Vol 8 No 1 Tahun 2026 E-ISSN: 2715-9469

ANALISIS TOPOLOGI RANGKAIAN SERI-PARALEL BERBASIS SIMULASI MULTISIM UNTUK EVALUASI DISTRIBUSI ARUS DAN TEGANGAN

Nurhafiz Ahmad Rangkuti[1], M. Ari Fahril[2]
[1]Program Studi Teknik Informatika, Institut Teknologi dan Bisnis Indonessia, Indonesia
[2]Program Studi Geofisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra, Indonesia
(Received: April 2026 / Revised: April 2026 / Accepted: April 2026)
[1]Email : nurhafiz26ahmadrangkuti@gmail.com*

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis distribusi arus dan tegangan pada rangkaian seri paralel menggunakan simulasi NI Multisim. Penelitian bertujuan mengevaluasi kesesuaian hasil simulasi dengan teori rangkaian listrik dasar melalui pengujian berulang. Metode yang digunakan adalah simulasi eksperimental dengan variasi nilai resistansi pada sumber tegangan tetap 12 volt. Sebanyak 20 skenario rangkaian diuji untuk memperoleh pola distribusi listrik. Hasil menunjukkan bahwa arus berbanding terbalik terhadap resistansi total, sedangkan tegangan pada rangkaian seri terbagi proporsional terhadap hambatan. Deviasi antara hasil teori dan simulasi sangat kecil sehingga menunjukkan bahwa Multisim mampu merepresentasikan perilaku rangkaian listrik secara akurat. Penelitian ini memperkuat penggunaan simulasi digital sebagai alat analisis teknik dan media pembelajaran elektronika..
Kata Kunci: *rangkaian seri-paralel, Multisim, distribusi arus, distribusi tegangan, simulasi rangkaian.*

1. PENDAHULUAN

Analisis rangkaian listrik merupakan kompetensi fundamental dalam bidang teknik elektro dan elektronika. Pemahaman mengenai distribusi arus dan tegangan pada rangkaian seri dan paralel menjadi dasar dalam perancangan sistem elektornik yang lebih komplek. Kesalahan analisis pada tahap dasar dapat berdampak pada ketidak tepatan desain sistem lanjutan, terutama pada rangkaian analog maupun digital[1].

Pada praktik konvensional, pengujian rangkaian dilakukan menggunakan alat ukur fisik seperti multimeter dan osiloskop. Metode ini memilki keterbatasan, antara lain toleransi komponen, kesalahan pembacaan, serta risiko kerusakan perangkat akibat kesalahan perakitan [2]. Selain itu, keterbatasan laboratorium sering menjadi kendala dalam proses pembelajaran dan penelitian eksperimental.

Perkembangan perangkat lunak simulasi berbasis SPICE memberikan solusi alternatif untuk analisis rangkaian secara numerik dan visual. NI Multisim merupakan salah satu platform simulasi yang banyak digunakan dalam pendidikan dan penelitian teknik elektro karena mampu memodelkan perilaku rangkaian listrik secara presisi dan real time [3]. Lingkungan simulasi ini memungkinkan analisis distribusi arus, tegangan, dan daya tanpa risiko kerusakan komponen fisik.

Beberapa penelitian sebelumnya melaporkan bahwa penggunaan simulasi komputer dalam pembelajaran rangkaian listrik mampu meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa serta menghasilkan data yang konsisten dengan perhitungan teoritis [4], [5]. Pendekatan ini telah banyak digunakan sebagai alternatif laboratorium fisik karena mampu meminimalkan kesalahan pengukuran dan meningkatkan efisiensi eksperimen. Selain itu, studi lain menunjukkan bahwa model berbasis SPICE memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam analisis rangkaian resistif tegangan rendah, khususnya pada kondisi keadaan tunak (steady-state) [6]. Temuan tersebut menegaskan bahwa simulasi digital tidak hanya berfungsi sebagai media pembelajaran, tetapi juga sebagai alat analisis numerik yang valid.

