

Study of Spectral Induced Polarization Response Based on Measurement in the Laboratory

Eksperimental Terhadap Respon Polarisasi Terinduksi Spektral Berdasarkan Pengukuran di Laboratorium

Dicky Ahmad Zaky^{1*}, Suparwoto²

¹Program Studi Teknik Geofisika, Universitas Pertamina, Jakarta, Indonesia

² Program Studi Geofisika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Email: dicky.az@universitaspertamina.ac.id

Submit: 5 Juli 2018; Revised: 4 September 2018; Accepted: 10 September 2018

Abstract: *The spectral induced polarization (SIP) method can provide apparent complex resistivity based on measurements of multi frequency. SIP method also can provide more detail information about physical properties of rocks and minerals because SIP can give spectral parameters or Cole-Cole parameters such as, chargeability (m), time constant (τ) and frequency dependence (c). An Experimental study in laboratory has been conducted to knowing the SIP response of some test sample. The measurement system is built with digital oscilloscope Pico ADC-100 as device for sampling the input and output voltage. Amplifier is used to doubled up the signal and input differential. The range frequency of measurement is 10^{-2} Hz - 10^3 Hz. Porouspot Cu - CuSO_4 is used to minimize the polarization at potential electrode. A Matlab listings is used to calculate the response of impedance and phase. The result from calibration that used the parallel circuit RC indicate that the measurement system was good. SIP response of porous model indicate that the response form an asymptotic resistivity, and the peak of phase is in the range frequency where the dispersion happen. The result also indicate that resistivity of small grain size model is larger than the big grain size model. Result from sample of mineralized rocks did not indicate a perfect SIP response, it is influenced by the contact between mineral and water was minimum.*

Keywords: *spectral induced polarization, complex resistivity, Cole-Cole parameters.*

Abstrak: Metode polarisasi terinduksi spektral atau *spectral induced polarization* (SIP) adalah metode yang dapat memberikan resistivitas kompleks semu berdasarkan pengukuran multi frekuensi. Metode SIP juga dapat memberikan informasi lebih detail mengenai sifat fisis batuan dan mineral karena metode SIP dapat memberikan parameter-parameter spektral atau parameter Cole-Cole antara lain, *chargeability* (m), tetapan waktu (τ) dan *frequency dependence* (c). Studi eksperimental di laboratorium telah dilakukan untuk mengetahui respon SIP dari berbagai sampel uji. Sistem pengukuran menggunakan osiloskop digital Pico ADC-100 sebagai alat perekam tegangan masukan dan keluaran. Digunakan pula amplifier sebagai penguat sinyal dan pembeda masukan sinyal. Pengukuran dilakukan pada

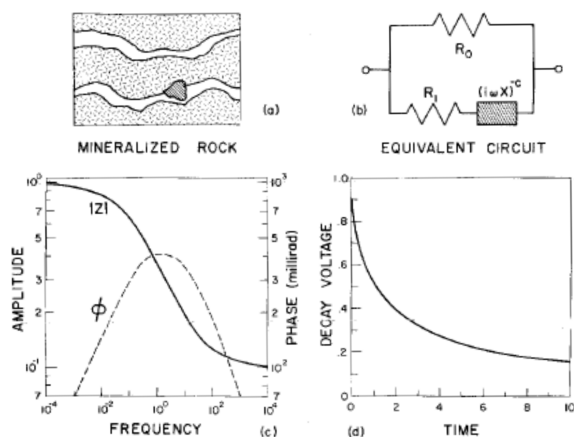
rentang frekuensi 10^{-2} Hz - 10^3 Hz. Untuk mengurangi efek polarisasi pada elektroda potensial, digunakan porouspot Cu - CuSO_4 . Pengolahan data dilakukan menggunakan Matlab untuk menghitung respon impedansi dan fase. Hasil dari kalibrasi menggunakan rangkaian paralel RC menunjukkan sistem pengukuran yang dibangun sudah benar. Respon SIP yang diperoleh pada sampel uji berupa model pori batuan bermineral membentuk kurva asimtotik untuk respon resistivitas dan respon puncak fase berada pada rentang frekuensi dimana dispersi impedansi terjadi. Hasil pengukuran pada model juga menunjukkan adanya penambahan nilai resistivitas pada model ukuran butir mineral yang lebih kecil bila dibandingkan dengan model butir mineral yang lebih besar. Sampel uji berupa batuan mineral tidak begitu menunjukkan respon SIP yang sempurna, hal ini dipengaruhi karena minimnya kontak antara air dengan mineral logam.

Kata kunci: *spectral induced polarization, resistivitas kompleks, parameter Cole-Cole.*

1 PENDAHULUAN

Metode polarisasi terinduksi spektral atau *spectral induced polarization* (SIP) adalah metode yang relatif baru dalam eksplorasi geofisika. Metode SIP dapat memberikan resistivitas kompleks semu berdasarkan pengukuran multi frekuensi (dalam orde 10^{-2} hingga 10^2 Hz) dengan menggunakan konfigurasi dari survei resistivitas konvensional. Metode SIP dapat menjelaskan parameter-parameter spektral dan distribusi spasial dari struktur geologi dibawah permukaan [Luo dan Zhang, 1998].

