

Rancang Bangun Ohmmeter Berbasis Modulasi Lebar Pulsa (PWM)

^{1,2}Dika Setiawan^{*}, ¹Wifda Rahmatiya Hasna, ¹Atikah Ardi & ¹Hendro

¹ Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Bandung

²UPT Balai Pengembangan Instrumentasi, LIPI

dikasetiawan09@gmail.com ^{*})

Abstrak

Pada makalah ini akan dibahas mengenai sistem pengukuran hambatan listrik dari suatu komponen resistif atau *Device Under Test* (D.U.T) dengan metode volt-ampere yang memanfaatkan sinyal PWM. Alat ukur hambatan listrik atau ohmmeter yang bekerja berdasarkan metode volt-ampere terdiri dari sistem pembangkit (sumber) arus konstan dan sistem pengukur tegangan. Arus uji dari ohmmeter yang dibahas pada makalah ini dihasilkan dari pengolahan sinyal PWM (dengan resolusi 10-bit) yang dibangkitkan oleh modul Arduino Uno. Sinyal PWM tersebut kemudian dirata-ratakan oleh rangkaian filter RC berpenyangga sehingga dihasilkan tegangan searah (DC) yang sebanding dengan lebar pulsa dari sinyal PWM yang dibangkitkan. Tegangan DC ini kemudian diumpungkan ke rangkaian HCP sehingga dihasilkan arus uji yang sebanding dengan lebar pulsa dari sinyal PWM tersebut. Tegangan jatuh pada D.U.T akan sebanding dengan arus uji yang mengalir padanya. Tegangan jatuh pada D.U.T kemudian ditangkap oleh rangkaian penguat awal (*pre-amp*) kemudian diukur menggunakan Digital Voltmeter. Hasil pengukuran dari ohmmeter yang dibuat memiliki akurasi terbaik dibawah 0.1% jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan ohmmeter referensi.

Kata Kunci: ohmmeter, Pulse Width Modulation, filter RC, Howland Current Pump

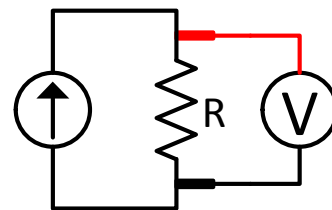
1 Pendahuluan

Pada tahun 1826, seorang fisikawan bernama Georg Simon Ohm menemukan hubungan antara tegangan, arus, dan hambatan listrik dimana besarnya arus I yang mengalir melalui hambatan R pada sebuah rangkaian tertutup akan sebanding dengan sumber tegangan V yang menyebabkannya dan berbanding terbalik dengan hambatan listrik yang dilaluinya [1]. Pernyataan tersebut dikenal sebagai Hukum Ohm yang secara matematis dapat diungkapkan sebagai

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

Ungkapan diatas menyiratkan makna bahwa hambatan listrik dari suatu objek dapat diketahui dengan cara mengalirkan arus (yang besarnya sudah diketahui) melalui objek tersebut kemudian

mengukur tegangan jatuhnya. Metode tersebut dikenal sebagai metode Volt-Ampere dan dapat diilustrasikan seperti gambar 1. Penerapan metode Volt-Ampere untuk pengukuran hambatan listrik pada berbagai media dan rentang ukur dapat dijumpai pada referensi [2], [3], dan [4]. Untuk selanjutnya, objek yang akan diukur hambatan listriknya disebut *Device Under Test* atau D.U.T.



Gambar 1 ilustrasi pengukuran hambatan listrik berdasarkan Hukum Ohm

Dari uraian diatas dapat disimpulkan bahwa untuk mengukur hambatan listrik menggunakan metode Volt-Ampere, setidaknya dibutuhkan dua hal yakni sumber arus konstan dan alat ukur tegangan (voltmeter). Sistem pengukuran hambatan seperti pada gambar 1 akan bekerja dengan optimal apabila arus uji yang dihasilkan oleh sumber arus nilainya selalu konstan (tidak terpengaruh oleh hambatan D.U.T). Selain itu, voltmeter yang digunakan juga harus memiliki impedansi input yang sangat tinggi sehingga arus uji sepenuhnya mengalir ke D.U.T (tidak ada arus uji yang mengalir ke voltmeter).

Hambatan listrik dari sebuah D.U.T juga dapat diketahui dengan cara menempatkan D.U.T tersebut sebagai salah satu komponen dari rangkaian osilator, seperti dikemukakan pada referensi [5]. Konstanta-waktu (dan juga frekuensi osilasi) dari osilator akan berbeda untuk nilai hambatan yang berbeda. Nilai hambatan dari D.U.T dapat diketahui dengan mengukur frekuensi osilasi yang dihasilkan osilator kemudian membaginya dengan sebuah konstanta dan kapasitansi dari kapasitor yang digunakan. Namun sayangnya metode ini kurang efektif untuk pengukuran hambatan listrik dibawah 100Ω.

