



# ANALISIS RANGKAIAN JEMBATAN *WHEATSTONE* DENGAN PENDEKATAN TEORETIS DAN SIMULASI

Desiana Fajar Wisdawati<sup>1</sup>, Syifaulyuada<sup>2</sup>, Leonardi Paris Hasugian<sup>3,4</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Sistem Telekomunikasi, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Veteran No. 8 Negri Kaler Kabupaten Purwakarta, 41115, Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Sistem Informasi, Universitas Komputer Indonesia, Jl. Dipatiukur No. 112-116 Kota Bandung, 40132, Indonesia

<sup>4</sup>Program Studi Sistem Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60117, Indonesia

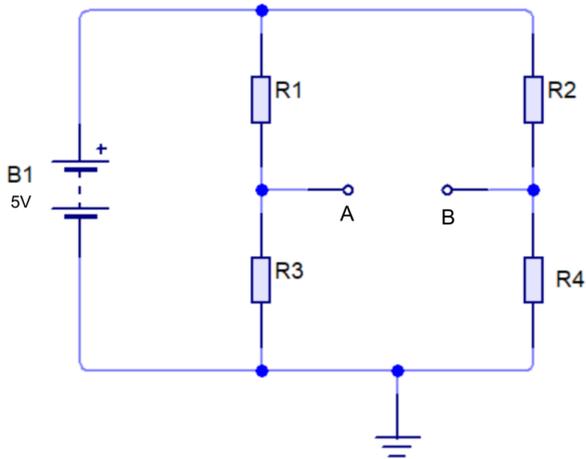
|   |   |
|---|---|
| INFORMASI ARTIKEL   | <p style="text-align: center;"><b>A B S T R A K</b></p> <p>Hukum <i>Kirchhoff</i> merupakan dasar analisis rangkaian listrik kompleks yang mencakup prinsip kekekalan arus (Hukum I) dan tegangan (Hukum II). Penelitian ini mengkaji penerapannya dalam rangkaian jembatan <i>Wheatstone</i> melalui metode teoretis dan simulasi. Hukum <i>Kirchhoff</i> I menyatakan total arus masuk-cabang sama dengan arus keluar, sementara Hukum II menegaskan jumlah aljabar tegangan dalam <i>loop</i> tertutup bernilai nol. Kedua aturan ini menjadi kunci dalam analisis rangkaian listrik tak-seimbang yang tidak dapat diselesaikan dengan kombinasi seri-paralel sederhana. Studi ini melibatkan empat simulator yang berbeda: Circuit Simulator Applet, Circuit Lab (C-Lab), Circuit Wizard, PhET, TinkerCAD membuktikan konsistensi hasil terhadap perhitungan manual (teoretis). Hasilnya penerapan rangkaian jembatan <i>wheatstone</i> memiliki dua kategori yang bersifat <i>balance</i> dan tidak <i>balance</i> dimana perbedaannya terletak pada nilai <math>V_{AB}</math> &amp; <math>I_{AB}</math> -nya. Semakin besar nilai <math>V_{AB}</math> maka laju <math>V_{AB}</math> akan semakin cepat dan semakin tidak stabil. Experimen sederhana ini mengkonfirmasi Hukum <i>Kirchhoff</i> sebagai alat analisis rangkaian jembatan <i>Wheatstone</i> sekaligus mengungkap keterbatasan praktis dalam implementasi fisik melalui pendekatan simulasi.</p> <p>Kata kunci — Hukum <i>Kirchoff</i>, Jembatan <i>Wheatstone</i>, <i>Circuit simulator applet</i>, C-Lab, <i>Circuit wizard</i>, PhET, TinkerCAD</p> |
| <p>Received: July 25, 2024<br/>Revised: March 19, 2025<br/>Available online: March 24, 2025</p> |   |
| CORRESPONDENCE  | <p style="text-align: center;"><b>A B S T R A C T</b></p> <p><i>Kirchhoff's laws serve as the essential framework for examining complex electrical circuits by incorporating the principles of current conservation (First Law) and voltage conservation (Second Law). This study explores their application in Wheatstone bridge circuits through theoretical analysis and simulations conducted with four tools: Circuit Simulator Applet, Circuit Lab (C-Lab), Circuit Wizard, PhET, and TinkerCAD, revealing consistency between simulated results and manual computations. The First Law maintains that the total current entering a junction equals the current exiting it, while the Second Law asserts that the algebraic sum of voltages in any closed loop is zero—critical principles for analyzing unbalanced circuits beyond the simple series-parallel configurations. The research classified Wheatstone bridges into balanced (<math>V_{AB} \geq 0, I_{AB} = 0</math>) and unbalanced states (non-zero <math>V_{AB}</math> and <math>I_{AB}</math>), demonstrating that larger <math>V_{AB}</math> magnitudes relate to more rapid voltage changes and decreased stability. This confirms Kirchhoff's laws as golden tools for Wheatstone bridge analysis while also uncovering practical limitations in physical implementations as observed through simulation-based methods.</i></p> <p>Keywords — Kirchoff Law, Wheatstone Bridge, Circuit simulator applet, C-Lab, Circuit wizard, PhET, TinkerCAD</p>   |
| <p>E-mail:<br/><sup>4</sup>syifaulyuada@upi.edu</p>   |   |

## I. PENDAHULUAN

Rangkaian listrik memiliki berbagai tingkat kompleksitas, mulai dari yang sederhana hingga yang rumit dengan banyak percabangan. Untuk menganalisis rangkaian yang kompleks, *engineer* sering menggunakan teknik penyederhanaan. Salah satu metode yang efektif adalah transformasi rangkaian, di mana rangkaian yang rumit diubah menjadi bentuk yang lebih sederhana melalui

serangkaian persamaan matematis. Proses ini memungkinkan analisis yang lebih mudah tanpa mengubah karakteristik dasar rangkaian [1]. Contoh rangkaian listrik yang bercabang dapat ditemukan pada jembatan *Wheatstone* (Gambar 1). Analisis rangkaian jembatan *Wheatstone* secara fundamental mengimplementasikan hukum *Kirchoff* tentang arus dan tegangan, di mana kondisi keseimbangan tercapai ketika perkalian silang nilai resistansi pada empat lengan

rangkaian memenuhi persamaan  $R_1/R_2 = R_3/R_x$  (anggap  $R_4 = R_x$ ). Prinsip ini memungkinkan konversi pengukuran resistansi kompleks menjadi perhitungan matematis sederhana dengan akurasi tinggi [2], [3].



