

## RANCANG BANGUN POTENTIOSTAT EKONOMIS BERBASIS MIKROKONTROLER UNTUK APLIKASI SENSOR ELEKTROKIMIA

Pratondo Busono<sup>1</sup>, Rony Febryarto<sup>2</sup>, Menasita Mayantasasi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Pusat Teknologi Elektronika, BPPT, Gedung Teknologi 3 Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan

<sup>2</sup>Progran Studi Fisika, Jurusan Sains, Teknologi Pangan dan Kemaritiman,

Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Kalimantan Timur

pratondo.busono@bppt.go.id

### Abstrak

Potentiostat merupakan perangkat elektronik yang digunakan untuk mengukur konsentrasi suatu zat hasil reaksi reduksi – oksidasi. Dalam penelitian ini telah dilakukan rancang bangun prototip potentiostat berbasis mikrokontroler ekonomis. Pada waktu yang bersamaan telah dikembangkan pula sensor elektrokimia untuk pengukuran konsentrasi kolesterol standar. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa potentiostat mampu menghasilkan kurva *cyclic voltametry* dan kurva kalibrasi. Untuk mengetahui kehandalannya, potentiostat yang telah dikembangkan dibandingkan dengan potentiostat komersial. Hasil perbandingan diperoleh kesimpulan bahwa pengukuran dengan potentiostat hasil pengembangan mendekati hasil pengukuran dengan potentiostat komersial.

**Kata kunci:** Potentiostat, sensor elektrokimia, mikrokontroler

### Abstract

Potentiostat is a device that is used to measure the concentration of substance resulted from reduction-oxidation reaction. In this research, a low cost and portable potentiostat has been developed. In line with this research, electrochemical sensor for measuring the cholesterol concentration has been fabricated. Experimental results show that the potentiostat is capable for performing the cyclic voltametry characterization. A calibration curve can be obtained from the measurement. The present potentiostat has been compared with the commercial potentiostat. A close agreements in measurement are obtained between the present potentiostat and the commercial one.

**Keywords :** Potentiostat, electrochemical sensor, microcontroller

### PENDAHULUAN

Elektrokimia akhir-akhir ini mempunyai peran yang penting dalam dunia medis, khususnya untuk alat diagnostik. Banyak literature menyebutkan bahwa pengukuran elektrokimia dapat digunakan untuk diagnose kanker [West, 2012], penyakit kardiovaskular dan deteksi dini penyakit karena gangguan metabolisme tubuh [Pratondo Busono et.al, 2015]. Sensor elektrokimia dan potentiostat merupakan perangkat yang biasa digunakan untuk melakukan pengukuran elektrokimia tersebut. Dalam sensor elektrokimia terdapat elektroda-elektroda yang mengubah sinyal yang dihasilkan dari reaksi kimia menjadi

sinyal listrik yang selanjutnya dapat diukur secara elektronik. Sensor elektrokimia untuk laboratorium biasanya memiliki konfigurasi 2 atau 3 elektroda yang kontak langsung dengan sampel yang akan diukur konsentrasinya. Ketiga elektroda pada sensor elektrokimia adalah: *reference electrode*, *counter electrode* dan *working electrode* [Harrar, 2013]. *Reference electrode* adalah elektroda yang memiliki tegangan potensial yang stabil dan tetap. Bahan yang banyak dipakai untuk *reference electrode* adalah Ag/Ag Cl. *Working electrode* adalah elektroda dimana reaksi kimia berlangsung. *Working electrode* biasanya terbuat dari logam mulia (inert metals) seperti

emas (Au), perak (Ag), platina (Pt) atau inert carbon seperti pasta karbon, *glassy carbon* atau *pyrolytic carbon*. *Auxiliary electrode* atau lebih dikenal dengan *counter electrode* merupakan elektroda yang berfungsi untuk memastikan bahwa arus tidak mengalir ke *reference electrode* sehingga tidak mengganggu potensial pada *reference electrode*. Bahan yang digunakan untuk *counter electrode* adalah platina (Pt), grafit atau *glassy carbon* [Harrar, 2013].

