



Analisis Rangkaian *Wheatstone Bridge* Menggunakan Simulator *Circuit Wizard*, *Proteus*, dan *Multisim*

Winda Pratiwi¹, Syifaul Fuada^{2*}, Farah Wardatul Zanah³, Nissa Restyasari⁴

Program Studi Sistem Telekomunikasi, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia^{1 2 3 4}

*Corresponding Author: E-mail: syifaulfuada@upi.edu

ABSTRAK

Rangkaian jembatan *Wheatstone* merupakan salah satu konfigurasi rangkaian resistor yang berfungsi untuk mengukur perubahan resistansi (hambatan) yang sangat kecil, dan telah banyak digunakan pada rangkaian sensor. Rangkaian ini disusun seperti belah ketupat, sedikitnya empat buah resistor (R_1, R_2, R_3, R_4), dimana salah satunya merupakan resistor tidak tetap (R_3) yang biasanya menggunakan *variable Resistor*. Kemudian, salah satunya lagi merupakan resistor yang dicari nilai resistansinya (R_4). Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi rangkaian jembatan *Wheatstone* dengan tiga skenario. Pertama, yaitu pencarian salah satu nilai resistor (R_4) yang tepat saat keadaan *balance*, atau saat arus yang mengalir di titik AB sama dengan Nol ($I_{AB} = 0$ A). Kedua, mengukur tegangan jembatan *Wheatstone* (V_{AB}) dengan nilai resistor yang bervariasi. Ketiga, mencari salah satu nilai resistor (R_4), nilai hambatan pengganti dari semua hambatan (R_{Eq}) saat keadaan *balance*, dan arus total yang mengalir (I_{Total}) pada rangkaian jembatan *Wheatstone* ketika $V_{AB} = 0$ Volt. Analisis memanfaatkan tiga buah simulator *offline*, yaitu *Circuit Wizard* v.1.15, *Proteus* v.8.5, dan *Multisim* v.14.0. Kemudian hasil simulasi ketiganya dibandingkan dengan perhitungan teoretis. Hasil simulasi dari ketiga simulator tersebut membuktikan bahwa nilai arus dan tegangan pada rangkaian *Wheatstone* telah sesuai dengan perhitungan teori, dimana $I_{AB} = 0$ A dan $V_{AB} = 0$ V apabila keadaan seimbang. Dalam keadaan tidak setimbang, maka akan ada arus yang mengalir dari titik A ke titik B sehingga terdapat beda potensial, dimana nilai beda potensial ini sama dengan $V_A - V_B$. Artikel ini juga mengkaji performansi dan *trade-off* dari ketiga simulator tersebut saat eksperimen menggunakan rangkaian jembatan *Wheatstone* berdasarkan pengalaman (*experience*) langsung dalam sudut pandang peneliti.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 29 May 2021

Revised 10 June 2021

Accepted 15 June 2021

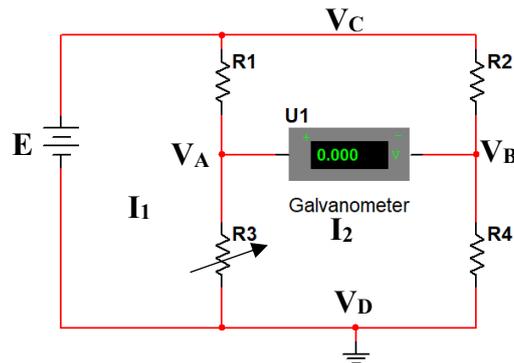
Available online 30 June 2021

Kata kunci:

Jembatan *Wheatstone*,
Circuit wizard,
Proteus,
Multisim

1. PENDAHULUAN

Jembatan *Wheatstone* adalah suatu konfigurasi rangkaian resistor yang telah banyak digunakan untuk menemukan nilai resistansi yang tidak diketahui pada suatu rangkaian listrik. Rangkaian tersebut disusun oleh empat resistor yang disusun secara seri-paralel dan satu buah sumber tegangan DC (bisa berupa baterai) [1], kemudian dipasang Galvanometer (detektor nol) yang digunakan sebagai indikator bahwa rangkaian tersebut dalam keadaan setimbang (Gambar 1). Rangkaian ini familiar dari susunan, karena terlihat seperti “jembatan”. Rangkaian ini mampu mengukur perubahan resistansi (hambatan) hingga ketelitian yang sangat kecil. Oleh itu, konfigurasi rangkaian ini sering dijumpai pada alat ukur elektronika. Jembatan *Wheatstone* pada dasarnya terdiri atas dua rangkaian pembagi tegangan, dengan masing-masing *output* dinamai sebagai tegangan A (V_A) dan tegangan B (V_B). Dalam keadaan setimbang, $V_A = V_B$ sehingga tidak ada arus melewati Galvanometer [2].



Gambar 1. Rangkaian Dasar Jembatan *Wheatstone*

Adapun persyaratan keadaan setimbang ditunjukkan pada Persamaan (1), dimana R_4 merupakan resistansi yang tidak diketahui nilainya (kemudian ditulis sebagai R_x). Sehingga, dapat dituliskan sebagai berikut: $R_1 \times R_x = R_2 \times R_3$,

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

Tegangan pada V_A dan Tegangan pada V_B dapat dicari menggunakan Persamaan (2) dan Persamaan (3), secara berurutan

$$V_A = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot E \quad (2)$$

$$V_B = \frac{R_2}{R_4 + R_2} \cdot E \quad (3)$$

Saat keadaan *balance*, dimana $R_1 \times R_x$ sama dengan $R_2 \times R_3$ (Persamaan 1), maka pengurangan V_A dengan V_B akan sama dengan nol volt ($V_A - V_B = 0$ V) dan tidak ada arus yang mengalir pada Galvanometer ($I_{AB} = 0$ A). Apabila $V_A - V_B \neq 0$ V, maka R_x dapat dicari menggunakan persamaan (4),

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (4)$$

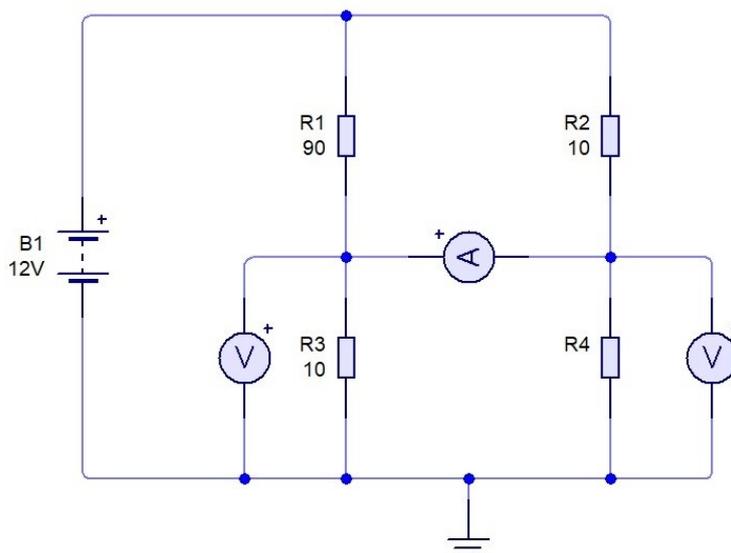
Untuk lebih mengetahui karakteristik rangkaian jembatan *Wheatstone*, penelitian ini akan mengeksplorasi melalui penggantian R_1 , R_2 , R_3 , dan R_x , kemudian dilihat pengaruhnya terhadap keadaan kesetimbangan Galvanometer. Pembuktian dilakukan dengan perhitungan teoretis dengan berpegangan pada Persamaan (1) hingga Persamaan (4). Kemudian, pendekatan simulasi juga dilakukan untuk membuktikan apakah perhitungan teori sesuai dengan persamaan yang telah didefinisikan atau tidak. *Simulator* melibatkan tiga buah *Computer-based software* yang telah familiar digunakan dalam kegiatan penelitian ataupun praktikum (eksperimen), yaitu *Circuit Wizard*, *Multisim*, dan *Proteus*. Ketiga *simulator* ini diakses secara *offline* pada komputer dengan *limit* waktu 30 hari (versi *Trial*). Hasil simulasi juga dapat dijadikan sebagai acuan tentang penggunaan ketiga *simulator* tersebut. Peneliti akan mengetahui *simulator* manakah yang paling mendekati hasil perhitungan, dilihat dari parameter arus dan tegangan yang terukur pada instrument alat ukur *virtual* yang tersedia pada ketiga *simulator* tersebut.

