

Studi Kuantitatif Respons Memristor Model Joglekar dan Biolek terhadap Variasi Sinyal Input

Quantitative Study on Response of Joglekar and Biolek Memristor Models to Input Signal Variations

Mohamad Ramdhani¹, Irwan Purnama²

^{1,2} Universitas Telkom; email: mohamadramdhani@telkomuniversity.ac.id

[Dikirimkan: 1 Juni 2025, Direvisi: 28 November 2025, Diterima: 28 November 2025]
Corresponding Author: Mohamad Ramdhani

INTISARI — Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons memristor model Joglekar dan Biolek terhadap variasi sinyal input menggunakan simulasi LTspice. Memristor, sebagai komponen kunci dalam teknologi memori *non-volatile* dan komputasi *neuromorfik*, memiliki kemampuan unik dalam menyimpan informasi melalui perubahan resistansi yang bergantung pada riwayat arus yang mengalir. Meskipun berbagai model matematis telah dikembangkan untuk memodelkan perilaku memristor, penelitian ini fokus pada dua model yang paling banyak digunakan, yaitu model Joglekar dan Biolek. Kedua model tersebut memiliki pendekatan matematis yang berbeda, terutama dalam penggunaan fungsi jendela untuk mengatur respons memristor terhadap variasi sinyal. Simulasi dilakukan dengan tiga jenis sinyal input yang berbeda: sinyal sinusoidal, kotak, dan segitiga, untuk mengevaluasi respons memristor terhadap variasi frekuensi dan amplitudo sinyal. Data hasil simulasi dianalisis secara kuantitatif menggunakan statistik deskriptif, yang meliputi perhitungan rata-rata, simpangan baku, varians, median, dan rentang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Joglekar memiliki fluktuasi yang lebih besar dibandingkan model Biolek pada semua jenis gelombang, terutama pada gelombang kotak. Sebaliknya, model Biolek menunjukkan respons yang lebih stabil dan konsisten. Penelitian ini memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai keunggulan dan keterbatasan masing-masing model dalam aplikasi praktis, khususnya dalam pengembangan sistem memori dan komputasi neuromorfik berbasis memristor.

KATA KUNCI — Memristor, Joglekar, Biolek, LTspice, Simulasi, Statistik deskriptif, Sinyal input.

ABSTRACT — *This study aims to analyze the response of the Joglekar and Biolek memristor models to variations in input signals using LTspice simulations. Memristors, as key components in non-volatile memory technology and neuromorphic computing, have a unique ability to store information through changes in resistance that depend on the history of the current flowing. Although various mathematical models have been developed to represent the behavior of memristors, this research focuses on two of the most widely used models: Joglekar and Biolek. These two models differ in their mathematical approaches, particularly in the use of window functions to regulate the memristor's response to input signal variations. Simulations were performed with three different types of input signals: sinusoidal, square, and triangular waves, to evaluate the memristor's response to variations in signal frequency and amplitude. The data from the simulations were analyzed quantitatively using descriptive statistics, including mean, standard deviation, variance, median, and range calculations. The results show that the Joglekar model exhibits larger fluctuations compared to the Biolek model across all waveforms, particularly for the square wave. On the other hand, the Biolek model shows a more stable and consistent response. This study provides deeper insights into the advantages and limitations of each model in practical applications, especially in the development of memristor-based memory and neuromorphic computing systems.*

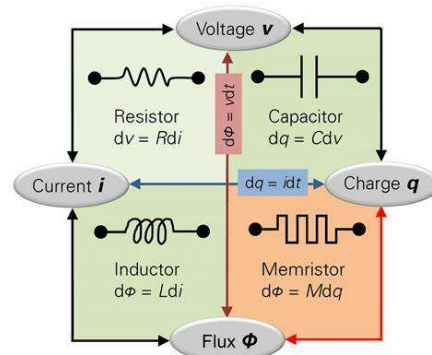
KEYWORDS — Memristor, Joglekar, Biolek, LTspice, Simulation, Descriptive Statistics, Input Signal.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi memori non-volatile dan komputasi *neuromorfik* telah mendorong penelitian intensif terhadap komponen elektronik inovatif, salah satunya adalah memristor [1]. Memristor dikenal sebagai elemen pasif keempat yang memiliki kemampuan unik dalam menyimpan informasi melalui perubahan resistansi yang bergantung pada riwayat arus listrik yang mengalir [2]. Keunggulan ini menjadikan memristor sebagai komponen kunci dalam pengembangan perangkat penyimpanan data yang lebih efisien, cepat, dan hemat energi [3], serta dalam implementasi sistem komputasi yang meniru fungsi otak manusia secara lebih realistis. Berbagai model matematis telah dikembangkan untuk memodelkan perilaku memristor, diantaranya model Joglekar dan Biolek yang banyak digunakan dalam simulasi sirkuit elektronik, khususnya menggunakan perangkat lunak LTspice. Simulasi ini memungkinkan analisis mendalam terhadap respons memristor terhadap berbagai variasi sinyal input secara kuantitatif dan sistematis [4].

Meskipun demikian, penelitian terdahulu mengungkapkan sejumlah keterbatasan dalam penggunaan model Joglekar dan Biolek, terutama terkait dengan akurasi representasi dinamika *nonlinier* memristor dan sensitivitas terhadap variasi parameter model [5].

Model Joglekar, yang menggunakan fungsi jendela simetris [6], sering kali kurang mampu menangkap efek batas fisik secara realistis, sedangkan model Biolek yang menggunakan fungsi jendela asimetris, meskipun lebih adaptif, masih memerlukan kalibrasi parameter yang cermat agar hasil simulasi tidak mengalami distorsi [7]. Selain itu, studi kuantitatif yang membandingkan secara langsung respons kedua model terhadap variasi sinyal input dalam simulasi LTspice masih sangat terbatas, sehingga menimbulkan kesenjangan dalam pemahaman mendalam mengenai keunggulan dan kelemahan masing-masing model dalam konteks aplikasi praktis [8].



Gambar 1 Hubungan antar elemen rangkaian

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kekurangan tersebut dengan melakukan studi kuantitatif yang komprehensif terhadap respons memristor model Joglekar dan Biolek terhadap variasi sinyal input menggunakan simulasi LTspice [9]. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi secara sistematis pengaruh parameter model terhadap karakteristik arus-tegangan dan dinamika switching memristor [10], sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih jelas dan terukur mengenai performa kedua model tersebut. Dengan pendekatan kuantitatif yang mendalam, penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan literatur terkait evaluasi parameter model dan memberikan rekomendasi parameter optimal yang dapat digunakan dalam simulasi dan aplikasi praktis memristor. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan model memristor yang lebih akurat dan aplikatif, serta mendukung kemajuan teknologi memori non-volatile dan komputasi *neuromorfik* berbasis memristor.

II. METODE PENELITIAN

A. DESAIN PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi untuk menganalisis respons memristor model Joglekar dan Biolek terhadap variasi sinyal input. Metode simulasi dipilih karena memungkinkan pengujian karakteristik memristor secara detail dan sistematis tanpa memerlukan perangkat keras fisik, sehingga efisien dari segi waktu dan biaya. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak LTspice, yang merupakan salah satu platform simulasi rangkaian elektronik yang populer dan handal dalam memodelkan komponen *nonlinier* seperti memristor [11]. Desain penelitian ini bersifat eksperimental dengan fokus pada pengukuran parameter kuantitatif yang dihasilkan dari simulasi. Dua model memristor yang menjadi objek studi, yaitu model Joglekar dan Biolek, dipilih karena keduanya banyak digunakan dalam literatur dan memiliki pendekatan matematis yang berbeda dalam merepresentasikan perilaku memristor, khususnya dalam hal fungsi jendela (*window function*) yang mempengaruhi dinamika *dopant drift* [12].

