

**STUDI TENTANG PENGARUH PERUBAHAN
KONSENTRASI PENCEMAR MERKURI $HgCl_2$ TERHADAP
PENGUKURAN *REAL-TIME* POTENSIAL LISTRIK KULIT
KATAK LEMBU (*Rana catesbeiana*)**

TUGAS AKHIR

Oleh:
DANY WIDIARTO
NIM. 0310930018



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2009**

**STUDI TENTANG PENGARUH PERUBAHAN
KONSENTRASI PENCEMAR MERKURI $HgCl_2$ TERHADAP
PENGUKURAN *REAL-TIME* POTENSIAL LISTRIK KULIT
KATAK LEMBU (*Rana catesbeiana*)**

TUGAS AKHIR

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Oleh:
DANY WIDIARTO
NIM. 0310930018



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2009**

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**STUDI TENTANG PENGARUH PERUBAHAN
KONSENTRASI PENCEMAR MERKURI $HgCl_2$ TERHADAP
PENGUKURAN *REAL-TIME* POTENSIAL LISTRIK KULIT
KATAK LEMBU (*Rana Catesbeiana*)**

**Oleh:
Dany Widiarto
NIM. 0310930018**

**Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal.....
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika**

Pembimbing I

Pembimbing II

**Chomsin S.Widodo, S.Si, M.Si
NIP. 196910201995121002**

**Achmad Hidayat, S.Si, M.Si
NIP. 132 090 385**

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya**

**Adi Susilo, Ph.D
NIP. 196312271991031002**

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Dany Widiarto
NIM : 0310930018
Jurusan : Fisika
Penulis Tugas Akhir berjudul :

STUDI TENTANG PENGARUH PERUBAHAN KONSENTRASI
PENCEMAR MERKURI $HgCl_2$ TERHADAP PENGUKURAN
REAL-TIME POTENSIAL LISTRIK KULIT KATAK LEMBU
(*Rana catesbeiana*)

Dengan ini menyatakan bahwa:

- a. Isi dari Tugas Akhir yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktum di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Tugas Akhir ini.
- b. Apabila dikemudian hari ternyata Tugas Akhir yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, Desember 2009
Yang menyatakan,

Dany Widiarto
NIM. 0310930018

**STUDI TENTANG PENGARUH PERUBAHAN
KONSENTRASI PENCEMAR MERKURI HgCl₂ TERHADAP
PENGUKURAN *REAL-TIME* POTENSIAL LISTRIK KULIT
KATAK LEMBU (*Rana catesbeiana*)**

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengukur dan mempelajari karakteristik potensial listrik kulit katak secara *real-time* terhadap perubahan konsentrasi HgCl₂. Pengukuran potensial listrik dilakukan menggunakan elektoda kalomel dengan metode *Ussing*. Kulit katak dijepitkan diantara dua buah *ussing chamber* yang telah diisi dengan larutan HgCl₂ pada kulit bagian *mucosal* dan *ringer* pada kulit bagian *serosal*. Elektode kalomel dihubungkan dengan multimeter digital *PC510* yang dilengkapi dengan *interface port* USB dan *software PCLink* untuk menampilkan potensial listrik *real-time*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensial listrik kulit katak *lembu* yang awalnya negatif meningkat seiring dengan waktu sampai titik kesetimbangan. Naiknya konsentrasi HgCl₂ menyebabkan potensial awal pengukuran semakin negatif, serta periode yang diperlukan untuk mencapai titik kesetimbangan relatif semakin kecil yang menandakan bahwa laju difusinya semakin cepat akibat denaturasi protein membran. Anomali potensial listrik tersebut menunjukkan bahwa larutan HgCl₂ berpengaruh terhadap potensial listrik kulit katak *Lembu* akibat tertutupnya kanal yang menghalangi transpor ion, sehingga timbul karakter perbedaan muatan di antara kedua *chamber* tersebut.

**STUDY ON MERCURY HgCl₂ WASTE INFLUENCE
WITH CHANGE CONCENTRATION TO THE *REAL-TIME*
MEASUREMENT OF ELECTRIC POTENTIAL OF
BULLFROG'S SKIN (*Rana catesbeiana*)**

ABSTRACT

Has been done the research whose purpose to measure and observe the electric potential characteristic of Bullfrog's skin by real-time to the changes of HgCl₂ concentration. The electric potential measurement was used calomel electrode with *Ussing's method*. Frog's skin nipped between two pieces *Ussing's chamber* which had been filled with HgCl₂ solutes to *mucosal* skin and ringer in *serosal* skin. Calomel electrode connected to *PC510* digital multimeter which completed with USB interface port and *PCLink* software to shown *real-times* of the electric potential.

The results of research showed that electrical potential of Bullfrog's skin was started in negative and increasing along the time until equilibrium axis. The increasing HgCl₂ concentration caused the starting potential was measured negative, and periods which needed to the potential equilibrium axis was smaller relatively, showed that diffusion speed was faster caused by denaturation the proteins of membrane. The Anomali of these electric potential indicated that HgCl₂ solutes influence to electric potential of Bullfrog's skin by closed the chanel which blocked the ionic transport, so that arised character difference of charges among both chamber.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi ALLAH SWT., atas segala rahmat dan petunjuk-NYA sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul:

“ Studi Tentang Pengaruh Perubahan Konsentrasi Pencemar HgCl₂ terhadap Pengukuran *Real-Time* Potensial Listrik Kulit Katak Lembu (*Rana catesbeiana*)”

Banyak pihak yang ikut terlibat dan memberikan bantuannya baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu dengan tulus, penulis ucapkan terima kasih kepada:

- a. Chomsin S. Widodo, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan skripsi ini.
- b. Achmad Hidayat, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing II yang dengan sabar telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan skripsi ini.
- c. Drs. Ach. Agus Dardiri, M.Si., Drs. Unggul P. Juswono, M.Sc. dan Istiroyah, S.Si., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan dan arahan.
- d. Adi Susilo, Ph.D., selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya.
- e. Dr.Rer.Nat.Abdurrouf, M.Si., selaku sekertaris Jurusan Fisika dan dosen penguji yang telah memberikan kemudahan, masukan dan arahan.
- f. Ibu dan bapak beserta keluarga, yang tidak pernah berhenti mendoakan penulis dan memberikan semangat dengan penuh cinta dan kasih sayang.
- g. “*Cintaku*” atas keikhlasan kasih dan sayang, doa, semangat, dan mimpi indahnyanya selama ini.
- h. Teman-teman fisika 2003, yang tidak bisa disebutkan satu per satu terima kasih atas dukungan dan semangatnya.
- i. Para staf TU fisika, P.Jaedi, P.Sahri, P.Susilo, serta P.Roby A. I. selaku laboran Biofisika yang telah membantu penulis dengan sabar.

- j. Teman-teman seperjuangan (Kos 22A, F16, & GAZU), terima kasih atas perhatian, semangat dan bantuannya.
- k. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, penulis ucapkan terima kasih atas bantuan yang diberikan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan, untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis mohon kiranya dapat dimaklumi dan penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari pembaca.

Semoga penyusunan dan penulisan skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Malang, Desember 2009

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL -----	i
HALAMAN PENGESAHAN -----	iii
HALAMAN PERNYATAAN -----	v
ABSTRAK -----	vii
ABSTRACT -----	viii
KATA PENGANTAR -----	ix
DAFTAR ISI -----	xi
DAFTAR GAMBAR -----	xiii
DAFTAR TABEL -----	xiv
DAFTAR LAMPIRAN -----	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah -----	1
1.2 Rumusan Masalah -----	2
1.3 Batasan Masalah -----	2
1.4 Tujuan Penelitian -----	2
1.5 Manfaat Penelitian -----	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Sel -----	4
2.2 Membran Sel-----	4
2.3 Sistem Transpor Zat pada Sel -----	8
2.4 Potensial Membran-----	12
2.5 Potensial Elektrokimia -----	13
2.6 Pencemar Merkuri -----	15
2.7 Katak Lembu atau <i>Bullfrog (Rana catesbeiana)</i> -----	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian -----	23
3.2 Alat dan Bahan Penelitian -----	23
3.3 Metode Penelitian -----	23
3.3.1 Pembuatan larutan ringer -----	23
3.3.2 Persiapan kulit katak -----	25
3.4 Pengukuran Potensial Listrik Kulit Katak -----	25
3.5 Analisis Data -----	27
3.6 Diagram Alur Penelitian -----	28

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian -----	29
4.2 Pembahasan -----	36
4.2.1 Potensial listrik kulit katak -----	36
4.2.2 Pengaruh pencemar merkuri pada potensial listrik kulit katak -----	39

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan -----	44
5.2 Saran -----	44

DAFTAR PUSTAKA -----	45
-----------------------------	----

LAMPIRAN -----	48
-----------------------	----

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Makromolekul penyusun membran sel -----	5
Gambar 2.2 Mekanisme transpor aktif primer dan transpor aktif sekunder-----	10
Gambar 2.3 Mekanisme Co-transpor -----	11
Gambar 2.4 Pengaruh metil merkuri terhadap gugus <i>thiol</i> pada residu <i>sistein</i> -----	18
Gambar 2.5 Pengaruh metil merkuri terhadap ikatan disulfida-----	19
Gambar 2.6 Bullfrog (<i>Rana catesbeiana</i>) -----	20
Gambar 2.7 Jaringan epitel dan kelenjar pada kulit katak-----	22
Gambar 3.1 Rangkaian alat penelitian-----	26
Gambar 4.1 Potensial listrik <i>real-time</i> kulit katak ϕ pada larutan $HgCl_2$ dengan konsentrasi C-----	29
Gambar 4.2 Pendekatan nilai rata-rata potensial <i>real-time</i> kulit katak <i>ventral</i> dalam suatu konsentrasi pencemar $HgCl_2$ -----	30
Gambar 4.3 Perubahan potensial <i>real-time</i> pada kulit katak bagian <i>dorsal</i> (tiap selang waktu 60 sekon) -----	32
Gambar 4.4 Perubahan potensial <i>real-time</i> pada kulit katak bagian <i>ventral</i> (tiap selang waktu 60 sekon)-----	33
Gambar 4.5 Potensial <i>real-time</i> kulit katak <i>dorsal</i> dan <i>ventral</i> pada konsentrasi $HgCl_2$ 100 ppm -----	34
Gambar 4.6 Jalur masuknya zat pernafasan dan ion ke dalam intraseluler pada jaringan epitel-----	37
Gambar 4.7 Jalur ion-ion dari ekstraselular ke intraselular-----	38
Gambar 4.8 Grafik hubungan antara konsentrasi pencemar $HgCl_2$ terhadap periode untuk mencapai titik kesetimbangan pada kulit katak <i>ventral</i> -----	40
Gambar 4.9 Grafik hubungan antara konsentrasi pencemar $HgCl_2$ terhadap periode untuk mencapai titik kesetimbangan pada kulit katak <i>dorsal</i> -----	41
Gambar 4.10 Proses bioakumulasi berbagai bentuk merkuri berdasarkan pendekatan model ligan biotik-----	43

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 4.1	Perbedaan karakter kelistrikan kulit katak <i>dorsal</i> dan <i>ventral</i> melalui pendekatan matematis-----	35
Tabel 4.2	Konsentrasi ion dan senyawa membran pada kondisi <i>resting</i> potensial (<i>dorsal</i>)-----	36

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1 Pendekatan Nilai Potensial Listrik Kulit Katak Rata-Rata	
1.1 Pendekatan nilai rata-rata kulit katak <i>dorsal</i> dan periode potensialnya.....	48
1.2 Pendekatan nilai rata-rata kulit katak <i>ventral</i> dan periode potensialnya -----	68
Lampiran 2 Hasil Pengolahan Data	
2.1 Kulit katak <i>dorsal</i> -----	88
2.2 Kulit katak <i>ventral</i> -----	91
Lampiran 3 Perbandingan Potensial Kulit Katak (ϕ) <i>Ventral</i> dengan <i>Dorsal</i> pada Tiap Konsentrasi Pencemar $HgCl_2$-----	
	94
Lampiran 4 Lambang dan Singkatan-----	104

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber daya air yang dibutuhkan semua makhluk hidup mulai mengalami penurunan kualitas akibat fenomena pencemaran. Pembuangan limbah akibat aktivitas manusia yang tidak memperhatikan keselamatan lingkungan, menjadi penyebab utama terjadinya pencemaran air. Aktivitas tersebut meliputi praktik pertanian, peternakan, industri, maupun permukiman. Ditemukannya kandungan logam berat merkuri yang berlebih di perairan baru-baru ini, memberikan bukti yang nyata terhadap penurunan kualitas air akibat aktivitas manusia.

Merkuri atau air raksa (Hg) dalam bentuk logam, maupun senyawa organik dan anorganik, secara langsung maupun tidak langsung bisa masuk ke dalam makhluk hidup. Budiono (2003) menyebutkan bahwa merkuri yang terdapat dalam limbah di perairan umum diubah oleh aktifitas mikro organisme menjadi komponen metil merkuri ($\text{CH}_3\text{-Hg}$) yang memiliki sifat racun dan daya ikat yang kuat di samping kelarutannya yang tinggi terutama dalam tubuh hewan air. Hal tersebut memungkinkan logam berat merkuri terakumulasi dalam jaringan, hingga menimbulkan dampak buruk pada makhluk hidup akuatik seperti katak.

Katak merupakan hewan amphibi yang daur hidupnya di dua alam, yaitu darat dan air. Sebuah sumber (USDA *forest service federal building*) menyebutkan bahwa *Bullfrog* merupakan jenis katak yang sangat erat kaitannya dengan lingkungan air. Sehingga mereka juga dapat dikategorikan sebagai hewan akuatik.

Katak mempunyai kulit yang sangat istimewa. Menurut Chiang (2002) kulit katak sangatlah porus karena memiliki banyak lubang mikro, dan katak menggunakannya sebagai alat bantu pernafasan serta untuk memasukkan molekul air dari lingkungan sekitarnya. Hal ini menyebabkan keberadaannya menjadi sebuah catatan penting yang mencerminkan kondisi lingkungan perairan tempat hidupnya.

Kulit katak yang diisolasi telah lama digunakan sebagai suatu model untuk mempelajari mekanisme transpor ion. Beberapa tahun yang lalu, Stiffler (1995) membuktikan bahwa salah satu jenis katak (*Rana pipiens*) mengambil Ca^{2+} dari larutan eksternal lemah melawan gradien elektrokimianya. Hillyard et. al., (1997) juga

menemukan adanya transpor K^+ dan kapasitansi membran basolateral pada kulit katak larval *Rana catesbeiana*. Selain tersebut di atas, terdapat beberapa penelitian lain yang pada dasarnya menemukan adanya mekanisme transpor terhadap kulit katak yang diisolasi.

Karakter potensial listrik kulit katak telah digunakan untuk mengidentifikasi adanya pengaruh pencemaran air di antaranya detergen (Novianti, 2005), *Linear Alkylbenzene Sulfonate* (Fantika, 2007) dan logam berat Pb (Fitriah, 2007). Keterbatasan alat ukur yang digunakan menyebabkan penelitian sebelumnya hanya dapat mengukur potensial pada kondisi awal dan keadaan tunak saja, serta mengabaikan dinamika potensial kulit katak yang sesungguhnya menunjukkan mekanisme transpor ioniknya. Pengukuran secara *real-time* pada potensial listrik kulit katak diharapkan mampu menunjukkan pengaruh polutan melalui karakter kelistrikan dan mekanisme transpor ion sehingga terlihat jelas dan lebih detail.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, dapat diambil beberapa rumusan masalah, di antaranya:

2. Bagaimanakah perubahan potensial listrik kulit katak lembu secara *real-time* terhadap perubahan konsentrasi merkuri $HgCl_2$ di lingkungan hidupnya ?
3. Apakah kulit katak lembu dapat dijadikan sebagai biosensor pencemaran air (khususnya merkuri) ?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini hanya dititikberatkan untuk mengamati dan mempelajari potensial listrik kulit katak secara *real-time* serta perubahan potensial listrik kulit katak terhadap perubahan konsentrasi merkuri $HgCl_2$. Jenis kelamin, umur, dan berat badan katak yang digunakan dalam penelitian diabaikan, serta semua katak yang digunakan dianggap normal.

1.4 Tujuan Penelitian

Mengukur dan mempelajari potensial listrik kulit katak secara *real-time* serta perubahan potensial listrik kulit katak lembu terhadap perubahan konsentrasi merkuri $HgCl_2$.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain pemanfaatan kulit katak sebagai piranti biosensor pencemaran air.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel

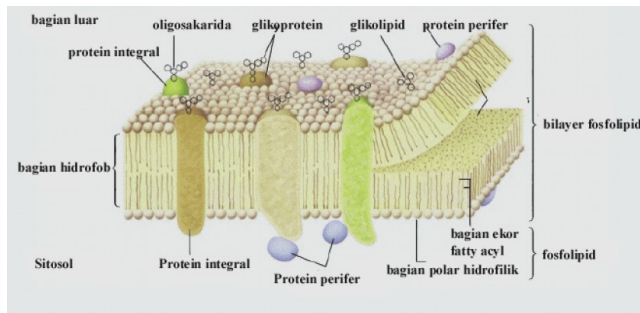
Pada dasarnya makhluk hidup terdiri atas satuan dasar hidup yakni sel. Tiap organ merupakan kelompok sel yang berbeda-beda yang saling dihubungkan satu sama lainnya oleh struktur penunjang interseluler. Tiap macam sel dapat beradaptasi secara khusus untuk membentuk suatu fungsi yang khas. Menurut seorang botaniwan Matthias Schleiden, dan Zoologiawan Theodor Schwann sel merupakan unit struktural dan fungsional dari semua organisme, unit dasar yang mempunyai semua ciri khas benda hidup. Secara sederhana sel dapat digambarkan sebagai kantong yang berisi protoplasma. Dan umumnya sel tersusun atas membran sel, sitoplasma, dan inti sel (*nukleus*). Di mana sitoplasma dan nukleus adalah penyusun protoplasma (Guyton, 1993).

2.2 Membran Sel

Membran sel merupakan lapisan yang melindungi inti sel dan sitoplasma. Membran sel membungkus organel-organel dalam sel. Menurut Ackerman (1988), membran mempunyai 2 fungsi utama yaitu memberikan kerangka kerja proses-proses kehidupan (sebagai pembantu) atau sebagai pertahanan sel dan memisahkan sitoplasma menjadi bagian-bagian di mana pemisahannya terjadi secara selektif (sebagai penghalang). Membran sel juga merupakan alat transportasi bagi sel yaitu tempat masuk dan keluarnya zat-zat yang dibutuhkan dan tidak dibutuhkan oleh sel. Sehingga pada membran sel terjadi proses difusi.

Membran sel tersusun atas lipid dan protein serta memiliki struktur yang tipis, tebalnya hanya 7,5-10 nm (Guyton, 1993). Membran sel terdiri atas dua lapis molekul fosfolipid. Bagian ekor merupakan dua lapis molekul yang saling berorientasi ke dalam mengandung asam lemak yang bersifat hidrofobik (nonpolar), sedangkan bagian kepala bersifat hidrofilik (polar) mengarah ke lingkungan yang berair. Komponen protein terletak pada membran dengan posisi yang berbeda-beda. Beberapa protein terletak *periferal*, sedangkan yang lain tertanam *integral* dalam lapis ganda *fosfolipid*. Membran yang serupa juga terdapat pada bagian organel

di dalam sel, seperti vakuola, mitokondria dan lain sebagainya (Giese,1962).



Gambar 2.1 Makromolekul penyusun membran sel (Iriawati, 2009)

Menurut Stryer (1981) Membran berbeda dalam struktur sebagaimana fungsinya. Secara umum mereka memiliki beberapa atribut penting, yakni:

1. Struktur membran seperti sebuah sheet (lembaran tipis). Rata-rata ketebalannya antara 60 sampai 100 Å.
2. Membran terdiri atas bagian utama lipid dan protein. Perbandingan berat protein terhadap lipid secara umum dalam sistem biologis dan membran berturut-turut 1:4 sampai 4:1. Membran juga tersusun atas karbohidrat yang terhubung dengan lipid dan protein.
3. Lipid membran merupakan molekul relatif kecil yang mempunyai bagian hidrofilik dan hidrofobik. Lipid ini secara spontan membentuk lapisan biomolekuler tertutup dalam media cair. Bilayer lipid ini merupakan penghalang bagi aliran molekul-molekul polar.
4. Protein khusus menengahi perbedaan fungsi dari membran. Protein berperan sebagai pompa, gerbang, reseptor, transduksi energi dan enzim.
5. Membran bersifat asimetris. Permukaan luar dan dalam membran berbeda.
6. Membran tersusun atas ikatan nonkovalen. Unsur molekul lipid dan protein membentuk ikatan bersama dengan interaksi nonkovalen, yang bersifat kooperatif.

7. Membran merupakan struktur fluida. Molekul lipid terbuka dengan cepat dalam lapisan membran seperti halnya protein, kecuali jika terjadi interaksi spesifik.

Kimball (1993) menambahkan bahwa makromolekul penyusun membran terdiri atas lipid, protein dan karbohidrat.

a. Lipid

Lipid terdiri dari 3 bagian yaitu: kepala, leher dan ekor seperti tampak pada gambar 2.1. Kepala lipid banyak mengandung gugus fosfat sehingga bersifat polar atau bermuatan listrik (dapat menarik muatan listrik/ ion), hidrofilik dan lentur. Leher lipid banyak mengandung gliserol yang merupakan pengikat antara gugus fosfat dengan hidrokarbon. Ekornya berupa gugusan hidrokarbon sehingga tidak bermuatan listrik (nonpolar), isolator listrik, hidrofobik (sukar ditembus air, ion maupun molekul polar) serta kaku. Sifat hidrofobik di bagian tengah lapisan lipid membran menyebabkan membran tidak mudah ditembus oleh molekul polar. Molekul polar tersebut tidak bisa larut dalam inti hidrofobik yang tidak permeabel terhadap hampir semua molekul yang larut dalam air. Sehingga sifat hidrofobik tersebut dapat mencegah keluarnya komponen-komponen polar di dalam sel. Gas-gas seperti oksigen, CO₂ dan nitrogen, merupakan molekul kecil yang menunjukkan sedikit interaksi dengan pelarut, mudah berdifusi melalui bagian hidrofobik membran. Molekul organik nonlektrolit menunjukkan kecepatan difusi yang tergantung pada kelarutannya pada minyak/air. Semakin besar kelarutan lipid suatu molekul, makin besar kecepatan difusinya melalui membran.

b. Protein

Terdapat dua jenis protein membran sel yakni protein *integral* yang menonjol ke dalam sel dan protein *perifer* yang hanya melekat pada permukaan membran dan tidak menembus membran. Protein *integral* memberikan lintasan struktural, tempat air dan zat yang larut dalam air, khususnya ion berdifusi antara cairan eksternal dan internal. Protein ini mempunyai sifat selektif yang menyebabkan difusi beberapa zat lebih mudah daripada zat lain. Sebagian dari protein tersebut dapat bekerja sebagai enzim. Protein *perifer* hampir seluruhnya terdapat pada bagian dalam membran dan dalam keadaan normal mereka melekat pada salah satu protein *integral*. Protein *perifer* ini hampir seluruhnya berfungsi sebagai enzim.

c. Karbohidrat

Karbohidrat yang berbentuk rantai oligosakarida terikat dengan protein membran (*glikoprotein*) dan sebagian kecil terikat pada lipid (*glikolipid*). Sebagian besar protein membran yang tampak pada permukaan membran sel diduga mengikat gugus glukosa sedangkan kurang dari 1/10 molekul lipid dari lapisan luar lipid mengikat karbohidrat. Setiap *glikoprotein* memiliki sejumlah rantai-rantai cabang oligosakarida, namun sebaliknya setiap molekul *glikolipid* hanya memiliki sebuah rantai cabang. Secara keseluruhan, perbandingan karbohidrat dalam membran berkisar antara 2% - 10% terhadap berat membran.

Pada semua membran plasma organisme hidup molekul karbohidrat selalu berada pada permukaan membran plasma yang tidak berhadapan dengan sitoplasma. Inilah salah satu penyebab adanya bentuk asimetri dan membran plasma yang terbentuk dari dua lapisan lipid.

Adanya molekul karbohidrat yang berlebihan pada beberapa sel eukariotik memberikan terminologi khusus, sebagai selubung sel atau *glikokaliks*. Selubung sel ini kadang-kadang mudah ditunjukkan dalam pengamatan mikroskop cahaya dengan pewarnaan khas. Lebih dari 100 jenis monosakarida yang terdapat di alam, hanya 3 jenis yang diketemukan pada molekul *glikoprotein* dan *glikolipid* membran. Monosakarida yang utama adalah *galaktose*, *manose*, *fukose*, *galaktosamin*, *glukosamin*, *glucose* dan asam *sialik*.

Fungsi rantai cabang oligosakarida pada *glikolipid* dan *glikoprotein* membran plasma begitu jelas. Sangat mungkin bahwa gugus oligosakarida pada *glikoprotein* membran membantu agar molekul terpancang kuat dalam membran dan berperan menstabilkan struktur protein. Kompleksibilitas dari beberapa oligosakarida pada *glikoprotein* dan *glikolipid* membran plasma yang terpapar pada permukaan sel, memberikan petunjuk bahwa mereka berperan sangat penting dalam proses pengenalan pada komunikasi antar sel. Hal ini sangat jelas terdapat pada sel-sel yang terlibat dalam sel imunitas.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa sebuah sel dibangun oleh komponen-komponen berikut: air, ion-ion anorganik, makromolekul (protein, lipid, asam *nukleat*, dan karbohidrat/polisakarida), dan mikromolekul (asam *amino*, asam lemak, *nukleotida*, dan glukosa).

2.3 Sistem Transpor Zat pada Sel

Sebagai ciri makhluk hidup, sel juga melakukan aktivitas transportasi zat-zat baik ke dalam maupun ke luar. Zat-zat yang harus dimasukkan ke dalam sel berupa air, ion, O_2 dan zat-zat organik yang diperlukan. Sedangkan zat-zat yang dikeluarkan adalah sisa-sisa metabolisme terutama berupa gas CO_2 dan NH_3 (Guyton, 1993). Pengangkutan zat yang menuju maupun keluar sel selalu melewati membran. Transpor melalui membran sel baik melalui lapisan lipid ganda atau melalui struktur molekul protein dapat melalui salah satu dari dua mekanisme dasar yaitu: mekanisme difusi (transpor pasif) dan transpor aktif.

1. Difusi

Difusi dapat didefinisikan sebagai gerakan molekul zat terlarut dalam suatu larutan melalui atau tanpa melalui membran selektif permeabel dari suatu daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah lain dengan konsentrasi lebih rendah yang disebabkan oleh energi kinetik molekul-molekul tersebut. Difusi dapat terjadi karena gerakan acak kontinyu yang menjadi ciri khas semua molekul yang tidak terikat dalam suatu zat padat (Kimball, 1993).

Difusi pada membran sel terbagi atas dua sub tipe yang disebut difusi sederhana dan difusi yang dipermudah. Difusi sederhana berarti bahwa gerakan kinetik molekuler dari molekul maupun ion terjadi melalui celah membran atau melalui ruang intermolekuler tanpa perlu berikatan dengan protein pembawa dalam membran. Kecepatan difusi ditentukan oleh jumlah zat yang tersedia, kecepatan gerak kinetik, dan jumlah celah pada membran sel yang dapat dilalui oleh molekul/ion. Sebaliknya, difusi yang dipermudah membutuhkan interaksi antar molekul maupun ion dengan protein pembawa. Protein pembawa membantu lewatnya molekul dan ion melalui membran, melalui ikatan kimia sehingga molekul atau ion dapat keluar masuk membran dengan cara melalui celah pada lapisan lipid ganda, khususnya jika bahan yang berdifusi terlarut dalam lipid, dan melalui saluran licin pada beberapa protein transpor (Guyton, 1993).

2. Osmosis

Osmosis adalah pergerakan molekul-molekul air melalui membran selektif permeabel menuju ke larutan yang relatif mengandung zat terlarut dengan konsentrasi yang lebih tinggi (Suripto, 1998). Yatim (1992) dalam Novianti (2005) menambahkan

bahwa jika ada dua kompartemen yang dipisahkan oleh membran semipermeabel berisi zat-zat terlarut dalam konsentrasi yang berbeda maka akan terjadi beda tekanan osmotik. Bila tekanan osmotik kedua kompartemen awalnya tidak seimbang, maka air akan berpindah dari kompartemen yang berisi air murni (atau larutan yang paling encer) menuju ke kompartemen yang lebih kental. Jika kompartemen yang mengandung zat terlarut mempunyai volume tertentu yang terbatas, pergerakan air akan menyebabkan naiknya tekanan di dalam kompartemen tersebut. Perpindahan air dalam hal ini disebut osmosis, yang mempunyai peranan sangat penting di dalam banyak proses kehidupan.

3. Transpor Aktif

Transpor aktif adalah perpindahan zat dari larutan dengan konsentrasi lebih rendah ke larutan dengan konsentrasi lebih tinggi, dengan bantuan energi yang berasal dari sel (Isnaeni, 2006).

Suatu membran memiliki sifat semipermeabel yaitu hanya ion jenis tertentu saja yang dapat melewati membran tersebut. Keluar masuknya ion diatur oleh protein yang ada di dalam membran. Macam macam protein tersebut antara lain:

- a. Protein channel (gerbang), mempunyai sifat yang dapat membuka dan menutup sesuai dengan kebutuhan sehingga tidak terjadi kelebihan ion dalam sel dan berbeda satu sama lain untuk tiap jenis ion misalnya channel K^+ , Na^+ , Cl^- . Kebocoran membran merupakan masuknya ion lain yang lebih kecil ke channel dengan ukuran yang lebih besar.
- b. Protein pompa berfungsi untuk mempertahankan muatan dengan cara memompa sehingga apabila terjadi kelebihan muatan dapat dikeluarkan dengan cara memompa.
- c. Protein carier bersifat *fluid mozaik* sebagai pembungkus muatan sehingga tidak dikenali oleh fosfolipid dan dapat memasuki membran.