1.1 Sumber Arus

Sumber arus pada hakikatnya adalah sebuah sumber tegangan yang memiliki impedansi sangat tinggi dimana nilai tegangan yang dibangkitkan dapat berubah (secara otomatis) sehingga arus yang mengalir menuju beban akan tetap sama berapapun besar bebannya [6]. Pada sistem pengukuran hambatan (seperti diilustrasikan pada Gambar 1), D.U.T merupakan beban bagi sumber arus. Dalam prakteknya, tegangan internal dari sebuah sumber nilainya terbatas sehingga arus yang dihasilkan oleh sebuah sumber arus akan berkurang seiring bertambahnya beban.

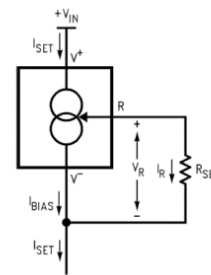
Terbatasnya kemampuan sumber arus menyebabkan terbatasnya pula rentang pengukuran hambatan. Alat ukur hambatan (ohmmeter) dengan rentang ukur yang lebar tentunya harus memiliki kemampuan untuk menghasilkan arus uji yang bervariasi sesuai dengan rentang pengukuran yang digunakan. Sebagai contoh, Tabel 1 memberikan informasi mengenai arus uji dari sebuah produk multimeter yang memiliki fitur pengukuran hambatan [7].

Tabel 1 arus uji untuk pengukuran hambatan dari sebuah produk multimeter

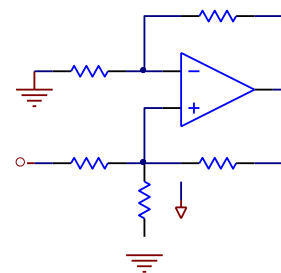
Rentang Ukur	Arus uji maksimum
400 Ω	200 μA
4 kΩ	80 μA
40 kΩ	12 μA
400 kΩ	1.4 μA
4 MΩ	0.2 μA
40 MΩ	0.2 μA

Dengan kecanggihan teknologi semikonduktor yang ada sekarang, berbagai macam rangkaian terpadu (*Integrated Circuit* atau I.C.) telah dikembangkan. LM334 adalah salah satu contoh sumber arus dalam bentuk IC yang memiliki tiga pin [8]. Arus output (I_{SET}) yang dihasilkan dapat diatur dengan cara mengubah-ubah nilai resistor (R_{SET}) antara pin R dan pin V . Pemanfaatan LM334 pada aplikasi ohmmeter multi-rentang (seperti pada tabel 1) membutuhkan beberapa buah R_{SET} dan sebuah multiplekser untuk memilih R_{SET} yang akan dipakai pada rentang ukur tertentu.

Konfigurasi ini dinilai kurang praktis setidaknya karena dua alasan. Pertama, multiplekser memiliki hambatan dalam yang tidak kecil (antara puluhan hingga ratusan ohm) sehingga mempengaruhi perhitungan nilai R_{SET} . Kedua, penyesuaian (*adjustment*) untuk mendapatkan nilai arus uji yang tepat harus dilakukan sebanyak jumlah R_{SET} .



Gambar 2 skema rangkaian sumber arus berbasis I.C. LM334 [4]



Gambar 3 skema rangkaian Howland Current Pump

Alternatif lain untuk membuat sumber arus adalah dengan menggunakan rangkaian *Howland Current Pump* (HCP) seperti terlihat pada gambar 3 [9]. Rangkaian ini pertama kali dirancang oleh Prof. Bradford Howland dari Massachusetts Institute of Technology (MIT) pada tahun 1962. Rangkaian ini akan menghasilkan arus (I_{OUT}) yang proporsional dengan tegangan input (V_{IN}) yang diterimanya. Rasio antara tegangan input dan arus output yang mengalir ke beban (Z) dinyatakan dengan [10]

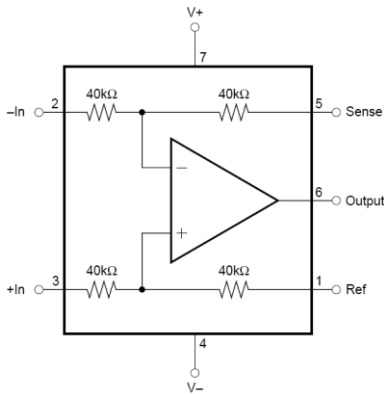
$$I_{OUT} = \frac{V_{IN}}{R_2} \quad (2)$$