Variasi sinyal input yang digunakan dalam simulasi meliputi sinyal sinusoidal, segitiga, dan persegi dengan rentang frekuensi dan amplitudo yang telah ditentukan secara sistematis. Hal ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana kedua model memristor merespons perubahan bentuk dan frekuensi sinyal, yang relevan untuk aplikasi memristor dalam sistem memori dan *neuromorfik* [13]. Data yang diperoleh dari simulasi berupa kurva arus-tegangan (I-V), waktu *switching*, dan parameter resistansi dianalisis secara kuantitatif untuk membandingkan performa kedua model. Dengan desain penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai keunggulan dan keterbatasan masing-masing model dalam kondisi operasi yang beragam [14].

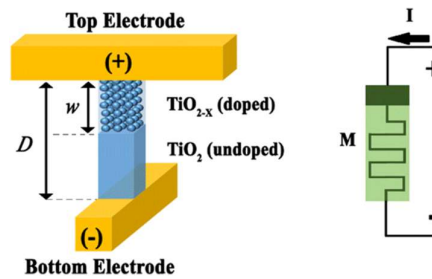
B. MODEL MEMRISTOR

Model memristor Joglekar merupakan salah satu model matematis yang banyak digunakan untuk mempelajari perilaku memristor secara teoritis dan simulatif. Model ini didasarkan pada konsep variabel keadaan (*state variable*) yang merepresentasikan posisi atau kondisi internal memristor yang berubah seiring dengan arus listrik yang mengalir. Salah satu aspek penting dari model Joglekar adalah penggunaan fungsi jendela (*window function*) yang dirancang untuk menjaga agar variabel keadaan tetap berada dalam batas fisik yang valid, yaitu antara 0 dan 1 [15]. Fungsi jendela ini berbentuk matematis yang menghalangi variabel keadaan melewati batas tersebut, sehingga mencegah terjadinya nilai yang tidak realistis atau tidak fisik selama proses simulasi. Fungsi jendela pada model Joglekar biasanya dinyatakan sebagai:

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (1)$$

di mana x adalah variabel keadaan dan p adalah parameter yang mengatur kekakuan fungsi jendela. Fungsi ini memiliki nilai maksimum di tengah rentang variabel keadaan dan menurun ke nol saat mendekati batas 0 dan 1, sehingga memperlambat perubahan variabel keadaan saat mendekati batas tersebut. Pendekatan ini sangat efektif untuk menjaga stabilitas simulasi dan

menghindari fenomena *overshoot* atau nilai variabel yang keluar dari domain fisik, yang sering menjadi masalah dalam simulasi memristor [16].



Gambar 2 Struktur dan simbol memristor

Dalam implementasinya di LTspice, model Joglekar biasanya direpresentasikan sebagai *subcircuit* yang menggabungkan elemen-elemen seperti sumber arus, kapasitor, dan resistor untuk membentuk integrator yang menghitung perubahan variabel keadaan berdasarkan arus input [17]. Parameter penting yang digunakan dalam simulasi meliputi resistansi minimum (R_{on}), resistansi maksimum (R_{off}), serta parameter fungsi jendela (p) yang dapat disesuaikan untuk merefleksikan karakteristik fisik memristor yang berbeda. Dengan konfigurasi ini, simulasi LTspice dapat menghasilkan kurva I-V yang menunjukkan perilaku histeresis khas memristor [18], serta memodelkan respons dinamis terhadap variasi sinyal input secara akurat.

Penggunaan model Joglekar dalam simulasi LTspice memberikan keuntungan berupa kesederhanaan matematis yang memudahkan analisis dan implementasi, sekaligus memberikan hasil simulasi yang cukup realistis untuk berbagai aplikasi memristor. Model ini telah banyak digunakan dalam penelitian untuk memahami karakteristik *switching* dan memori memristor, serta sebagai dasar pengembangan model yang lebih kompleks.

Model memristor Biolek merupakan pengembangan signifikan dari model memristor dasar yang bertujuan untuk mengatasi keterbatasan fungsi jendela pada model-model sebelumnya, termasuk model Joglekar. Biolek memperkenalkan fungsi jendela yang lebih adaptif dan dinamis, yang mampu menangani *nonlinearitas* serta efek histeresis yang kompleks yang sering muncul pada perilaku memristor nyata [19]. Fungsi jendela ini dirancang untuk mengontrol variabel keadaan (*state variable*) dengan lebih presisi, sehingga variabel tersebut tetap berada dalam batas fisik yang valid tanpa mengorbankan akurasi simulasi. Pendekatan ini memungkinkan model Biolek untuk merepresentasikan fenomena *switching* dan memori memristor dengan tingkat realisme yang lebih tinggi dibandingkan model-model sebelumnya.

$$f(x, i) = 1 - (x - \text{sgn}(i))^{2p} \quad (2)$$

Secara teknis, fungsi jendela pada model Biolek memperhitungkan arah arus yang mengalir melalui memristor, sehingga respons model terhadap sinyal input menjadi lebih responsif dan sesuai dengan karakteristik fisik perangkat. Fungsi ini mengadaptasi perubahan variabel keadaan berdasarkan polaritas arus, yang memungkinkan simulasi menangkap efek histeresis yang khas pada memristor, yaitu perbedaan jalur resistansi saat arus mengalir maju dan mundur. Hal ini sangat penting dalam analisis rangkaian dinamis di mana sinyal input bervariasi secara kompleks dan tidak selalu simetris.

Dalam simulasi LTspice, model Biolek diimplementasikan sebagai *subcircuit* yang menggabungkan elemen-elemen seperti sumber arus, kapasitor, dan resistor, serupa dengan model Joglekar, namun dengan parameter fungsi jendela yang lebih kompleks dan adaptif [20]. Parameter utama yang digunakan meliputi resistansi minimum (R_{on}), resistansi maksimum (R_{off}), serta parameter yang mengatur bentuk dan respons fungsi jendela terhadap arus. Konfigurasi ini memungkinkan simulasi untuk menghasilkan kurva I-V dengan histeresis yang lebih realistis dan dinamis, serta memodelkan perubahan resistansi memristor secara lebih akurat terhadap variasi sinyal input.

Untuk keperluan simulasi dalam penelitian ini, kedua model akan diimplementasikan dalam lingkungan LTspice dengan parameter yang disesuaikan berdasarkan literatur sebelumnya. Parameter umum yang digunakan meliputi resistansi minimum (R_{on}) sebesar 100 Ω , resistansi maksimum (R_{off}) sebesar 16 k Ω , panjang lapisan tipis (D) sebesar 10 nm, dan koefisien mobilitas ion (μv) sebesar 10^{-14} m²/Vs [21][22]. Nilai parameter *nonlinearitas* p akan divariasikan untuk mengamati pengaruhnya terhadap respons memristor.