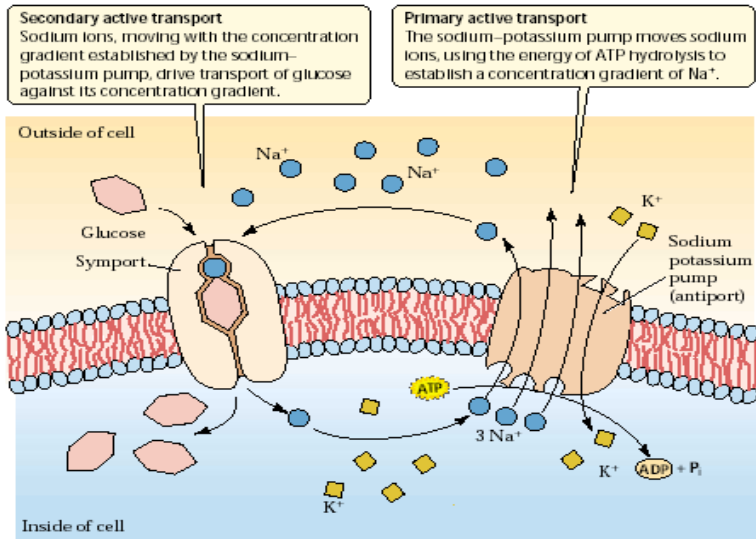
Transpor aktif yang terkait dalam sistem difusi membran dapat dibedakan dalam dua kelompok yakni:

1. Berkaitan dengan hidrolisa ATP, meliputi pompa elektrogenik maupun non-elektrogenik dalam hal ini Na^+/K^+ -ATP-ase (Pompa Na^+ dan K^+). Mekanismenya melalui dua proses berikut:

- a. Transpor aktif primer

Transpor aktif primer memerlukan partisipasi langsung molekul ATP yang kaya energi. Pada transpor aktif primer

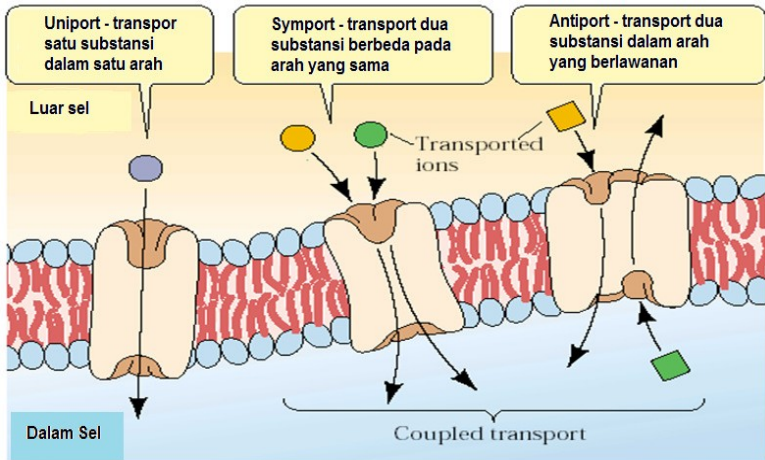
energi digunakan untuk memindahkan ion melawan gradien konsentrasi. Untuk setiap molekul ATP yang digunakan, dua ion K^+ dipompa ke dalam sel dan tiga ion Na^+ dipompa ke luar sel, seperti tampak pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mekanisme transpor aktif primer dan transpor aktif sekunder (Iriawati, 2009)

b. Transpor aktif sekunder

Transpor aktif sekunder tidak menggunakan ATP secara langsung, energi disediakan oleh gradien konsentrasi ion yang dihasilkan dari transpor aktif primer. Pada transpor aktif sekunder, konsentrasi Na^+ yang dimantapkan oleh transpor aktif primer menggerakkan transpor aktif sekunder dari glukosa. Perpindahan glukosa melintasi membran melawan gradien konsentrasi dibantu oleh protein simport untuk pergerakan ion Na^+ ke dalam sel, seperti tampak pada gambar 2.2.



Gambar 2.3 Mekanisme Co-transporter (Iriawati, 2009)

2. Co-transporter berkaitan dengan gradien ion. Transporter aktif merupakan mekanisme transporter yang terarah (gambar 2.3), meliputi:
 - a. *Uniport*, pergerakan ion tunggal dalam satu arah, misalnya protein pengikat kalsium terdapat dalam membran plasma dan pada sel-sel yang aktif mentranspor ion Ca^{2+} dari daerah konsentrasi tinggi baik dari dalam maupun luar retikulum endoplasma.
 - b. *Symport*, pergerakan dua jenis ion dalam arah yang sama. Misalnya, pengambilan asam amino dari usus halus ke sel-sel yang membatasinya memerlukan pengikatan ion Na^+ dan asam amino secara bersamaan ke protein *transporter* yang sama.
 - c. *Antiports*, pergerakan dua ion pada arah yang berlawanan. Satu ke luar dan yang lain ke dalam sel. Misalnya, banyak sel yang memiliki pompa Na-K yang menggerakkan Na^+ ke luar sel dan K^+ ke dalam sel.

Symport dan *antiport* dikenal sebagai *transporter* berpasangan, karena kedua tipe ini menggerakkan ion pada saat yang bersamaan seperti gambar 2.2 (Iriawati, 2009).

Menurut Subowo (1989), berdasarkan struktur spesialisasi membran sel, khususnya dalam hubungan dengan membran sel didekatnya dibedakan sebagai *tight junction*, *gap junction*, dan *dermosome*. Pada epitel biasanya antara sel didekatnya terdapat celah

sebesar 150 – 200 Å. *Tight junction* merupakan spesialisasi membran yang memberikan struktur yang melekat erat dengan membran sel didekatnya hingga tidak terdapat celah sama sekali. *Gap junction* merupakan spesialisasi yang berstruktur dengan celah sebesar 20 Å diantara dua sel yang berdekatan. *Dermosome (macula adherens)* merupakan celah sebesar 200 – 250 Å yang memisahkan membran sel dari kedua sel yang berdekatan. Di daerah tersebut sitoplasmanya lebih padat dan banyak mengandung filamen, sedang celahnya terisi oleh substansi yang kaya akan karbohidrat.

2.4 Potensial Membran

Banyak zat-zat di dalam sel terurai menjadi ion-ion. Membran sel membatasi cairan sel yang ada di dalam dan di luar sel. Cairan tersebut mengandung ion-ion Na^+ , K^+ , Cl^- dan A^- . Ion-ion tersebut akan menimbulkan medan listrik jika ion-ion dengan muatan berlawanan saling dipisahkan. Perbedaan ion di dalam sel dan di luar sel akan menyebabkan perpindahan ion dari daerah dengan potensial elektrokimia yang tinggi menuju ke potensial elektrokimia rendah. Adanya perpindahan dari ion-ion tersebut menimbulkan pemisahan muatan listrik yang menyebabkan terjadinya perbedaan potensial listrik. Karena terjadinya di membran maka disebut potensial membran.

Potensial membran dapat timbul dengan mempergunakan dua cara dasar yakni (1) difusi ion melewati membran sebagai akibat dari perbedaan konsentrasi ion antara kedua sisi membran, menimbulkan suatu ketidaksinambungan muatan positif dan negatif pada kedua sisi membran tersebut, dan (2) transpor aktif ion melewati membran juga menimbulkan ketidaksinambungan muatan (Guyton, 1993).

Fenomena kelistrikan membran terkait erat dengan adanya potensial aksi pada membran. Berikut tahapan menuju potensial aksi menurut Guyton (1993):

- c. Tahap istirahat atau *resting* potensial, Di mana potensial aksi masih belum terjadi. Selama tahap ini membran dikatakan dalam keadaan polarisasi akibat sangat besarnya muatan negatif pada potensial membran yang terjadi pada saat itu.
- d. Tahap depolarisasi. Dimana membran secara tiba-tiba sangat permeabel terhadap ion natrium. Hal ini menyebabkan ion natrium mengalir melewati membran. Sehingga keadaan

polarisasi yang normal sebesar -90 mV meningkat dengan cepat ke arah potensial positif.

- e. Tahap repolarisasi. Yakni dalam sepersepuluh ribu detik setelah membran tersebut sangat permeabel terhadap ion natrium, maka saluran natrium tersebut akan tertutup dengan kecepatan yang hampir sama dengan kecepatan waktu terbukanya. Selanjutnya, proses difusi yang berlangsung cepat dari ion kalium menuju bagian luar akan mengembalikan membran dalam keadaan normal (tahap istirahat).

Besarnya nilai potensial membran dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu: (1) Konsentrasi ion di dalam dan di luar sel, (2) Permeabilitas membran sel terhadap ion-ion tersebut (konduktansi ion) yang melalui ion channel spesifik dan, (3) Aktifitas pompa elektrogenik (Na^+ atau K^+ -ATP-ase dan pompa transpor Ca^{2+}) untuk menjaga kesetimbangan konsentrasi yang melalui membran.

2.5 Potensial Elektrokimia

Potensial kimia dari suatu jenis zat (μ_j) menunjukkan besarnya energi bebas yang tersedia untuk melakukan usaha dan dirumuskan (Nobel, 1974):

$$\mu_i = \mu_0 + RT \ln \gamma_j C_j + Z_j FV + mgh + PV_j \quad 2.1)$$

μ_j merupakan potensial elektrokimia spesies j (kal/mol) dan μ_0 potensial kimia standart species j (kal/mol), R = konstanta gas umum 1,987 kal/(mol.K), T = suhu absolut dalam K, γ_j = koefisien aktivitas spesies j, C_j = konsentrasi kimia spesies (mol/liter), Z_j = valensi spesies j, F konstanta Faraday 96.487 C/mol, V = potensial listrik membran (mV), P = tekanan hidrostatis (bar), dan V_j merupakan volume molar parsial (cm^3/mol).

c_j , V, P, dan γ_j adalah variabel yang berubah untuk setiap kali ada aliran dari larutan yang lain. $\gamma_j c_j$ merupakan aktifitas kimia a_j untuk tingkat sel, kontribusi (sumbangan) dari gravitasi dan tekanan pada potensial kimia dapat diabaikan sehingga potensial kimia dapat ditulis:

$$\mu_i = \mu_0 + RT \ln a_j + Z_j FV \quad 2.2)$$

(Kusharto dkk., 1999).

1. Persamaan Nerst

Dalam keadaan setimbang (tidak ada difusi) maka potensial kimia μ dari kedua kedudukan adalah sama ($\mu = \mu_1 - \mu_2 = 0$). Rumusan ini dapat diterapkan pada kondisi setimbang antara sel dan lingkungannya sehingga dapat dituliskan :

$$\mu_{sel} = \mu_{lingkungan} \quad (2.3)$$

Dengan pertimbangan potensial kimia standart μ_o sel = μ_o lingkungan untuk kedua sisi karena kedua larutan ada pada keadaan standart yang sama, Substitusi persamaan 2.2 ke 2.3, maka persamaan 2.3 dapat disederhanakan menjadi :

$$\begin{aligned} ZF(V_{sel} - V_{lingkungan}) &= RT \ln \left[\frac{C_{lingkungan}}{C_{sel}} \right] \\ \psi &= \text{potensial membran} = V_{sel} - V_{lingkungan} \\ \psi &= \left(\frac{RT}{ZF} \right) \ln \left[\frac{C_{lingkungan}}{C_{sel}} \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Persamaan diatas disebut dengan persamaan Nerst (Kusharto dkk., 1999).

2. Persamaan Goldman – Hodgkin - Katz

Persamaan potensial Goldman-Hodgkin-Katz (GHK) atau lebih umum diketahui sebagai persamaan Goldman digunakan dalam fisiologi membran sel untuk mengukur potensial yang melalui membran sel dengan mempertimbangkan semua ion yang dapat melalui membran. Persamaan ini sebenarnya merupakan variasi dari persamaan Nerst. Persamaan Nerst sendiri lebih mengutamakan penghitungan potensial membran suatu sel ketika hanya satu ion yang permeabel, selama konsentrasi ion baik di dalam maupun di luar sel diketahui. Sehingga persamaan Nerst tidak dapat digunakan ketika suatu membran mempunyai permeabilitas lebih dari satu ion. Persamaan GHK untuk N spesies ionik positif dan M negatif dituliskan:

$$E_m = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{\sum_i^N P_{M_i^+} [M_i^+]_{out} + \sum_j^M P_{A_j^-} [A_j^-]_{in}}{\sum_i^N P_{M_i^+} [M_i^+]_{in} + \sum_j^M P_{A_j^-} [A_j^-]_{out}} \right) \quad (2.5)$$

Hasil diatas didapatkan jika kita mempertimbangkan suatu membran yang memisahkan dua larutan $K_xNa_{1-x}Cl$. Sedangkan persamaan 2.6 berikut:

$$E_{m,K_2Na_1-2Cl} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{P_{Na^+}[Na^+]_{out} + P_{K^+}[K^+]_{out} + P_{Cl^-}[Cl^-]_{in}}{P_{Na^+}[Na^+]_{in} + P_{K^+}[K^+]_{in} + P_{Cl^-}[Cl^-]_{out}} \right) \quad 2.6)$$

Merupakan persamaan yang ”serupa dengan persamaan Nerst” tetapi berlaku untuk setiap ion yang permeabel.

E_m	: Potensial membran
P_{ion}	: Permeabilitas untuk ion
$[ion]_{in}$: Konsentrasi ion di dalam sel
$[ion]_{out}$: Konsentrasi ion di luar sel
R	: Konstanta gas ideal
T	: Temperatur dalam kelvin
F	: Konstanta Faraday

(Wikipedia, 2007)

2.6 Pencemar Merkuri

Logam merkuri (Hg) adalah salah satu *trace element* yang mempunyai sifat cair pada temperatur ruang dengan spesifik *gravity* dan daya hantar listrik yang tinggi (Budiono, 2003). Dinata (2004) menambahkan, sifat-sifat yang umum dari merkuri, yaitu: (1) Berbentuk cair sehingga mudah menyebar di permukaan air dan sulit dikumpulkan; (2) Bersifat mudah berubah menjadi gas dan uap (*volatil*) sehingga dapat mencemari lingkungan; (3) Dapat diubah oleh mikroorganisme yang terdapat di dalam air (laut, sungai atau danau) menjadi komponen metil merkuri yang sangat beracun, di mana dengan adanya rantai makanan memungkinkan terkumpul di dalam tubuh hewan dan manusia; (4) Merkuri mengalami pemindahan tempat (*translokasi*) di dalam tanaman dan hewan.

Aripin (2009) mengatakan bahwa berdasarkan daya hantar panas dan listriknya merkuri (Hg) dimasukkan dalam golongan logam. Sedangkan berdasarkan densitasnya, dimasukkan ke dalam golongan logam berat. Merkuri memiliki sifat-sifat :

1. Kelarutan rendah,
2. Sifat kimia yang stabil terutama di lingkungan sedimen,
3. Mempunyai sifat yang mengikat protein, sehingga mudah terjadi biokonsentrasi pada tubuh organisme air melalui rantai makanan,
4. Mudah mengemisi atau melepaskan uap merkuri beracun walaupun pada suhu ruang,

5. Logam merkuri merupakan satu-satunya unsur logam berbentuk cair pada suhu ruang 25°C,
6. Pada fase padat berwarna abu-abu dan pada fase cair berwarna putih perak,
7. Uap merkuri di atmosfer dapat bertahan selama 3 (tiga) bulan sampai 3 (tiga) tahun sedangkan bentuk yang melarut dalam air hanya bertahan beberapa minggu.

Kadar merkuri yang tinggi pada perairan umumnya diakibatkan oleh buangan industri dan efek samping dari penggunaan senyawa-senyawa merkuri di bidang pertanian. Terdapatnya merkuri di perairan dapat disebabkan oleh dua hal, yaitu pertama oleh kegiatan perindustrian seperti pabrik cat, kertas, peralatan listrik, *chlorine* dan *coustic soda*; kedua oleh alam itu sendiri melalui proses pelapukan batuan dan peletusan gunung berapi. Namun pencemaran merkuri yang disebabkan kegiatan alam pengaruhnya terhadap biologi maupun ekologi tidak signifikan (Budiono, 2003).

Merkuri yang terdapat dalam limbah di perairan umum diubah oleh aktifitas mikro-organisme menjadi komponen metil-merkuri ($\text{CH}_3\text{-Hg}$) yang memiliki sifat racun (*toksik*) dan daya ikat yang kuat di samping kelarutannya yang tinggi terutama dalam tubuh hewan air. Hal tersebut mengakibatkan merkuri terakumulasi baik melalui proses *bioakumulasi* maupun *biomagnifikasi* yaitu melalui rantai makanan (*food chain*) dalam jaringan tubuh hewan-hewan air. Terjadinya proses akumulasi merkuri di dalam tubuh hewan air, karena kecepatan pengambilan merkuri (*up take rate*) oleh organisme air lebih cepat dibandingkan dengan proses ekresi, yaitu karena metil-merkuri memiliki paruh waktu sampai beberapa ratus hari di tubuh hewan air, sehingga zat ini menjadi terakumulasi dan konsentrasinya beribu kali lipat lebih besar dibanding air di sekitarnya.

Merkuri dapat berada dalam bentuk metal, senyawa-senyawa anorganik dan senyawa organik. Budiono tahun 2003 menyebutkan adanya beberapa kemungkinan bentuk merkuri yang masuk ke dalam lingkungan perairan, yaitu:

1. Sebagai merkuri anorganik, melalui hujan, *run-off* ataupun aliran sungai. Unsur ini bersifat stabil terutama pada keadaan pH rendah.
2. Dalam bentuk merkuri organik, yaitu *phenyl merkuri* ($\text{C}_6\text{H}_5\text{-Hg}$), *methyl merkuri* ($\text{CH}_3\text{-Hg}$) dan *alkoxyalkyl merkuri* atau *methoxy-ethyl merkuri* ($\text{CH}_3\text{O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-Hg}^+$). Merkuri organik

yang terdapat di perairan alam dapat berasal dari kegiatan pertanian (pestisida).

3. Terikat dalam bentuk *suspended solid* sebagai Hg^{2+} (ion merkuri) yang mempunyai sifat reduksi.
4. Sebagai metalik merkuri (HgO), melalui kegiatan perindustrian dan manufaktur. Unsur ini memiliki sifat reduksi yang tinggi, dan berbentuk cair pada temperatur ruang serta mudah menguap.

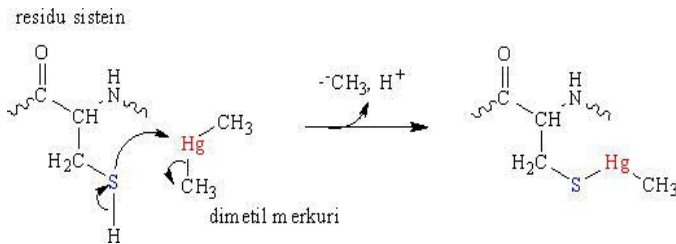
Bahaya yang besar bagi manusia muncul bila yang masuk ke dalam tubuh adalah bentuk *metil merkuri*. Senyawa metil merkuri tergolong mudah larut dalam air, sedangkan yang berbentuk *metil merkuri klorida* juga memiliki sifat mudah bereaksi dengan gugus SH dan OH yang terdapat dalam protein. Sifat logam beracun ini sangat berbahaya karena dapat mempengaruhi seluruh aktivitas metabolisme makhluk hidup (Kompas, 2004). Menurut Dinata (2004) daya racun merkuri dapat diinformasikan sebagai berikut:

1. Kerusakan tubuh yang disebabkan oleh merkuri pada umumnya bersifat permanen.
2. Masing-masing komponen merkuri mempunyai perbedaan karakteristik yang berbeda seperti daya racunnya, distribusi, akumulasi atau pengumpulan, dan waktu retensinya (penyimpanan) di dalam tubuh.
3. Semua komponen merkuri dalam jumlah cukup, maka akan beracun terhadap tubuh.
4. Merkuri dapat berpengaruh terhadap tubuh, karena dapat menghambat kerja enzim dan menyebabkan kerusakan sel. Sifat-sifat *membran* dari dinding sel akan rusak karena pengikatan dengan merkuri, sehingga aktivitas sel dapat terganggu.
5. Transformasi biologi dapat terjadi pada lingkungan atau di dalam tubuh, di mana komponen merkuri diubah menjadi bentuk lain.

Masuknya merkuri dalam tubuh memang akan menimbulkan berbagai gangguan kesehatan bila melampaui ambang batas. Budiono (2003) menyebutkan bahwa pencemaran perairan oleh merkuri akibat kegiatan alam mempunyai kisaran antara 0,00001 sampai 0,0028 ppm, kecuali pada beberapa tempat seperti sungai-sungai di Itali dimana terdapat sumber endapan logam merkuri alamiah, kadarnya dapat mencapai $1,36 \cdot 10^4$ ppm. Menurut pedoman Baku Mutu Lingkungan dalam Kompas (KCM, 2004), kadar merkuri pada makanan yang dikonsumsi langsung atau tanpa diolah maksimum 0,001 ppm. Kadar merkuri yang aman dalam darah

maksimal 0,04 ppm (part per millions). Kadar merkuri 0,1 sampai 1 ppm dalam jaringan sudah dapat menyebabkan munculnya gangguan fungsi tubuh.

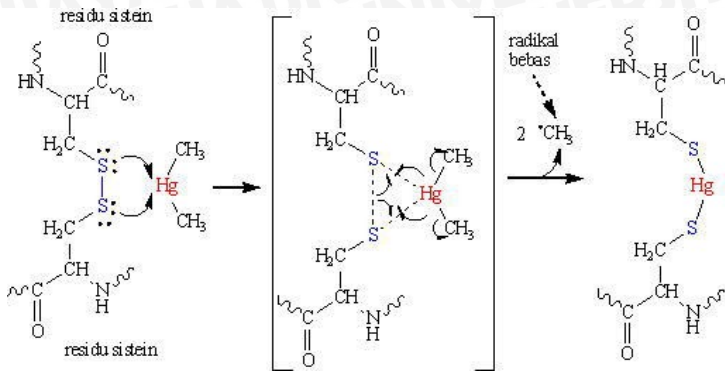
Merkuri dapat membentuk ikatan dengan gugus thiol, ikatan yang terbentuk sangat kuat dan stabil hal ini disebabkan oleh tingginya konstanta kestabilan merkuri-thiol. Dalam pembentukan kompleks merkuri dengan gugus thiol (baik itu berasal dari glutathioein, albumin, sistein dan lain-lain) merkuri akan berikatan dengan gugus thiol bebas yang tersedia (Irwan, 2009).



Gambar 2.4 Pengaruh metil merkuri terhadap gugus *thiol* pada residu *sistein* (Irwan, 2009)

Adanya merkuri yang terikat pada gugus *thiol* pada residu sistein ini menyebabkan fungsi dari *sistein* tidak berjalan dengan semestinya. Sebab gugus *thiol* sangat berperan dalam metabolisme tubuh, di antaranya adalah sebagai pusat aktif dari enzim. Adanya atom merkuri menyebabkan enzim tidak berfungsi sebab enzim bekerja secara spesifik (Irwan, 2009).

Ikatan merkuri yang lain adalah antara merkuri dengan disulfida. Pengaruh merkuri pada ikatan disulfida dapat menyebabkan dua hal. Pertama metil merkuri menyebabkan ikatan disulfida putus. Ikatan disulfida merupakan pembentuk struktur tersier dari suatu protein. Putusnya ikatan disulfida ini mengakibatkan protein kehilangan sifat biologisnya (denaturasi protein) (Irwan, 2009).



Gambar 2.5 Pengaruh metil merkuri terhadap ikatan disulfida (Irwan, 2009)

Akibat lebih lanjut adalah merkuri membentuk suatu jembatan menggantikan ikatan disulfida sebelumnya. Meskipun kelihatan tidak berpengaruh terhadap struktur awalnya, namun secara alami tubuh akan mendeteksi protein asing dalam tubuh. Reaksi penolakan bisa saja terjadi karena adanya pengaruh unsur merkuri dalam protein. Selanjutnya kompleks ini dapat menyebabkan kerusakan protein yang telah terbentuk. Mekanisme pembentukannya dapat diamati pada gambar 2.5 (Irwan, 2009).

2.7 Katak Lembu atau Bullfrog (*Rana Catesbeiana*)

Bullfrog Amerika (*Lithobates catesbeianus*, sebelumnya *Rana catesbeiana*) merupakan katak akuatik. Jika dibandingkan dengan katak asli Indonesia, bullfrog mempunyai banyak kelebihan, di antaranya adalah mudah beradaptasi dengan lingkungan, memiliki ukuran relatif lebih besar, dan mempunyai pertumbuhan yang lebih cepat (Wikipedia, 2007).

Katak jantan dan betina dapat dibedakan dengan melihat tanda-tanda kelamin sekunder, seperti besar kecilnya gendang telinga, warna kulit, ibu jari dan tanda lainnya. Susanto (1998) dalam Novianti (2005) menyebutkan, induk katak lembu jantan mempunyai ciri-ciri sebagai berikut: ukuran gendang telinga dua kali lebih besar dari lingkaran mata, warna kulit di sekitar tenggorokan hijau kekuningan, ibu jari kaki bagian depan relatif lebih besar, memiliki kantung suara yang terletak antara selaput gendang dengan lengan bawah. Sedangkan induk katak betina bisa dibedakan karena

mempunyai ciri-ciri yang bertolak belakang seperti: ukuran lingkaran gendang telinga relatif sama atau sedikit lebih besar dari lingkaran mata, warna kulit sekitar tenggorokan putih dengan bintik-bintik kehitaman, ibu jari kaki bagian depan relatif lebih kecil serta tidak memiliki kantung suara.



Gambar 2.6 Bullfrog (*Rana catesbeiana*)
(Wikipedia, 2007)

Berikut ini taksonomi dari bullfrog (anonymous, 2001):

Kingdom	:	<u><i>Animalia</i></u>
Subkingdom	:	<u><i>Bilateria</i></u>
Branch (Cabang)	:	<u><i>Deuterostopia</i></u>
Infrakingdom	:	<u><i>Chordonia</i></u>
Filum	:	<u><i>Chordata</i></u>
Subfilum	:	<u><i>Vertebrata</i></u>
Infra filum	:	<u><i>Gnathostomata</i></u>
Super kelas	:	<u><i>Tetrapoda</i></u>
Kelas	:	<u><i>Amphibia</i></u>
Subkelas	:	<u><i>Lissamphibia</i></u>
Ordo	:	<u><i>Anura</i></u>
Subordo	:	<u><i>Displasiocoela</i></u>
Famili	:	<u><i>Ranidae</i></u>
Subfamili	:	<u><i>Raninae</i></u>
Genus	:	<u><i>Rana</i></u>
Spesies	:	<u><i>Catesbeiana</i></u>

Nama Sains	:	<i>Rana Catesbeiana</i>
Nama Inggris	:	<i>Giant Bullfrog, Bullfrog</i>
Nama Indonesia	:	Katak lembu, Katak Hijau

Bullfrog merupakan satu spesies yang besar dalam famili *Ranidae* dengan ciri-cirinya (Wikipedia, 2007):

1. Panjang hingga mencapai 8 inci (18 cm) dengan berat lebih dari 1,5 lb (750 g).
2. Jumlah betina secara khas lebih banyak dari pejantannya. Secara umum variasi warna kulitnya antara hijau atau coklat, dengan coklat gelap, hijau gelap atau hitam pada kulit punggung dan putih atau kuning di bagian bawah (perut).
3. Tulang rangka katak dewasa terdiri atas tulang keras (*bone*), tulang lunak hialin dan tulang lunak pengapur (*calcified cartilage*).
4. Berkembang biak dengan cara bertelur, dimana betinanya mampu mengeluarkan lebih dari 25.000 telur tiap proses reproduksi. Telur tersebut berkembang menjadi berudu yang selanjutnya mengalami daur metamorfosis (selama 12-24 bulan) hingga terbentuk organ seperti katak dewasa.

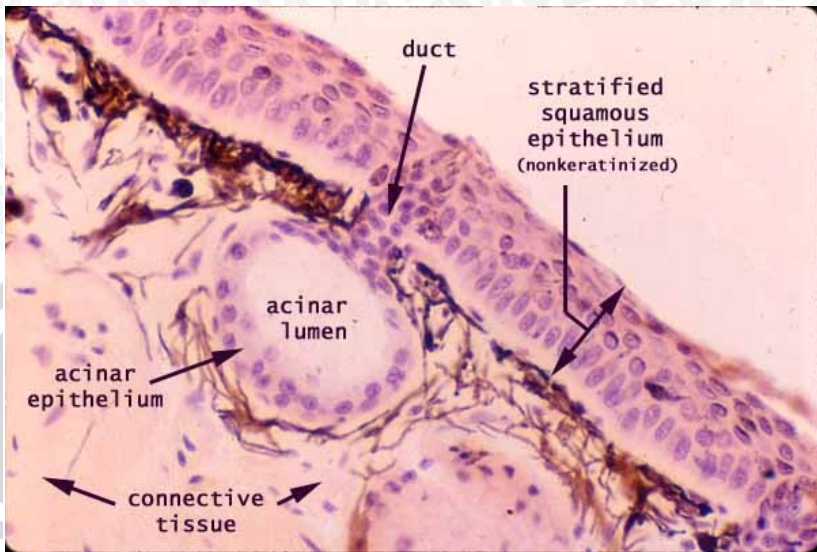
Umumnya fisiologi katak serupa dengan amphibia lainnya dan berbeda dibanding vertebrata darat karena oksigen bisa masuk melalui kulit dengan permeabilitas tinggi yang dimilikinya (Wikipedia, 2007).

Kulit katak terdiri dari dua bagian, yaitu epidermis dan dermis (King, 2002).