Potensiostat merupakan perangkat elektronik untuk mengontrol jalannya reaksi elektrokimia yakni dengan memberikan tegangan konstan pada elektroda acuan (*reference electrode*) dan mengukur arus yang mengalir pada elektroda kerja (*working electrode*). Potensiostat yang banyak digunakan di laboratorium saat ini merupakan salah satu peralatan laboratorium dengan harga yang cukup mahal dan memiliki ukuran fisik yang cukup besar. Dengan berkembangnya teknologi elektronika, telah memudahkan untuk mengembangkan potensiostat yang semula mahal, berat, berukuran besar, menjadi murah, ringan, berukuran kecil dan portable. Sehingga dapat digunakan untuk *point of care diagnostic*.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengecilkan ukuran potensiostat. A.V. Gopinath dan D. Russell telah mengembangkan sebuah potensiostat berbasis mikrokontroler yang dapat menampilkan hasil pengukuran berupa konsentrasi kimia dan arus puncak, dengan faktor korelasi berkisar 0.99 [Gopinath et.al., 2005]. Bertocci telah mengembangkan potensiostat dengan derau rendah untuk pengukuran elektrokimia [Bertocci, 1980]. Blanco et. al. telah merancang potensiostat portable yang ekonomis untuk pengukuran amperometri [Blanco et al., 2016].

Saat ini telah dikembangkan potensiostat opensource. Dengan adanya format opensource ini, memudahkan para peneliti untuk mengadopsi rancangan disain dengan mudah dan mengembangkannya potensiostat untuk kegunaan yang lebih spesifik tanpa harus mengembangkannya dari awal. Deskripsi potensiostat opensource tersebut mencakup seluruh rincian yang akan direplikasi seperti misalnya rancangan rangkaian elektronik,

daftar komponen elektronik (*bill of material*), layout PCB dan perangkat lunak (baik *firmware* maupun aplikasi). Ada beberapa publikasi yang menyebutkan potensiostat opensource, seperti misalkan : CheapStat yang dikembangkan oleh [Rowe et al, 2011 ], Dstat yang dikembangkan oleh [Dryden et al, 2015 ], dan potensiostat/galvanostat yang dikembangkan oleh [Dobbelaere et al ] yang digunakan untuk karakterisasi baterai lapis tipis.

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan perancangan dan pembuatan potensiostat kanal tunggal berbasis mikrokontroler yang lebih ringkas dan ekonomis, untuk aplikasi sensor elektrokimia atau biosensor khususnya pengukuran konsentrasi zat-zat hasil metabolisme tubuh. Proses pengembangan awal dimulai dengan mengintegrasikan potensiostat AFE LMP91000EVM dengan modul mikrokontroler STM32F411-DISCO dan beberapa perangkat lainya seperti flashdisk untuk penyimpanan data dan modul display. Perangkat lunak *firmware* dikembangkan untuk mengontrol dan memantau jalannya proses reaksi oksidasi dan reduksi pada sel elektrokimia. Selain itu *firmware* juga dilakukan untuk proses lainnya, sehingga potensiostat mempunyai kemampuan untuk pengukuran potentiometri, amperometri dan voltametri siklik. Pada saat yang bersamaan, telah dikembangkan pula sensor elektrokimia berbasis *screen printing* untuk pengukuran kadar kolesterol. Uji fungsi prototipe potensiostat maupun sensor elektrokimia ini dilakukan dengan menggunakan bahan kolesterol standar. Untuk mengetahui validitas dari prototipe potensiostat yang dikembangkan, hasil pengukuran dengan prototipe potensiostat dibandingkan dengan hasil pengukuran prototipe komersial. Perbandingan hasil pengukuran menunjukkan bahwa hasil pengukuran konsentrasi kolesterol dengan prototipe potensiostat mendekati hasil pengukuran dengan potensiostat komersial. Manfaat dari hasil penelitian ini adalah untuk keperluan percobaan elektrokimia di laboratorium-laboratorium pendidikan, laboratorium klinik, lingkungan, industri makanan dan pertanian.