Dengan syarat:

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{R_1}{R_3}$$

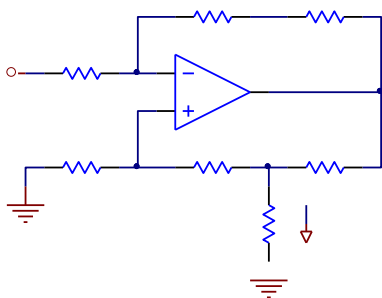
Berdasarkan persamaan (2) diatas, implementasi rangkaian pada gambar 3 menuntut derajat kesesuaian (*matching*) yang sangat tinggi sehingga dibutuhkan resistor dengan toleransi yang sangat kecil (lebih baik dari 0.5%). Resistor semacam itu memang sulit untuk ditemui di Indonesia.

Solusi alternatif untuk menyelesaikan persoalan tersebut adalah dengan menggunakan penguat diferensial (*differential amplifier*). INA132 adalah salah satu contoh rangkaian terpadu penguat diferensial yang cukup populer. INA132 terdiri dari sebuah penguat operasi yang presisi dan empat buah resistor presisi yang dikemas dalam bentuk chip 8 pin, seperti ditunjukkan pada gambar 4 [11].



Gambar 4 penguat diferensial INA132 [11]

Dengan mencocokkan gambar 4 dengan gambar 3 maka nilai R_2 adalah $40k\Omega$. Untuk nilai tegangan input (V_{IN}) sebesar 5 Volt, arus maksimum yang dapat dihasilkan (berdasarkan persamaan 2) adalah $125\mu A$. Untuk mendapatkan arus keluaran yang lebih besar, maka rangkaian HCP pada gambar 3 harus dimodifikasi, seperti terlihat pada gambar 5. Hubungan antara tegangan input dan arus output yang mengalir ke beban (Z) dinyatakan dengan [12]



Gambar 5 skema rangkaian HCP termodifikasi

$$I_{OUT} = \frac{(R_3 + R_A)}{(R_1 \times R_B)} V_{IN} \quad (3)$$

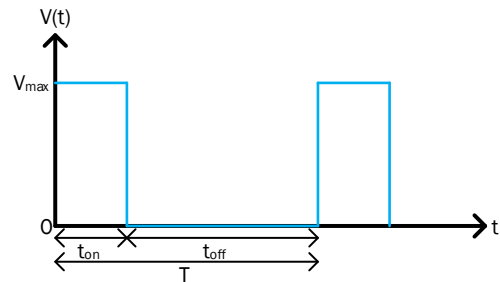
Dengan syarat $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$, dan $R_A = R_B$. Jika rangkaian pada gambar 5 diimplementasikan menggunakan penguat diferensial, maka hanya dibutuhkan *matching* antara R_A dan R_B saja.

1.2 Modulasi Lebar-Pulsa

Arus output yang dihasilkan oleh rangkaian HCP akan sebanding dengan tegangan input yang diterimanya. Jika rangkaian HCP tersebut hendak diimplementasikan pada sistem pengukuran hambatan listrik dengan rentang ukur yang cukup besar, maka dibutuhkan tegangan input yang stabil dan juga dapat divariasikan pada rentang yang cukup lebar. Variasi tegangan semacam ini dapat

diperoleh menggunakan *multi-turn trimpot* sebagai pembagi tegangan. Namun perubahan tegangan input hanya bisa dilakukan secara manual sehingga kurang fleksibel. Solusi dari permasalahan ini salah satunya adalah dengan memanfaatkan teknik modulasi lebar-pulsa (*pulse-width modulation* atau PWM).

Sinyal PWM pada hakikatnya merupakan sebuah gelombang persegi (*square-wave*) yang divariasikan lebar pulsanya (pada frekuensi tetap) sehingga menghasilkan tegangan rata-rata yang bervariasi [13]. Konsep ini dilukiskan pada gambar 6 berikut.



