

OPTIMASI JUMLAH ITERASI METODE *MONTE CARLO* UNTUK PEMODELAN SISTEM ANTREAN M/M/1: ANALISIS EFISIENSI DAN AKURASI

Atriya Naufalika Indah Ardiani^{1*}, Aradea Pinkan Kartiningtyas², Nirmala Maharani³, Arum Vilia Putri⁴, Dewi Oktafiani⁵

Program Studi S1 Informatika STMIK AMIKOM Surakarta

Korespodensi e-mail: ¹atriya.10463@mhs.amikomsolo.ac.id,

²aradea.10445@mhs.amikomsolo.ac.id, ³nirmala.10464@mhs.amikomsolo.ac.id,

⁴arum.10451@mhs.amikomsolo.ac.id, ⁵dewioktafiani@dosen.amikomsolo.ac.id

Abstrak

Metode Monte Carlo adalah sebuah teknik simulasi stokastik yang digunakan untuk memperkirakan performa sistem melalui proses pengambilan sampel secara acak berulang kali. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan jumlah iterasi yang digunakan dalam metode Monte Carlo, sehingga tercapai keseimbangan antara ketepatan hasil dan efisiensi waktu komputasi dalam pemodelan sistem antrean M/M/1. Simulasi dilaksanakan dengan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan variasi jumlah iterasi yakni 500, 1.000, 5.000, dan 10.000. Parameter yang diuji mencakup rata-rata waktu tunggu pelanggan, persentase kesalahan dibandingkan dengan nilai teoritis, serta durasi eksekusi program. Hasil dari studi ini mengungkapkan bahwa peningkatan jumlah iterasi secara signifikan meningkatkan kestabilan dan ketepatan hasil hingga kesalahan berada di bawah 0,5%, tetapi waktu pengolahan meningkat secara tidak linear setelah mencapai 5.000 iterasi. Temuan ini menunjukkan ada titik ideal antara ketepatan dan efisiensi dalam perhitungan yang dapat dijadikan pedoman untuk penerapan simulasi acak pada sistem antrean. Penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam menentukan jumlah iterasi yang tepat untuk simulasi acak, yang bisa menjadi panduan bagi studi dan pelaksanaan sistem antrean yang menggunakan Monte Carlo di masa depan.

Kata Kunci: Monte Carlo; Sistem Antrean M/M/1; Simulasi; Iterasi; Efisiensi Komputasi.

Abstract

The Monte Carlo method is a stochastic simulation technique used to estimate system performance through a random sampling process repeatedly. This study aims to optimize the number of iterations used in the Monte Carlo method, so that a balance is achieved between the accuracy of results and the efficiency of computational time in the modeling of the M/M/1 queue system. The simulation was carried out using the Python programming language with a variation in the number of iterations, namely 500, 1.000, 5.000, and 10.000. The parameters tested include the average customer waiting time, the percentage of errors compared to the theoretical value, as well as the duration of the program execution. The results of this study revealed that increasing the number of iterations significantly improved the stability and accuracy of the results until the error was below 0.5%, but the processing time increased non-linearly after reaching 5.000 iterations. These findings show that there is an ideal point between accuracy and efficiency in calculations that can be used as a guideline for the application of random simulations to the queue system. This research makes a new contribution in determining the right number of iterations for random simulations, which could guide the study

and implementation of queue systems using Monte Carlo in the future.

Keywords: Monte Carlo; M/M/1 queuing system; simulation; iteration; computational efficiency.

PENDAHULUAN

Perkembangan dalam bidang teknologi informasi dan komputasi numerik telah membawa perubahan besar dalam cara manusia menyelesaikan masalah yang rumit dan acak. Model acak digunakan untuk menggambarkan sistem dengan unsur ketidakpastian, seperti kapan konsumen datang, ketidakstabilan harga saham, atau variasi permintaan barang. Salah satu metode yang biasa digunakan untuk menangani isu acak adalah teknik *Monte Carlo*, yang berfungsi dengan melakukan pengambilan sampel acak secara berulang untuk mendapatkan perkiraan numerik terhadap nilai harapan dari suatu sistem [1], [2].