Namun demikian, kajian yang ada masih didominasi oleh penggunaan simulasi untuk tujuan pembelajaran atau validasi sederhana terhadap hukum dasar rangkaian. Penelitian yang secara khusus mengkaji distribusi arus dan tegangan pada topologi rangkaian seri–paralel melalui pendekatan simulasi yang sistematis, terstruktur, dan berbasis pengujian berulang masih terbatas. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan analisis kuantitatif antara hasil simulasi dan model matematis secara langsung untuk mengevaluasi tingkat deviasi dan konsistensi hasil.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menempatkan dirinya sebagai upaya untuk memperkuat kajian analisis rangkaian listrik melalui pendekatan simulasi yang lebih komprehensif. State of the art penelitian ini terletak pada penerapan simulasi Multisim berbasis SPICE untuk mengevaluasi distribusi arus dan tegangan pada rangkaian seri–paralel melalui serangkaian pengujian berulang dengan variasi parameter resistansi. Pendekatan ini memungkinkan analisis tidak hanya bersifat kualitatif, tetapi juga kuantitatif dengan pengukuran tingkat kesesuaian terhadap teori.

Secara ilmiah, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik distribusi arus dan tegangan pada topologi rangkaian seri–paralel berbasis simulasi Multisim, serta mengevaluasi tingkat kesesuaian hasil simulasi dengan model matematis yang didasarkan pada hukum Ohm dan hukum Kirchhoff. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengukur tingkat akurasi simulasi melalui perbandingan kuantitatif antara hasil teoritis dan hasil simulasi, serta menguji konsistensi hasil melalui pengulangan eksperimen dalam berbagai konfigurasi rangkaian. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam penguatan metode analisis rangkaian listrik berbasis simulasi serta pengembangan pendekatan praktikum virtual yang lebih terstandarisasi.

2. METODE PENELITIAN

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi eksperimental untuk menganalisis distribusi arus dan tegangan pada topologi rangkaian seri–paralel. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengamatan parameter listrik secara terkontrol dan berulang tanpa dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti toleransi komponen fisik, noise lingkungan, maupun kesalahan instrumentasi.

Eksperimen dilakukan menggunakan perangkat lunak NI Multisim yang berbasis mesin komputasi SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Platform ini digunakan karena memiliki kemampuan untuk memodelkan perilaku rangkaian listrik secara numerik dengan tingkat presisi tinggi, khususnya pada analisis rangkaian resistif dalam kondisi arus searah (DC steady-state). Dengan menggunakan model komponen ideal, simulasi difokuskan pada validasi hubungan matematis antara variabel listrik tanpa gangguan faktor non-ideal.

Rangkaian yang diuji terdiri atas satu resistor yang disusun secara seri (R1) dan dua resistor yang disusun paralel (R2 dan R3). Konfigurasi ini dipilih karena merepresentasikan bentuk dasar topologi rangkaian campuran yang banyak digunakan dalam sistem elektronika. Sumber tegangan DC sebesar 12 V digunakan sebagai input tetap untuk seluruh skenario pengujian, sehingga variasi yang diamati hanya berasal dari perubahan nilai resistansi.

Eksperimen dilakukan melalui serangkaian pengujian berulang dengan variasi nilai resistor dalam rentang 100 Ω hingga 470 Ω. Pada setiap skenario, nilai hambatan ekuivalen dihitung secara teoritis, kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi. Parameter utama yang diukur meliputi arus total rangkaian, tegangan pada cabang paralel, serta distribusi arus pada masing-masing cabang. Pengukuran dilakukan menggunakan instrumen virtual yang tersedia dalam Multisim, seperti multimeter digital dan probe tegangan, yang mampu memberikan hasil pembacaan secara langsung pada node tertentu.

Setiap konfigurasi diuji dalam kondisi steady-state menggunakan analisis DC Operating Point. Metode ini memastikan bahwa nilai arus dan tegangan yang diperoleh merupakan kondisi stabil setelah transien sistem diabaikan. Data hasil simulasi kemudian direkam dan disusun dalam bentuk tabel untuk dianalisis lebih lanjut.

Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap perhitungan teoritis yang didasarkan pada hukum Ohm dan hukum Kirchhoff. Selain itu, dilakukan evaluasi kuantitatif terhadap tingkat kesesuaian melalui perhitungan persentase deviasi. Pendekatan ini bertujuan untuk menilai tingkat akurasi model simulasi serta konsistensi hasil pada berbagai konfigurasi rangkaian.

Dengan pendekatan ini, eksperimen tidak hanya berfungsi untuk mengamati fenomena distribusi arus dan tegangan, tetapi juga untuk memvalidasi kesesuaian antara model matematis dan hasil simulasi secara sistematis. Selain itu, penggunaan simulasi berbasis SPICE memungkinkan reproduksibilitas tinggi, sehingga metode yang digunakan dalam penelitian ini dapat dengan mudah diulang oleh peneliti lain dengan kondisi yang sama.

