

**PERILAKU KOROSI MATERIAL AMORF GELAS METALIK
BERBASIS ZIRKONIUM DENGAN METODE POLARISASI
POTENSIOSTATIK**

SKRIPSI

M. MUKHLAS ROZIQIN

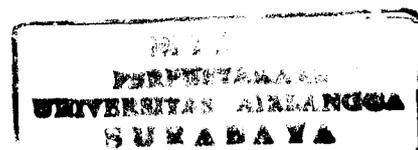
MPT 06 06

Roz



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA**

2005



**PERILAKU KOROSI MATERIAL AMORF GELAS METALIK
BERBASIS ZIRKONIUM DENGAN METODE POLARISASI
POTENSIOSTATIK**

SKRIPSI

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Sains Bidang Fisika Pada Fakultas Matematika
Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga**

Oleh :

M. MUKHLAS ROZIQIN
NIM. 089912062

Tanggal Lulus : 03 Agustus 2005

Disetujui Oleh :

Pembimbing I,



Drs. Djoni Izak R., M.Si.
NIP. 132 058 821

Pembimbing II,



Drs. Handoko DK, DEA
NIP. 131 801 399

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Judul : Perilaku Korosi Material Amorf Gelas Metalik Berbasis Zirkonium Dengan Metode Polarisasi Potensiostatik
Penyusun : M. Mukhlas Roziqin
NIM : 089912062
Tanggal Ujian : 03 Agustus 2005

Disetujui Oleh :

Pembimbing I,



Drs. Djoni Izak R., M.Si.
NIP. 132 058 821

Pembimbing II,



Drs. Handoko DK, DEA
NIP. 131 801 399

Mengetahui :

Ketua Jurusan Fisika

Universitas Airlangga



Drs. Bujiyanto, M.S.
NIP. 131 756 001

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan, namun tersedia di perpustakaan dalam lingkungan Universitas Airlangga. Diperkenankan untuk dipakai sebagai referensi kepustakaan, tetapi pengutipan seijin penulis dan harus menyebutkan sumbernya sesuai kebiasaan ilmiah.

Dokumen skripsi ini merupakan hak milik Universitas Airlangga.

KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah kupersembahkan kehadiran-Mu yaa Rabb, Tuhan semesta alam, sebagai rasa terima kasih atas sedikit curahan rahmat dan limpahan qudrah-Mu yang telah menguatkan segenap jiwa dan raga sampai pada akhirnya terselesaikan skripsi yang berjudul “Perilaku Korosi Material Amorf Gelas Metalik Berbasis Zirkonium Dengan Metode Polarisasi Potensiostatik”.

Skripsi ini adalah tahap lanjutan dari proposal yang telah diseminarkan dan merupakan langkah akhir penelitian yang diajukan sebagai syarat kelulusan untuk meraih gelar Sarjana Fisika. Mudah-mudahan langkah ini mendapat rahmat dari Sang Pencipta semangat serta mendapat nilai tersendiri bagi penulis dan pembimbing sehingga sampai terselesaikannya skripsi ini. Rasa hormat kepada Ibunda dan Ayahanda yang mendorong penulis untuk cepat menyelesaikan tugas ini dan ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada Bapak Drs. Djoni Izak R., M.Si selaku Pembimbing I dan Bapak Drs. Handoko DK, DEA selaku Pembimbing II atas segala bimbingan dan masukan yang diberikan, serta kepada semua pihak yang telah membantu penulis sampaikan rasa terima kasih.

Penulis berusaha menyusun skripsi ini dengan sebaik-baiknya, akan tetapi tetap menyadari akan kelemahan dalam penulisan proposal ini. Oleh karena itu, kritik dan saran dari semua pihak sangat kami harapkan demi kesempurnaan dan tergapainya hasil yang bermanfaat sesuai dengan fungsinya

Surabaya, Januari 2005

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah....., Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah S.W.T yang telah membimbing dan menganugerahkan kesempurnaan nikmat hingga dapat terselesaikannya skripsi ini.

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini :

1. Kedua orang tua tercinta, Ibu Hj. Umi Kultsum dan Ayah H.M. Jasin,S.Ag yang selalu mendo'akan dan memberi dorongan moral bagi penulis, hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
2. Bapak Drs. Djoni Izak R., M.Si. selaku pembimbing I yang dengan ikhlas dan penuh perhatian telah memberikan bimbingan, dorongan, tuntunan, saran dan nasehat selama menyelesaikan naskah skripsi ini, sekaligus dosen wali yang telah memberi saran dan nasehat selama penulis belajar di Fisika FMIPA Unair.
3. Bapak Drs. Handoko DK, DEA selaku pembimbing II yang dengan penuh kesabaran telah memberikan waktu, bimbingan, dorongan dan semangat untuk segera menyelesaikan naskah skripsi ini.
4. Bapak Drs. Pujiyanto, M.S. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Airlangga, yang telah memberi ijin bagi penulis untuk melakukan penelitian.
5. Bapak Jan Ady, S.Si. M.Si. dan Bapak Samian, S.Si selaku dosen penguji atas segala saran dan kritiknya.

6. Bapak dan Ibu dosen yang telah mentransfer ilmunya bagi penulis.
7. Adikku tersayang, yang dengan penuh kesabaran selalu membesarkan hati penulis disaat kehabisan motivasi, dan semua gadis-gadisku; Chies-k Sephia, Phia, Silphia, Ulpha, Ulphia, Cacansay yang telah meninggalkanku saat bingung cari ide.
8. Sobat – sobatku : Joen, Ma’as, Moel, Tutuk, Endro, Asmoro, Sandy, Bayu, Ali, Andiek, Aries, Lia, Tere, Erty, Yanus, Ninik, Watik, Ita, Jeng Sri, Inayah, Nila, Eva dan seluruh teman-temanku angkatan ’99.
9. Sahabat-sahabat/i PMII Unair, ITS, IAIN, UNESA, UPN, ITPS, UBHARA, UNITOMO, dan Pengurus PMII Cabang Surabaya.
10. Rekan – rekan senasib di Kontrakan Maut Sutorejo : Agus ‘curut’ Hakam ’02, Robet Gedek ’02, Fauzi ’03, Marsupilami ’02, Gurem’02, Tomy’ 02, dan penumpang ‘Romli’ ; Ahong, Fandi, Edo, Eki, ArFun, dll.
11. Seluruh mahasiswa Fisika dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan dan dukungan moril.

Atas segala bantuan yang telah diberikan penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya. Semoga amal baik yang telah diberikan mendapat balasan yang setimpal serta selalu mendapatkan berkah dan rahmat dari Tuhan Yang Maha Kuasa.

Surabaya, 27 Juli 2005

M. Mukhlas Roziqin

M. Mukhlas Roziqin, 2005, **Perilaku Korosi Material Amorf Gelas Metalik Berbasis Zirkonium Dengan Metode Polarisasi Potensiostatik**. Skripsi ini di bawah bimbingan Drs. Djoni Izak R., M.Si Jurusan Fisika dan Drs. Handoko DK, DEA Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga.

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian perilaku korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium dalam lingkungan HNO_3 dengan menggunakan metode polarisasi potensiostatik. Bahan yang digunakan adalah material amorf gelas metalik dua, tiga dan empat komponen berbasis zirkonium yaitu $\text{Zr}_{67}\text{Ni}_{33}$, $\text{Zr}_{67}\text{Cu}_{33}$, $\text{Zr}_{70}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{15}$, $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27,5}\text{Al}_{7,5}$ dan $\text{Zr}_{69,5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7,5}$ yang berbentuk pita tipis dengan tebal 1 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju korosi pada material amorf gelas metalik berbasis zirkonium yaitu $\text{Zr}_{67}\text{Ni}_{33}$, $\text{Zr}_{67}\text{Cu}_{33}$, $\text{Zr}_{70}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{15}$, $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27,5}\text{Al}_{7,5}$ dan $\text{Zr}_{69,5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7,5}$ masing-masing sebesar 19,29 mpy, 27,9 mpy, 104,6 mpy, 401 mpy dan 123,76 mpy. Hal ini menunjukkan bahwa untuk pita paduan gelas metalik $\text{Zr}_{67}\text{Ni}_{33}$ lebih resistan terhadap serangan korosi dengan dibuktikan adanya nilai intensitas arus korosi dan laju korosi yang relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan pita paduan gelas metalik yang lain yaitu masing-masing sebesar $5,31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan 19,78 mpy.

Kata kunci : Laju korosi, Material amorf gelas metalik, Polarisasi Potensiostatik

M. Mukhlas Roziqin, 2005. Corrosion behavior of metallic glasses amorphous on zirconium based investigated by potentiostatic polarization method. This script is under control of Drs. Djoni Izak R., M.Si Department of Physics and Drs. Handoko DK, DEA Department of Chemistry, Mathematic and Natural Science Faculty of Airlangga University.

ABSTRACT

There were done the experiment about corrosion behavior of metallic glasses amorphous on zirconium based in HNO_3 aqueous media investigated by potentiostatic polarization method. The sample of this experiment was metallic glasses amorphous two, three, and four component on zirconium based ; $\text{Zr}_{67}\text{Ni}_{33}$, $\text{Zr}_{67}\text{Cu}_{33}$, $\text{Zr}_{70}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{15}$, $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27,5}\text{Al}_{7,5}$ dan $\text{Zr}_{69,5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7,5}$ in the form of thin amorphous ribbon with 1 mm thick. The experiment result show that corrosion velocity value on metallic glasses amorphous on zirconium based $\text{Zr}_{67}\text{Ni}_{33}$, $\text{Zr}_{67}\text{Cu}_{33}$, $\text{Zr}_{70}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{15}$, $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27,5}\text{Al}_{7,5}$ dan $\text{Zr}_{69,5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7,5}$ were 19,29 mpy, 27,9 mpy, 104,6 mpy, 401 mpy dan 123,76 mpy. This result show that metallic glasses amorphous alloy ribbons of $\text{Zr}_{67}\text{Ni}_{33}$ more corrosion resistant to other alloys which showed by the value of the corrosion current density and corrosion velocity that lower than other metallic glasses alloy ribbons, each of them were $5,31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ and 19,78 mpy.

Key words : Corrosion velocity, Metallic glasses amorphous, Potentiostatic polarization.

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Pembentukan Struktur Gelas	4
2.2. Stabilitas Bahan Gelas Metalik.....	6
2.3. Korosi	7

2.3.1. Dasar-Dasar Korosi.....	8
2.3.1.1. Sel Elektrokimia	8
2.3.1.1.1. Anoda	8
2.3.1.1.2. Katoda	9
2.3.1.1.3. Elektrolit	10
2.3.1.1.4. Rangkaian Arus Listrik	10
2.3.2. Terbentuknya Sel Korosi	11
2.3.3. Jenis-Jenis Korosi	13
2.3.3.1. Korosi Merata (Uniform Corrosion)	13
2.3.3.2. Korosi Sumuran (Pitting Corrosion)	14
2.3.3.3. Korosi Celah (Crevice Corrosion)	14
2.3.3.4. Korosi Antar Butir (Intergranular Corrosion)	15
2.3.3.5. Korosi Galvanik (Galvanik Corrosion)	15
2.3.3.1. Korosi Selektif (Selective Corrosion)	16
2.3.3.1. Korosi Tegang (Stress Corrosion Cracking)	16
2.3.3.1. Korosi Erosi (Erosion Corrosion)	16
2.4. Penentuan Laju Korosi Dengan Metode Polarisasi Potensiostatik.....	17
BAB III METODE PENELITIAN.....	20
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	20
3.2. Bahan dan Alat Penelitian	20
3.2.1. Bahan penelitian.....	20
3.2.2. Alat Penelitian.....	20
3.3. Prosedur Penelitian.....	20

3.4. Analisis Data.....	22
3.4.1. Analisis Data Pengujian Laju Korosi	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	23
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	38
5.1. Kesimpulan	38
5.2. Saran.....	38
DAFTAR PUSTAKA.....	39
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Judul Gambar	Halaman
2.1.	Kurva pendinginan padatan dari fasa cair	5
2.2.	Diagram skematik keseimbangan	6
2.3.	Terbentuknya Sel Korosi	11
2.4.a.	Reaksi elektrokimia Pada korosi baja	12
2.4.b.	Terbentuknya Ferrous Hydroxide	12
2.4.c.	Mekanisme terbentuknya karat.....	13
2.5.	Kurva potensial lawan log intenitas arus korosi	18
3.1.	Diagram Alir Penelitian	22
4.1.a	Grafik intensitas arus korosi gelas metalik spesimen paduan ZrNi.....	24
4.1.b	Grafik intensitas arus korosi gelas metalik spesimen paduan ZrCu	24
4.2.a	Grafik intensitas arus korosi gelas metalik spesimen paduan ZrCuNi ..	25
4.2.b	Grafik intensitas arus korosi gelas metalik spesimen paduan ZrCuAl ..	25
4.3.	Grafik intensitas arus korosi gelas metalik spesimen paduan ZrCuNiAl.	26
4.4.a	Profil energi untuk tembaga.....	29
4.4.b	Profil energi untuk tembaga yang dalam kesetimbangan.....	29

DAFTAR TABEL

	Judul Tabel	Halaman
4.1	Hasil perhitungan laju korosi masing-masing sampel	27

DAFTAR LAMPIRAN

Judul Lampiran	Halaman
Lampiran 1 Perhitungan densitas sampel (ρ).....	40
Lampiran 2 Perhitungan Berat Ekuivalen (EW)	41
Lampiran 3 Perhitungan Laju Korosi (V_{kor}).....	42
Lampiran 4 Kurva Tafel paduan Zr ₆₇ Ni ₃₃	43
Lampiran 5 Kurva Tafel paduan Zr ₆₇ Cu ₃₃	44
Lampiran 6 Kurva Tafel paduan Zr ₇₀ Cu ₁₅ Ni ₁₅	45
Lampiran 7 Kurva Tafel paduan Zr ₆₅ Cu _{27,5} Al _{7,5}	46
Lampiran 8 Kurva Tafel paduan Zr _{69,5} Cu ₁₂ Ni ₁₁ Al _{7,5}	47
Lampiran 9 Gambar bahan penelitian	48
Lampiran 10 Gambar alat penelitian	49

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, menuntut penggunaan material secara tepat. Untuk dapat menggunakan material dengan tepat, maka harus dikenali dengan baik sifat-sifat material yang mungkin akan di pilih untuk dipergunakan. Sifat-sifat ini tentunya sangat banyak macamnya, karena sifat ini dapat ditinjau dari berbagai bidang keilmuan.

