

## RANCANG BANGUN RANGKAIAN PENGKONDISI SINYAL UNTUK SENSOR DETEKSI KANDUNGAN NITRAT

Robeth Viktoria Manurung<sup>1\*)</sup>, Aminuddin Debatara<sup>2</sup>, dan Hiskia<sup>1</sup>

1. Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, LIPI, Bandung 40135, Indonesia
2. Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Depok 16425, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: [robeth@ppet.lipi.go.id](mailto:robeth@ppet.lipi.go.id)

---

### Abstrak

Nitrat salah satu unsur hara utama yang diperlukan dalam pertanian. Ketersediaan nitrat di dalam tanah pertanian juga terbatas karena sifatnya yang mudah tergerus oleh air hujan sehingga proses penambahan melalui pemberian pupuk yang berlebih dapat menyebabkan pencemaran air tanah, di samping itu terjadi inefisiensi dalam pertanian jika pemberian pupuk dilakukan seragam tanpa dilakukan analisis kondisi lahan terlebih dahulu. Oleh sebab itu dibutuhkan sistem sensor untuk mengukur kandungan unsur nitrat di dalam tanah. Sistem sensor pendeteksi kadar nitrat ini terdiri atas divais sensor nitrat, rangkaian pengkondisi sinyal dan rangkaian data akuisisi. Dalam tulisan ini dijelaskan proses desain dan pembuatan rangkaian pengkondisi sinyal yang di intergrasikan ke dalam sistem sensor pendeteksi kadar nitrat yang diaplikasikan pada lahan pertanian. Divais sensor ion nitrat ini menggunakan prinsip amperometrik dengan konfigurasi tiga elektroda: *working*, *reference*, dan *auxiliary* dengan membran sensitif yang digunakan adalah konduktif polimer. Teknik *screen printing* teknologi lapisan tebal dipilih sebagai teknik fabrikasi elektroda sedangkan teknik deposisi membran menggunakan metoda elektro-polimerisasi. Pengujian kinerja divais sensor dilakukan dengan menguji kemampuan sensor dalam mengukur larutan nitrat standar dengan rentang konsentrasi 1  $\mu\text{M}$ –1 mM. Pengujian memperlihatkan respon yang baik dengan rentang arus dari 2,8–4,71  $\mu\text{A}$  dengan faktor linieritas 99,65% dan waktu tanggap 250 detik.

### Abstract

**Circuit Design for Sensor Detection Signal Conditioner Nitrate Content.** Nitrate is one of macro nutrients very important for agriculture. The availability of nitrate in soil is limited because it is very easy to leaching by rain, therefore nitrate could be contaminated ground water by over-process of fertilizer. This process could also produce inefficiency in agriculture if it happened continuously without pre-analysis of farm field. The answer those problems, it is need to develop the ion sensor system to measure concentrations of nitrat in soil. The system is consist of nitrate ion sensor device, signal conditioning and data acquisition circuit. The design and fabrications of signal conditioning circuit which integrated into ion nitrate sensor system and will apply for agriculture. This sensor has been used amperometric with three electrodes configuration: *working*, *reference* and *auxiliary*; the ion sensitive membrane has use conductive polymer. The screen printing technique has been chosen to fabricate electrodes and deposition technique for ion sensitive membrane is electropolymerization. The characterization of sensor has been conducted using nitrate standard solution with range of concentration between 1  $\mu\text{M}$ –1 mM. The characterization has shown that sensor has a good response with current output between 2.8–4.71  $\mu\text{A}$ , linearity factor is 99.65% and time response 250 second.

*Keywords: amperometric, conductive polymer, electropolymerization, ion sensor, nitrate*

---

### 1. Pendahuluan

Pertanian presisi atau *precision farming* merupakan sebuah konsep pengelolaan pertanian secara modern yang bertujuan untuk mengendalikan input dan proses dalam usaha tani sehingga diharapkan diperoleh hasil

produksi yang optimal, berkelanjutan, dan menguntungkan. Peningkatan keuntungan diusahakan melalui peningkatan kualitas produk dan penurunan biaya produksi, sedangkan penurunan pengaruh terhadap lingkungan dilakukan dengan menekan masukan produksi melalui pengelolaan yang efektif dan

efisien dalam hal penggunaan bahan kimia pertanian (pupuk, pestisida, herbisida, dan sebagainya).