Gambar 1. Rangkaian jembatan *Wheatstone*.

Dalam eksperimen sederhana di laboratorium, rangkaian jembatan *Wheatstone* dapat dirangkai dengan menggunakan komponen elektronika resistor dan catu daya (*power supply*). Pada umumnya rangkaian jembatan *Wheatstone* banyak digunakan untuk menghitung resistansi yang tidak diketahui [4]. Rangkaian ini telah banyak digunakan dalam instrumentasi listrik, terutama untuk aplikasi pengukuran presisi [5]. Dengan keunggulannya dalam mendeteksi perubahan resistansi kecil secara akurat (mengukur perubahan resistansi hingga orde mili-ohm), rangkaian ini populer untuk digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi modern saat ini, seperti pemantauan struktur bangunan menggunakan strain gauge, alat diagnostik medis, sensor termistor untuk pengukuran suhu, hingga kalibrasi presisi komponen elektronik [6], [7], [8], [9]. Konsep dasar jembatan *Wheatstone* diciptakan untuk pertama kalinya oleh Samuel Hunter pada tahun 1833 dengan keberhasilannya dalam mengembangkan alat ukur hambatan listrik. Lalu dikembangkan kembali oleh Sir Charles *Wheatstone* pada tahun 1843 dengan dikembangkannya rumus hingga terbentuk konsep rangkaian [10].

Beberapa kajian tentang rangkaian jembatan *Wheatstone* dilakukan oleh [5], [11], [12]. Berbeda dengan studi-studi tersebut, penelitian ini mengusulkan integrasi lima platform simulasi baru yang belum pernah dikaji secara komprehensif untuk analisis jembatan *Wheatstone*, yaitu *Circuit Simulator Applet*, *Circuit Lab (C-Lab)*, *Circuit Wizard*, *PhET*, dan *TinkerCAD*. Hasil perhitungan teoretis rangkaian dibandingkan dengan hasil simulasi. Tabel I merupakan profil simulator yang digunakan dalam eksperimen, yang mana dapat diakses secara *online* (dioperasikan langsung pada website yang disediakan penyedia simulator) atau *offline*, yaitu diunduh dan diinstalasi pada laptop [12], [13].

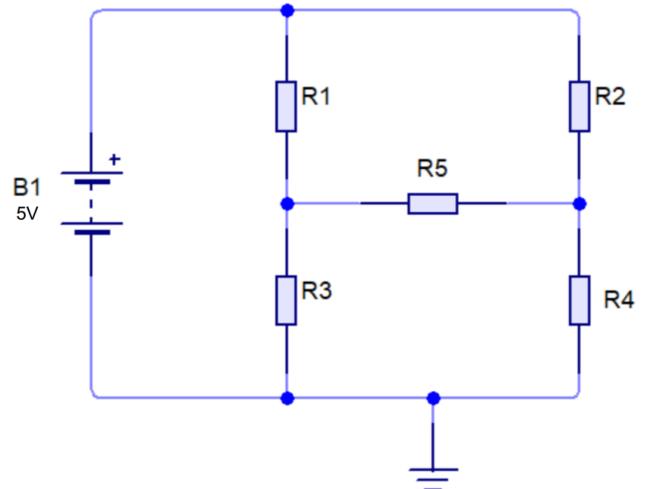
TABEL I. KOMPARASI SIMULASI

| No | Simulator                       | Online/Offline | Version |
|----|---------------------------------|----------------|---------|
| 1  | <i>Circuit Simulator Applet</i> | Online         | 2.7.1js |
| 2  | <i>Circuit Lab (C-Lab)</i>      | Online         | -       |
| 3  | <i>Circuit Wizard</i>           | Offline        | 1.15    |
| 4  | <i>PhET</i>                     | Online         | 2.0.4   |

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Rangkaian jembatan *Wheatstone* merupakan salah satu konfigurasi rangkaian resistor yang berfungsi untuk mengukur perubahan resistansi yang sangat kecil dan banyak digunakan pada rangkaian sensor. Rangkaian ini disusun seperti belah ketupat, sedikitnya empat buah resistor ( $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ ), kemudian salah satunya merupakan resistor yang dicari nilai resistansinya ( $R_5$ ). Secara garis besar metode dari percobaan yang digunakan adalah dengan melakukan kombinasi melalui urutan alur besar proses percobaan dan melalui pendekatan pada teori serta pembuktian hasil perhitungan manual yang dibandingkan dengan hasil nilai pada simulator dengan nilai yang difokuskan pada percobaan meliputi  $I_{Total}$ ,  $I_{AB}$ , dan  $V_{AB}$ .

Dalam eksperimen ini ada dua skenario rangkaian yang digunakan, yaitu rangkaian dengan jembatan *Wheatstone* dalam keadaan *balance* (skenario I) dan dalam keadaan tidak *balance* (skenario II). Rangkaian disusun dengan menggunakan lima resistor dan satu tegangan masukan yang disajikan pada Tabel II dan III, secara berurutan. Skenario I mengacu pada Gambar 1, sedangkan skenario II mengacu pada rangkaian eksperimen Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian jembatan *Wheatstone* (saat *balance*), apabila tidak *balance* maka rangkaian menjadi *Star - Delta* resistor.