1. Epidermis

Epidermis sangat tebal, merupakan lapisan epitelia dari kulit, lebih utama berperan untuk perlindungan. Epidermis tersusun atas *Keratnizedt Stratified Squamous Epithelium* yang bersifat ulet dan relatif impermeabel. Fungsi epidermis disesuaikan dengan tempatnya. Beberapa macam lapisan epidermis:

- a) *Stratum Granulosum*. Lapisan sel *granule* yang terlihat seperti butiran noda gelap.
- b) *Stratum Corneum*. Merupakan lapisan sel yang sudah mati.
- c) *Stratum Spinosum*. Lapisan sel *prickle* yang saling berhimpitan satu dengan yang lain.
- f. *Stratum Basale/Stratum Germinativum*. Lapisan sel yang berhimpitan dengan bagian dasar membran.



Gambar 2.7 Jaringan epitel dan kelenjar pada kulit katak (King, 2002)

2. Dermis

Dermis terdiri dari dua lapisan Collagen, yaitu:

- a. Lapisan *Papillari*, yang merupakan lapisan pada dermis yang berdekatan dengan epidermis yang relatif kecil dan mempunyai tekstur serat collagen yang halus.
- b. Lapisan *Retikular*, merupakan lapisan yang berada di bawah lapisan *papillari* dan cenderung lebih lebar dan serat collagenya bertekstur kasar.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Biofisika Jurusan Fisika Universitas Brawijaya pada bulan Februari sampai Juni 2009.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: gelas ukur, erlenmeyer, pengaduk larutan, pisau (cutter), dua buah *chamber* (setara dengan *Ussing's chamber*), elektroda kalomel, multimeter digital (SANWA PC510), CPU serta *software PCLink* untuk menampilkan potensial *real-time* kulit katak.

Sedangkan bahan-bahan yang digunakan antara lain: Aquades, bahan larutan *ringer* yaitu: NaCl, CaCl₂ · 2H₂O, KCl dan NaHCO₃, larutan pencemar HgCl₂ dengan konsentrasi dalam ppm yaitu: 0.001; 0.005; 0.01; 0.05; 0.1; 0.5; 1; 5; 10 dan 100, dan kulit katak Lembu (*Rana catesbeiana*).

3.3 Metode Penelitian

3.3.1 Pembuatan larutan *ringer*

Larutan *ringer* merupakan larutan yang digunakan untuk menjaga kestabilan PH sel kulit katak dan untuk menjaga kelembaban sel kulit katak. Untuk spesies katak *Rana catesbeiana* yang digunakan dalam penelitian ini, komposisi larutan *ringer* terdiri dari NaCl 85 mM, CaCl₂ · 2H₂O 1 mM, KCl 2 mM, dan NaHCO₃ 25 mM.

Untuk membuat 1 liter larutan *ringer*, komposisi zat-zat penyusunnya dapat ditentukan dengan menggunakan rumus:

$$\text{Mol zat terlarut (mol)} = \text{molaritas larutan (mol/l)} \times V \text{ larutan (liter)}$$

$$\text{Massa zat terlarut (g)} = \text{mol zat terlarut} \times \text{massa molekul relatif zat terlarut}$$

Sehingga berat masing-masing zat yang digunakan dapat ditentukan dengan cara:

1. NaCl dengan molaritas 85 mM

$$\text{Berat molekul (Mr) NaCl} = 58.5 \text{ g/mol}$$

$$\text{Mol NaCl} = \text{molaritas larutan} \times \text{volume larutan}$$

$$= 8.5 \times 10^{-2} \text{ mol/l} \times 1 \text{ liter}$$

$$= 8.5 \times 10^{-2}$$

$$\text{Berat NaCl} = \text{mol NaCl} \times \text{berat molekul NaCl}$$

$$= 8.5 \times 10^{-2} \text{ mol} \times 58.5 \text{ g/mol}$$

$$= 4.973 \text{ g}$$

2. $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dengan molaritas 1mM

$$\text{Berat molekul (Mr) CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 147 \text{ g/mol}$$

$$\text{Mol CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{molaritas larutan} \times \text{volume larutan}$$

$$= 1 \times 10^{-3} \text{ mol/l} \times 1 \text{ liter}$$

$$= 10^{-3}$$

$$\text{Berat CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{mol CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \times \text{berat molekul CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$

$$= 1 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 147 \text{ gr/mol}$$

$$= 0.147 \text{ g}$$

3. KCl dengan molaritas 2 mM

$$\text{Berat molekul (Mr) KCl} = 74.5 \text{ g/mol}$$

$$\text{Mol KCl} = \text{molaritas larutan} \times \text{volume larutan}$$

$$= 2 \times 10^{-3} \text{ mol/l} \times 1 \text{ liter}$$

$$= 2 \times 10^{-3}$$

$$\text{Berat KCl} = \text{mol KCl} \times \text{berat molekul KCl}$$

$$= 2 \times 10^{-2} \text{ mol} \times 74.5 \text{ g/mol}$$

$$= 0.149 \text{ g}$$

4. NaHCO_3 dengan molaritas 25 mM

$$\text{Berat molekul (Mr) NaHCO}_3 = 84 \text{ g/mol}$$

$$\text{Mol NaHCO}_3 = \text{molaritas larutan} \times \text{volume larutan}$$

$$= 2.5 \times 10^{-2} \text{ mol/l} \times 1 \text{ liter}$$

$$= 2.5 \times 10^{-2}$$

$$\text{Berat NaHCO}_3 = \text{mol NaHCO}_3 \times \text{berat molekul NaHCO}_3$$

$$\begin{aligned} &= 2.5 \times 10^{-2} \text{ mol} \times 84 \text{ g/mol} \\ &= 2.1 \text{ g} \end{aligned}$$

Setelah itu, semua bahan yang telah ditimbang dengan komposisi sesuai dengan perhitungan di atas, dimasukkan pada Erlenmeyer yang berukuran 1 liter dan kemudian ditambahkan aquades sedikit demi sedikit sampai volume larutan mencapai 1 liter. Larutan *ringer* diukur pH-nya dengan menggunakan kertas pH, Jika larutan belum mempunyai pH 7.4, maka perlu ditambahkan HCl.

3.3.2 Persiapan kulit katak

Kulit katak yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah kulit katak bagian perut (*ventral*) dan kulit bagian punggung (*dorsal*). Kulit bagian perut dan punggung katak diambil kemudian dibilas dengan aquades dan direndam atau dimasukkan ke dalam larutan *ringer*, agar kulit katak tetap dalam keadaan baik. Kulit katak yang masih berupa lembaran dipotong berbentuk lingkaran dengan diameter ± 2 cm disesuaikan dengan lubang atau celah diantara kedua chamber. Dari satu ekor katak dapat dibuat sebanyak 10 buah lingkaran, yakni 5 buah lingkaran untuk kulit katak bagian punggung dan 5 buah lingkaran untuk kulit bagian perut. Hal yang harus diperhatikan adalah pada setiap perlakuan kulit katak harus selalu terjaga kelembabannya dengan direndam dalam larutan *ringer*.

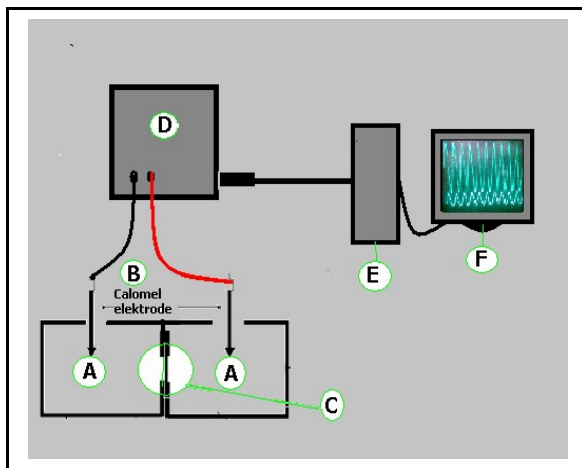
3.4 Pengukuran Potensial Listrik Kulit Katak

Proses pengambilan data, dimulai dengan mempersiapkan rangkaian alat ukur beda potensial. Langkah-langkahnya adalah elektroda *calomel* dihubungkan ke multimeter *sanwa PC510* yang dilengkapi dengan *interface port* USB. Kemudian Interface tersebut disambungkan ke PC (yang telah dilengkapi dengan sebuah software *PCLink* yang dapat menampilkan dan merekam besar potensial listrik terhadap waktu pengukuran). Dan dipastikan bahwa rangkaian alat telah tersambung dan bekerja dengan baik.

Pengukuran potensial listrik kulit katak bagian perut dan punggung dilakukan secara bergantian. Perlakuan yang diberikan baik bagian perut maupun punggung adalah sama. Kulit katak yang telah dipotong dijepitkan, sedemikian sehingga tepat menutup celah diantara kedua chamber. Dan ditandai kulit katak bagian luar (*mucosal*) dan bagian dalam (*serosal*), agar penempatan larutannya

tepat yakni larutan ringer pada chamber yang berhadapan langsung dengan permukaan kulit katak bagian *serosal* dan larutan pencemar merkuri $HgCl_2$ pada chamber yang berhadapan dengan permukaan kulit katak bagian *mucosal*. Setelah semuanya siap, elektroda kalomel dimasukkan pada lubang di bagian atas kedua chamber. Dan grafik pengukuran yang ditampilkan oleh monitor direkam sebagai data hasil pengukuran potensial *real-time* kulit katak lembu. Setiap perlakuan dilakukan lima kali pengulangan dan tiap pengantian larutan dengan pengubahan komposisi larutan pencemar juga dilakukan penggantian kulit katak agar pengukuran untuk tiap pengantian larutan berada pada kondisi yang sama.

Ilustrasi rangkaian alat pengukuran potensial *real-time* dari kulit katak bisa dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Rangkaian alat penelitian

Keterangan:

- A = Chamber (yang setara dengan ussing chamber)
- B = Elektrode *calomel*
- C = Kulit katak
- D = Multimeter digital *sanwa PC510*
- E = CPU (dilengkapi dengan *software PCLink*)
- F = Monitor

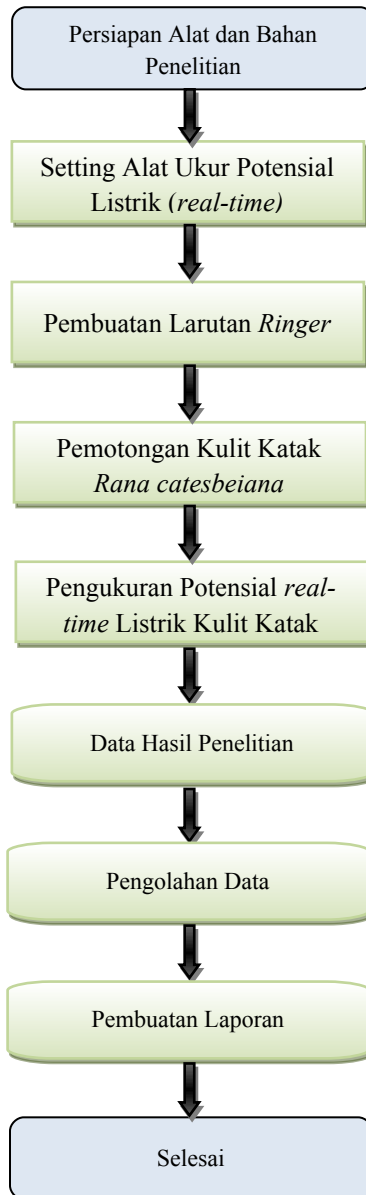
Dengan melakukan perubahan konsentrasi diharapkan hubungan antara potensial listrik *real-time* kulit katak dengan perubahan konsentrasi pencemar HgCl_2 dan hubungan perubahan konsentrasi pencemar terhadap waktu dapat dipelajari.

3.5 Analisis Data

Data yang diperoleh merupakan data pengukuran potensial membran kulit katak *Rana catesbeiana* yang gayut terhadap waktu dengan berbagai konsentrasi pencemar HgCl_2 dalam ppm diantaranya yaitu: 0.001; 0.005; 0.01; 0.05; 0.1; 0.5; 1; 5; 10 dan 100. Data yang diperoleh diambil dari kulit katak bagian perut (*ventral* atau *abdomen*) dan bagian punggung (*dorsal*). Besaran potensial kulit katak yang diukur terhadap fungsi waktu merupakan hasil pendekatan terbaik yaitu nilai rata-rata hasil pengukuran.

Dari pendekatan nilai rata-rata yang diperoleh dibuat grafik hubungan antara potensial listrik kulit katak (sumbu y) terhadap waktu dalam sekon (sumbu x) untuk berbagai perubahan konsentrasi pencemar HgCl_2 serta konsentrasi terhadap periode untuk mencapai titik kesetimbangan (nol mutlak). Grafik tersebut diharapkan mampu menunjukkan adanya pengaruh pencemar varian merkuri HgCl_2 melalui karakter potensial listrik kulit katak *Rana catesbeiana* dalam konteks dinamis (*real-time*).

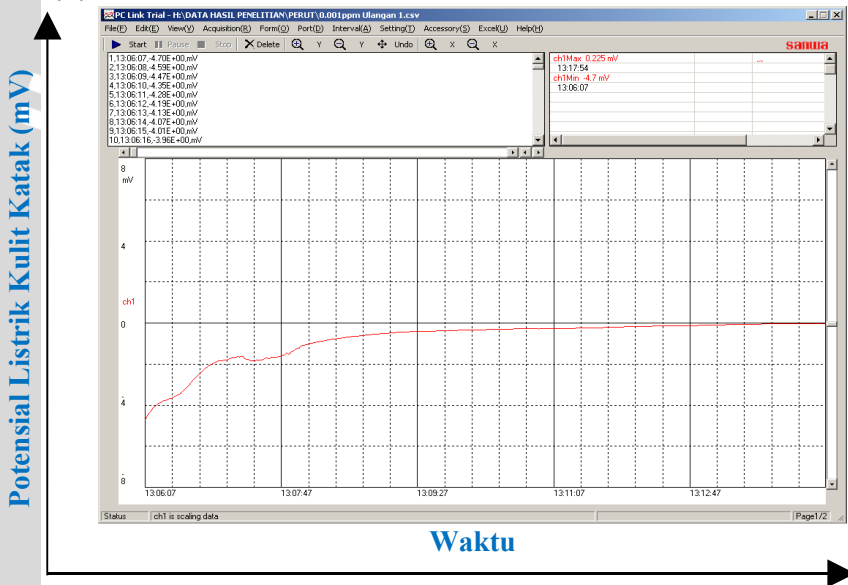
3.6 Diagram Alur Penelitian



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Kulit katak yang diukur perubahan potensialnya dibedakan menjadi dua, yaitu potensial kulit katak bagian perut (*ventral*) dan kulit katak bagian punggung (*dorsal*). Potensial yang terukur merupakan nilai potensial kulit katak setiap saat (*real-time*) akibat *trigger* berupa paparan larutan HgCl_2 terhadap membran kulit katak *Rana catesbeiana*. Data hasil pengukuran potensial listrik kulit katak yang diperoleh dalam konteks dinamik tersebut tampak pada gambar 4.1.

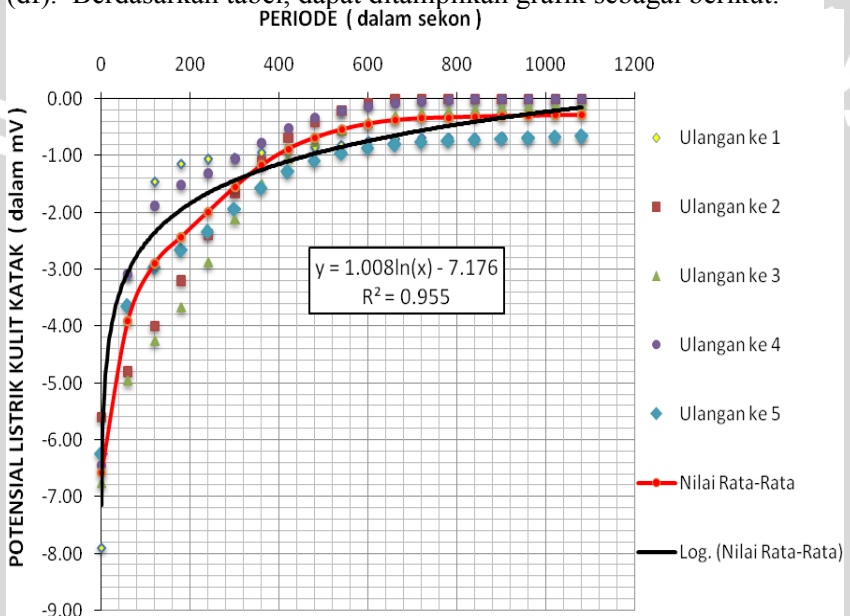


Gambar 4.1 Potensial listrik *real-time* kulit katak ϕ pada larutan HgCl_2 dengan konsentrasi C

Gambar 4.1 merupakan data hasil rekaman potensial listrik kulit katak (arah-y) terhadap periode (arah-x). Mengacu gambar 4.1 untuk konsentrasi pencemar tertentu C, gradien potensial listrik semakin meningkat seiring dengan kenaikan waktu sampai *steady state* (keadaan tunak) dalam selang waktu t. Grafik perubahan potensial yang merupakan gradien potensial listrik kulit katak terhadap selang

waktu yang diperlukan memberikan suatu fungsi yang identik dengan fungsi logaritmik.

Perlakuan yang sama diberikan untuk masing-masing kulit katak, sehingga nilai potensial *real-time* yang terukur dapat diambil rata-ratanya. Berikut salah satu cuplikan untuk memperoleh nilai rata-rata potensial listrik *real-time* kulit katak Lembu dengan hampiran waktu tiap 60 detik (selengkapnya dalam tabel dan grafik pada lampiran 1). Dari tabel tampak bahwa pengambilan potensial kulit katak dilakukan dengan nilai rata-rata dari lima kali perlakuan yang diberikan dengan hampiran periode tiap 60 detik, sehingga didapatkan potensial listrik kulit katak rata-rata (f) dan deviasinya (df). Berdasarkan tabel, dapat ditampilkan grafik sebagai berikut:



Gambar 4.2 Pendekatan nilai rata-rata potensial *real-time* kulit katak *ventral* dalam suatu konsentrasi pencemar $HgCl_2$

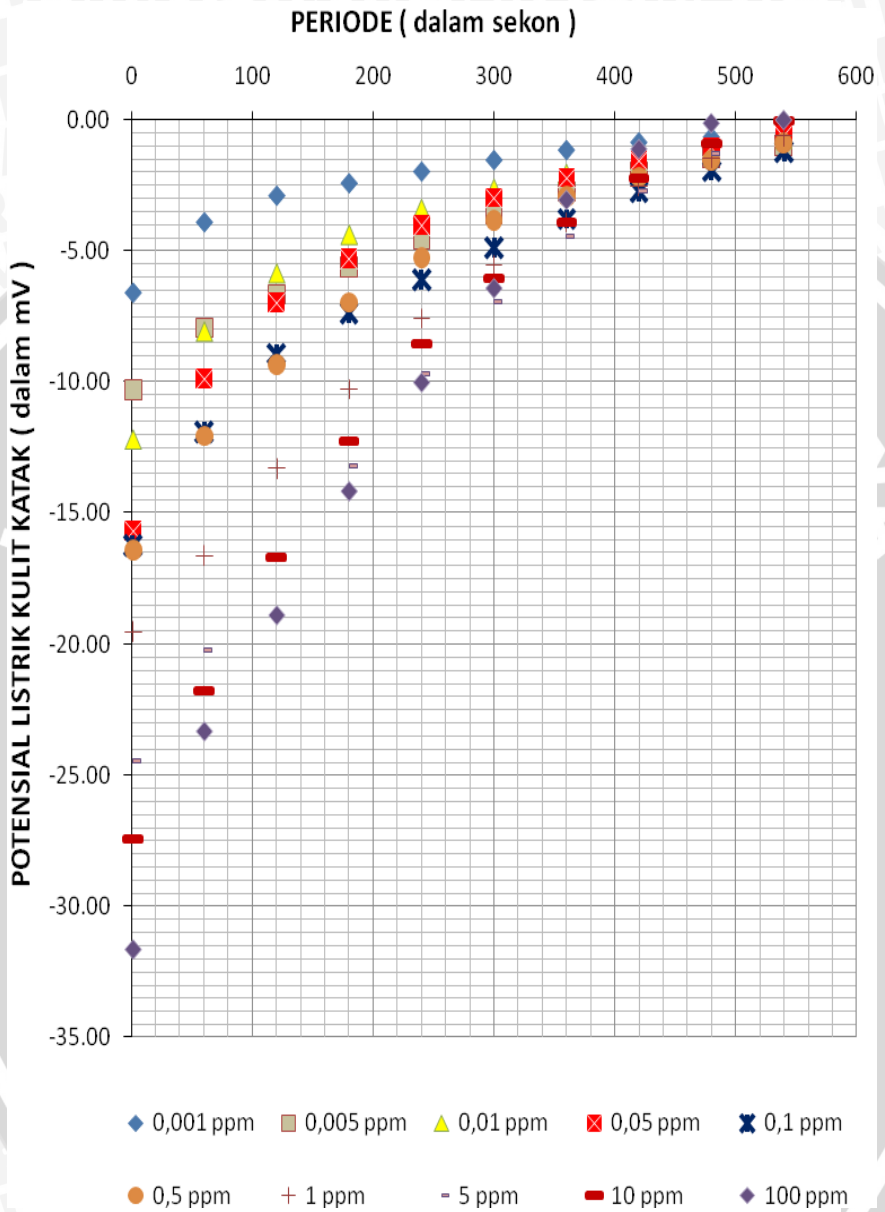
Berdasarkan gambar 4.2, terlihat titik-titik *marker* berwarna (hijau, biru, coklat, ungu dan kuning) menunjukkan bahwa perlakuan diulang sebanyak lima kali. Dan titik *marker* merah bergaris (nilai rata-rata) merupakan nilai pendekatan rata-ratanya. Garis *trendline* berwarna hitam merupakan pendekatan matematis nilai rata-rata ke dalam persamaan garis yang serupa fungsi logaritmik, yakni:

$$y = 1,008 \ln(x) - 7,176 ; \text{ dengan } R^2 = 0,955$$

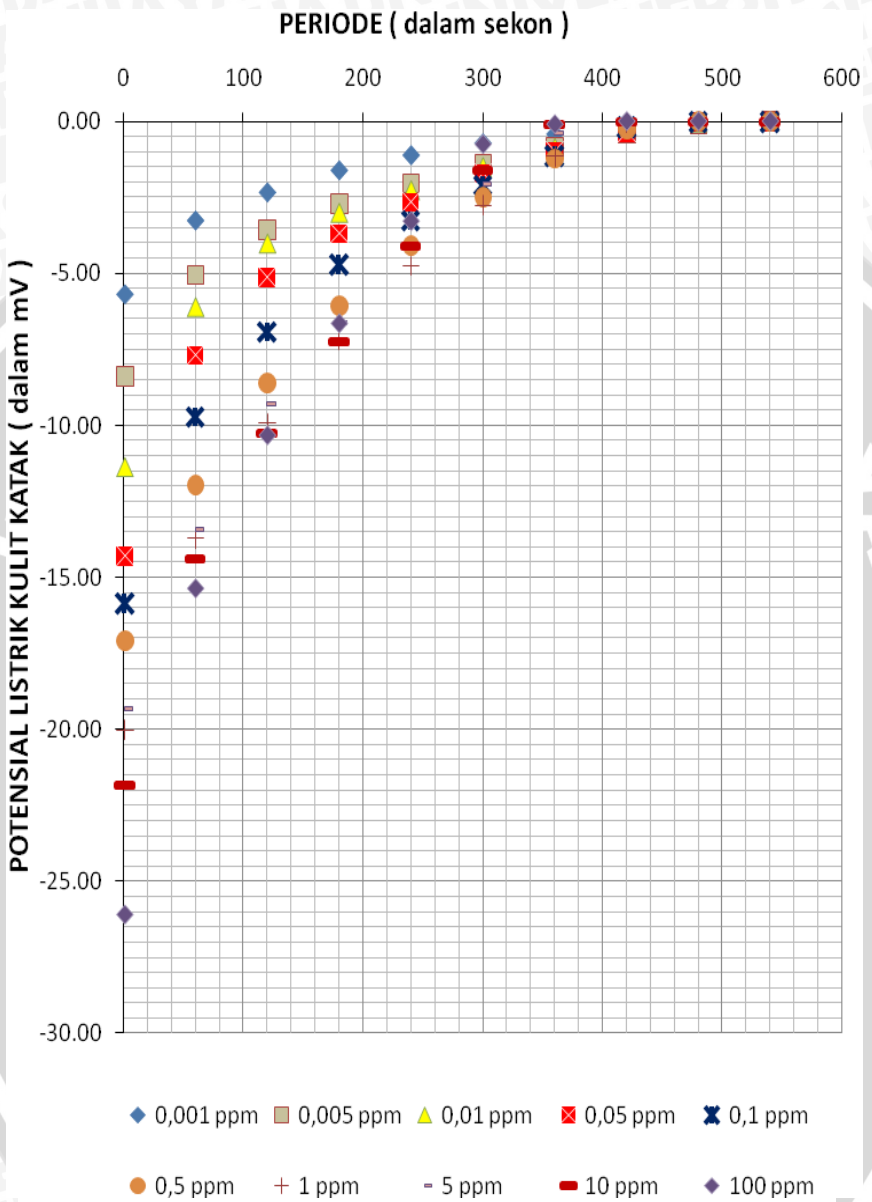
Persamaan garis yang diambil menunjukkan nilai potensial yang gayut terhadap waktu dan R^2 menunjukkan nilai regresi dari hasil pendekatan persamaan garis tersebut. Nilai potensial rata-rata ini sebagai hasil pendekatan terbaik terhadap nilai yang sebenarnya.

Hasil pendekatan rata-rata dengan hampiran periode tiap 60 sekon yang diperoleh dari pengukuran besar potensial *real-time* kulit katak Lembu (*Rana catesbeiana*) pada berbagai konsentrasi HgCl_2 dapat dilihat pada tabel 2.1.1 dan 2.1.2 pada lampiran 2. Tabel tersebut menunjukkan bahwa nilai potensial menjadi relatif lebih positif dari keadaan awal hingga mendekati titik kesetimbangan $\phi=0$ mV pada selang waktu tertentu. Pada keadaan awal (periode 1 sekon), konsentrasi HgCl_2 yang semakin besar dari 0.001 ppm sampai 100 ppm menyebabkan *range* potensial yang ditimbulkan berbeda jauh yakni berkisar antara -6.58 mV sampai -31.64 mV untuk kulit katak bagian *dorsal* dan -5.67 mV sampai -26.08 mV untuk bagian *ventral*. *Range* potensial tersebut semakin menurun seiring periode pengukurannya sampai mencapai titik kesetimbangan. Dari tabel 2.1.1 untuk bagian *dorsal* terlihat bahwa pada periode 540 sekon, *range* potensialnya menjadi -1.21 mV sampai 0 mV, sedangkan untuk bagian *ventral* pada periode 420 sekon *range* potensialnya telah berkisar antara -0.42 mV sampai 0 mV dan pada periode 540 sekon semua sampel yang diteliti telah mencapai nilai potensial 0 mV.

Berdasarkan tabel 2.1.1 dan 2.1.2 dihasilkan grafik perubahan potensial terhadap waktu seperti gambar 4.3 dan 4.4. Grafik tersebut menunjukkan terjadinya peningkatan nilai potensial yang diikuti dengan naiknya periode yang diperlukan dalam tiap kenaikan konsentrasi HgCl_2 baik kulit *ventral* maupun *dorsal*. Kenaikan konsentrasi pencemar HgCl_2 menunjukkan suatu perbedaan karakter potensial listrik pada kulit katak baik *ventral* maupun *dorsal*. Nilai potensial listrik kulit katak pada mulanya bernilai negatif, dan lebih negatif seiring dengan konsentrasi yang lebih besar. Selang waktu beberapa saat potensial untuk berbagai konsentrasi HgCl_2 tampak mendekati titik kesetimbangan yakni sumbu koordinat potensial $\phi=0$ mV. Dinamika perubahan *range* nilai potensial yang diperoleh tampak semakin kecil seiring kenaikan waktu sampai mendekati titik kesetimbangan.

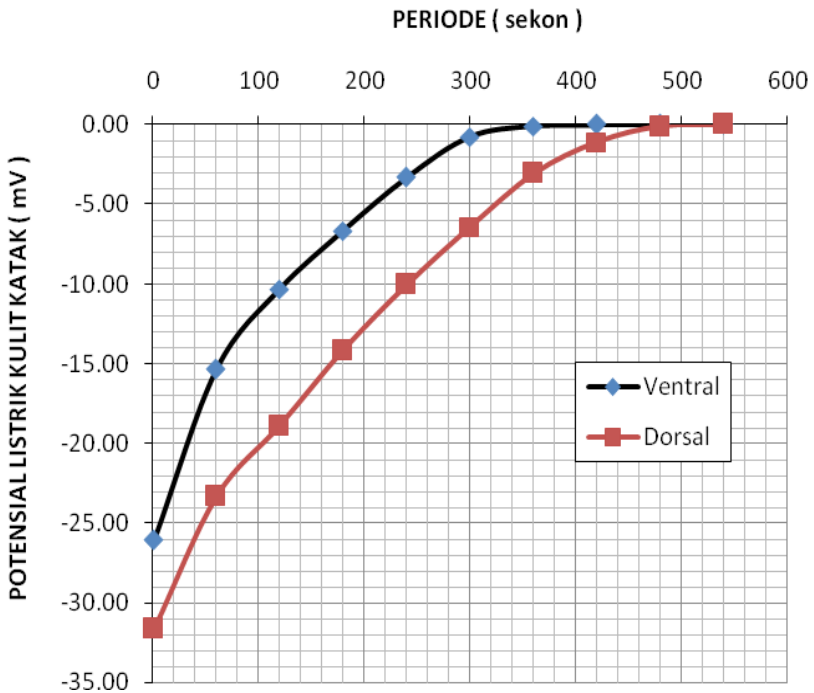


Gambar 4.3 Perubahan potensial listrik pada kulit katak bagian dorsal (tiap selang waktu 60 sekon)



Gambar 4.4 Perubahan potensial listrik pada kulit katak bagian *ventral* (tiap selang waktu 60 sekond)

Perbedaan karakter kelistrikan antara kulit katak *ventral* dengan *dorsal* pada tiap konsentrasi pencemar HgCl_2 tampak pada gambar 4.5 di bawah ini (selengkapnya pada lampiran 3).