Penggunaan energi dan melalui konservasi tanah dan air baik permukaan maupun di dalam tanah. Secara alami kondisi lahan tidaklah seragam, hal ini disebabkan antara lain oleh topografi lahan, ketebalan lapisan *top soil*, tekstur tanah, kesuburan tanah, kelembaban tanah dan sebagainya. Dengan demikian, perlakuan seragam secara teknis menyebabkan terjadinya *over application* pada "lingkungan yang subur" dan *under-application* pada "lingkungan yang marjinal" pada tiap petak lahan. Kemudian jika perlakuan tersebut dilakukan secara intens dan dalam waktu yang cukup lama, maka tidak diragukan lagi akan menurunkan produktivitas lahan yang disebabkan oleh degradasi mutu lingkungan. Hal ini terjadi disebabkan *over-application* pupuk N (Nitrogen) misalnya, yang tidak dapat segera terserap oleh tanaman sehingga sebagian besar menguap ke udara dalam bentuk amonia atau meresap masuk ke dalam air tanah dalam bentuk nitrat.

Salah satu teknologi yang mendukung pertanian presisi adalah teknologi sensor, dimana jenis-jenis sensor yang dikembangkan selama ini mengacu pada kualitas tanah, air serta iklim lingkungan di sekitar lahan yang dipantau. Jenis-jenis sensor yang telah banyak dibuat dan dikembangkan sebagai aplikasi pertanian presisi adalah temperatur tanah, pH tanah, kelembaban (*moisture*) tanah sedangkan untuk sensor deteksi *macro-nutrients* tanah seperti N, P, K belum begitu banyak dibuat. Dalam penelitian pendahuluan telah dilakukan perancangan dan pembuatan sensor ion nitrat dengan menggunakan teknologi *thick film* dan teknologi semikonduktor. Sebagai bahan aktif dari *ion selective membrane* adalah *conductive polymer* poly pyrrole (PPy).

Untuk mendukung kinerja dari divais sensor nitrat dibutuhkan rangkaian pengkondisi sinyal yang mampu memproses sinyal keluaran dari sensor untuk dapat ditampilkan berupa data pengukuran kadar nitrat serta menyimpan data tersebut. Untuk itu, dalam tulisan ini akan dijelaskan mengenai perancangan dan pembuatan rangkaian pengkondisi sinyal untuk sensor ion nitrat yang akan diaplikasikan pada pertanian presisi [1-2].

**Sensor Ion Nitrat.** Sensor ion dapat didefinisikan sebagai sensor kimia yang memiliki fungsi untuk mengukur tingkat konsentrasi ion tertentu di dalam larutan.

Komponen-komponen utama dari sensor ion adalah elektroda, elektrolit pendukung, dan ion *sensitive membrane*. Terdapat dua jenis sensor ion berdasarkan prinsip kerjanya yaitu, potensiometrik dan amperometrik. Sensor ion potensiometrik merupakan jenis yang paling banyak ditemui yaitu *ion selective*

*electrode* dan memegang peranan yang cukup penting [1]. Salah satu implementasi dari *ion selective electrode* (ISE) adalah pH meter, ISFET, dan MOSFET. Dalam prinsip amperometrik dilakukan pengukuran besar arus yang terjadi sebagai akibat reaksi ion secara kimia berbanding lurus dengan jumlah konsentrasi ion yang dideteksi. Besar arus yang diukur mengikuti rumus hukum Nerst sebagai berikut,

$$I = \frac{nFAC^{\phi} \sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}} \quad (1)$$

dengan,

$i$  = arus (A)

$n$  = jumlah muatan elektron dalam reaksi elektroda

$F$  = Konstanta Faraday (96465 C/mol)