TABEL II. NILAI  $V_{in}$  DAN RESISTOR RANGKAIAN *BALANCE*

| No | $R_1$       | $R_2$       | $R_3$       | $R_4$       | $R_5$       | $V_{in}$ |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 1  | 18 $\Omega$ | 24 $\Omega$ | 27 $\Omega$ | 36 $\Omega$ | 16 $\Omega$ | 12 V     |
| 2  | 33 $\Omega$ | 24 $\Omega$ | 22 $\Omega$ | 16 $\Omega$ | 15 $\Omega$ | 11 V     |
| 3  | 10 $\Omega$ | 15 $\Omega$ | 10 $\Omega$ | 15 $\Omega$ | 20 $\Omega$ | 13 V     |

TABEL III. NILAI  $V_{in}$  DAN RESISTOR RANGKAIAN TIDAK *BALANCE*

| No | $R_1$       | $R_2$       | $R_3$       | $R_4$       | $R_5$       | $V_{in}$ |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 1  | 13 $\Omega$ | 18 $\Omega$ | 24 $\Omega$ | 30 $\Omega$ | 39 $\Omega$ | 10 V     |
| 2  | 20 $\Omega$ | 30 $\Omega$ | 40 $\Omega$ | 50 $\Omega$ | 10 $\Omega$ | 10 V     |
| 3  | 43 $\Omega$ | 33 $\Omega$ | 27 $\Omega$ | 36 $\Omega$ | 24 $\Omega$ | 12 V     |

Hal pertama yang diperhatikan adalah dengan menentukan apabila rangkaian *Wheatstone* tersebut tergolong *balance* atau tidak *balance*. Untuk mencari *balance* tidaknya rangkaian dengan memperhatikan dan membuktikan melalui nilai  $V_{AB}$  yang didapatkan. Pada kasus *balance* nilai  $V_{AB}$  &  $I_{AB}$  diharuskan sama dengan nol yang mengartikan bahwa rangkaian tersebut telah stabil dan tidak

ada pergerakan arus di  $V_{R5}$  atau  $V_{AB}$ . Rumus dalam pembuktiannya dapat dilakukan dengan cara sebagaimana disampaikan pada Persamaan (1) [14],

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (1)$$

Setelah digunakannya Persamaan (1), kemudian dilakukan penyederhanaan dengan mengkali silangkan pada persamaan tersebut hingga terbentuk persamaan sederhananya sebagai  $R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3$ . Ketika hasil dari kedua sisi bernilai sama, maka terbukti jika rangkaian listriknya bernilai *balance* dan apabila tidak sama hasil dari kedua sisi, maka dinyatakan tidak *balance*. Pada dasarnya apabila rangkaian bersifat *balance*, maka  $R_5$  diabaikan dan dianggap nilainya 0 dikarenakan  $V_{AB} = 0$ .

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \text{ (Balance)}$$

$$R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3 = 18 \Omega \times 36 \Omega = 24 \Omega \times 27 \Omega$$

$$648 \Omega = 648 \Omega$$

Dengan hasilnya yang sama dari kedua sisi dapat dilihat bahwa rangkaianannya *balance* dan jika dihitung melalui selisih  $V_{AB}$  nya yakni  $V_A - V_B$  maka diketahui hasil perhitungannya sebesar 7,2 V.

$$V_A = \frac{R_3}{R_1+R_3} \times V = \frac{36}{18+36} \times 12 = 7,2V$$

$$V_B = \frac{R_4}{R_2+R_4} \times V = \frac{27}{24+27} \times 12 = 7,2V$$

$$V_{AB} = V_A - V_B = 0V$$

$V_{AB}$  adalah nol (0) karena rangkaian dalam keadaan *balance*. Selanjutnya untuk mencari kuat arus atau  $I_{total}$  pada rangkaian yang *balance* digunakan persamaan (2).

$$I_{Total} = \frac{V}{\frac{(R_1+R_3)(R_2+R_4)}{R_1+R_2+R_3+R_4}} \quad (2)$$

Dalam keadaan tidak *balance* untuk mencari  $I_{Total}$  maka, harus mengetahui  $R_{Total}$  terlebih dahulu melalui persamaan (3) dan (4). Setelah itu  $R_{Total}$  akan dijadikan sebagai pembagi tegangan untuk mencari  $I_{Total}$  sebagaimana disampaikan pada persamaan (5). Diperlukan pendekatan teori transformasi segitiga bintang ( $\Delta$ -Y) untuk menyelesaikannya. Adapun cara kerjanya adalah mengganti cabang rangkaian yang berbentuk segitiga ( $\Delta$ ), dengan rangkaian yang tersambung dalam rangkaian berbentuk bintang (Y) [15].

$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{S2}} \quad (3)$$

$$R_{Total} = R_p + R_a \quad (4)$$

$$I_{Total} = \frac{V}{R_{Total}} \quad (5)$$

Pembuktian  $I_{AB}$  dan  $V_{AB}$  tidak *balance* atau tidak sama dengan 0, maka dilakukanlah eliminasi *loop* 1 dan *loop* 2 dengan perhitungan berikut.

Loop 1

$$(I_1 \times R_2) + (I_2 \times R_5) - [(I - I_1)R_1] = 0$$

$$18.I_1 + 39.I_2 - [(0,478 - I_1)13] = 0$$

$$18.I_1 + 39.I_2 - (6,214 - 13.I_1) = 0$$

$$31.I_1 + 39.I_2 = 6,214$$

Loop 2

$$(I_1 - I_2)R_4 - (I - I_1 + I_2)R_3 - (I_2 \times R_5) = 0$$

$$(I_1 - I_2)30 - (0,478 - I_1 + I_2)24 - (I_2, 39) = 0$$

$$(30.I_1 - 30.I_2) - (11,472 - 24.I_1 + 24.I_2) - (39. I_2) = 0$$

$$54. I_1 - 93. I_2 = 11,472$$

Eliminasi

$$31.I_1 + 39.I_2 = 6,214 \quad [x54] \quad | \quad 1.674.I_1 + 2.106.I_2 = 335,556$$

$$54.I_1 - 93.I_2 = 11,472 \quad [x31] \quad | \quad 1.674.I_1 - 2.883.I_2 = 355,632 -$$

$$4.989.I_2 = 20,076$$

$$I_2 = \frac{20,076}{4.989}$$

$$I_2 = 0,00402 A$$

$$I_{AB} = 0,00402 A$$

Pembuktian  $I_{AB}$  dan  $V_{AB}$  tidak *balance* atau tidak sama dengan 0, maka dilakukanlah eliminasi *loop* 1 dan *loop* 2 dengan perhitungan berikut.

$$V_{AB} = I_{AB} \times R_5$$

$$= 0,00402 \times 39$$

$$= 0,15678 V$$

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan teoretis rangkaian *Balance* dan pembuktian pada simulator disajikan pada Tabel IV, V dan VI. Dapat diperhatikan bahwa nilai dari  $V_{AB}$  &  $I_{AB}$  bernilai 0 (*balance*). Sementara hasil perhitungan rangkaian tidak *balance* secara teoretis dan simulator disajikan pada Tabel VII, VIII, dan IX. Dari eksperimen dapat disimpulkan bahwa nilai dari  $V_{AB}$  &  $I_{AB}$  bernilai tidak sama dengan 0. Adapun beberapa pengamatan lain yang dapat diambil, yaitu sebagai berikut:

- Keadaan *balance* atau stabil pada rangkaian terjadi ketika  $V_{AB}$  &  $I_{AB} = 0$  yang disebabkan terjadi keseimbangan dari nilai resistor titik A dengan resistor titik B dan karena nilai  $V_{AB}$  nya menjadi 0 maka laju gerak arus tidak akan bergerak kearah mana pun, dalam hal ini c-nya akan diabaikan dan akan membentuk jembatan *Wheatstone*. Apabila kondisi rangkaianannya dalam keadaan tidak *balance* atau tidak stabil maka  $V_{AB}$  &  $I_{AB}$  tidak sama dengan 0, dalam hal ini  $R_5$ ,  $V_{AB}$ , dan  $I_{AB}$  akan memiliki nilai dan tidak dianggap 0.
- Dalam kondisi *balance* atau  $V_{AB}$ ,  $I_{AB} = 0$  pada rangkaian jalur arus  $V_{AB}$  akan mengalami diam dengan kondisi elektron yang stabil sehingga tidak diperlukan untuk berpindah ke titik arus yang lainnya. Dalam kondisi tidak *balance* atau  $V_{AB}$  &  $I_{AB} \neq 0$  menjadikan arus  $V_{AB}$  bergerak menuju kearah arus yang lain. Hal ini disebabkan karena adanya nilai selain 0 pada  $V_{AB}$ ,  $I_{AB}$  dan menjadikan kondisi rangkaianannya tidak stabil. Kejadian ini dapat terlihat ketika simulatornya dijalankan.
- Semakin besar nilai selisih dari arus  $V_{AB}$  &  $I_{AB}$  maka mengakibatkan laju kecepatan dari jalur arus  $V_{AB}$  semakin cepat dan tidak stabil menuju arus yang lain dibandingkan  $V_{AB}$  yang nilai selisihnya lebih sedikit.
- Semakin kecil nilai  $V_{AB}$  maka akan semakin stabil rangkaianannya dan laju gerak arus  $V_{AB}$  nya akan lebih lambat. Apabila tercapai nilai  $V_{AB}$  hingga ke titik 0 maka pada arus  $V_{AB}$  tidak akan bergerak menuju arus yang lain dan akan mengalami kondisi diam sehingga arusnya menjadi stabil.
- Circuit Simulator Applet merupakan simulator yang dapat diakses secara gratis (*free*), dengan fitur yang didapatkan sudah sangat banyak dan perhitungannya terbilang akurat, dan valid. Tidak hanya itu dalam

perancangan rangkaiannya juga dapat diposisikan dengan bebas hingga alat-alatnya dapat diposisikan miring. Kekurangannya adalah ketidakjelasan gambar rincian pada *list tools* dan tidak dapat mencantumkan nilai angka setelah koma lebih dari 1 digit (misalnya: ketika memasukkan nilai  $7,28V$  maka yang muncul pada simulator menjadi  $7,3V$ ) dan akan dibulatkan secara otomatis, tetapi nilai detailnya dapat dilihat secara langsung melalui *list* hasil nilai pada area pojok bawah kanan *user interface*. Lalu untuk simulator Circuit Lab juga menunjukkan hasil yang akurat dan mudah digunakan. Hanya saja pemakaian secara gratis terbatas dengan waktu dan tidak bisa digunakan secara terus menerus kecuali menggunakan versi berbayar. Untuk TinkerCAD dan PhET merupakan aplikasi berbasis web sehingga mudah digunakan tanpa harus mengunduhnya terlebih dahulu seperti Circuit Wizard. TinkerCAD dan PhET memiliki *tools* yang mirip dan mudah dicari. Kemudian disertai gambar ilustrasi dan hasil yang akurat. Hasil simulasi menggunakan Circuit Wizard memiliki hasil yang relatif sama atau mirip dengan hasil perhitungan secara manual.

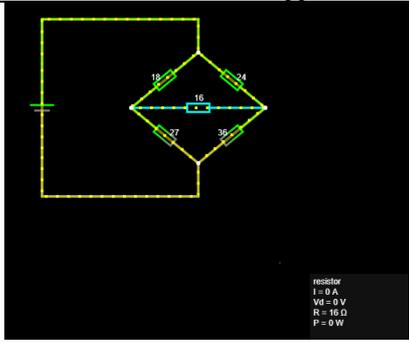
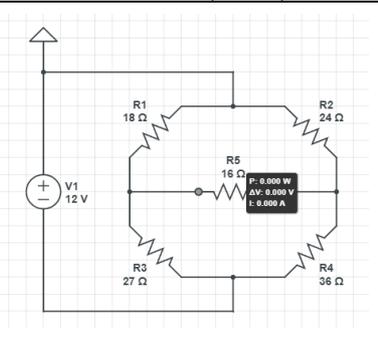
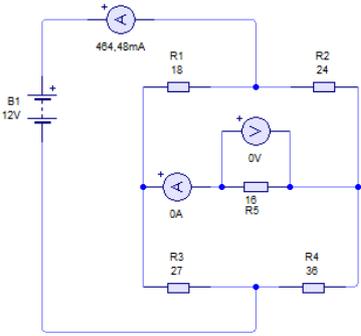
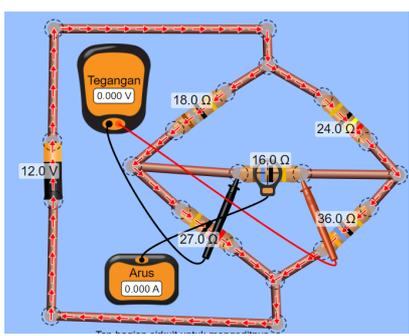
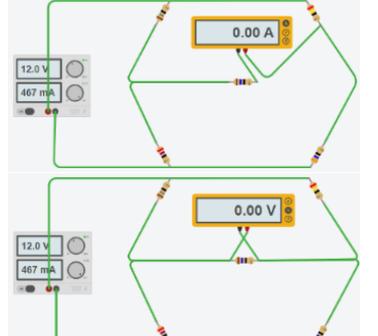
Penilaian dari perbandingan lima simulator ditunjukkan pada Tabel X, yang menghubungkan berbagai aspek yang menyangkut performa, fitur yang diberikan, aksesibilitas (faktor akses secara gratis atau tidak), keakuratan hasil yang diberikan simulator secara teori, kemudahan pengguna, dan ketelitian. Penilaian dari kelima simulator tersebut juga berdasarkan pada pengalaman selama penggunaannya sehingga memungkinkan untuk beberapa penilaian secara subjektif pada masing-masing individu. Simulator yang

dijalankan sebagian bersifat *offline* dan yang digunakan secara *online* pada website tertentu digunakan secara *free trial* seperti pada Circuit Lab (C-Lab).