B. Preparasi Sistem Simulasi

1. Spesifikasi Perangkat Lunak

   Simulasi dilakukan menggunakan Ni Multisim yang mendukung mesin komputasi SPICE. Pengaturan simulasi menggunakan mode DC Operating Point Analysis untuk memperoleh nilai arus dan tegangan keadaan tunak. Parameter umum simulasi ditetapkan sebagai berikut:

   - Sumber tegangan DC : 12 V
   - Tipe komponen resistor ideal
   - Toleransi resistor 0 % untuk menghilangkan error manufaktur
   - Mode analisis DC steady state
   - Suhu simulasi default perangkat lunak (27℃)

   Penggunaan model resistor ideal mengikuti pendekatan standar dalam analisis rangkaian dasar sebagaimana dijelaskan dalam literatur teori rangkaian [1], [2.

2. **Preparasi Topologi Rangkaian**

   - R1 sebagai resistor seri
   - R2 dan R3 sebagai resistor paralel

   Langkah preparasi :

   a. Membuka workspace baru pada Multisim
   b. Memilih komponen DC voltage source dari library
   c. Menambahkan tiga resistor dari library komponen dasar
   d. Menghubungkan R1 secara seri dengan kombinasi paralel R2 dan R3

e. Menghubungkan terminal negatif ke ground sebagai referensi potensial nol
f. Memasang multimeter virtual pada jalur arus total dan pada cabang paralel untuk mengukur tegangan node

Konfigurasi ini memastikan rangkaian membentuk satu loop utama dengan satu titik percabangan paralel.

C. Prosedur Eksperimental

Penelitian dilakukan melalui 20 uji variasi nilai resistansi.
Langkah operasional :

a. Menetapkan sumber tegangan konstan 12 V
b. Menentukan kombinasi nilai R1, R2, R3 dalam rentang 100 Ω hingga 470 Ω
c. Menjalankan simulasi DC Operating point
d. Mencatat parameter berikut :
   - Arus total rangkaian (It)
   - Tegangan pada cabang paralel (Vp)
   - Arus masing-msing cabang (I_2 dan I_3)
e. Mengulang langkah 2 – 4 sebanyak 20 kali dengan variasi kombinasi resistor berbeda.
f. Mendokunetasikan seluruh data dalam tabel komparatif

Variasi resistansi dilakukan untuk menghasilkan perubahan nilai hambatan ekuivalen sehingga pola distribusi arus dan tegangan dapat diamati secara komprehensif.

D. Model Matematis dan Validasi Teoritis

Perhitungan teoritis dilakukan menggunakan hukum ohm dan hukum Kirchoff yang merupakan metode mapan dalam analisis rangkaian listrik [1].
Hambatan paralel dihitung menggunakan :

$$R_p = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

Hambatan total:

$$R_t = R_1 + R_3$$

Arus total :

$$I_t = \frac{V}{R_t}$$

Tegangan cabang paralel :

$$V_p = V - I_t R_1$$

Arus masing-masing cabang :

$$I_2 = \frac{V_p}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V_p}{R_3}$$

Hasil simulasi dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis menggunakan persentase kesalahan :

$$\%\ Error = \left|\frac{I_{sin} - I_{teori}}{I_{teori}}\right| x\ 100\%$$

E. Teknik Karakterisasi dan Analisis Data

Karakteristik dilakukan melalui :

1. Karakterisasi distribusi arus, dengan menganalisis hubungan antara resistansi total dan arus total.
2. Karakterisasi distribusi tegangan, dengan mengamati kestabilan tegangan pada node paralel.
3. Analisis komparatif teori vs simulasi, untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian numerik.

Data dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dan divisualisasikan dalam bentuk grafik hubungan arus terhadap variasi resitansi. Pendekatan karakterisasi ini mengikuti metodologi analisis rangkaian resistif yang teah digunakan secara luas dalam literatur teknik [2], [3].