Gambar 4.5 Potensial real-time kulit katak *dorsal* dan *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 100 ppm

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa potensial kulit katak *ventral* lebih besar dari *dorsal* dengan selang waktu untuk mencapai titik kesetimbangan relatif lebih cepat. Hal ini dimungkinkan akibat pengaruh tekstur kulit katak *dorsal* yang relatif lebih tebal dari *ventral*. Perbedaan karakter kelistrikan kulit katak *dorsal* dan *ventral* untuk tiap perlakuan (sampel konsentrasi yang sama) selengkapnya pada lampiran 3. Pendekatan matematis yang menunjukkan perbedaan karakter kelistrikan dengan pendekatan persamaan garis yang dihasilkan tampak pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbedaan karakter kelistrikan kulit katak *dorsal* dan *ventral* melalui pendekatan matematis

Konsentrasi HgCl ₂ (ppm)	<i>Dorsal</i>		<i>Ventral</i>	
	Persamaan	R ²	Persamaan	R ²
0.001	$y = 1.008\ln(x) - 7.176$	0.955	$y = 0.926\ln(x) - 6.142$	0.932
0.005	$y = 1.679\ln(x) - 12.45$	0.791	$y = 1.357\ln(x) - 9.194$	0.914
0.01	$y = 1.975\ln(x) - 13.73$	0.912	$y = 1.848\ln(x) - 12.13$	0.955
0.05	$y = 2.544\ln(x) - 17.41$	0.925	$y = 2.315\ln(x) - 15.20$	0.952
0.1	$y = 2.645\ln(x) - 19.04$	0.851	$y = 2.584\ln(x) - 17.32$	0.904
0.5	$y = 2.660\ln(x) - 18.98$	0.845	$y = 2.787\ln(x) - 19.19$	0.842
1	$y = 3.148\ln(x) - 23.43$	0.734	$y = 3.283\ln(x) - 22.45$	0.846
5	$y = 3.986\ln(x) - 29.39$	0.732	$y = 3.138\ln(x) - 21.49$	0.835
10	$y = 4.559\ln(x) - 32.29$	0.789	$y = 3.597\ln(x) - 24.15$	0.850
100	$y = 5.184\ln(x) - 36.61$	0.790	$y = 4.399\ln(x) - 28.27$	0.903

Persamaan-persamaan garis yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengetahui beda karakter kelistrikan akibat perbedaan ketebalan dari kulit katak sebagai obyek penelitian. Berdasarkan tabel 4.1, pendekatan matematis menghasilkan suatu fungsi logaritmik; $y = a \ln(x) - b$ yang menguatkan sifat kapasitif dari membran transepitelial, dengan R² sebagai regresi dari pendekatan matematisnya. Dimana; $y=f(t)$ merupakan potensial listrik kulit katak dan $x=t$ merupakan periode perekamannya. Sedangkan konstanta a menunjukkan faktor kelengkungan kurva $f(t)$ yang diperoleh dan konstanta b menunjukkan pergeseran kurva $f(t)$. Kenaikan konsentrasi HgCl₂ menyebabkan potensial pada keadaan awal semakin negatif, hal tersebut ditunjukkan oleh konstanta b yang semakin negatif. Selain itu, gradien persamaan garis (konstanta a) yang semakin besar menunjukkan bahwa ekstrimitas dari persamaan garis yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini menandakan bahwa akselerasi ioniknya semakin besar akibat gradien konsentrasi yang semakin besar. Jika dibandingkan, konstanta a dan b yang dihasilkan

lebih besar *dorsal* dari pada *ventral*, artinya potensial listrik kulit katak *ventral* relatif lebih kecil dengan periode potensialnya juga semakin kecil. Hal ini menandakan adanya perbedaan karakter akibat pengaruh ketebalan dari obyek penelitian.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Potensial listrik kulit katak

Prinsip dasar potensial listrik kulit katak dapat diterangkan dalam suatu pemodelan struktur dasar penyusun makhluk hidup yaitu membran sel. Di mana proses yang berperan pada peristiwa ini adalah difusi, transpor aktif dan kebocoran Na^+ dan K^+ melalui membran. Terdapat dua kondisi potensial membran, yaitu potensial aksi dan *resting* membran (masa istirahat membran). Dalam keadaan *resting* potensial (tidak ada kontak pencemar di lingkungan), konsentrasi ion dan senyawa yang mendominasi terlihat pada tabel 4.2.

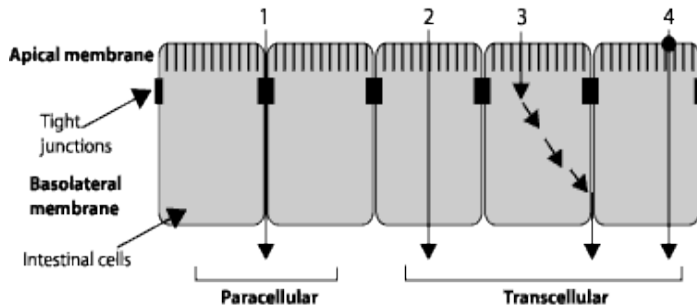
Tabel 4.2 Konsentrasi ion dan senyawa membran pada kondisi *resting* potensial

Component	Concentration in mM/l		
	Plasma	Interstitial	Intracellular
Na^+	140	145	10
K^+	4	4	160
Ca^{2+}	2	2	10^{-4}
Cl^-	100	115	3
HCO_3^-	28	30	10
Protein	16	10	55

Ussing (1956:135) dalam Novianti (2005) mengemukakan bahwa pada tahun 1848 Du Bois Reymond telah menunjukkan bahwa kulit katak yang diisolasi mampu mempertahankan beda potensial antara sisi luar (*mucosal*) dan sisi dalam (*serosal*), larutan di bagian sisi dalam selang beberapa waktu menjadi 100 mV relatif lebih positif daripada sisi luar.

Jalur pertukaran ion dan zat pernafasan yang terjadi pada kulit katak tampak pada gambar 4.6. Novianti (2005) menyebutkan bahwa membran *serosal* merupakan permukaan sebelah dalam yang berhubungan dengan cairan sitoplasma dilengkapi dengan pompa

Na^+ yang menjaga keseimbangan kadar ion Na^+ dan ion K^+ antara di luar sel dan di dalam sel. Ion-ion Na^+ keluar sel (menuju sitoplasma) sedangkan ion K^+ masuk ke dalam sel, sehingga kadar ion K^+ dalam sel lebih tinggi daripada di luar sel. Membran serosal tidak permeabel untuk ion Na^+ (dan *Sulfate*), sehingga ion Na^+ tidak mungkin dapat kembali masuk ke dalam sel secara difusi pasif. Akan tetapi sebaliknya, membran serosal sangat permeabel untuk ion K^+ dan ion Cl^- .

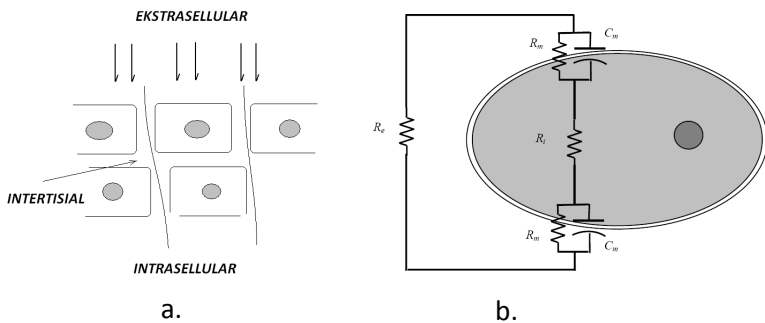


Gambar 4.6 Jalur masuknya zat pernafasan dan ion ke dalam intraseluler pada jaringan epitel (Anonymous, 2009)

Membran *mucosal* merupakan permukaan sebelah luar yang berhubungan dengan lingkungan. Sangat permeabel untuk ion-ion Na^+ dan juga ion Cl^- , akan tetapi tidak permeabel untuk ion K^+ . Hal ini menyebabkan ion Na^+ dari lingkungan dapat masuk ke dalam sel secara difusi seiring dengan gradien konsentrasi ion Na^+ . Oleh karena itu pengurangan ion Na^+ pada membran *serosal* dapat tergantikan. Ketidakseimbangan antara pompa ion dan permeabilitas menyebabkan ion Na^+ berpindah dari lingkungan, melintasi membran *mucosal* masuk ke dalam epitelium, kemudian melintasi membran *serosal* masuk ke dalam sitoplasma. *Tight junction* yang merupakan hubungan antara membran plasma yang berdekatan, akan mencegah aliran balik ion melalui saluran kecil antar sel. Perpindahan K^+ yang berlawanan arah dengan pompa Na^+ bertujuan untuk menghindari timbulnya gradien potensial sebagai akibat dari perpindahan ion Na^+ .

Secara sederhana, perbedaan gradien elektrokimia antara ekstraseluler dengan intraseluler menyebabkan ion-ion masuk menerobos membran maupun melewati jalur sela antar sel (*intertisial*), seperti tampak pada gambar 4.7a. Sebuah pemodelan

rangkaian listrik yang dapat dianalogikan pada jalur ion-ion tersebut tampak pada gambar 4.7b.



Gambar 4.7 Jalur ion-ion dari ekstraselular ke intraselular

Proses difusi molekul-molekul dan ion melewati jaringan epitelium tergantung pada *specificity* yakni kekhususan kanal pada membran, tingkat kejenuhan (*saturation*) dan kompetisi.

Konsep resistif dari membran muncul akibat aliran atau difusi ion melewati medium membran dengan hambatan jenis tertentu. Sedangkan konsep kapasitif muncul ketika kita membicarakan sifat kekhususan dari membran, bahwa hanya molekul dan ion tertentu yang terdifusikan melalui sistem tersebut (membran). Jumlah kanal hanya mampu mendifusikan sejumlah ion dan molekul tertentu dalam satu waktu sehingga seperti terjadi suatu pengumpulan muatan pada salah satu sisi membran. Selain itu adanya dua atau lebih substansi yang permeabel terhadap satu kanal tertentu maka salah satunya akan terdifusikan lebih lambat dari yang lain akibat kompetisi untuk menggunakan kanal yang terbatas dari segi kuantitasnya.

Mekanisme dasar difusi sel *epithelia* pada kulit katak *Rana catesbeiana* yang diisolasi secara logis akan mengesampingkan fenomena transpor aktif yang dirangsang melalui energi ATP akibat produksi insulin pada katak hidup. Praktisnya, pada pengukuran potensial listrik kulit katak yang diisolasi, hanya didominasi oleh difusi pasif saja. Sehingga dalam keadaan normal, potensial listrik kulit katak akan memberikan suatu kenyataan yang sesuai dengan mekanisme difusi sederhana, difusi terfasilitasi maupun osmosis

yang mematuhi hukum-hukum kesetimbangan difusi baik konsentrasi maupun ionik.

4.2.2 Pengaruh pencemar merkuri pada potensial listrik kulit katak

Katak sebagai hewan air secara langsung berhubungan dengan intake pencemar merkuri cair. Bagian kulit katak yang berperan sebagai alat metabolisme dan pertukaran zat/ion dapat dikatakan sebagai gerbang dalam proses bioakumulasi dan biomagnifikasi logam berat merkuri bilamana air di lingkungan hidupnya mengandung *varian* limbah merkuri cair.

Pemodelan fisis yang menunjukkan interaksi antara kulit katak akibat *trigger* berupa *varian* limbah merkuri HgCl_2 terlarut dapat dijelaskan dengan suatu karakter kelistrikan yang ditimbulkan. *Driving force* berupa perbedaan konsentrasi dan ion antara larutan di dalam dan di luar sel menimbulkan kecenderungan kedua larutan untuk mencapai suatu titik kesetimbangan. Fenomena difusi ion-ion akan memberikan karakter kelistrikan kulit katak.

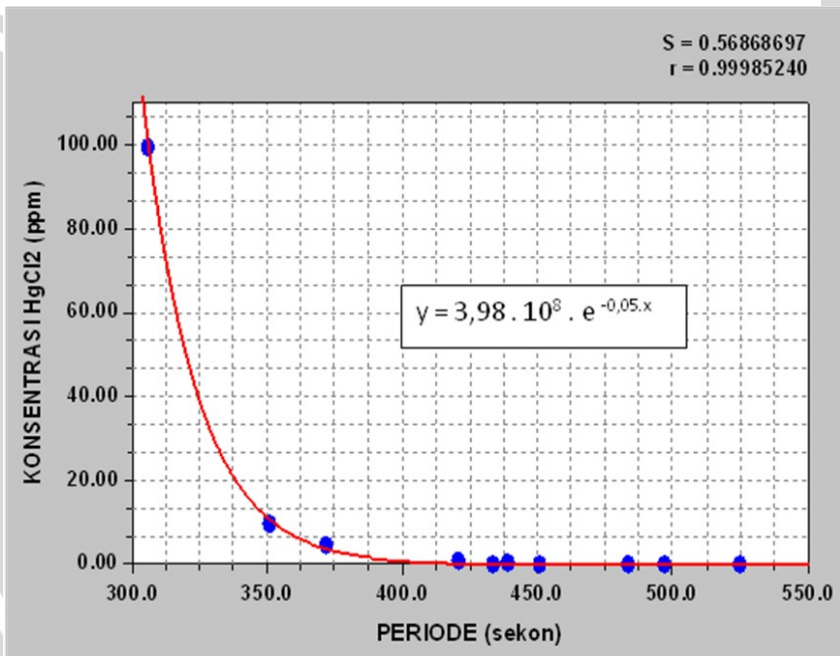
Nilai potensial listrik kulit katak pada mulanya bernilai negatif. Dalam sebuah penelitian menggunakan *ussing chamber*, Novianti (2005) menyebutkan bahwa pada kondisi tidak ada pencemar yakni dengan komposisi larutan *ringer* dengan aquades, kulit katak mampu mempertahankan kondisi potensial sampai -60.96 mV pada bagian *ventral* dan -35.68 mV pada bagian *dorsal*. Hal ini terjadi karena ion-ion negatif yang terdapat di bagian dalam sel lebih banyak daripada di luar sel.

Meningkatnya konsentrasi menyebabkan nilai potensial listrik kulit katak pada awal pengukuran semakin negatif. Hal ini dimungkinkan akibat timbulnya kompleksasi garam merkuri HgCl_2 pada permukaan membran yang membentuk ikatan Hg-X (kompleks garam merkuri di permukaan) dengan melepaskan ion bebas Cl^- . Sehingga semakin besar konsentrasi HgCl_2 maka ion bebas Cl^- yang dilepaskan juga semakin banyak.

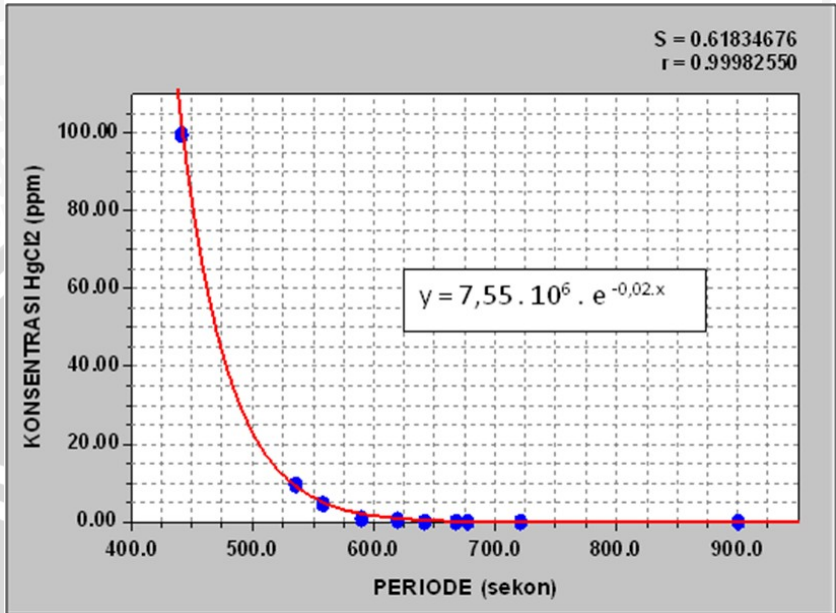
Nilai potensial listrik kulit katak untuk berbagai konsentrasi HgCl_2 dalam skala yang besar tampak mendekati sebuah titik sesaat sebelum mencapai sumbu koordinat potensial $\phi=0$ mV. Pola tersebut menggambarkan bahwa hanya sejumlah ion yang dapat ditranspor pada selang waktu tertentu. Selain itu, merupakan suatu kecenderungan ion-ion di antara kedua sisi membran untuk menuju

ke titik kesetimbangan. Ketika skala grafik diperkecil tampak bahwa periode yang dibutuhkan untuk mencapai titik kesetimbangan semakin kecil seiring dengan peningkatan konsentrasi HgCl_2 baik kulit katak *ventral* maupun *dorsal*.

Perbedaan periode tersebut dapat dikaitkan dengan periode difusi yang berhubungan dengan laju difusi akibat pengaruh HgCl_2 . Dimana peningkatan konsentrasi HgCl_2 menyebabkan laju difusinya semakin besar. Ini ditunjukkan oleh grafik hubungan antara konsentrasi pencemar HgCl_2 terhadap periode untuk mencapai titik kesetimbangan pada gambar 4.8 untuk kulit *ventral* dan 4.9 untuk kulit *dorsal*. Kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi HgCl_2 menyebabkan periode untuk mencapai titik kesetimbangan semakin kecil, atau dengan kata lain kecepatan perpindahan elemen bermuatan penyusun larutannya semakin besar.



Gambar 4.8 Grafik hubungan antara konsentrasi pencemar HgCl_2 terhadap periode untuk mencapai titik kesetimbangan pada kulit katak *ventral*



Gambar 4.9 Grafik hubungan antara konsentrasi pencemar HgCl₂ terhadap periode untuk mencapai titik kesetimbangan pada kulit katak *dorsal*

Nilai potensial listrik kulit katak *dorsal* lebih besar dari *ventral* dengan selang waktu untuk mencapai titik kesetimbangan relatif lebih cepat disebabkan karena struktur seluler kulit katak *dorsal* lebih tebal dari *ventral*. Ketebalan struktur kulit katak ini mengindikasikan kuantitas makromolekul penyusun jaringan epitelia kulit katak lebih besar bagian *dorsal* daripada *ventral*. Akibatnya, permeabilitas yang ditimbulkan oleh pengaruh HgCl₂ juga berbeda. Hal inilah yang memungkinkan grafik potensial listrik *real-time* kulit katak *dorsal* relatif lebih landai dari *ventral* (tampak pada gambar 4.5 dan selengkapnya pada lampiran 3), serta terjadinya pergeseran kurva konsentrasi terhadap waktu jika dibandingkan antara gambar 4.8 (*ventral*) dan 4.9 (*dorsal*). Selain itu, kulit katak *ventral* lebih sering kontak dengan air menyebabkan sensitivitas terhadap larutan pencemar cair lebih besar dari *dorsal*.

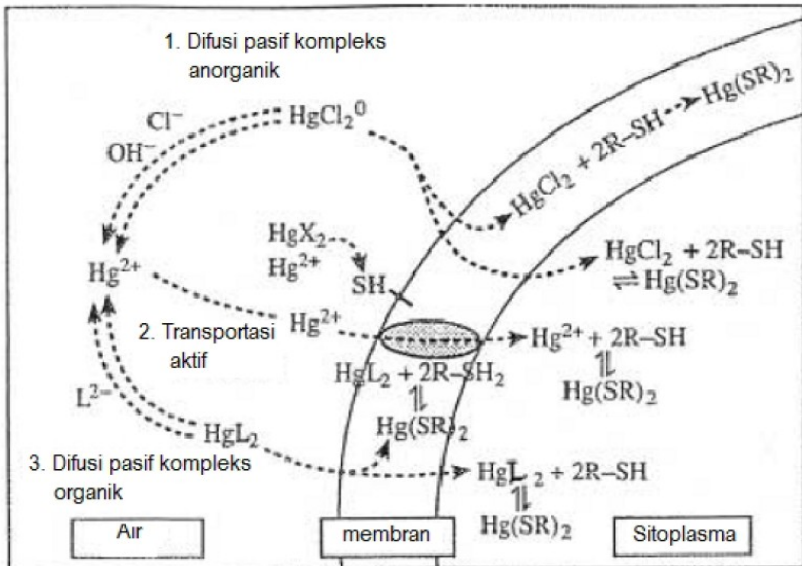
Anomali perubahan potensial kulit katak akibat kenaikan konsentrasi HgCl_2 yang terjadi memungkinkan kulit katak digunakan sebagai biosensor pencemar merkuri. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa peningkatan kadar merkuri dapat diindikasikan melalui fenomena kelistrikan dari kulit katak dimana potensial pada keadaan awal semakin negatif serta laju difusi untuk mencapai titik kesetimbangan (nol mutlak) semakin besar.

Naiknya nilai potensial listrik kulit katak akibat interaksi HgCl_2 dengan gugus fungsional protein penyusun membran juga ditambahkan oleh Irwan (2009). Dia menyebutkan bahwa merkuri dapat membentuk ikatan dengan gugus thiol. Ikatan yang terbentuk sangat kuat dan stabil. Hal ini disebabkan oleh tingginya konstanta kestabilan merkuri-thiol. Dalam pembentukan kompleks merkuri dengan gugus *thiol* (baik itu berasal dari *gluthathioein*, *albumin*, *sistein* dan lain-lain) merkuri akan berikatan dengan gugus *thiol* bebas yang tersedia.

Dalam sistem, larutan logam berada dalam bentuk ion bebas atau dalam bentuk kompleks ligan. Ketika mendekati permukaan sel, logam harus melewati membran sel. Makromolekul dalam membran sel bersifat porous dan mengandung gugus fungsional sederhana yang didominasi oleh grup oksigen sebagai donor elektron ($-\text{COH}$; $-\text{COOH}$; $-\text{P}(\text{O})(\text{OH})_2$). Pada pH netral kebanyakan gugus fungsional tersebut mengalami ionisasi menghasilkan matriks hidrofilik bermuatan negatif sehingga ion logam dan bentuk kompleksnya dapat melewati membran plasma.

Pemodelan interaksi limbah *varian* merkuri terhadap membran berkaitan dengan bioakumulasi logam berat merkuri juga dapat diterangkan melalui proses biokimia dengan teori *ligan biotik model* (model ligan biotik). Secara skematik mekanisme interaksi logam dengan membran tampak pada gambar 4.10. Teori model ligan biotik dalam Suseno dan Panggabean (2009), menunjukkan interaksi logam dengan sel mengikuti beberapa langkah yaitu difusi logam dalam larutan ke permukaan biologis, sorpsi/kompleksasi logam pada sisi ikatan pasif dalam lapisan pelindung atau sisi pengikat spesifik pada permukaan luar membran plasma dan pengambilan atau internalisasi logam diangkut sepanjang membran plasma. Berdasarkan pendekatan ligan biotik (gambar 4.10), merkuri dalam bentuk organik terakumulasi melalui proses difusi pasif, sedangkan anorganik merkuri HgCl_2 atau dalam bentuk garam merkuri

anorganik HgX_2 melalui dua proses yaitu transpor aktif dan difusi pasif.



Gambar 4.10 Proses bioakumulasi berbagai bentuk merkuri berdasarkan pendekatan model ligan biotik (Suseno dan Panggabean, 2007)

Interaksi pencemar merkuri yang terdiri atas garam $HgCl_2$ terlarut dan ion Hg^{2+} dengan gugus sulfida pada protein membran akan membentuk kompleks rantai merkuri disulfida $Hg(SR)_2$. Implikasi dari pengikatan Hg tersebut menyebabkan protein pada membran mengalami denaturasi, akibatnya kanal-kanal membran kehilangan sifat biologisnya.

Logam berat merkuri baik dalam senyawa organik maupun anorganik merupakan zat kimia pencemar yang berbahaya. Logam berat ini dapat menimbulkan efek kesehatan bagi manusia tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh. Menurut Aripin (2009), daya racun yang dimiliki akan bekerja sebagai penghalang enzim, sehingga proses metabolisme tubuh terputus dan lebih jauh lagi, logam ini akan bertindak sebagai penyebab alergi, mutagen, teratogen atau karsinogen bagi manusia.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Perubahan konsentrasi pencemar HgCl_2 mempengaruhi nilai potensial kulit katak *Rana catesbeiana* serta periode difusinya. Potensial awal pengukuran bernilai negatif (antara -5.95 sampai -26.43 mV pada *ventral* dan -6.83 sampai -30.10 mV pada *dorsal*), menunjukkan potensial bagian *serosal* lebih rendah dari potensial bagian *mucosal*. Nilai potensial tersebut terus meningkat sampai pada titik kesetimbangan $f=0$ mV dengan selang waktu yang berbeda. Pengukuran potensial listrik kulit katak secara *real-time* baik *ventral* maupun *dorsal* menunjukkan bahwa: periode untuk mencapai titik kesetimbangan semakin kecil seiring dengan peningkatan konsentrasi HgCl_2 atau dengan kata lain laju difusinya semakin besar. Hal ini menandakan bahwa transpor molekul dan ion tidak mematuhi prinsip kesetimbangan difusi.

Karakteristik perubahan potensial kulit katak dimungkinkan akibat proses bioakumulasi logam Hg yang menyebabkan denaturasi protein membran, sehingga membran transepitelial (kulit katak) kehilangan sifat biologisnya, baik sifat kekhususan (*specificity*) maupun tingkat kejenuhan (*saturation*) yang pada dasarnya menjembatani timbulnya penutupan kanal dan aksi penolakan terhadap ion-ion dengan polaritas tertentu. Anomali perubahan potensial kulit katak yang terjadi mengindikasikan bahwa kulit katak lembu *Rana catesbeiana* bisa dijadikan piranti pendeteksi adanya pencemar merkuri HgCl_2 terlarut.

5.2 Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut yang langsung menuju pada pemanfaatan kulit katak sebagai biosensor pencemaran air. Katak yang digunakan untuk penelitian sebaiknya masih dalam keadaan tidak tercemar, untuk itu bisa digunakan membran buatan yang serupa dengan kulit katak.

DAFTAR PUSTAKA

- Ackerman, E., Lynda, B.M., Lawrence, E.W. 1988. *Ilmu Biofisika*. Airlangga University Press. Surabaya.
- Anonymous. 2001. *Rana Catesbeiana*. <http://zipcodezoo.com/Animals/R/Ranacatesbeiana.asp>. Diakses tanggal 2 September 2007.
- Anonymous. 2009. *In Vitro Models of the Intestinal Barrier*.
<http://altweb.jhsph.edu/publications/ECVAM/ecvam46.htm>. Diakses tanggal 27 Juli 2009.
- Aripin. 2009. *Merkuri (Hg); Logam Cair Toksik Mematikan*.
<http://smk3ae.wordpress.com/2008/06/24/merkuri-hg-logam-cair-toksik-mematikan/>. Diakses tanggal 19 Juli 2009.
- Budiono, Ahmad. 2003. *Pengaruh Pencemaran Merkuri terhadap Biota Air*.
http://tumoutou.net/702_05123/a_budiono.pdf. Diakses tanggal 10 September 2007.
- Chiang, Mona. 2002. *Croak: what's killing these frogs? - Life/Earth science: water pollution/ecosystems*.
http://findarticles.com/p/articles/mim_1590/is159/ai_95845326. Diakses tanggal 1 September 2007.
- Dinata, Arda. 2004. *Berbahayakah Racun Merkuri?*.
<http://www.pikiran-rakyat.com/cetak/0704/23/0106.htm>. Diakses tanggal 10 September 2007.
- Fitriah. 2007. *Pengaruh Logam Berat terhadap Potensial Listrik Kulit Katak Lembu*. Fisika. Universitas Brawijaya. Malang.
- Giese, Arthur C. 1962. *Cell Physiologi. Edisi ke 2*. W.B Saunders Company. USA.
- Guyton, Arthur C. 1993. *Fisiologi Kedokteran*. Buku Kedokteran EGC. Jakarta.
- Hillyard, Stanley D., Horacio, F. C., and Willy Van Driessche. 1997. *K⁺ transport and capacitance of the basolateral membrane of the larval frog skin*.
<http://ajpcell.physiology.org/cgi/reprint/273/6/C1995.pdf>. Diakses tanggal 2 September 2007.
- Iriawati. 2009. *Struktur dan Fungsi Membran Sel*.
<http://www.sith.itb.ac.id/profile/pdf/iriawati/bahan->

kuliah/bahan-2/StrukturDanFungsiMembran_Sel-februari09.pdf. Diakses tanggal 8 Agustus 2009.