Gambar 6 sinyal modulasi lebar-pulsa

Lalu tinjaulah sebuah kurva tegangan $V(t)$ (seperti pada gambar 6) dengan periode T dengan amplitudo (tegangan) maksimum V_{max} . Harga tegangan rata-ratanya adalah [14]

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (4)$$

Kurva tegangan $V(t)$ tersebut berharga V_{max} pada $0 < t < t_{on}$ dan berharga nol pada $t_{on} < t < T$ sehingga persamaan (4) diatas menjadi

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_{on}} V_{max} dt + \int_{t_{on}}^T 0 dt \right) \quad (5)$$

$$\bar{V} = \frac{t_{on}}{T} \cdot V_{max} = D \cdot V_{max}$$

Variabel D pada persamaan (5) dikenal sebagai *duty-cycle*, yang merupakan rasio antara waktu terjadinya tegangan maksimum dengan periode. Dengan mengubah-ubah nilai D , maka akan dihasilkan nilai tegangan rata-rata \bar{V} yang bervariasi antara nol hingga V_{max} .

Jika tegangan \bar{V} diumpankan ke rangkaian HCP, maka arus output yang dihasilkan rangkaian HCP tersebut akan sebanding dengan nilai *duty-cycle* dari sinyal PWM yang digunakan. Dengan demikian, pengaturan arus output dari rangkaian HCP dapat dilakukan hanya dengan mengatur *duty-cycle* D .

Kombinasi rangkaian HCP dan sinyal PWM seperti diatas dapat menghasilkan sumber arus dengan harga yang relatif murah jika dibandingkan dengan sumber arus yang digunakan pada referensi [2]. Pengaturan arus juga dapat dilakukan secara digital (bukan secara manual seperti pada referensi [4]) dan tanpa menggunakan selektor (seperti pada referensi [3])

1.3 Arduino Uno

Arduino adalah sebuah proyek *open-source* yang terdiri dari perangkat keras berbasis mikrokontroler (komputer kecil) dan perangkat lunak yang memudahkan dalam membuat program (disebut *sketch*) sehingga memungkinkan terjadinya interaksi antara program yang dibuat dengan dunia fisik [15, 16]. Interaksi yang dimaksud dapat berupa penginderaan suatu besaran fisik (melalui sensor) maupun pengendalian besaran fisik lainnya (melalui aktuator).

Arduino Uno merupakan salah satu varian dari Arduino yang menggunakan mikrokontroler ATmega 328P. Arduino Uno memiliki fitur yang sangat lengkap sehingga banyak digunakan dalam aplikasi instrumentasi. Tiga fitur utama yang dimanfaatkan dalam pembuatan sistem pengukuran hambatan pada makalah ini adalah PWM, ADC (*Analog-to-Digital Converter*), dan sistem komunikasi serial. Dua fitur terakhir memungkinkan modul Arduino Uno untuk membaca sinyal keluaran dari sebuah sensor, mengolah, lalu menampilkannya di komputer.

2 Diskusi

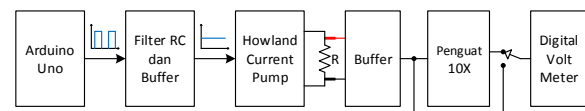
2.1 Perancangan Sistem

Ohmmeter yang dibuat pada makalah ini bekerja berdasarkan metode volt-ampere dan diharapkan mampu melakukan pengukuran hambatan listrik dari 1Ω hingga $4M\Omega$ yang terbagi dalam enam rentang pengukuran. Sumber arus uji didesain berdasarkan rangkaian *Howland Current Pump* (HCP) seperti pada gambar 5. Jatuh tegangan pada D.U.T ditangkap oleh rangkaian penguat awal (*pre-amp*) sebelum disalurkan ke multimeter digital (DMM). Rangkaian *pre-amp* sendiri terdiri dari sebuah penyangga (*buffer*) ditambah dengan rangkaian penguat untuk meningkatkan resolusi pengukuran untuk nilai hambatan yang kecil. Resolusi pengukuran pada rentang ukur dibawah 400 ohm juga dapat ditingkatkan dengan cara menaikkan nilai arus uji yang digunakan. Namun hal tersebut tidak dilakukan karena pemberian arus uji diatas 1 mA dapat menghasilkan pemanasan-sendiri (*self-heating*) pada resistor yang diukur.

Arus uji dan nilai penguatan (*gain*) dari masing-masing rentang ukur ditunjukkan pada tabel 2. Adapun interkoneksi antara modul Arduino Uno dengan elemen pengukuran ditunjukkan pada gambar 7.