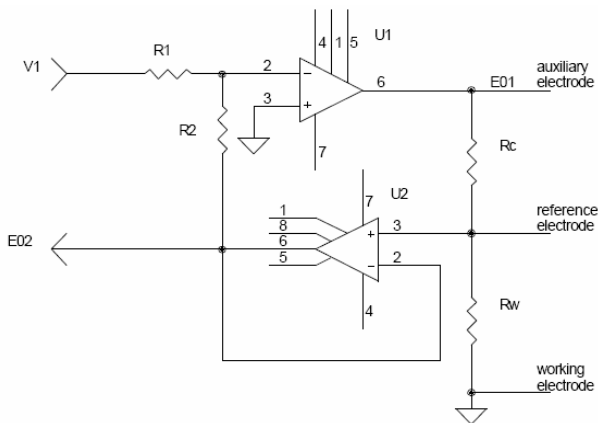
$D$  = Koefisien difusi ( $m^2/s$ )

$t$  = waktu (detik)

Pada umumnya sensor ion dengan prinsip amperometrik menggunakan konfigurasi tiga elektroda yaitu *working*, *reference*, dan *counter electrode*. Sensor amperometrik menggunakan proses transfer ionik menjadi pergerakan elektronik antara bagian elektroaktif (membran sensitif ion) dan elektroda. Arus listrik dihasilkan ketika divais direndam di dalam larutan yang diukur dan langsung berhubungan dengan besar konsentrasi unsur yang diukur [3-4]. Konfigurasi dua elektroda (elektroda kerja dan referensi) dapat digunakan, ketika arus listrik kecil digunakan akan tetapi ketika arus listrik yang diperlukan cukup besar (orde mikroampere) maka akan terjadi tegangan jatuh pada elektroda referensi dan hal ini sangat mempengaruhi kinerja sensor dalam melakukan pengukuran konsentrasi unsur target. Untuk mengatasi hal tersebut maka ditambahkan elektroda bantu atau *auxiliary* untuk mencegah arus mengalir pada elektroda referensi. Konfigurasi yang demikian dikenal sebagai konfigurasi tiga elektroda amperometrik. Dalam konfigurasi tiga elektroda ini sangat diperlukan kestabilan tegangan suplai yang diberikan pada elektroda kerja dan referensi dalam melakukan pengukuran besar konsentrasi unsur target.

Rangkaian potensiostat merupakan rangkaian yang berfungsi untuk menjaga kestabilan besar potensial (tegangan) antara elektroda kerja dan referensi [5-6]. Rangkaian ini melakukan kompensasi terhadap tegangan jatuh yang mungkin dapat terjadi terhadap larutan kimiawi serta mampu memperkecil kemungkinan sirkulasi arus listrik oleh elektroda referensi. Rangkaian dasar dari potensiostat berupa rangkaian *feedback* yang dapat mengkompensasi tegangan jatuh yang muncul antara elektroda kerja dan referensi [7]. Rangkaian potensiostat ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa IC *operational amplifier* U1 memiliki besar output yang sama dengan besar potensial untuk polarisasi elektroda kerja serta



Gambar 1. Skematik Rangkaian Dasar Potensiostat

drop yang terjadi akibat larutan. Sedangkan IC U2 merupakan bagian sensor untuk proses *feedback* terhadap tegangan error melalui resistor R2. Rc dan Rw merupakan resistor hipotesis dari transfer muatan resistansi dari daerah pemisahan antara elektroda bantu dan referensi dan antara elektroda referensi dan elektroda kerja. Untuk U1 dengan  $e_1 = 0$  dan besar R1 dan R2 adalah sama maka,

$$e_2 = \frac{1}{2}(V_1 - E_{02}) + E_{02} \quad (2)$$

Sedangkan pada rangkaian U2 sebagai *voltage follower* dari jaringan hipotesis Rc dan Rw bekerja sesuai dengan persamaan,

$$e_2 = \frac{R_w}{(R_w + R_c)} \quad (3)$$

Dengan menggabungkan persamaan (1) dan (2) dan membuat pertimbangan secara praktek berupa faktor penguatan *very large open-loop* dari *operational amplifier* (opamp) dan posisi letak elektroda kerja dan referensi yang berdekatan di dalam larutan sehingga diasumsikan  $R_w \ll R_c$ , maka diperoleh  $E_{02} = -V_1$  yang berarti bahwa potensial pada elektroda referensi dapat ditentukan untuk mengabaikan pengaruh Rw dan Rc, sehingga besar perbedaan potensial antara referensi dan elektroda kerja dapat diatur sedemikian menjadi konstan. Jenis IC opamp U1 yang digunakan adalah opamp dengan tipe TL081 dengan masukan FET, derau rendah dan CMRR (*common mode rejection ratio*) yang tinggi, murah serta mudah diperoleh di pasaran. Sedangkan IC U2 menggunakan tipe CA3140 dimana komponen ini memiliki impedansi masukan yang tinggi ( $10^{12} \Omega$ ), derau rendah, CMRR tinggi serta berbiaya murah.