- Irwan, Syahputra. 2009. *Toksisitas dan Transformasi Merkuri*. http://www.chem-is-try.org/materi_kimia/kimia_anorganik1/khelasi-merkuri/toksisitas-dan-transformasi-merkuri/. Diakses tanggal 20 Juli 2009.
- Isnaeni, W. 2006. *Fisiologi Hewan*. Kanisius. Yogyakarta
- Kimball, John W. 1993. *Biologi. Edisi ke 5. Jilid 1*. Terjemahan. dari Biology, Fifth Edition. Penerjemah: Prof. DR. Ir. H. Siti Seotarmi T, dan Prof. DR. Nawangsari Sugiri. Erlangga. Jakarta.
- King, David. 2002. *Epithelium and Gland Frog Skin*. <http://www.siumed.edu/~dking2/intro/IN031b.htm>. Diakses tanggal 27 Juli 2009.
- Kompas (KCM). 2004. *Pencemaran Merkuri Dari Darat ke Laut*. <http://www.kompas.com/kompascetak/0412/02/bahari/1412383.htm>. Diakses tanggal 10 September 2007.
- Kusharto, Juswuno, Unggul P., dan Santoso, Didik R. 1999. *Pengukuran Perubahan Potensial Membran Sel Akar Jagunng Sebagai Indikator Tingkat Pencemaran Air*. Laporan Penelitian Dosen Muda. FMIPA Unibraw. Malang.
- Novianti, R. 2005. *Studi Tentang Pengaruh Deterjen Terhadap Potensial Listrik Kulit Katak Lembu (Rana catesbeiana)*. Fisika. Universitas Brawijaya. Malang.
- Fantika, N. 2007. *Studi Tentang Pengaruh Linier Alkilsulfonate (LAS) terhadap Potensial Listrik Kulit Katak Lembu*. Fisika. Universitas Brawijaya. Malang.
- Stryer, Lubert. 1981. *Biochemistry*. W.H. Freeman and Company. Newyork.
- Stiffler, Daniel, F. 1994. *Active Calcium Transport In The Skin Of The Frog Rana Pipiens: Kinetics And Seasonal Rhythms*. Biological Sciences Department, California State Polytechnic University. Pomona, USA.
- Subowo. 1989. *Biologi Sel*. Elstar Offset. Bandung
- Suripto. 1998. *Fisiologi Hewan*. Departemen Biologi. ITB. Bandung.

Suseno, Heny dan Panggabean, Sahat, M. 2009. *Merkuri: Spesiasi dan Bioakumulasi pada Biota Laut*. http://www.batan.go.id/ptlr/08id/files/u1/jurnal/01001/JL08_Heny_Suseno.pdf. Diakses tanggal 19 Juli 2009.

Wikipedia. 2007. *Bullfrog*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Bullfrog>. Diakses tanggal 2 September 2007.

Wikipedia. 2007. *Goldman Equation*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Goldman equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Goldman_equation). Diakses tanggal 30 Agustus 2007

Yatim, Wildan. 1992. *Biologi Sel*. Tarsito. Bandung

Lampiran 1 Pendekatan Nilai Potensial Listrik Kulit Katak Rata-Rata

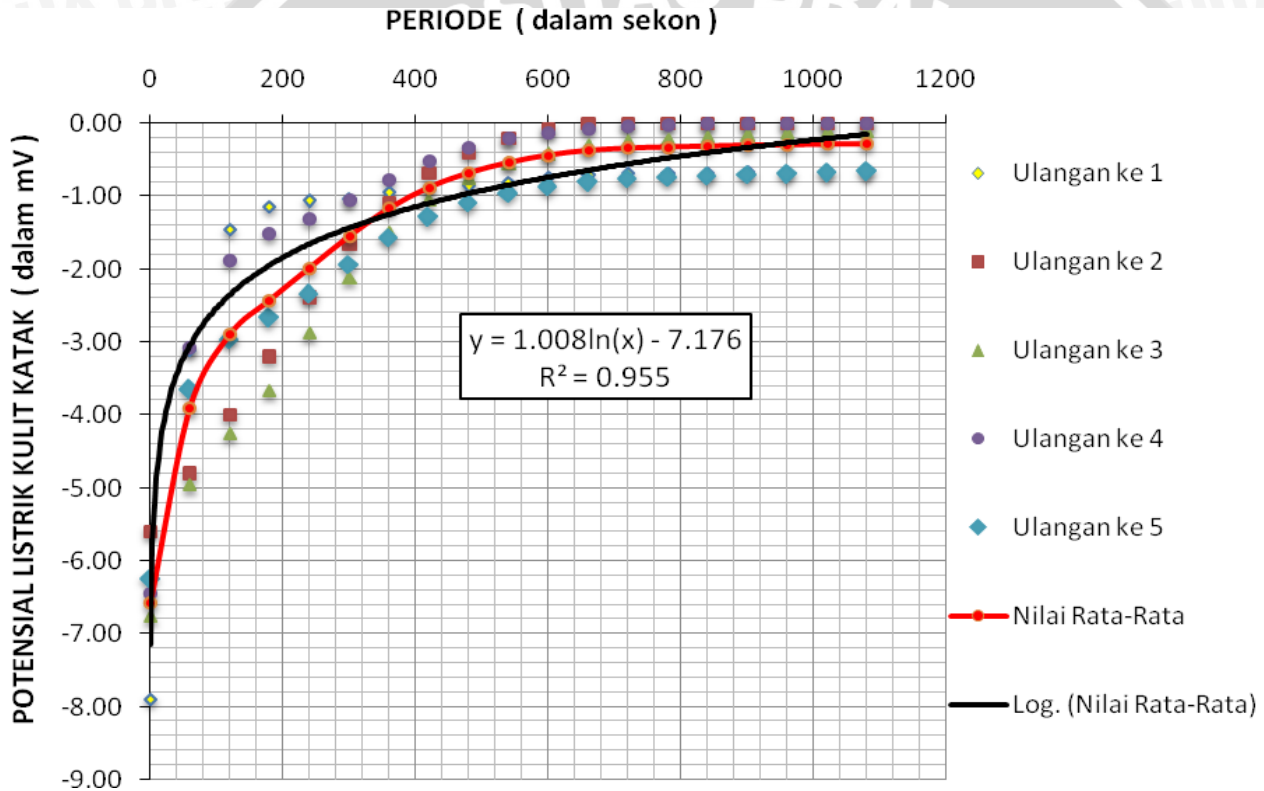
1.1 Pendekatan nilai potensial listrik kulit katak *dorsal* dan periode potensialnya

a. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 0.001 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-7.89	-5.59	-6.75	-6.44	-6.24	-6.58	1.51
60	-3.10	-4.79	-4.95	-3.08	-3.64	-3.91	1.62
120	-1.45	-3.99	-4.25	-1.87	-2.96	-2.90	2.22
180	-1.13	-3.19	-3.66	-1.51	-2.66	-2.43	1.93
240	-1.05	-2.38	-2.87	-1.31	-2.33	-1.99	1.38
300	-1.02	-1.65	-2.11	-1.05	-1.93	-1.55	0.89
360	-0.94	-1.09	-1.49	-0.77	-1.57	-1.17	0.62
420	-0.89	-0.68	-1.04	-0.52	-1.28	-0.88	0.53
480	-0.85	-0.39	-0.74	-0.34	-1.09	-0.68	0.57
540	-0.80	-0.20	-0.54	-0.21	-0.95	-0.54	0.61
600	-0.73	-0.07	-0.41	-0.12	-0.86	-0.44	0.63
660	-0.70	0.00	-0.30	-0.07	-0.80	-0.37	0.65
720	-0.68	0.00	-0.24	-0.03	-0.76	-0.34	0.64
780	-0.68	0.00	-0.22	-0.01	-0.73	-0.33	0.64
840	-0.67	0.00	-0.18	0.00	-0.72	-0.31	0.64
900	-0.66	0.00	-0.15	0.00	-0.70	-0.30	0.63
960	-0.66	0.00	-0.13	0.00	-0.69	-0.30	0.63
1020	-0.66	0.00	-0.11	0.00	-0.67	-0.29	0.62
1080	-0.66	0.00	-0.11	0.00	-0.65	-0.28	0.61

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	$d_{\check{T}}$
	I	II	III	IV	V		
	960	644	1020	802	1079	901	316

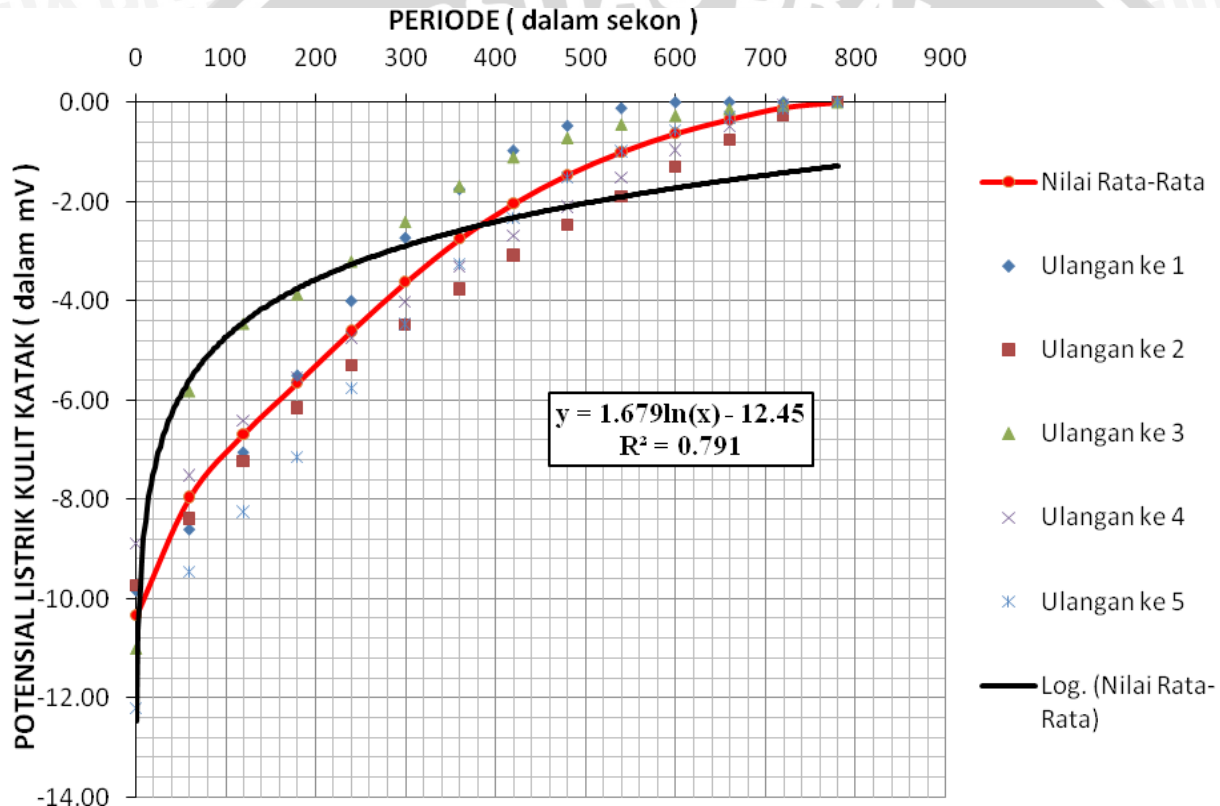


- b. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 0.005 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					$\phi(\text{mV})$	$d\phi$
	I	II	III	IV	V		
1	-9.83	-9.73	-11.00	-8.88	-12.20	-10.33	2.31
60	-8.60	-8.39	-5.82	-7.51	-9.46	-7.96	2.47
120	-7.05	-7.23	-4.46	-6.41	-8.25	-6.68	2.51
180	-5.50	-6.16	-3.87	-5.54	-7.14	-5.64	2.13
240	-4.00	-5.30	-3.21	-4.74	-5.76	-4.60	1.82
300	-2.73	-4.49	-2.41	-4.01	-4.47	-3.62	1.76
360	-1.75	-3.76	-1.69	-3.31	-3.25	-2.75	1.72
420	-0.98	-3.08	-1.11	-2.69	-2.33	-2.04	1.69
480	-0.48	-2.48	-0.72	-2.10	-1.51	-1.46	1.54
540	-0.12	-1.90	-0.45	-1.51	-0.99	-0.99	1.31
600	0.00	-1.31	-0.27	-0.96	-0.57	-0.62	0.94
660	0.00	-0.76	-0.14	-0.48	-0.31	-0.34	0.53
720	0.00	-0.27	-0.06	-0.06	-0.12	-0.10	0.18
780	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\bar{t}	$d_{\bar{t}}$
	I	II	III	IV	V		
	566	756	782	736	770	722	159



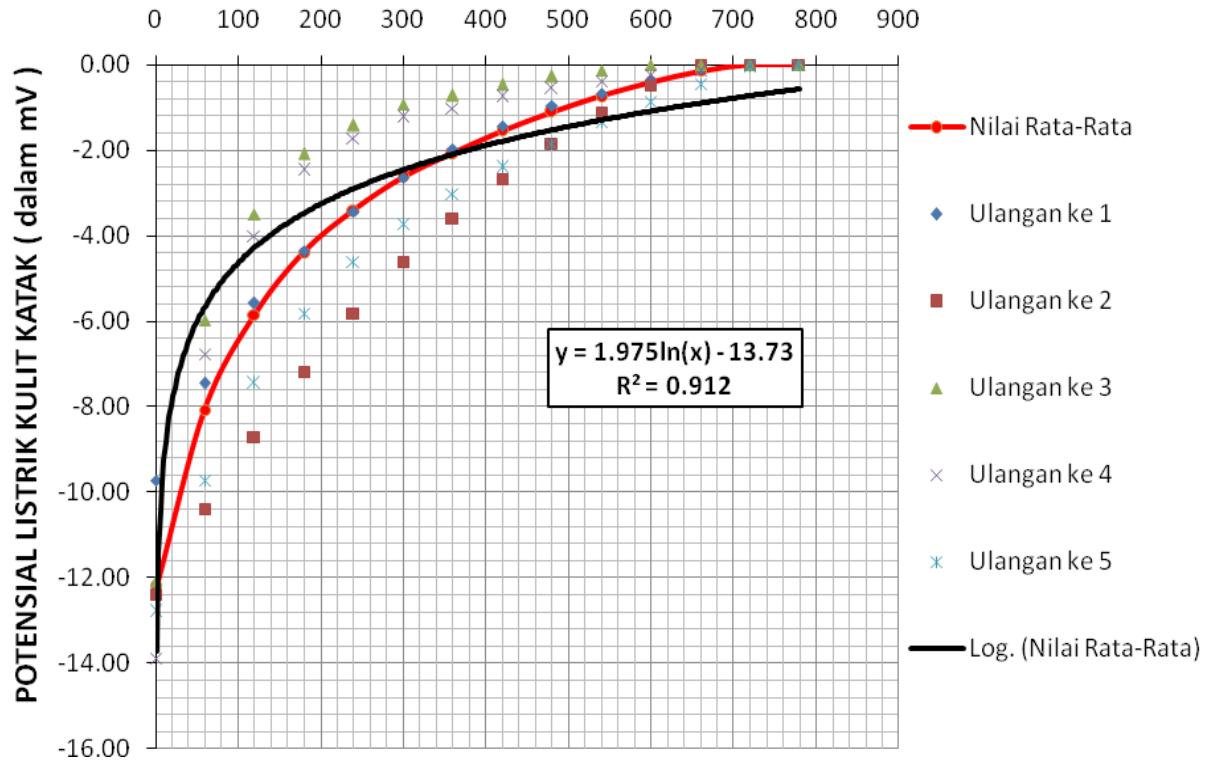
- c. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 0.01 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	$d\phi$
	I	II	III	IV	V		
1	-9.73	-12.40	-12.10	-13.90	-12.80	-12.19	2.74
60	-7.46	-10.40	-5.98	-6.77	-9.74	-8.07	3.42
120	-5.58	-8.72	-3.51	-4.02	-7.46	-5.86	3.97
180	-4.37	-7.18	-2.09	-2.47	-5.83	-4.39	3.88
240	-3.45	-5.82	-1.42	-1.73	-4.61	-3.41	3.35
300	-2.64	-4.62	-0.93	-1.23	-3.73	-2.63	2.83
360	-1.98	-3.59	-0.72	-1.02	-3.03	-2.07	2.22
420	-1.43	-2.67	-0.47	-0.75	-2.41	-1.55	1.75
480	-0.97	-1.85	-0.28	-0.56	-1.86	-1.10	1.30
540	-0.67	-1.13	-0.13	-0.39	-1.34	-0.73	0.90
600	-0.35	-0.49	-0.01	-0.28	-0.86	-0.40	0.56
660	-0.11	0.00	0.00	-0.15	-0.46	-0.14	0.34
720	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.06	-0.01	0.05
780	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\checkmark	d_{\checkmark}
	I	II	III	IV	V		
	685	654	608	713	730	678	87

PERIODE (dalam sekond)

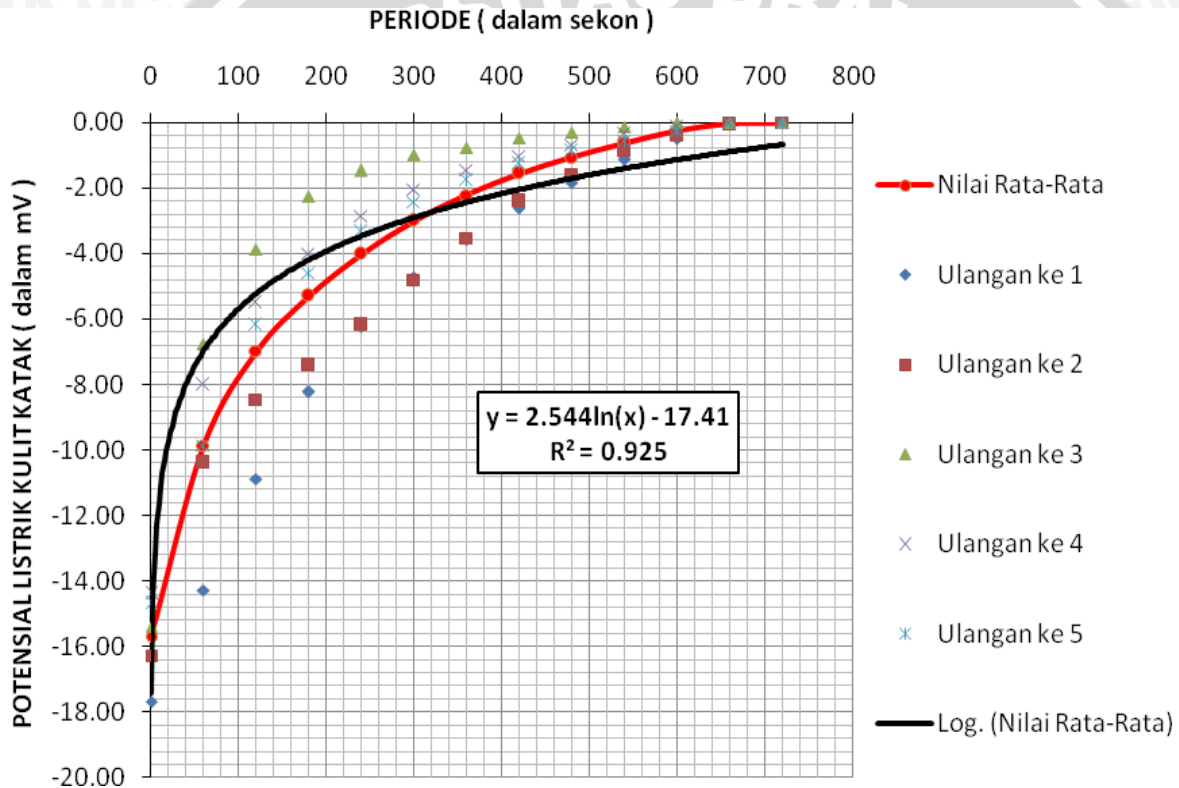


- d. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 0.05 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	$d\phi$
	I	II	III	IV	V		
1	-17.70	-16.30	-15.40	-14.40	-14.70	-15.70	2.39
60	-14.30	-10.40	-6.76	-8.02	-9.88	-9.87	5.14
120	-10.90	-8.47	-3.88	-5.51	-6.19	-6.99	4.90
180	-8.23	-7.43	-2.26	-3.99	-4.60	-5.30	4.43
240	-6.24	-6.19	-1.47	-2.86	-3.34	-4.02	3.79
300	-4.72	-4.80	-0.98	-2.05	-2.44	-3.00	3.03
360	-3.57	-3.54	-0.76	-1.46	-1.77	-2.22	2.28
420	-2.62	-2.41	-0.48	-1.03	-1.26	-1.56	1.65
480	-1.82	-1.59	-0.30	-0.68	-0.87	-1.05	1.14
540	-1.13	-0.86	-0.13	-0.37	-0.56	-0.61	0.71
600	-0.49	-0.40	-0.01	-0.10	-0.27	-0.25	0.36
660	0.00	-0.07	0.00	0.00	-0.01	-0.02	0.05
720	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\bar{t}	$d_{\bar{t}}$
	I	II	III	IV	V		
	651	676	604	621	665	643	54

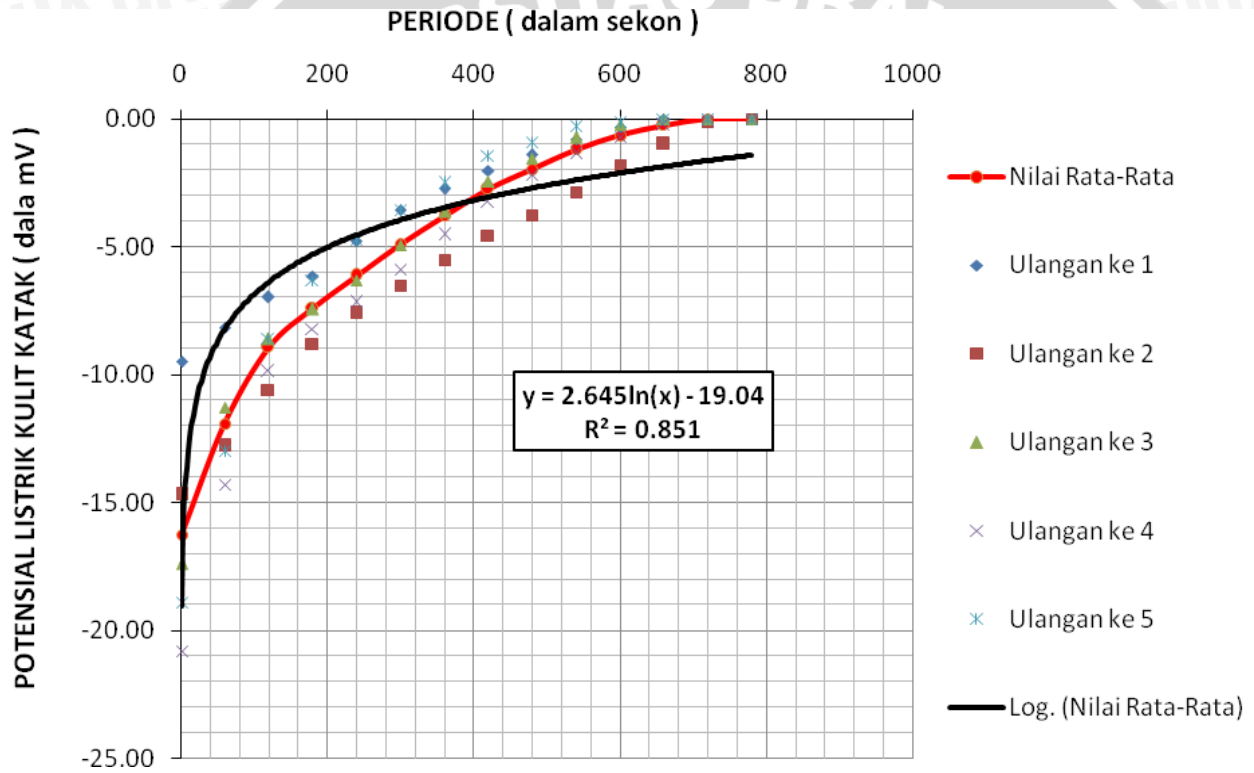


- e. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 0.1 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	$d\phi$
	I	II	III	IV	V		
1	-9.50	-14.70	-17.40	-20.80	-18.90	-16.26	7.85
60	-8.18	-12.80	-11.30	-14.30	-13.00	-11.92	4.19
120	-6.98	-10.60	-8.62	-9.88	-8.60	-8.94	2.48
180	-6.14	-8.81	-7.45	-8.22	-6.30	-7.38	2.09
240	-4.78	-7.61	-6.32	-7.18	-4.74	-6.13	2.38
300	-3.58	-6.51	-4.93	-5.90	-3.56	-4.90	2.39
360	-2.74	-5.51	-3.64	-4.55	-2.54	-3.80	2.23
420	-2.02	-4.57	-2.44	-3.28	-1.44	-2.75	2.18
480	-1.42	-3.77	-1.55	-2.20	-0.92	-1.97	1.97
540	-0.81	-2.87	-0.74	-1.37	-0.28	-1.21	1.79
600	-0.33	-1.89	-0.23	-0.70	-0.12	-0.65	1.30
660	0.00	-1.00	0.00	-0.26	0.00	-0.25	0.77
720	0.00	-0.13	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.10
780	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\bar{t}	$d_{\bar{t}}$
	I	II	III	IV	V		
	639	728	629	707	643	669	81

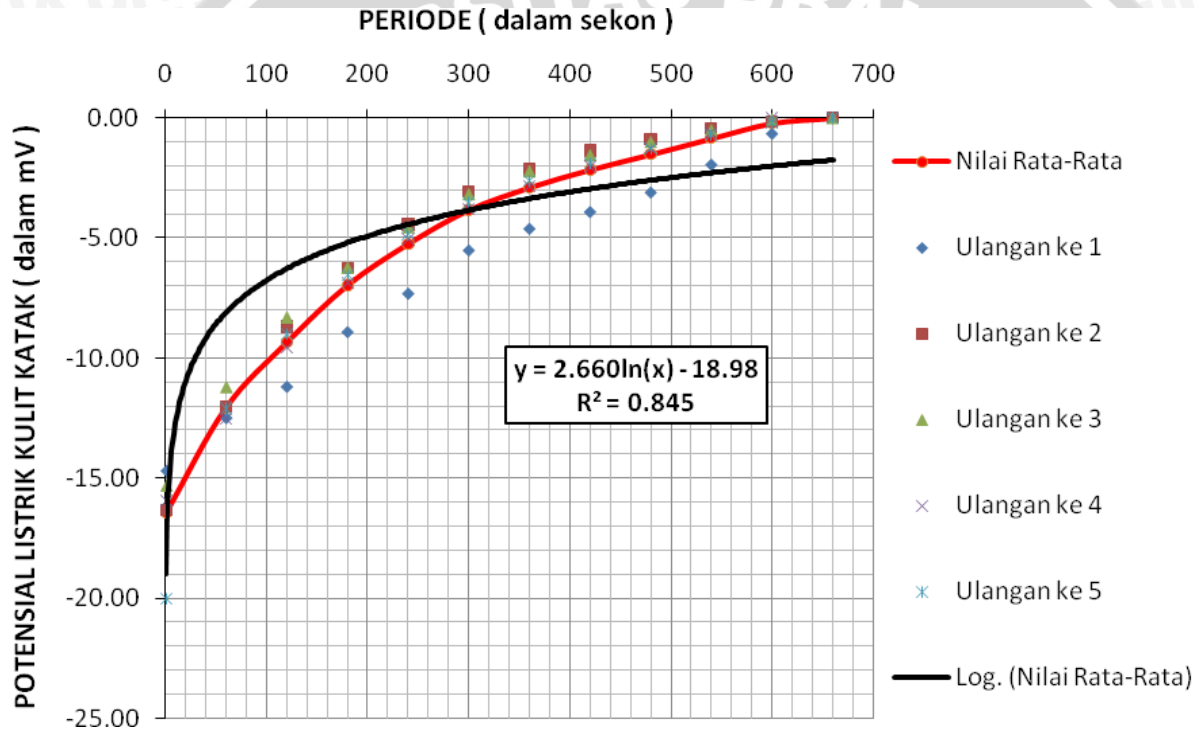


- f. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 0.5 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-14.70	-16.30	-15.30	-15.90	-20.00	-16.44	3.72
60	-12.50	-12.00	-11.20	-12.50	-12.10	-12.06	0.95
120	-11.20	-8.68	-8.30	-9.56	-8.98	-9.34	2.03
180	-8.92	-6.24	-6.24	-6.86	-6.54	-6.96	2.01
240	-7.32	-4.44	-4.55	-5.04	-4.83	-5.24	2.13
300	-5.52	-3.08	-3.18	-3.80	-3.54	-3.82	1.77
360	-4.62	-2.14	-2.22	-2.83	-2.63	-2.89	1.81
420	-3.92	-1.36	-1.55	-2.02	-1.90	-2.15	1.83
480	-3.11	-0.88	-1.00	-1.29	-1.28	-1.51	1.63
540	-1.95	-0.44	-0.51	-0.62	-0.72	-0.85	1.12
600	-0.66	-0.16	-0.06	-0.02	-0.18	-0.22	0.46
660	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	$d_{\check{T}}$
	I	II	III	IV	V		
	629	635	611	602	623	620	24