## METODE

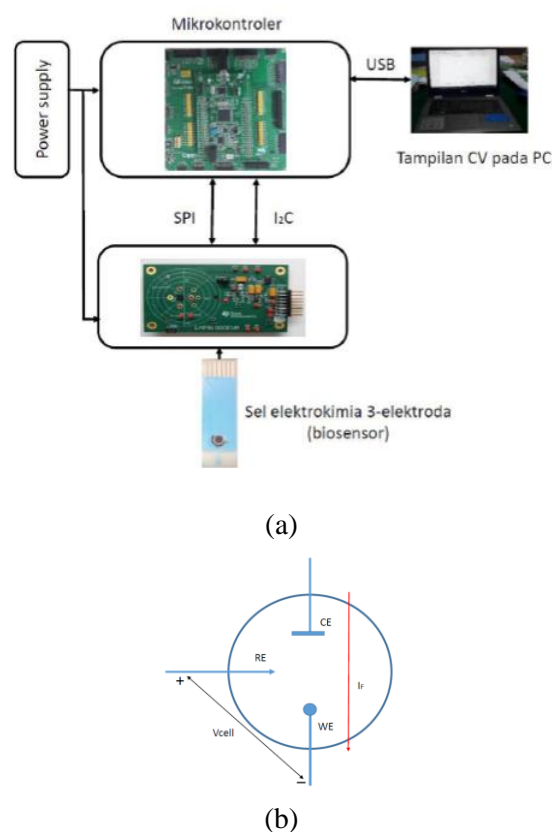
### Bahan

Carbon conductive ink (Electrodag PF-407) dibeli dari Acheson Colliods, USA. Sel elektrokimia dengan konfigurasi 3 elektroda dibeli dari Uniscan Instrument, UK. Serbuk platina (99.95%) dibeli dari Sigma Aldrich, USA. Triton-10, Enzim Cholesterol oxidase (ChOx, CO5F; 19.4 U/mg) dibeli dari BBI Enzymes (Gwent, UK). Natrium Klorida (NaCl), Kalium klorida (KCl), Kalium dihidrogen fosfat (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), dinatrium hidrogen fosfat (Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>), Cholesterol (99%) dibeli dari Sigma Aldrich, USA. Pyrrole dibeli dari Fluka.

Mikrokontroler STM32F411-DISCO, Modul LMP91000EVM, OPA2354 dibeli dari Mouser Electronic, USA. Resistor, kapasitor, LED dan conector dibeli dari toko online Indoware.

### Pengembangan Potentiostat

Blok diagram potensiostat berikut sel elektrokimia dengan konfigurasi 3-elektroda, secara berurutan dapat dilihat pada Gambar 1 (a) dan 1(b). Perangkat tersebut terdiri dari sensor elektrokimia, modul potensiostat, modul mikrokontroler, USB interface dimana perangkat pembaca dihubungkan, dan power supply. Potensiostat merupakan perangkat elektronik untuk mengontrol jalannya reaksi elektrokimia yakni dengan memberikan tegangan konstan pada elektroda acuan (*reference electrode*) dan mengukur arus yang mengalir pada elektroda kerja (*working electrode*). Antara modul potensiostat dan modul mikrokontroler dihubungkan dengan menggunakan protocol komunikasi I<sup>2</sup>C.

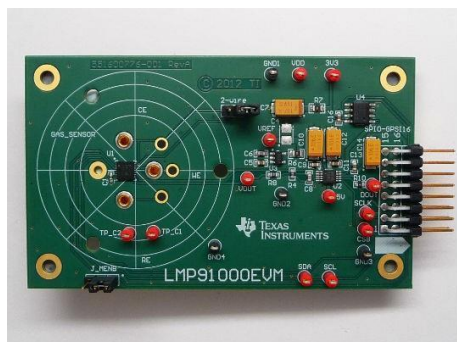


Gambar 1. Blok diagram potensiostat (a) dan skema sel elektrokimia 3 elektroda (b)

Modul mikrokontroler terdiri dari komponen yang diperlukan untuk pengontrolan dan akuisisi data, sedangkan pemrosesan maupun untuk penghitungan dilakukan di PC maupun perangkat mobile. Mikrokontroler tersebut diprogram untuk fungsi yang lebih spesifik, seperti misalnya *firmware* kalibrasi untuk pengukuran konsentrasi kolesterol akan berbeda dengan *firmware* kalibrasi untuk pengukuran glukosa. Perangkat potensiostat yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler STM32F411-DISCO yang didalamnya terdapat 32-bit ARM prosesor, memori, ADC, DAC, dan dapat dikoneksikan dengan perangkat lainnya melalui komunikasi seperti i<sup>2</sup>C, SPI, serial dan USB.