Metode SIP dapat memberikan informasi lebih detail mengenai sifat fisis batuan dan mineral. Hal ini tentu sangat membantu dalam eksplorasi di lapangan. Selain untuk identifikasi mineral, metode SIP juga dapat digunakan untuk mendeteksi zat pencemar kimia organik [Vanhalala dkk., 1992], estimasi permeabilitas batupasir [Weller dkk., 2010], respon dari endapan abiotik *FeS* [Ntarlagiannis dan Ferguson, 2010], dan respon biofilms buatan [Ntarlagiannis dan Ferguson, 2009]. Keunggulan lain dari metode SIP adalah kemam-



Gambar 1. (a) Bagian kecil dari batuan bermineral yang memiliki jalur pori yang terhalang butir mineral dan tidak (b) Rangkaian setara untuk batuan bermineral. (c) Respon khas impedansi dan beda fase domain frekuensi untuk rangkaian setara. (d) Respon tegangan domain waktu yang bersesuaian dengan respon domain frekuensi yang digambarkan pada (c) [Pelton dkk., 1978]

puannya dalam mendeteksi hidrokarbon, He dkk. [2006] menjelaskan bagaimana penggunaan metode SIP dalam mendeteksi hidrokarbon di darat (*onshore*).

Metode SIP merupakan metode geofisika yang masih terus dikembangkan. Namun karena metode ini masih terbilang baru, buku-buku maupun publikasi dari tulisan ilmiah yang membahas metode SIP ini relatif masih sedikit dibandingkan metode lainnya yang sudah lama berkembang, khususnya tulisan mengenai studi eksperimental SIP di laboratorium masih terbilang jarang.

Studi eksperimental di laboratorium sangat perlu dilakukan, karena dari sistem pengukuran dan hasil yang diperoleh akan menjadi dasar penerapan di lapangan. Oleh karena itu untuk metode SIP ini perlu dilakukan eksperimen terhadap beberapa sampel batuan atau model untuk diteliti respon SIP-nya. Agar dapat melakukan eksperimen terhadap respon SIP diperlukan suatu sistem pengukuran yang benar, baik peralatan yang digunakan maupun tahapan kerja penilitan. Oleh karena itu pembuktian apakah sistem pengukuran sudah benar juga harus dilakukan.

2 DASAR TEORI

Sifat dari Impedansi kompleks IP atau tahanan jenis kompleks terhadap frekuensi adalah serupa dengan pernyataan Cole dan Cole yang digunakan untuk menjelaskan polarisasi dielektrik [Luo dan Zhang, 1998], yang dapat dituliskan pada persamaan berikut

$$\rho(i\omega) = \rho(0) \left[1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right] \quad (1)$$

dimana $\rho(0)$ adalah nilai asimtotik tahanan jenis ke arah frekuensi nol, m adalah *chargeability* yang menjelaskan besarnya polarisasi elektrik yang memberikan kenaikan beda fase antara tegangan dan arus (dengan kata lain, sifat kompleks dari ρ), τ adalah karakteristik tetapan-waktu (*time*

constant) dari proses peluruhan, c adalah eksponen Cole-Cole yang menjelaskan tingkat *frequency dependence* dari ρ , ω adalah frekuensi sudut dan i adalah bilangan kompleks $\sqrt{-1}$ [Chen dkk., 2008].

Pelton dkk. [1978] memperkenalkan model Cole-Cole untuk menjelaskan sifat elektrik dalam batuan yang mengandung mineral. Rangkaian pada Gambar 1.b adalah rangkaian resistif yang memperlihatkan relaksasi Cole-Cole. Rangkaian lainnya bisa juga memiliki respon yang sama, tetapi gambaran ini memberikan analogi yang sesuai dengan geometri pori pada batuan bermineral yang disajikan pada Gambar 1.a Pada rangkaian, impedansi kompleks, $(i\omega x)^c$ merupakan simulasi butir mineral atau antarmuka metalik-ionik. Tahanan R_0 merupakan simulasi jalur pori yang tidak terhalang yang memungkinkan konduksi paralel melewati elemen resistif murni, dan tahanan R_1 merupakan simulasi tahanan dari larutan dalam jalur pori yang terhalang butir mineral. Tidak dapat disangkal bahwa gambaran yang merupakan bagian kecil dari batuan bermineral ini sangat sederhana, pada keadaan sebenarnya jalur konduksi tentu lebih rumit. Namun demikian, model sederhana dan rangkaian setara ini dapat memberikan penjelasan hampir semua sifat dasar dari IP spektral yang diamati pada laboratorium dan lapangan.

3 METODOLOGI

Secara garis besar tahapan penelitian terdiri dari pengambilan data di laboratorium dan pengolahan data. Pengambilan data dilakukan berdasarkan eksperimen dengan menggunakan sistem pengukuran yang dirancang khusus untuk mendapatkan respon SIP dari sampel-sampel yang ada. Kalibrasi perlu dilakukan untuk mengetahui apakah sistem pengukuran sudah benar, kalibrasi dilakukan dengan melakukan pengukuran pada rangkaian setara RC. Setelah sistem dikalibrasi, penelitian dilanjutkan dengan pengambilan data terhadap beberapa sampel uji.