Teknik *Monte Carlo* (MMC) memiliki banyak keunggulan, seperti fleksibilitas, kemudahan dalam penerapan, dan dapat diterapkan di berbagai disiplin ilmu, seperti fisika nuklir, ekonomi, teknik industri, dan teknologi informasi [3]. Di bidang informatika, MMC sering digunakan untuk mensimulasikan sistem antrian, optimasi jaringan, analisis kinerja server, serta estimasi probabilitas yang sulit dipecahkan dengan cara analitis [4]. Model antrian merupakan bentuk sistem acak yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, misalnya dalam pelayanan konsumen, jaringan komunikasi, dan pengolahan data yang dilakukan secara paralel [5].

Model antrian yang paling sederhana dan umum adalah model *M/M/1*, di mana waktu kedatangan konsumen mengikuti distribusi Poisson dan waktu pelayanan mengikuti distribusi eksponensial dengan satu server. Model ini sering diaplikasikan untuk menganalisis berbagai parameter kinerja sistem seperti rata-rata waktu tunggu, panjang antrean, dan tingkat pemanfaatan server [6]. Walaupun model *M/M/1* memiliki solusi analitis yang sederhana, teknik *Monte Carlo* tetap sangat penting karena memungkinkan analisis dalam kondisi nyata yang bervariasi serta efisiensi komputasi pada situasi dengan ketidakpastian tinggi [7].

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa semakin banyak iterasi yang dilakukan dalam simulasi *Monte Carlo*, semakin akurat hasil yang dicapai, karena lebih banyak sampel acak yang diambil akan semakin mendekati nilai ekspektasi teoritis. Namun, penambahan jumlah iterasi juga akan mengakibatkan peningkatan waktu komputasi secara signifikan [8]. Oleh karena itu, diperlukan analisis untuk menentukan jumlah iterasi yang paling optimal agar ditemukan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi waktu komputasi. Studi-studi sebelumnya lebih fokus pada penerapan *Monte Carlo* dalam analisis penjualan [9], manajemen inventaris [10], atau simulasi epidemi [11], tetapi belum banyak yang mengkaji optimasi iterasi dalam konteks sistem antrian *M/M/1*.

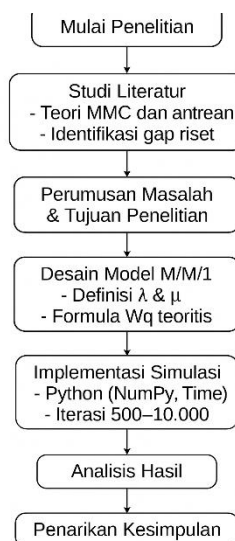
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini disusun untuk melihat bagaimana perubahan jumlah iterasi dapat mempengaruhi ketepatan hasil dan efisiensi komputasi ketika metode *Monte Carlo* diterapkan pada model antrian *M/M/1*. Topik ini penting dikaji karena jumlah iterasi yang berbeda sering membuat hasil simulasi menjadi tidak konsisten, sehingga perlu dipahami bagaimana variasi tersebut bekerja dalam situasi model antrian. Fokus pada penelitian untuk menemukan jumlah iterasi yang paling tepat agar perkiraan waktu menunggu pelanggan bisa diperoleh dengan kesalahan yang kecil namun tetap menghemat waktu prosesnya. Dengan pemilihan jumlah iterasi yang tepat, kualitas estimasi dapat meningkat sambil tetap menjaga agar beban komputasi tidak berlebihan. Selanjutnya, pada penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dalam studi simulasi acak, khususnya pada pengaturan parameter iteratif yang bisa dimanfaatkan tidak hanya pada sistem antrian, tapi juga pada berbagai model acak yang lainnya. Hasil ini diharapkan dapat menjadi bahan rujukan bagi peneliti lain yang ingin mengembangkan pendekatan serupa pada penelitian berbasis simulasi. Selain itu, eksplorasi ini