Modul potensiostat menggunakan LMP91000EVM analog front end seperti yang terlihat pada Gambar 2. Modul ini dapat deprogram agar dapat melakukan pengukuran elektrokimia. LMP91000EVM dikontrol oleh mikrokontroler STM32F411-DISCO melalui i<sup>2</sup>C interface. Untuk pemakaian sensor elektrokimia, modifikasi perlu dilakukan pada LMP91000, karena LMP91000 dipersiapkan

untuk pengukuran dengan sensor gas yang menggunakan konfigurasi 2-elektroda. Oleh karena itu perlu direkonfigurasi agar dapat digunakan untuk pengukuran voltametri siklik yang menggunakan konfigurasi 3-elektroda. Hal ini dapat dilakukan dengan melepas jumper 2 pin, sehingga pengukuran dengan working electrode (WE), counter electrode (CE) dan reference electrode (RE) dapat dilakukan.



Gambar 2. Modul LMP91000EVM

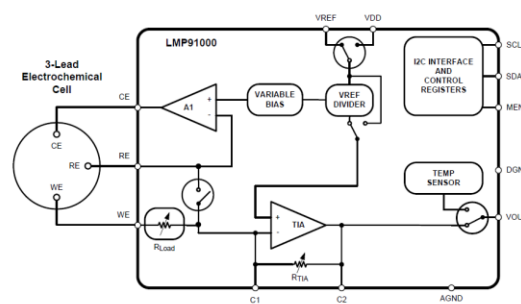
Konektivitas antara modul LMP91000 dengan modul mikrokontroler STM32F411-DISCO melalui konfigurasi pin berikut:

Tabel 1. Konfigurasi Pin

LMP91000EVM		STM32F411-DISCO	
Pin	Uraian	Pin	Uraian
2	GND		
3	3.3V		
11	SDA	PB7	I2C1_SDA
12	SCL	PB6	I2C2_SCL
1	CS0	PA15	CS
5	MISO	PA6	SPI_MISO
3	CK	PA5	SPI_SCK

Data hasil pengukuran potentiostat terlebih dahulu didigitalisasi dengan menggunakan IC Analog to Digital Converter ADC161S626 sebelum dikirim ke modul mikrokontroler dalam bentuk digital. Data tersebut dikirim menggunakan protokol Serial Peripheral Interface (SPI) yang ada pada ADC161S62. Seperti yang terlihat pada Gambar 3, besarnya tegangan keluaran dari potentiostat bergantung dari arus yang mengalir dari counter electrode (CE) ke working electrode (WE). Apabila terjadi perubahan impedansi antara working electrode (WE) dan reference electrode (RE), maka akan menyebabkan perubahan tegangan

pada counter electrode (CE) untuk menjaga agar tegangan antara working electrode dengan reference electrode tetap konstan.



Gambar 3. Potentiostat pada LMP91000

Transimpedance amplifier (TIA) dihubungkan ke working electrode (WE) untuk memberikan tegangan output yang proporsional dengan arus yang mengalir pada sel elektrokimia. Tegangan pada working electrode ditahan pada kondisi virtual ground oleh transimpedance amplifier. Potentiostat akan membandingkan tegangan pada reference electrode dengan tegangan bias yang diinginkan dan akan menyesuaikan tegangan pada counter electrode agar tegangan antara working dan reference electrode tetap terjaga. Transimpedance amplifier juga memiliki 7 buah resistor penguat yang dapat diprogram, selain resistor penguat eksternal yang dapat disambungkan pada C1 dan C2. Control amplifier (A1) pada LMP91000 memiliki 2 tugas yakni memberikan muatan awal pada sensor dengan maksimum arus 10 mA dan tegangan bias pada sensor. Variabel bias pada LMP91000 memberikan tegangan bias yang dibutuhkan antara reference electrode (RE) dan working electrode (WE). Tegangan bias dapat diprogram 1%-24% (14 langkah) dari tegangan catu daya, atau tegangan acuan. Pemrograman tegangan bias 14 langkah tersebut dapat dilakukan melalui i<sup>2</sup>C.