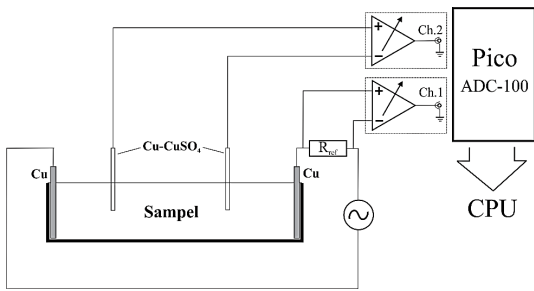
Data yang diperoleh dari eksperimen di laboratorium harus diolah terlebih dahulu sebelum dapat diketahui bagaimana respon SIP dari sampel-sampel yang diuji. Pengolahan data meliputi perhitungan impedansi dan fase. Setelah dilakukan perhitungan maka didapatkan respon SIP dari sampel uji yang digambarkan dengan grafik impedansi dan fase versus frekuensi.

3.1 Sistem Pengukuran

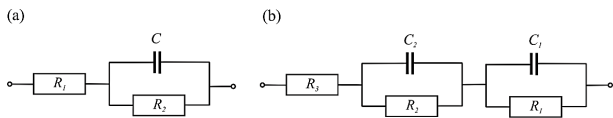
Prinsip pengukuran yang diterapkan dalam sistem adalah dengan menginduksi arus listrik pada sampel melalui plat tembaga kemudian melakukan pencuplikan sinyal tegangan masukan (V_{in}) dan keluaran (V_{out}). Hasil dari pencuplikan kemudian diolah agar diketahui bagaimana respon SIP dari suatu sampel. Diagram blok dari sistem pengukuran disajikan pada Gambar 2. Berikut ini alat-alat yang digunakan untuk membangun sistem pengukuran respon SIP,

(i) *Function Generator* National VP-7402A berfungsi sebagai sumber tegangan dengan fungsi frekuensi yang dapat divariasikan.

(ii) Osiloskop digital Pico ADC-100 berfungsi sebagai alat pencuplik sinyal yang dihubungkan dengan komputer, memiliki dua kanal.



Gambar 2. Diagram blok sistem pengukuran SIP



Gambar 3. Skema rangkaian RC yang digunakan untuk kalibrasi alat. (a) Rangkaian paralel RC, (b) Rangkaian paralel RC ganda.

(iii) *Amplifier* dengan kemampuan menguatkan sinyal sebesar dua kali lipat dan berfungsi sebagai pembeda sinyal masukan ke osiloskop digital.

(iv) Akuarium kaca dengan ukuran 50 cm x 10 cm x 7,1 cm berfungsi sebagai tempat sampel.

(v) Dua buah Plat tembaga yang berfungsi sebagai elektroda arus, sepasang batang *stainless steel* sepanjang 15,5cm dan porouspot kecil dengan larutan $CuSO_4$ yang berfungsi sebagai elektroda potensial.

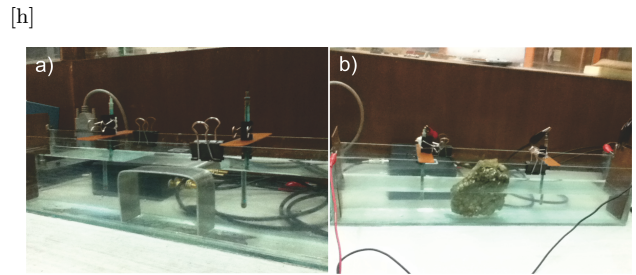
(vi) Resistor referensi yang telah diketahui nilai hambatannya, untuk membantu dalam perhitungan besar arus yang diinduksikan.

Osiloskop digital Pico ADC-100 memiliki dua kanal. Kanal pertama yang digunakan untuk mencuplik sinyal tegangan masukan (V_{in}), dihubungkan dengan resistor referensi melalui *amplifier*. Kemudian kanal kedua yang digunakan untuk mencuplik sinyal tegangan keluaran (V_{out}), dihubungkan dengan dua elektroda potensial melalui *amplifier*.

3.2 Kalibrasi Sistem Pengukuran

Kalibrasi alat perlu dilakukan untuk mengetahui apakah sistem pengukuran yang diterapkan sudah benar. Kalibrasi dilakukan dengan melakukan pengukuran terhadap rangkaian paralel RC, ada dua rangkaian yang diukur untuk kalibrasi alat, yakni rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 3.a memiliki satu rangkaian paralel RC dan rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 3.b memiliki dua rangkaian paralel RC.

Untuk rangkaian pertama $R_1 = 1800\Omega$, $R_2 = 1800\Omega$ dan $C = 235\mu F$. Kemudian untuk rangkaian kedua $R_1 = 1000\Omega$, $R_2 = 2200\Omega$, $R_3 = 12000\Omega$, $C_1 = 1,1\mu F$ dan $C_2 = 235\mu F$. Kalibrasi akan benar jika hasil dari pengukuran akan menunjukkan respon yang mirip dengan respon yang dihitung menggunakan Persamaan (2) dan (3). Jika



Gambar 4. (a) Pengukuran pada model pori batuan, mineral logam dimodelkan menggunakan lempeng aluminium. (b) Pengukuran pada batuan bermineral chalcopyrite.

kalibrasi alat yang dilakukan sudah benar maka tahap selanjutnya adalah melakukan pengukuran pada sampel uji.

$$Z_a = R_1 + \left(\frac{1}{R_2} + j\omega C\right)^{-1} \quad (2)$$

$$Z_b = R_3 + \left(\frac{1}{R_2} + j\omega C\right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C\right)^{-1} \quad (3)$$

Z_a adalah total impedansi untuk rangkaian Gambar 3.a dan Z_b adalah total impedansi untuk rangkaian Gambar 3.b.