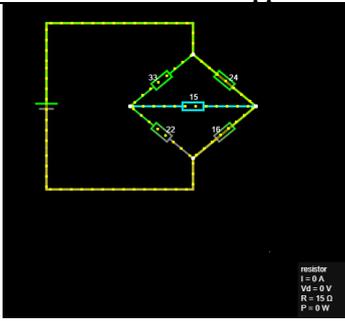
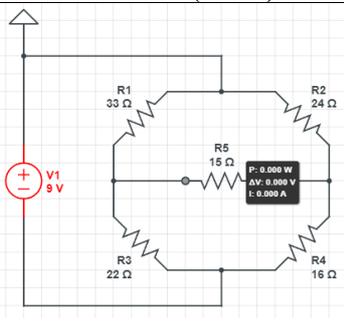
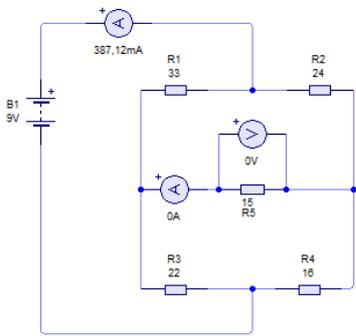
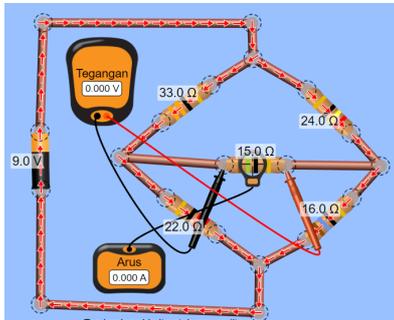
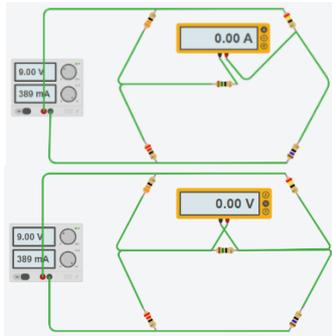
Sebagai saran, simulator diharapkan dapat semakin berkembang, diantaranya:

1. Simulator Circuit Applet memiliki *tools* yang lengkap, namun pada daftar *tools*-nya tidak terdapat ilustrasi sehingga sulit menemukan komponen yang dicari.
2. Pada ThinkerCAD untuk jalur pemasangan kabelnya akan lebih baik tidak terhubung langsung pada komponen sehingga kabelnya dapat langsung terhubung satu sama lain. Selain itu akan lebih baik jika terdapat komponen selain multimeter, yaitu *voltmeter* dan *amperemeter* agar lebih efisien.
3. Circuit lab sangat nyaman digunakan, namun aplikasi tersebut berbayar. Akan lebih baik jika terdapat pengecualian untuk orang-orang yang khusus menggunakannya dalam pendidikan, tentu saja hal tersebut akan memberikan dampak positif bagi simulator ini.
4. Pada simulator PhET tidak terdapat opsi *undo* sehingga jika terjadi kesalahan dalam percobaan maka harus merombak ulang rangkaian.
5. Simulator Circuit Wizard memiliki komponen yang lengkap dan cara penggunaan yang tergolong mudah. Hanya saja komponennya tidak dapat terlalu banyak untuk merubah posisinya. Jadi pada saat membuat rangkain yang berbentuk seperti belah ketupat dengan resistor di setiap sisinya, akan sangat sulit dilakukan sehingga bentuk rangkaiannya akan terus saja berpola menyerupai persegi seperti belah ketupat.

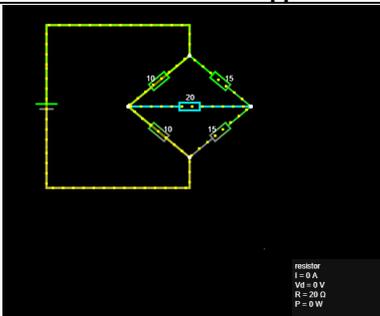
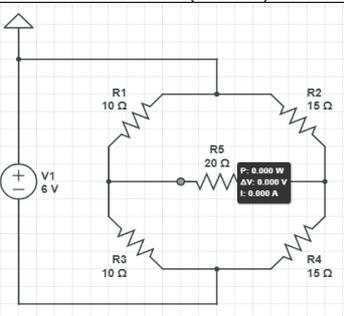
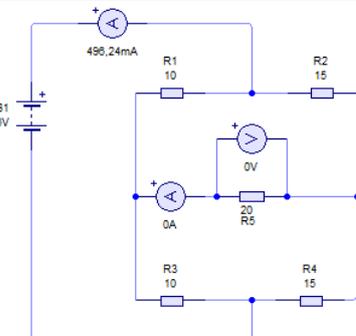
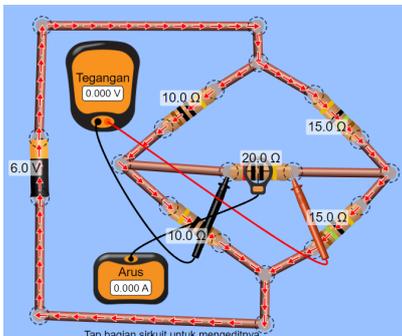
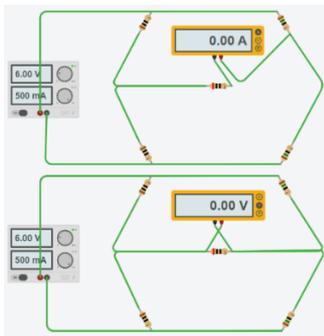
TABEL IV. TABEL  $I_{AB}$  &  $V_{AB}$  HASIL PERHITUNGAN RANGKAIAN *BALANCE* KE-1

| Nilai $V_{in}$ & Resistor (Manual)   | Circuit Simulator Applet   | Circuit Lab (C-Lab)   |
|--|--|---|
| $V_{in} = 12 V$<br>$R_1 = 18 \Omega$<br>$R_2 = 24 \Omega$<br>$R_3 = 27 \Omega$<br>$R_4 = 36 \Omega$<br>$R_5 = 16 \Omega$ |  |  |
| 0 A & 0 V  | 0 A & 0 V  | 0 A & 0 V   |
| Circuit Wizard   | PhET   | TinkerCAD   |
|                                       |  |  |
| 0 A & 0 V  | 0 A & 0 V  | 0 A & 0 V   |