Salah satu sifat penting yang perlu dipertimbangkan dalam proses pemilihan material adalah sifat tahan korosi. Korosi merupakan masalah yang sangat serius dalam dunia material, karena dapat mengakibatkan kerugian-kerugian yang lebih besar, antara lain : bisa menimbulkan kebocoran, mengakibatkan berkurangnya ketangguhan/kekuatan, robohnya suatu konstruksi, meledaknya suatu pipa/bejana bertekanan, dan mungkin juga akan membuat pencemaran pada suatu produk.

Salah satu penelitian yang saat ini banyak dilakukan adalah mengenai bahan-bahan baru dari logam yang berstruktur amorf misalnya adalah gelas metalik berbasis zirkonium, sebab sebagaimana diketahui struktur amorf mempunyai sifat keuletan yang tinggi. Zirkonium merupakan unsur yang mempunyai kegetasan (*brittle*) tinggi. Pemakaian zirkonium saat ini masih relatif sedikit, salah satu yang sudah lama dikenal adalah ZrO_2 . Melalui rekayasa material, diharapkan paduan zirkonium akan mempunyai sifat keuletan (*ductility*) yang tinggi dan ketahanan terhadap oksidasi yang lebih tinggi.

Berkaitan dengan hal tersebut diatas, maka perlu dilakukan penelitian terhadap perilaku korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium. Sehingga dapat diketahui faktor-faktor yang berpengaruh agar supaya dihasilkan material amorf gelas metalik berbasis zirkonium yang mempunyai daya tahan yang unggul terhadap korosi (resistan terhadap korosi).

Dalam penelitian ini digunakan metode polarisasi potensiostatik dimana merupakan metode semi manual yang memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode sebelumnya karena menggunakan interface yang dirangkai dengan komputer, sehingga merupakan metode yang lebih akurat daripada metode manual sebelumnya, yaitu metode pencelupan (*immersion*) menggunakan teknik pengurangan massa. Sedangkan pemilihan lingkungan (media cair) asam menggunakan larutan HNO_3 adalah terkait dengan aplikasi pemilihan bahan pada industri-industri bahan kimia, yang diharapkan memiliki sifat mampu korosi terhadap media asam, khususnya pada larutan HNO_3 .

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang permasalahan yang telah diuraikan di atas akan timbul permasalahan- permasalahan yang belum terpecahkan, antara lain :

1. Bagaimanakah perilaku korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium dalam lingkungan HNO_3 ?
2. Bagaimanakah nilai laju korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium dalam lingkungan HNO_3 ?
3. Bagaimanakah pengaruh jenis elemen padu terhadap nilai laju korosi?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini membatasi masalah yang akan dibahas, antara lain :

1. Sampel yang digunakan adalah material amorf gelas metalik dua, tiga, dan empat komponen berbasis zirkonium yaitu $Zr_{67} Ni_{33}$, $Zr_{67} Cu_{33}$, $Zr_{70} Cu_{15} Ni_{15}$, $Zr_{65} Cu_{27,5} Al_{7,5}$ dan $Zr_{69,5} Cu_{12} Ni_{11} Al_{7,5}$
2. Sampel dianalisis dengan menggunakan alat uji korosi dengan metode polarisasi potensiostatik.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mempelajari perilaku korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium dalam lingkungan HNO_3 .
2. Menentukan nilai laju korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium.
3. Mempelajari pengaruh jenis elemen pepadu terhadap nilai laju korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium.

1.5 Manfaat penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang perilaku korosi material amorf gelas metalik berbasis zirkonium dalam lingkungan HNO_3 , serta mengetahui pengaruh jenis elemen pepadu terhadap nilai laju korosinya.
2. Memberikan masukan yang berarti bagi fisikawan sehingga memperoleh kajian untuk membuat material yang mempunyai daya tahan yang unggul terhadap korosi (resistan terhadap korosi).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembentukan Struktur Gelas

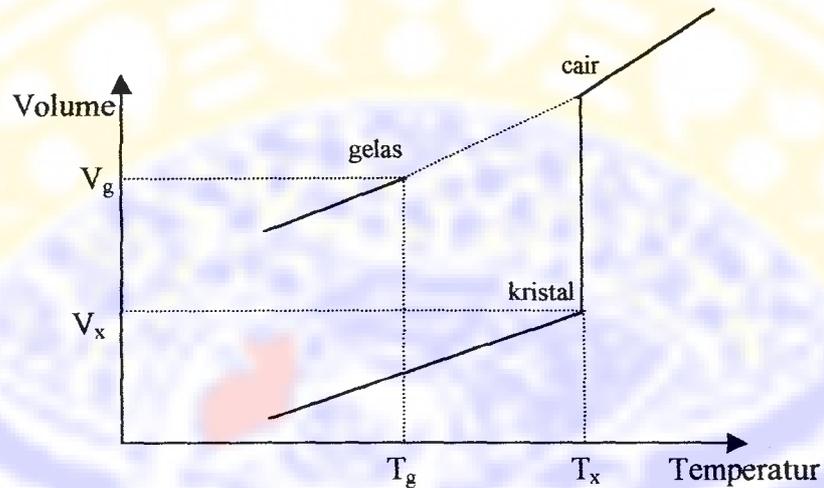
Ditinjau dari susunan atom-atomnya, padatan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu padatan kristal dan padatan amorf. Gelas metalik adalah metal yang mempunyai struktur amorf, yang ditandai dengan adanya titik transisi, yaitu titik transisi gelas. Gelas metalik dapat disintesis dari fasa cairnya melalui pendinginan dengan kecepatan tinggi atau metode pemadatan cepat. Kurva pendinginan padatan dari fasa cairnya dapat dilihat pada gambar 2.1.

Pendinginan dari fasa cair ke padatan kristal maupun padatan amorf akan sangat tergantung pada laju pendinginan ($\Delta T/\Delta t$). Semakin besar laju pendinginan yang diberikan, maka temperatur kristalisasi bahan gelas metalik tersebut akan semakin meningkat (Schoers, 2000).

Berdasarkan kurva pendinginan padatan dari fasa cairnya (Gambar 2.1), laju pendinginan tidak hanya terjadi pada satu titik, tetapi pada suatu daerah. Dengan demikian temperatur transisi gelas T_g merupakan suatu daerah, dimana struktur padatan akan menjadi amorf. Parameter lainnya adalah titik kristalisasi. Kristalisasi akan terjadi jika sampel didinginkan secara perlahan-lahan dari keadaan cair. Kemampuan paduan untuk membentuk struktur gelas yang tinggi (mudah terbentuk paduan dengan struktur amorf) mengikuti aturan empirik (Inoue dan Zhang, 1996) :

1. Paduan terdiri dari 3 elemen penyusun.
2. Perbedaan ukuran atom elemen penyusun lebih besar dari 12%.

3. Panas pencampuran antara elemen paduan harus negatif (ΔG pencampuran < 0).



Gambar 2.1. Kurva pendinginan padatan dari fasa cair (Koester, 1993)

Keterangan :

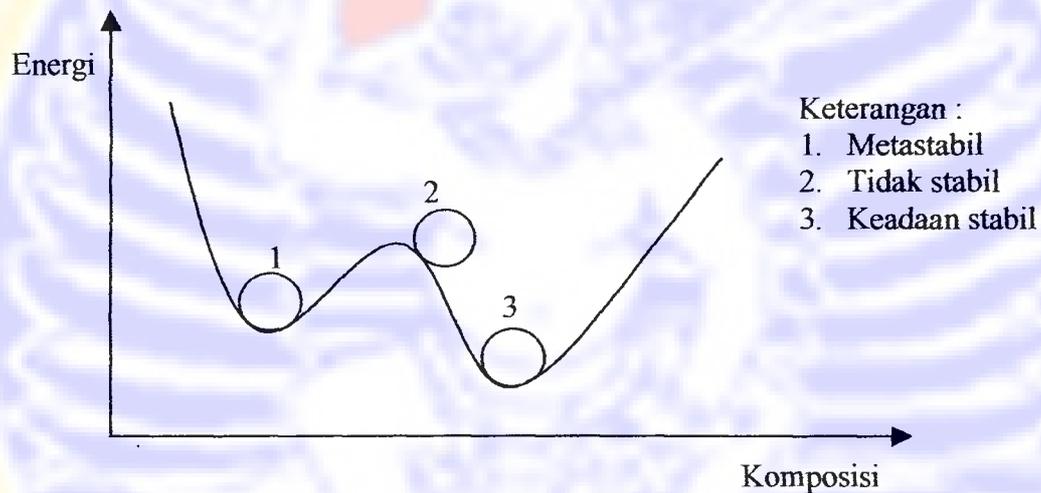
V_g : Fraksi volume gelas T_g : Temperatur gelas

V_x : Fraksi volume kristal T_x : Temperatur kristalisasi

Beberapa penelitian aktual dilakukan oleh Koester dkk. (1999), Meinhardt (1997), dan Koester (1993) dalam rangka memperbaiki kinerja material. Penelitian tersebut terkait dengan kondisi struktur mikro (kristal atau amorf) baik melalui parameter sintesis material yaitu temperatur, waktu dan tekanan, maupun melalui penambahan elemen unsur pepadu dengan prosentase $< 3\%$.

2.2. Stabilitas Bahan Gelas Metalik

Gelas metalik merupakan metal dengan atom-atom yang tersusun periodik dan berjangkauan pendek. Susunan gelas metalik pertama kali ditemukan oleh P. Duwez pada tahun 1960, yaitu gelas metalik dari paduan Au-Si (Klement, 1960). Bahan gelas metalik secara termodinamik berada pada keadaan metastabil, artinya struktur ini dengan mudah akan bertransformasi menuju ke keadaan yang lebih stabil jika mendapatkan tambahan energi (gambar 2.2).



Gambar 2.2. Diagram skematik keseimbangan (West, 1985)

Jika bahan gelas metalik diberi perlakuan panas, maka bahan akan mendapatkan tambahan energi yang akan digunakan untuk transformasi fasa dari amorf menuju kristal (gambar 2.1). Sebab kondisi kristal merupakan keadaan yang lebih stabil dibandingkan amorf maupun cair.

Transformasi ini bisa terjadi jika bahan dengan struktur amorf mendapatkan perlakuan panas, bereaksi dengan atmosfer seperti udara luar atau dengan adanya gaya gesek serta perlakuan mekanik lainnya. Transformasi yang

dihasilkan adalah struktur kristal baik penuh (kristalisasi sempurna) maupun sebagian (kristalisasi sebagian). Struktur amorf dapat ditandai dengan adanya titik transisi yang disebut dengan titik transisi gelas, dan dapat disintesis dari fasa cairnya melalui pendinginan dengan kecepatan tinggi atau pemadatan cepat.

2.3. Korosi

Korosi atau pengkaratan merupakan fenomena kimia pada bahan - bahan logam pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang kontak langsung dengan lingkungan berair dan oksigen. Dengan pengertian lain korosi adalah penurunan mutu logam akibat reaksi kimia dengan lingkungannya (Trethewey,1991). Korosi memulai proses perusakannya sebagai sebab dari luka yang timbul pada permukaan metal, pada bagian yang dilas, atau disebabkan adanya tegangan.