3.3 Sampel Uji

Pada penelitian ini digunakan beberapa sampel uji. Pengujian pertama dilakukan terhadap logam murni. Sampel logam murni yang diuji adalah aluminium dan tembaga. Sampel-sampel yang berupa lempengan diletakkan pada akuarium berisi air, polarisasi elektroda akan terjadi akibat adanya kontak logam dan air. Akibat dari polarisasi yang terjadi inilah akan dibuktikan apakah respon SIP yang terukur akan berupa kurva asimtotik, seperti yang dimiliki batuan. Lempeng logam yang diuji akan dibentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.a, hal ini dimaksudkan untuk menyerupai model pori batuan bermineral seperti yang disajikan pada Gambar 1.a, yakni lempeng logam sebagai butir mineral logam dalam sebuah pori batuan yang luasannya hampir menutupi seluruh luasan pori.

Pada tahap akhir sampel yang diuji adalah berupa batuan yang bermineral logam. Sama halnya dengan sampel uji logam murni, sampel uji batuan juga diletakkan pada akuarium berisi air. Pada batuan yang tidak memiliki mineral logam maka tidak akan terjadi polarisasi sehingga seharusnya tidak memiliki respon impedansi kompleks terhadap frekuensi, sedangkan pada batuan yang memiliki mineral logam akan terjadi polarisasi seperti yang terjadi pada sampel uji logam murni. Hasil pengukuran respon SIP pada sampel batuan diharapkan akan memiliki respon dengan bentuk kurva asimtotik yang menjelaskan adanya impedansi kompleks pada batuan. Gambar 4.b menunjukkan pengukuran yang dilakukan pada sampel batuan.

3.4 Frekuensi Sinyal dan Pencuplikan

Variasi frekuensi sinyal yang digunakan berada dalam rentang 10^{-2} Hz hingga 103 Hz. Penyajian respon impedansi kompleks terhadap frekuensi digambarkan dalam skala log,

sehingga pencuplikan sinyal V_{in} dan V_{out} dilakukan pada frekuensi sinyal dengan kelipatan 1,2,3 dan 6 pada tiap orde. Maka dengan begitu didapatkan jarak yang teratur dalam skala log.

Frekuensi sinyal yang divariasikan dan besaran yang ditentukan untuk kedua metode cuplik yang digunakan dapat dirangkum dalam Tabel 1. Penentuan total waktu maupun waktu interval cuplik berdasarkan dua kali periode frekuensi sinyal, dengan demikian hasil pencuplikan akan mendapatkan gelombang dengan dua puncak dan dua lembah.

3.5 Pengolahan Data

Hasil pencuplikan tegangan yang dilakukan pada setiap frekuensi sinyal selanjutnya akan diolah untuk mendapatkan impedansi dan fase. Prinsip perhitungan impedansi yang dilakukan berdasarkan hukum Ohm, dimana arus yang diinduksikan dihitung dengan menggunakan persamaan (4),

$$I = \frac{V_{in}}{R_{ref}} \quad (4)$$

dimana V_{in} adalah nilai tegangan maksimum dari pencuplikan pada kanal pertama, dan R_{ref} adalah nilai hambatan dari resistor referensi. Apabila arus diketahui besarnya, maka impedansi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5),

$$Z = \frac{V_{out}}{I} \quad (5)$$

dimana V_{out} adalah nilai tegangan maksimum dari pencuplikan pada kanal kedua, dan I adalah arus terhitung. Jika perhitungan impedansi dilakukan pada tiap frekuensi sinyal maka dapat diketahui respon impedansi terhadap frekuensi dengan menggambarkan grafik respon, dimana sumbu x adalah frekuensi dalam skala log dan sumbu y adalah impedansi. Sedangkan perhitungan tahanan jenis pada sampel uji dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$\rho = Z \left(\frac{A}{L} \right) \quad (6)$$

dimana Z adalah impedansi, A adalah luas penampang sampel uji, dapat dihitung dengan mengukur ketinggian tinggi air dan lebar akuarium, dan L adalah jarak antara elektroda potensial. Jika perhitungan tahanan jenis dilakukan pada tiap frekuensi sinyal maka dapat diketahui respon tahanan jenis terhadap frekuensi dengan menggambarkan grafik respon, dimana sumbu x adalah frekuensi dalam skala log dan sumbu y adalah tahanan jenis.

Begitupula dengan beda fasa yang akan mengalami perubahan terhadap frekuensi sinyal. Dua buah bentuk gelombang sinusoidal dengan frekuensi yang sama dapat dibandingkan dengan mencatat pergeseran kedua gelombang tersebut dengan waktu dari panjang gelombang (Gambar 5). perhitungan beda fase antara dua gelombang juga dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$\beta = \frac{\delta t}{\frac{1}{2}T} \phi(\text{rad}) \quad (7)$$

dimana δt adalah selisih waktu antara dua gelombang sinusoidal saat amplitudo bernilai nol, dan T adalah perioda gelombang.