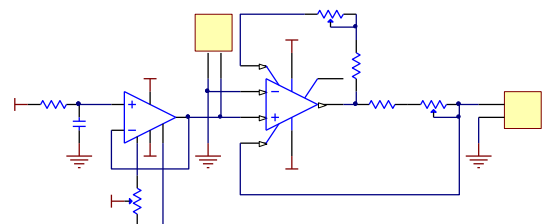
Tabel 2 rentang ukur, arus uji, dan gain yang diharapkan dari ohmmeter yang akan dibuat

Range	Rentang Ukur	Arus uji	Gain
1	200k Ω - 2M Ω	1 μ A	1
2	40k Ω - 200k Ω	10 μ A	1
3	4k Ω - 40k Ω	100 μ A	1
4	400 Ω - 4k Ω	1 mA	1
5	40 Ω - 400 Ω	1 mA	10
6	1 Ω - 40 Ω	1 mA	10



Gambar 7 diagram sistem ohmmeter

Tegangan masukan bagi rangkaian HCP bersumber dari sinyal PWM yang dibangkitkan oleh modul Arduino Uno melalui pin 9. Sebelum dihubungkan ke rangkaian HCP, sinyal PWM ini dirata-ratakan terlebih dahulu oleh rangkaian filter R-C yang diberi penyangga (*buffer*). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan tegangan DC yang stabil (untuk diumpankan ke rangkaian HCP) serta untuk menjaga agar sinyal PWM tersebut tidak cacat akibat efek pembebanan dari rangkaian HCP.



Gambar 8 skema rangkaian awal sumber arus

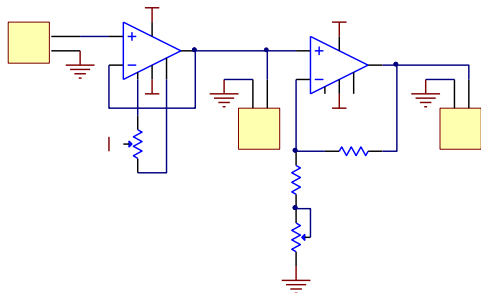
Gambar 8 menunjukkan rangkaian pembangkit arus uji untuk sistem ohmmeter. Sinyal PWM dari modul Arduino Uno dirata-ratakan oleh rangkaian filter R1 dan C1. Penguat operasi (*op-amp*) U1 berfungsi sebagai *buffer*. Tegangan output dari *buffer* yang juga merupakan tegangan input bagi rangkaian HCP dapat diukur melalui terminal P2.

Rangkaian HCP sendiri dibangun dari penguat diferensial U2 serta resistor R5, R6, VR5 dan VR6. Arus output dari HCP dapat diukur melalui terminal P3. Pengukuran tegangan pada terminal P2 dan arus pada terminal P3 dilakukan menggunakan DMM referensi Hewlett-Packard 3458A. DMM ini

juga yang nantinya akan digunakan untuk mengukur tegangan jatuh pada D.U.T

Sinyal PWM yang dibangkitkan oleh Arduino Uno diset memiliki resolusi 10-bit (1024 step) dimana nilai maksimum yang dihasilkan adalah 5 Volt. Penguat diferensial U2 menggunakan I.C. INA132 sehingga jika disesuaikan dengan gambar 5, maka nilai $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 40\text{k}\Omega$, $R_A = R_5 + VR_5$, dan $R_B = R_6 + VR_6$. Nilai $R_5 = R_6 = 5\text{ k}\Omega$ dan nilai $VR_5 = VR_6 = 1\text{ k}\Omega$. Dari persamaan (3), untuk menghasilkan arus maksimum sebesar 1,024mA maka R_A dan R_B harus bernilai 5561.74 Ω . Jika nilai arus maksimum dibagi dengan resolusi PWM, maka akan dihasilkan arus sebesar 1 μA /step PWM.

Sebuah Kelvin Probe yang terdiri dari dua pasang kabel digunakan untuk menghubungkan D.U.T dengan sistem pengukuran yang dibuat. Dua kabel pertama dihubungkan ke terminal P3 dari rangkaian HCP. Sedangkan dua kabel sisanya digunakan untuk menghubungkan D.U.T ke rangkaian penguat *pre-amp* sehingga tegangan jatuh pada D.U.T akibat mengalirnya arus uji dapat diukur. Adapun skema rangkaian *pre-amp* ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9 skema rangkaian *pre-amp* yang terdiri dari buffer dan penguat 10X

Pengukuran tegangan jatuh pada D.U.T untuk range 1 hingga 4 dilakukan dengan cara menghubungkan terminal P5 ke terminal input dari DMM referensi. Sedangkan untuk range 5 dan 6, DMM referensi dihubungkan ke terminal P6.