Penelitian serupa dilakukan oleh [3], yang melakukan perancangan dan pengujian instrumen alat ukur rengangan (*strain gauge*) dengan memanfaatkan rangkaian jembatan *Wheatstone*, dimana *proof-of-design* dilakukan menggunakan *Proteus*. Kemudian, pada [4] melakukan rekayasa rangkaian jembatan *Wheatstone* pada sensor *parallel wire* yang disimulasikan menggunakan *Proteus*. Selanjutnya, Ref. [5] melakukan eksperimen tentang efisiensi penggunaan rangkaian jembatan *Wheatstone* terhadap sensor suhu. Pada [6], mengeksplorasi rangkaian jembatan *Wheatstone* untuk keperluan pengembangan modul praktikum listrik dinamis pada pembelajaran praktikum fisika listrik. Namun, modul praktikum disediakan dengan pendekatan praktik atau pembuktian langsung, tanpa melibatkan *simulator*.

Hasil kajian pustaka menunjukkan bahwa eksplorasi rangkaian jembatan *Wheatstone* melalui variasi *simulator* belum banyak ditemukan. Aktivitas ini penting untuk dilakukan, karena sebagai pondasi awal untuk lebih memahami kepada calon perancang (*early engineer*) mengenai prinsip dasar jembatan *Wheatstone*, sebelum mereka mengembangkan dan merealisasikan *device* (dalam hal ini, rangkaian sensor dan instrumen alat ukur) yang lebih kompleks. Sehingga penelitian ini bermaksud untuk mengisi *gap* yang ditemukan tersebut. Pendekatan simulasi sangat perlu dilakukan untuk lebih mempersiapkan pengetahuan perancang saat eksperimen langsung nantinya, sehingga kerusakan pada komponen dapat diminimalisir. Artikel ini menganalisis rangkaian jembatan *Wheatstone* dengan beberapa skenario eksperimen dengan membandingkan hasil perhitungan secara teoretis dengan hasil simulasi *Circuit Wizard* (versi 1.15), *Multisim* (versi 14.0), dan *Proteus* (versi 8.5).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan perhitungan teori dan pembuktiannya dengan simulasi, yang mana terbagi atas tiga skenario eksperimen. Skenario pertama, adalah eksplorasi karakteristik rangkaian jembatan *Wheatstone* dengan salah satu hambatan yang tidak diketahui. Tujuan dari skenario ini adalah untuk membuktikan Persamaan (4). Rangkaian skenario pertama ditunjukkan pada Gambar 2, dimana terdapat empat resistor, baterai, dua buah Voltmeter yang dipasang pada titik A dan B terhadap *ground*, dan Amperemeter yang menghubungkan titik A ke B [7]. Tiga dari empat resistor dipilih secara *random*, yaitu $R_1 = 90 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, dan $R_3 = 10 \Omega$ untuk kelompok uji pertama. Untuk kelompok uji kedua, dipilih $R_1 = 60 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, dan $R_3 = 30 \Omega$, sedangkan untuk kelompok uji ketiga, dipilih $R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 90 \Omega$, dan $R_3 = 70 \Omega$. Kemudian, nilai hambatan R_4 dicari saat rangkaian jembatan *Wheatstone* dalam keadaan *balance*, yaitu saat arus yang mengalir pada titik AB = 0 Ampere. Tegangan baterai untuk eksperimen ini diatur 12 Volt.



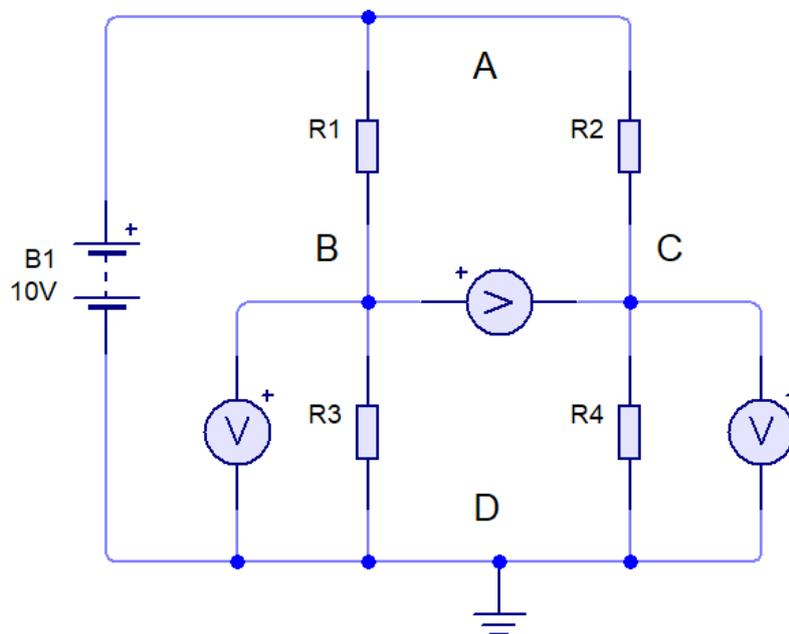
Gambar 2. Skema Rangkaian jembatan *Wheatstone* pada skenario I, mencari nilai R_4 ketika kondisi $I_{AB} = 0 A$

Skenario kedua adalah pengukuran tegangan (V_{BC}) pada rangkaian jembatan *Wheatstone*, yang kemudian dinyatakan sebagai V_{Bridge} . Rangkaian eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4 yang mana rangkaian sama seperti Gambar 3, hanya saja di Amperemeter pada titik AB diganti dengan Voltmeter (pengganti Galvanometer). Pada Gambar 3, dibuat empat titik (*node*) untuk mempermudah

penamaan (*labelling*) titik ukur, yaitu A, B, C, dan D. Tegangan baterai diatur 10V dan nilai dari 4 buah resistor divariasikan seperti pada Tabel 2, dimana pada Tabel 2 nilai V_{BD} dikondisikan lebih kecil atau lebih besar dari V_{CD} agar V_{BC} atau V_{Bridge} bernilai negatif atau positif. Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk membuktikan bahwa V_{Bridge} merupakan hasil pengurangan antara V_{CD} terhadap V_{BC} , atau $V_A - V_B$ apabila menggunakan referensi Gambar 2. Dalam keadaan setimbang, $V_A - V_B = 0 V$ atau $V_{CD} - V_{BC} = 0 V$.