4 HASIL DAN DISKUSI

4.1 Kalibrasi Menggunakan Rangkaian RC

Sebelum dilakukan pengukuran terhadap sampel uji, sistem pengukuran yang telah dibangun harus diuji terlebih dahulu atau dilakukn kalibrasi. Melakukan pengukuran terhadap rangkaian RC adalah cara yang digunakan untuk kalibrasi. Dari nilai resistor dan kapasitor maka dapat dilakukan simulasi bagaimana respon SIP menurut perhitungan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan persamaan (2) dan (3) sehingga didapatkan respon yang jelas dalam rentang frekuensi yang digunakan dalam penelitian ini, yakni 10^{-2} Hz sampai 10^3 Hz. Pengukuran dilakukan terhadap dua jenis rangkain RC yang telah disebutkan sebelumnya pada bagian metodologi. Rangkaian RC pertama adalah rangkaian yang memiliki satu rangkaian paralel RC, kemudian rangkaian RC kedua adalah rangkaian yang tersusun atas dua buah rangkaian paralel RC. Pada Gambar 6.a berikut disajikan respon SIP hasil pengukuran dan perhitungan dari rangkaian RC tipe pertama.

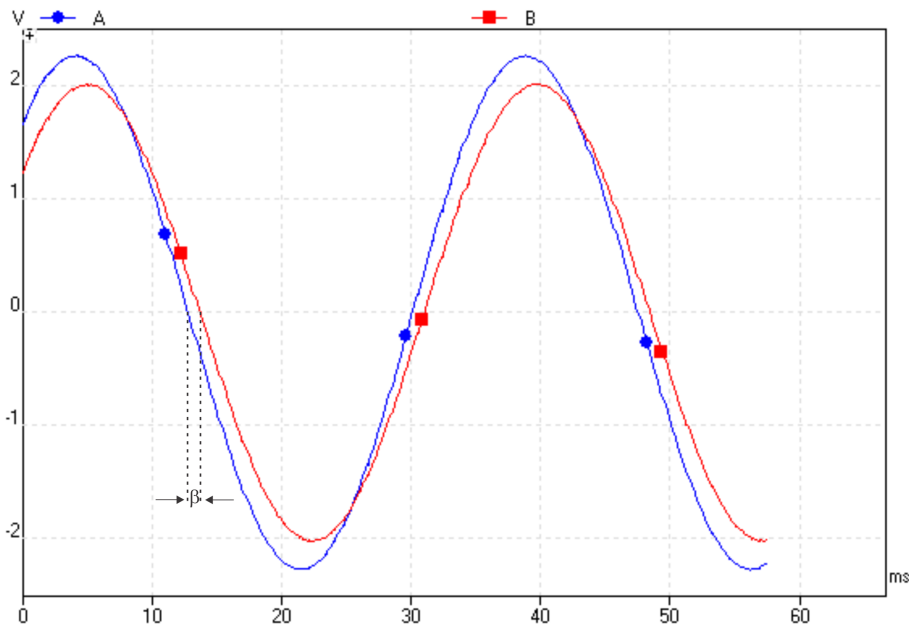
Dapat dilihat bahwa respon impedansi kompleks antara hasil pengukuran dan perhitungan sudah bersesuaian. Respon impedansi kompleks membentuk kurva asimtotik dimana pada frekuensi rendah 10^{-2} - 10^{-1} Hz nilai impedansi menuju nilai penjumlahan dari dua buah resistor yang digunakan yakni sebesar 3,6 K Ω karena pada frekuensi menuju tak hingga kapasitor akan bernilai nol yang mengakibatkan kedua resistor, R_1 dan R_2 berhubungan seri. Pada frekuensi 10^{-1} - 1 Hz merupakan zona dispersi dimana nilai impedansi semakin menurun nilainya seiring bertambahnya frekuensi. Kemudian pada frekuensi tinggi nilai impedansi semakin menuju nilai resistor pertaman yakni 1,8 K Ω , karena pada frekuensi tinggi kapasitor akan bernilai nol dan mengakibatkan tahanan pengganti dari hubungan paralel resistor kedua dan kapasitor akan sangat kecil, sehingga nilai impedansi total merupakan nilai tahanan resistor pertaman.

Respon fase tidak seluruhnya bersesuaian dengan hasil perhitungan. Pada frekuensi rendah nilai fase cenderung tidak stabil, ini disebabkan karena perekaman pada frekuensi rendah cukup sulit untuk mendapatkan hasil yang akurat, dalam hubungannya dengan lamanya periode satu gelombang dengan interval sampling yang dilakukan. Pada frekuensi sedang dari 10^{-1} - 10^2 Hz merupakan rekaman yang akurat untuk mendapatkan nilai fase, dimana pada rentang frekuensi ini pula diperlihatkan hubungan zona dispersi impedansi yang diikuti dengan zona puncak dari fase. Pada Frekuensi tinggi efek kopling sangat berpengaruh mengakibatkan nilai fase yang tinggi dan tidak sesuai dengan hasil perhitungan. Oleh karena itu pada pengukuran yang melibatkan sampel digunakan amplifier, yang salah satu fungsinya untuk memperkecil efek kopling. Kalibrasi selanjutnya dilakukan pengukuran pada rangkaian RC kedua. Pada Gambar 6.b disajikan respon SIP hasil pengukuran dan perhitungan dari rangkaian RC tipe kedua.