2.2 Pengujian Sistem dan Analisa

Pengujian sistem dibagi kedalam dua tahap, yaitu pengujian sumber arus tanpa D.U.T dan dilanjutkan dengan pengujian sistem secara keseluruhan untuk semua rentang ukur menggunakan D.U.T dengan berbagai macam nilai. D.U.T yang digunakan untuk pengujian berupa 62 buah resistor metal film yang masing-masing memiliki toleransi 1%. Nilai hambatan aktual dari masing-masing D.U.T terlebih dahulu diukur menggunakan DMM referensi dengan sistem pengukuran 4-kawat. Nilai hambatan aktual ini nantinya akan dibandingkan

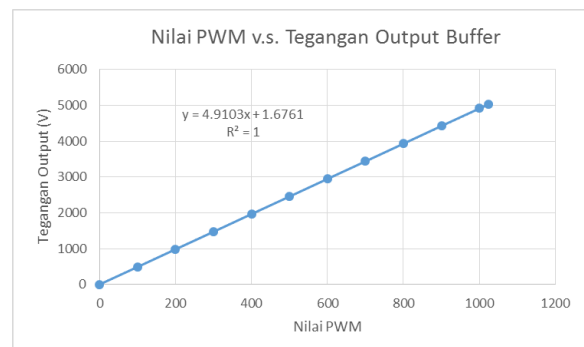
dengan hasil bagi antara tegangan output rangkaian *pre-amp* dengan arus uji yang diberikan.

Sebelum kegiatan pengujian dilakukan, terlebih dahulu dilakukan proses *adjustment* terhadap rangkaian sumber arus dan rangkaian *pre-amp*. Proses *adjustment* terhadap rangkaian sumber arus diawali dengan menghubungkan kaki R1 (yang terhubung ke pin 9 modul Arduino Uno) ke titik nol (ground). Kemudian trimpot VR1 diatur sedemikian hingga tegangan pada terminal P2 bernilai 0mV. Setelah itu trimpot VR5 dan VR6 diatur sedemikian hingga $(R_5 + VR_5) \approx (R_6 + VR_6) \approx 5561.74\ \Omega$.

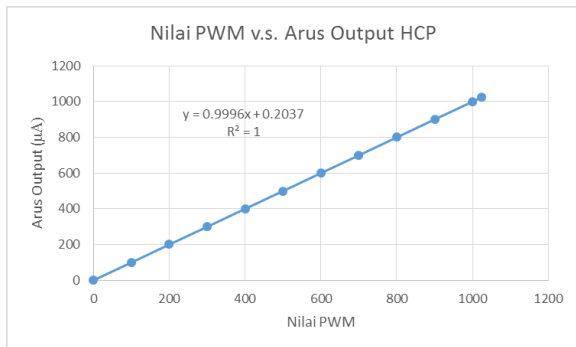
Adapun proses *adjustment* terhadap rangkaian *pre-amp* diawali dengan menghubungkan-singkatkan terminal P4. Kemudian trimpot VR2 diputar sedemikian hingga tegangan pada terminal P5 bernilai 0 mV. Kemudian tegangan DC sebesar $\pm 200\text{ mV}$ diberikan pada terminal P4. Trimpot VR3 kemudian diatur sedemikian hingga tegangan pada terminal P6 bernilai $\pm 2\text{ V}$.

Pengujian tahap pertama dilakukan dengan terlebih dahulu menghubungkan terminal P2 dari rangkaian buffer ke DMM referensi. Nilai PWM dari modul Arduino Uno kemudian diubah-ubah secara bertahap mulai dari nol hingga 1023. Nilai tegangan yang terbaca pada DMM referensi kemudian dicatat untuk masing-masing step. Selanjutnya arus keluaran dari HCP diukur dengan cara menghubungkan terminal P3 dengan DMM referensi. Nilai PWM dari modul Arduino Uno lalu diubah-ubah secara bertahap mulai dari nol hingga 1023 kemudian nilai arus yang terbaca pada DMM referensi dicatat untuk masing-masing step.

Hasil pengukuran tegangan dan arus pada terminal P2 dan P3 terhadap nilai PWM ditunjukkan pada gambar 10 dan 11. Adapun nilai-nilai yang tercantum pada tabel 3 merupakan nilai-nilai yang mendekati *set-point* yang diinginkan pada tabel 2. Hasil pengukuran pada tabel 3 akan dijadikan referensi perhitungan nilai hambatan D.U.T.