C. PROSEDUR SIMULASI

LTspice merupakan perangkat lunak yang sangat berguna untuk menganalisis rangkaian elektronik secara simulasi. Dalam penelitian ini, rangkaian memristor dimodelkan dengan menggunakan komponen simulasi yang ada di LTspice. Komponen memristor Joglekar dan Biolek dimasukkan ke dalam rangkaian dengan parameter yang sesuai. Selanjutnya, rangkaian ini diberi sinyal input dalam bentuk tegangan atau arus yang bervariasi. Pada tahap ini, berbagai parameter dalam LTspice diatur untuk memastikan simulasi dapat berjalan dengan baik dan menghasilkan data yang akurat. Beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan antara lain waktu total simulasi serta konvergensi dalam perhitungan. Parameter-parameter ini mempengaruhi akurasi dan kecepatan simulasi.

```

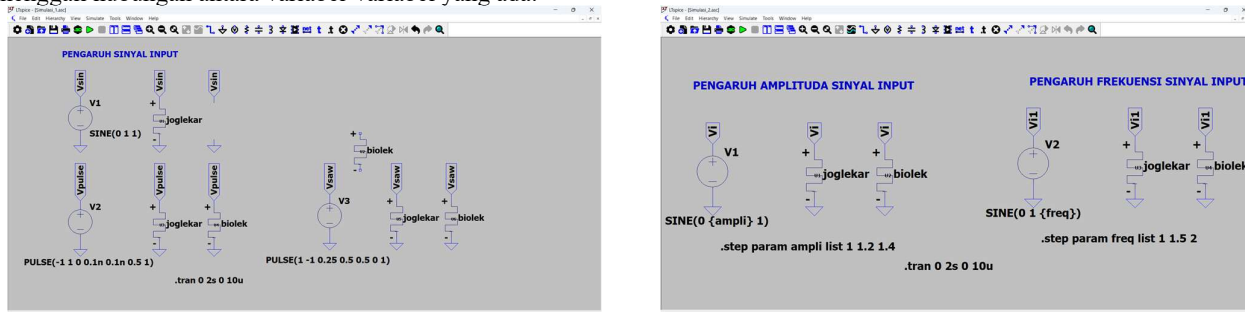
.....
.SUBCKT memris_joglekar plus minus PARAMS:
+ Ron=100 Roff=16K Rinit=11K D=10N uv=10F p=1
*+ Ron=100 Roff=16K Rinit=11K D=16N uv=40F p=7
.....
* DIFFERENTIAL EQUATION MODELING *
.....
Gx 0 x value={I(Emem)*uv*Ron/D**2*f(V(x),p)}
Cx x 0 1 IC={(Roff-Rinit)/(Roff-Ron)}
Raux x 0 1000000
.....
* RESISTIVE PORT OF THE MEMRISTOR *
.....
Emem plus aux value=-I(Emem)*V(x)*(Roff-Ron)}
Roff aux minus {Roff}
.....
* FLUX COMPUTATION *
.....
Eflux flux 0 value={SDT(V(plus,minus))}
.....
* CHARGE COMPUTATION *
.....
Echarge charge 0 value={SDT(I(Emem))}
.....
* WINDOW FUNCTIONS
* FOR NONLINEAR DRIFT MODELING *
.....
* window function, according to Joglekar
.func f(x,p)={1-(2*x-1)**(2*p)}
* .func f(x,i)={1-pow((x-stp(-i)),(2*p))}
.....
.ENDS memris_joglekar
.....
.SUBCKT memris_birolek plus minus PARAMS:
+ Ron=100 Roff=16K Rinit=11K D=10N uv=10F p=1
*+ Ron=100 Roff=16K Rinit=11K D=16N uv=40F p=7
.....
* DIFFERENTIAL EQUATION MODELING *
.....
Gx 0 x value={I(Emem)*uv*Ron/D**2*f(V(x),p)}
Cx x 0 1 IC={(Roff-Rinit)/(Roff-Ron)}
Raux x 0 1000000
.....
* RESISTIVE PORT OF THE MEMRISTOR *
.....
Emem plus aux value=-I(Emem)*V(x)*(Roff-Ron)}
Roff aux minus {Roff}
.....
* FLUX COMPUTATION *
.....
Eflux flux 0 value={SDT(V(plus,minus))}
.....
* CHARGE COMPUTATION *
.....
Echarge charge 0 value={SDT(I(Emem))}
.....
* WINDOW FUNCTIONS
* FOR NONLINEAR DRIFT MODELING *
.....
* window function, according to Joglekar
.func f(x,p)={1-(2*x-1)**(2*p)}
* .func f(x,i)={1-pow((x-stp(-i)),(2*p))}
.....
.ENDS memris_birolek

```

Gambar 3 Koding memristor pada LTspice

Setelah pengaturan rangkaian dan parameter selesai, simulasi dilakukan untuk memodelkan respons memristor terhadap variasi sinyal input yang telah ditentukan. LTspice akan menghasilkan grafik yang menunjukkan hubungan antara variabel-variabel yang terlibat, seperti tegangan, arus, dan resistansi. Data yang dihasilkan dari simulasi ini kemudian dianalisis untuk mendapatkan pemahaman mengenai karakteristik memristor dalam kondisi yang berbeda-beda.

Hasil simulasi dievaluasi dengan menganalisis grafik-grafik yang dihasilkan oleh LTspice. Dalam penelitian ini, grafik yang diperoleh menunjukkan bagaimana resistansi memristor berubah seiring dengan perubahan sinyal input, baik dalam hal amplitudo maupun frekuensi. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola-pola yang muncul dalam respons memristor dan untuk menggali hubungan antara variabel-variabel yang ada.