Respon SIP rangkaian kedua menunjukkan nilai pen-

Tabel 1. Tabel variasi frekuensi sinyal dan besaran pencuplikan

Frekuensi Sinyal (Hz)	Total Waktu Cuplik (μs)	Total Cuplik
1.000	2.000	60 - 65
600	3.333	100 - 105
300	6.666	200 - 205
200	10.000	305 - 310
100	20.000	610 - 615
60	33.333	1025 - 1030
30	66.666	2000
20	100.000	2000
10	200.000	2000
6	333.333	2000
3	666.666	2000
2	1.000.000	2000
1	2.000.000	2000
0,6	3.333.333	2000
0,3	35 ms	200
0,2	50 ms	200
0,1	100 ms	200
0,06	150 ms	200
0,03	335 ms	200
0,02	500 ms	200
0,01	400 ms	200



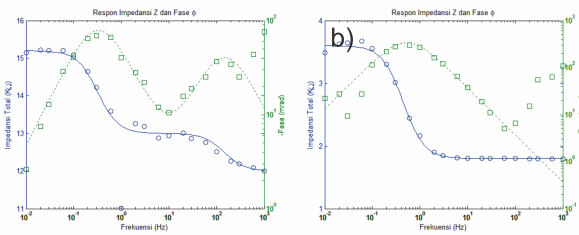
Gambar 5. Beda sudut fase antara sinyal tegangan masukan (V_{in}) dan tegangan keluaran (V_{out})

gukuran impedansi sudah sesuai dengan perhitungan. Tampak terdapat dua zona dispersi, yakni pada rentang frekuensi 10^{-1} - 1 Hz dan frekuensi tinggi pada rentang sekitar 10^2 - 10^3 Hz. Diikuti pula terdapat dua pucak fase pada masing-masing zona dispersi tersebut. Permasalahan yang sama juga ditemui pada hasil pengukuran terhadap rangkaian RC kedua ini, yakni nilai fase pada frekuensi tinggi masih terpengaruh efek kopling dan pada frekuensi rendah rekaman tegangan tidak baik yang berimbas pada tidak akuratnya perhitungan fase. Dilihat dari hasil yang telah diperoleh pada kalibrasi alat ini maka diketahui bahwa sistem pen-

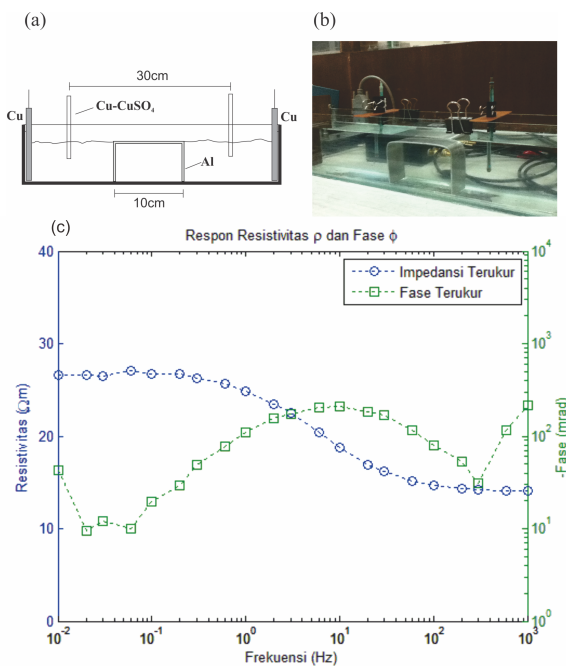
gukuran yang dibangun layak untuk digunakan mengukur respon SIP baik dari model maupun sampel.

4.2 Pengukuran Model dengan Logam Murni

Pengujian pada sampel logam murni bertujuan untuk melakukan pengukuran pada model pori batuan bermineral logam. Diibaratkan akuarium kaca adalah sebuah pori batuan yang berisi air, dan lempeng logam sebagai butir mineral logam yang meblokir pori batuan. Logam yang digunakan adalah aluminium dan tembaga. Berikut adalah hasil dari pengujian beberapa model pori batuan.



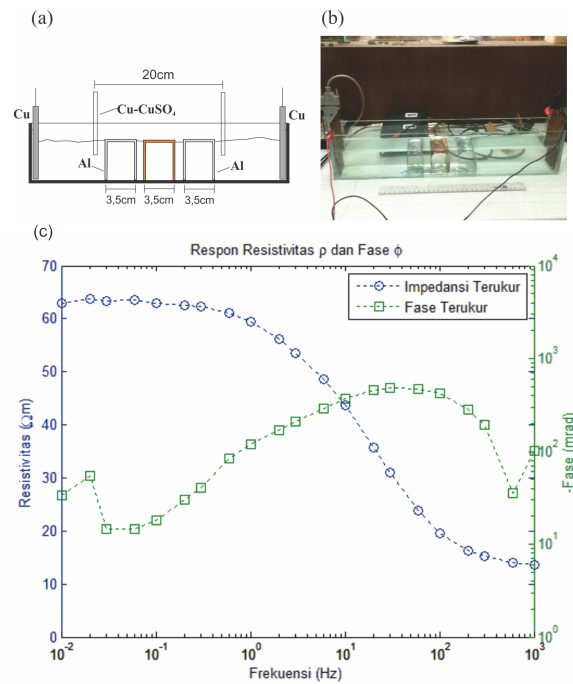
Gambar 6. (a) Respon SIP hasil pengukuran dan perhitungan pada rangkaian RC pertama. (b) Respon SIP hasil pengukuran dan perhitungan pada rangkaian RC kedua. Grafik garis merupakan hasil perhitungan dan plot bulat, kotak merupakan hasil pengukuran.