Gambar 10 grafik hubungan antara nilai PWM dan tegangan output rangkaian filter-RC dan buffer



Gambar 11 grafik hubungan antara nilai PWM dan arus output rangkaian HCP

Tabel 3 hasil pengujian awal rangkaian sumber arus

Nilai PWM	Tegangan Output Buffer (pada P2)	Arus Output HCP (pada P3)
0	3,183 mV	0,6223 µA
1	8,102 mV	1,6242 µA
10	51,637 mV	10,4814 µA
100	0,49164 V	100,018 µA
1000	4,9124 V	1,00001 mA
1023	5,0237 V	1,02273 mA

Grafik pada gambar 10 menunjukkan bahwa kombinasi rangkaian filter-RC dan buffer dapat digunakan untuk mengubah sinyal PWM menjadi tegangan DC yang besarnya yang sebanding dengan duty-cycle dari sinyal PWM tersebut dan dengan sendirinya membuktikan persamaan (5). Sedangkan grafik pada gambar 11 menunjukkan bahwa arus output dari rangkaian HCP berbanding lurus dengan nilai PWM yang dibangkitkan oleh modul Arduino Uno.

Pengujian tahap kedua dimulai dari rentang ukur pertama (range 1) hingga rentang terakhir (range 6). Pengujian diawali dengan memasang D.U.T pada sistem pengukuran menggunakan Kelvin Probe. Dua kabel pertama dari Kelvin Probe dihubungkan ke terminal P3 dan dua kabel sisanya dihubungkan ke terminal P4. Kemudian terminal P5 dihubungkan ke DVM.

Nilai PWM yang dibangkitkan oleh modul Arduino Uno diset bernilai 1. Nilai tegangan yang terbaca pada DMM referensi kemudian dicatat. Nilai ini kemudian dibagi dengan 1,6242 µA (sesuai tabel 3) sehingga diperoleh nilai resistansi dalam satuan ohm. Pengujian pada range 2 hingga range 4 dilakukan dengan metode yang sama. Sedangkan untuk pengujian pada range 5 dan 6, DMM dihubungkan ke terminal P6. Data hasil pengukuran untuk berbagai nilai D.U.T pada masing-masing range ditunjukkan pada tabel 4 - 9.

Tabel 4 hasil pengujian ohmmeter pada rentang 200kΩ - 2MΩ

Range 1 : Arus uji = 1,6242 µA, Gain = 1		
Nilai Aktual (kΩ)	Hasil Percobaan (kΩ)	Error (%)
2025.6	1961.5	3.17
1006.48	988.79	1.76
921.91	906.54	1.67
830.16	817.94	1.47
767.76	756.80	1.43
649.09	641.36	1.19
516.48	511.22	1.02
403.88	400.17	0.92
388.92	385.20	0.96
303.98	301.38	0.86
199.73	198.47	0.63
100.96	100.52	0.43
Error Rata-rata (%)		1.29

Tabel 5 hasil pengujian ohmmeter pada rentang 40kΩ - 200kΩ

Range 2 : Arus uji = 10,4814 µA, Gain = 1		
Nilai Aktual (kΩ)	Hasil Percobaan (kΩ)	Error (%)
199.73	199.10	0.32
100.96	100.84	0.12
90.787	90.651	0.15
81.836	81.743	0.11
73.569	73.513	0.08
61.780	61.740	0.06
50.034	50.004	0.06
40.131	40.121	0.03
29.785	29.779	0.02
20.190	20.201	0.05
9.973	9.964	0.09
Error Rata-rata (%)		0.10

Tabel 6 hasil pengujian ohmmeter pada rentang 4kΩ - 40kΩ

Range 3 : Arus uji = 100,018 µA, Gain = 1		
Nilai Aktual (kΩ)	Hasil Percobaan (kΩ)	Error (%)
40.131	40.130	0.003
29.785	29.790	0.02
20.190	20.197	0.04
9.9730	9.9787	0.06
9.1025	9.1077	0.06
8.0715	8.0762	0.06
7.4702	7.4729	0.04
6.1798	6.1852	0.09
4.9535	4.9585	0.10
3.9757	3.9797	0.10
2.9991	3.0013	0.07
1.9874	1.9922	0.24
0.99558	0.99797	0.24
Error Rata-rata (%)		0.09

Tabel 7 hasil pengujian ohmmeter pada rentang 400 Ω - 4k Ω

Range 4 : Arus uji = 1,00001 mA, Gain = 1		
Nilai Aktual (Ω)	Hasil Percobaan (Ω)	Error (%)
3975.7	3979.0	0.08
3873.1	3876.2	0.08
2999.1	3001.9	0.09
1987.4	1989.5	0.10
995.58	996.68	0.11
908.43	909.63	0.13
818.44	819.57	0.14
767.13	768.20	0.14
619.19	620.17	0.16
495.93	496.93	0.20
400.72	401.64	0.23
Error Rata-rata (%)		0.13