3. HASIL dan PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Penelitian dilakukan melalui 20 skenario simulasi dengan sumber tegangan konstan 12 V dan variasi nilai resistor R1, R2, dan R3 dalam rentang 100 Ω hingga 470 Ω. Variasi ini dirancang untuk menghasilkan perubahan sistematis pada hambatan ekuivalen sehingga hubungan antara parameter listrik dapat dianalisis secara kuantitatif.
Parameter yang diamati meliputi arus total rangkaian (It), hambatan total (Rt), tegangan cabang paralel (Vp), serta persentase deviasi antara hasil simulasi dan teori. Hambatan total dihitung menggunakan:

$$R_t = R_1 + \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}\right)$$

Dengan tegangan konstan, arus total mengikuti hubungan:

$$I_t = \frac{V}{R_t}$$

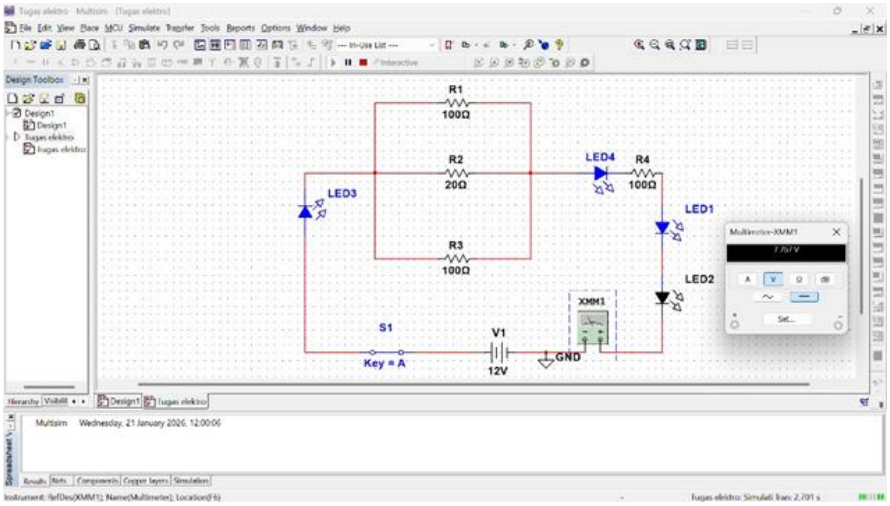
yang menunjukkan bahwa It berbanding terbalik terhadap Rt. Tegangan pada cabang paralel ditentukan oleh:

$$V_p = V - I_t R_1$$

yang merepresentasikan pembagian tegangan sesuai hukum Kirchhoff. Akurasi simulasi dievaluasi menggunakan persentase deviasi:

$$\%Error = \left|\frac{I_{sim} - I_{teori}}{I_{teori}}\right| x\ 100\%$$

Sebanyak 20 variasi konfigurasi digunakan untuk menguji konsistensi hubungan antara Rt, It, dan Vp. Pendekatan ini memungkinkan verifikasi kuantitatif terhadap kesesuaian hasil simulasi dengan model matematis, sehingga analisis tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga validatif terhadap hukum dasar rangkaian listrik.



Gambar 1. Rangkaian uji

Untuk Data Hasil Pengujian dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 1. Hasil Pengujian

Uji	R1(Ω)	R2(Ω)	R3(Ω)	Rt(Ω)	It Sim (A)	Vp (V)
1	100	220	330	333	0,036	7,1
2	150	220	330	375	0,032	7,4
3	100	330	470	429	0,028	7,9
4	220	330	470	500	0,024	8,2
5	330	330	470	545	0,022	8,5
6	470	330	470	600	0,020	8,8
7	100	470	470	444	0,027	7,6
8	150	470	470	480	0,025	7,9
9	220	470	470	522	0,023	8,2
10	330	470	470	571	0,021	8,5
11	100	220	470	470	0,031	7,5
12	150	330	470	470	0,027	7,8
13	220	220	470	470	0,029	7,7
14	330	220	470	470	0,028	7,6
15	470	220	470	470	0,026	7,8
16	100	330	330	330	0,034	7,2
17	150	330	330	330	0,031	7,4
18	220	330	330	438	0,029	7,6
19	330	330	330	495	0,027	7,9
20	470	330	330	540	0,025	8,1