**Rangkaian Sumber Potensial Polarisasi (bias).** Rangkaian ini berfungsi untuk memasok potensial konstan dengan nilai tertentu yang dibutuhkan untuk polarisasi pada elektroda. Besar potensial polarisasi

untuk sensor ion nitrat ini adalah 700 mV. Sebagai sumber potensial digunakan dioda tegangan referensi LM385 yang mampu memasok tegangan konstan dengan rentang 0–1.2 V atau 0–2.5 V yang dapat di-adjustable melalui potensio resistor P1.

Rangkaian sumber potensial polarisasi (bias) berfungsi mengubah besar arus listrik yang mengalir dari elektroda kerja ke elektroda bantu menjadi besaran tegangan. Pada Gambar 3 merupakan rangkaian dasar dari konverter arus-tegangan.

Rangkaian ini bekerja dengan kondisi *ground virtual* pada input  $e_2$  yang berperan sebagai titik penjumlahan. Dari Gambar 3 tersebut Persamaan dapat dituliskan,

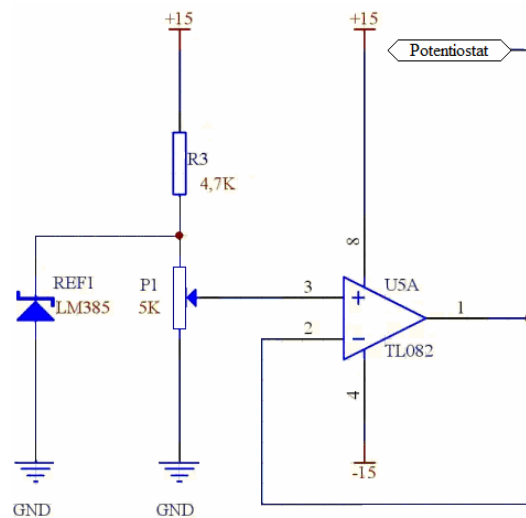
$$I_c = -I_r \quad (4)$$

dengan  $I_c$  merupakan arus masukan dari rangkaian yang juga berhubungan langsung dengan arus yang mengalir dari *auxiliary* ke elektroda kerja. Arus listrik tersebut melewati resistor *feedback* Rr. Tegangan keluaran  $V_o$  dari konverter arus-tegangan adalah

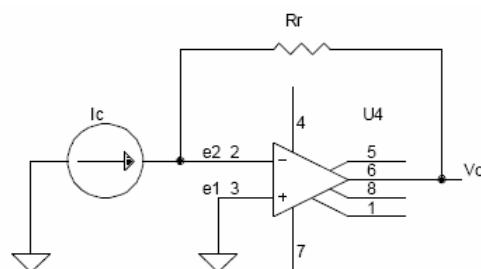
$$V_o = -I_c R_r \quad (5)$$

atau

$$V_o = I_r R_r \quad (6)$$



Gambar 2. Desain Skematik Rangkaian Sumber Potensial Polarisasi



Gambar 3. Rangkaian Dasar Konverter Arus-Tegangan

Dengan demikian besar tegangan keluaran dari konverter arus-tegangan akan sebanding dengan besar arus listrik yang mengalir pada elektroda bantu (*auxiliary*) ke elektroda kerja (*working*). Rancangan rangkaian di atas memungkinkan arus mengalir hingga  $100 \mu\text{A}$  tanpa kondisi saturasi.

