fourier berdasarkan  $A(\tau, u)$  dan  $B(\tau, u)$  dengan waktu jatuh tempo 6 bulan (Tabel 3). Harga *call* tertinggi tercatat pada Maret 2020 (Rp3802,8259), mencerminkan lonjakan nilai tukar akibat pandemi. Harga *put* lebih tinggi pada periode nilai tukar rendah, seperti Januari 2020 (Rp2404,3498).

Tabel 3. Hasil Harga Opsi dengan Transformasi Fourier

| Bulan | Harga Opsi Call | Harga Opsi Put |
|-------|-----------------|----------------|
| 1     | 1326,0009       | 2404,3498      |
| 2     | 1908,2210       | 2343,8218      |
| 3     | 3802,8259       | 2161,6952      |
| ...   | ...             | ...            |
| 60    | 3368,7500       | 2182,7673      |

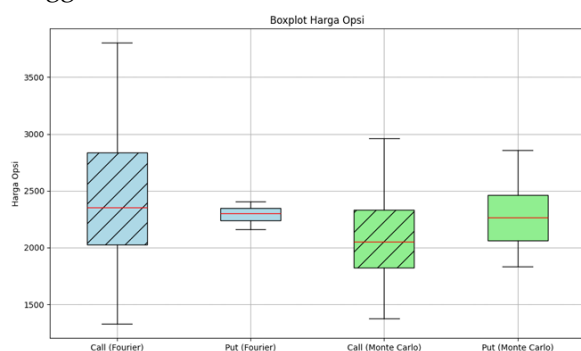
### HASIL PERHITUNGAN HARGA OPSI DENGAN SIMULASI MONTE CARLO

Harga opsi dihitung menggunakan simulasi Monte Carlo dengan parameter yang sama, jumlah simulasi  $M=500000$ , dan langkah waktu  $N=512$  (Tabel 4). Harga *call* tertinggi terjadi pada Maret 2020 (Rp2959,0444), sedangkan harga *put* tertinggi pada Januari 2020 (Rp2855,5222).

Tabel 4. Hasil Harga Opsi dengan Monte Carlo

| Bulan | Harga Opsi Call | Harga Opsi Put |
|-------|-----------------|----------------|
| 1     | 1374,4930       | 2855,5222      |
| 2     | 1804,9362       | 2494,9017      |
| 3     | 2927,4765       | 1831,2409      |
| ...   | ...             | ...            |
| 60    | 2797,3954       | 1914,0065      |

Semua harga opsi bernilai positif, dan visualisasi *boxplot* (Gambar 1) menunjukkan distribusi yang wajar tanpa outlier ekstrem, mengindikasikan validitas numerik kedua metode. Hasil ini mendukung analisis perbandingan lebih lanjut menggunakan MAPE.



Gambar 1. Visualisasi Boxplot Harga Opsi

### PERBANDINGAN HARGA OPSI: FOURIER DAN MONTE CARLO DENGAN METRIK MAPE

Konsistensi metode Fourier dan Monte Carlo dievaluasi menggunakan MAPE (Tabel 5). MAPE opsi put di bawah 10% (Fourier sebagai acuan: 6,5477%; Monte Carlo sebagai acuan: 6,7424%), menunjukkan kesamaan hasil yang sangat tinggi. MAPE opsi call berkisar 14,4533%–17,3301%, tetap dalam kategori konsisten, meskipun lebih tinggi karena sensitivitas Monte Carlo terhadap volatilitas.