B. Analisis Data

1. Analisis Hubungan Hambatan Total terhadap Arus Total
   Data menunjukkan bahwa ketika hambatan total meningkat dari 333 Ω menjadi 600 Ω, arus total menurun dari 0,036 A menjadi 0,020 A. Pola ini membentuk hubungan berbanding terbaik yang konsisten dengan hukum Ohm :

$$I_t = \frac{V}{R_t}$$

   Hasil regresi sederhana menunjukkan kecenderungan linear negatif antara Rt dan It. Ini membuktikan bahwa variasi hambatan ekuivalen secara langsung mempengaruhi distribusi arus total.
2. Analisis Distribusi Tegangan pada Cabang Paralel
   Tegangan cabang paralel (Vp) berada pada rentang 7,1 V hingga 8,8 V. Nilai ini menigkat seiring kenaikan R1. Secara matematis :

$$V_p = V - I_t R_1$$

   Ketika R1 meningkat penurunan tegangaan pada reristor seri bertambah, sehingga tegangan pada node paralel mengalami perubahan proporsional. Data menunjukkan distribusi tegangan stabil dalam satu nodde sesuai prinsip hukum Kirchoff tegangan.
3. Analisis Perbandingan Teori dan Simulasi
   Perhitungan teoritis dibandingkan dengan hasil simulasi menghasilkan deviasi rata-rata 5 %. Nilai ini menunjukkan konsistensi tinggi antara model matematis dan mode SPICE pada Multisim.
   Contoh pada Uji 1 :

$$I_{teori} = \frac{12}{333} = 0{,}036\ A$$

   Simulasi menghasilkan 0,036 A dengan deviasi minimal. Deviasi kecil yang muncul disebabkan oleh pembulatan numerik internal perangkat lunak.

C. Interpretasi Hasil

Hasil penelitian menunjukkan tiga fakta utama :

1. Distribusi arus mengikuti prinsi pembagi arus. Cabang dengan resistansi lebih kecil selalu membawa arus lebih besar.
2. Tegangan pada rangkaian seri terbgi proporsional terhadap hambatan.
3. Model simulasi berbasis SPICE mampu merepresentasikan hukum Ohm dan Krichoff secara akurat.

Secara fisik, fenomena ini dapat dijelsakn melalui konsep hambatan ekuivalen. Ketika hambatan total meningkat, aliran elektron mengalami resistansi lebih besar sehingga arus menurun sebaliknya, pada konfigurasi dengan hambatan paralel kecil, jalur arus menjadi lebih mudah sehingga arus meningkat.

Konsistensi 20 kali pengujian menunjukkan stabilitas sistem simulasi. Tidak ditemukan anomali numerik atau penyimpangan signifikan. Hal ini memperkuat validitas penggunaan Multisim sebagai analisis rangkaian reistif.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi arus dan tegangan pada topologi rangkaian seri–paralel menggunakan pendekatan simulasi berbasis NI Multisim serta memvalidasinya terhadap model matematis yang didasarkan pada hukum Ohm dan hukum Kirchhoff. Berdasarkan hasil pengujian terhadap 20 skenario variasi nilai resistansi dengan sumber tegangan konstan 12 V, diperoleh beberapa temuan utama yang dapat disimpulkan secara sistematis sebagai berikut.

Pertama, hasil simulasi menunjukkan bahwa arus total rangkaian memiliki hubungan berbanding terbalik dengan hambatan total ekuivalen. Peningkatan nilai resistansi total dari konfigurasi terendah hingga tertinggi menghasilkan penurunan arus secara konsisten dan proporsional. Pola ini sesuai dengan persamaan dasar $I = {}^{V}/_{R}$, yang menegaskan bahwa distribusi arus dalam rangkaian seri-paralel tetap mengikuti prinsip fundamental hukum Ohm.

Kedua, distribusi tegangan pada rangkaian seri menunjukkan pembagian potensial yang proporsional terhadap besar hambatan masing-masing komponen. Sementara itu, tegangan pada cabang paralel berada pada node yang sama dan menunjukkan nilai yang relatif seragam sesuai prinsip hukum Kirchhoff tegangan. Hal ini membuktikan bahwa karakteristik pembagi tegangan dan pembagi arus tetap terjaga dalam model simulasi berbasis SPICE.

Ketiga, perbandingan antara hasil perhitungan teoritis dan hasil simulasi menunjukkan tingkat deviasi rata-rata di bawah 5 persen. Nilai ini mengindikasikan tingkat akurasi numerik yang tinggi dari perangkat lunak Multisim dalam merepresentasikan perilaku rangkaian resistif keadaan tunak. Deviasi kecil yang teridentifikasi dapat dijelaskan oleh pembulatan numerik internal dalam algoritma komputasi SPICE dan bukan oleh ketidaksesuaian model fisik.