Faktor yang berpengaruh terhadap korosi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu yang berasal dari bahan itu sendiri dan dari lingkungan. Faktor dari bahan meliputi kemurnian bahan, struktur bahan, bentuk kristal, unsur - unsur kelumit yang ada dalam bahan, teknik pencampuran bahan dan sebagainya. Faktor dari lingkungan meliputi suhu, kelembaban, keberadaan zat - zat kimia yang bersifat korosif dan sebagainya.

Bahan - bahan korosif (dapat menyebabkan korosi) terdiri atas asam, basa serta garam, baik dalam senyawa an-organik dan organik. Flour, Hidrogen Fluorida beserta persenyawaan - persenyawaannya dikenal sebagai bahan korosif. Ketika atom logam mengalami suatu reaksi korosi, atom itu diubah menjadi

sebuah ion melalui reaksi dengan suatu unsur yang terdapat di lingkungannya (Trethewey,1991).

Penurunan mutu logam tidak hanya melibatkan reaksi kimia namun juga reaksi elektro kimia, yakni antara bahan - bahan bersangkutan terjadi perpindahan elektron. Karena elektron adalah sesuatu yang bermuatan negatif, maka perpindahannya menimbulkan arus listrik, sehingga reaksi demikian dipengaruhi oleh potensial listrik.

Adapun tahap - tahap terjadinya korosi pada logam adalah sebagai berikut:

1. Terbentuknya awal luka atau lubang.
2. Proses autocatalyc mempercepat larutan yang bersifat korosif terkonsentrasi dan membuat larutan tersebut menjadi lebih agresif.
3. Kebocoran timbul apabila lubang menembus permukaan.

2.3.1. Dasar-Dasar Korosi

2.3.1.1. Sel Elektrokimia

Pada dasarnya semua proses korosi identik dengan sebuah sel elektrokimia yang terdiri dari:

- Anoda
- Katoda
- Elektrolit
- Rangkaian listrik

2.3.1.1.1. Anoda

Seng yang mempunyai valensi nol, larut pada elektrolit sebagai ion seng yang positif. Valensi +2, ini berarti seng telah teroksidasi pada saat masuk ke

dalam elektrolit, seng meninggalkan 2 muatan negatif dalam bentuk elektron.

Reaksinya adalah sebagai berikut:



Jika dimisalkan simbol M digunakan sebagai atom logam yang terdapat dalam struktur padatnya, kita dapat menggambarkan korosi melalui persamaan yang sebenarnya adalah reaksi yang terjadi pada anoda sebagai berikut:



Bilangan bulat z, biasanya mempunyai harga 1, 2 atau 3. Harga - harga z yang lebih tinggi juga ada tetapi jarang. Persamaan (2.2) adalah bentuk paling umum suatu reaksi korosi dan menyatakan bahwa atom - atom logam dapat melepaskan lebih dari satu elektron. Dari harga - harga z yang dimungkinkan, 2 merupakan yang paling umum atau lazim. Harga z ini disebut valensi dan bukan suatu hal yang aneh bila logam mempunyai valensi lebih dari satu. Sebagai contoh besi, bahan paling penting dalam perindustrian ketika digunakan dalam bentuk baja, mempunyai valensi 2 dan 3.

Persamaan (2.2) adalah tidak menggambarkan proses yang lengkap, sesuai dengan prinsip elektronnetralitas. Sebuah ion positif telah dikeluarkan dari suatu unsur netral, tetapi tidak demikian halnya dengan ion negatif.

Persamaan diatas disebut persamaan setengah reaksi karena tidak lengkap meskipun telah dapat menyatakan peristiwa korosi yang sebenarnya.

2.3.1.1.2. Katoda

Reaksi pada katoda terjadi karena adanya konsumsi elektron dari anoda.

Pada elektrolit yang asam akan banyak terbentuk ion hidrogen (makin rendah pH

maka makin besar jumlah ion hidrogen), ion hidrogen ini akan tereduksi pada katoda dan terbentuk gas hidrogen (valensi berubah dari +1 untuk setiap hidrogen menjadi nol untuk gas H₂). Demikian juga pada larutan asam, oksigen akan tereduksi menjadi :



Pada elektrolit yang netral atau basa, reaksi katodiknya akan berbeda. Harus ada oksigen yang larut di dalam elektrolit agar reaksi berlanjut.

Pada anoda reaksi akan sama seperti pada elektrolit yang asam walaupun pada katoda tidak terbentuk gas hidrogen, akan tetapi oksigen yang terlarut akan tereduksi seperti reaksi berikut :



2.3.1.1.3. Elektrolit

Elektrolit adalah larutan yang dapat menghantarkan listrik. Kemampuan untuk menghantar ini disebabkan adanya ion di dalam larutan.



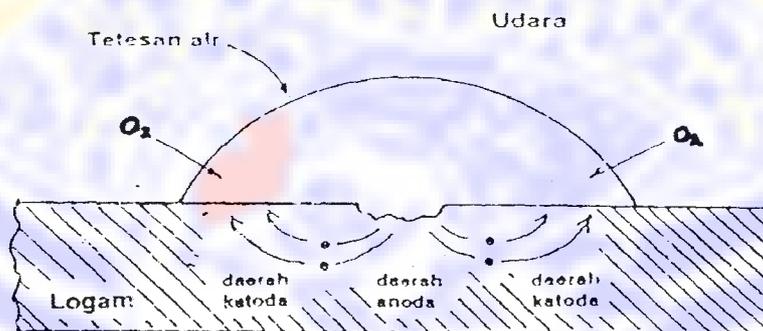
Elektrolit ini dapat terdiri dari beberapa jenis larutan seperti : air laut, air hujan, asam, basa dan lain sebagainya. Oksigen biasanya larut di dalam elektrolit yang akan memberikan pengaruh yang agresif pada korosi logam.

2.3.1.1.4. Rangkaian arus listrik

Reaksi-reaksi yang tertulis di atas menggambarkan konsumsi dari elektron pada katoda sepanjang reaksi itu berlangsung, arus listrik akan mengalir dan proses korosi akan berlangsung.

2.3.2. Terbentuknya Sel Korosi

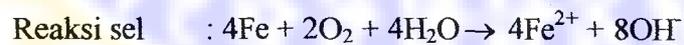
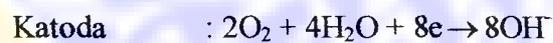
Dari keempat unsur diatas secara skematis dapat dijelaskan bagaimana terbentuknya sel korosi dan pengkaratan. Dibawah ini diberikan skematis terbentuknya sel korosi dari satu tetesan air pada permukaan logam yang cacat.

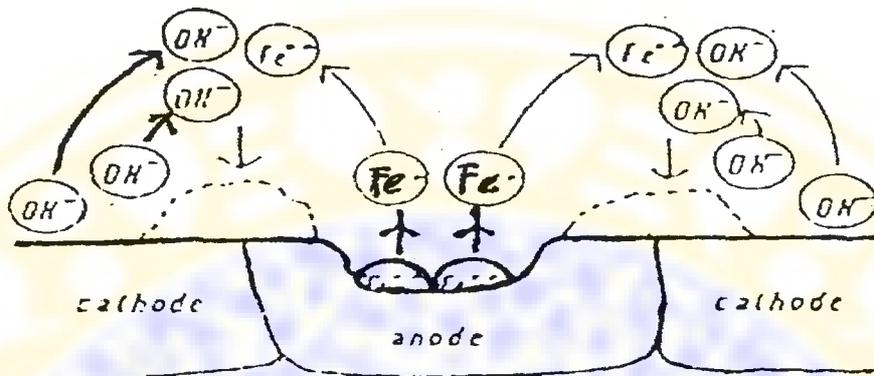


Gambar 2.3. Terbentuknya Sel Korosi

Dengan adanya daerah katoda, anoda dan media elektrolit terbentuklah suatu sel korosi dimana proses korosi berlangsung.

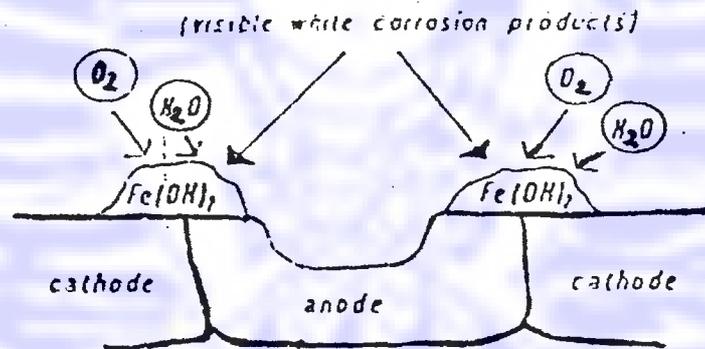
Reaksi elektrokimia pada korosi baja dalam lingkungan netral (gambar 2.4a) adalah sebagai berikut:





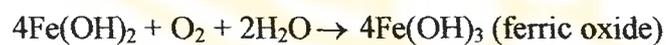
Gambar 2.4a. Reaksi elektrokimia pada korosi baja

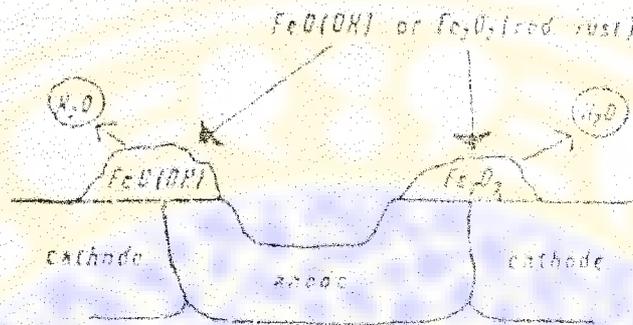
Dalam kondisi netral Fe^{2+} akan terhidrolisa membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_2$ yang bila batas kelarutannya telah terlampaui akan mengendap (lihat gambar 2.4b).



Gambar 2.4b. Terbentuknya Ferrous Hydroxide

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ teroksidasi membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$





Gambar 2.4c. Mekanisme terbentuknya karat

Pembentukan karat berdasarkan reaksi sebagai berikut (gambar 2.4c) :



Atau



2.3.3. Jenis-Jenis Korosi

Dari perbedaan-perbedaan yang menyebabkan korosi maka jenis-jenis korosi dapat dikelompokkan sebagai berikut :

2.3.3.1. Korosi Merata (Uniform Corrosion)

Korosi merata adalah bentuk umum dari korosi. Pada korosi ini, logam mengalami kerusakan dengan laju yang sama (hampir sama) diseluruh permukaan. Salah satu penyebab dari korosi merata adalah disebabkan oleh atmosfer. Kerusakan yang diakibatkan korosi merata cukup besar (ditinjau dari segi jumlah atau berat logam yang terkorosi), maka korosi jenis ini harus diwaspadai.

2.3.3.2. Korosi Sumuran (Pitting Corrosion)

Korosi sumuran terjadi karena suatu serangan yang intensif secara setempat, membentuk suatu sumuran. Umumnya diameter sumuran ini relatif kecil dan tumbuh mengikuti arah gravitasi, dengan diameternya lebih kecil daripada kedalamannya.

2.3.3.3. Korosi Celah (Crevice Corrosion)

Korosi celah adalah korosi yang terjadi pada daerah celahan atau daerah-daerah yang tersembunyi pada permukaan logam yang berada dalam lingkungan korosif. Korosi ini terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi oksigen antara daerah celahan dan sekitarnya.

Berdasarkan mekanisme korosi celah, ada 2 kemungkinan yang dapat mengakibatkannya antara lain :

a. Perbedaan konsentrasi oksigen

Larutan yang berada di dalam celah yang terisolasi dari larutan semula yang menyebabkan kandungan oksigennya menjadi bertambah sedikit. Sedangkan larutan dibagian luar secara kontinyu kandungan oksigennya digantikan sehingga tetap tinggi. Terjadinya perbedaan konsentrasi menyebabkan terbentuknya sel korosi dimana daerah di dalam menjadi anodik dan daerah luar menjadi katodik.

b. Konsentrasi ion logam

Demikian halnya dimana perbedaan konsentrasi ion logam di dalam celah yang berbeda dengan diluar menyebabkan terbentuknya sel korosi. Konsentrasi ion logam yang tinggi menjadi katodik sedangkan konsentrasi ion logam yang rendah menjadi anodik.

2.3.3.4. Korosi Antar Butir (Intergranular Corrosion)

Korosi antar butir sering terjadi pada baja tahan karat sebagai akibat perlakuan panas atau pengelasan. Dalam keadaan tertentu bidang antar muka butiran menjadi sangat reaktif dan menyebabkan korosi antar butir, yaitu korosi lokal di sekitar butiran, yang menyebabkan penurunan kekuatan bahan.