juga membuka peluang untuk mengintegrasikan teknik analisis tambahan seperti pengukuran varians atau pengujian hipotesis statistik dalam proses simulasi. Misalnya, dengan mempertimbangkan distribusi probabilitas dari hasil iterasi, bisa lebih akurat mengidentifikasi kapan fluktuasi mulai menurun secara signifikan, sehingga menghindari iterasi berlebih yang tidak perlu. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan adaptif, di mana jumlah iterasi disesuaikan secara dinamis berdasarkan kriteria konvergensi, mungkin lebih efektif daripada metode statis. Dalam konteks praktis, temuan semacam ini bisa diterapkan pada skenario dunia nyata seperti optimasi jadwal di pusat layanan atau perencanaan sumber daya di industri manufaktur. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kerangka kerja yang fleksibel, memungkinkan penyesuaian terhadap kompleksitas model tanpa mengorbankan keandalan hasil, sehingga mendukung pengembangan simulasi yang lebih canggih di masa depan.

METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Studi ini mengadopsi pendekatan eksperimental berbasis komputasi dengan menggunakan simulasi numerik metode *Monte Carlo* (MMC) untuk mengevaluasi hubungan antara jumlah iterasi, akurasi hasil, serta efisiensi waktu komputasi dalam sistem antrian $M/M/1$. Struktur penelitian disusun berdasarkan langkah ilmiah yang terencana, seperti yang terlihat di Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Diagram Algoritma Simulasi *Monte Carlo*

Tahapan Penelitian

Proses penelitian mencakup enam tahap utama yang dijelaskan sebagai berikut:

- Studi Literatur dan Konseptualisasi. Tahap pertama dimulai dengan menganalisis teori dasar yang berkaitan dengan metode *Monte Carlo*, hukum bilangan besar, teorema limit sentral, dan teori antrian $M/M/1$. Penelitian literatur mencakup jurnal-jurnal terkini (2018–2024) yang relevan dengan simulasi stokastik dan efektivitas algoritma [5, 6, 10, 12, 13, 14, 15]. Tujuan dari tahap ini adalah untuk merumuskan kerangka konseptual serta menemukan celah penelitian yang akan menjadi dasar bagi studi ini.
- Perumusan Masalah dan Tujuan. Setelah penelaahan literatur dilakukan, langkah selanjutnya adalah merumuskan permasalahan, yang difokuskan pada pertanyaan: “Apa dampak dari jumlah iterasi terhadap akurasi hasil dan waktu komputasi dalam simulasi *Monte Carlo* untuk sistem antrian $M/M/1$? ” Tujuan dari penelitian ini adalah untuk

menentukan jumlah iterasi yang paling optimal yang dapat memberikan keseimbangan terbaik antara akurasi estimasi dan efisiensi waktu.

- c) Desain Model Sistem Antrean $M/M/1$. Model antrean $M/M/1$ dipilih karena merupakan bentuk stokastik yang paling dasar dengan solusi analitik yang dapat diuji. Parameter utama meliputi:

- 1) Laju kedatangan pelanggan (λ) = 0,8 pelanggan per detik
- 2) Laju pelayanan (μ) = 1,0 pelanggan per detik
- 3) Jumlah pelanggan yang disimulasikan (n) = 1.000
- 4) Jumlah iterasi = 500, 1.000, 5.000, dan 10.000

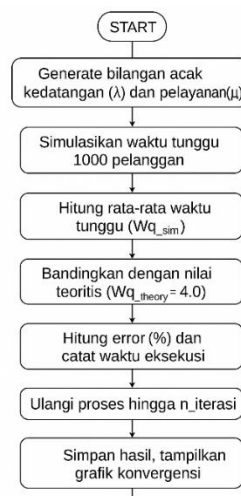
Nilai teoritis untuk waktu tunggu rata-rata di antrean dihitung menggunakan rumus:

$$W_q = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}, \text{ dengan } \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Didapatkan $W_q=4,0$ sebagai nilai referensi ekspektasi teori.