Tabel 8 hasil pengujian ohmmeter pada rentang 40 Ω - 400 Ω

Range 5 : Arus uji = 1,00001 mA, Gain = 10		
Nilai Aktual (Ω)	Hasil Percobaan (Ω)	Error (%)
400.72	401.05	0.08
298.76	299.16	0.13
199.41	199.90	0.24
99.717	100.299	0.58
90.787	91.365	0.64
81.792	82.374	0.71
74.692	75.274	0.78
62.060	62.667	0.98
50.733	51.337	1.19
Error Rata-rata (%)		0.69

Tabel 9 hasil pengujian ohmmeter pada rentang 1 Ω - 40 Ω

Range 6 : Arus uji = 1,00001 mA, Gain = 10		
Nilai Aktual (Ω)	Hasil Percobaan (Ω)	Error (%)
38.985	39.585	1.54
29.921	30.565	2.15
19.913	20.575	3.32
9.9905	10.6289	6.39
9.1553	9.8155	7.21
8.1393	8.8187	8.35
7.4728	8.1255	8.73
6.2046	6.8458	10.33
5.0680	5.7232	12.93
3.9319	4.5760	16.38
3.0077	3.6484	21.30
1.9925	2.6379	32.39
1.0080	1.6538	64.07
Error Rata-rata (%)		16.13

Dari data hasil pengujian pada tabel 4 hingga 9 dapat dilihat bahwa akurasi terbaik yang dapat dicapai oleh ohmmeter ini adalah 0,003% (pada

titik ukur 40 k Ω) dan akurasi terendah sebesar 64.07% (pada titik ukur 1 Ω).

3 Kesimpulan

Sistem pengukuran hambatan listrik dengan metode volt-ampere yang diimplementasikan menggunakan kombinasi pembangkit sinyal PWM, rangkaian filter RC, Howland Current Pump, Buffer, serta voltmeter resolusi tinggi dapat digunakan untuk melakukan pengukuran hambatan listrik pada rentang 1 Ω hingga 2M Ω . Performa terbaik dari ohmmeter ini diperoleh pada rentang pengukuran diatas 40 Ω .

4 Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin berterima kasih kepada :

- Kementerian Ristekdikti yang telah menyelenggarakan program Beasiswa Sainstek 2018.
- Laboratorium Kalibrasi UPT BPI - LIPI (LK-006 IDN) yang telah menyediakan meter referensi untuk keperluan pengambilan data.

5 Daftar Pustaka

- [1] M. E. Schultz, "Grob's Basic Electronics 11th ed," New York: McGraw-Hill, 2007.
- [2] T. Chang, J. Zhang, dan W. Chen, "Digital DC Resistance Tester," International Conference on Future Networks, 2010.
- [3] R. V. Shwetank, S. Bhagwat, A. Banode, S. Khobragade, K. Gorale, dan N. Munde, "Arduino Based Customized Ohm-Meter for Industrial Utilization," International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 5, Issue 3, March 2016.
- [4] Mikailu A., Abdullahi I., Sani M.G. dan Muhammad S, "Development of Digital Resistivity Meter," Advances in Physics Theories and Applications, Vol.42, 2015
- [5] N. Khasnabish, "Design and Development of 8051 Based Resistance Meter for Interfacing with Sensors," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 2 Issue 12, December 2013.
- [6] A. P. Malvino dan D. J. Bates, "Electronic Principles 8th ed," New York: McGraw-Hill, 2016.
- [7] "Fluke 80 Series III Product Manual Rev.2," U.S.A, 1998.

- [8] "LM134 / LM234 / LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources," National Semiconductor Product Datasheet, U.S.A, 2000.
- [9] D. H. Sheingold, "Impedance & Admittance Transformations using Operational Amplifiers," "Lightning Empiricist", U.S.A, Vol 12, No. 1, January 1964.
- [10] "AN-1515 - A Comprehensive Study of the Howland Current Pump," Texas Instrument Application Report, U.S.A, 2013.
- [11] "INA132 - Low Power, Single-Supply Difference Amplifier," Burr-Brown Product Datasheet, U.S.A, 1996.
- [12] "OP177 - Ultraprecision Operational Amplifier" Analog Device Product Datasheet, U.S.A, 2016.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation
- [14] N. Mohan, T.M. Undeland, dan W.P. Robbins, "Power Electronics - Converters, Applications and Design," 3rd ed, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc, 2003.
- [15] M. Margolis, "Arduino Cookbook," 2nd ed, California: O'Reilly Media, 2011.
- [16] M. B. Agung, "Arduino for Beginners," Jakarta: Surya University, 2011.