Bila material tahan korosi dipanaskan pada suhu 500-800°C, akan mudah mengalami korosi antar butir, membentuk karbida krom (Cr_{23}C_6) yang tidak larut dan mengendap di batas butir. Pada kondisi ini akan terbentuk daerah yang kekurangan krom (disekitar batas butir) yang sangat mudah mengalami serangan korosi.

2.3.3.5. Korosi Galvanik (Galvanic Corrosion)

Korosi galvanik terjadi bila dua logam atau lebih yang berbeda berada dalam suatu lingkungan dan saling berhubungan. Pada kondisi ini akan timbul suatu tegangan listrik sedemikian sehingga logam yang lebih anodik (logam yang pada kondisi tidak terhubung mempunyai potensial yang lebih negatif) akan bertindak sebagai anoda, sedangkan logam lainnya menjadi katoda. Pada daerah anoda akan terjadi pelarutan logam karena terjadi oksidasi.

Dibandingkan dengan sifat masing-masing logam sebelum saling berhubungan, maka dalam kondisi tersebut diatas, laju korosi logam yang lebih anodik akan dipercepat, sedangkan laju korosi logam yang lebih katodik akan ditekan atau berhenti sama sekali. Logam yang potensialnya lebih negatif atau aktif (M) akan melepaskan elektron menuju logam yang mempunyai potensial yang lebih positif (N). Reaksi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:



Logam yang aktif, M laju reaksinya meningkat dengan melepaskan elektron. M pada keadaan ini berlaku sebagai anoda sedangkan untuk logam yang lebih positif (N) reaksi anodiknya sebagai berikut:



Laju reaksinya menurun karena ada kelebihan elektron yang diberikan oleh M. N disini berlaku sebagai katoda.

2.3.3.6. Korosi Selektif (Selective Corrosion)

Korosi selektif adalah terlarutnya suatu unsur yang bersifat lebih anodik dari suatu paduan. Contoh utama dari korosi ini adalah terlarutnya seng dari kuningan, yang dikenal sebagai proses "Dezincfication". Kejadian yang sama bisa terjadi terhadap unsur-unsur aluminium, besi, krom dan silikon dari suatu paduan. Dalam proses dezincfication, logam seng akan mengalami pelarutan sehingga yang tertinggal hanyalah suatu kerangka dari tembaga.

2.3.3.7. Korosi Tegang (Stress Corrosion Cracking)

Korosi Tegang (SCC) adalah korosi yang terjadi akibat adanya aksi gabungan antara lingkungan korosif dan tegangan statis. Tegangan ini dapat berupa tegangan dalam (sisa) atau tegangan dari luar. Awal retakan dipermukaan dapat dimulai dari suatu korosi sumuran yang kemudian berkembang.

2.3.3.8. Korosi Erosi (Erosion Corrosion)

Korosi erosi adalah gejala percepatan korosi atau peningkatan laju kerusakan logam karena adanya aliran fluida yang bersifat korosif pada permukaan logam.

Biasanya aliran ini sangat cepat seperti aliran fluida dalam pipa, sehingga dapat menimbulkan keausan mekanik atau abrasi. Logam yang tererosi terlepas secara mekanik maupun sebagai ion karena adanya reaksi kimia.

2.4. Penentuan Laju Korosi dengan Metode Polarisasi Potensiostatik

Untuk mengetahui kualitas ketahanan terhadap serangan korosi pada material amorf gelas metalik berbasis Zirkonium dalam penelitian ini didasarkan pada nilai laju korosi dari masing-masing logam. Pengukuran intensitas arus korosi logam digunakan sebagai ukuran ketahanan korosi.

Ketepatan penentuan harga intensitas arus korosi (I_{kor}) sangat diperlukan, karena I_{kor} berbanding langsung dengan besarnya laju korosi sesuatu logam di dalam lingkungannya. Hal ini sesuai dengan persamaan (2.6):

$$\text{Laju korosi (mpy)} = \frac{(0,13)(I_{kor})(EW)}{d} \quad (2.6)$$

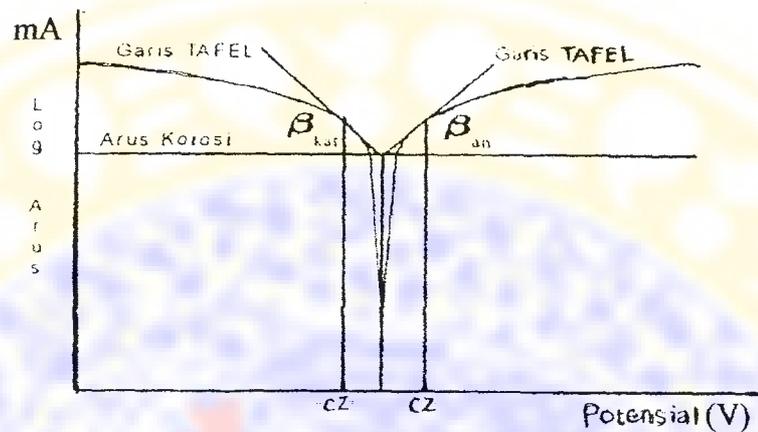
Dengan: 0,13 = faktor konversi metrik dan waktu

$$I_{kor} = \text{intensitas arus korosi } (\mu A / m^2)$$

$$EW = \text{berat ekuivalen (berat atom / valensi)}$$

$$d = \text{densitas (g / cm}^3\text{)}$$

Nilai I_{kor} diperoleh dengan melakukan analisa "Tafel" secara semi manual dari kurva potensial lawan log intensitas arus melalui komputer yang dirangkai dengan potensiostat PGS-201T.



Gambar 2.5. Kurva potensial lawan log intensitas arus korosi

Pada gambar 2.5. ditunjukkan kurva potensial lawan log intensitas arus korosi yang telah dilakukan analisa Tafel.

Penentuan potensial batas ruas perhitungan (calculation zone "CZ") dari kurva katoda maupun anoda berpengaruh pada hasil perhitungan slope kurva katoda (" β_{kat} ") dan anoda (" β_{an} ") yang secara langsung menentukan harga I_{kor} .

Hal ini ditunjukkan oleh persamaan (Stern-Geary):

$$I_{kor} \left(\frac{\mu A}{cm^2} \right) = \frac{(\beta_{kat})(\beta_{an})}{2,3.(\beta_{kat} + \beta_{an})A.R_p} \quad (2.7)$$

dengan : β_{kat} = slope kurva katoda (mV)

β_{an} = slope kurva anoda (mV)

2,3 = faktor konversi

A = luas (cm^2)

R_p = tahanan polarisasi ($\text{k}\Omega / \text{cm}^2$)

Besarnya slope kurva katoda maupun anoda untuk masing-masing unsur atau jenis logam belum tentu sama, tergantung pada valensi yang bersesuaian dalam reaksi korosi yang terjadi. Pada buku manual potensiostat PGS-201T disebutkan bahwa besarnya " β_{kat} " dan " β_{an} " yang baik mendekati atau bahkan sama dengan valensi dikalikan tetapan 118, disebutkan sebagai " $118n$ " dengan n valensi logam.

Semakin besar nilai laju korosi menunjukkan bahwa suatu logam cepat terkorosi sehingga kualitas ketahanan logam tersebut terhadap serangan korosi lebih rendah.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Kegiatan penelitian ini dilakukan pada bulan Juli 2004 sampai dengan Januari 2005 dan dilaksanakan di Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Airlangga Surabaya dan Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Yogyakarta.

3.2 Bahan dan Alat Penelitian

3.2.1 Bahan Penelitian

1. Bahan yang digunakan adalah material amorf gelas metalik dua, tiga, dan empat komponen berbasis zirkonium yaitu $Zr_{67} Ni_{33}$, $Zr_{67} Cu_{33}$, $Zr_{70} Cu_{15} Ni_{15}$, $Zr_{65} Cu_{27,5} Al_{7,5}$ dan $Zr_{69,5} Cu_{12} Ni_{11} Al_{7,5}$.
2. Larutan HNO_3

3.2.2 Alat Penelitian

1. Mikrometer
2. Alat uji korosi Potensiostat PGS 201-T yang dirangkai dengan komputer
3. Jangka Sorong
4. Gelas Bejana
5. Alat pemotong logam (gunting)

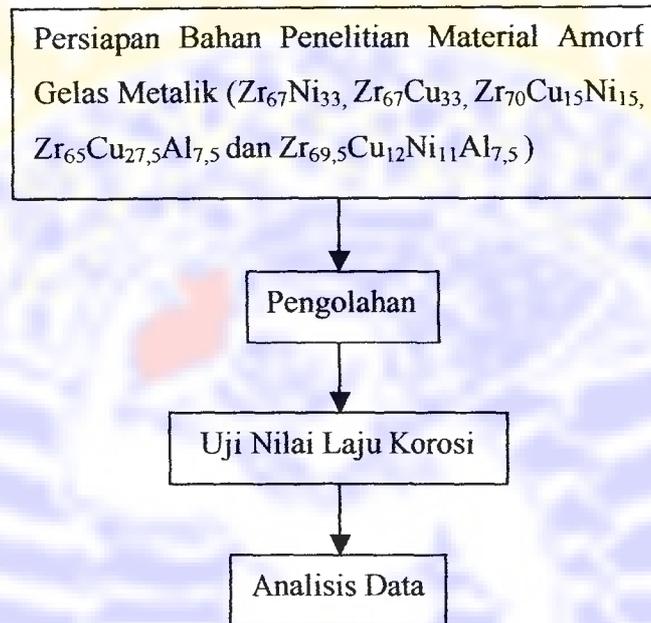
3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut ;

1. Menyiapkan bahan berupa potongan material amorf gelas metalik yang ada (dibuat dengan menggunakan peralatan Melt-Spining di laboratorium Material Science and Corrosion, University of Dortmund Republik Federal Jerman).
2. Potongan dari material amorf gelas metalik dibentuk sesuai dengan bentuk elektroda ; berupa silinder pipih dengan diameter 13 mm dan tebal 1 mm. Oleh karena sampel berupa pita (ribbon) tipis, maka sampel diletakkan di atas permukaan silinder elektroda. Masing-masing sampel permukaannya dibuat halus dan rata.
3. Menyiapkan 3 elektrode: elektroda acuan (*Reference Electrode*) elektroda kerja (*Working Elektrode*), dan elektroda pembantu (*Auxiliary Electrode*).
4. Seluruh sampel diuji nilai laju korosinya dengan metode penentuan intensitas arus korosi logam menggunakan Potensiostat PGS 201T sebagai berikut :
 - a. Salah satu pita yang telah dibentuk ditempatkan kedalam elektrode kerja dengan permukaan halus menghadap keluar (agar tercelup media pengkorosi) kemudian dipasang pada sel elektrokimia.
 - b. Elektroda kalomel dan platina dipasang pada sel elektrokimia.
 - c. Larutan HNO_3 0,005 M dimasukkan kedalam sel elektrokimia sampai semua elektroda tercelup.
 - d. Semua elektroda dihubungkan pada Potensiostat.
 - e. Pengukuran dilakukan dengan memberikan potensial pada elektrode kerja dari -1400 mV sampai $+1400$ mV dengan laju scan 20 mV permenit. Analisa dimulai dengan menekan tombol "starting" F9. Hasilnya berupa kurva potensial lawan log intensitas arus.
 - f. Kemudian bahan uji diganti dengan masing-masing sampel.

g. Penentuan intensitas arus korosi (I_{kor}).

Secara umum prosedur penelitian yang dilakukan dinyatakan pada diagram alir yang ditunjukkan seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.4. Analisis Data

3.4.1. Analisis Data Pengujian Laju Korosi

Setelah dilakukan uji laju korosi menggunakan metode penentuan intensitas arus korosi logam menggunakan potensiostat PGS-201T maka akan didapatkan kurva potensial lawan log intensitas arus. Dari kurva tersebut juga akan diperoleh nilai-nilai β_{kat} , β_{an} , tahanan polarisasi (R_p) yang selanjutnya dengan menggunakan persamaan (2.7) akan diperoleh nilai arus korosi (I_{kor}). Setelah didapatkan nilai I_{kor} , maka dengan menggunakan persamaan (2.6) akan diperoleh nilai laju korosi sampel tersebut dalam satuan mils per year (mpy). Nilai laju korosi ini dapat menunjukkan ketahanan korosi relatif (mampu korosi).