TABEL V. TABEL  $I_{AB}$  &  $V_{AB}$  HASIL PERHITUNGAN RANGKAIAN *BALANCE* KE-2

| Nilai $V_{in}$ & Resistor (Manual)  | Circuit Simulator Applet   | Circuit Lab (C-Lab)  |
|---|--|--|
| $V_{in} = 9\text{ V}$<br>$R_1 = 33\ \Omega$<br>$R_2 = 24\ \Omega$<br>$R_3 = 22\ \Omega$<br>$R_4 = 16\ \Omega$<br>$R_5 = 15\ \Omega$ |   |   |
| 0 A & 0 V   | 0 A & 0 V  | 0 A & 0 V  |
| Circuit Wizard  | PhET   | TinkerCAD  |
|   |  |  |
| 0 A & 0 V   | 0 A & 0 V  | 0 A & 0 V  |

TABEL VI. TABEL  $I_{AB}$  &  $V_{AB}$  HASIL PERHITUNGAN RANGKAIAN *BALANCE* KE-3

| Nilai $V_{in}$ & Resistor (Manual)  | Circuit Simulator Applet  | Circuit Lab (C-Lab)   |
|---|---|---|
| $V_{in} = 6\text{ V}$<br>$R_1 = 10\ \Omega$<br>$R_2 = 15\ \Omega$<br>$R_3 = 10\ \Omega$<br>$R_4 = 15\ \Omega$<br>$R_5 = 20\ \Omega$ |  |  |
| 0 A & 0 V   | 0 A & 0 V   | 0 A & 0 V   |
| Circuit Wizard  | PhET  | TinkerCAD   |
|    |  |  |
| 0 A & 0 V   | 0 A & 0 V   | 0 A & 0 V   |

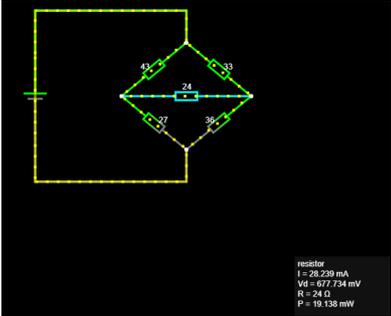
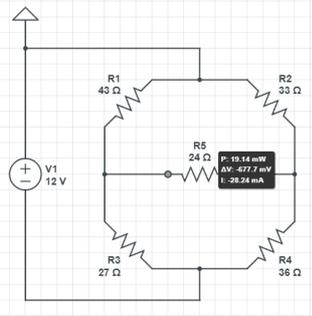
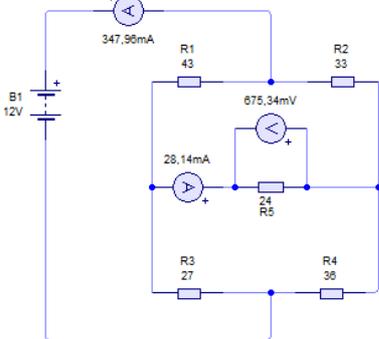
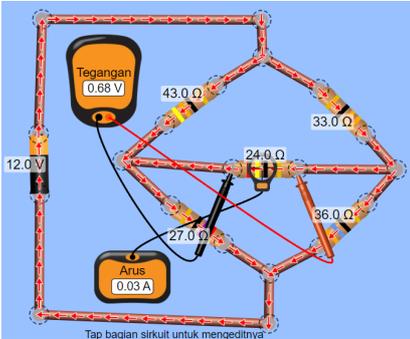
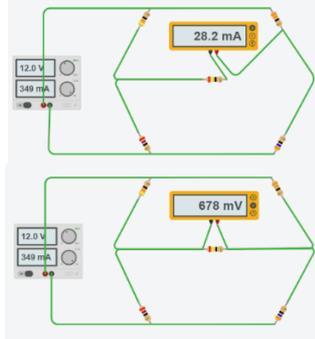
TABEL VII. TABEL  $I_{AB}$  &  $V_{AB}$  HASIL PERHITUNGAN RANGKAIAN TIDAK *BALANCE* KE-1

| Nilai $V_{in}$ & Resistor (Manual)   | Circuit Simulator Applet | Circuit Lab (C-Lab) |
|--|--------------------------|---------------------|
| $V_{in} = 10\text{ V}$<br>$R_1 = 13\ \Omega$<br>$R_2 = 18\ \Omega$<br>$R_3 = 24\ \Omega$<br>$R_4 = 30\ \Omega$<br>$R_5 = 39\ \Omega$ |                          |                     |
| 0,00402 A & 0,15678 V  | 4,03 mA & 157,168 mV     | 4,03 mA & 157,2 mV  |
| <b>Circuit Wizard</b>  | <b>PhET</b>              | <b>TinkerCAD</b>    |
|  |                          |                     |
| 4,01 mA & 156,41 mV  | 4 mA & 160 mV            | 4,03 mA & 157 mV    |

TABEL VIII. TABEL  $I_{AB}$  &  $V_{AB}$  HASIL PERHITUNGAN RANGKAIAN TIDAK *BALANCE* KE-2

| Nilai $V_{in}$ & Resistor (Manual)   | Circuit Simulator Applet | Circuit Lab (C-Lab) |
|--|--------------------------|---------------------|
| $V_{in} = 10\text{ V}$<br>$R_1 = 20\ \Omega$<br>$R_2 = 30\ \Omega$<br>$R_3 = 40\ \Omega$<br>$R_4 = 50\ \Omega$<br>$R_5 = 10\ \Omega$ |                          |                     |
| 0,009 A & 0,09 V   | 9,901 mA & 99,01 mV      | 9,901 mA & 99,01 mV |
| <b>Circuit Wizard</b>  | <b>PhET</b>              | <b>TinkerCAD</b>    |
|  |                          |                     |
| 9,87 mA & 98,72 mV   | 10 mA & 100 mV           | 9,90 mA & 99,0 mV   |