Gambar 4 Simulasi memristor pada LTspice

D. PENGOLAHAN DATA

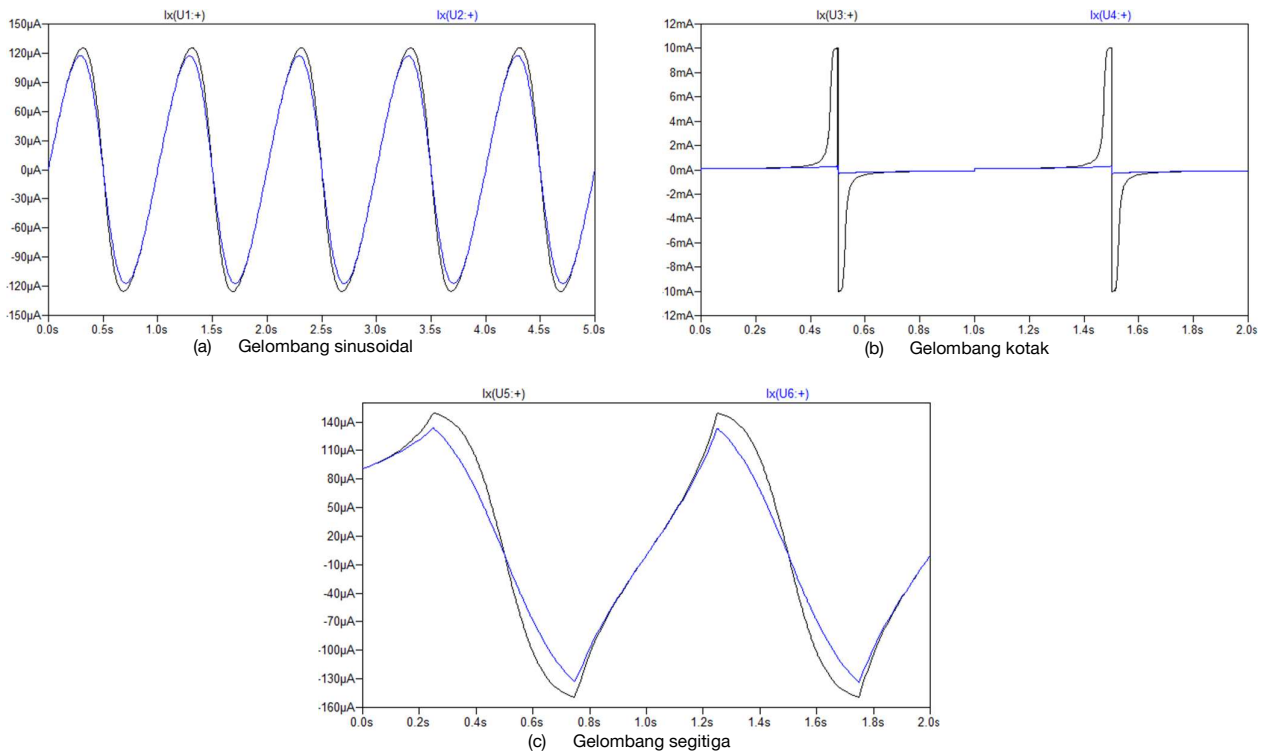
Salah satu metode yang sering digunakan dalam analisis data adalah statistik deskriptif, metode inilah yang digunakan pada penelitian ini. Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan dan merangkum data dalam bentuk yang mudah dipahami, tanpa membuat inferensi atau generalisasi lebih lanjut tentang populasi yang lebih luas. Penggunaan statistik deskriptif dalam analisis data memiliki tujuan utama untuk memberikan gambaran umum tentang karakteristik dasar suatu *dataset*, serta mempermudah pengambilan keputusan berdasarkan data yang tersedia. Beberapa ukuran yang umum digunakan dalam statistik deskriptif meliputi rata-rata (*mean*), median, modus, simpangan baku (*standard deviation*), varians, rentang (*range*), dan kuartil. Statistik deskriptif ini memberikan gambaran yang jelas mengenai data yang diteliti, yang sangat berguna untuk memberikan konteks terhadap variabel yang ada dalam penelitian.

Langkah pertama dalam analisis deskriptif adalah pengumpulan dan pemeriksaan data mentah. Setelah data terkumpul, langkah berikutnya adalah menghitung ukuran pusat, seperti rata-rata atau median, untuk memahami kecenderungan data secara umum. Peneliti juga akan menghitung ukuran penyebaran, seperti simpangan baku dan rentang, untuk menilai seberapa tersebar data tersebut. Salah satu kelebihan utama dari statistik deskriptif adalah kemudahannya dalam memberikan gambaran yang jelas dan sederhana mengenai dataset tanpa perlu melakukan analisis yang lebih kompleks. Ini sangat bermanfaat ketika peneliti ingin mendapatkan pemahaman awal tentang karakteristik data atau ketika data terlalu besar untuk dianalisis secara manual. Statistik deskriptif juga memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi tren dan pola dalam data yang dapat memberikan wawasan lebih lanjut dalam perencanaan penelitian atau pengambilan keputusan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. PENGUJIAN ARUS

Pada pengujian ini dilakukan perbandingan hasil keluaran berupa arus pada model Joglekar dan Biolek dengan sinyal input yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan simulasi LTspice dan dari data hasil keluaran kemudian disimpan dalam bentuk dot txt yang nantinya akan diolah dengan menggunakan perangkat lunak OriginPro 2021.



Gambar 5 Grafik arus terhadap waktu model Joglekar dan Biolek

Dari ketiga grafik diatas yang dikonversi kedalam bentuk file teks, kemudian file tersebut diolah dengan menggunakan OriginPro 2021, berikut hasil data kompilasinya dinyatakan dengan Tabel I.

TABEL I
NILAI ARUS MODEL JOGLEKAR DAN BIOLEK

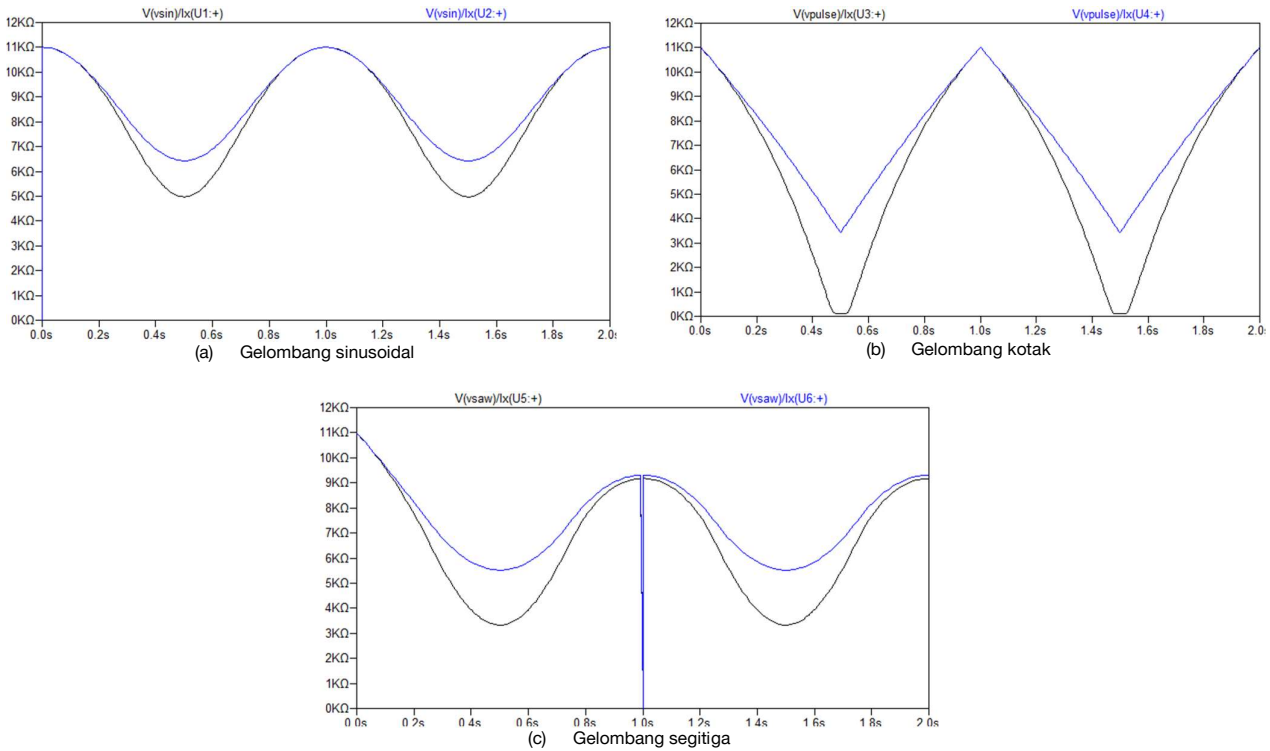
| Statistik deskriptif | Gelombang sinus | | Gelombang kotak | | Gelombang segitiga | |
|----------------------|-----------------|--------------|-----------------|-------------|--------------------|-------------|
| | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek |
| Mean | -3,89109E-7 | -3,10285E-7 | -7,17424E-5 | 2,15204E-7 | 3,83763E-6 | 3,65092E-6 |
| Standard deviation | 7,7051E-5 | 6,7475E-5 | 0,00377 | 2,07943E-4 | 8,41629E-5 | 6,56786E-5 |
| Variance | 5,93685E-9 | 4,55288E-9 | 1,42376E-5 | 4,32404E-8 | 7,08339E-9 | 4,31367E-9 |
| Sum | -5,47476E-4 | -4,36571E-4 | -0,04211 | 1,26325E-4 | 0,00225 | 0,00214 |
| Minimum | -1,25635E-4 | -1,17446E-4 | -0,01 | -2,93111E-4 | -1,49521E-4 | -1,33604E-4 |
| Median | -2,526E-13 | -1,95519E-13 | 9,09091E-5 | 9,09091E-5 | 4,36032E-14 | 4,29732E-14 |
| Maximum | 1,25632E-4 | 1,17446E-4 | 0,01001 | 2,93111E-4 | 1,49614E-4 | 1,33467E-4 |
| Range | 2,51267E-4 | 2,34892E-4 | 0,02001 | 5,86221E-4 | 2,99135E-4 | 2,67071E-4 |