TABEL 1. PENGATURAN NILAI R_1, R_2, R_3, R_4 PADA EKSPERIMEN KE-2

No	R_1	R_2	R_3	R_4	V_{BD}	V_{CD}	V_{BC}
1	1 k Ω	1 k Ω	1 k Ω	1 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
2	6 k Ω	2 k Ω	3 k Ω	1 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
3	2 k Ω	4 k Ω	1 k Ω	2 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
4	1 k Ω	1 k Ω	2 k Ω	1 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
5	1 k Ω	4 k Ω	2 k Ω	1 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
6	5 k Ω	4 k Ω	2 k Ω	1 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
7	1 k Ω	1 k Ω	1 k Ω	2 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
8	1 k Ω	2 k Ω	1 k Ω	5 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt
9	2 k Ω	1 k Ω	3 k Ω	20 k Ω	... Volt	... Volt	... Volt



Gambar 3. Skema Rangkaian jembatan *Wheatstone* pada skenario II, pembuktian $V_{CD} - V_{BC} = 0 V$

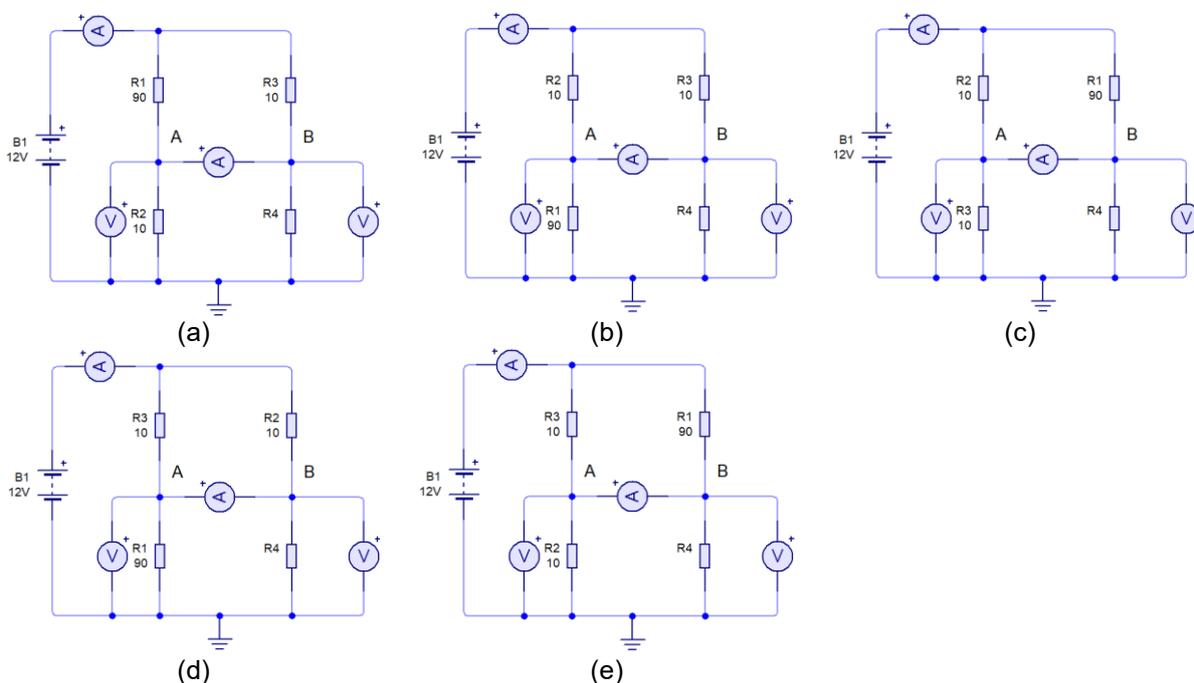
Skenario eksperimen ketiga menggunakan rangkaian yang sama dengan rangkaian pada Gambar 2 (skenario I), kemudian dipasang Amperemeter untuk mengukur arus total pada rangkaian jembatan *Wheatstone*. Nilai R_1, R_2 , dan R_3 juga mengacu pada skenario I, yaitu 90 $\Omega, 10 \Omega$, dan $R_3 = 10 \Omega$. Hanya saja posisinya diganti-ganti, kemudian menghasilkan lima rangkaian eksperimen (*case I* hingga *case V*) seperti pada Gambar 4. Untuk skenario ketiga, nomor uji II ($R_1 = 60 \Omega, R_2 = 10 \Omega$, dan $R_3 = 30 \Omega$) dan III ($R_1 = 20 \Omega, R_2 = 90 \Omega$, dan $R_3 = 70 \Omega$) juga menggunakan prosedur yang sama.

Tegangan sumber diatur 12V. Pengujian ini bertujuan untuk mencari beberapa parameter, yaitu nilai R_4 saat arus yang mengalir di titik AB = 0 Ampere dan arus total (I_{Total}). Untuk mencari I_{Total} , nilai hambatan pengganti (resistor ekuivalen) dari keempat resistor setelah rangkaian dalam keadaan *balance*, harus dicari terlebih dahulu. Nilai resistor ekuivalen (R_{Eq}), yaitu menghitung rangkaian seri dari R_1 & R_3 , kemudian R_2 & R_4 . Selanjutnya, R_{13} dan R_{24} diparalelkan, $\left(\frac{1}{R_1+R_3}\right) + \left(\frac{1}{R_2+R_4}\right)$, maka R_{Eq} dapat ditemukan. Selanjutnya arus total dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (5). R_{Eq} dapat diekspresikan seperti pada Persamaan (6) yang disederhanakan menjadi Persamaan (7),

$$I_{Total} = \frac{V}{R_{eq}} \tag{5}$$

$$I_{Total} = \frac{V}{\left(\frac{1}{R_1+R_3}\right) + \left(\frac{1}{R_2+R_4}\right)} \quad (6)$$

$$I_{Total} = \frac{V}{\frac{(R_1+R_3).(R_2+R_4)}{R_1+R_2+R_3+R_4}} \quad (7)$$



Gambar 4. Skema Rangkaian jembatan *Wheatstone* pada skenario III untuk kelompok uji I, untuk (a) *Case I*; (b) *Case II*; (c) *Case III*; (d) *Case IV*; dan (e) *Case V*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Skenario I

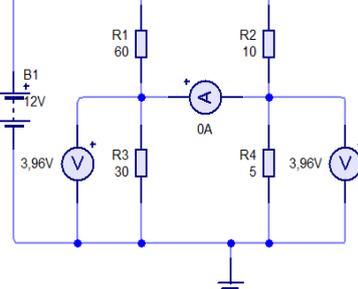
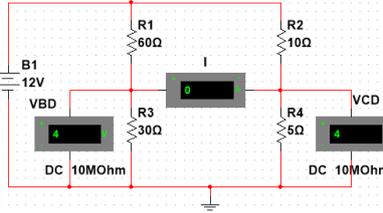
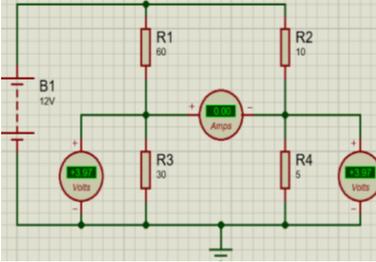
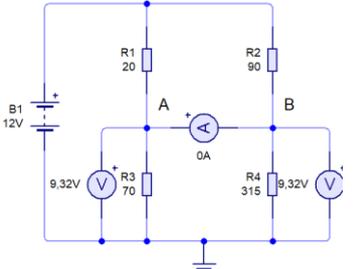
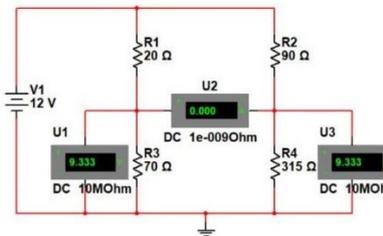
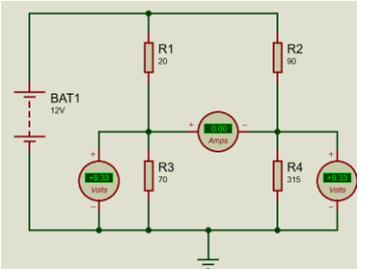
Skenario eksperimen pertama adalah mencari nilai R_4 saat arus yang mengalir di titik AB pada rangkaian jembatan *Wheatstone* sama dengan 0 Ampere (rangkaiannya *balance*). Dengan menggunakan Persamaan (4), maka nilai R_4 dapat ditemukan, yaitu 1,11 Ω . Selanjutnya, nilai R_4 dimasukkan kedalam rangkaian pada simulator untuk diperiksa apakah I_{AB} sama dengan nol atau tidak dengan nilai $R_4 = 1,11 \Omega$ (Kelompok uji pertama). Hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 3. Sedangkan kelompok uji kedua menghasilkan $R_4 = 5 \Omega$ dan kelompok uji ketiga menghasilkan $R_4 = 315 \Omega$. Hasil simulasi keduanya ditampilkan pada Tabel 4.