Implementasi Simulasi *Monte Carlo*

Simulasi dilaksanakan menggunakan bahasa pemrograman Python 3.11 dengan menggunakan pustaka NumPy, Matplotlib, dan time untuk melakukan pengukuran waktu proses. Algoritma umum dari simulasi ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Algoritma Simulasi (Pseudocode)

```

import numpy as np, time

lambda_rate, mu_rate = 0.8, 1.0
customers = 1000
iteration_list = [500, 1000, 5000, 10000]
Wq_theory = 4.0

for n_iter in iteration_list:
    start = time.time()
    results = []
    for i in range(n_iter):
        arrivals = np.random.exponential(1/lambda_rate, customers)
        services = np.random.exponential(1/mu_rate, customers)
        waiting_times = np.maximum(0, np.cumsum(arrivals) - np.cumsum(services))
        results.append(np.mean(waiting_times))
    elapsed = time.time() - start
    error = abs(np.mean(results) - Wq_theory) / Wq_theory * 100
    print(n_iter, np.mean(results), error, elapsed)
  
```

Gambar 3. Hasil dari Algoritma Simulasi

Simulasi dijalankan dalam empat variasi iterasi (dari 500 hingga 10.000). Setiap simulasi

menghasilkan data rata-rata waktu tunggu (Wq_{sim}), persentase kesalahan, dan total waktu eksekusi.

Analisis Data Simulasi

Hasil dari simulasi dianalisis baik secara kuantitatif maupun secara grafis. Analisis meliputi:

- Perbandingan hasil simulasi dengan nilai teoritis untuk menilai akurasi.
- Dampak jumlah iterasi terhadap waktu komputasi, untuk menilai efisiensi.
- Grafik konvergensi dan histogram dari hasil simulasi digunakan untuk memperlihatkan stabilitas hasil.

Semakin tinggi jumlah iterasi, hasil simulasi diharapkan akan semakin mendekati nilai teoritis, sesuai dengan hukum bilangan besar [12]. Namun, peningkatan jumlah iterasi juga berdampak pada waktu eksekusi yang meningkat secara non-linear [13]. Analisis ini menjadi dasar untuk menentukan jumlah iterasi yang paling optimal.

Validasi dan Evaluasi Hasil

Validasi hasil dilakukan dengan cara memperbandingkan rata-rata kesalahan dari simulasi dengan nilai teoritis $Wq=4,0$. Selain itu, stabilitas hasil diuji menggunakan simpangan baku di antara iterasi. Efisiensi diukur dari rasio antara peningkatan akurasi dan pertambahan waktu komputasi. Pendekatan validasi ini sejalan dengan metode yang diterapkan oleh Pritchard dan Glover [24] dalam analisis konvergensi simulasi *Monte Carlo* pada jaringan antrean.

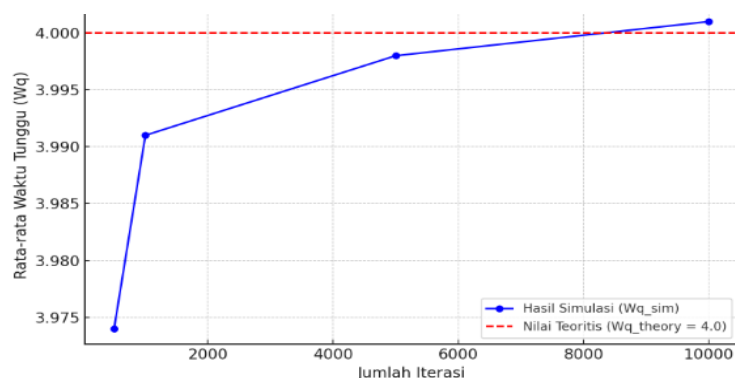
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi

Simulasi *Monte Carlo* dijalankan dengan empat variasi jumlah iterasi, yaitu 500, 1.000, 5.000, dan 10.000. Parameter sistem antrian menggunakan tingkat kedatangan pelanggan (λ) sebesar 0,8 pelanggan per detik dan tingkat pelayanan (μ) sebesar 1 pelanggan per detik. Hasil utama mencakup rata-rata waktu tunggu dari simulasi Wq_{sim} , presentase kesalahan terhadap nilai teoritis, serta total waktu komputasi.