Tabel 5. Hasil Harga Opsi dengan Monte Carlo

| Jenis Opsi | MAPE (%) Fourier sebagai Acuan | MAPE (%) Monte Carlo sebagai Acuan |
|------------|--------------------------------|------------------------------------|
|------------|--------------------------------|------------------------------------|

|   |         |         |
|---|---------|---------|
| 1 | 14,4533 | 17,3301 |
| 2 | 6,5477  | 6,7424  |

### PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan menerapkan model Heston untuk harga opsi valuta asing USD/IDR dan membandingkan metode Fourier dan Monte Carlo. Parameter Heston (Tabel 2) menunjukkan  $\kappa=0,9995$  (tingkat mean-reversion tinggi),  $\theta=0,0006$  (volatilitas jangka panjang rendah,  $\sqrt{\theta} \approx 2,45\%$ ),  $\sigma=0,0349$  (fluktuasi volatilitas moderat), dan  $\rho=0,1532$  (korelasi lemah antara nilai tukar dan volatilitas). Temuan ini mencerminkan stabilitas pasar USD/IDR pasca pandemi, kemungkinan akibat intervensi Bank Indonesia, dan mendukung relevansi model Heston untuk volatilitas stokastik (Heston, 1993).

Fungsi karakteristik, yang bergantung pada  $A(\tau, u)$  dan  $B(\tau, u)$ , memungkinkan perhitungan harga opsi secara efisien dengan Fourier. Solusi  $B(\tau, u)$  menangkap dinamika varians, sedangkan  $A(\tau, u)$  mengintegrasikan efek suku bunga, konsisten dengan pendekatan semi-analitik (Han, 2007). Harga opsi (Tabel 3, Tabel 4) menunjukkan pola yang sesuai dengan teori opsi (Hull, 2012), dengan harga call meningkat saat nilai tukar tinggi (Maret 2020) dan put lebih tinggi saat nilai tukar rendah. Selisih suku bunga memengaruhi nilai tukar *forward*, sesuai prinsip paritas suku bunga.

MAPE rendah untuk opsi put mengindikasikan konsistensi tinggi antar metode, sejalan dengan efisiensi Fourier (Han, 2007). MAPE lebih tinggi untuk opsi call disebabkan sensitivitas Monte Carlo terhadap volatilitas, konsisten dengan Chalimatusadiah (2021) dan Saputri (2024). Kedua metode layak untuk opsi valuta asing, dengan Fourier lebih efisien dan Monte Carlo lebih fleksibel untuk skenario risiko. Keterbatasan seperti strike price tetap dan parameter konstan menyarankan perlunya kalibrasi pasar di masa depan.

### PENUTUP

### SIMPULAN

Penelitian ini membandingkan dua pendekatan dalam penentuan harga opsi valuta asing tipe Eropa menggunakan model Heston, yaitu metode transformasi Fourier dan simulasi Monte Carlo. Untuk meningkatkan akurasi perhitungan dengan

metode Fourier, fungsi karakteristik dari model Heston disusun ulang dengan menyesuaikan dinamika nilai tukar agar merepresentasikan pengaruh dua suku bunga yang berbeda, yakni suku bunga domestik dan suku bunga asing. Penyesuaian ini menghasilkan bentuk fungsi karakteristik yang lebih relevan dan aplikatif dalam konteks opsi valuta asing, serta belum banyak dibahas secara eksplisit dalam studi-studi sebelumnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua metode mampu menghasilkan pola harga opsi *call* dan *put* yang konsisten terhadap variasi nilai tukar, volatilitas, dan perbedaan suku bunga. Harga opsi cenderung meningkat seiring dengan kenaikan nilai tukar dan volatilitas, sejalan dengan teori dasar penetapan harga opsi. Metode transformasi Fourier terbukti efisien dari sisi komputasi karena bersifat semi-analitik, sementara metode simulasi Monte Carlo menawarkan fleksibilitas tinggi dalam menangkap dinamika stokastik melalui pendekatan simulasi jalur acak. Perbandingan hasil dari kedua metode berdasarkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) menunjukkan konsistensi yang relatif baik, terutama pada opsi *put*, sehingga keduanya dapat digunakan secara saling melengkapi dalam praktik perhitungan harga opsi valuta asing.