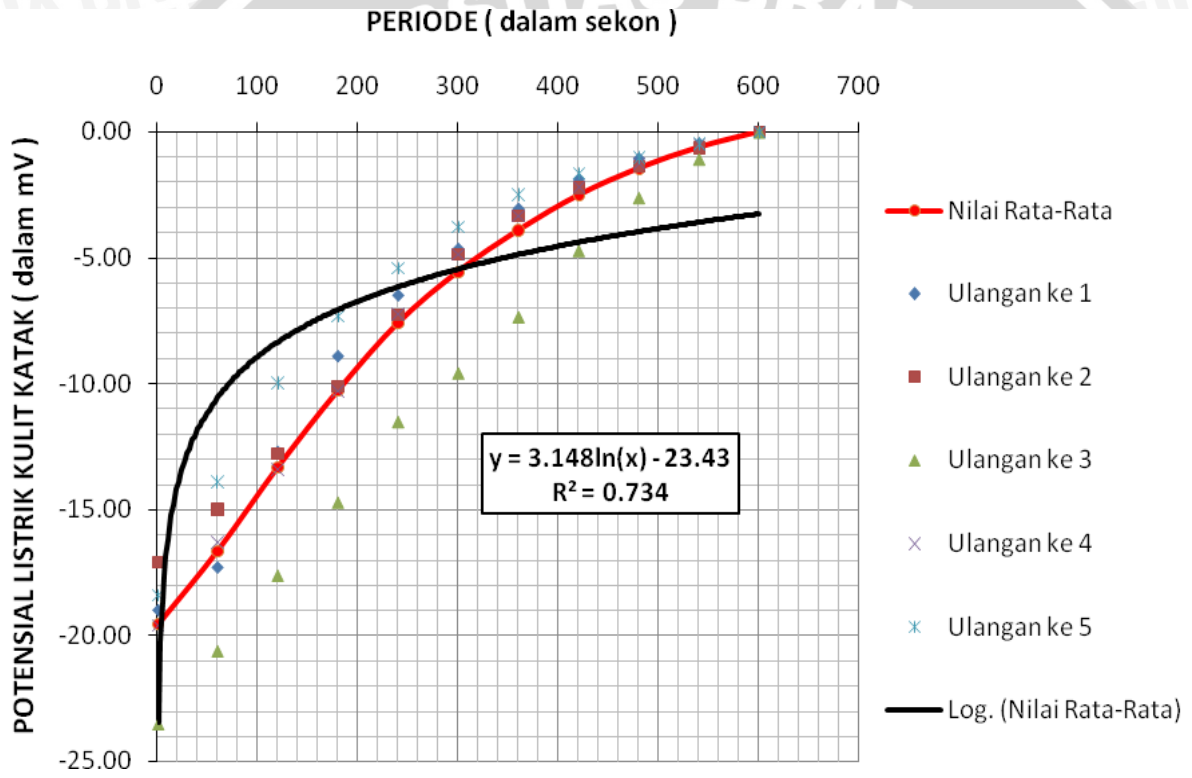


- g. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 1 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-19.00	-17.10	-23.50	-19.60	-18.40	-19.52	4.31
60	-17.30	-15.00	-20.60	-16.30	-13.90	-16.62	4.60
120	-12.70	-12.80	-17.60	-13.40	-9.97	-13.29	4.92
180	-8.90	-10.10	-14.70	-10.30	-7.32	-10.26	4.92
240	-6.48	-7.27	-11.50	-7.23	-5.39	-7.57	4.16
300	-4.63	-4.86	-9.57	-4.87	-3.77	-5.54	4.11
360	-3.04	-3.33	-7.34	-3.32	-2.47	-3.90	3.50
420	-1.86	-2.21	-4.71	-2.17	-1.62	-2.51	2.24
480	-1.04	-1.34	-2.61	-1.23	-1.00	-1.44	1.19
540	-0.44	-0.62	-1.08	-0.47	-0.46	-0.61	0.48
600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\checkmark	d_{\checkmark}
	I	II	III	IV	V		
	591	597	593	579	596	591	13

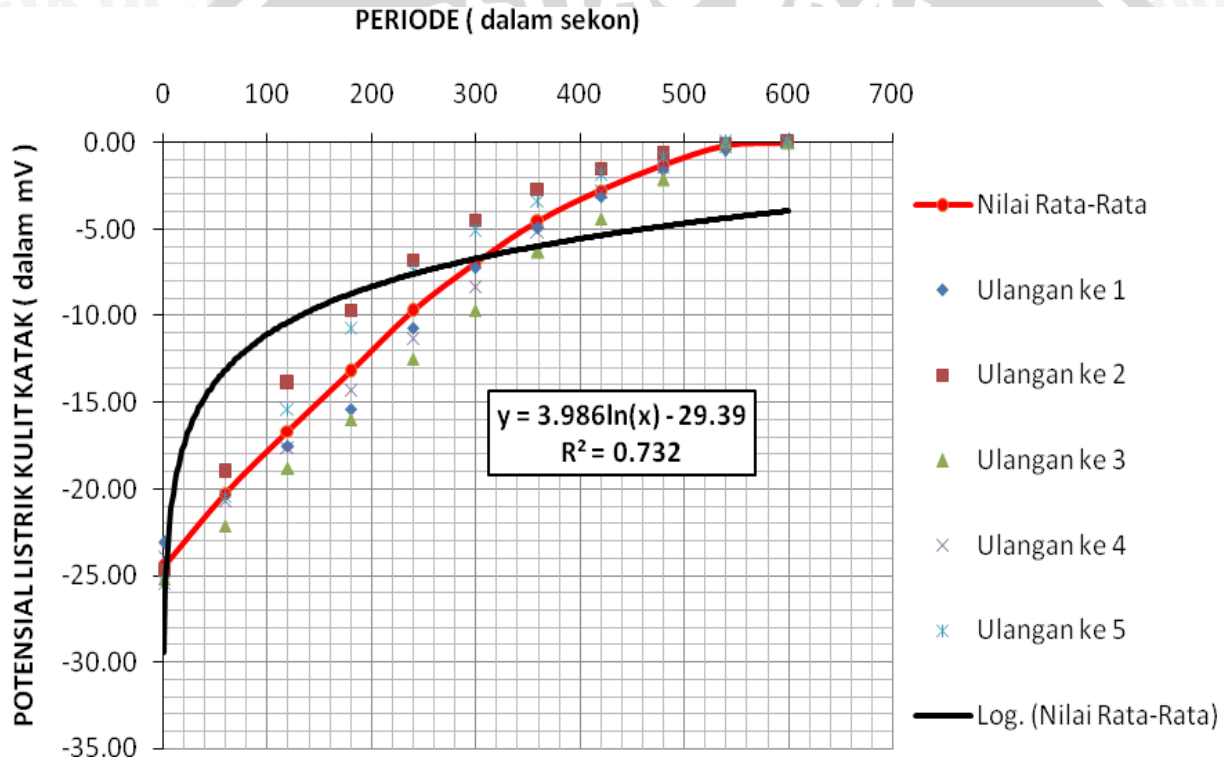


- h. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 5 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-23.10	-24.70	-25.20	-23.90	-25.50	-24.48	1.75
60	-19.00	-19.00	-22.10	-20.70	-20.40	-20.24	2.33
120	-17.50	-13.90	-18.80	-17.60	-15.40	-16.64	3.51
180	-15.40	-9.66	-16.00	-14.30	-10.70	-13.21	5.11
240	-10.70	-6.77	-12.50	-11.30	-7.34	-9.72	4.52
300	-7.21	-4.46	-9.65	-8.32	-5.11	-6.95	3.88
360	-4.88	-2.70	-6.29	-5.19	-3.34	-4.48	2.59
420	-3.12	-1.49	-4.40	-2.89	-1.86	-2.75	2.05
480	-1.58	-0.66	-2.12	-1.39	-0.77	-1.30	1.08
540	-0.42	-0.02	0.00	-0.25	0.00	-0.14	0.34
600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\checkmark	d_{\checkmark}
	I	II	III	IV	V		
	570	543	587	556	540	559	35

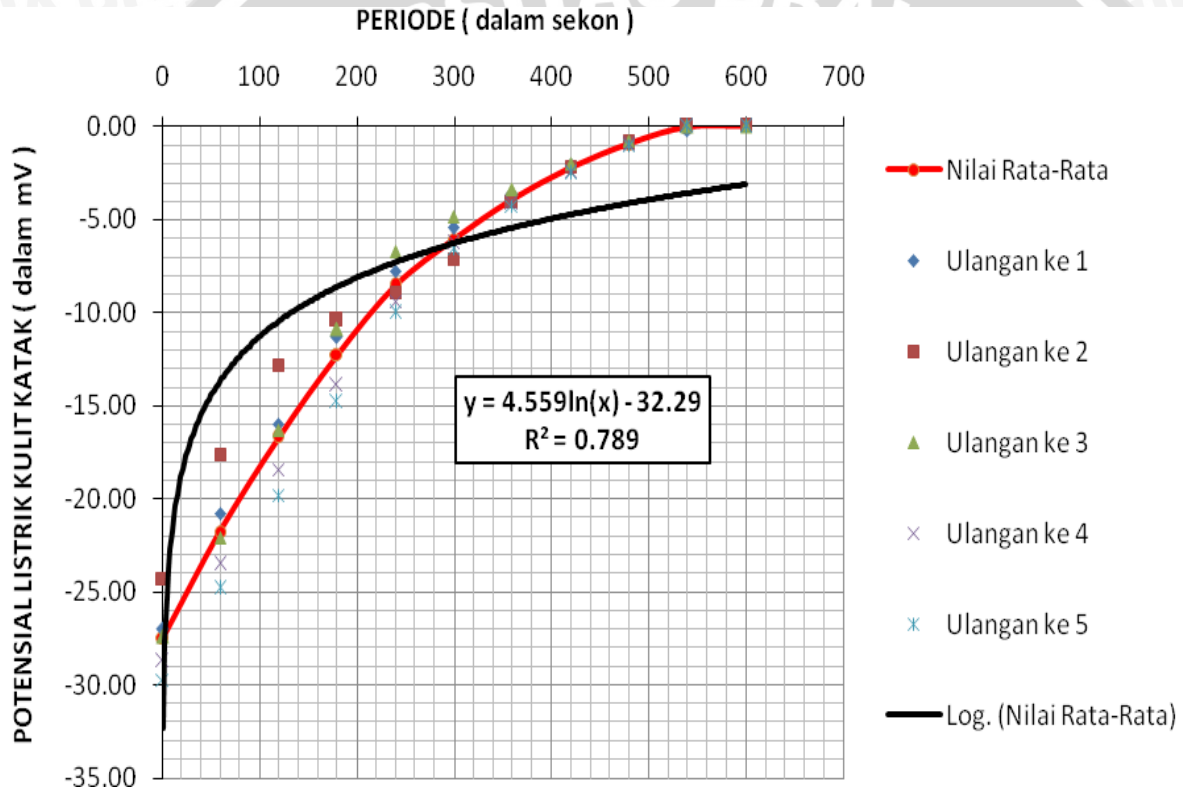


- i. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 10 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-27.00	-24.30	-27.40	-28.70	-29.70	-27.42	3.66
60	-20.80	-17.60	-22.10	-23.50	-24.80	-21.76	4.95
120	-16.00	-12.80	-16.30	-18.40	-19.80	-16.66	4.76
180	-11.30	-10.40	-10.90	-13.90	-14.80	-12.26	3.51
240	-7.77	-8.88	-6.69	-9.37	-10.00	-8.54	2.36
300	-5.44	-7.09	-4.81	-6.26	-6.59	-6.04	1.63
360	-3.64	-4.04	-3.37	-4.15	-4.29	-3.90	0.68
420	-2.10	-2.14	-1.98	-2.41	-2.52	-2.23	0.40
480	-0.95	-0.88	-0.75	-0.97	-0.99	-0.91	0.17
540	-0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.14
600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke-					\check{T}	d_T
	I	II	III	IV	V		
	557	533	521	536	534	536	23



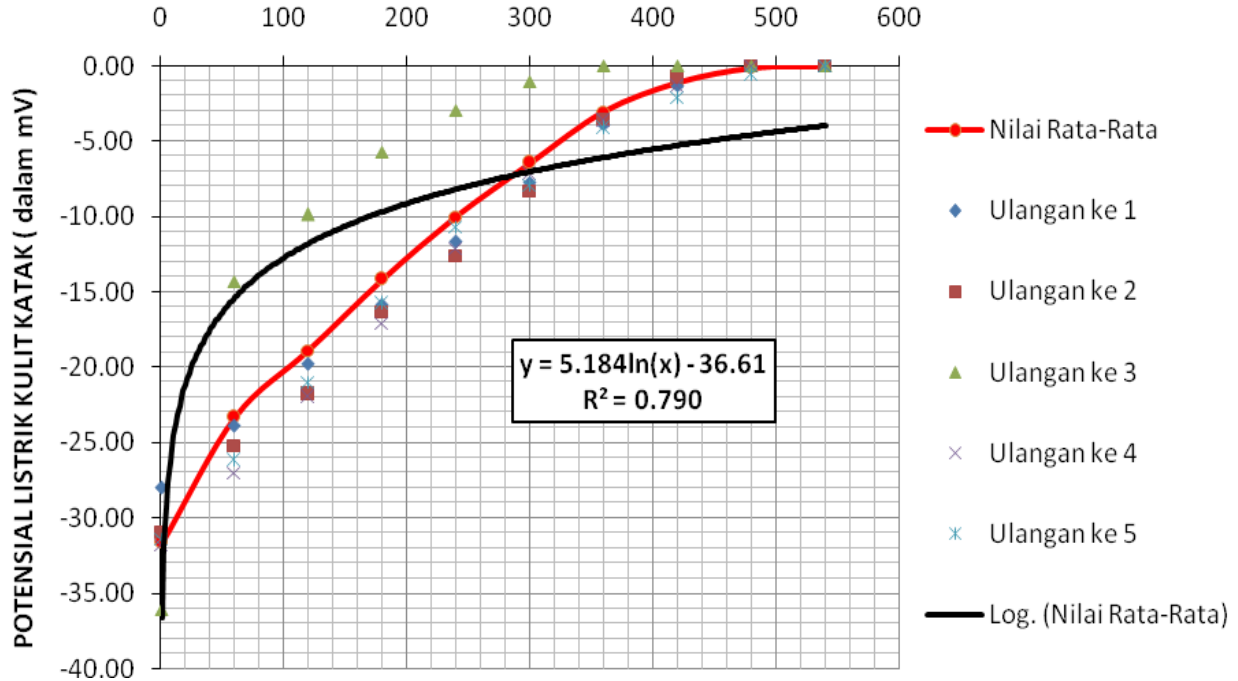
- j. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 100 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-28.00	-30.90	-36.10	-31.80	-31.40	-31.64	5.20
60	-23.90	-25.20	-14.30	-27.00	-26.20	-23.32	9.25
120	-19.80	-21.80	-9.87	-22.00	-21.00	-18.89	9.16
180	-15.90	-16.30	-5.70	-17.10	-15.80	-14.16	8.51
240	-11.70	-12.60	-2.96	-12.10	-10.70	-10.01	7.16
300	-7.70	-8.28	-1.02	-7.19	-7.91	-6.42	5.45
360	-3.88	-3.55	0.00	-3.68	-4.14	-3.05	3.08
420	-1.32	-0.80	0.00	-1.37	-2.07	-1.11	1.37
480	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.61	-0.12	0.49
540	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke-					\check{T}	d_T
	I	II	III	IV	V		
	457	446	336	465	506	442	113

PERIODE (dalam sekon)



1.2 Pendekatan Nilai Potensial Listrik Kulit Katak *Ventral* dan Periode Potensialnya

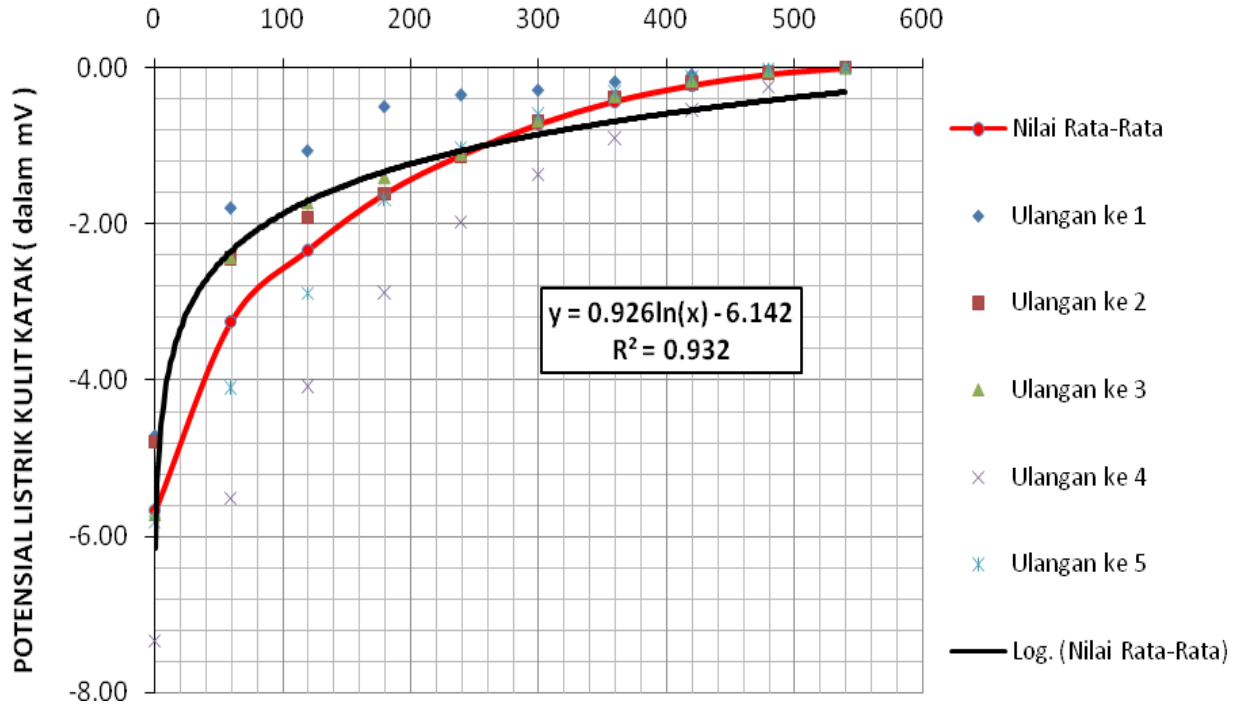
- a. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 0.001 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-4.70	-4.78	-5.71	-7.34	-5.82	-5.67	1.91
60	-1.79	-2.44	-2.42	-5.52	-4.10	-3.25	2.74
120	-1.06	-1.92	-1.72	-4.08	-2.89	-2.33	2.10
180	-0.50	-1.61	-1.40	-2.88	-1.68	-1.61	1.52
240	-0.35	-1.13	-1.10	-1.97	-1.03	-1.12	1.03
300	-0.29	-0.68	-0.68	-1.37	-0.60	-0.72	0.71
360	-0.18	-0.38	-0.36	-0.90	-0.31	-0.43	0.49
420	-0.09	-0.20	-0.16	-0.54	-0.12	-0.22	0.33
480	-0.03	-0.06	-0.04	-0.24	-0.02	-0.08	0.16
540	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	d_T
	I	II	III	IV	V		
	517	543	507	554	504	525	40

PERIODE (dalam sekon)

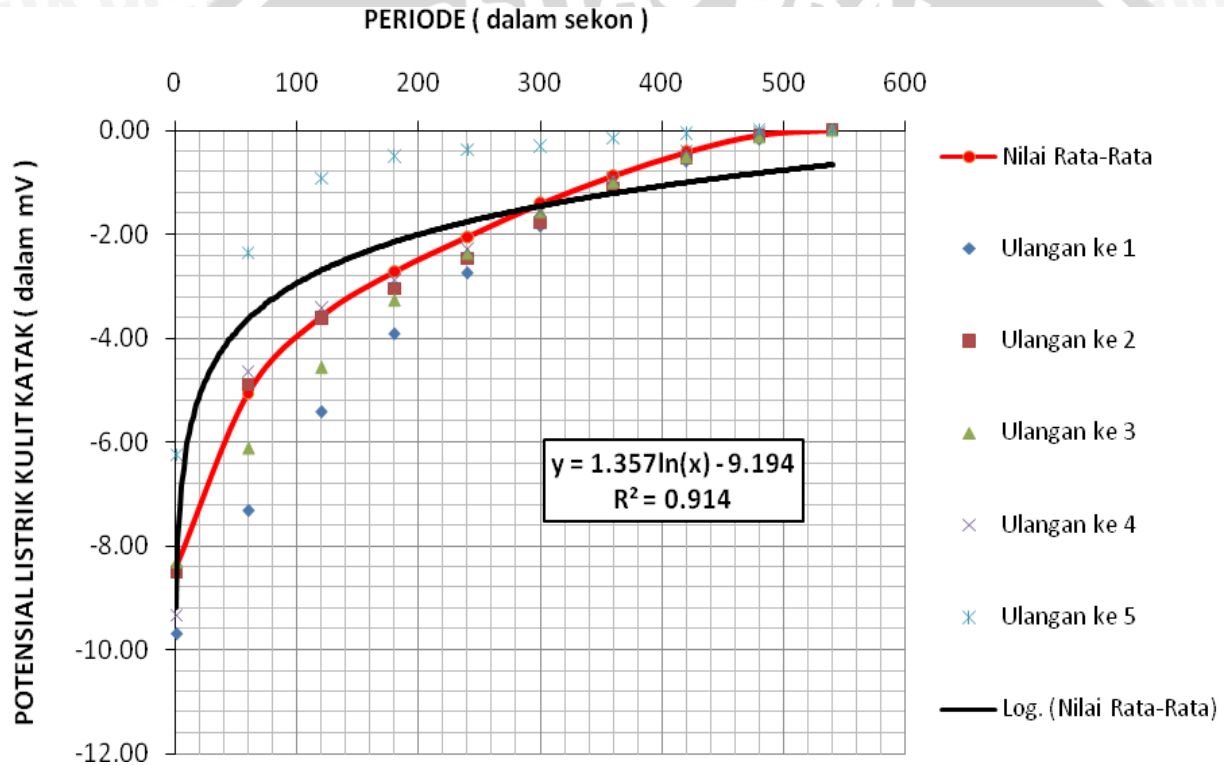


- b. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *dorsal* pada konsentrasi HgCl_2 0.005 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-9.69	-8.50	-8.30	-9.32	-6.25	-8.41	2.39
60	-7.32	-4.89	-6.11	-4.64	-2.37	-5.07	3.30
120	-5.42	-3.62	-4.56	-3.42	-0.93	-3.59	3.02
180	-3.92	-3.05	-3.27	-2.89	-0.51	-2.73	2.33
240	-2.75	-2.48	-2.37	-2.29	-0.38	-2.05	1.70
300	-1.85	-1.78	-1.57	-1.57	-0.31	-1.42	1.13
360	-1.15	-1.14	-1.00	-0.93	-0.16	-0.88	0.74
420	-0.60	-0.54	-0.52	-0.40	-0.06	-0.42	0.39
480	-0.18	-0.10	-0.13	-0.05	0.00	-0.09	0.12
540	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\bar{t}	$d_{\bar{t}}$
	I	II	III	IV	V		
	511	495	506	491	480	497	22

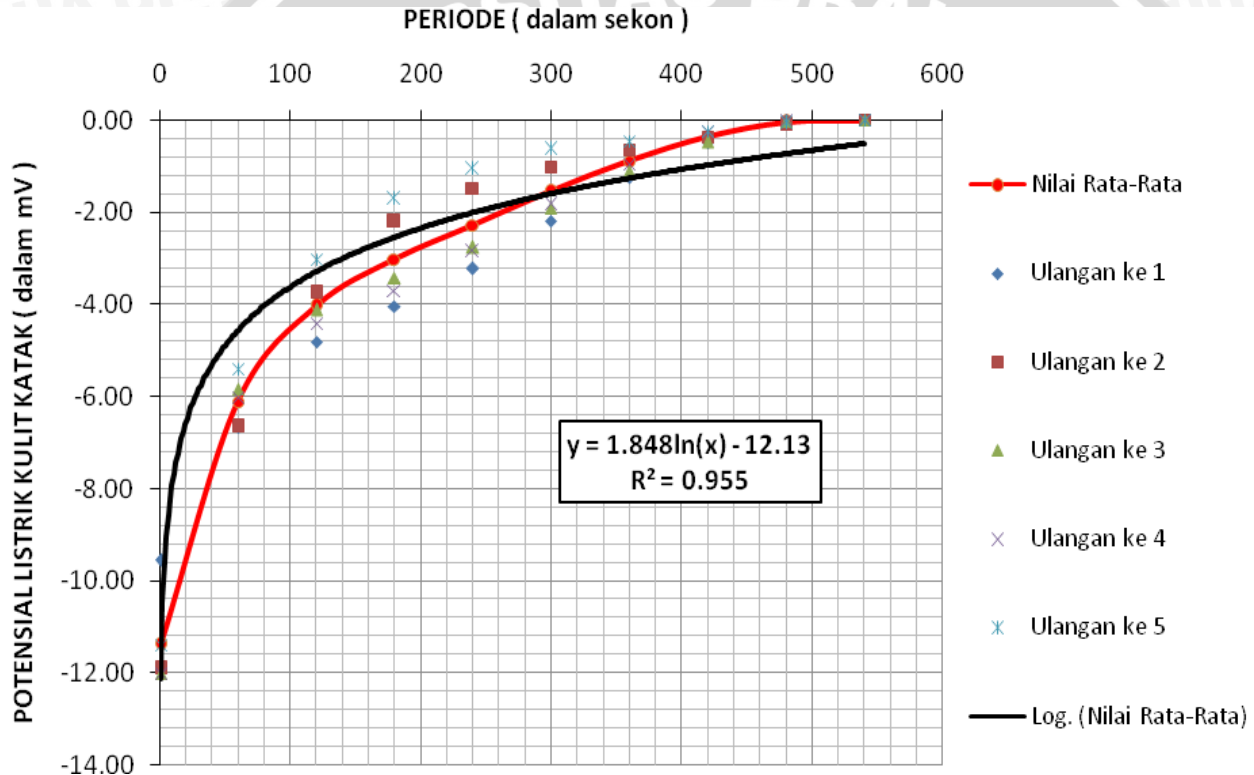


- c. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 0.01 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-9.55	-11.90	-12.00	-12.00	-11.40	-11.37	1.87
60	-6.66	-6.65	-5.83	-6.02	-5.40	-6.11	0.97
120	-4.82	-3.75	-4.12	-4.41	-3.02	-4.02	1.22
180	-4.04	-2.20	-3.43	-3.69	-1.71	-3.01	1.80
240	-3.22	-1.48	-2.76	-2.85	-1.06	-2.27	1.69
300	-2.18	-1.01	-1.91	-1.83	-0.63	-1.51	1.18
360	-1.24	-0.64	-1.11	-0.94	-0.46	-0.88	0.58
420	-0.49	-0.37	-0.47	-0.24	-0.23	-0.36	0.22
480	0.00	-0.10	-0.02	0.00	-0.07	-0.04	0.08
540	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	d_T
	I	II	III	IV	V		
	477	501	483	448	511	484	43



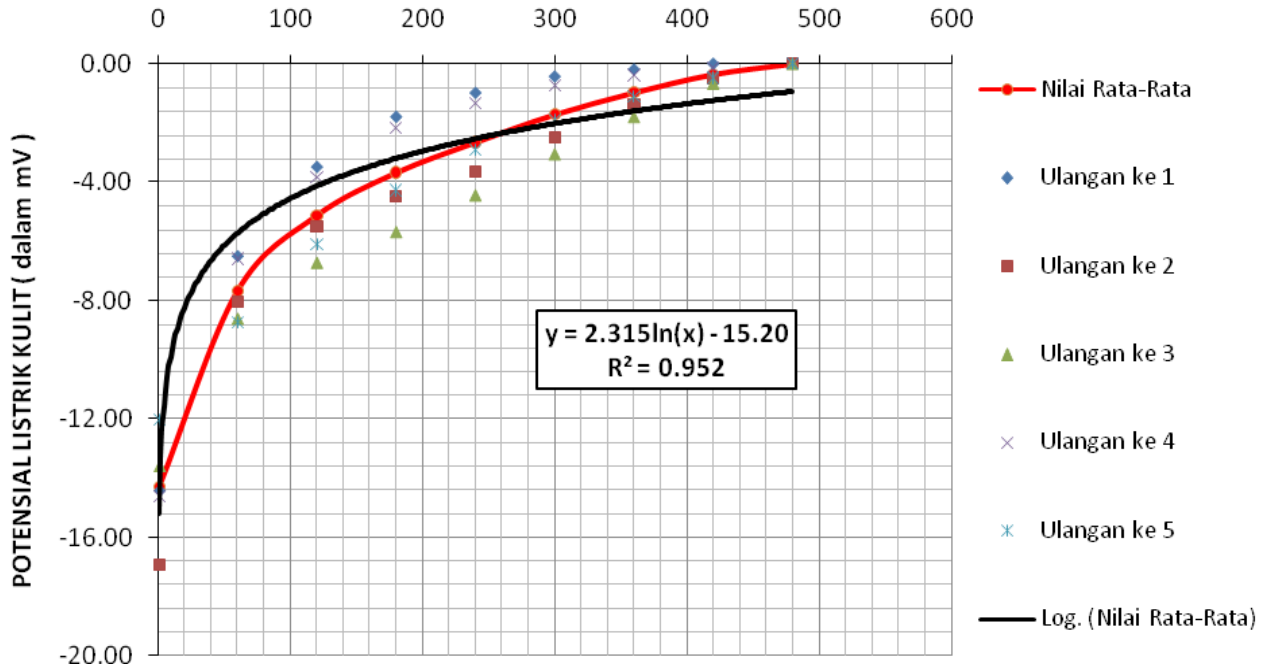
- d. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 0.05 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-14.40	-16.90	-13.60	-14.60	-12.00	-14.30	3.18
60	-6.49	-8.02	-8.62	-6.58	-8.74	-7.69	1.95
120	-3.48	-5.48	-6.73	-3.84	-6.10	-5.13	2.53
180	-1.79	-4.49	-5.69	-2.17	-4.27	-3.68	2.95
240	-0.98	-3.63	-4.45	-1.32	-2.89	-2.65	2.66
300	-0.43	-2.48	-3.06	-0.72	-1.89	-1.72	2.01
360	-0.19	-1.39	-1.80	-0.39	-1.11	-0.98	1.21
420	0.00	-0.50	-0.67	-0.13	-0.48	-0.36	0.50
480	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\bar{t}	$d_{\bar{t}}$
	I	II	III	IV	V		
	397	467	471	452	469	451	56

PERIODE (dalam sekon)