Gambar 7. (a) Model 1 menggunakan lempeng aluminium. (a) blok diagram Model 1, (b) susunan rangkaian pengukuran Model 1 di laboratorium, (c) Respon SIP Model 1.

Model pori batuan pertama menggunakan lempeng aluminium. Lempeng aluminium dibentuk dengan ukuran panjang 10cm dan luas penampangnya 6,5cm x 5,5cm, kemudian jarak antar elektroda potensial adalah 30cm. Blok diagram dan pengukuran pada model pertama disajikan pada Gambar 7.a.

Respon SIP dari model pertama disajikan pada Gambar 7.c. Respon yang diperoleh menunjukkan adanya grafik asimtotik untuk respon resistivitas dan puncak fase pada daerah dispersi resistivitas. Daerah dispersi mulai terjadi pada frekuensi 0,3 Hz sampai 300Hz. Resistivitas pada frekuensi menuju nol bernilai 26,6 Ωm kemudian mengalami dispersi seiring bertambah frekuensi, dimana pada frekuensi menuju tak hingga resistivitas bernilai 14,0 Ωm . Maka dapat diketahui bahwa selisih nilai resistivitas antara frekuensi rendah dan frekuensi tinggi adalah 12,6 Ωm . Respon resistivitas menunjukkan grafik yang *smooth*, berbeda dengan grafik respon fase menunjukkan adanya ketidakstabilan



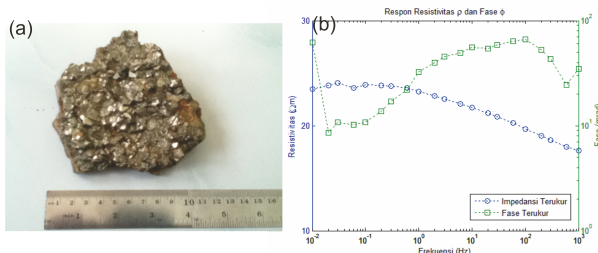
Gambar 8. (a) Model 2 menggunakan lempeng tembaga dan aluminium (a) blok diagram Model 2, (b) susunan rangkaian pengukuran Model 2 di laboratorium, (c) Respon SIP Model 2.

data yang dipengaruhi beberapa faktor. Untuk respon fase yang terukur pada frekuensi tinggi yakni 600 Hz dan 100 Hz masih dijumpai adanya efek kopling yang ditandai dengan perubahan nilai fase yang drastis meningkat. Kemudian untuk frekuensi rendah 0,01 Hz hingga 0,06 Hz respon fase tidak stabil, hal ini disebabkan karena rekaman tegangan pada frekuensi rendah cukup sulit untuk mendapatkan hasil yang akurat.

Model pori batuan kedua menggunakan dua buah lempeng aluminium yang digunakan pada model pertama dan ditambah lempeng tembaga kecil dengan ukuran yang sama. Model kedua dimaksudkan memodelkan pori batuan dengan butir mineral logam yang lebih kecil dan memiliki dua jenis butiran mineral logam. Blok diagram dan pengukuran pada model kedua disajikan pada Gambar 8.a.

Respon SIP dari model kedua disajikan pada Gambar 8.c. Respon resistivitas membentuk kurva asimtotik dan puncak fase berada pada rentang frekuensi daerah dispersi resistivitas. Respon resistivitas tidak menunjukkan respon bahwa terdapat dua jenis logam yang berbeda, namun pada respon fase di daerah frekuensi rendah menunjukkan adanya tanda-tanda dideteksinya dua jenis logam yang berbeda, yakni dengan berbeloknya nilai fase.

Penambahan logam tembaga pada model kedua ini juga memberikan pengaruh pada resistivitas yang terukur, dimana lebih resistivitas yang terukur lebih besar dari model pertama. Pada frekuensi menuju nol memiliki resistivitas sebesar 62,9 Ωm dan pada frekuensi menuju tak hingga memiliki resistivitas sebesar 13,6 Ωm . Maka dapat diketahui bahwa selisih nilai resistivitas antara frekuensi rendah dan frekuensi tinggi adalah 49,3 Ωm . Pada respon fase masih dijumpai adanya efek kopling pada frekuensi tinggi dan tidak stabilnya nilai fase pada frekuensi rendah.



Gambar 9. (a) Sampel batuan bermineral chalcopyrite, (b) Respon SIP sampel chalcopyrite.

4.3 Pengukuran Sampel Batuan Bermineral Logam

Pengujian pada sampel batuan bermineral logam dilakukan dengan menggunakan teknik pengujian yang sama dengan model-model pori batuan sebelumnya, meskipun resistivitas yang terukur adalah resistivitas air dan batuan, namun kontak antara air dan mineral logam diharapkan dapat memberikan respon resistivitas kompleks dan fase terhadap frekuensi, dengan begitu dapat diketahui bagaimana respon SIP dari batuan. Berikut adalah hasil dari pengujian sampel batuan bermineral.