Dalam melakukan pengembangan firmware untuk pengaturan potentiostat, perlu dinyatakan terlebih jenis pengukuran parameter yang diinginkan. Pemrograman selanjutnya dilakukan dengan mengisi register-register pada LMP91000. Untuk mengontrol resistor penguatan dan beban resistansi pada transimpedance amplifier, maka register TIACN perlu diisi. Dalam register TIACN ada 2 parameter yang perlu diisi yakni TIA\_GAIN dan RLOAD. Pada penelitian ini TA\_GAIN

diset 14 k $\Omega$  (100) dan RLOAD diisi dengan 10  $\Omega$  (00). Register RLOAD ini digunakan untuk menjembatani antara *reference electrode* dengan transimpedance amplifier. Pengaturan konfigurasi dari internal zero, bias dan sumber acuan digunakan register REFCN. Pada potentiostat ini REFCN diset ke nilai 0 karena dicatu dari sumber internal dan BIAS\_SIGN diset ke 0 karena tegangan pada working electrode (WE) lebih rendah dari reference electrode (RE). Register BIAS\_SIGN digunakan untuk scanning penuh (bolak-balik) voltametri siklik, dari negatif ke positif dan dari positif ke negative. Internal zero (INT\_Z) diberi nilai 67% dari sumber acuan. Konfigurasi untuk moda operasi diatur oleh register MODECN. Untuk moda operasi amperometric dengan konfigurasi 3 elektroda, maka OP\_MODE pada register MODECN diisi dengan bilangan biner 011.

### Fabrikasi Sensor Elektrokimia

Konfigurasi tiga elektroda digunakan untuk sensor elektrokimia. Sel elektrokimia dalam bentuk kosong dibeli dari Uniscan Instrument, Inggris. Sel elektrokimia ini terdiri dari 3 elektroda. *working electrode* ada ditengah dalam bentuk bulat dan dikelilingi secara berurutan oleh *reference electrode* dan paling luar adalah *counter electrode*. Untuk meningkatkan sensitivitas, *working electrode* (WE) dimodifikasi dengan melapisi kembali permukaan elektroda dengan campuran *carbon conductive ink* dengan serbuk platina. Proses pelapisan digunakan teknologi screen printing.

Setelah proses modifikasi elektroda selesai, tahapan berikutnya pelapisan elektroda dengan polypyrrol. Proses penutupan ini dilakukan dengan elektropolimerisasi dari pyrrol, dimana sel dengan konfigurasi 3-elektroda ini dicelupkan pada 10 ml dari larutan 0.1 M pyrrol selanjutnya dilakukan dengan scanning voltametri siklik dari -1.0 dan 2.0 V dengan scan rate 100 mV/detik, menggunakan potentiostat-galvanostat Uniscan PG580. Setelah pelapisan selesai, elektroda dicuci dengan larutan penyangga dan dikeringkan.

Immobilisasi enzim kolesterol oxydase dilakukan dengan metoda physical entrapment. Dengan metoda ini, 1 mL enzim kolesterol

oxydase (COx) dengan kadar (10 U/mL) dicampur dengan larutan pyrrol konsentrasi 0.1 M. Elektropolimerisasi selanjutnya dilakukan scanning voltametri siklik dengan rentang tegangan -1.0 sampai dengan +2.0 V dan scanning rate 100 mV/detik. Setelah proses immobilisasi selesai, maka elektroda dibersihkan dengan air murni untuk menghilangkan monomer pyrrole yang tidak ikut bereaksi serta enzim kolesterol oxydase bebas. Selanjutnya sel dengan konfigurasi 3-elektroda yang telah dilapisi enzyme disimpan dalam kulkas dengan suhu sekitar 4 °C.

### Pengujian dan Validasi

Setelah pembuatan prototipe potentiostat dan prototipe sensor elektrokimia selesai dilakukan, maka tahapan berikutnya adalah melakukan pengujian dan selanjutnya validasi. Tahap pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa prototipe potentiostat dan sensor elektrokimia berfungsi dengan baik.

Pengujian dilakukan dengan mengintegrasikan antara prototipe potentiostat dengan prototipe sensor elektrokimia untuk pengukuran voltametri siklik pada larutan kolesterol standar. Proses scanning dilakukan dari tegangan negatif (-0.6 V) ke tegangan positif (+0.6V) dengan scan rate 1 mV/detik. Adapun kemampuan rentang scanning maksimum adalah antara -1.6 V sampai dengan 1.6 V.