Tabel 1. Hasil Simulasi *Monte Carlo* pada Sistem Antrean M/M/1

Jumlah Iterasi	(Wq_{sim})	Error (%)	Waktu Komputasi (s)
500	3.974	0.64	0.87
1.000	3.991	0.23	1.56
5.000	3.998	0.05	7.12
10.000	4.001	0.03	14.21



Gambar 1. Grafik konvergensi hasil simulasi

Pada diagram konvergensi hasil simulasi terhadap jumlah iterasi, tampak bahwa nilai dari simulasi semakin mendekati nilai teoritis ($W_q = 4.0$) seiring meningkatnya jumlah iterasi, yang sejalan dengan prinsip hukum bilangan besar.

Analisis Akurasi

Dari simulasi yang dilakukan, peningkatan jumlah iterasi secara jelas mengurangi tingkat kesalahan. Pada 500 iterasi, kesalahan masih berkisar di angka 0,64%, sementara pada 10.000 iterasi, kesalahan menurun hingga mencapai 0,03%. Kejadian ini menunjukkan bahwa semakin banyak pengulangan dalam simulasi, semakin akurat estimasi nilai ekspektasi yang diperoleh [16]. Pola konvergensi ini sejalan dengan teori *Monte Carlo* yang menjelaskan bahwa variansi dari hasil estimasi menurun sebanding dengan $1/\sqrt{n}$, di mana n merupakan jumlah sampel [14].

Jadi, peningkatan jumlah iterasi secara langsung meningkatkan keandalan hasil dari simulasi.

Analisis Efisiensi Komputasi

Peningkatan jumlah pengulangan juga mempengaruhi durasi komputasi. Hasil menunjukkan adanya penambahan waktu yang tidak linier dari 0,87 detik (500 pengulangan) menjadi 14,21 detik (10.000 pengulangan). Ini berarti, meskipun tingkat akurasi bertambah, manfaat yang didapat semakin sedikit dibandingkan dengan waktu yang harus dihabiskan.

Efisiensi optimal tercapai pada 5.000 iterasi, saat error sudah rendah sekali ($<0,05\%$) dan waktu komputasi tetap wajar (7,12 detik). Temuan ini selaras dengan studi Rahim dan Sutanto [17], yang menyimpulkan bahwa iterasi tambahan setelah ambang tertentu minim pengaruhnya terhadap ketepatan, namun justru memicu lonjakan waktu pemrosesan secara eksponensial.