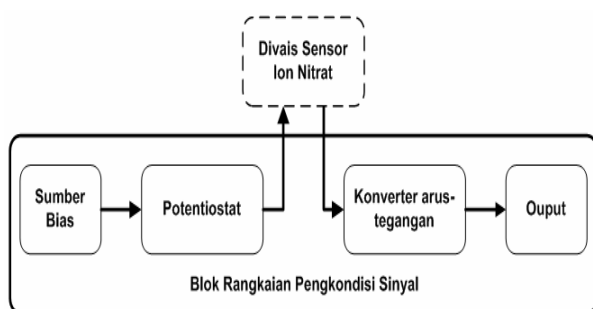
## 2. Metode Penelitian

### Desain dan Fabrikasi Rangkaian Pengkondisi Sinyal.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa sensor amperometrik merupakan jenis sensor yang melakukan pengukuran dengan merekam besar arus yang mengalir di dalam sel. Arus listrik yang dihasilkan diperoleh melalui proses elektro-kimia yang terjadi karena adanya beda potensial eksternal yang diberikan pada elektroda kerja dan elektroda referensi. Dengan demikian pada sensor amperometrik sangat diperlukan rangkaian pengkondisi sinyal untuk mendukung kinerja sensor tersebut. Rangkaian pengkondisi sinyal ini terdiri dari beberapa sub-blok rangkaian yaitu rangkaian sumber potensial (bias), rangkaian potensiostat, konverter arus-tegangan dan rangkaian output (penguat dan filter) [8,9]. Blok diagram dari rangkaian pengkondisi sinyal pada Gambar 4.

Dari blok diagram tersebut selanjutnya di-implementasikan ke dalam desain skema rangkaian listrik dengan menggunakan piranti lunak Protel DXP dan dari skema rangkaian tersebut dapat dibuat *printed circuit board* (PCB) dan dilakukan pemasangan komponen yang telah didesain sebelumnya.

Proses pengujian kinerja dari rangkaian pengkondisi sinyal dilakukan dengan menghubungkan prototip sensor nitrat dengan rangkaian pengkondisi sinyal dan selanjutnya melakukan pengukuran terhadap larutan nitrat standar dengan kandungan konsentrasi yang berbeda-beda. Hasil pengolahan dari rangkaian pengkondisi sinyal ini direkam dengan menggunakan digital multimeter yang terhubung langsung dengan personal komputer.



Gambar 4. Blok Rangkaian Pengkondisi Sinyal

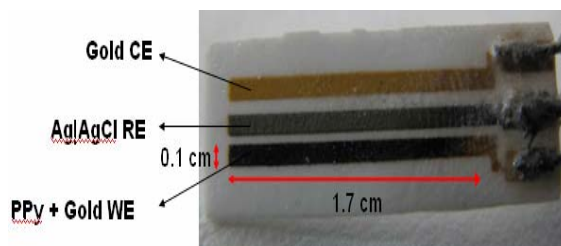
## 3. Hasil dan Pembahasan

**Hasil Fabrikasi Sensor Ion Nitrat.** Tahapan fabrikasi sensor ion nitrat diawali oleh pembuatan (desain) tata letak dari elektroda sensor dengan menggunakan *layout editor* CorelDraw, dan dalam proses ini dihasilkan tiga jenis tata letak elektroda sensor. Selanjutnya hasil desain tersebut dijadikan *screen mask* untuk pembuatan elektroda menggunakan teknologi film tebal. Selanjutnya hasil fabrikasi elektroda sensor ion nitrat tersebut dilakukan proses deposisi membran dengan menggunakan teknik elektro polimerisasi di atas permukaan elektroda *working* dan hasilnya pada Gambar 5.

**Hasil Fabrikasi Pengkondisi Sinyal.** Dari Gambar 4 blok diagram rangkaian pengkondisi sinyal yang telah dijelaskan sebelumnya, selanjutnya di-implementasikan ke dalam desain skema rangkaian listrik dan dari skema rangkaian tersebut dapat dibuat PCB dan dilakukan pemasangan komponen yang telah didesain sebelumnya. Desain PCB menggunakan piranti Protel DXP. Hasil fabrikasi rangkaian pada Gambar 6.

**Hasil Pengujian dan Karakterisasi.** Pengujian kinerja elektroda referensi Ag|AgCl ini bertujuan untuk memantau kestabilan tegangan yang dihasilkan oleh elektroda tersebut. Faktor kestabilan sangatlah memegang peranan penting dalam pengujian dengan menggunakan teknik amperometrik konfigurasi tiga elektroda. Pengujian dilakukan dengan membandingkan tegangan yang dihasilkan melalui proses potensiometri dengan elektroda referensi Ag|AgCl komersial yang diperoleh dari WTW (Technische Werkstätten GmbH) terhadap larutan elektrolit KCL dengan konsentrasi 0,1 M.