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran puncak kurva voltametri siklik dengan prototipe potentiostat dengan potentiostat komersial dalam hal ini adalah Uniscan PG580 (Uniscan Instrument, UK) dengan kondisi lingkungan yang sama dan sampel dengan karakteristik yang sama.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 merupakan potentiostat board yang telah terintegrasi dengan modul mikrokontroler dan terkoneksi dengan sensor elektrokimia. Modul mikrokontroler dicatu dengan tegangan 5 V, dengan menggunakan LDO tegangan tersebut diturunkan ke 3.3 V. Potentiostat diset sehingga memiliki rentang tegangan maksimum -1.6 V dan 1.6 V. Potentiostat yang dikembangkan dapat diprogram untuk



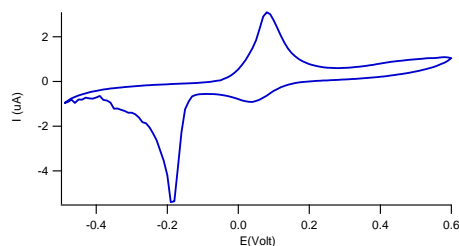
memberikan proses scanning dengan berbagai rentang tagangan dan berbagai nilai scan rate mulai dari 1 mV/detik sampai dengan 100 mV/detik. Arus minimum yang dapat dideteksi oleh rangkaian potensiostat dapat dihitung dengan menggunakan hukum Ohm.



Gambar 4. Potentiostat dan sensor elektrokimia

Uji coba potentiostat selanjutnya dilakukan dengan percobaan pengukuran kadar kolesterol standar (99%). Kolesterol tersebut terlebih dahulu diubah kedalam bentuk larutan. Kolesterol standar (99%) dalam bentuk serbuk dilatirkan terlebih dahulu dengan isopropanol, Triton X-100, dan buffer phosphate (ph = 7.0). Komposisi campuran dari isopropanol, Triton X-100, phosphate buffer adalah 10:4:86 [Yapar, 2009].

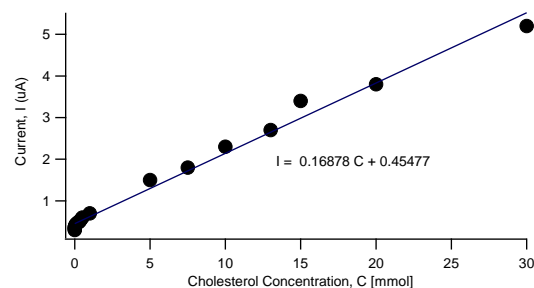
Gambar 5 menunjukkan voltamogram untuk pengukuran kolesterol standar dengan konsentrasi 10 mM, dimana arus puncak yang dihasilkan adalah 2.57  $\mu$ A. Puncak tersebut memberikan informasi bahwa reaksi reduksi / oksidasi (redox) terjadi pada sensor elektrokimia dan transfer elektron terjadi pada working electrode. Arus puncak terjadi pada tegangan 0.18 V, dimana scan ratenya adalah 5 mV/second. Besarnya arus puncak tersebut sebanding dengan banyaknya konsentrasi kolesterol.



Gambar 5. Voltamogram

Gambar 6 menunjukkan kura kalibrasi sensor elektrokimia untuk pengukuran konsentrasi kolesterol standar. Data diperoleh

dari beberapa pengukuran cyclic voltametry untuk konsentrasi kolesterol dari 10  $\mu$ M sampai 30 mM. Kurva linear diperoleh antara konsentrasi kolesterol 30  $\mu$ M sampai 20 mM. Dari kurva tersebut diperoleh batas deteksi minimum adalah 10  $\mu$ M.



Gambar 6. Kurva Kalibrasi

Tabel 2. Perbandingan hasil pengukuran peak current dengan potentiostat hasil pengembangan dan potentiostat komersial

N o	Konsentrasi Kolesterol Standar (mM)	Peak Current ( $\mu$ A) Prototipe Potentiostat	Peak Current ( $\mu$ A) Potentiostat Komersial
1	5	2.33 $\pm$ 0.016	2.40 $\pm$ 0.018
2	8	2.45 $\pm$ 0.019	2.49 $\pm$ 0.017
3	10	2.57 $\pm$ 0.018	2.63 $\pm$ 0.017
4	15	2.82 $\pm$ 0.017	2.87 $\pm$ 0.019
5	20	3.12 $\pm$ 0.018	3.08 $\pm$ 0.012

Tabel 2 menunjukkan perbandingan hasil pengukuran peak current dengan potentiostat hasil pengembangan dan potentiostat komersial (Uniscan, PG580) untuk berbagai konsentrasi kolesterol. Perbedaan hasil pengukuran masih dalam rentang pengukuran potentiostat komersial kurang dari 5%.