TABEL IX. TABEL  $I_{AB}$  &  $V_{AB}$  HASIL PERHITUNGAN RANGKAIAN TIDAK *BALANCE* KE-3

| Nilai $V_{in}$ & Resistor (Manual)   | Circuit Simulator Applet  | Circuit Lab (C-Lab)  |
|--|---|--|
| $V_{in} = 12 V$<br>$R_1 = 43 \Omega$<br>$R_2 = 33 \Omega$<br>$R_3 = 27 \Omega$<br>$R_4 = 36 \Omega$<br>$R_5 = 24 \Omega$ |    |   |
| 0,03 A & 0,7 V   | 28,239 mA & 677,734 mV  | 28,24 mA & 677,7 mV  |
| Circuit Wizard   | PhET  | TinkerCAD  |
|                                        |  |  |
| 28,16 mA & 675,74 mV   | 30 mA & 680 mV  | 28,2 mA & 678mV  |

TABEL X. RELEVANSI SIMULASI

| No | Simulator                | Spesifikasi   |
|----|--------------------------|---|
| 1. | Circuit Simulator Applet | Circuit Simulator Applet menyediakan fitur <i>save file</i> pada rangkaian yang dibuat dan disimpan pada <i>internal device</i> meski penggunaan <i>Circuit Applet</i> sendiri secara <i>online</i> . Selain itu memiliki fitur untuk melakukan <i>import file</i> baik itu dalam bentuk <i>text</i> ataupun <i>dropbox</i> dan dapat dilakukan <i>export file</i> dalam bentuk <i>text</i> , <i>image</i> , <i>link</i> , dan <i>.SVG</i> . Pada Circuit Simulator Applet memungkinkan untuk melakukan <i>auto-save recovery</i> dan dapat melakukan <i>print</i> secara langsung pada simulatornya. Circuit Simulator Applet dapat merangkai sebuah rangkaian berjenis AC ataupun DC dan memungkinkan untuk membuat rangkaian logika Aljabar Boolean. Salah satu kekurangannya adalah tidak menampilkan ilustrasi apapun pada <i>tools list</i> menunya.  |
| 2. | Circuit Lab (C-Lab)      | Circuit Lab memiliki ilustrasi pada setiap <i>tools</i> yang tersedia sehingga mempermudah dalam mencari dan mengatur komponen yang dipilih. Selain itu Circuit Lab memiliki akses untuk melakukan <i>save file</i> dan menyimpannya pada <i>device</i> dan dapat dilakukan <i>print/export to pdf</i> secara sekaligus, tidak hanya berlaku pada format <i>.PDF</i> tetapi juga dapat dilakukan <i>export</i> untuk <i>.PNG</i> , <i>.EPS</i> , <i>.SVG</i> , dan <i>.SVZG</i> . Dalam Circuit Lab ketika menjalani sebuah rangkaian listrik maka akan ada 1 <i>icon</i> yang dapat berubah 3 warna, diantaranya hijau, kuning, dan merah. Ketiga warna tersebut masing-masing memiliki arti yang berbeda tergantung berjalan atau tidaknya sebuah rangkaian. Apabila muncul warna hijau mengartikan bahwa rangkaian telah berjalan normal, apabila terdapat warna kuning maka rangkaian masih dalam proses dan berhasil setengah jalan, sedangkan untuk warna merah mengartikan bahwa rangkaian tidak benar dan tidak aktif. Kekurangan Circuit Lab yaitu terbatasnya waktu penggunaan apabila menggunakan Circuit Lab secara <i>free</i> , kecuali menggunakan versi berbayar maka tidak ada batasan waktu penggunaan. |
| 3. | Circuit Wizard           | Circuit Wizard memiliki fitur yang lengkap. Pada setiap <i>tools</i> terdapat ilustrasi sehingga sangat mempermudah pemilihan komponen. Saat merangkai rangkaiannya pun tergolong mudah hanya saja penempatan posisinya sedikit kaku (komponennya tidak bisa miring posisinya). Pada Circuit Wizard terdapat tombol <i>pause</i> , <i>play</i> , dan <i>stop</i> saat menjalankan simulasi rangkaiannya. Hasil simulasinya sendiri bisa dikatakan sangat mendekati dengan hasil hitung manual. Jika, dibandingkan dengan simulator lain hasilnya juga mirip. Circuit Wizard ini adalah simulator <i>offline</i> yang perlu diunduh dahulu sebelum digunakan. Hal tersebut membuat Circuit Wizard menjadi kurang praktis.  |
| 4. | PhET                     | Simulasi PhET menghadirkan fitur yang cukup realistis, dimana ketika membuat sebuah rangkaian yang tidak beraturan maka simulasi PhET akan menampilkan <i>overheat</i> dan akan terbakar pada komponennya. PhET juga memiliki fitur ilustrasi pada semua <i>tools</i> -nya yang tersedia dan apabila rangkaian dijalankan akan ada arus yang bergerak dan memiliki dua jenis opsi yang dapat dipilih, diantaranya mode elektron dan konvensional. Selain itu PhET tidak hanya menghadirkan simulasi untuk keperluan fisika saja, tetapi untuk simulasi berjenis lain seperti simulasi Matematika, Kimia, Kebumihan, dan Biologi. Sayangnya PhET memiliki keterbatasan <i>tools</i> sehingga   |

dibandingkan dengan keempat simulator yang terkait, PhET tergolong simulator yang memiliki *tools* paling sedikit dan tidak memiliki fitur untuk melakukan *undo*, sehingga apabila terjadi kesalahan dalam merangkai rangkaian, maka diperlukan perombakan ulang secara manual.