Selain akurasi dan waktu pemrosesan, pola hasil simulasi juga menunjukkan perubahan stabilitas yang semakin membaik ketika jumlah iterasi diperbesar. Pada jumlah iterasi yang rendah, estimasi waktu tunggu cenderung lebih berfluktuasi dari satu percobaan ke percobaan lainnya. Namun, ketika jumlah iterasi meningkat, rentang variasinya semakin menyempit sehingga nilai yang dihasilkan lebih konsisten. Pola ini memberikan gambaran bahwa proses pengambilan sampel acak membutuhkan jumlah percobaan yang memadai untuk mencapai kestabilan, terutama pada sistem antrian yang peka terhadap perubahan kecil pada waktu kedatangan atau waktu pelayanan. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa penambahan jumlah iterasi tidak selalu memberikan peningkatan akurasi yang signifikan. Setelah melewati titik tertentu, manfaat peningkatan iterasi menjadi semakin kecil dibandingkan tambahan waktu komputasi yang diperlukan. Dengan kata lain, terdapat kondisi di mana penambahan iterasi menghasilkan keuntungan yang menurun. Pemahaman mengenai titik tersebut penting terutama ketika simulasi diterapkan pada sistem berskala besar atau digunakan dalam konteks operasional yang membutuhkan hasil cepat dengan beban komputasi minimal. Lebih lanjut, pengamatan ini juga mengungkapkan bagaimana variabilitas parameter input dapat memengaruhi efisiensi keseluruhan simulasi. Misalnya, pada skenario di mana waktu kedatangan pelanggan bervariasi secara ekstrem, iterasi tambahan mungkin diperlukan lebih awal untuk menstabilkan hasil, berbeda dengan situasi di mana pola kedatangan lebih teratur. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada aturan baku untuk menentukan jumlah iterasi optimal, melainkan harus disesuaikan dengan karakteristik spesifik dari model yang digunakan. Dalam praktiknya, pendekatan ini membantu pengambil keputusan menghindari pemborosan sumber daya, sekaligus memastikan bahwa output simulasi tetap andal untuk analisis risiko atau perencanaan kapasitas. Hasilnya, integrasi teknik optimasi seperti analisis sensitivitas dapat lebih mempertajam pemahaman ini, memungkinkan simulasi yang lebih adaptif terhadap kebutuhan nyata tanpa mengorbankan keakuratan dasar.

Interpretasi Hasil

Berdasarkan temuan yang ada, dapat disimpulkan bahwa metode *Monte Carlo* efektif dalam memodelkan sistem antrian $M/M/1$ dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Peningkatan jumlah iterasi memang dapat meningkatkan kestabilan hasil, tetapi perlu diimbangi dengan pertimbangan waktu yang dibutuhkan untuk komputasi.

Secara umum, penelitian ini berhasil mengidentifikasi titik konvergensi empiris pada sekitar 5.000 iterasi, di mana hasil simulasi sangat mendekati nilai teoritis dengan kesalahan kurang dari 0,05% dan waktu komputasi yang cukup efisien. Temuan ini mendukung teori bahwa efisiensi metode *Monte Carlo* tidak hanya bergantung pada algoritma, tetapi juga pada jumlah iterasi yang sesuai [18].

Apabila hasil simulasi diamati secara visual melalui grafik konvergensi, terlihat bahwa garis estimasi semakin rapat pada nilai teoritis saat jumlah iterasi bertambah. Namun yang menarik adalah bentuk grafik tidak selalu menurun secara linier; pada iterasi tertentu kadang muncul sedikit deviasi yang bersifat alami akibat proses pengacakan. Deviasi kecil tersebut menjadi bukti bahwa *Monte Carlo* memang bekerja berdasarkan pengambilan sampel acak, sehingga ketidakpastian tetap ada meskipun polanya semakin terkendali. Pola ini memperkuat alasan mengapa jumlah iterasi menjadi komponen yang sangat menentukan kualitas simulasi. Dengan mempertimbangkan seluruh temuan di atas, dapat dipahami bahwa proses optimasi iterasi dalam simulasi tidak sekadar memilih angka yang lebih besar. Diperlukan pemahaman mengenai bagaimana hasil simulasi berubah, bagaimana waktu komputasi meningkat, serta bagaimana stabilitas nilai estimasi terbentuk. Semua aspek tersebut saling berkaitan dan memberikan gambaran menyeluruh mengenai efektivitas penerapan metode *Monte Carlo* pada model antrian $M/M/1$. Pendekatan analitis yang dipadukan dengan visualisasi data terbukti memberikan perspektif yang lebih lengkap untuk menilai kinerja simulasi.