## SIMPULAN DAN SARAN

Prototip potensiostat berbasis mikrokontroler telah berhasil dikembangkan dan dapat digunakan untuk mengukur sensor elektrokimia. Spesifikasi teknis dari potentiostat adalah scan rate 1 mV/s dan pengukuran tegangan maksimum berkisar  $\pm$  1.6 V.

Dalam penelitian ini telah dilakukan fabrikasi sensor elektrokimia untuk pengukuran kadar kolesterol. Adapun teknik pembuatan elektroda menggunakan teknik screen printing.

Pengujian kinerja potensiostat telah berhasil dilakukan, yakni dengan melakukan percobaan pengukuran kadar kolesterol standar yang telah dilarutkan terlebih dahulu pada isopropanol. Dari hasil percobaan telah dihasilkan kurva cyclic voltametry dan kurva kalibrasi.

Untuk mengetahui kehandalan potensiostat, hasil percobaan pengukuran dengan potensiostat yang dikembangkan dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan potensiostat komersial untuk pengukuran kadar kolesterol standar. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa perbedaan hasil pengukuran antara kedua potensiostat <~5%.

Agar hasil pengukuran dapat divisualisasikan, maka perlu dikembangkan perangkat lunak user interface, sehingga data untuk input dapat dilakukan secara iterative dan gambar voltamogram dapat ditampilkan secara online.

Perlu dikembangkan prototip potensiostat yang dapat melakukan pengukuran beberapa sensor elektrokimia secara serempak.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanani dari Kemenristek Dikti Melalui SINAS 2017 Pengembangan Teknologi Mesin Hemodialisa Untuk Mendukung Pelayanan Pasien Gagal Ginjal di Rumah Sakit.

## DAFTAR PUSTAKA

D. West, "How Mobile Devices are Transforming Healthcare," *Issues in Technology Innovation*, vol. 18, pp. 1-14, May 2012.

Pratondo Busono, Development of Amperometric Biosensor Immobilized by Entrapment of Urease Enzyme in Polypyrrol Film for Determination of Blood Urea, Proc. Of the 7th Interantional Conference on Physics and Its Application 2014 (ICOPIA 2014), pp. 123-126, February 2015.

Harrar, J.E., 2013, The Potentiostat and the Voltage Clamp, *The Electrochemical Society Interface*, 42-44.

Gopinath, A.V. and Russel, D., 2005. An Inexpensive Field-Portable Programmable Potentiostat, *The Chemical Educator*, Vol.11, No.1.

Bertocci, U., 1980, *Applications of a Low Noise Potentiostat in Electrochemical Measurements*, *Journal of The Electrochemical Society*, **127**, 1931-1934.

Blanco, J.R., Ferrero, F.J., Campo, J.C., Anton, J.C., Pingarron, J.M., Reviejo, A.J. and Manso, J. (2006) Design of Low-Cost Portable Potentiostat for Amperometric Measurements. *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, 24-27 April 2016, 690.

Rowe, A.A., Bonham, A.J., White, R.J., Zimmer, M.P., Yadgar, R.J., Hobza, T.M., Honea, J.W., Ben-Yaacov, I. and Plaxco, K.W. (2011) CheapStat: An Open-Source, "Do-It-Yourself" Potentiostat for Analytical and Educational Applications. *PLoS ONE*, **6**, e23783.  
<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0023783>

Michael D. M. Dryden and Aaron R. Wheeler, DStat: A Versatile, Open-Source Potentiostat for Electroanalysis and Integration, *PLoS One*. 2015; 10(10): e0140349.  
Published online 2015 Oct 28. doi: [10.1371/journal.pone.0140349](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140349).

-----, LMP91000EVM User's Guide, Texas Instrument, June 2012.

Yapar, E.; Kayahan, S.K.; Bozkurt, A.; Toppare, L. Immobilizing cholesterol oxidase in chitosan-alginate network. *Carbohydr. Polym.* 2009, **76**, 430-436