#### SARAN

Berdasarkan temuan dan keterbatasan dalam penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan acuan untuk penyempurnaan pada penelitian selanjutnya. Pertama, pengembangan model dapat dilakukan dengan mempertimbangkan dinamika suku bunga stokastik, misalnya dengan mengintegrasikan model Cox-Ingersoll-Ross (CIR), agar dinamika pasar tercermin lebih realistis. Kedua, penerapan metode transformasi Fourier dan simulasi Monte Carlo dapat diperluas pada instrumen derivatif lain, seperti opsi eksotik atau kontrak swaption, untuk mengevaluasi kinerja model dalam berbagai konteks keuangan. Ketiga, perluasan kajian empiris juga disarankan dengan menggunakan data pasar yang lebih bervariasi, termasuk periode krisis keuangan atau saat terjadi perubahan besar dalam kebijakan moneter, guna menguji ketahanan model terhadap kondisi pasar yang ekstrem. Keempat, analisis harga opsi sebaiknya mencakup variasi *strike price* dan waktu jatuh tempo yang lebih beragam agar dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam

mengenai sensitivitas hasil perhitungan terhadap parameter kontrak opsi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahlip, R., & Rutkowski, M. (2013). Pricing of foreign exchange options under the Heston stochastic volatility model and CIR interest rates. *Quantitative Finance*, 13(6), 955–966. <https://doi.org/10.1080/14697688.2013.769688>
- Alaya, M. B., Dahbi, H., & Fathallah, H. (2023). *Asymptotic properties of AD(1, n) model and its maximum likelihood estimator* [Working paper or preprint]. <https://hal.science/hal-04029180>
- Andersen, L. (2008). Simple and efficient simulation of the Heston stochastic volatility model. *Journal of Computational Finance*, 11(3), 1–42. <https://doi.org/10.21314/JCF.2008.189>
- Azencott, R., & Gadhyan, Y. (2015). Accuracy of maximum likelihood parameter estimators for Heston stochastic volatility SDE. *Journal of Statistical Physics*, 159(2), 393–420. <https://doi.org/10.1007/s10955-014-1120-x>
- Azencott, R., Ren, P., & Timofeyev, I. (2020). Realised volatility and parametric estimation of Heston SDEs. *Finance and Stochastics*, 24, 723–755. <https://doi.org/10.1007/s00780-020-00427-2>
- Bank Indonesia. (n.d.). *BI-Rate*. <https://www.bi.go.id/id/statistik/indikator/BI-Rate.aspx>
- Carr, P., & Madan, D. B. (1999). Option valuation using the fast Fourier transform. *Journal of Computational Finance*, 2(4), 61–73. <https://doi.org/10.21314/jcf.1999.043>
- Chalimatusadiah, Lesmana, D. C., & Budiarti, R. (2021). Penentuan harga opsi dengan volatilitas stokastik menggunakan metode Monte Carlo. *Jambura Journal of Mathematics*, 3(1), 80–92. <https://doi.org/10.34312/jjom.v3i1.10137>
- Crisóstomo, R. (2014). *An analysis of the Heston stochastic volatility model: Implementation and calibration using Matlab* [CNMV Working Paper No. 58]. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2527818>
- Dewi, N. P. W. I., Dharmawan, K., & Sumarjaya, I. W. (2022). Estimasi volatilitas stokastik cryptocurrency Bitcoin menggunakan model Heston-Milstein. *E-Jurnal Matematika*, 11(4), 210–216. <https://doi.org/10.24843/MTK.2022.v11.i04.p383>
- Djou, D. R., Pudjiono, V. R., Ali, S., & Maratusaleha. (2021). Analisis penetapan harga dan penilaian opsi pada perusahaan. *Jurnal Ilmiah Ilmu Manajemen dan Kewirausahaan*, 1(2), 510–527.