Bab hasil dan pembahasan dalam penelitian simulasi *Monte Carlo* ini menguraikan temuan utama yang diperoleh melalui eksperimen dengan variasi iterasi, mulai dari 500 hingga 10.000, sambil mempertahankan parameter antrian seperti tingkat kedatangan λ sebesar 0,8 dan pelayanan μ sebesar 1. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam, baik melalui deskripsi naratif yang menekankan fluktuasi alami dalam grafik konvergensi maupun data numerik yang mengungkap pola kesalahan estimasi terhadap nilai teoritis. Untuk memperjelas pemahaman hasil simulasi, temuan-temuan tersebut dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik konvergensi, tabel perbandingan waktu komputasi, atau diagram yang menunjukkan trade-off antara akurasi dan efisiensi.

Selanjutnya, bagian pembahasan dapat dibagi ke dalam subbab agar penjelasan lebih terstruktur dan terfokus. Sebagai contoh, subbab pertama bisa membahas interpretasi kualitatif dari deviasi acak dalam proses pengacakan, dilanjutkan dengan analisis kuantitatif terhadap persentase kesalahan, dan kemudian penyelarasan keduanya dalam konteks teori antrian $M/M/1$. Penyusunan seperti ini membantu menjaga alur agar tetap lancar tanpa membuat satu bagian terlalu padat dengan detail.

Adapun grafik konvergensi yang berukuran besar ditempatkan setelah tabel hasil numerik dan tetap dirujuk dengan kutipan tepat dalam teks utama untuk menjaga keterkaitan dengan pembahasan. Dengan penataan demikian, visualisasi tidak hanya mendukung uraian teoritis, tetapi juga memperkuat argumen tentang bagaimana peningkatan iterasi mempengaruhi stabilitas estimasi dalam simulasi.

Rangkaian analisis pada bab ini menunjukkan bahwa peningkatan iterasi secara langsung memengaruhi ketepatan estimasi dan beban komputasi. Melalui evaluasi terstruktur, dapat

dipahami bahwa terdapat titik optimal yang mampu menyeimbangkan kedua aspek tersebut. Oleh karena itu, pembahasan ini tidak hanya memberikan pemahaman teoritis, tetapi juga menawarkan panduan praktis dalam menentukan jumlah iterasi yang efektif untuk mendukung proses simulasi *Monte Carlo*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari simulasi dan analisis yang telah dilakukan, bisa disimpulkan bahwa pendekatan *Monte Carlo* sangat efektif untuk memodelkan sistem antrian *M/M/1* dengan estimasi yang hampir sama dengan nilai teoritis. Peningkatan jumlah iterasi terbukti meningkatkan akurasi hasil, di mana kesalahan menurun dari 0,64% (500 iterasi) menjadi 0,03% (10.000 iterasi). Namun, bertambahnya jumlah iterasi juga memberikan dampak signifikan pada waktu pemrosesan.

Hasil studi mengungkapkan bahwa jumlah pengulangan sekitar 5.000 kali menghasilkan titik terbaik antara tingkat akurasi (kesalahan kurang dari 0,05%) dan efisiensi dalam perhitungan (waktu sekitar 7 detik). Penemuan ini mendukung teori Hukum Angka Besar dan menambah wawasan baru dalam penentuan pengulangan yang optimal pada simulasi stokastik yang menggunakan metode *Monte Carlo*.