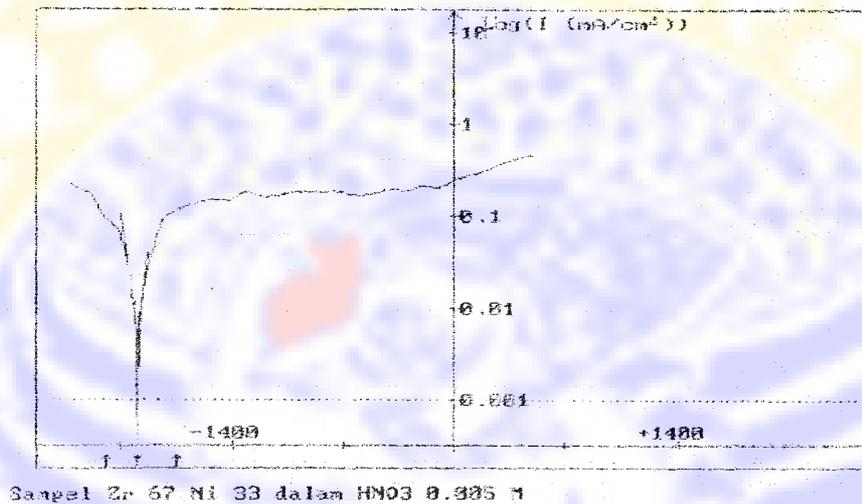
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

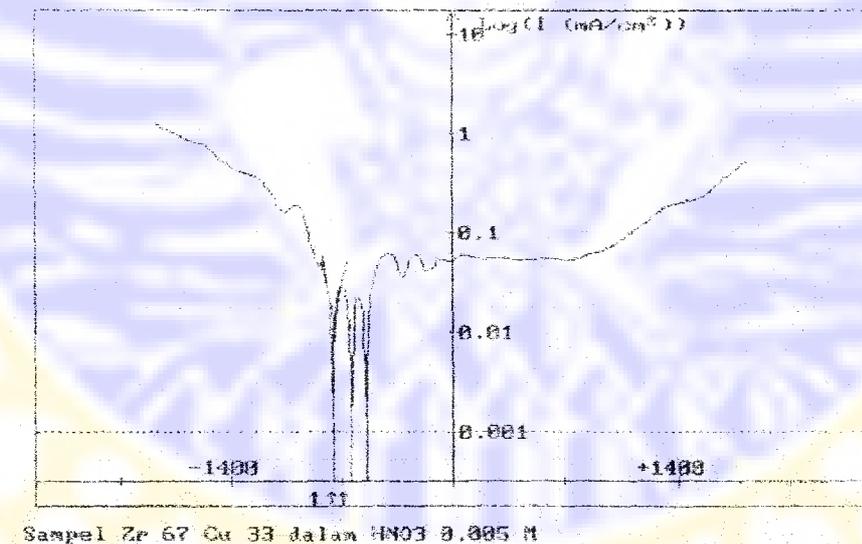
Korosi adalah gejala yang dapat timbul secara alami, pengaruhnya dialami oleh hampir semua zat dan diatur oleh perubahan-perubahan energi. Reaksi pada logam sampel dapat diukur melalui reaksi reduksi dan oksidasi. Logam sampel diletakkan pada elektroda kerja (*Working Electrode*) dan logam ini berperan sebagai kutub anoda. Selanjutnya kedalam sistem di masukkan elektroda pembantu (*Auxiliary Electrode*) berupa logam platina (Pt) yang berperan sebagai kutub katoda. Digunakan logam platina karena logam ini merupakan inert, mempunyai potensial reduksi E^0 positif sehingga tidak mudah meng-ion (bereaksi dengan lingkungannya), dan harga energi bebas Gibbs ΔG^0 nya positif dimana hal ini menunjukkan secara termodinamika tidak terjadi reaksi spontan. Adanya elektroda pembantu dimaksudkan untuk mengangkut arus dalam rangkaian. Disamping itu digunakan elektroda pembanding (*Reference Elektrode*) yang mana elektrode ini dimaksudkan sebagai titik dasar yang baik untuk acuan pengukuran potensial elektrode kerja. Arus yang mengalir melalui elektroda acuan ini harus sekecil-kecilnya sehingga dapat diabaikan. Apabila tidak demikian, elektroda ini akan ikut dalam reaksi sel dan potensialnya tidak konstan. Oleh karena itu elektroda pembantu dibutuhkan (Trethewey, 1957).

Agar reaksi reduksi dan oksidasi dapat berjalan dengan baik, maka kedalam sistem sel elektrokimia diberi potensial yang bervariasi. Potensial tersebut akan mengakibatkan arus yang bervariasi pula dan hubungan antara potensial lawan log intensitas arus yang dihasilkan menggambarkan kurva anoda dan katoda.

Setelah dilakukan 'starting' program pada potensiostat PGS-201T terhadap bahan uji pita paduan gelas metalik, diperoleh kurva potensial lawan log intensitas arus yang ditunjukkan pada gambar berikut ini :



(a)

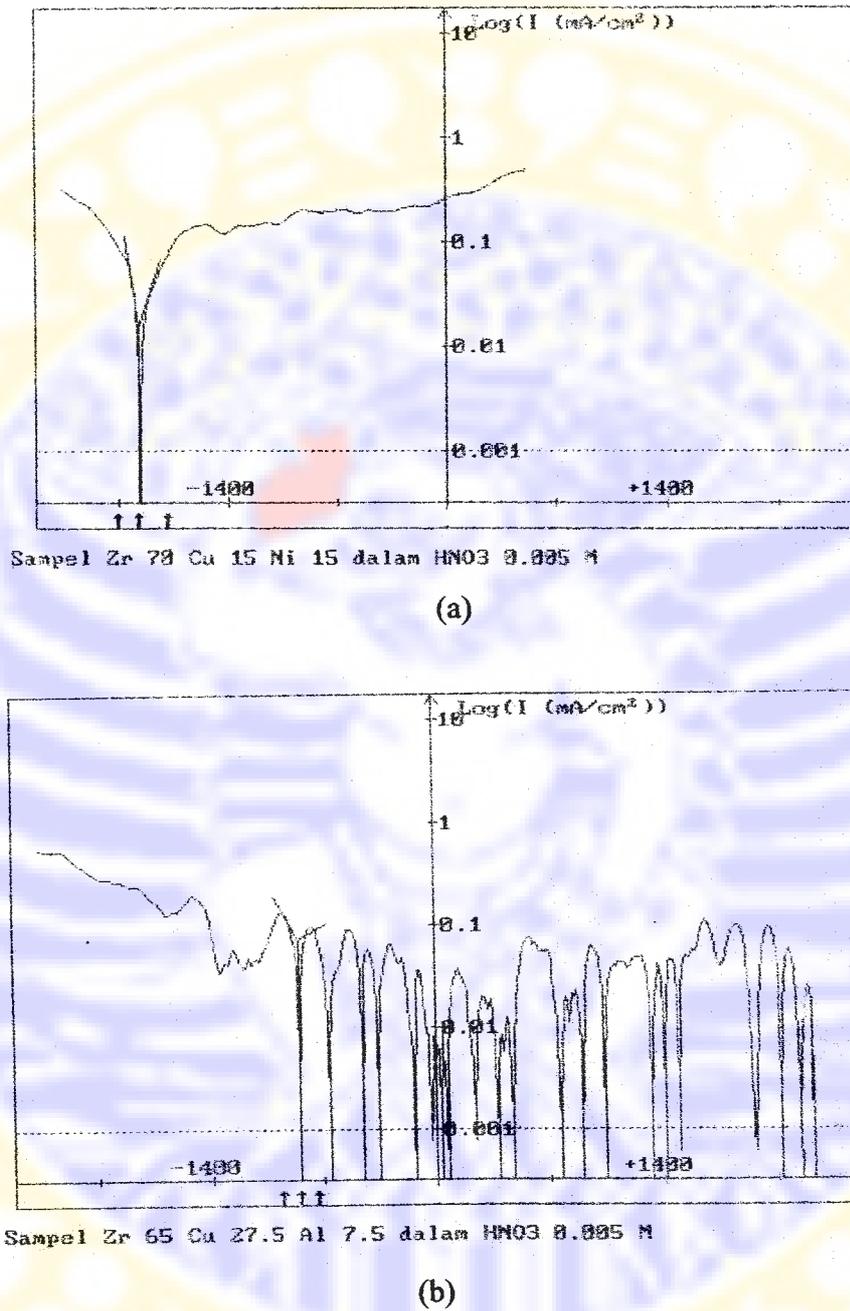


(b)

Gambar 4.1 Grafik intensitas arus korosi gelas metalik dua komponen

a. Spesimen paduan ZrNi

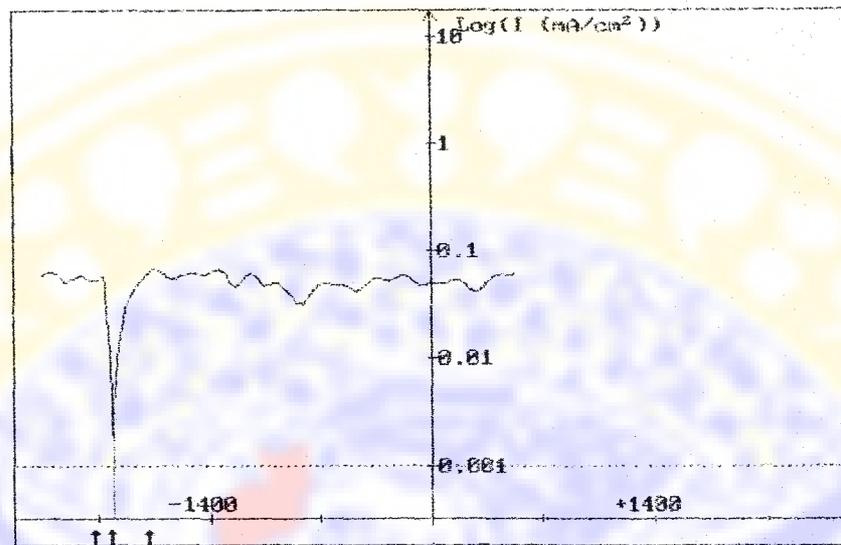
b. Spesimen paduan ZrCu



Gambar 4.2. Grafik intensitas arus korosi gelas metalik tiga komponen

a. Spesimen paduan ZrCuNi

b. Spesimen paduan ZrCuAl



Sampel Zr 59.5 Cu 12 Ni 11 Al 7.5 dalam HNO₃ 0.005 M

Gambar 4.3. Grafik intensitas arus korosi gelas metalik empat komponen (ZrCuNiAl)

Dengan melakukan analisis tafel secara semi manual diperoleh harga arus korosi I_{kor} . Teknik penentuan intensitas arus korosi dengan cepat dan benar sangat diperlukan untuk mendapatkan hasil I_{kor} yang sesungguhnya. Penentuan potensial batas ruas Calculation Zone 'CZ' dan kurva katoda maupun anoda untuk menghasilkan slope yang tepat tidak mudah untuk dilakukan, karena seringkali perlu dilakukan berulang-ulang sampai beberapa kali untuk memperoleh hasil β_{kat} atau β_{an} yang harganya mendekati atau bahkan sama dengan perhitungan yang semestinya. Besarnya β_{kat} atau β_{an} untuk setiap unsur atau logam tergantung pada valensi yang bersesuaian dengan reaksi korosi yang terjadi.

Pada sel elektrokimia didalam labu media pengkorosi (elektrolit) terdapat lalu lintas lewatnya partikel-partikel bermuatan antara dua titik polarisasi (anoda

dan katoda) yang disebut sebagai arus elektron. Gaya penggerak yang menyebabkan partikel bermuatan tersebut bergerak akibat adanya beda potensial antara dua kutub sehingga arus mengalir dari potensial tinggi ke potensial rendah. Aliran muatan listrik tersebut dirintangi oleh sesuatu yang disebut hambatan, dan di perhitungkan sebagai hambatan polarisasi pada rumusan I_{kor} . Keping uji yang kecil akan terkorosi lebih cepat dibanding keping uji yang besar, dimana ini mengungkapkan perlunya penggunaan parameter rapat arus (*current density*) agar luas logam (A) yang terkorosi ikut diperhitungkan.

Dari uji korosi yang telah dilakukan terhadap spesimen pita paduan gelas metalik dua, tiga, dan empat komponen berbasis zirkonium yaitu yaitu $Zr_{67}Ni_{33}$, $Zr_{67}Cu_{33}$, $Zr_{70}Cu_{15}Ni_{15}$, $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$ dan $Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$ maka diperoleh suatu hasil yang dapat memberikan informasi tentang perilaku korosi masing-masing material dan pengaruh jenis elemen pematu, sehingga dapat diketahui pita paduan gelas metalik yang mana yang lebih resistan terhadap korosi.

Adapun hasil perhitungan laju korosi tercantum dalam tabel 4.1 berikut :

Tabel 4.1. hasil perhitungan laju korosi masing-masing sampel

Jenis Sampel	I_{kor} ($\mu A/cm^2$)	V_{kor} (mpy)
$Zr_{67} Ni_{33}$	5,31	19,78
$Zr_{67} Cu_{33}$	12,13	27,9
$Zr_{70} Cu_{15} Ni_{15}$	14,62	104,6
$Zr_{65} Cu_{27,5} Al_{7,5}$	69,50	401
$Zr_{69,5} Cu_{12} Ni_{11} Al_{7,5}$	25,12	123,76

Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pita paduan logam $Zr_{67}Ni_{33}$ lebih resistan terhadap korosi dengan dibuktikan adanya nilai intensitas arus korosi dan laju korosi yang relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan paduan yang lain.