Analisis statistik deskriptif terhadap nilai arus untuk model Joglekar dan Biolek pada variasi sinyal input diperoleh nilai rata-rata (*mean*) menunjukkan bahwa model Joglekar menghasilkan nilai yang lebih negatif pada gelombang sinus dan kotak dibandingkan dengan Biolek, sedangkan untuk gelombang segitiga diperoleh nilai rata-rata arus kedua model hampir serupa. Simpangan baku (*standard deviation*) mengukur variasi atau penyebaran nilai-nilai untuk gelombang kotak menunjukkan variasi yang lebih besar pada model Joglekar, dengan simpangan baku 0.00377, sedangkan Biolek memiliki nilai yang lebih kecil (2.07943E-4) dan untuk gelombang sinus dan segitiga, simpangan baku kedua model cukup dekat. Varians menunjukkan sejauh mana data tersebar, dimana varians gelombang kotak pada model Joglekar sangat besar dibandingkan dengan Biolek, yang menunjukkan penyebaran yang lebih tinggi pada Joglekar. Median memberikan informasi tentang posisi tengah dari dataset dimana gelombang sinus, median sangat kecil (hampir 0) untuk kedua model, yang menunjukkan distribusi yang simetris. Rentang (*range*) menunjukkan perbedaan antara nilai maksimum dan minimum, gelombang kotak untuk Joglekar menunjukkan rentang yang jauh lebih besar (0.02001) dibandingkan dengan Biolek, yang menunjukkan fluktuasi besar dalam respons.

Analisis statistik deskriptif pada Tabel I ini menunjukkan perbedaan karakteristik antara model Joglekar dan Biolek dalam merespons berbagai jenis sinyal (sinus, kotak, dan segitiga). Model Joglekar cenderung memiliki variasi yang lebih besar pada beberapa parameter (seperti rentang dan simpangan baku) dibandingkan dengan Biolek, yang menunjukkan kestabilan lebih dalam responsnya pada sinyal tertentu.

B. PENGUJIAN RESISTANSI

Pada pengujian ini dilakukan perbandingan hasil keluaran berupa resistansi pada model Joglekar dan Biolek dengan sinyal input yang berbeda.



Gambar 6 Grafik resistansi terhadap waktu model Joglekar dan Biolek

Dari ketiga grafik diatas yang dikonversi kedalam bentuk file teks, kemudian file tersebut diolah dengan menggunakan OriginPro 2021, berikut hasil data kompilasinya dinyatakan dengan Tabel II.

TABEL II
NILAI RESISTANSI MODEL JOGLEKAR DAN BIOLEK

| Statistik deskriptif | Gelombang sinus | | Gelombang kotak | | Gelombang segitiga | |
|----------------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|--------------------|---------------|
| | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek |
| Mean | 6447,45683 | 7437,06376 | 3099,72393 | 5544,66572 | 4713,97256 | 6358,58539 |
| Standard deviation | 1958,19638 | 1458,13245 | 3294,23291 | 2034,44882 | 1990,43617 | 1305,93642 |
| Variance | 3834533,05663 | 2126150,23573 | 1,0852E7 | 4138982,0123 | 3961836,15468 | 1705469,94247 |
| Sum | 3784657,158 | 4365556,426 | 1819537,94759 | 3254718,78 | 2767101,891 | 3732489,622 |
| Minimum | 0 | 0 | 99,92642 | 3411,682 | 0 | 0 |
| Median | 5500,188 | 6737,459 | 1889,317 | 4783,778 | 3721,073 | 5727,228 |
| Maximum | 11000,01 | 11000,01 | 11012,43 | 11013,02 | 11000 | 11000 |
| Range | 11000,01 | 11000,01 | 10912,50358 | 7601,338 | 11000 | 11000 |

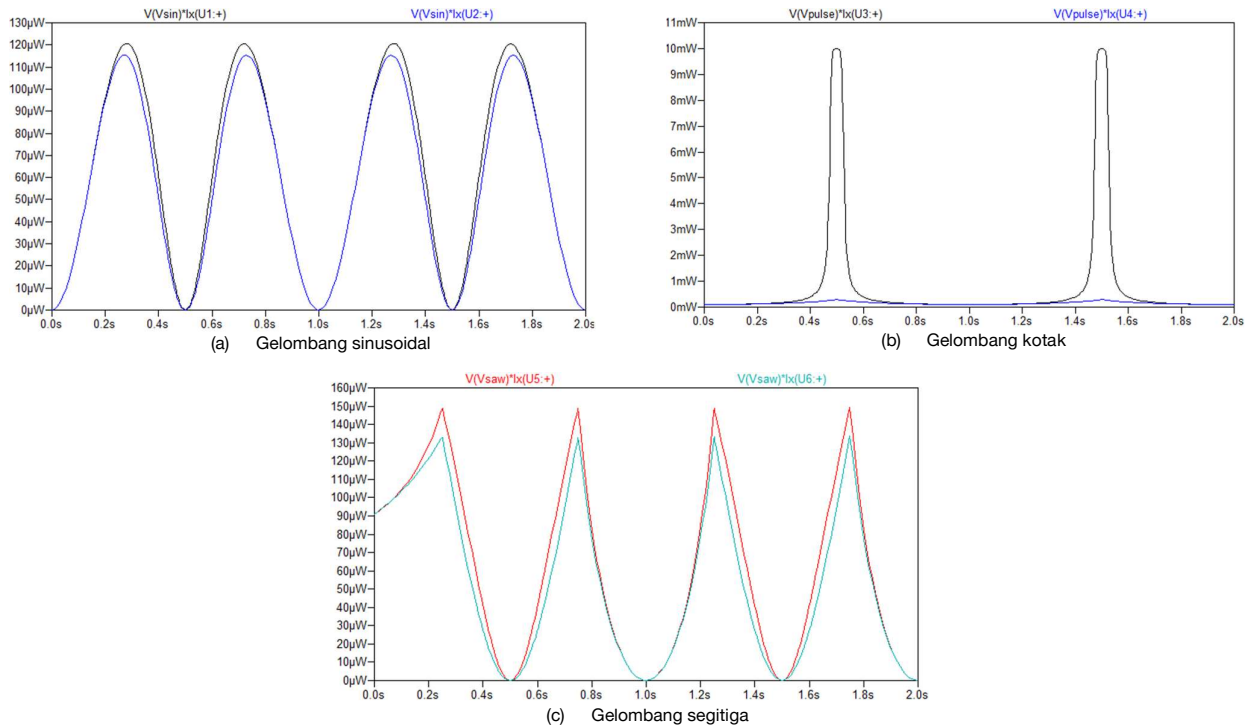
Nilai rata-rata (*mean*) resistansi pada gelombang sinus lebih tinggi untuk model Biolek dibandingkan Joglekar sedangkan untuk gelombang kotak dan segitiga, model Biolek cenderung menunjukkan nilai rata-rata resistansi yang lebih besar daripada Joglekar. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan karakteristik pada respons kedua model tersebut terhadap jenis sinyal input yang diberikan. Simpangan baku (*standard deviation*) pada model Joglekar lebih tinggi dibandingkan dengan Biolek di semua jenis gelombang. Hal ini menunjukkan bahwa resistansi pada model Joglekar memiliki variasi yang lebih besar, baik pada gelombang sinus, kotak, maupun segitiga, dibandingkan dengan model Biolek. Varians yang lebih tinggi pada Joglekar dibandingkan dengan Biolek menunjukkan bahwa penyebaran resistansi pada model Joglekar lebih besar, yang mengindikasikan ketidakstabilan atau fluktuasi yang lebih tinggi dalam respons terhadap sinyal input pada gelombang sinus, kotak, dan segitiga. Median menunjukkan posisi tengah dari data resistansi. Gelombang sinus menunjukkan perbedaan median yang signifikan antara Joglekar dan Biolek, dengan model Biolek memiliki median yang lebih tinggi. Pada gelombang kotak dan segitiga, perbedaan median ini juga terlihat, menunjukkan bahwa model Biolek memiliki kecenderungan nilai resistansi yang lebih besar di tengah-tengah distribusi. Rentang