- <https://doi.org/10.46306/vls.v1i2.44>
- Dunn, R., Hauser, P., Seibold, T., & Gong, H. (2014). *Estimating option prices with Heston's stochastic volatility model*. Valparaiso University.
- Federal Reserve Bank of St. Louis. (n.d.). *Federal funds effective rate* (FEDFUNDS). <https://fred.stlouisfed.org/series/FEDFUNDS#>
- Ferdiansyah, Zahilah, R., Hajar, S., & Stiawan, D. (2023). CNN-LSTM hybrid model for improving Bitcoin price prediction results. *Applied Mathematics and Computational Intelligence*, 12(4), 13–26. <https://doi.org/10.58915/amci.v12i4.349>
- Glasserman, P. (2004). *Monte Carlo methods in financial engineering*. Springer.
- Han, Z. (2007). *Option pricing with the Fourier transform method, based on the stochastic volatility model* (Master's thesis, Friedrich Alexander University of Erlangen-Nuremberg, Germany).
- Hanifah, A. N., & Maulana, D. A. (2024). Penerapan model Geometric Brownian Motion termodifikasi Kalman Filter dalam prediksi nilai tukar Rupiah terhadap Dolar Amerika Serikat. *MATHunesa: Jurnal Ilmiah Matematika*, 12(3), 671–680.
- Haske, J. L. (2022). *Option pricing using stochastic volatility models* (Master's thesis, University of Tartu).
- Heston, S. L. (1993). A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options. *The Review of Financial Studies*, 6(2), 327–343. <http://www.jstor.org/stable/2962057>
- Hull, J. C. (2012). *Options, futures, and other derivatives* (8th ed.). Pearson.
- Hull, J. C. (2015). *Options, futures, and other derivatives* (9th ed.). Pearson.
- Hutabarat, S. R., & Batubara, M. (2023). Fenomena minat masyarakat Indonesia pada Forex online; bagaimana sudut pandang syariah? *Jurnal Ilmiah Ekonomi Islam*, 9(2), 2826–2833. <https://doi.org/10.29040/jiei.v9i2.8177>
- Juliarini, N. K., Sumarjaya, I. W., & Sari, K. (2021). Peramalan volatilitas dan estimasi value at risk (VaR) saham blue chip pada sektor perbankan. *E-Jurnal Matematika*, 10(4), 198–208. <https://doi.org/10.24843/MTK.2021.v10.i04.p343>
- Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia. (2015). *Kebijakan lanjutan stabilisasi nilai tukar Rupiah*. <https://www.ekon.go.id/publikasi/detail/3785/kebijakan-lanjutan-stabilisasi-nilaitukar-rupiah>
- Maybank Indonesia. (n.d.). *FX options*. <https://www.maybank.co.id/en/Business/globalmarket-solution/fx-options>
- Pangestuti, D. C., Fadila, A., & Nugraheni, S. (2022). Rupiah exchange rate fluctuations in the US Dollar, purchasing power parity theory and Fisher effect theory testing. *Jurnal Nominal: Barometer Riset Akuntansi dan Manajemen*, 11(1), 57–69. <https://doi.org/10.21831/nominal.v11i1.42982>
- Pardasia, S., & Syafri. (2024). Analisis faktor yang mempengaruhi nilai tukar. *Jurnal Ekonomi Trisakti*, 4(1), 187–196. <https://doi.org/10.25105/jet.v4i1.18694>
- Redaksi OCBC NISP. (2023). *Kurs – Pengertian, jenis, dan faktor yang memengaruhinya*. OCBC. <https://www.ocbc.id/id/article/2021/04/14/kurs-adalah>
- Samosir, K., & Arka, S. (2024). Fluktuasi nilai tukar Rupiah atas Dolar AS. *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran*, 7(3), 10431–10441. <https://doi.org/10.31004/jrpp.v7i3.31084>
- Saputri, F. A. (2024). *Penentuan harga opsi beli Eropa dengan volatilitas stokastik menggunakan model Heston*. UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
- Taylor, M. (2022). *Mean absolute percentage error*. Vexpower. <https://www.vexpower.com/brief/mean-absolute-percentage-error>
- Wibowo, A. (2022). *Pasar derivatif (produk turunan)*. Yayasan Prima Agus Teknik.
- Yahoo Finance. (n.d.). *USD/IDR (IDR=X) historical data*. <https://finance.yahoo.com/quote/IDR%3DX/history/?p=IDR%3DX&frequency=1mo&period1=1577836800&period2=1735603200&guccounter=1>