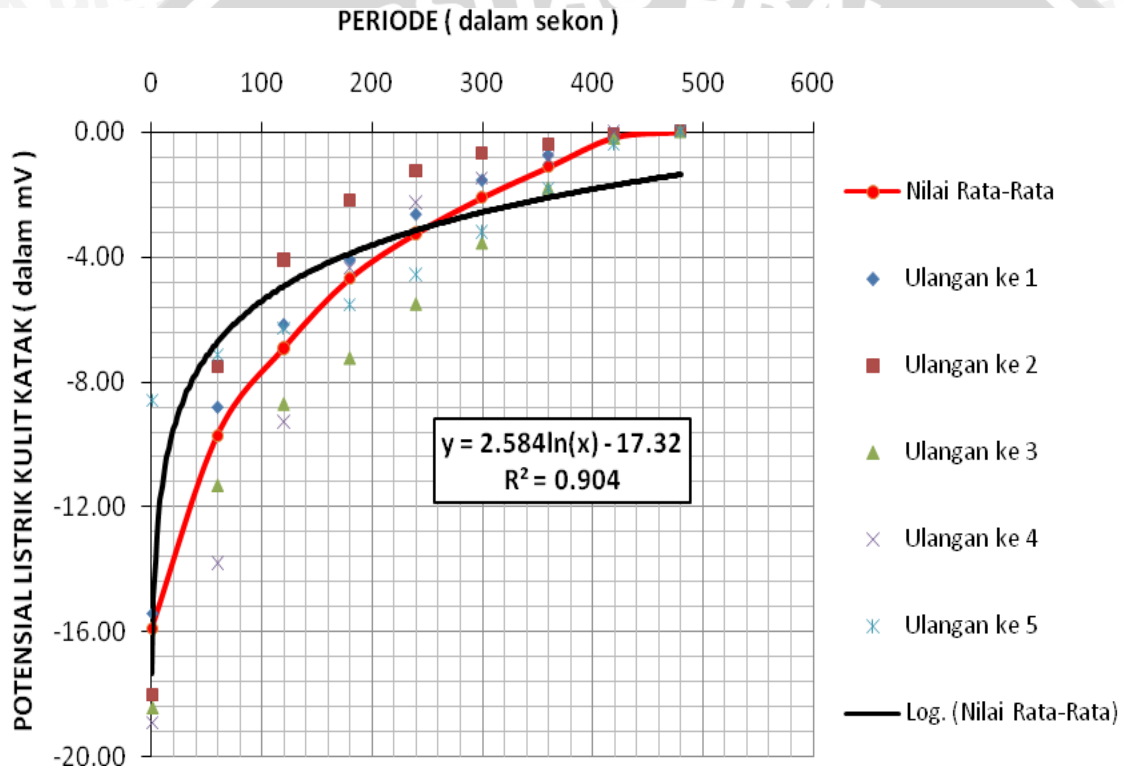


- e. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 0.1 ppm

Periode (sekond)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-15.40	-18.00	-18.40	-18.90	-8.58	-15.86	7.67
60	-8.81	-7.53	-11.30	-13.80	-7.14	-9.72	5.01
120	-6.17	-4.11	-8.70	-9.29	-6.30	-6.91	3.76
180	-4.10	-2.20	-7.24	-4.37	-5.55	-4.69	3.33
240	-2.65	-1.27	-5.51	-2.27	-4.57	-3.25	3.11
300	-1.56	-0.69	-3.56	-1.49	-3.21	-2.10	2.19
360	-0.76	-0.41	-1.80	-0.86	-1.81	-1.13	1.15
420	-0.13	-0.09	-0.21	-0.02	-0.41	-0.17	0.27
480	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekond)	Perlakuan ke					\check{T}	$d_{\check{T}}$
	I	II	III	IV	V		
	435	441	430	421	441	434	15



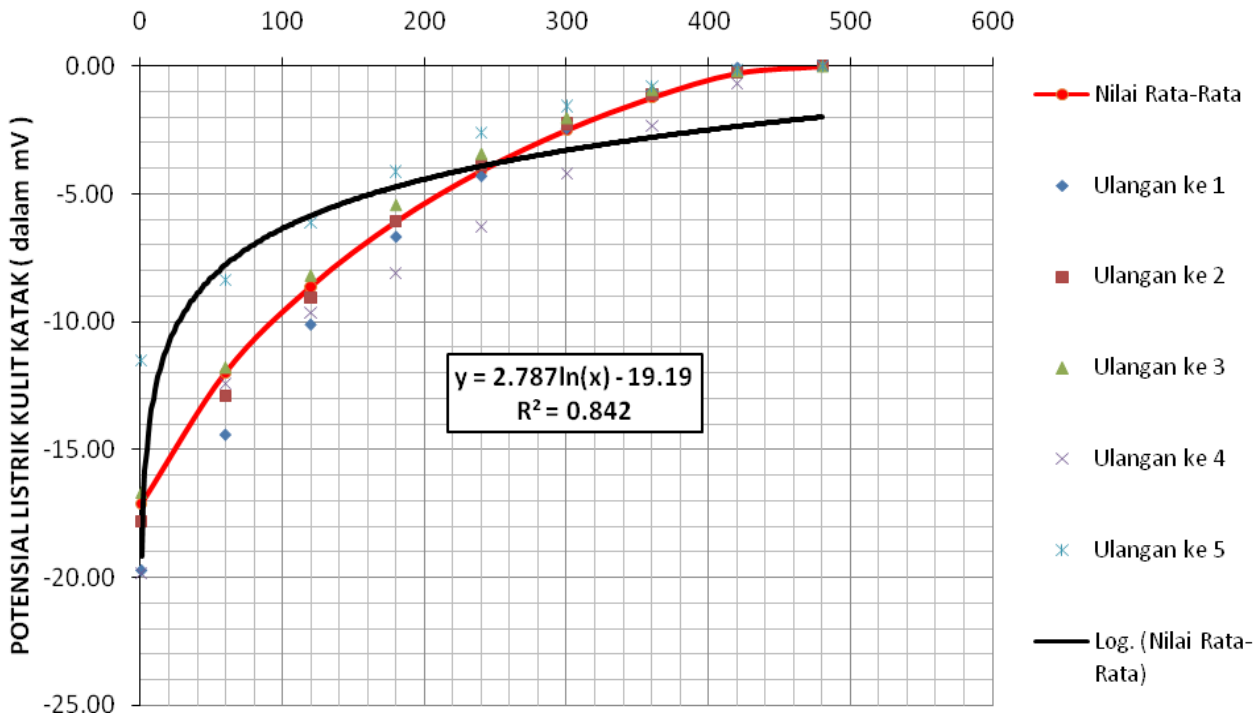
- f. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 0.5 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-19.70	-17.80	-16.70	-19.80	-11.50	-17.10	6.07
60	-14.40	-12.90	-11.80	-12.40	-8.37	-11.97	3.99
120	-10.10	-9.05	-8.20	-9.64	-6.11	-8.62	2.81
180	-6.67	-6.07	-5.44	-8.10	-4.12	-6.08	2.64
240	-4.30	-3.87	-3.44	-6.26	-2.60	-4.09	2.44
300	-2.44	-2.26	-2.03	-4.20	-1.57	-2.50	1.80
360	-1.00	-1.10	-0.92	-2.34	-0.80	-1.23	1.13
420	-0.07	-0.27	-0.20	-0.67	-0.16	-0.27	0.42
480	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	$d_{\check{T}}$
	I	II	III	IV	V		
	426	446	436	449	436	439	16

PERIODE (dalam sekon)

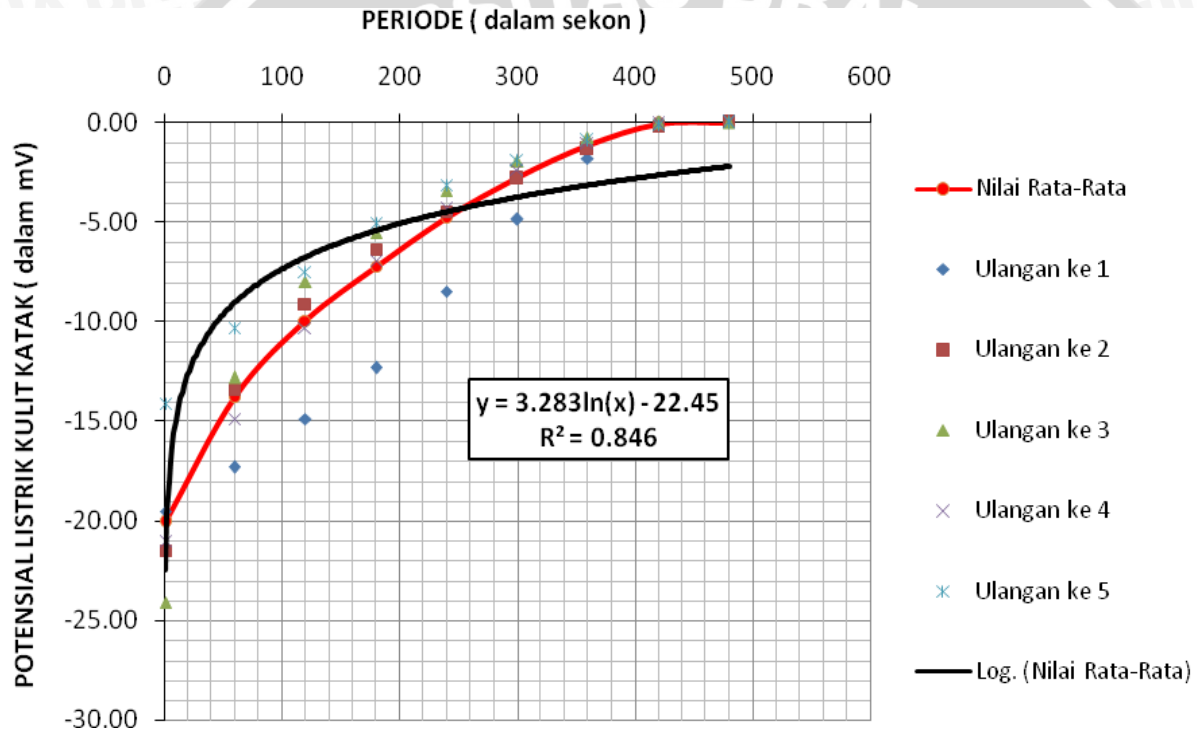


g. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 1 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-19.50	-21.50	-24.10	-21.00	-14.10	-20.04	6.64
60	-17.30	-13.40	-12.80	-14.90	-10.30	-13.74	4.63
120	-14.90	-9.12	-7.97	-10.30	-7.47	-9.95	5.32
180	-12.30	-6.39	-5.51	-6.92	-5.01	-7.23	5.25
240	-8.50	-4.47	-3.41	-4.37	-3.12	-4.77	3.87
300	-4.85	-2.82	-1.95	-2.37	-1.86	-2.77	2.19
360	-1.81	-1.33	-0.73	-1.04	-0.92	-1.17	0.75
420	0.00	-0.19	0.00	-0.08	-0.11	-0.08	0.14
480	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	d_T
	I	II	III	IV	V		
	412	431	406	423	431	421	20

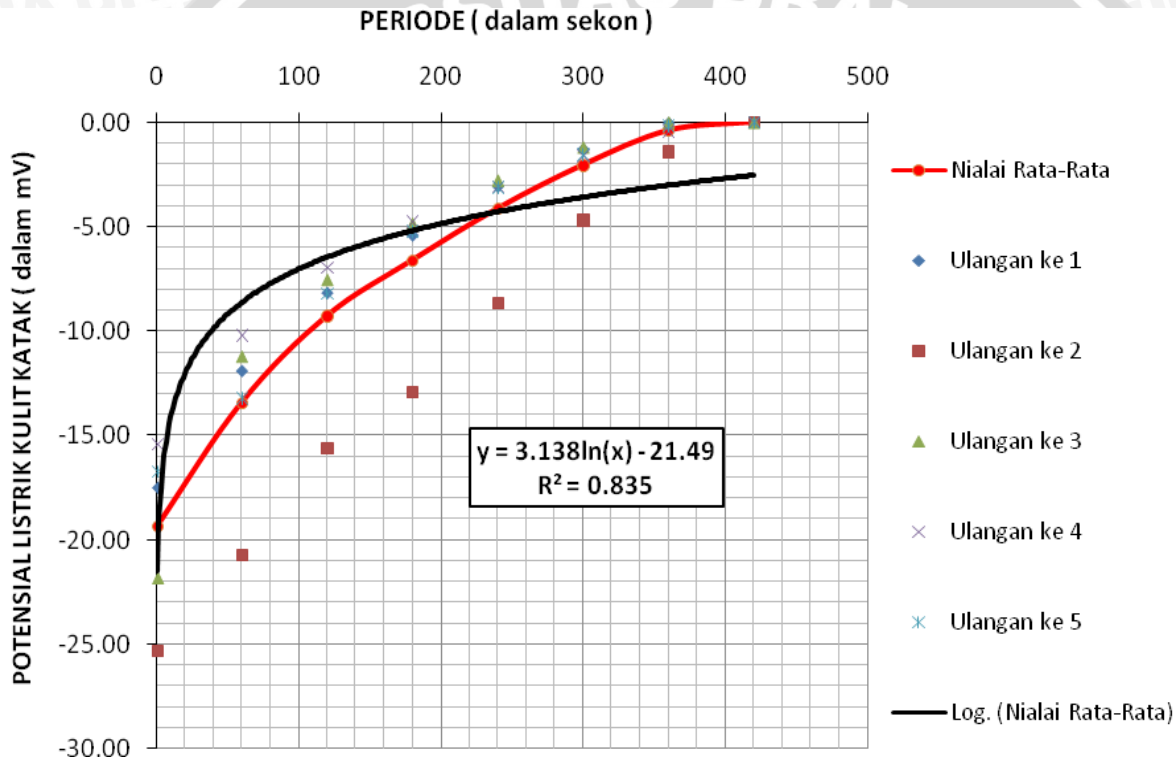


- h. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 5 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-17.50	-25.30	-21.80	-15.40	-16.70	-19.34	7.35
60	-11.90	-20.70	-11.20	-10.20	-13.20	-13.44	7.52
120	-8.16	-15.60	-7.53	-6.95	-8.19	-9.29	6.38
180	-5.40	-12.90	-4.84	-4.75	-5.20	-6.62	6.30
240	-3.06	-8.67	-2.77	-3.07	-3.11	-4.14	4.54
300	-1.27	-4.67	-1.19	-1.60	-1.53	-2.05	2.64
360	-0.02	-1.41	0.00	-0.41	-0.15	-0.40	1.05
420	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	$d_{\check{T}}$
	I	II	III	IV	V		
	362	397	351	381	368	372	32

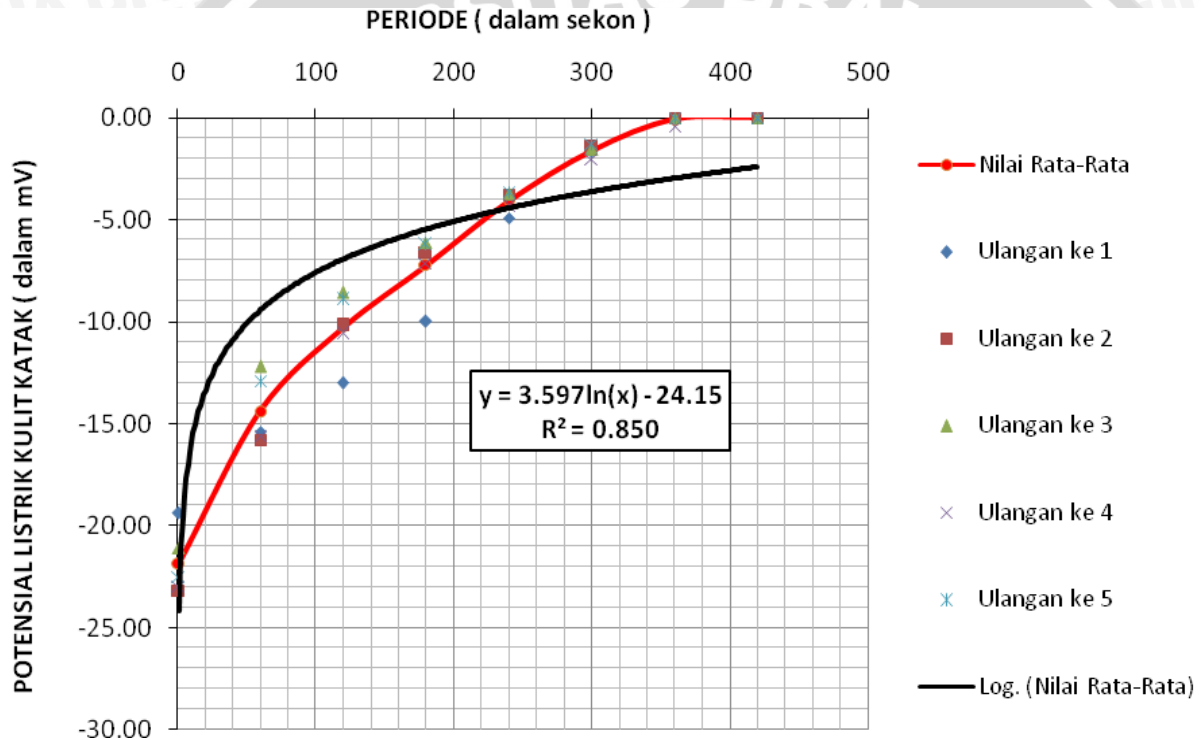


- i. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 10 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-19.40	-23.20	-21.10	-23.00	-22.50	-21.84	2.85
60	-15.40	-15.80	-12.20	-15.60	-12.90	-14.38	3.03
120	-13.00	-10.20	-8.59	-10.60	-8.92	-10.26	3.13
180	-10.00	-6.58	-6.12	-7.15	-6.24	-7.22	2.87
240	-4.93	-3.77	-3.74	-4.35	-3.65	-4.09	0.98
300	-1.67	-1.34	-1.58	-2.04	-1.30	-1.59	0.53
360	0.00	0.00	0.00	-0.40	0.00	-0.08	0.32
420	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\check{T}	d_T
	I	II	III	IV	V		
	345	343	350	378	338	351	28



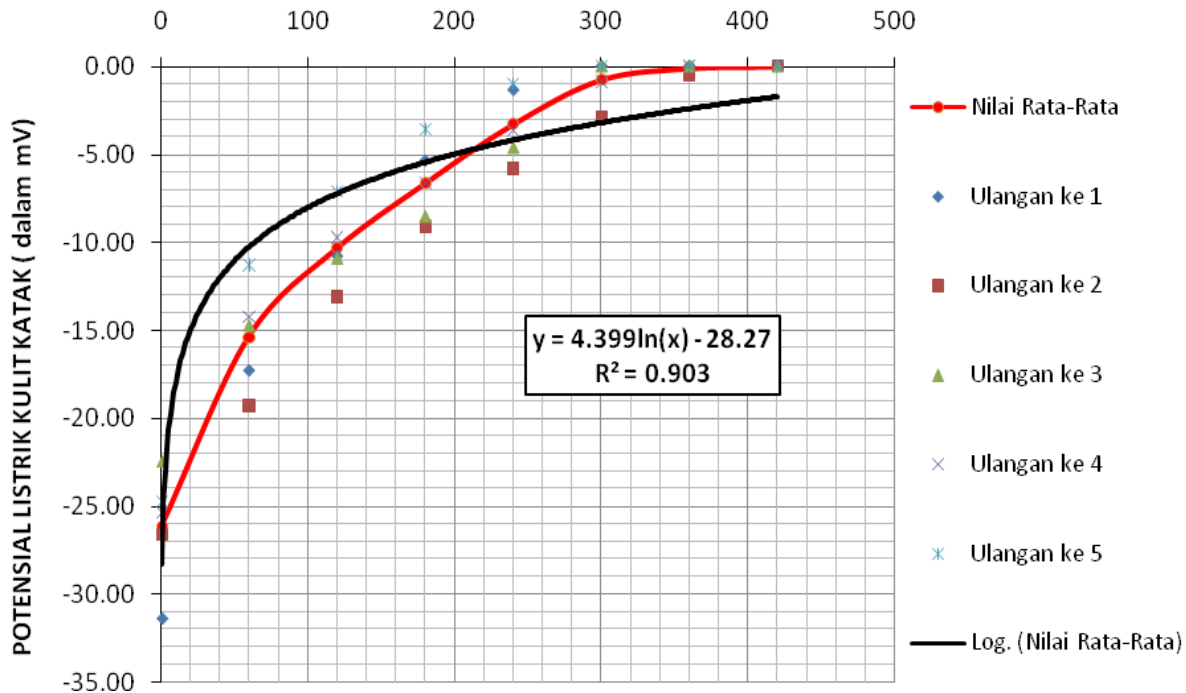
- j. Pendekatan nilai rata-rata potensial listrik kulit katak *ventral* pada konsentrasi HgCl_2 100 ppm

Periode (sekon)	ϕ dalam mV pada perlakuan ke-					ϕ (mV)	d_ϕ
	I	II	III	IV	V		
1	-31.40	-26.60	-22.40	-25.30	-24.70	-26.08	5.98
60	-17.30	-19.30	-14.70	-14.20	-11.30	-15.36	5.48
120	-10.80	-13.10	-10.90	-9.73	-7.10	-10.33	3.90
180	-5.37	-9.12	-8.52	-6.63	-3.60	-6.65	4.05
240	-1.36	-5.82	-4.62	-3.63	-1.00	-3.29	3.72
300	0.00	-2.89	0.00	-0.88	0.00	-0.75	2.24
360	0.00	-0.49	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.39
420	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periode untuk mencapai titik kesetimbangan $\phi = 0$ mutlak

Nilai Periode (sekon)	Perlakuan ke					\checkmark	d_{\checkmark}
	I	II	III	IV	V		
	266	372	294	322	274	306	77

PERIODE (dalam sekon)



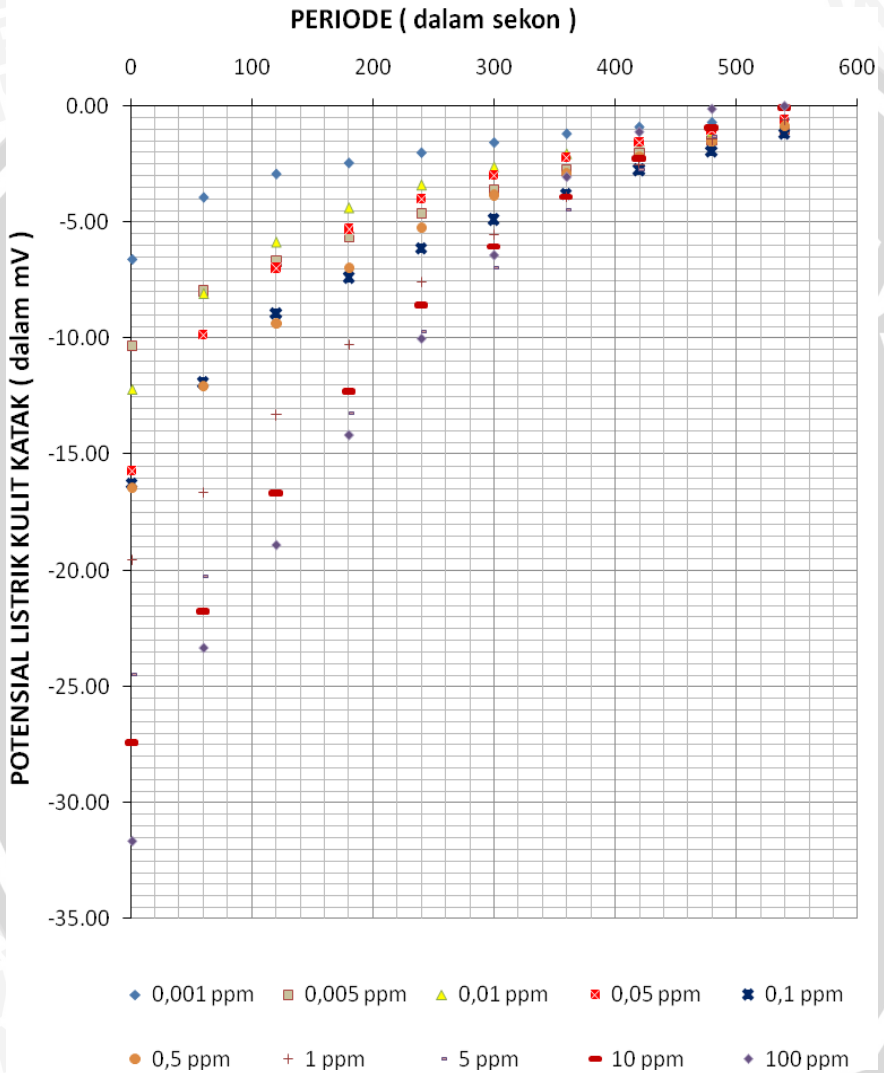
Lampiran 2 Hasil Pengolahan Data

2.1 Kulit katak *dorsal*

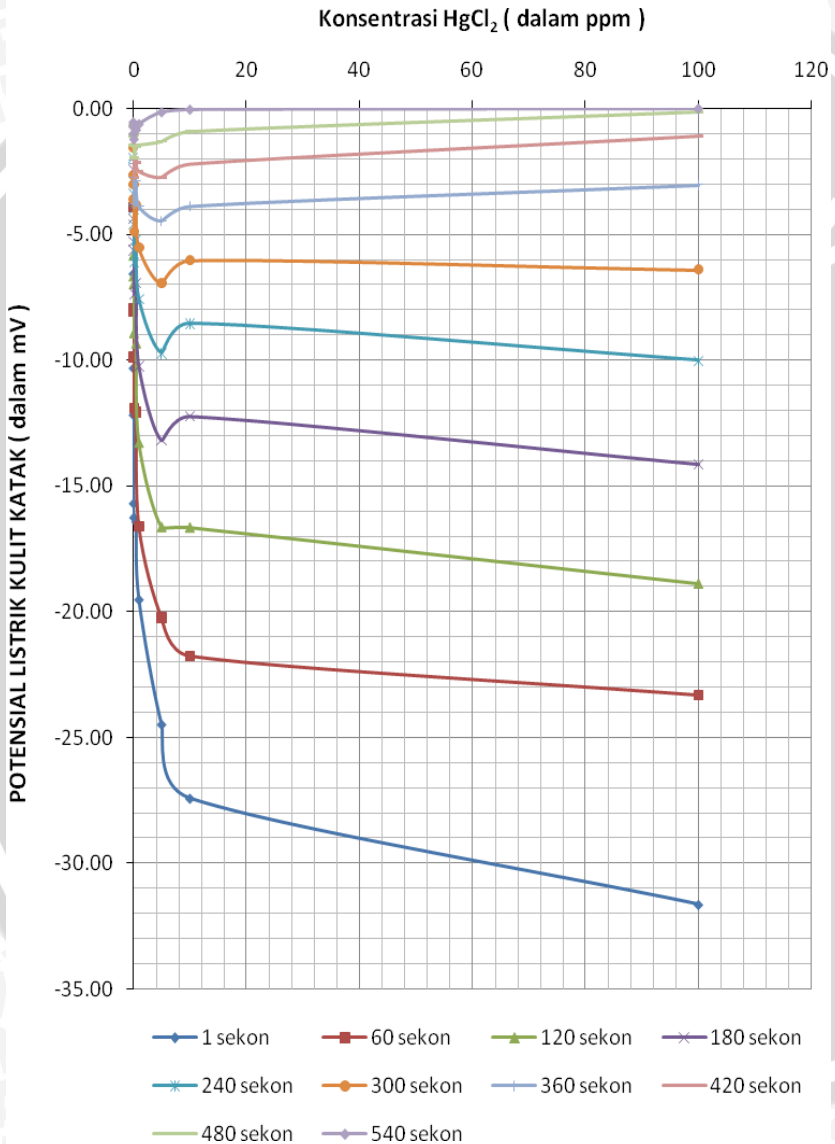
Tabel 2.1.1 Perubahan potensial listrik rata-rata kulit katak *dorsal* terhadap konsentrasi pencemar HgCl_2

Periode T (sekon)	Potensial listrik rata-rata (dalam mV) pada konsentrasi $[\text{HgCl}_2]$ (dalam ppm)									
	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1	5	10	100
1	-6.58	-10.33	-12.19	-15.70	-16.26	-16.44	-19.52	-24.48	-27.42	-31.64
60	-3.91	-7.96	-8.07	-9.87	-11.92	-12.06	-16.62	-20.24	-21.76	-23.32
120	-2.90	-6.68	-5.86	-6.99	-8.94	-9.34	-13.29	-16.64	-16.66	-18.89
180	-2.43	-5.64	-4.39	-5.30	-7.38	-6.96	-10.26	-13.21	-12.26	-14.16
240	-1.99	-4.60	-3.41	-4.02	-6.13	-5.24	-7.57	-9.72	-8.54	-10.01
300	-1.55	-3.62	-2.63	-3.00	-4.90	-3.82	-5.54	-6.95	-6.04	-6.42
360	-1.17	-2.75	-2.07	-2.22	-3.80	-2.89	-3.90	-4.48	-3.90	-3.05
420	-0.88	-2.04	-1.55	-1.56	-2.75	-2.15	-2.51	-2.75	-2.23	-1.11
480	-0.68	-1.46	-1.10	-1.05	-1.97	-1.51	-1.44	-1.30	-0.91	-0.12
540	-0.54	-0.99	-0.73	-0.61	-1.21	-0.85	-0.61	-0.14	-0.04	0.00