(range) pada gelombang sinus dan segitiga identik untuk kedua model, yaitu 11000, yang menunjukkan fluktuasi resistansi yang serupa pada kedua model tersebut. Namun, pada gelombang kotak, model Joglekar menunjukkan rentang yang lebih besar (11012,43) dibandingkan dengan model Biolek (10912,50358), yang menunjukkan variasi yang lebih tinggi dalam respons Joglekar.

Dari analisis statistik deskriptif pada tabel ini, dapat disimpulkan bahwa model Joglekar memiliki variasi dan fluktuasi yang lebih besar pada semua jenis gelombang dibandingkan dengan Biolek. Hal ini tercermin dalam nilai simpangan baku dan varians yang lebih tinggi pada Joglekar. Di sisi lain, model Biolek cenderung memiliki nilai rata-rata, median, dan jumlah resistansi yang lebih tinggi pada gelombang sinus dan segitiga, yang menunjukkan kestabilan lebih besar dalam respons terhadap variasi sinyal input.

C. PENGUJIAN DAYA

Pada pengujian ini dilakukan perbandingan hasil keluaran berupa daya pada model Joglekar dan Biolek dengan sinyal input yang berbeda.



Gambar 7 Grafik daya terhadap waktu model Joglekar dan Biolek

Dari ketiga grafik diatas yang dikonversi kedalam bentuk file teks, kemudian file tersebut diolah dengan menggunakan OriginPro 2021, berikut hasil data kompilasinya dinyatakan dengan Tabel III.

TABEL III
NILAI DAYA MODEL JOGLEKAR DAN BIOLEK

| Statistik deskriptif | Gelombang sinus | | Gelombang kotak | | Gelombang segitiga | |
|----------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|--------------------|------------|
| | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek |
| Mean | 4,16675E-5 | 3,73479E-5 | 0,00214 | 2,0007E-4 | 3,74142E-5 | 3,03219E-5 |
| Standard deviation | 3,81408E-5 | 3,62818E-5 | 0,00311 | 5,6074E-5 | 4,25533E-5 | 3,84782E-5 |
| Variance | 1,45472E-9 | 1,31637E-9 | 9,65204E-6 | 3,14429E-9 | 1,81079E-9 | 1,48057E-9 |
| Sum | 0,02446 | 0,02192 | 1,25663 | 0,11744 | 0,02196 | 0,0178 |
| Minimum | 0 | 0 | 9,08065E-5 | 9,08016E-5 | 0 | 0 |
| Median | 3,00716E-5 | 2,48931E-5 | 5,29292E-4 | 2,0904E-4 | 2,07555E-5 | 1,37954E-5 |
| Maximum | 1,20664E-4 | 1,15328E-4 | 0,01001 | 2,93111E-4 | 1,49448E-4 | 1,49448E-4 |
| Range | 1,20664E-4 | 1,15328E-4 | 0,00992 | 2,02309E-4 | 1,33548E-4 | 1,33548E-4 |

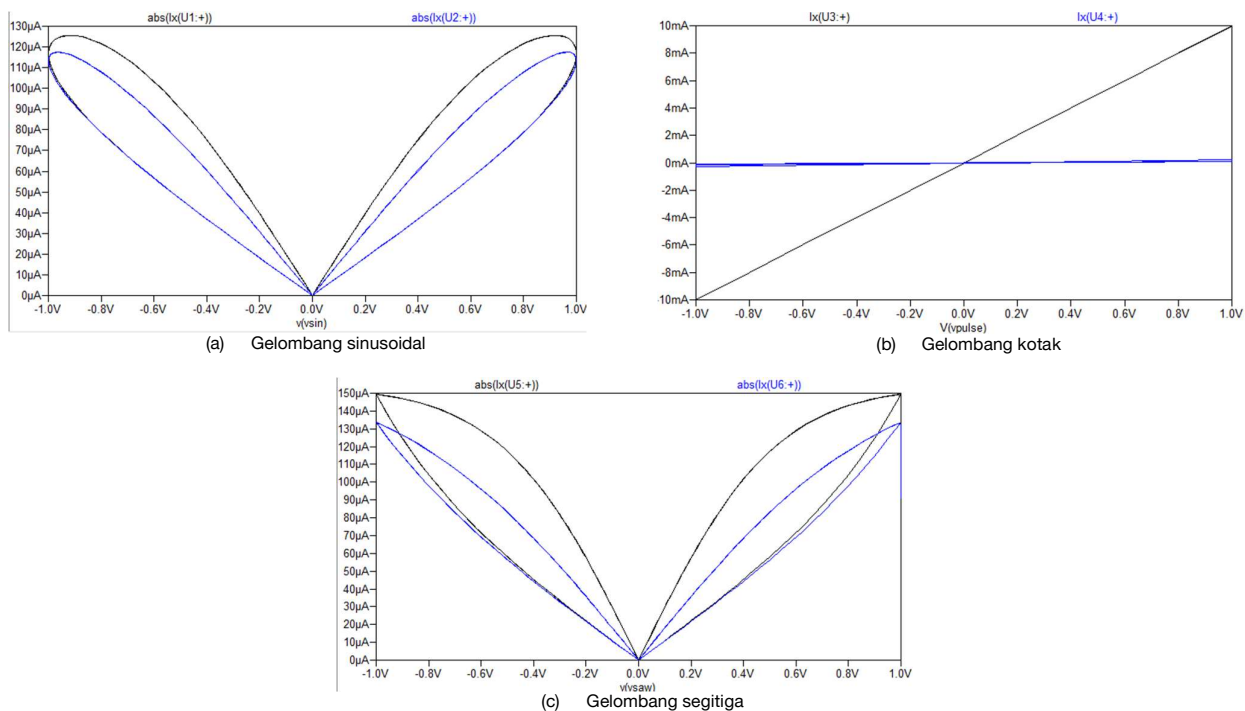
Nilai rata-rata (*mean*) daya pada model Joglekar sedikit lebih tinggi pada gelombang sinus dan segitiga dibandingkan dengan Biolek. Namun, pada gelombang kotak, Joglekar memiliki nilai rata-rata daya yang lebih tinggi secara signifikan daripada Biolek. Perbedaan ini menunjukkan bahwa respons daya pada model Joglekar lebih besar pada beberapa jenis gelombang, terutama pada gelombang kotak. Simpangan baku menunjukkan seberapa besar variasi atau fluktuasi nilai daya dalam dataset. Pada gelombang sinus dan segitiga, nilai simpangan baku (*standard deviation*) antara Joglekar dan Biolek cukup dekat, yang menunjukkan distribusi daya yang hampir serupa. Namun, pada gelombang kotak, Joglekar memiliki simpangan baku yang jauh lebih besar (0,00311) dibandingkan dengan Biolek (5,6074E-5), yang menunjukkan fluktuasi daya yang lebih besar pada model Joglekar. Varians