TABEL 2. PEMBUKTIAN NILAI R_4 SAAT ARUS YANG MENGALIR DI TITIK AB = 0 A MENGGUNAKAN SIMULATOR *CIRCUIT WIZARD, MULTISIM, DAN PROTEUS* (KELOMPOK UJI I)

<i>Circuit Wizard</i>	<i>Multisim</i>	<i>Proteus</i>
<p>Terbukti, karena ketika nilai R_4 pada simulasi <i>Circuit Wizard</i> saat diatur sama dengan 1,11</p>	<p>Terbukti, karena ketika nilai R_4 pada simulasi <i>Multisim</i> saat diatur sama dengan 1,11 Ω, $V_{AB} = 0$ A</p>	<p>Terbukti, karena nilai R_4 pada simulasi <i>Proteus</i> saat diatur sama dengan 1,11 Ω, $V_{AB} = 0$ A</p>

Ω , $V_{AB} = 106,38 \mu A$ atau sama dengan $V_{AB} = 0 A$ apabila dilakukan pembulatan

TABEL 4. PEMBUKTIAN NILAI R_4 SAAT ARUS YANG MENGALIR DI TITIK $AB = 0 A$ MENGGUNAKAN SIMULATOR *CIRCUIT WIZARD*, *MULTISIM*, DAN *PROTEUS* (KELOMPOK UJI II DAN III)

<i>Circuit Wizard</i>	<i>Multisim</i>	<i>Proteus</i>
		
<p>Terbukti, karena ketika nilai R_4 pada simulasi <i>Circuit Wizard</i> saat diatur sama dengan 5Ω, $V_{AB} = 0 A$</p>	<p>Terbukti, karena ketika nilai R_4 pada simulasi <i>Multisim</i> saat diatur sama dengan 5Ω, $V_{AB} = 0 A$</p>	<p>Terbukti, karena nilai R_4 pada simulasi <i>Proteus</i> saat diatur sama dengan 5Ω, $V_{AB} = 0 A$</p>
		
<p>Terbukti, karena ketika nilai R_4 pada simulasi <i>Circuit Wizard</i> saat diatur sama dengan 315Ω, $V_{AB} = 0 A$</p>	<p>Terbukti, karena ketika nilai R_4 pada simulasi <i>Multisim</i> saat diatur sama dengan 315Ω, $V_{AB} = 0 A$</p>	<p>Terbukti, karena nilai R_4 pada simulasi <i>Proteus</i> saat diatur sama dengan 315Ω, $V_{AB} = 0 A$</p>

Berdasarkan hasil pembuktian ketiga *simulator* yang digunakan pada Tabel 3, *Proteus* dan *Multisim* yang menunjukkan nilai yang ideal, yaitu sama persis dengan hasil perhitungan teori ($I_{AB} = 0$ Ampere), sementara pada *Circuit Wizard*, $V_{AB} = 106,38 \mu A$ atau $0,00010638 A$, meskipun tidak persis $0 A$, nilainya sangat kecil dan hampir mendekati 0 . Dengan demikian, I_{AB} dapat dibulatkan menjadi $0 A$. Artinya $R_4 = 1,11 \Omega$ untuk kelompok uji pertama sudah sesuai untuk menghasilkan rangkaian Jembatan *Wheatstone* yang seimbang. Begitupun pada Tabel 4 menunjukkan bahwa ketiga *simulator* menghasilkan $0 A$ persis. Maka, untuk kelompok uji kedua dan ketiga sama-sama sudah sesuai untuk menghasilkan rangkaian Jembatan *Wheatstone* yang seimbang.

Hasil simulasi ini mengkonfirmasi penelitian dari Ref. [8–11], bahwa saat keadaan *balance*, hampir tidak ada arus listrik yang mengalir melewati Galvanometer. Dengan demikian, prinsip jembatan *Wheatstone* memenuhi kaidahnya.

3.2 Skenario II

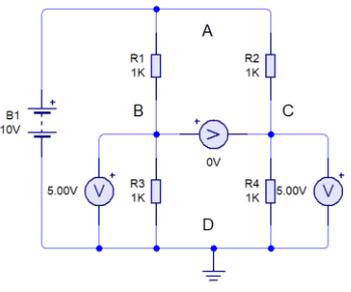
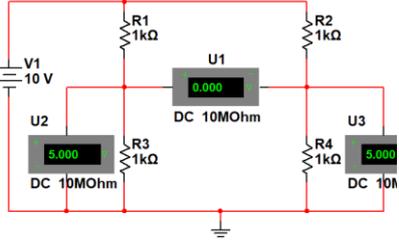
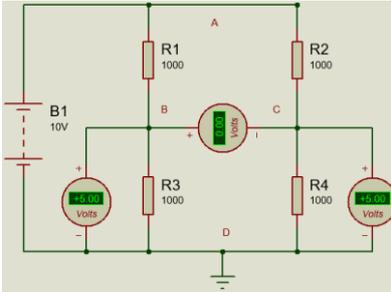
Skenario eksperimen kedua adalah melakukan pengukuran tegangan pada rangkaian jembatan *Wheatstone* (V_{Bridge}) berdasarkan perhitungan teori dan pembuktian simulasi. Tabel 5 merupakan sampel perhitungan teori untuk mengetahui hubungan antara V_{BD} dan V_{CD} terhadap V_{BC} , dimana R_1 hingga R_4 diatur sama sebesar 1000Ω . Baik V_{BD} dan V_{CD} , merupakan diperoleh dari persamaan rangkaian pembagi tegangan, dan menentukan beda potensial pada galvanometer (titik BC). Hasil menunjukkan bahwa keadaan rangkaian jembatan setimbang apabila $V_{BD} = V_{CD}$ dimana V_{BC} akan bernilai nol volt. Tabel 6 merupakan hasil percobaan pengukuran tegangan V_{Bridge} sebagai pembuktian perhitungan pada Tabel 5, menggunakan simulator *Circuit Wizard*, *Multisim*, dan *Proteus*. Hasil menunjukkan bahwa untuk kasus $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1000 \Omega$, ketiga simulator menunjukkan hasil yang sesuai dengan perhitungan teoretis. Tabel 7 merupakan hasil pengujian yang mengacu pada Tabel 2.

Agar galvanometer menunjukkan nilai 0 Volt, maka V_{BD} harus sama dengan V_{CD} , sesuai eksperimen uji nomor 1 – 3 pada Tabel 6. Sementara pada nomor uji 4 – 5 dan 7 – 9, V_{BC} tidak sama dengan nol karena V_{BD} dan V_{CD} tidak seimbang. Tegangan *output* dapat menjadi positif saat kondisi $V_{BD} > V_{CD}$ dan negatif saat $V_{BD} < V_{CD}$. Hasil simulasi membuktikan bahwa adalah benar ekspresi berikut $V_{BD} - V_{CD} = 0 V$. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi penelitian pada [8–10] dan [12–15]. Sama halnya pada skenario I, pada skenario II juga terdapat perbedaan hasil simulasi dimana *Proteus* menunjukkan hasil yang ideal atau sama persis dengan perhitungan teori. Sementara pada *Circuit Wizard* dan *Multisim* terdapat simpangan hasil pengukuran untuk nomor uji 2 dan 3. Meskipun demikian, nilainya sangat kecil yaitu skala *micro volt* (pada *Circuit Wizard*) ataupun *mili volt* (pada *Multisim*) sehingga dapat dianggap nol volt.