Sedangkan pita paduan gelas metalik $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$ menempati urutan paling tidak resistan terhadap korosi dibuktikan dengan intensitas arus korosi dan laju korosinya yang relatif lebih besar dibandingkan dengan paduan yang lain.

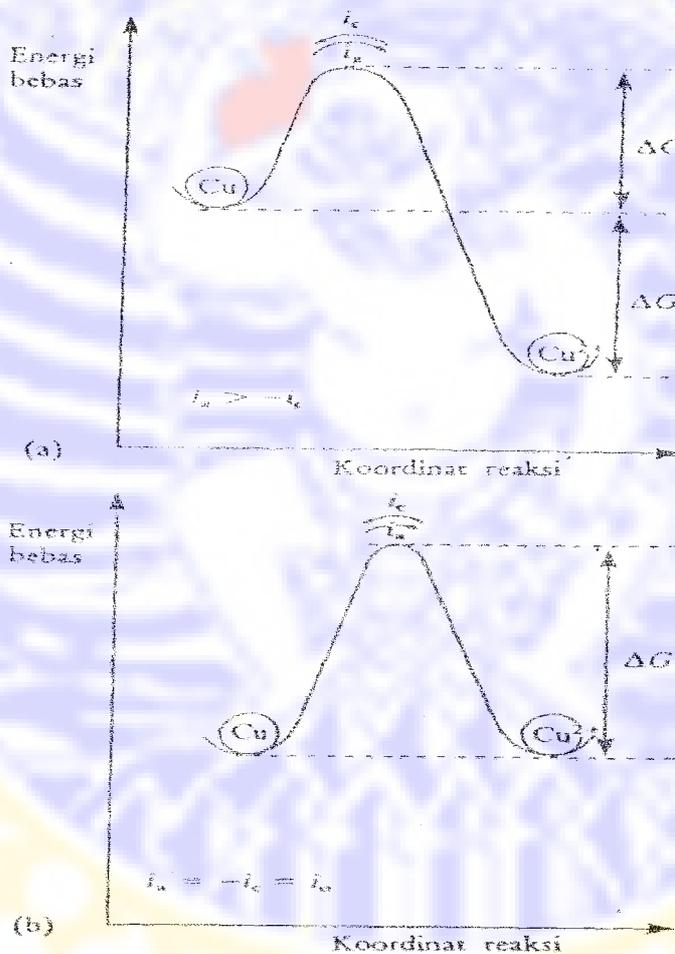
Media (lingkungan) yang korosif mempunyai energi yang cukup untuk mengalirkan atom atom unsur secara mantap melintasi perintang energi dan mengubah diri mejadi ion-ion. Unsur mulai terlarut (terkorosi) dan konsentrasi ion-ion unsur dalam media yang semula nol menjadi bertambah (Trethewey, K.R.,1991). Sepotong logam yang ditempatkan dalam sebuah elektrolit dapat bertindak sebagai anoda katoda dan penghubung listrik sendiri. Setiap bagian dari logam dapat menjadi anoda bagi bagian yang lain akibat adanya variasi-variasi dalam struktur padat logam, atau adanya lingkungan-lingkungan berlainan dipermukaannya (Trethewey, K.R.,1991).

Ketika logam dimasukkan kedalam elektrolit, peristiwa pertama yang terjadi adalah menyusupnya ion-ion logam ke sisi elektrolit pada permukaan antara logam dan elektrolit. Ion-ion logam (kation) mula-mula masih terikat dengan logam. Jika kesetimbangan diganggu dengan menambah laju reaksi maju atau reaksi mundur, suatu kesetimbangan dinamik baru akan tercapai saat anion-anion dan kation-kation mengalir berkesinambungan. Elektroda berfungsi sebagai pembawa arus pada reaksi elektroda-elektroda.

Pada tembaga (dengan menggunakan i_a dan i_c untuk menyatakan kerapatan arus reaksi maju (anoda) dan reaksi mundur (katoda)), dituliskan $Cu \xrightarrow{i_a} Cu^{2+} + 2e^-$ $\xleftarrow{i_c}$. Jika keadaan kesetimbangan tercapai dimana $i_a = -i_c$ tak ada arus netto yang mengalir. Arus sesungguhnya mengalir, tetapi sama dan berlawanan arah sehingga tidak dapat terukur, arus ini disebut arus pertukaran (i_0). Dari sini dapat dilihat nilai

intensitas arus korosi saat i_0 pada masing-masing spesimen uji seperti terlampir dalam lampiran 4-8.

Kecenderungan tembaga untuk terkorosi berkurang begitu arus beranjak dari nol dan harga ΔG mengecil, begitu pula pada potensialnya, dimana keadaan ini memenuhi hukum Faraday “Energi-energi termodinamika atom dan ion logam cenderung saling mendekati”.



Gambar 4.4. a. Profil energi untuk tembaga $i_a > -i_c$

b. Profil energi untuk tembaga yang dalam kesetimbangan dengan larutan ion-ion bervalensi duanya; $i_a = -i_c = i_0$

Laju reaksi berkurang apabila perintang energi bebas aktivasi meningkat. Segera setelah ion-ion tembaga terdapat dalam larutan, ada peluang bagi ion-ion itu untuk kembali memintas perintang energi dan bergabung lagi dengan logamnya. Laju penempelan ini diatur oleh besarnya energi bebas aktivasi yang arahnya berlawanan, yang besarnya pada permulaan lebih dari energi pada reaksi maju. Perintang energi bebas ini mengecil ketika energi kedua unsur mendekat dan pada akhirnya tercapai keadaan laju perlambatan reaksi maju sama besarnya dengan laju percepatan reaksi mundur sehingga kesetimbangan terjadi (Gambar 4.4).

Kurva pada potensial yang lebih negatif daripada E_{kor} (daerah nol pada ekstrapolasi Tafel) menggambarkan logam dalam kondisi katodik. Pada potensial yang positif (dibanding E_{kor}) kerapatan arus meningkat sampai suatu harga maksimum, tapi tiba-tiba turun ke nilai sangat rendah dimana pada saat tersebut logam mengalami kondisi pasif karena terlindungi oleh selaput korosi. Kemudian pada pertambahan potensial, energi bebas yang tersedia melebihi kemampuan proteksi lapisan pasivasi dimana selaput pecah dan korosi mengalami percepatan lagi. Daerah ini disebut transpasivasi (Schreiber C.F., 1986).

Pasivasi merupakan fenomena yang biasa teramati selama terjadinya proses korosi. Secara sederhana pasivasi didefinisikan sebagai berkurangnya reaktifitas kimia akibat kondisi lingkungannya (Uhlig H., 1978). Definisi yang lain menyebutkan bahwa pasivasi merupakan gejala meningkatnya potensial elektrode menuju sebuah nilai yang rendah atau meningkatnya pengoksidasi dalam larutan atau udara (gas) dimana laju oksidasi lebih rendah daripada konsentrasi pengoksidasi (Wagner C., 1957). Pada pasivasi terdapat beda energi antara sebuah logam dan salah satu senyawa kimianya, dalam hal ini oksida logam yang

bersangkutan. Logam berperilaku sebagai sekumpulan atom, tetapi dalam oksidanya ion-ionlah yang berperan. Logam mempunyai tingkat energi lebih tinggi ketimbang oksidanya, oleh karena itu ia memasok elektron-elektron untuk rangkaian, atau dengan kata lain logam itu terkorosi. Jadi pada sepotong logam yang sebagian tersalut oksida, logam akan membentuk sebuah sel korosi lokal dengan oksidanya dan mengalami korosi. Jika pada selaput tipis itu tidak ada pori-pori dan lapisan oksida itu menutupi seluruh permukaan logam, korosi tidak akan terjadi.

Asam nitrat adalah agen pengoksidasi artinya mampu mengubah logam menjadi oksida. Larutan ini menyebabkan terbentuknya lapisan oksida tidak reaktif yang tipis dipermukaannya, dimana memisahkan spesimen dari lingkungannya. Namun selaput ini sangat mudah pecah dan jika pecah menyebabkan korosi terjadi lagi secara cepat.

Pada logam transisi, adsorpsi oksigen pada umumnya lebih stabil secara termodinamik daripada logam oksidanya (Uhlig H., 1967). Logam Zirkonium termasuk logam transisi sehingga pada paduan zirkonium dua, tiga, maupun empat komponen, unsur Zr lambat membentuk oksidanya (ZrO_2) dibandingkan unsur pepadunya. Media cair yang diadsorpsi berpindah dari permukaan logam oleh lapisan pasivasi selama reaksi pasivasi berlangsung. Perpindahan ini disebabkan masuknya perubahan energi bebas yang lebih besar daripada adsorpsi cairan pada lapisan pasivasi (King P. Dan Uhlig H., 1959). Lapisan pasivasi adalah lapisan oksida hasil reaksi korosi yang terbentuk pada permukaan logam. Adanya lapisan pasivasi menyebabkan proses korosi yang terjadi terhambat. Akibatnya arus korosi yang terdeteksi sangat kecil, sedangkan pada konsentrasi nitrat yang lebih tinggi,

lapisan pasivasinya rusak (terkelupas) akibat reaktivitas ion nitrat. Oleh karena itu sebaiknya menggunakan media larutan yang tidak terlalu rendah konsentrasinya.

Pasivator adalah kelompok pengoksidasi inorganik yang bereaksi dengan rendah ketika kontak langsung dengan logamnya, tetapi mereduksi cepat dengan arus katodik (i_c) (Winston R, 1985). Pada nitrat, densitas arus anodik meningkat, pasivator bereaksi dan arus korosi menurun. Oksida-oksida logam sebagian besar merupakan senyawa ionik. Ion logam dan ion-ion yang bertempat pada posisi intertisi, disebut bahan tipe-n atau tipe pembawa muatan negatif, sedangkan oksida yang kekurangan ion logam dan tempat-tempat kosong itu berada di sisi kation disebut bahan tipe-p atau pembawa muatan positif. Oksida Al_2O_3 termasuk oksida tipe-n sedangkan Cu_2O dan NiO termasuk oksida tipe-p.

Pada grafik intensitas arus korosi $Zr_{67}Ni_{33}$ dan $Zr_{70}Cu_{15}Ni_{15}$ tidak ditemukan adanya gejala pasivasi yang diakibatkan oleh oksida logam paduannya karena jika dilihat dari efek pepaduan valensi unsur paduan lebih tinggi dibanding logam utama, sehingga berefek menambah jumlah kekosongan sehingga ion berupaya menutupi kekosongan sehingga tidak terjadi pasivasi. Di sisi lain, oksida NiO yang terbentuk bereaksi dengan HNO_2^- hanya menambah konsentrasi oksigen sehingga logam paduan terkorosi tanpa terdapat pasivasi dan semakin lama mendekati kesetimbangan karena paduan terproteksi katodik oleh oksidanya dimana hal ini menyebabkan nilai laju korosi yang rendah pada paduan $Zr_{67}Ni_{33}$. Adapun nilai laju korosi yang cukup besar pada logam paduan $Zr_{70}Cu_{15}Ni_{15}$ akibat adanya kekosongan (*vacancy*) pada paduan unsur Cu dan Ni yang dapat dijelaskan sebagai berikut : Logam Ni mempunyai 0,6 *d*-elektron *vacancy* per atom atau 0,6 elektron tak berpasangan (diukur secara magnetik). Sedangkan logam Cu dan Al masing-

masing 0,8 dan 1,7 *d*-elektron *vacancy* per atom. Ni mempunyai konfigurasi $3d^84s^2$ mengikat sampai 2 kekosongan elektron, sedang pada Cu mempunyai konfigurasi $3d^{10}4s^1$. Pada proses pembentukan ikatan pada logam, elektron tak berpasangan dari atom tunggal Ni membutuhkan elektron tidak berpasangan dari atom tetangga (Cu). Jika diasumsikan bahwa *intercoupling* *d*-elektron meningkat dengan pendekatan atom nikel pada paduan, ia merupakan fungsi linear dari konsentrasi nikel. Kekosongan per atom nikel adalah sama dengan $2 - (2 - 0,6) \text{ pada } \%Ni/100$ menurut 2 kekosongan untuk 0%Ni dan 0,6 kekosongan untuk 100%Ni (Uhlig, 1957). Paduan akan kehilangan karakternya sebagai logam transisi mulai saat komposisi untuk jumlah total *d*-*vacancies* sama dengan jumlah total elektron donor (1/atom Cu). Hal ini menyebabkan logam Cu terkorosi terlebih dahulu pada paduan $Zr_{70}Cu_{15}Ni_{15}$ sesuai pernyataan bahwa oksidasi logam tembaga lebih cepat daripada besi dan lebih cepat lagi daripada nikel (Lustman B., 1946). Lain halnya jika komposisi Ni lebih banyak maka dalam paduan tersebut Ni menutupi kekosongan (*vacancy*) yang dibutuhkan Cu sehingga mengurangi nilai I_{kor} karena membuat logam terproteksi secara katodik.