menunjukkan seberapa besar penyebaran daya pada dataset. Pada gelombang sinus dan segitiga, varians antara Joglekar dan Biolek hampir serupa. Namun, pada gelombang kotak, Joglekar memiliki varians yang sangat besar ($9,65204E-6$), sementara Biolek jauh lebih kecil ($3,14429E-9$), menunjukkan fluktuasi yang jauh lebih tinggi pada model Joglekar untuk gelombang kotak. Median memberikan informasi tentang nilai tengah dari daya yang dihasilkan. Pada gelombang sinus dan segitiga, median untuk model Joglekar lebih tinggi daripada Biolek, yang menunjukkan bahwa sebagian besar data daya pada Joglekar terdistribusi lebih tinggi. Pada gelombang kotak, median untuk model Joglekar jauh lebih tinggi daripada Biolek, yang menunjukkan bahwa model Joglekar cenderung menghasilkan daya yang lebih tinggi di tengah distribusi. Rentang (*range*) menunjukkan perbedaan antara nilai maksimum dan minimum. Gelombang kotak menunjukkan rentang yang sangat besar pada model Joglekar ($0,01001$) dibandingkan dengan Biolek ($0,00091$), yang menunjukkan fluktuasi daya yang lebih besar pada Joglekar. Sedangkan pada gelombang sinus dan segitiga, rentang daya antara kedua model hampir serupa.

Dari analisis statistik deskriptif ini, dapat disimpulkan bahwa model Joglekar memiliki fluktuasi daya yang lebih besar dibandingkan dengan Biolek, terutama pada gelombang kotak. Model Joglekar cenderung menghasilkan daya yang lebih tinggi dan memiliki variasi yang lebih besar dalam respons terhadap sinyal input, sedangkan model Biolek menunjukkan daya yang lebih konsisten dan stabil di semua jenis gelombang.

D. PENGUJIAN ARUS TERHADAP TEGANGAN

Pada pengujian ini dilakukan perbandingan hasil keluaran berupa arus terhadap tegangan pada model Joglekar dan Biolek dengan sinyal input yang berbeda.



Gambar 8 Grafik arus terhadap tegangan input model Joglekar dan Biolek

Dari ketiga grafik diatas yang dikonversi kedalam bentuk file teks, kemudian file tersebut diolah dengan menggunakan OriginPro 2021, berikut hasil data kompilasinya dinyatakan dengan Tabel IV.

TABEL IV
KURVA I TERHADAP V MODEL JOGLEKAR DAN BIOLEK

| Statistik deskriptif | Gelombang sinus | | Gelombang kotak | | Gelombang segitiga | |
|----------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|--------------------|-------------|
| | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek | Joglekar | Biolek |
| Mean | 1,22233E-6 | 1,17436E-6 | -7,17424E-5 | 2,15204E-7 | 3,83763E-6 | 3,65092E-6 |
| Standard deviation | 7,8432E-5 | 6,92637E-5 | 0,00377 | 2,07943E-4 | 8,41629E-5 | 6,56786E-5 |
| Variance | 6,15158E-9 | 4,79746E-9 | 1,42376E-5 | 4,32404E-8 | 7,08339E-9 | 4,31367E-9 |
| Sum | 7,1751E-4 | 6,89349E-4 | -0,04211 | 1,26325E-4 | 0,00225 | 0,00214 |
| Minimum | -1,25635E-4 | -1,17443E-4 | -0,01 | -2,93111E-4 | -1,49521E-4 | -1,33604E-4 |
| Median | 0 | 0 | 9,09091E-5 | 9,09091E-5 | 4,36032E-14 | 4,29732E-14 |
| Maximum | 1,25621E-4 | 1,17419E-4 | 0,01001 | 2,93111E-4 | 1,49614E-4 | 1,33467E-4 |
| Range | 2,51256E-4 | 2,34861E-4 | 0,02001 | 5,86221E-4 | 2,99135E-4 | 2,67071E-4 |

Nilai rata-rata (*mean*) untuk gelombang sinus menunjukkan perbedaan yang sangat kecil antara Joglekar dan Biolek, dengan Joglekar sedikit lebih tinggi. Pada gelombang kotak, Joglekar menunjukkan nilai rata-rata yang jauh lebih rendah (-7,17424E-5) dibandingkan Biolek (2,15204E-7), sementara pada gelombang segitiga, kedua model menunjukkan nilai rata-rata yang sangat dekat satu sama lain. Simpangan baku (*standard deviation*) pada model Joglekar lebih tinggi dibandingkan dengan Biolek pada gelombang sinus dan segitiga, yang menunjukkan bahwa daya fluktuasi model Joglekar lebih besar. Pada gelombang kotak, simpangan baku untuk Joglekar jauh lebih besar (0,00377) dibandingkan dengan Biolek (2,07943E-4), menunjukkan variasi yang lebih tinggi pada model Joglekar. Varians menunjukkan penyebaran data. Pada gelombang sinus dan segitiga, varians antara kedua model hampir serupa, meskipun Joglekar sedikit lebih tinggi. Namun, pada gelombang kotak, Joglekar memiliki varians yang sangat besar (1,42376E-5), yang menunjukkan fluktuasi daya yang lebih besar dibandingkan dengan Biolek (4,32404E-8). Median menunjukkan posisi tengah dari daya yang dihasilkan. Pada gelombang sinus dan segitiga, nilai median adalah 0 untuk kedua model, menunjukkan bahwa sebagian besar daya terdistribusi secara simetris di sekitar nilai nol. Pada gelombang kotak, median menunjukkan nilai yang sama antara kedua model, yang menunjukkan bahwa data daya terdistribusi serupa. Rentang (*range*) menunjukkan perbedaan antara nilai maksimum dan minimum. Gelombang kotak menunjukkan rentang yang sangat besar pada model Joglekar (0,02001), sementara Biolek memiliki rentang yang jauh lebih kecil (5,86221E-4), yang menunjukkan fluktuasi daya yang jauh lebih besar pada Joglekar. Pada gelombang sinus dan segitiga, rentang daya antara kedua model hampir serupa.