TABEL 5. NILAI V_{Bridge} BERDASARKAN PERHITUNGAN TEORI

Pengukuran berdasarkan perhitungan teori		
$V_{BD} = \frac{R_3}{R_1+R_3} \times E$ $= \frac{1k}{1k+1k} \times 10$ $= \frac{1k}{2k} \times 10 = 5V$	$V_{CD} = \frac{R_4}{R_2+R_4} \times E$ $= \frac{1k}{1k+1k} \times 10$ $= \frac{1k}{2k} \times 10 = 5V$	$V_{BC} = V_{BD} - V_{CD}$ $= 5V - 5V = 0V$

TABEL 6. NILAI V_{Bridge} BERDASARKAN PEMBUKTIAN SIMULASI DENGAN $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1000 \Omega$

<i>Circuit Wizard</i>	<i>Multisim</i>	<i>Proteus</i>
		
$V_{BD} = 5V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 0V$	$V_{BD} = 5V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 0V$	$V_{BD} = 5V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 0V$

TABEL 7. HASIL SELURUH PERCOBAAN PENGUKURAN TEGANGAN PADA RANGKAIAN JEMBATAN *Wheatstone* (V_{Bridge})

No	Resistor	Perhitungan Teori	Pembuktian menggunakan <i>Circuit Wizard</i>	Pembuktian menggunakan <i>Multisim</i>	Pembuktian menggunakan <i>Proteus</i>
1	R1= 1 kΩ R2= 1 kΩ R3= 1 kΩ R4= 1 kΩ	$V_{BD} = 5V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 0V$	$V_{BD} = 5V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 0V$	$V_{BD} = 5V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 0V$	$V_{BD} = 5V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 0V$
2	R1= 6 kΩ R2= 2 kΩ R3= 3 kΩ R4= 1 kΩ	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = 0V$	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = -24,08 \mu V$ = 0V (dibulatkan)	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = -0,44 mV$ = 0V(dibulatkan)	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = 0V$
3	R1= 2 kΩ R2= 4 kΩ R3= 1 kΩ R4= 2 kΩ	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = 0V$	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = 12,29 \mu V$ = 0V(dibulatkan)	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = 0,22 mV$ = 0V(dibulatkan)	$V_{BD} = 3,33 V$ $V_{CD} = 3,33 V$ $V_{BC} = 0V$
4	R1= 1 kΩ R2= 1 kΩ R3= 2 kΩ R4= 1 kΩ	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 1,67 V$	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 1,67 V$	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 1,67 V$	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 5V$ $V_{BC} = 1,67 V$
5	R1= 1 kΩ R2= 4 kΩ R3= 2 kΩ	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 2V$ $V_{BC} = 4,67 V$	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 2V$ $V_{BC} = 4,67 V$	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 2V$ $V_{BC} = 4,67 V$	$V_{BD} = 6,67 V$ $V_{CD} = 2V$ $V_{BC} = 4,67 V$

	R4= 1 kΩ				
6	R1= 5 kΩ R2= 4 kΩ R3= 2 kΩ R4= 1 kΩ	V _{BD} = 2,86 V V _{CD} = 2V V _{BC} = 0,86V	V _{BD} = 2,86 V V _{CD} = 2V V _{BC} = 0,86V	V _{BD} = 2,86 V V _{CD} = 2V V _{BC} = 0,86 V	V _{BD} = 2,86 V V _{CD} = 2V V _{BC} = 0,86V
7	R1= 1 kΩ R2= 1 kΩ R3= 1 kΩ R4= 2 kΩ	V _{BD} = 5V V _{CD} = 6,67 V V _{BC} = -1,67 V	V _{BD} = 5V V _{CD} = 6,67 V V _{BC} = -1,67 V	V _{BD} = 5V V _{CD} = 6,67 V V _{BC} = -1,67V	V _{BD} = 5V V _{CD} = 6,67 V V _{BC} = -1,67 V
8	R1= 1 kΩ R2= 2 kΩ R3= 1 kΩ R4= 5 kΩ	V _{BD} = 5V V _{CD} = 7,14 V V _{BC} = -2,14 V	V _{BD} = 5V V _{CD} = 7,14 V V _{BC} = -2,14 V	V _{BD} = 5V V _{CD} = 7,14 V V _{BC} = -2,14 V	V _{BD} = 5V V _{CD} = 7,14 V V _{BC} = -2,14 V
9	R1= 2 kΩ R2= 1 kΩ R3= 3 kΩ R4=20kΩ	V _{BD} = 6V V _{CD} = 9,52 V V _{BC} = -3,52 V	V _{BD} = 6V V _{CD} = 9,52 V V _{BC} = -3,52 V	V _{BD} = 6V V _{CD} = 9,52 V V _{BC} = -3,52 V	V _{BD} = 6V V _{CD} = 9,52 V V _{BC} = -3,52 V

3.3 Skenario III

Skenario eksperimen ketiga adalah untuk menemukan nilai R₄ dengan R₁, R₂, R₃ yang telah ditentukan sesuai kelompok uji pada skenario I. Nilai R₄ agar menghasilkan I_{AB} = 0 A, dapat dihitung menggunakan Persamaan (4). Setelah keadaan *balance*, nilai R_{Eq} dapat ditemukan dengan menggunakan rumus $\left(\frac{1}{R_1+R_3}\right) + \left(\frac{1}{R_2+R_4}\right)$, dan nilai I_{total} dapat dihitung menggunakan Persamaan (7). Tabel 8 merupakan sampel perhitungan R₄, R_{Eq}, dan I_{Total}, (untuk nomor uji I, II, dan III) dan hasil simulasinya ditunjukkan pada Tabel 9 (khusus nomor uji I). Pada kelompok uji pertama, hasil menunjukkan bahwa *Circuit Wizard* dan *Proteus* menghasilkan nilai ukur yang sama, yaitu 1,19 A. Sedangkan pada *Multisim* menghasilkan 1,220 A. Baik perhitungan maupun pembuktian simulasi, apabila dibulatkan akan menghasilkan angka 1,2 A. Selanjutnya, nilai resistor ditukar posisinya seperti pada Gambar 4 dan dihitung dengan cara yang sama. Hasil yang lebih detail mengenai perbandingan perhitungan teori (R₄, R_{Eq}, dan I_{Total}) dengan data hasil simulasi (*Circuit Wizard*, *Multisim*, dan *Proteus*) pada kelompok uji pertama, ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 10 adalah hasil simulasi I_{total} untuk nomor uji II dan III. Pembulatan nilai yang ditunjukkan oleh *Multisim*, *Proteus*, *Circuit Wizard* sama dengan perhitungan teori, yaitu sekitar 0,51 A dan 0,14 A. Tabel 12 dan Tabel 13 merupakan hasil yang lebih detail mengenai perbandingan R₄, R_{Eq}, dan I_{Total} secara teori terhadap data hasil ketiga simulator yang digunakan, untuk kelompok uji kedua dan ketiga. Hasil eksperimen ini dapat mengkonfirmasi Ref. [10–11] dan Ref. [15–19], yang mendeskripsikan prinsip dasar dari jembatan *Wheatstone* mulai dari sifat Galvanometer, keterhubungan keempat resistor, dan I_{Total}.

TABEL 8. NILAI R₄ SAAT ARUS YANG MENGALIR DI TITIK AB = 0 A, SERTA NILAI R_{Eq} DAN I_{Total} BERDASARKAN PERHITUNGAN TEORI (KELOMPOK UJI I, II, III)

Perhitungan R ₄ secara Teori	Perhitungan hambatan pengganti (R _{Eq})	Perhitungan arus total rangkaian
$R_1 R_4 = R_2 R_3$ $R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$ $= \frac{10 \times 10}{90}$ $= 1,11 \Omega$	$R_1 + R_2 = 90 + 10 = 100 \Omega$ $R_3 + R_4 = 10 + 1,11 = 11,11 \Omega$ $\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{100} + \frac{1}{11,11}$ $= \frac{11,11 + 100}{1111}$ $R_{total} = \frac{1111}{111,11} = 9,99 \Omega$	$I_{Total} = \frac{E}{R_{total}}$ $= \frac{12}{9,99 \Omega}$ $= 1,2012 \text{ A}$
$R_1 R_4 = R_2 R_3$ $R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$ $= \frac{10 \times 30}{60}$ $= 5 \Omega$	$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}$ $\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{60 + 10} + \frac{1}{30 + 5}$ $\frac{1}{R_{tot}} = \frac{3}{70}$ $R_{tot} = 23,33 \Omega$	$I_{Total} = \frac{E}{R_{total}}$ $= \frac{12}{23,33 \Omega}$ $= 0,514 \text{ A}$