Sedangkan pada grafik $Zr_{67}Cu_{33}$ dan $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$ terdapat penurunan arus korosi pada daerah potensial 700 mV yang menggambarkan proteksi logam paduan akibat kehadiran hasil korosi atau gejala pasivasi yang tampak jelas dibandingkan dengan $Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$ yang terlihat sangat rendah sekali. Pada paduan $Zr_{67}Cu_{33}$, logam oksida yang terbentuk yaitu Cu_2O adalah termasuk jenis oksida tipe-p dimana Cu_2^+ didalam oksida Cu_2O adalah *positive hole* (kekurangan elektron) yang saat terjadi oksidasi, kekosongan kation dan *positive hole* terbentuk pada O_2 diluar dan permukaan oksida hasil pasivasi kemudian berpindah ke

permukaan logam. Pada paduan $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$, Al_2O_3 sebagai oksida logam aluminium mengurangi konsentrasi ion logam intertisi dan menambah elektron bebas sehingga mudah bereaksi untuk membentuk lapisan pasivasi. Ion Al^{3+} yang dimasukkan pada paduan $Zr_{67}Cu_{33}$ dimana keduanya bervalensi 2 menyebabkan tersisanya sebuah lobang (*hole*) dalam logam yang ditempati oleh $Zr_{67}Cu_{33}$

Potensial korosi sebuah logam ditentukan oleh banyaknya muatan negatif yang terbentuk ketika logam itu dimasukkan kedalam media pengkorosif. Dilihat dari sifat oksidasinya, nilai potensial oksidasi logam Al paling tinggi (1,6 V) dibandingkan dengan logam Cu (0,387 V) maupun Ni (0.9 V) sehingga dalam paduan $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$ logam Al terkorosi terlebih dahulu dibandingkan logam Cu. Lapisan oksida tipis yang terbentuk di seluruh permukaan logam mengendalikan laju korosi dan melindungi logam dibawahnya. Jika selaput oksida rusak korosi logam ini akan berlangsung cepat sekali (Trethewey, 1957). Hal inilah yang terjadi pada paduan $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$, dimana lapisan pelindung hasil pasivasi mudah terkelupas akibat aktifitas Al dan Cu seperti yang terlihat pada grafik bahwa intensitas arus korosi turun beberapa kali. $CuAl_2$ bersifat katodik terhadap matriks, dan menimbulkan kerusakan korosi di daerah sekitar partikel-partikel yang mengendap.

Pada paduan $Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$ lapisan oksida logam paduan yang terbentuk sangat tipis, sehingga perbedaan konsentrasi ion antara oksida dan logam rendah mengakibatkan perbedaan tingkat energi pun rendah dan arus yang berjalan antar keduanya kecil, terlihat adanya penurunan densitas arus korosi yang minim pada kurva.

Tahapan korosi selanjutnya adalah terjadinya transpasivasi yang dapat ditunjukkan dengan naiknya potensial serta kerapatan arus anodik kritisnya atau arus korosi. Transpasivasi ini diakibatkan oleh rusaknya lapisan oksida yang berfungsi sebagai pelindung pada daerah potensial yang sangat positif.

Dilihat dari pengaruh jenis elemen pepadu yang digunakan pada sampel diketahui bahwa pita paduan gelas metalik yang mengandung unsur Ni memiliki intensitas arus korosi maupun laju korosi lebih kecil sehingga dapat dikatakan bahwa adanya unsur Ni mampu menghambat korosi dengan cara atau kemampuan unsur ini untuk menghambat timbulnya pasivasi yang merugikan pada paduan ketika proses elektrokimia berlangsung.

Variasi paduan logam dapat menentukan besar intensitas arus korosinya, tidak terkait dengan jumlah pepadunya. Sedangkan paduan yang mengandung logam Al ternyata berpotensi menimbulkan fenomena pasivasi daripada paduan yang mengandung logam Cu meskipun keduanya ternyata mampu memunculkan pasivasi. Hal ini dapat dilihat jika membandingkan grafik hasil eksperimen pada paduan $Zr_{67}Cu_{33}$ dan $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$, dimana potensi Cu lebih kecil dibandingkan potensi Al dalam membentuk lapisan pasivasi.

Adanya lapisan pasivasi inilah yang meningkatkan besar nilai laju korosi paduan meskipun sebenarnya pasivasi ini pada awalnya melapisi paduan logam dan berfungsi menahan atau memperlambat serangan korosi, namun pada akhirnya serangan yang ditimbulkan setelah munculnya pasivasi jauh lebih membahayakan karena berangsur-angsur terjadi gejala transpasivasi pada daerah potensial yang sangat positif. Potensial yang positif ini dapat diakibatkan oleh media pengkorosi yang masuk pada saat terjadinya korosi galvanik (*Galvanic Corrosion*) atau

diakibatkan adanya potensial yang lebih anodik (positif) antar logam padu saat terjadi korosi celah (*Crevice Corrosion*). Korosi celah ini berawal dari adanya celahan atau daerah yang tersembunyi pada permukaan logam akibat perbedaan oksigen antara daerah celahan dan sekitarnya, dimana daerah celah menjadi anodik dan diluar menjadi katodik. Proses tersebut memunculkan terbangkitnya beda energi akibat perubahan konsentrasi oksigen dilingkungan sekitar. Konsentrasi oksigen bertambah ketika larutan didalam celah terisolasi dari larutan HNO_3 semula, sedangkan larutan diluar secara kontinyu kandungan oksigennya digantikan sehingga tetap tinggi (Nasoetion dalam Helani R., 2003). Kondisi tersebut memunculkan polarisasi tersendiri dimana elektrode pada larutan beroksigen banyak akan berada pada tingkat energi lebih tinggi. Perubahan konsentrasi ion-ion dalam larutan mempengaruhi tingkat energi logam (Trethewey, 1957). Pada grafik yang lain tidak ditemukan adanya grafik yang menunjukkan fenomena pasivasi dan nilai intensitas laju korosinya lebih kecil, sehingga fungsi unsur Ni pada paduan tersebut menghambat pasivasi dan transpasivasi.

Dalam penelitian ini tidak digunakan variasi konsentrasi pada media korosifnya karena sudah dapat dipastikan bahwa ada linearitas grafik hubungan antara pengaruh konsentrasi larutan korosif terhadap intensitas arus korosi (Helani R., 2003) dengan keterangan bahwa pada konsentrasi rendah, proses korosi terjadi secara lambat. Pada konsentrasi rendah, ion nitrat tidak dapat langsung memberikan reaksi elektrokimia terhadap bahan uji, karena terlebih dahulu membentuk lapisan pasivasi.

Ketepatan penentuan harga intensitas arus korosi (I_{kor}) penting sekali diperhatikan karena I_{kor} merupakan unsur pokok yang langsung berpengaruh dalam

perhitungan laju korosi suatu material. Pada tingkat korosi dengan intensitas arus korosi yang tinggi, penentuan analisa Tafelnya cenderung lebih mudah karena bentuk kurva yang terjadi lebih curam dan rentang potensial batas ruas perhitungan "CZ" tidak begitu lebar. Sebaliknya untuk tingkat korosi dengan intensitas arus korosi yang rendah, penentuan "CZ"nya cenderung lebih sulit karena bentuk kurva yang terjadi lebih landai.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari data dan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Adanya pasivasi dan transpasivasi mempercepat tingginya nilai laju korosi.
2. Hasil uji laju korosi pada material amorf gelas metalik berbasis zirkonium yaitu $Zr_{67}Ni_{33}$, $Zr_{67}Cu_{33}$, $Zr_{70}Cu_{15}Ni_{15}$, $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$ dan $Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$ masing-masing memberikan nilai sebesar 19,78 mpy ; 27,9 mpy ; 104,6 mpy ; 401 mpy ; dan 123,76 mpy. Nilai laju korosi material $Zr_{67}Ni_{33}$ lebih resistan terhadap serangan korosi dan material $Zr_{65}Cu_{27,5}Al_{7,5}$ paling tidak resistan terhadap serangan korosi.
3. Jenis elemen pepadu berpengaruh terhadap nilai laju korosi material, dan paduan yang mengandung unsur nikel (Ni) mampu menghambat laju korosi.

5.2 Saran

1. Perlu ketepatan penentuan batas hitung (CZ) karena I_{kor} bergantung pada penentuan batas ruas perhitungan "CZ" pada kurva katoda maupun anoda.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap laju korosi paduan dengan membandingkan antara material yang berstruktur amorf dengan material berstruktur kristal beserta uji struktur mikronya.
3. Adanya pengujian laju korosi dengan variasi persen komposisi yang berbeda pada tiap unsur atau komponen pepadu terhadap material dasar (zirkonium).

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, **Potensiostat PGS-201T Instruction Manual**, Solea Tacussel, Perancis, 1993
- Callister, W.D., 1990, **Material Science and Engineering**, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Herlani, R., Simbolon S., Wasito B., 2004, **Teknik Penentuan Intensitas Arus Korosi Logam Seng dalam Lingkungan Sulfat dengan Potensiostat PGS-201T**, P3TM-BATAN, Yogyakarta.
- Inone, A. and T. Zhang, 1996, **Fabrication of Bulk Glassy $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ of 30 nm In diameter by a Suction Casting Method**, Mat. Trans JIM 37, Halaman 185 - 187.
- Kehl, G.L., 1949, **The Principles of Metallographic Laboratory Practice**, Third Edition, Mc Graw Hill Book Company, New York.
- Koester, Vwe, 1993, **Phase Transformation in Rapidly Solidification Alloy**, Key Engineering Material 81 – 83, Halaman 647 – 662.
- Koester, Vwe et al., 1999, **Influence of Oxygen on Nanocrystallization of Zr – Based Metallic Glasses**, Mater. Sci. Forum 307, Halaman 9 – 16.
- Klement, W. et al., 1976, **Introduction to Ceramic**, John Wiley & Sons.
- Schoers, Jan and William L. Johnson, 2000, **History Dependent Crystallisation of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}Be_{23}$ Melt**. Journal of Applied Physics Vol. 88 No. 1.
- Trethwey, K.R., Chamberlain, J., 1991, **Korosi Untuk Mahasiswa Sains dan Rekayasawan**, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Uhlig, H.H., Revie, R.W., 1985, **Corrosion and Corrosion Control**, Third Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Vlack, V.L.H., 1985, **Science and Elements of Materials Engineering**, Fourth Edition, Addison Wesley Publishing Company, USA.

Lampiran 1**Perhitungan densitas sampel (ρ)**

- Massa Zr Ni = 0,072 gr Volume = 0,05 ml

- Massa Zr Cu = 0,116 gr Volume = 0,05 ml

- Massa Zr Cu Ni = 0,112 gr Volume = 0,15 ml

- Massa Zr Cu Al = 0,132 gr Volume = 0,15 ml

- Massa Zr Cu Ni Al = 0,052 gr Volume = 0,05 ml

$$\rho_{\text{Zr Ni}} = \frac{0,072}{0,05} = 1,44 \text{ gr/ml}$$

$$\rho_{\text{Zr Cu Al}} = \frac{0,132}{0,15} = 0,88 \text{ gr/ml}$$

$$\rho_{\text{Zr Cu}} = \frac{0,116}{0,05} = 2,32 \text{ gr/ml}$$

$$\rho_{\text{Zr Cu Ni Al}} = \frac{0,052}{0,05} = 1,04 \text{ gr/ml}$$

$$\rho_{\text{Zr Cu Ni}} = \frac{0,112}{0,15} = 0,74667 \text{ gr/ml}$$

Lampiran 2

Perhitungan Berat Ekuivalen (EW):