#### 5. TinkerCAD

TinkerCAD adalah salah satu simulasi *online* yang penggunaannya praktis. Memiliki banyak fitur dan kegunaan. Selain itu, TinkerCAD memiliki ilustrasi komponen yang menarik. Hanya saja terdapat beberapa komponen yang tidak tersedia seperti *voltmeter* atau *amperemeter*. Saat menyusun rangkaian itu tergolong cukup rumit karena setiap kabel itu harus terhubung dengan suatu komponen dan tidak dapat langsung terhubung ke kabel lain secara otomatis. Jika terdapat kesalahan saat menghubungkan kabel maka akan sulit untuk memastikan di mana letak kesalahannya. Pada saat menjalankan simulasi TinkerCAD tidak memiliki tombol *pause* sehingga menjadi kurang efektif jika ingin mengecek sesuatu rangkaian yang nilainya terus berubah.

### IV. KESIMPULAN

Melalui perbandingan pada artikel yang terkait, dapat ditarik kesimpulan bahwa rangkaian Jembatan Wheatstone/*Wheatstone Bridge* memiliki dua kategori, yaitu rangkaian yang bersifat *balance* dan tidak *balance*. Perbedaannya ada pada nilai  $V_{AB}$  &  $I_{AB}$  nya. Dalam rangkaian Jembatan Wheatstone *balance* nilai  $V_{AB}$  &  $I_{AB} = 0$  sehingga  $R_5$  pada pertengahan jalur jembatan dinyatakan nol dan diabaikan, artinya tidak terjadi gerakan apapun pada arah arus  $R_5$  sehingga terjadi kondisi stabil/*balance*. Pada rangkaian Jembatan Wheatstone *non-balance* memiliki nilai  $V_{AB}$  &  $I_{AB} \neq 0$ . Itu artinya  $R_5$  memiliki nilai dan tidak dapat diabaikan dan arah arus  $R_5$  akan terjadi pergerakan sehingga terjadi ketidakstabilan pada rangkaian yang disebut *non-balance*. Semakin besar nilai  $V_{AB}$  maka laju  $V_{AB}$  akan semakin cepat dan semakin tidak stabil.

### REFERENSI

- [1] S. Fuada *et al.*, "Studi EasyEDA sebagai Alternatif Simulator Rangkaian Listrik: Pengujian pada Rangkaian Mesh dan Pembuktiannya dengan Eksperimen Aktual," *ALINIER: Journal of Artificial Intelligence & Applications*, vol. 4, no. 2, pp. 79–90, Nov. 2023, doi: 10.36040/alinierv4i2.6935.
- [2] D. Anugrah, "Penerapan Hukum Kirchhoff dan Hukum Ohm pada Analisis Rangkaian Listrik Menggunakan Software Electronics Workbench," *Journal of System Information Teknologi and Electronic Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 1–11, Dec. 2022, doi: 10.31331/jsiteev2i2.2496.
- [3] M. D. L. Rumlus, T. Widjajanti, and R. Hilum, "Penerapan Hukum Kirchoff Pada Rangkaian Ekuivalen Untuk Memperoleh Persamaan Telegraf," *I*, vol. 16, no. 2, pp. 66–73, Dec. 2020, doi: 10.30862/jn.v16i2.110.
- [4] R. Lockhat, "Physics: Wheatstone bridge," *Southern African Journal of Anaesthesia and Analgesia*, vol. 26, no. 6, pp. S100-101, Nov. 2020.
- [5] W. Pratiwi, S. Fuada, F. W. Zanah, and N. Restyasari, "Analisis Rangkaian Wheatstone Bridge Menggunakan Simulator Circuit Wizard, Proteus, dan Multisim," *Telecommunications, Networks, Electronics, and Computer Technologies (TELNECT)*, vol. 1, no. 1, pp. 1–13, Jun. 2021.
- [6] M. Y. Kholifudin, "Analisis Rangkaian Jembatan Wheatstone Berbasis Simulasi PhET Pada Pembelajaran Fisika di SMA," *Jurnal Penelitian Pembelajaran Fisika*, vol. 12, no. 2, pp. 131–137, Oct. 2021, doi: 10.26877/jp2f.v12i2.8062.
- [7] M. Saeedi and R. Effatnejad, "A New Design of Dual-Axis Solar Tracking System With LDR Sensors by Using the Wheatstone Bridge Circuit," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 13, pp. 14915–14922, Jul. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3072876.
- [8] A. P. Aritonang, R. Syech, and W. Tambunan, "Penentuan Konduktivitas Listrik dan Kajian Kualitas Air Sungai Siak Menggunakan Metode Jembatan Wheatstone," *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, vol. 1, no. 2, p. 9, Apr. 2014.
- [9] S. Sugito, H. Hartono, and I. Permadi, "Rancang Bangun Sistem Pengukuran Pergeseran Tanah Menggunakan Sensor Variabel Resistor," *BERKALA FISIKA*, vol. 18, no. 1, pp. 9–16, Jan. 2015.
- [10] N. J. Wade, "Charles Wheatstone (1802 – 1875)," *Perception*, vol. 31, no. 3, pp. 265–272, Mar. 2002, doi: 10.1068/p3103ed.
- [11] S. Apriliyanto, Susilo, M. Abhiyaksa, and M. Z. R. Amin, "Causes of Changes in Resistor Resistance Values in Wheatstone Bridge Circuits," *Journal of Educational Engineering and Environment*, vol. 2, no. 1, pp. 15–18, May 2023, doi: 10.36526/jeec.v1i2.2817.
- [12] S. Fuada *et al.*, "Can PhET simulate basic electronics circuits for undergraduate students?," *Jurnal Infotel*, vol. 15, no. 1, pp. 97–110, Feb. 2023, doi: 10.20895/infotel.v15i1.861.
- [13] S. Fuada *et al.*, "Analisis Rangkaian Pembagi Tegangan dan Perbandingan Hasil Simulasinya Menggunakan Simulator Offline," *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 28–46, Feb. 2022, doi: 10.22373/crc.v6i1.11200.
- [14] D. Herlan, "Studi Pengaruh Pengaman Galvanometer terhadap Keakuratan Hasil Pengukuran Resistor pada Jembatan Wheatstone Sederhana," *Prosiding Semnastek*, vol. 1, no. 1, Nov. 2014, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/237>
- [15] F. H. A. Alsharify and Z. A. H. Hassan, "Computing the reliability of a complex network using two techniques," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1963, no. 1, p. 012016, Jul. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1963/1/012016.