$R_1 R_4 = R_2 R_3$ $R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$ $= \frac{70 \times 90}{20}$ $= 315 \Omega$	$R_1 + R_2 = 20 + 90 = 110 \Omega$ $R_3 + R_4 = 70 + 315 = 385 \Omega$ $\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{110} + \frac{1}{385}$ $= \frac{9}{770}$ $R_{total} = 85,56 \Omega$	$I_{Total} = \frac{E}{R_{total}}$ $= \frac{12}{85,56 \Omega}$ $= 0,1402 \text{ A}$
--	---	--

Melalui eksperimen ini dapat disimpulkan bahwa I_{Total} akan berbeda meskipun perubahan posisi R_1, R_2, R_3, R_4 menghasilkan $I_{AB} = 0 \text{ A}$ (rangkaiian jembatan *Wheatstone* setimbang). Karena, nilai R_4 berbeda untuk menghasilkan keadaan setimbang. Dengan demikian, arus yang mengalir pada tiap-tiap resistor atau distribusi daya pada R_1, R_2, R_3 , dan R_4 juga berbeda.

TABEL 9. NILAI R_4 SAAT ARUS YANG MENGALIR DI TITIK AB = 0 VOLT, NILAI R_{Eq} DAN I_{Total} BERDASARKAN HASIL SIMULASI (KELOMPOK UJI I)

<i>Circuit Wizard</i>	<i>Multisim</i>	<i>Proteus</i>
Nilai R_4 pada simulasi <i>Circuit Wizard</i> diatur 1,11 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 1,19 \text{ A}$	Nilai R_4 pada simulasi <i>Multisim</i> diatur 1,11 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 1,220 \text{ A}$	Nilai R_4 pada simulasi <i>Proteus</i> diatur 1,11 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 1,19 \text{ A}$

TABEL 10. NILAI R_4 SAAT ARUS YANG MENGALIR DI TITIK AB = 0 VOLT, NILAI R_{Eq} DAN I_{Total} BERDASARKAN HASIL SIMULASI (KELOMPOK UJI II DAN III)

<i>Circuit Wizard</i>	<i>Multisim</i>	<i>Proteus</i>
Nilai R_4 pada simulasi <i>Circuit Wizard</i> diatur 5 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 511,63 \text{ mA}$	Nilai R_4 pada simulasi <i>Multisim</i> diatur 5 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 0,514 \text{ A}$	Nilai R_4 pada simulasi <i>Proteus</i> diatur 5 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 0,51 \text{ A}$
Nilai R_4 pada simulasi <i>Circuit Wizard</i> diatur 315 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 140,06 \text{ mA}$ atau 0,14006 A	Nilai R_4 pada simulasi <i>Multisim</i> diatur 315 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 0,14 \text{ A}$	Nilai R_4 pada simulasi <i>Proteus</i> diatur 315 Ω , dan menghasilkan $I_{Total} = 0,14 \text{ A}$

TABEL 11. HASIL SELURUH PERCOBAAN Mencari nilai R_4 saat arus yang mengalir di titik AB = 0 A, nilai R_{Eq} dan I_{Total} menggunakan *Circuit Wizard*, *Multisim*, dan *Proteus* (kelompok uji I)

Case	Nilai R_4 secara Teori	Nilai R_{Eq} dan I_{Tot} secara teori	Pembuktian menggunakan <i>Circuit Wizard</i>	Pembuktian menggunakan <i>Multisim</i>	Pembuktian menggunakan <i>Proteus</i>
I	1,11 Ω	Nilai R_{Eq} = 9,99 Ω Nilai I_{Total} = 1,20 A	Nilai R_4 = 1,11 Ω Nilai I_{Total} = 1,19A	Nilai R_4 = 1,11 Ω Nilai I_{Total} = 1,2 A	Nilai R_4 = 1,11 Ω Nilai I_{Total} = 1,19 A
II	90 Ω	Nilai R_{Eq} = 50 Ω Nilai I_{Total} = 0,24 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,24 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 1,26 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,24 A
III	90 Ω	Nilai R_{Eq} = 18 Ω Nilai I_{Total} = 0,67 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,66A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,98 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,66 A
IV	90 Ω	Nilai R_{Eq} = 50 Ω Nilai I_{Total} = 0,24 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,24 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 1,26 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,24 A
V	90 Ω	Nilai R_{Eq} = 50 Ω Nilai I_{Total} = 0,67 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,66 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,94 A	Nilai R_4 = 90 Ω Nilai I_{Total} = 0,66 A

TABEL 12. HASIL SELURUH PERCOBAAN Mencari nilai R_4 saat arus yang mengalir di titik AB = 0 A, nilai R_{Eq} dan I_{Total} menggunakan *Circuit Wizard*, *Multisim*, dan *Proteus* (kelompok uji II)

Case	Nilai R_4 secara Teori	Nilai R_{Eq} dan I_{Tot} secara teori	Pembuktian menggunakan <i>Circuit Wizard</i>	Pembuktian menggunakan <i>Multisim</i>	Pembuktian menggunakan <i>Proteus</i>
I	5 Ω	Nilai R_{Eq} = 23,33 Ω Nilai I_{Total} = 0,514A	Nilai R_4 = 5 Ω Nilai I_{Total} = 511,63 mA	Nilai R_4 = 5 Ω Nilai I_{Total} = 0,514 A	Nilai R_4 = 5 Ω Nilai I_{Total} = 0,51 A
II	180 Ω	Nilai R_{Eq} = 52,5 Ω Nilai I_{Total} = 0,228A	Nilai R_4 = 180 Ω Nilai I_{Total} = 228,05 A	Nilai R_4 = 180 Ω Nilai I_{Total} = 0,229A	Nilai R_4 = 180 Ω Nilai I_{Total} = 0,23A
III	180 Ω	Nilai R_{Eq} = 34,29 Ω Nilai I_{Total} = 0,349A	Nilai R_4 = 180 Ω Nilai I_{Total} = 348,77mA	Nilai R_4 = 180 Ω Nilai I_{Total} = 0,35 A	Nilai R_4 = 180 Ω Nilai I_{Total} = 0,35 A
IV	20 Ω	Nilai R_{Eq} = 22,5 Ω Nilai I_{Total} = 0,53 A	Nilai R_4 = 20 Ω Nilai I_{Total} = 530,48 A	Nilai R_4 = 20 Ω Nilai I_{Total} = 0,53 A	Nilai R_4 = 20 Ω Nilai I_{Total} = 0,533A
V	20 Ω	Nilai R_{Eq} = 26,67 Ω Nilai I_{Total} = 0,449A	Nilai R_4 = 20 Ω Nilai I_{Total} = 447,97 A	Nilai R_4 = 20 Ω Nilai I_{Total} = 0,45 A	Nilai R_4 = 20 Ω Nilai I_{Total} = 0,45 A

TABEL 13. HASIL SELURUH PERCOBAAN Mencari nilai R_4 saat arus yang mengalir di titik AB = 0 A, nilai R_{Eq} dan I_{Total} menggunakan *Circuit Wizard*, *Multisim*, dan *Proteus* (kelompok uji III)