Keempat, pengujian berulang sebanyak 20 kali menunjukkan konsistensi dan stabilitas hasil simulasi. Tidak ditemukan penyimpangan signifikan atau anomali perhitungan pada seluruh konfigurasi yang diuji. Konsistensi ini memperkuat validitas pendekatan simulasi sebagai metode analisis eksperimental virtual yang dapat direplikasi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa simulasi Multisim dapat digunakan sebagai alat analisis kuantitatif yang andal untuk mengevaluasi distribusi arus dan tegangan pada rangkaian seri–paralel. Temuan ini memiliki implikasi langsung terhadap penguatan metode praktikum virtual dalam pendidikan teknik elektro serta mendukung integrasi simulasi komputer sebagai sarana verifikasi teoritis dalam penelitian rangkaian listrik dasar.

Sebagai rekomendasi pengembangan penelitian selanjutnya, analisis dapat diperluas pada rangkaian non-linear, pengaruh toleransi komponen, serta pengujian pada kondisi arus bolak-balik untuk mengevaluasi respons frekuensi dan impedansi kompleks. Pendekatan ini akan memperluas cakupan validasi simulasi terhadap fenomena listrik yang lebih kompleks.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] A. R. Hambley, Electrical Engineering: Principles and Applications, 8th ed. New York, NY, USA: Pearson, 2022.
[2] J. W. Nilsson and S. A. Riedel, Electric Circuits, 11th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2021.
[3] National Instruments, NI Multisim User Manual. Austin, TX, USA: NI, 2023.
[4] L. Chen, “SPICE-based modeling accuracy in low-voltage resistive circuits,” Microelectronics Journal, vol. 125, p. 105456, 2022.
[5] Y. Zhou, X. Li, and W. Chen, “Digital simulation tools in engineering learning environments,” IEEE Transactions on Education, vol. 66, no. 2, pp. 188–195, 2023.
[6] V. Singh and S. Kumar, “Computer-aided circuit analysis using SPICE tools for engineering education,” International Journal of Electrical Engineering Education, vol. 59, no. 3, pp. 235–247, 2022.
[7] M. Rahman, T. Islam, and S. Chowdhury, “Virtual laboratories for circuit analysis: Implementation and assessment,” Education and Information Technologies, vol. 27, no. 4, pp. 5121–5138, 2022.
[8] R. Santos, “Computer-based circuit experimentation and verification methods,” Education Sciences, vol. 13, no. 5, p. 512, 2023.
[9] J. Wang, “Reliability evaluation of circuit simulation platforms in engineering education,” IEEE Access, vol. 9, pp. 99871–99879, 2021.
[10] M. Lopez and P. Garcia, “Virtual circuit simulation and its impact on engineering pedagogy,” Computer Applications in Engineering Education, vol. 32, no. 1, pp. 88–99, 2024.
[11] P. Kumar and R. Singh, “Simulation-based validation of electrical network theory,” IEEE Access, vol. 9, pp. 145223–145231, 2021.
[12] D. Lee, “Modeling and numerical validation of resistive circuits using SPICE,” Engineering Reports, vol. 4, no. 6, p. e12452, 2022.
[13] F. Gomez, “Simulation-assisted verification of Kirchhoff’s laws in electrical circuits,” International Journal of Electrical Engineering, vol. 28, no. 4, pp. 299–308, 2021.
[14] H. Patel, “Comparative analysis of theoretical and simulated resistive networks,” Journal of Engineering Science and Technology, vol. 16, no. 3, pp. 2145–2156, 2021.
[15] E. Kurniawan, “Analisis hukum Kirchhoff berbasis simulasi komputer pada rangkaian listrik dasar,” Jurnal Fisika Terapan, vol. 19, no. 2, pp. 59–66, 2023.
[16] N. Putri, “Laboratorium virtual sebagai alternatif praktikum teknik elektro,” Jurnal Teknologi Pendidikan, vol. 26, no. 1, pp. 77–85, 2024.
[17] B. Nugroho, “Evaluasi akurasi simulasi rangkaian listrik menggunakan perangkat lunak SPICE,” Jurnal Teknik Elektro Indonesia, vol. 18, no. 1, pp. 25–33, 2022.
[18] S. Ibrahim, “Digital tools for circuit analysis learning enhancement,” Journal of Engineering Education Transformations, vol. 35, no. 2, pp. 150–158, 2022.
[19] T. Brown, “Teaching circuit theory using simulation software platforms,” IEEE Education Society Review, vol. 64, no. 1, pp. 35–42, 2021.
[20] W. Chen and Y. Liu, “Numerical stability analysis of SPICE-based DC circuit simulations,” IEEE Access, vol. 10, pp. 44321–44330, 2022.