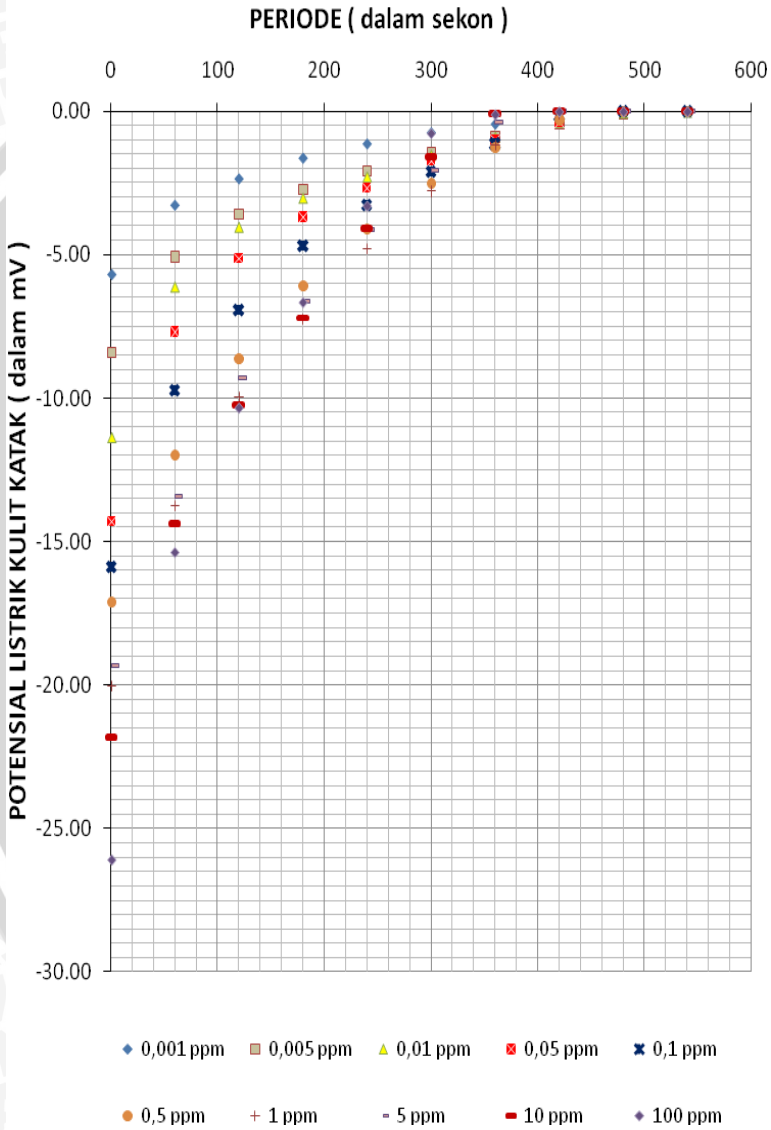
Grafik 2.1.1 Perbandingan pengaruh konsentrasi $HgCl_2$ melalui grafik hubungan antara potensial listrik kulit katak terhadap periodenya



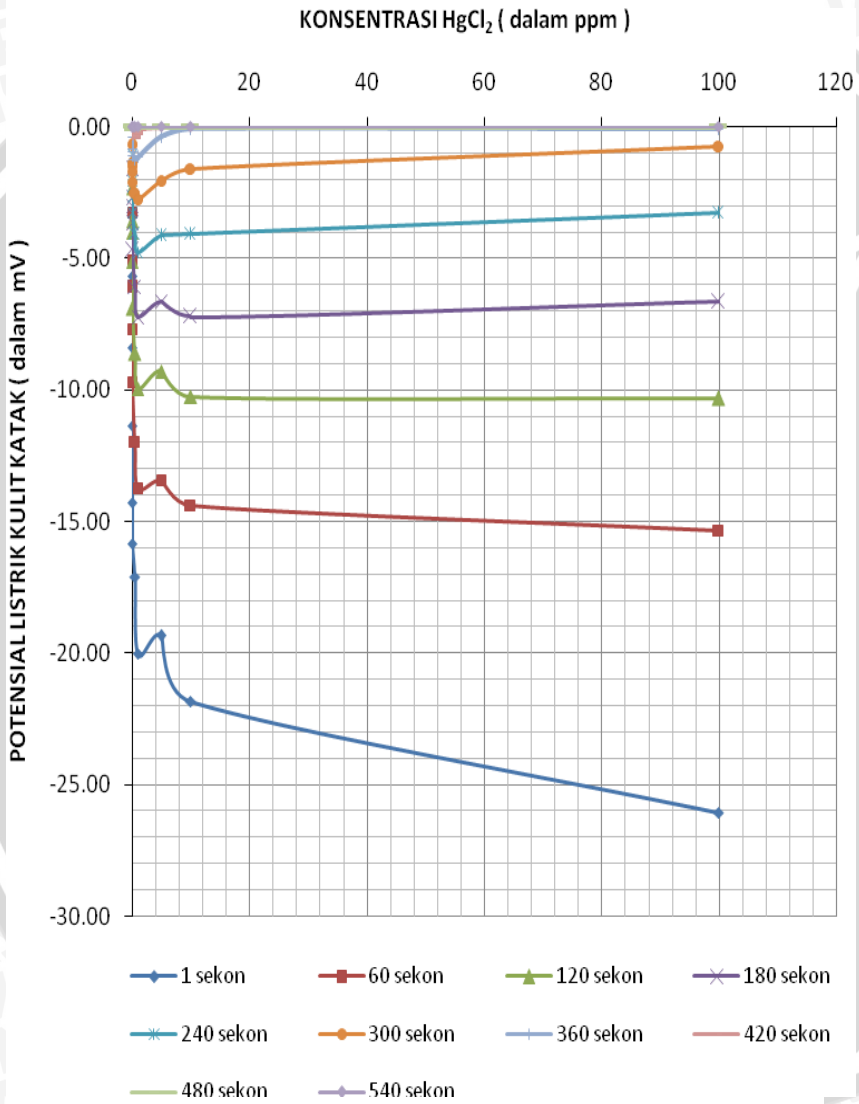
Grafik 2.1.2 Hubungan antara potensial listrik kulit katak *dorsal* terhadap konsentrasi HgCl_2 dengan perbandingan periodenya



Grifik 2.2.1 Perbandingan pengaruh konsentrasi $HgCl_2$ melalui grafik hubungan antara potensial listrik kulit katak *ventral* terhadap periodenya



Grafik 2.2.2 Hubungan antara potensial listrik kulit katak *ventral* terhadap konsentrasi HgCl_2 dengan perbandingan periodenya



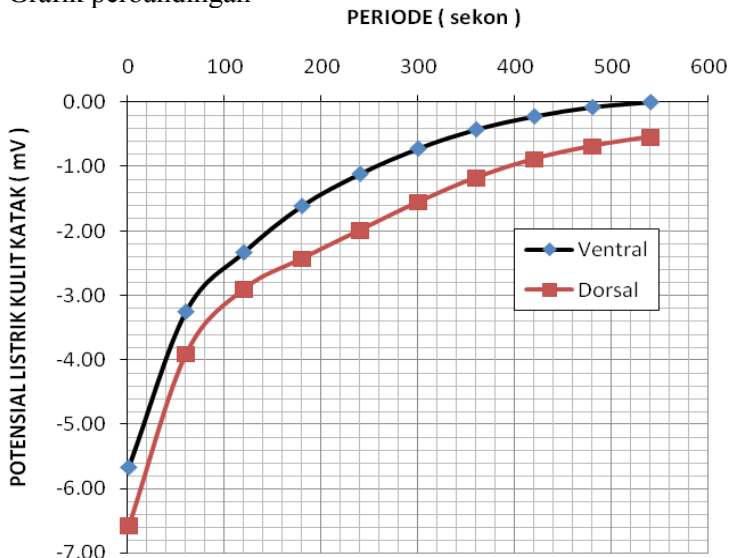
Lampiran 3 Perbandingan Potensial Kulit Katak (ϕ) Ventral dengan Dorsal pada Tiap Konsentrasi Pencemar HgCl_2

1. Konsentrasi HgCl_2 0.001 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	ϕ	$d\phi$	ϕ	$d\phi$
1	-5.67	1.91	-6.58	1.51
60	-3.25	2.74	-3.91	1.62
120	-2.33	2.10	-2.90	2.22
180	-1.61	1.52	-2.43	1.93
240	-1.12	1.03	-1.99	1.38
300	-0.72	0.71	-1.55	0.89
360	-0.43	0.49	-1.17	0.62
420	-0.22	0.33	-0.88	0.53
480	-0.08	0.16	-0.68	0.57
540	0.00	0.00	-0.54	0.61

Grafik perbandingan

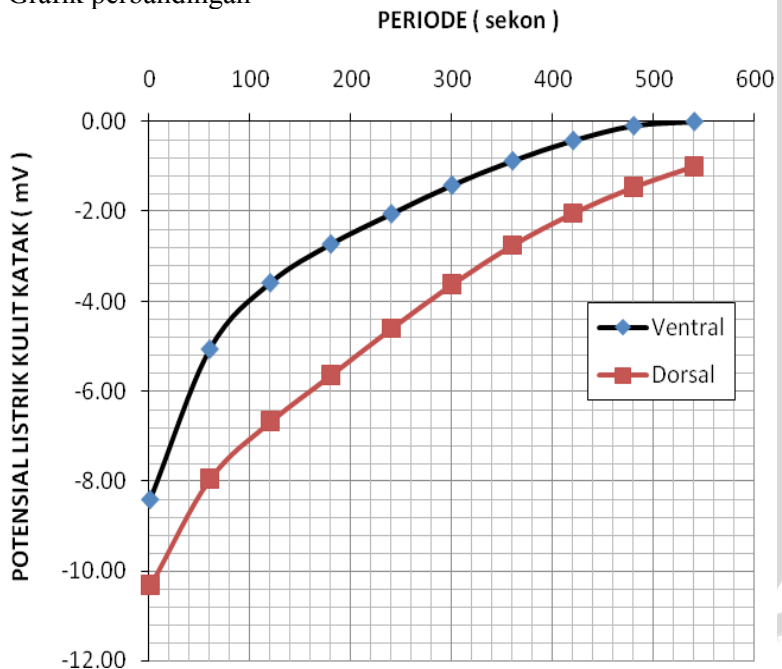


2. Konsentrasi HgCl_2 0.005 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	φ	$d\varphi$	φ	$d\varphi$
1	-8.41	2.39	-10.33	2.31
60	-5.07	3.30	-7.96	2.47
120	-3.59	3.02	-6.68	2.51
180	-2.73	2.33	-5.64	2.13
240	-2.05	1.70	-4.60	1.82
300	-1.42	1.13	-3.62	1.76
360	-0.88	0.74	-2.75	1.72
420	-0.42	0.39	-2.04	1.69
480	-0.09	0.12	-1.46	1.54
540	0.00	0.00	-0.99	1.31

Grafik perbandingan

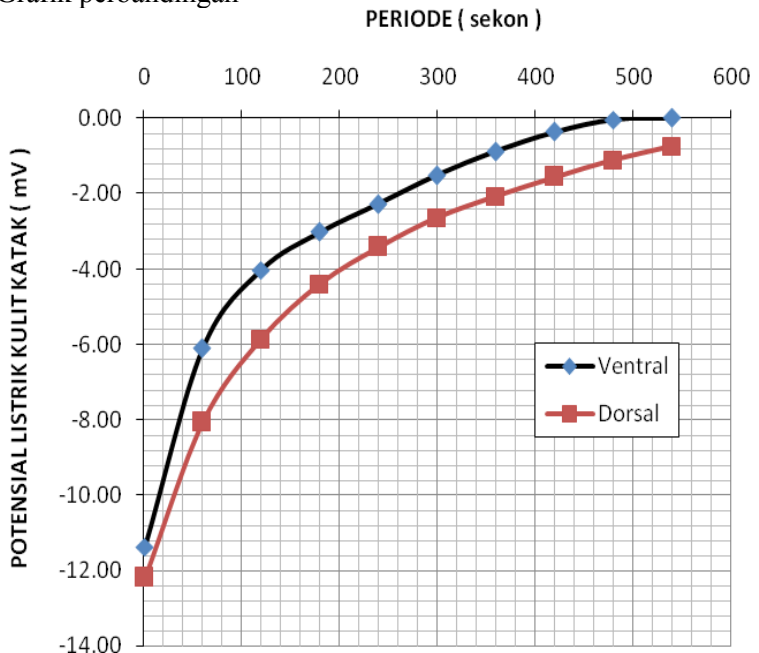


3. Konsentrasi HgCl_2 0.01 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	ϕ	$d\phi$	ϕ	$d\phi$
1	-11.37	1.87	-12.19	2.74
60	-6.11	0.97	-8.07	3.42
120	-4.02	1.22	-5.86	3.97
180	-3.01	1.80	-4.39	3.88
240	-2.27	1.69	-3.41	3.35
300	-1.51	1.18	-2.63	2.83
360	-0.88	0.58	-2.07	2.22
420	-0.36	0.22	-1.55	1.75
480	-0.04	0.08	-1.10	1.30
540	0.00	0.00	-0.73	0.90

Grafik perbandingan

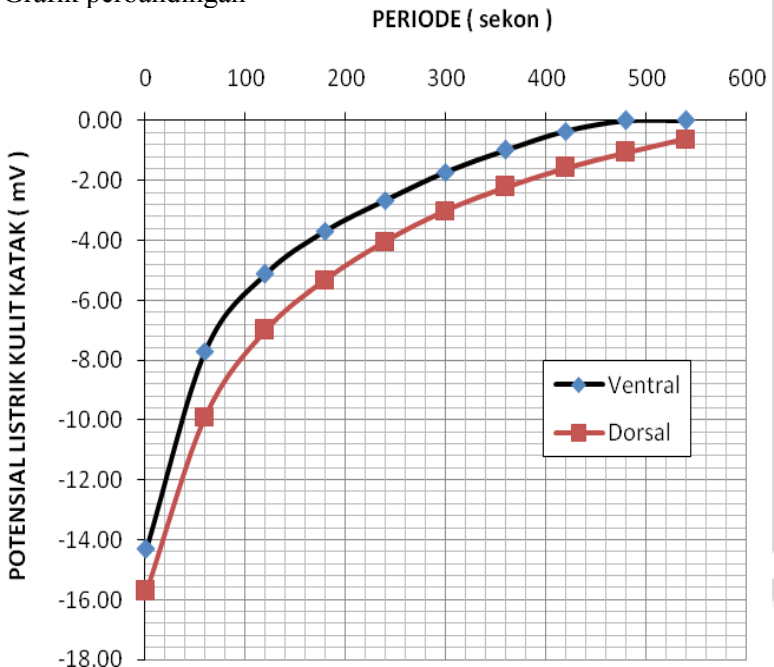


4. Konsentrasi HgCl_2 0.05 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	φ	$d\varphi$	φ	$d\varphi$
1	-14.30	3.18	-15.70	2.39
60	-7.69	1.95	-9.87	5.14
120	-5.13	2.53	-6.99	4.90
180	-3.68	2.95	-5.30	4.43
240	-2.65	2.66	-4.02	3.79
300	-1.72	2.01	-3.00	3.03
360	-0.98	1.21	-2.22	2.28
420	-0.36	0.50	-1.56	1.65
480	0.00	0.00	-1.05	1.14
540	0.00	0.00	-0.61	0.71

Grafik perbandingan

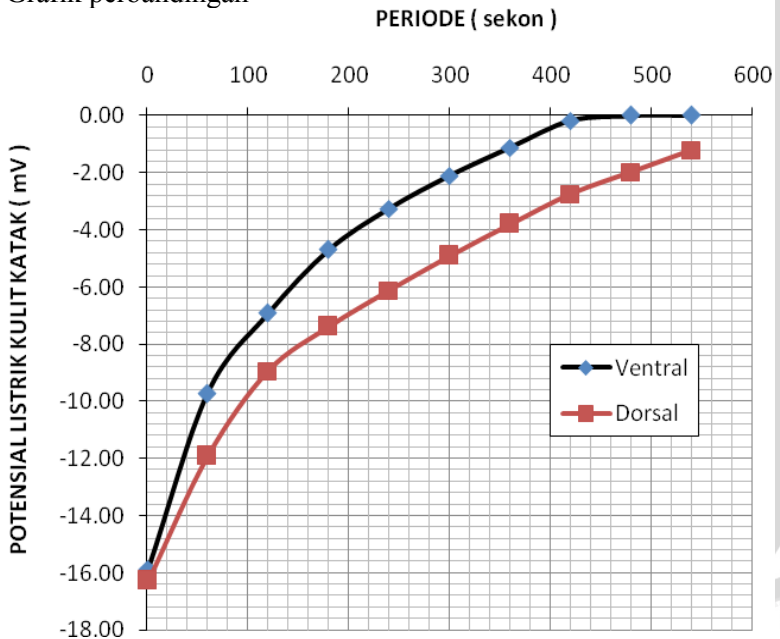


5. Konsentrasi HgCl_2 0.1 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	φ	$d\varphi$	φ	$d\varphi$
1	-15.86	7.67	-16.26	7.85
60	-9.72	5.01	-11.92	4.19
120	-6.91	3.76	-8.94	2.48
180	-4.69	3.33	-7.38	2.09
240	-3.25	3.11	-6.13	2.38
300	-2.10	2.19	-4.90	2.39
360	-1.13	1.15	-3.80	2.23
420	-0.17	0.27	-2.75	2.18
480	0.00	0.00	-1.97	1.97
540	0.00	0.00	-1.21	1.79

Grafik perbandingan

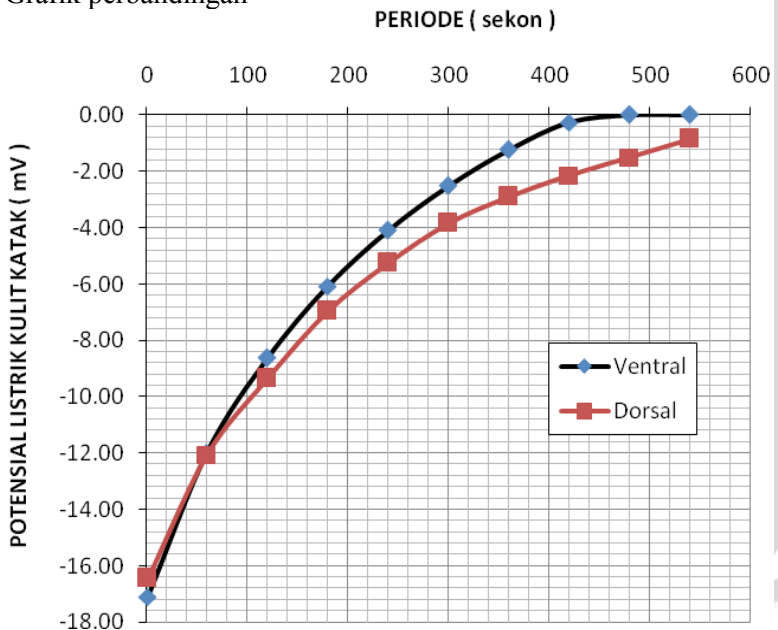


6. Konsentrasi HgCl_2 0.5 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	ϕ	$d\phi$	ϕ	$d\phi$
1	-17.10	6.07	-16.44	3.72
60	-11.97	3.99	-12.06	0.95
120	-8.62	2.81	-9.34	2.03
180	-6.08	2.64	-6.96	2.01
240	-4.09	2.44	-5.24	2.13
300	-2.50	1.80	-3.82	1.77
360	-1.23	1.13	-2.89	1.81
420	-0.27	0.42	-2.15	1.83
480	0.00	0.00	-1.51	1.63
540	0.00	0.00	-0.85	1.12

Grafik perbandingan

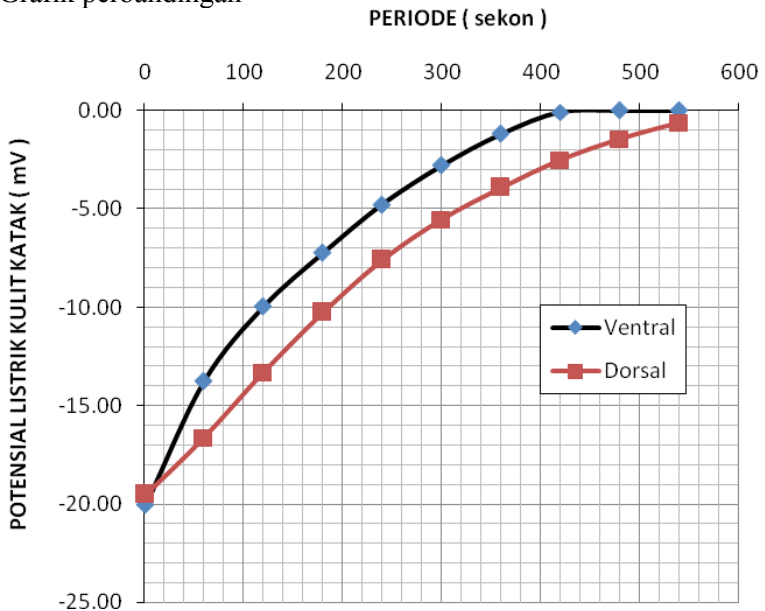


7. Konsentrasi HgCl_2 1 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	φ	d φ	φ	d φ
1	-20.04	6.64	-19.52	4.31
60	-13.74	4.63	-16.62	4.60
120	-9.95	5.32	-13.29	4.92
180	-7.23	5.25	-10.26	4.92
240	-4.77	3.87	-7.57	4.16
300	-2.77	2.19	-5.54	4.11
360	-1.17	0.75	-3.90	3.50
420	-0.08	0.14	-2.51	2.24
480	0.00	0.00	-1.44	1.19
540	0.00	0.00	-0.61	0.48

Grafik perbandingan

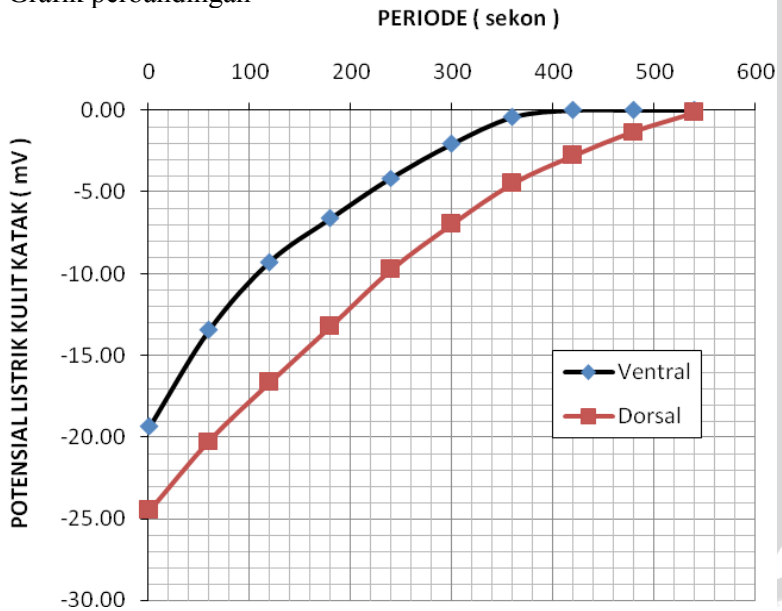


8. Konsentrasi HgCl_2 5 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	φ	$d\varphi$	φ	$d\varphi$
1	-19.34	7.35	-24.48	1.75
60	-13.44	7.52	-20.24	2.33
120	-9.29	6.38	-16.64	3.51
180	-6.62	6.30	-13.21	5.11
240	-4.14	4.54	-9.72	4.52
300	-2.05	2.64	-6.95	3.88
360	-0.40	1.05	-4.48	2.59
420	0.00	0.00	-2.75	2.05
480	0.00	0.00	-1.30	1.08
540	0.00	0.00	-0.14	0.34

Grafik perbandingan

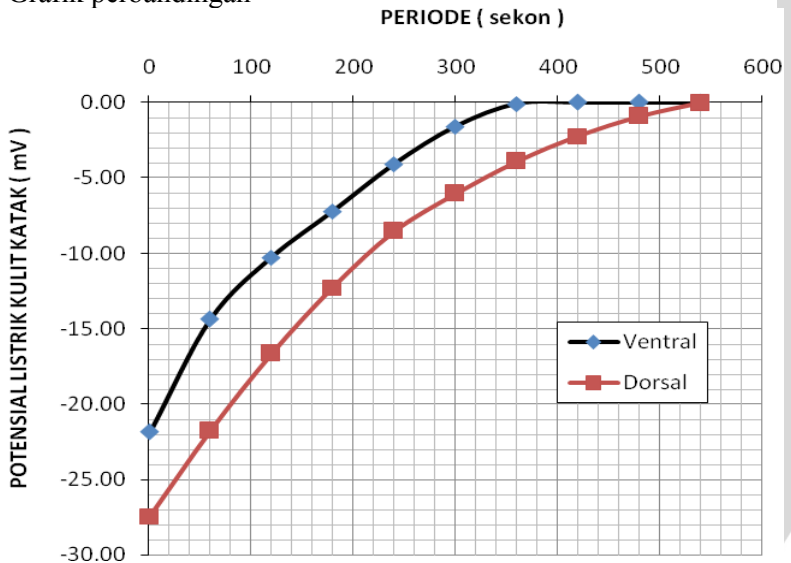


9. Konsentrasi HgCl_2 10 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	φ	$d\varphi$	φ	$d\varphi$
1	-21.84	2.85	-27.42	3.66
60	-14.38	3.03	-21.76	4.95
120	-10.26	3.13	-16.66	4.76
180	-7.22	2.87	-12.26	3.51
240	-4.09	0.98	-8.54	2.36
300	-1.59	0.53	-6.04	1.63
360	-0.08	0.32	-3.90	0.68
420	0.00	0.00	-2.23	0.40
480	0.00	0.00	-0.91	0.17
540	0.00	0.00	-0.04	0.14

Grafik perbandingan

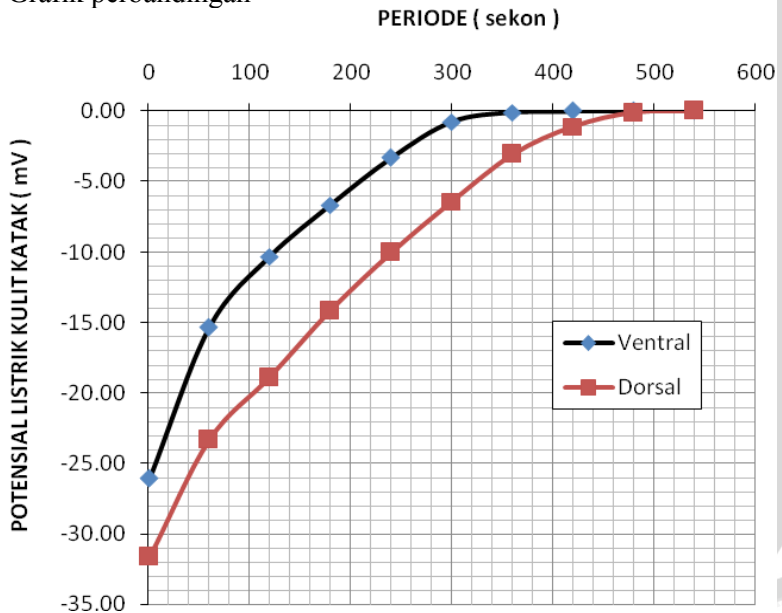


10. Konsentrasi HgCl₂ 100 ppm

Tabel data

Periode T (sekon)	Ventral		Dorsal	
	ϕ	d ϕ	ϕ	d ϕ
1	-26.08	5.98	-31.64	5.20
60	-15.36	5.48	-23.32	9.25
120	-10.33	3.90	-18.89	9.16
180	-6.65	4.05	-14.16	8.51
240	-3.29	3.72	-10.01	7.16
300	-0.75	2.24	-6.42	5.45
360	-0.10	0.39	-3.05	3.08
420	0.00	0.00	-1.11	1.37
480	0.00	0.00	-0.12	0.49
540	0.00	0.00	0.00	0.00

Grafik perbandingan



Berdasarkan grafik perbandingan potensial kulit katak terhadap waktu antara kulit katak *dorsal* dengan *ventral*, secara matematis diperoleh perbandingan fungsi kurva sebagai berikut:

Konsentrasi HgCl ₂ (ppm)	<i>Dorsal</i>		<i>Ventral</i>	
	Persamaan	R ²	Persamaan	R ²
0.001	$y = 1.008\ln(x) - 7.176$	0.955	$y = 0.926\ln(x) - 6.142$	0.932
0.005	$y = 1.679\ln(x) - 12.45$	0.791	$y = 1.357\ln(x) - 9.194$	0.914
0.01	$y = 1.975\ln(x) - 13.73$	0.912	$y = 1.848\ln(x) - 12.13$	0.955
0.05	$y = 2.544\ln(x) - 17.41$	0.925	$y = 2.315\ln(x) - 15.20$	0.952
0.1	$y = 2.645\ln(x) - 19.04$	0.851	$y = 2.584\ln(x) - 17.32$	0.904
0.5	$y = 2.660\ln(x) - 18.98$	0.845	$y = 2.787\ln(x) - 19.19$	0.842
1	$y = 3.148\ln(x) - 23.43$	0.734	$y = 3.283\ln(x) - 22.45$	0.846
5	$y = 3.986\ln(x) - 29.39$	0.732	$y = 3.138\ln(x) - 21.49$	0.835
10	$y = 4.559\ln(x) - 32.29$	0.789	$y = 3.597\ln(x) - 24.15$	0.850
100	$y = 5.184\ln(x) - 36.61$	0.790	$y = 4.399\ln(x) - 28.27$	0.903

Keterangan:

y = potensial kulit katak; x = periode; dan R² = regresi

Lampiran 4 Lambang dan Singkatan

Simbol/Singkatan	Keterangan
Å	Amstrong
A ⁻	Anion
ATP	Adenosin Tri Phospate
CaCl ₂ .2H ₂ O	Kalsium Klorida Dihidrat
CaCl ₂	Kalsium Klorida
Ca ²⁺	Ion Kalsium
CH ₃ -Hg	Metil merkuri
Cl ⁻	Ion Klorida
CO ₂	Karbon dioksida
g	gram
HCl	Asam Klorida
Hg	<i>Hydragyrum</i>
Hg ²⁺	Ion <i>Hydragyrum</i>
HgCl ₂	Merkuri (II) Klorida
KCl	Kalium Klorida
K ⁺	Ion Kalium
LAS	<i>Linear Aklilbenzene Sulfonate</i>
mM	Milimolar
Mr	Massa Relatif
mL	Mililiter
mV	Milivolt
nm	nanometer
Na ⁺	Ion Natrium
NaCl	Natrium Klorida
NaHCO ₃	Natrium Bikarbonat
NH ₃	Urea
O ₂	Oksigen
SH	Sulfida Hidrogen
OH	Oksida Hidrogen
φ	Potensial kulit katak
φ	Potensial kulit katak rata-rata
dφ	Deviasi potensial kulit katak
T	Periode
T̄	Periode rata-rata
dT̄	Deviasi periode