Case	Nilai R_4 secara Teori	Nilai R_{Eq} dan I_{Tot} secara teori	Pembuktian menggunakan <i>Circuit Wizard</i>	Pembuktian menggunakan <i>Multisim</i>	Pembuktian menggunakan <i>Proteus</i>
I	315 Ω	Nilai R_{Eq} = 85,56 Ω Nilai I_{Total} = 0,1402 A	Nilai R_4 = 315 Ω Nilai I_{Total} = 0,14 A	Nilai R_4 = 315 Ω Nilai I_{Total} = 0,14 A	Nilai R_4 = 315 Ω Nilai I_{Total} = 0,14 A
II	15,56 Ω	Nilai R_{Eq} = 48,1263 Ω Nilai I_{Total} = 0,2493 A	Nilai R_4 = 15,56 Ω Nilai I_{Total} = 0,24872A	Nilai R_4 = 15,56 Ω Nilai I_{Total} = 0,249 A	Nilai R_4 = 15,56 Ω Nilai I_{Total} = 0,25 A
III	15,56 Ω	Nilai R_{Eq} = 29,0938 Ω Nilai I_{Total} = 0,4124 A	Nilai R_4 = 15,56 Ω Nilai I_{Total} = 0,41075A	Nilai R_4 = 15,56 Ω Nilai I_{Total} = 0,412 A	Nilai R_4 = 15,56 Ω Nilai I_{Total} = 0,41 A
IV	25,7142 Ω	Nilai R_{Eq} = 50,6251 Ω Nilai I_{Total} = 0,237 A	Nilai R_4 = 25,71 Ω Nilai I_{Total} = 0,2364 A	Nilai R_4 = 25,7142 Ω Nilai I_{Total} = 1,237A	Nilai R_4 = 25,7142 Ω Nilai I_{Total} = 0,24 A
V	25,7142 Ω	Nilai R_{Eq} = 35,55 Ω Nilai I_{Total} = 0,3375 A	Nilai R_4 = 25,71 Ω Nilai I_{Total} = 0,3363 A	Nilai R_4 = 25,7142 Ω Nilai I_{Total} = 1,338A	Nilai R_4 = 25,7142 Ω Nilai I_{Total} = 0,34 A

3.4 Perbandingan performansi Simulator terhadap rangkaian jembatan Wheatstone

Bagian ini mendeskripsikan perbandingan antara ketiga simulator yang digunakan, yaitu *Circuit Wizard* versi 1.15, *Multisim* versi 14.0, dan *Proteus* versi 8.5 dipandang dari beberapa aspek, yaitu *Graphical User Interface* (GUI), kelengkapan komponen dan alat ukur, aksesabilitas (faktor gratis atau tidak), fitur *simulator*, ketelitian dan keakuratan atau kebenaran hasil simulasi sesuai teori, dan kemudahan penggunaan. Perbandingan ini disimpulkan berdasarkan pengalaman (*experiences*) ketika eksperimen rangkaian jembatan *Wheatstone* sehingga untuk analisis rangkaian lainnya (baik digital maupun analog), tentu akan menghasilkan kesimpulan yang berbeda dari masing-masing *software*. Ketiganya memiliki persamaan, yaitu bersifat *offline* sehingga *user* harus mengunduh pada situs resmi masing-masing. Selain itu, ketiga *software* ini berbayar. Dengan demikian, agar dapat mengaksesnya, maka pada eksperimen ini menggunakan versi *Trial*. Perbedaan hasil simulasi, kemungkinan dapat dipengaruhi oleh versi dari masing-masing *simulator*.

TABEL 3. PERFORMANSI *CIRCUIT WIZARD*, *MULTISIM*, DAN *PROTEUS* UNTUK CASE SIMULASI RANGKAIAN JEMBATAN *WHEATSTONE*

Circuit Wizard	<p><i>Circuit Wizard</i> menyediakan fitur penyusunan rangkaian menjadi tiga bagian, yaitu: <i>Circuit Diagram</i> yaitu simulasi rangkaian skematik (2 Dimensi), <i>PCB layout</i> yaitu simulasi laboratorium virtual (3 Dimensi), serta <i>Bill of materials</i> yaitu perkiraan <i>cost</i> dari komponen-komponen yang digunakan dalam simulasi. <i>Circuit Wizard</i> lebih ringan dipakai disertai <i>UI/UX design</i> yang menarik apalagi saat masuk pada mode laboratorium virtual (bagian <i>PCB Layout</i>), mudah dipakai karena tidak terlalu banyak menu dan komponen sehingga <i>desainer</i> rangkaian pemula akan cepat memahami penggunaan atau pengoperasian <i>Circuit Wizard</i>. Kemudian, memiliki keakuratan perhitungan yang baik karena satuan yang disediakan hingga 10^{-12}, akan tetapi karena hal inilah hasil eksperimen pada rangkaian jembatan <i>Wheatstone</i> tidak sama persis dengan hasil ideal. Sebagai contoh, saat simulasi nilai Galvanometer dan Amperemeter tidak bernilai nol melainkan memiliki nilai meskipun sangat kecil (orde <i>microvolt</i>). Apabila rangkaian kompleks, maka akan bermasalah karena nilai arus dan tegangannya dipastikan akan menyimpang jauh dari hasil perhitungan.</p>
Multisim	<p><i>Multisim</i> menyediakan <i>Toolbox design</i> sehingga dapat mengelola dan mengontrol berbagai jenis file dalam satu atau beberapa proyek, misalnya: skema, PCB, dan laporan dengan menampilkan atau menyembunyikan lapisan yang berbeda. Terdapat pula <i>Spreadsheet View</i> yang memungkinkan pengguna dapat mengedit parameter komponen dalam satu langkah, seperti mengedit rincian komponen <i>trace</i> kaki, <i>RefDes</i>, atribut dan kendala saat proses desain. Meskipun <i>Multisim</i> cukup ringan diakses pada PC, namun secara <i>UI/UX design</i> sedikit membingungkan bagi <i>designer</i> pemula. Seperti contoh bentuk alat ukur <i>Voltmeter</i> dan <i>Amperemeter</i> yang tidak mewakili simbol ataupun seperti alat ukur <i>real</i>, melainkan berbentuk persegi panjang yang posisi keterangan kutub (+) dan kutub (-) alat ukur tidak berada didekat titik atau <i>probe</i>. Selain itu, selain nilai yang tertera pada box alat ukur, terdapat keterangan satuan Ohm yang dapat membuat rancu pembacaan alat ukur. Sebenarnya, angka resistansi yang tertera merupakan hambatan dalam alat ukur. Faktor hambatan dalam ini memungkinkan hasil pembacaan tegangan dan arus menjadi tidak ideal, atau sama persis dengan perhitungan teoretis, ada pergeseran namun dalam <i>range</i> yang sangat kecil. <i>Multisim</i> menyediakan komponen yang sangat lengkap, yaitu terdiri atas model dari beberapa Vendor. Tidak seperti <i>Circuit Wizard</i> yang komponen elektroniknya serta model yang tersedia sangat terbatas. Pencarian komponen dapat dilakukan pada fitur kolom pencarian, namun <i>user</i> perlu memerlukan waktu yang cukup lama untuk terbiasa menggunakannya karena ribuan <i>database</i> komponen yang disediakan tersebut. Untuk mempermudah, umumnya menggunakan komponen yang ideal. <i>Multisim</i> mensimulasikan rangkaian dalam bentuk skematik dan tidak memiliki fitur <i>Virtual Lab</i> seperti halnya <i>Circuit Wizard</i>.</p>
Proteus	<p><i>Proteus</i> menyediakan perancangan rangkaian elektronik menggunakan <i>Template Layout</i> secara <i>default</i> atau memilih beragam <i>PCB layout</i> yang telah disediakan. Pada dasarnya, <i>Proteus</i> terdiri atas dua buah <i>Software</i>, yaitu <i>ISIS</i> dan <i>ARES</i> yang masing-masing memiliki fungsi yang berbeda yaitu untuk merancang dan mensimulasikan suatu rangkaian dan untuk mendesain atau mengkonversi rangkaian kedalam PCB. Fitur ini tidak dimiliki oleh <i>Multisim</i>. Namun, justeru karena itulah, apabila PC tidak</p>

	memiliki spesifikasi yang bagus, maka <i>Proteus</i> akan mudah <i>not responding</i> karena <i>me-load</i> dua buah <i>software</i> sekaligus. Sama halnya <i>Circuit Wizard</i> , secara desain UI/UX pada <i>Proteus</i> ramah bagi <i>user</i> . Kolom pencarian untuk komponen sangat mempercepat pekerjaan. Disisi lain, hasil simulasi pada <i>Proteus</i> untuk parameter pengukuran tegangan dan arus lebih akurat dibandingkan kedua simulator yang lainnya.
--	--