Respon SIP dari sampel batuan bermineral chalcopyrite disajikan dalam Gambar 9.b. Respon resistivitas tidak menunjukkan sebuah kurva asimtotik, namun secara umum terlihat bahwa terjadi dispersi nilai resistivitas. Untuk frekuensi rendah dispersi mulai terjadi pada frekuensi 0,1 Hz. Pada Nilai resistivitas yang terukur mengalami penurunan seiring dengan frekuensi yang semakin tinggi. Nilai resistivitas yang terukur juga tidak mengalami banyak penambahan dari resistivitas air saja, ini berarti chalcopyrite hanya menyumbang sedikit nilai resistivitas. Nilai resistivitas chalcopyrite memang sangat kecil yakni $1,2 \times 10^{-5} \Omega m - 0,3 \Omega m$ dengan rerata $4 \times 10^{-3} \Omega m$ (Telford et al., 1990). Respon fase juga menunjukkan respon yang tidak sempurna. Secara umum tren fase semakin naik seiring dengan nilai frekuensi yang semakin tinggi, dimana nilai resistivitas semakin menurun. Efek kopling dijumpai pada frekuensi tinggi 1000 Hz dimana nilai fase berubah melonjak naik.

Respon SIP dari sampel batuan bermineral magnetite disajikan dalam Gambar 10.b. Respon yang diperoleh dari sampel uji ini menunjukkan hasil yang mirip dengan respon batuan bermineral chalcopyrite. Respon resistivitas tidak membentuk grafik asimtotik, namun menunjukkan dispersi seiring dengan meningkatnya nilai frekuensi, dimana terdapat titik belok dispersi pada frekuensi 0,1 Hz. Untuk nilai resistivitas, sampel uji ini memberikan cukup banyak tambahan dari nilai resistivitas air. Dapat dilihat pada frekuensi 0,01 Hz memiliki resistivitas $48,5 \Omega m$ dan pada frekuensi 1000 Hz memiliki resistivity $38,9 \Omega m$. Merujuk pada Telford dkk. [1990], mineral magnetite memiliki nilai resistivitas yang bervariasi dari rendah hingga tinggi, yakni dalam rentang $5 \times 10^{-5} - 5,7 \times 10^3 \Omega m$. Respon fase juga menunjukkan respon yang mirip dengan respon fase pada mineral chalcopyrite. Secara umum tren fase semakin naik seiring dengan nilai frekuensi yang semakin tinggi, dimana nilai resistivitas semakin menurun. Efek kopling dijumpai pada frekuensi tinggi 1000 Hz dimana nilai fase berubah melonjak naik.



Gambar 10. (a) Sampel batuan bermineral magnetite, (b) Respon SIP sampel magnetite.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui respon SIP dari berbagai sampel uji maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

(i) Hasil yang diperoleh dari pengujian atau kalibrasi alat menggunakan rangkaian paralel RC, baik itu yang tunggal maupun ganda, menunjukkan bahwa sistem pengukuran yang dibangun sudah benar.

(ii) Model pori batuan bermineral logam yang dibentuk menggunakan berbagai macam logam murni dapat memberikan respon SIP. Hasil pengukuran model tersebut menunjukkan adanya pertambahan nilai resistivitas pada ukuran butir mineral yang lebih kecil bila dibandingkan dengan butir mineral yang lebih besar.

(iii) Hasil pengukuran sampel uji batuan bermineral logam dapat menunjukkan adanya respon impedansi kompleks, namun tidak menunjukkan respon SIP yang sempurna. Hal ini dipengaruhi akibat kontak antara kristal mineral logam pada sampel uji dengan air sangat kecil, sehingga polarisasi elektroda yang terjadi juga kecil.

(iv) Pada frekuensi tinggi diatas 600 Hz masih dijumpai adanya efek kopling, yang ditandai dengan bertambahnya nilai fase secara signifikan.

(v) Pengukuran impedansi pada frekuensi rendah dapat menghasilkan respon yang akurat dengan koreksi menghilangkan efek tegangan DC pada perhitungan.

(vi) Perhitungan fase masih belum akurat, ditunjukkan dengan banyak respon fase pada frekuensi rendah yang nilainya tidak stabil. Hal ini tergantung dari kemampuan cuplik osiloskop digital yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, J., Kemna, A. dan Hubbard, S.S, 2008, *A comparison between Gauss-Newton and Markov-chain Monte Carlo-based methods for inverting spectral induced polarization data for Cole-Cole parameters*, Geophysics, Vol.73, pp.247-259.
- He, Z., Jiang, W., dan Liu, P., 2006, *Two case studies from*

- China of hydrocarbon detection with SIP*, The Leading Edge, November 2006.
- Ntarlagiannis, D., dan Ferguson, A., 2009, *SIP response of artificial biofilms*, Geophysics, Vol.74, No.1, pp.A1-A5.
- Ntarlagiannis, D., Doherty, R., dan Williams, K.H., 2010, *Spectral induced polarization signatures of abiotic FeS precipitation*, Geophysics, Vol.75, No.4, pp.F127-F133.
- Luo, Y., dan Zhang, G., 1998, *Theory and Application of Spectral Induced Polarization*, Geophysical Monograph Series Number 8, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.
- Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R dan Nelson, P.H., 1978, *Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP*, Geophysics, Vol.43, pp.588-609.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. dan Sheriff, L.P., 1990, *Applied Geophysics, 2nd edition*, Cambridge University Press, New York, USA.
- Vanhala, H., Soininen, H., dan Kukkonen, I., 1992, *Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment*, Geophysics, Vol.57, pp.1014-1017.
- Weller, A., Nordsiek, S., dan Debschütz, W., 2010, *Estimating permeability of sandstone sample by nuclear magnetic resonance and spectral-induced polarization*, Geophysics, Vol.75, No.6, pp.E215-E226.