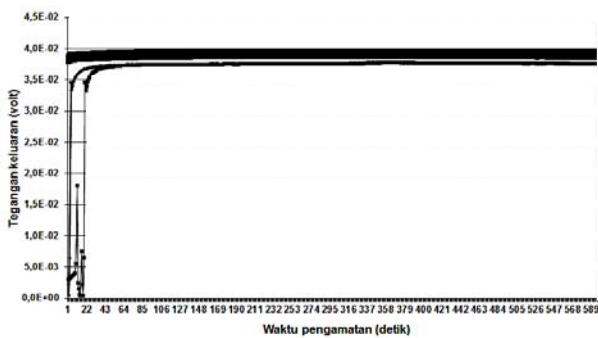
Dari Gambar 7 hasil pengukuran data keluaran rata-rata tegangan perbandingan sebesar  $0,039 \pm 0,09\%$  V yang berarti selisih tegangan serta simpangan yang dihasilkan antara elektroda referensi buatan terhadap elektroda referensi komersial cukup kecil, dan hal ini menjadi data karakteristik dari prototip elektroda referensi Ag|AgCl [10]. Secara umum kinerja elektroda referensi Ag|AgCl dapat dikatakan cukup baik dan dapat digunakan pada divais sensor ion nitrat.



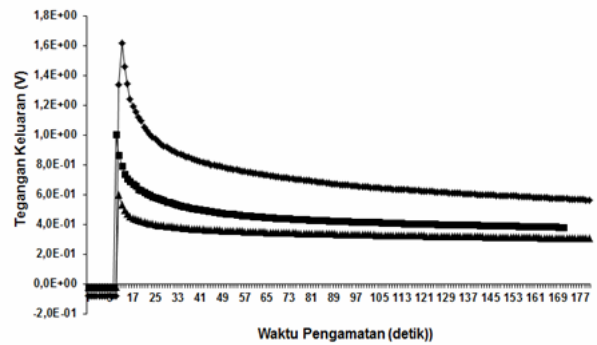
Gambar 5. Prototipe Sensor Ion Nitrat



Gambar 6. Prototipe Rangkaian Pengkondisi Sinyal



Gambar 8. Hasil Pengujian Berulang dari Sensor Ion Nitrat. Test A (◆), Test B (■), Test C (▲), Test D (×)



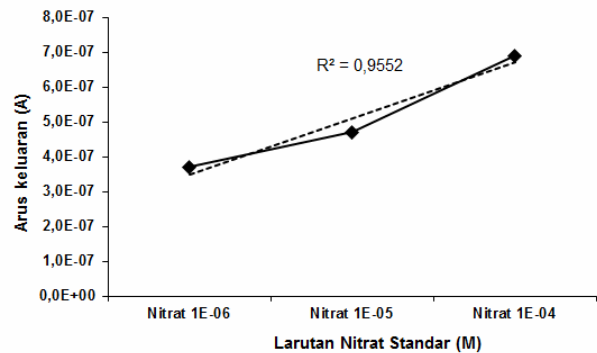
Gambar 9. Respon Pengujian Integrasi Sensor dan Pengkondisi Sinyal. Nitrat  $10^{-4}$  (◆), Nitrat  $10^{-5}$  (■), Nitrat  $10^{-6}$  (▲)

Gambar 7. Hasil Pengujian Kinerja Elektroda Referensi. Uji 1 (■), Uji 2 (◆), Uji 3 (▲), Uji 4 (×), Uji 5 (+), dan Uji 6 (★)

**Pengujian dan Karakterisasi Sensor Ion Nitrat.** Pengujian sensor ion nitrat dilakukan dengan mengukur larutan nitrat standar dengan rentang  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  M. Sensor dihubungkan dengan Multimeter SANWA PC-550 dan komputer untuk merekam hasil pengukuran dari masing-masing konsentrasi larutan. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 8.

Hasil pengujian kinerja sensor nitrat memperlihatkan respon keluaran arus sebanding dengan besar konsentrasi larutan nitrat standar yang diukur. Rentang arus yang dihasilkan untuk konsentrasi nitrat standar  $1 \mu\text{M}$ – $1 \text{mM}$  adalah  $9,48 \cdot 10^{-8}$ – $2,03 \cdot 10^{-7}$  A.