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Rangkaian jembatan *Wheatstone* telah berhasil dieksplorasi pada penelitian ini melalui pendekatan perhitungan matematis dan simulasi *offline* menggunakan *Circuit Wizard*, Multisim, dan *Proteus*. Rangkaian uji dalam eksperimen ini terdiri atas empat buah resistor yang disusun seperti dua buah rangkaian pembagi tegangan, dimana salah satu resistansinya tidak diketahui (R_x). Kemudian, *output* dari dua rangkain pembagi tegangan saling terhubung melalui Galvanometer. Hasil eksperimen pada rangkaian jembatan *Wheatstone* melalui tiga skenario pengujian telah mengkonfirmasi kebenaran teori rangkaian. Ketika dua rangkaian pembagi tegangan tidak seimbang (apabila $R_1 \times R_x \neq R_2 \times R_3$), maka akan Galvanometer tidak sama dengan nol volt. Galvanometer akan menunjukkan tegangan positif (kondisi $V_{BD} > V_{CD}$) dan negatif (kondisi $V_{BD} < V_{CD}$). Simpangan inilah nantinya dapat dimanfaatkan sebagai alat ukur hambatan dan rangkaian sensor. Arus total (I_{Tot}) yang mengalir pada rangkaian jembatan *Wheatstone* berpengaruh terhadap perubahan posisi nilai resistor untuk R_1 , R_2 , dan R_3 meskipun dalam keadaan setimbang dan tegangan sumber yang sama. Hal ini karena letak R_1 , R_2 , R_3 , dan R_4 menghasilkan hitungan resistor seri/paralel yang berbeda sehingga R_{Eq} berbeda. Masing-masing *simulator* memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, namun untuk kasus pengukuran tegangan dan arus pada rangkaian jembatan *Wheatstone*, *Proteus* lebih sesuai dengan perhitungan matematis

Penelitian ini cukup strategis untuk dilanjutkan terutama berkaitan dengan variasi *software* yang digunakan, tujuannya adalah untuk mengetahui *simulator* manakah yang paling ideal agar dapat digunakan dalam perancangan rangkaian dasar jembatan *Wheatstone*. Dengan demikian, rangkaian yang lebih kompleks dapat disimulasikan pada *software* tersebut dengan mempertimbangkan parameter-parameter yang telah didefinisikan pada perbandingan *simulator* (Bab 3.4). Oleh karena itu, pada penelitian berikutnya, peneliti akan menggunakan berbagai *simulator* yang tersedia baik diakses *online* ataupun *offline*. *Simulator* jenis *online* misalnya EasyEda (<https://easyeda.com/>), Circuit Simulator Applet (<https://www.falstad.com/circuit/>), DCAC Lab (<https://dcaclab.com/en/lab>), Every Circuit (<https://everycircuit.com/>), Circuit Lab (<https://www.circuitlab.com/>), Partsim (<https://www.partsim.com/>), ThinkerCad, dan sebagainya. Kemudian simulator jenis *offline* selain *Circuit Wizard*, *Multisim* dan *Proteus*, yaitu: *Electronic Workbench* (EWB), PSIM, YENKA, TINA SPICE, dan lain sebagainya.

5. REFERENSI

- [1] R. Lockhat, "Physics: Wheatstone bridge," *Southern African Journal of Anaesthesia and Analgesia*, pp. S100-101, 2020.
- [2] D. Herlan, "Studi Pengaruh Pengaman Galvanometer Terhadap Keakuratan Hasil Pengukuran Resistor Pada Jembatan Wheatstone Sederhana," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, pp. 2-4, November 2014.
- [3] Oluwole, Olanipekun, and Ajide, "Design, construction and Testing of a strain gauge Instrument ," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6 , no. 4, April 2015.
- [4] M. Armana and A. Badarudin, "Studi Awal Sistem Akuisisi Data Tebal Cairan Aliran Dua Fase Air-udara pada Pipa Horizontal Menggunakan Parallel Wir," *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, vol. 6, pp. 142-145, November 2015.
- [5] S. Pan and K. A. A. Makinwa, "A 10 fJ ·K2 Wheatstone Bridge Temperature Sensor With a Tail-Resistor-Linearized OTA," *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*, September 2020.
- [6] P. I. Nursuhud, "Pengembangan Perangkat Praktikum Listrik Dinamis Pada Mata Kuliah Eksperimen Fisika Materi Jembatan Wheatstone," *Universitas Negeri Semarang*, p. Juni, 2016.
- [7] S. Fuada, *Elektronika Dasar untuk Mahasiswa Teknik Telekomunikasi: Pendekatan Praktik secara Virtual Edisi II*. Tangerang, Banten: Media Edukasi Indonesia, 2021.
- [8] Y. D. T. uwariyah, "Analisa Resistivitas Kawat Penghantar Ditinjau Dari Metode Jembatan Wheatstone Dan Metode Hukum Ohm Pada Modul Praktikum Fisika," *Bina Teknika*, vol. XII, pp. 239-244, 2017.

- [9] Hartono, I. P. Sugito, "Rancang Bangun Sistem Pengukuran Pergeseran Tanah Menggunakan Sensor Variabel Resistor," *Berkala Fisika*, vol. XVIII, pp. 9 - 16, Januari 2015.
- [10] A. Harijanto, S. H. B. Prastowo, D. I. Pratiwi, "Analisis Hubungan Daya Hantar Listrik Dengan Total Dissolved Solid (TDS) Pada Air Minum Isi Ulang Di Sekitar Kampus Jember," *FKIP E-proceeding*, vol. 4, pp. 271-274, Desember 2019.
- [11] Y. Tie-Zhu, "Development of Wheatstone bridge and Kelvin bridge Simulation Experiment System Based on LabVIEW," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1792, p. 012083, Februari 2021.
- [12] B. Anggraheny, A. Parastiwi, Y. R. Pratama, "Desain Sistem Kontrol Suhu Pada Paralel Split Flow Heat Exchanger Dengan Algoritma Fuzzy ," *Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. VI, pp. 43--49, 2021.
- [13] M. Saeedi and R. Effatnejad, "A New Design of Dual-Axis Solar Tracking System with LDR sensors by Using the Wheatstone Bridge Circuit ," TechRxiv, 2021.
- [14] H. Jiang and K. A. A. Makinwa "Energy-Efficient Bridge-to-Digital Converters ," *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, p. 17, 2018.
- [15] H. Jiang, J. G. Vogel, S. Nihtianov, "A Power-Efficient Readout for Wheatstone-Bridge Sensors with COTS Components ," *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, pp. 1-7, April 2018.
- [16] P. R. Nagarajan, B. George, V. J. Kumar, "A Linearizing Digitizer for Wheatstone Bridge Based Signal Conditioning of Resistive Sensors," *IEEE Sensor Journal*, vol. XVII, Maret 2017.
- [17] H. Jiang, X. Tian, X. Deng, X. Zhao, L. Zhang, W. Zhang, J. Zhang, Y. Hwang, "Low Concentration Response Hydrogen Sensors Based on Wheatstone Bridge," *Sensors*, vol. XIX, p. 1096, Januari 2019.
- [18] S. Yan, Z. Cao, Z. Guo, Z. Zheng, A. Cao, Y. Qi, Q. Leng, W. Zhao, "Design and Fabrication of Full WheatstoneBridge-Based Angular GMR Sensors," *Sensors*, vol. XVIII, p. 1832, Juni 2018.
- [19] E. J. Beggs, J. F. Costa, J. V. Tucker, "Physical Oracles: The Turing Machine and the Wheatstone Bridge," *Studia Logica*, pp. 279-300, 2010.