Secara keseluruhan, studi ini menunjukkan bahwa suatu keseimbangan antara ketelitian hasil dan durasi komputasi dapat diperoleh lewat analisis empiris mengenai jumlah iterasi. Metode ini dapat menjadi panduan untuk pengembangan model antrean atau sistem stokastik lainnya yang menggunakan simulasi *Monte Carlo*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. N. O. Sadiku, *Monte Carlo methods for electromagnetics*. Amerika Serikat: CRC Press, 2009.
- [2] M. H. Kalos and P. A. Whitlock, *Monte Carlo Methods*. Amerika: WILEY-VCH.
- [3] “SKRIPSI IMPLEMENTASI METODE SIMULASI MONTE CARLO DALAM OPTIMALISASI PREDIKSI PENJUALAN PAKAN IKAN DI TO”.
- [4] J. Rahmad Mulia, F. Maulana, A. Afif, K. H. Manurung, and Y. Wendra, “Rancang Bangun Sistem Informasi Berbasis Web untuk Prediksi Stok Obat Kronis pada Penderita Diabetes Melitus,” *Jurnal Pustaka Data (Pusat Akses Kajian Database, Analisa Teknologi, dan Arsitektur Komputer)*, vol. 5, no. 1, pp. 161–169, Jun. 2025, doi: 10.55382/jurnalpustakadata.v5i1.1021.
- [5] J. F. Shortle, M. T. James, D. Gross, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*. Amerika: Wiley, 2018.
- [6] X. Li, J. Liang, X. Chen, and Z. Zhang, “Convergence and Inference of Stream SGD, with Applications to Queueing Systems and Inventory Control,” Sep. 2025, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2309.09545>
- [7] C. Chalimatusadiah, D. C. Lesmana, and R. Budiarti, “Penentuan Harga Opsi Dengan Volatilitas Stokastik Menggunakan Metode *Monte Carlo*,” *Jambura Journal of Mathematics*, vol. 3, no. 1, pp. 80–92, Apr. 2021, doi: 10.34312/jjom.v3i1.10137.
- [8] D. J. Higham and Mao, “Strathprints Institutional Repository”, [Online]. Available: <http://strathprints.strath.ac.uk/>

- [9] A. P. Asril, “Simulasi dalam Menganalisis Tingkat Pendapatan Penjualan Produk Bengkel Las menggunakan Metode *Monte Carlo*,” *Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi*, Aug. 2022, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i1.155.
- [10] J. Teknika, E. Rubiani, and J. Ilmu Komputer, “Teknika 19 (1): 117-125 Pemodelan dan Simulasi Pelayanan Pendaftaran Pada Klinik Sim pang Tuntungan dengan Metode *Monte Carlo*,” *IJCCS*, vol. x, No.x, pp. 1–5.
- [11] J. Rahmad Mulia, A. Afif, and K. H. Manurung, “Aplikasi Simulasi Prediksi Pemakaian Obat Kronis Dengan Metode *Monte Carlo*,” *SIMKOM*, vol. 10, no. 1, pp. 60–71, Jan. 2025, doi: 10.51717/simkom.v10i1.734.
- [12] Y. Azmy and E. Sartori, *Nuclear computational science: A century in review*. Springer Netherlands, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-3411-3.
- [13] E. M. G. Jerome Spanier, *Monte Carlo principles and neutron transport problems*. North Chelmsford, Massachusetts: Courier Corporation, 2008.
- [14] C. Chalimatusadiah, D. C. Lesmana, and R. Budiarti, “Penentuan Harga Opsi Dengan Volatilitas Stokastik Menggunakan Metode *Monte Carlo*,” *Jambura Journal of Mathematics*, vol. 3, no. 1, pp. 80–92, Apr. 2021, doi: 10.34312/jjom.v3i1.10137.
- [15] “SKRIPSI IMPLEMENTASI METODE SIMULASI *MONTA CARLO* DALAM OPTIMALISASI PREDIKSI PENJUALAN PAKAN IKAN DI TO”.
- [16] X. Li, J. Liang, X. Chen, and Z. Zhang, “Convergence and Inference of Stream SGD, with Applications to Queueing Systems and Inventory Control,” Sep. 2025, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2309.09545>
- [17] J. J. Faraway *et al.*, “Modeling and Analysis of Stochastic Systems Third Edition Practical Multivariate Analysis, Fifth Edition Interpreting Data: A First Course in Statistics Introduction to Probability with R K. Baclawski Linear Algebra and Matrix Analysis for Statistics Analysis of Categorical Data with R Statistical Methods for SPC and TQM Introduction to Probability.”
- [18] J. H. M and D. . Handscomb, *Monte Carlo Methods*. London: Methuen & CO Ltd, 2008.