Dari analisis statistik deskriptif ini, dapat disimpulkan bahwa model Joglekar cenderung memiliki variasi daya yang lebih besar dibandingkan dengan Biolek, terutama pada gelombang kotak. Model Joglekar menunjukkan nilai rata-rata, simpangan baku, varians, dan rentang yang lebih besar pada beberapa jenis gelombang, yang mencerminkan fluktuasi daya yang lebih tinggi. Sebaliknya, model Biolek menunjukkan kestabilan yang lebih tinggi, dengan nilai daya yang lebih konsisten di semua jenis gelombang.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi respons memristor model Joglekar dan Biolek terhadap variasi sinyal input menggunakan simulasi LTspice. Hasil analisis menunjukkan bahwa model Joglekar memiliki fluktuasi yang lebih besar pada semua jenis gelombang (sinus, kotak, segitiga) dibandingkan Biolek, dengan variasi arus, resistansi, dan daya yang lebih tinggi. Pada gelombang kotak, perbedaan fluktuasi sangat mencolok, dengan Joglekar menunjukkan variasi yang lebih besar dimana pada pengujian arus perbandingan simpangan baku (*standard deviation*) kurang lebih 18 kali dan pengujian daya hampir 55 kali dari Biolek. Sementara itu, model Biolek menunjukkan respons yang lebih stabil dan konsisten, dengan nilai rata-rata, median, dan jumlah daya yang lebih tinggi pada gelombang sinus dan segitiga. Meskipun Joglekar lebih sensitif terhadap variasi sinyal, model Biolek lebih stabil dalam respons terhadap input. Kedua model memiliki kelebihan dan kekurangan tergantung pada jenis sinyal dan kebutuhan aplikasi, memberikan wawasan untuk pengembangan lebih lanjut dalam teknologi memristor.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan pada penelitian dan hasil-hasilnya.

REFERENSI

- [1] W. M. I. Wan Zain et al., "Simulation study of memristor aided logic (Magic) based on cmos nor gate," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 9, no. 5, pp. 2134–2140, 2020, doi: 10.11591/eei.v9i5.2367.
- [2] H. Cao and F. Wang, "An Overview of Complex Instability Behaviors Induced by Nonlinearity of Power Electronic Systems with Memristive Load," *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2528, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16062528.
- [3] L. Gao, Q. Ren, J. Sun, S.-T. Han, and Y. Zhou, "Memristor modeling: challenges in theories, simulations, and device variability," *J. Mater. Chem. C*, vol. 9, no. 47, pp. 16859–16884, 2021, doi: 10.1039/D1TC04201G.
- [4] V. Mladenov, "A unified and open ltspice memristor model library," *Electron.*, vol. 10, no. 13, 2021, doi: 10.3390/electronics10131594.
- [5] K. Yang, J. Joshua Yang, R. Huang, and Y. Yang, "Nonlinearity in Memristors for Neuromorphic Dynamic Systems," *Small Sci.*, vol. 2, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.1002/ssmc.202100049.
- [6] E. B. Solovyeva and V. A. Azarov, "Comparative Analysis of Memristor Models with a Window Function Described in LTspice," in 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), IEEE, Jan. 2021, pp. 1097–1101. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396217.
- [7] A. P. James, Y. Tolegen, and A. Nandakumar, "Notice of Retraction: Frequency Analysis of Memristor Based Low Pass Bessel Filter," in 2018 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet), IEEE, Aug. 2018, pp. 185–189. doi: 10.1109/CoCoNet.2018.8476879.
- [8] V. Mladenov, "Application and Analysis of Modified Metal-Oxide Memristor Models in Electronic Devices," *Technologies*, vol. 11, no. 1, p. 20, Jan. 2023, doi: 10.3390/technologies11010020.
- [9] K. Soni. and S. Sahoo, "A Review On Different Memristor Modeling And Applications," in 2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON), IEEE, Mar. 2022, pp. 688–695. doi: 10.1109/MECON53876.2022.9752214.
- [10] F. Corinto, A. Ascoli, and M. Gilli, "Analysis of current–voltage characteristics for memristive elements in pattern recognition systems," *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 40, no. 12, pp. 1277–1320, Dec. 2012, doi: 10.1002/cta.1804.
- [11] D. Biolek, M. Di Ventra, Y. V Pershin, and S. Member, "Reliable SPICE Simulations of Memristors, Memcapacitors and Meminductors," *Radioengineering*, vol. 22, no. 4, pp. 945–968, 2013, doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.1307.2717.
- [12] D. Biolek, Z. Kolka, V. Biolková, Z. Biolek, M. Potrebić, and D. Tošić, "Modeling and simulation of large memristive networks," *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 46, no. 1, pp. 50–65, Jan. 2018, doi: 10.1002/cta.2327.
- [13] V. Mladenov, "A Unified and Open LTSPICE Memristor Model Library," *Electronics*, vol. 10, no. 13, p. 1594, Jul. 2021, doi: 10.3390/electronics10131594.
- [14] Y. N. Joglekar and S. J. Wolf, "The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits," *Eur. J. Phys.*, vol. 30, no. 4, pp. 661–675, 2009, doi: 10.1088/0143-0807/30/4/001.
- [15] J. Yu, X. Mu, X. Xi, and S. Wang, "A memristor model with piecewise window function," *Radioengineering*, vol. 22, no. 4, pp. 969–974, 2013.
- [16] S. Kim et al., "Overshoot-Suppressed Memristor Crossbar Array with High Yield by AlO_x Oxidation for Neuromorphic System," *Adv. Mater.*

- Technol., vol. 9, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.1002/admt.202400063.
- [17] T. Molter, "The Joglekar Resistance Switch Memristor Model in LTspice." [Online]. Available: <https://knowm.org/the-joglekar-resistance-switch-memristor-model-in-ltspice/>
- [18] L. Zhou, Z. You, X. Liang, and X. Li, "A Memristor-Based Colpitts Oscillator Circuit," *Mathematics*, vol. 10, no. 24, pp. 29–32, 2022, doi: 10.3390/math10244820.
- [19] A. Ascoli, F. Corinto, V. Senger, and R. Tetzlaff, "Memristor model comparison," *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 89–105, 2013, doi: 10.1109/MCAS.2013.2256272.
- [20] E. B. Solovyeva and V. A. Azarov, "Comparative Analysis of Memristor Models with a Window Function Described in LTspice," in 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), IEEE, Jan. 2021, pp. 1097–1101. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396217.
- [21] D. Biolek and V. Biolková, "SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift," *Radioengineering*, vol. 18, no. 2, pp. 210–214, 2009.
- [22] V. Mladenov and S. Kirilov, "A Simplified Tantalum Oxide Memristor Model, Parameters Estimation and Application in Memory Crossbars," *Technologies*, vol. 10, no. 1, p. 6, Jan. 2022, doi: 10.3390/technologies10010006.