**Pengujian Hasil Integrasi Sensor Ion Nitrat dan Pengkondisi Sinyal.** Selanjutnya adalah proses integrasi antara divais sensor nitrat dan rangkaian pengkondisi sinyal yang telah dibuat. Hasil integrasi tersebut dilakukan pengujian dan karakterisasi respon sensor terhadap larutan nitrat standar dengan rentang konsentrasi  $1 \mu\text{M}$ – $0,1 \text{mM}$ . Dari hasil pengujian tersebut memperlihatkan respon keluaran dari sistem integrasi antara sensor dan rangkaian pengkondisi sinyal, dengan demikian hal ini berarti bahwa rangkaian pengkondisi sinyal yang dibuat bekerja sesuai dengan harapan. Hasil pengujian diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 10. Respon Keluaran Integrasi Sensor dan Pengkondisi Sinyal

Dalam proses integrasi ini diberikan potensial polarisasi sebesar 100 mV, hal ini dipilih untuk menghindari sensor dari eksitasi berlebih sebagai akibat pemberian yang terlampau besar yang dapat menyebabkan kerusakan pada sensor. Pada proses intergasi ini hasil keluaran akhir yang diperoleh berupa tegangan yang dihasilkan dan tegangan ini nantinya dapat diproses lebih lanjut seperti konversi ke format digital pada bagian akuisisi data. Selanjutnya dari grafik respon tersebut diperoleh besar arus rata-rata dari tiap-tiap konsentrasi larutan nitrat standar seperti hasil plot grafik kurva kalibrasi integrasi sensor nitrat dan rangkaian pengkondisi sinyal. Kurva kalibrasi yang dihasilkan pada Gambar 10.

#### 4. Simpulan

Dari kegiatan penelitian rancang bangun rangkaian pengkondisi sinyal untuk sensor nitrat amperometrik ini, dapat diperoleh simpulan bahwa pembuatan rangkaian pengkondisi sinyal untuk sensor nitrat telah dilakukan, demikian juga dengan hasil uji kinerja rangkaian dari masing-masing sub-rangkaian yang menyusun rangkaian pengkondisi sinyal ini telah beroperasi sesuai dengan baik. Selain itu proses integrasi antara prototip sensor nitrat dan rangkaian pengkondisi sinyal juga sudah dilakukan, hasil dari integrasi memperlihatkan bahwa sistem bekerja dengan baik dan mampu mendeteksi kandungan ion yang terdapat di dalam larutan standar.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada Program Insentif Riset bagi Peneliti dan Perekayasa Tahun 2009 LIPI-DIKTI yang telah mendukung melalui anggaran penelitian sehingga kegiatan penelitian ini dapat dilakukan.

#### Daftar Acuan

- [1] P. Grundler, *Chemical Sensor: An Introduction for Scientist and Engineers*, Springer Berlin Heidelberg, New York, 2007, p.273.
- [2] G. Inzelt, *Conducting Polymers: A New Era in Electrochemistry*, Springer-Verlag, 2008, p.282.
- [3] H. Andreas, B. Oliver, H. Christoph, B. Henry, *Proceeding of The IEEE*, 91/6 (2003) 839.
- [4] T. Bandikov, T. Harmon, *Sensors & Actuators B*, 106 (2005) 512.
- [5] C.C. Liu, P.J. Hesketh, G.W. Hunter, *Chemical Microsensors, The Electrochemical Society Interface*, Summer 2004, p.22.
- [6] P.R.H. Rodriguez, C.A. Galan, A.M. Perez, S.A. Sanroman, *J. Appl. Res. Tech.* 1 (2002) 107.
- [7] R.A. Pallas, J.G. Webster, *Sensor and Signal Conditioning*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, p.634.
- [8] A.M. Fenelon, B. Carmel, *Corrosion Sci.* 45 (2003) 2837.
- [9] H. Stradiotto, M.V.B. Zanoni, *J. Braz. Chem. Soc.* 14/2 (2003) 159.
- [10] G. Li, Y. Wang, H. Xu, *J. Sens.*, [www.mdpi.org/sensors](http://www.mdpi.org/sensors), 2007.