➤ $EW \text{ Zr}_{67}\text{Cu}_{33}$

$$EW \text{ Zr}_{67}\text{Cu}_{33} = \frac{\frac{\%k \text{ Zr} \times \text{Ar Zr}}{100\%}}{\text{Val Zr}} + \frac{\frac{\%k \text{ Cu} \times \text{Ar Cu}}{100\%}}{\text{Val Cu}} = \frac{67 \times 91,22}{2} + \frac{33 \times 63,54}{2}$$

$$= \frac{6111,74/100}{2} + \frac{2096,82/100}{2}$$

$$= 30,5587 + 10,4841 = 41,0428$$

➤ $EW \text{ Zr}_{67}\text{Ni}_{33}$

$$EW \text{ Zr}_{67}\text{Ni}_{33} = \frac{\frac{\%k \text{ Zr} \times \text{Ar Zr}}{100\%}}{\text{Val Zr}} + \frac{\frac{\%k \text{ Ni} \times \text{Ar Ni}}{100\%}}{\text{Val Ni}} = \frac{67 \times 91,22}{2} + \frac{33 \times 58,71}{2}$$

$$= \frac{6111,74/100}{2} + \frac{1937,43/100}{2}$$

$$= 30,5587 + 9,68715 = 40,24585$$

➤ $EW \text{ Zr}_{70}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{15}$

$$EW \text{ Zr}_{70}\text{Cu}_{15}\text{Ni}_{15} = \frac{\frac{\%k \text{ Zr} \times \text{Ar Zr}}{100\%}}{\text{Val Zr}} + \frac{\frac{\%k \text{ Cu} \times \text{Ar Cu}}{100\%}}{\text{Val Cu}} + \frac{\frac{\%k \text{ Ni} \times \text{Ar Ni}}{100\%}}{\text{Val Ni}}$$

$$= \frac{70 \times 91,22}{2} + \frac{15 \times 63,54}{2} + \frac{15 \times 58,71}{2}$$

$$= \frac{6385,4/100}{2} + \frac{953,1/100}{2} + \frac{880,65/100}{2}$$

$$= 31,927 + 4,7655 + 4,40325 = 41,09575$$

➤ $EW \text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27,5}\text{Al}_{7,5}$

$$\begin{aligned}
 EW \text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27,5}\text{Al}_{7,5} &= \frac{\%k \text{Zr} \times \text{Ar Zr}}{\text{Val Zr}} + \frac{\%k \text{Cu} \times \text{Ar Cu}}{\text{Val Cu}} + \frac{\%k \text{Al} \times \text{Ar Al}}{\text{Val Al}} \\
 &= \frac{65 \times 91,22}{2} + \frac{27,5 \times 63,54}{2} + \frac{7,5 \times 26,98}{3} \\
 &= \frac{5929,3/100}{2} + \frac{1747,35/100}{2} + \frac{202,35/100}{3} \\
 &= 29,6465 + 8,73675 + 0,6745 = 39,05775
 \end{aligned}$$

➤ $EW \text{Zr}_{69,5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7,5}$

$$\begin{aligned}
 EW \text{Zr}_{69,5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7,5} &= \frac{\%k \text{Zr} \times \text{Ar Zr}}{\text{Val Zr}} + \frac{\%k \text{Cu} \times \text{Ar Cu}}{\text{Val Cu}} + \frac{\%k \text{Ni} \times \text{Ar Ni}}{\text{Val Ni}} + \frac{\%k \text{Al} \times \text{Ar Al}}{\text{Val Al}} \\
 &= \frac{69,5 \times 91,22}{2} + \frac{12 \times 63,54}{2} + \frac{11 \times 58,71}{2} + \frac{7,5 \times 26,98}{3} \\
 &= \frac{6339,79/100}{2} + \frac{762,48/100}{2} + \frac{645,81}{2} + \frac{202,35/100}{3} \\
 &= 31,69895 + 3,8124 + 3,22905 + 0,6745 = 39,4149
 \end{aligned}$$

Lampiran 3

Perhitungan Laju Korosi (V_{kor})

$$V_{kor} (mpy) = \frac{(0,13)(I_{corr})(Ew)}{\rho} \longrightarrow \rho = \frac{g}{cm^3}$$

Sampel Zr₆₇Ni₃₃

$$\begin{aligned} V_{kor} &= \frac{(0,13)(I_{corr})(Ew)}{\rho} = \frac{(0,13)(5,31)(40,24585)}{1,44} \\ &= \frac{27,7817}{1,44} = 19,29 \text{ mpy} \end{aligned}$$

Sampel Zr₆₇Cu₃₃

$$\begin{aligned} V_{kor} &= \frac{(0,13)(I_{corr})(Ew)}{\rho} = \frac{(0,13)(12,13)(41,0428)}{2,32} \\ &= \frac{64,72039}{2,32} = 27,9 \text{ mpy} \end{aligned}$$

Sampel Zr₇₀Cu₁₅Ni₁₅

$$\begin{aligned} V_{kor} &= \frac{(0,13)(I_{corr})(Ew)}{\rho} = \frac{(0,13)(14,62)(41,09575)}{0,74667} \\ &= \frac{78,10658}{0,74667} = 104,6 \text{ mpy} \end{aligned}$$

Sampel Zr₆₅Cu_{27,5}Al_{7,5}

$$\begin{aligned} V_{kor} &= \frac{(0,13)(I_{corr})(Ew)}{\rho} = \frac{(0,13)(69,50)(39,05775)}{0,88} \\ &= \frac{352,88677}{0,88} = 401,0 \text{ mpy} \end{aligned}$$

Sampel Zr_{69,5}Cu₁₂Ni₁₁Al_{7,5}

$$\begin{aligned} V_{kor} &= \frac{(0,13)(I_{corr})(Ew)}{\rho} = \frac{(0,13)(69,50)(39,4149)}{1,04} \\ &= \frac{128,7132974}{1,04} = 123,76 \text{ mpy} \end{aligned}$$

****DATA PROCESSING****

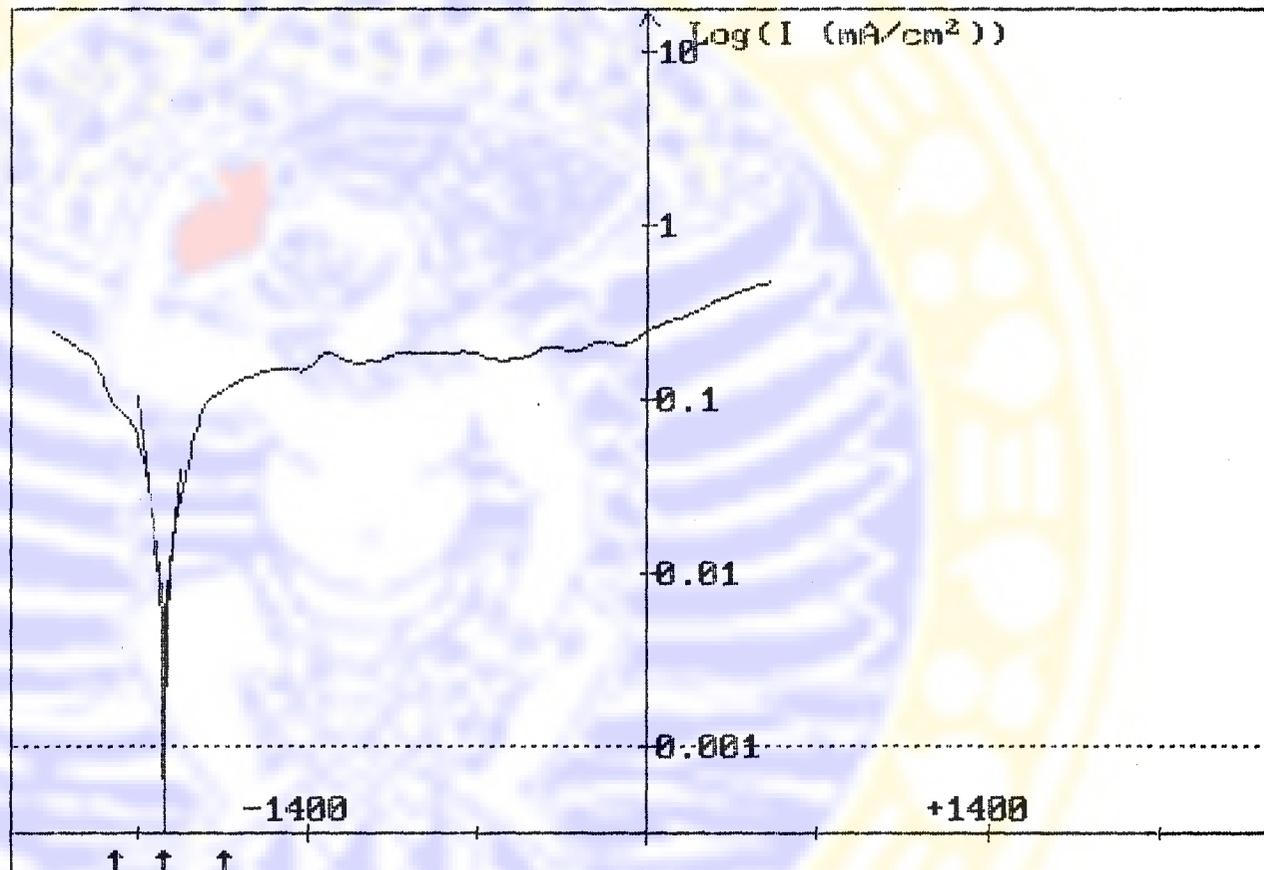
$E(i=0) = -2036.5 \text{ mV}$

$$\left[\begin{array}{l} R_p = 2.65E+03 \ \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9975 \end{array} \right.$$

$I(i=0) = 5.31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

$$\left[\begin{array}{l} \beta_c = -86.1 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9917 \end{array} \right.$$

$\beta_a = +84.7 \text{ mV}$



Sampel Zr 67 Ni 33 dalam HNO_3 0.005 M

Lampiran 4

****DATA PROCESSING****

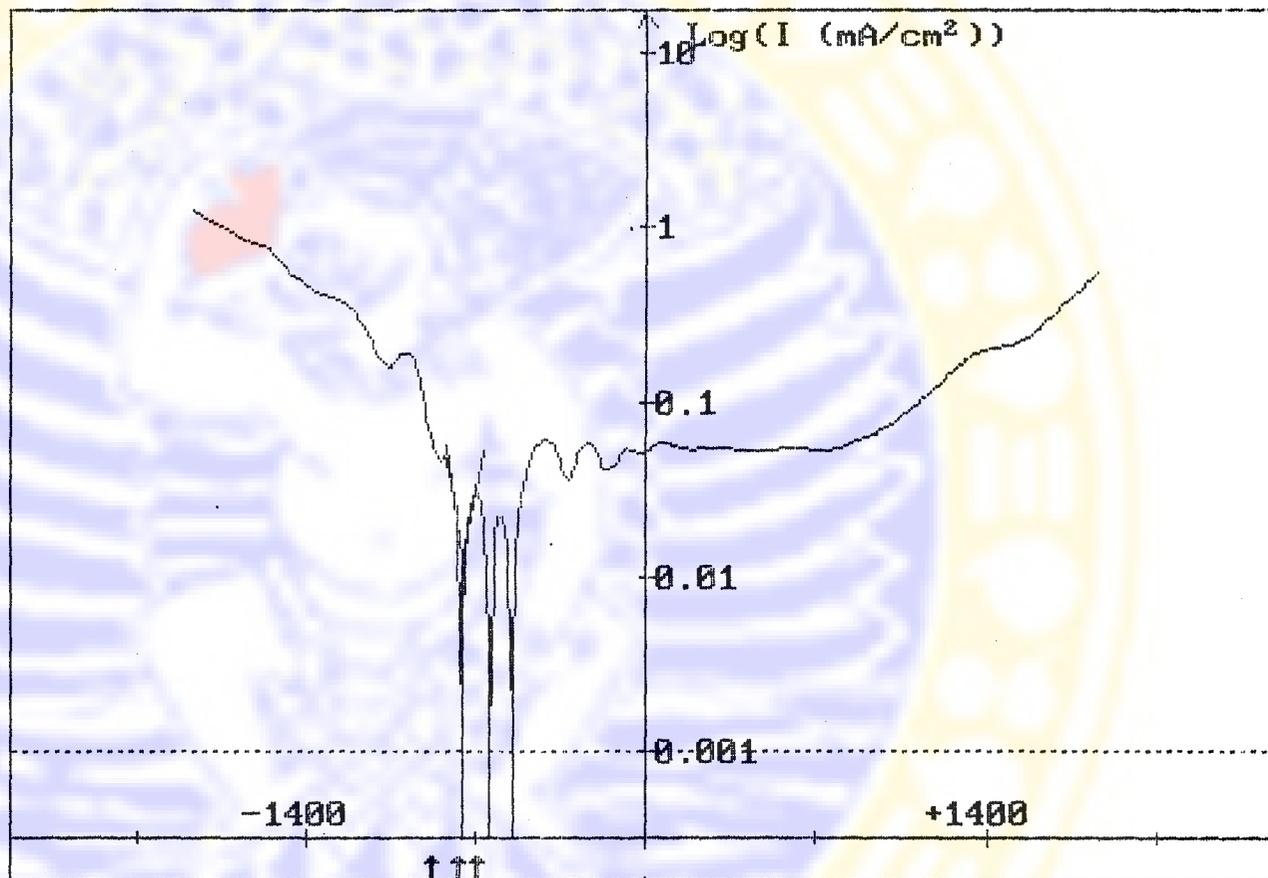
$E(i=0) = -776.2 \text{ mV}$

$R_p = 1.42E+03 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$
 $r^2 = 0.9813$

$I(i=0) = 12.13 \ \mu\text{A}/\text{cm}^2$

$\beta_c = -107.3 \text{ mV}$
 $r^2 = 0.9788$

$\beta_a = +141.0 \text{ mV}$



Sampel Zr 67 Cu 33 dalam HNO3 0.005 M

Lampiran 5

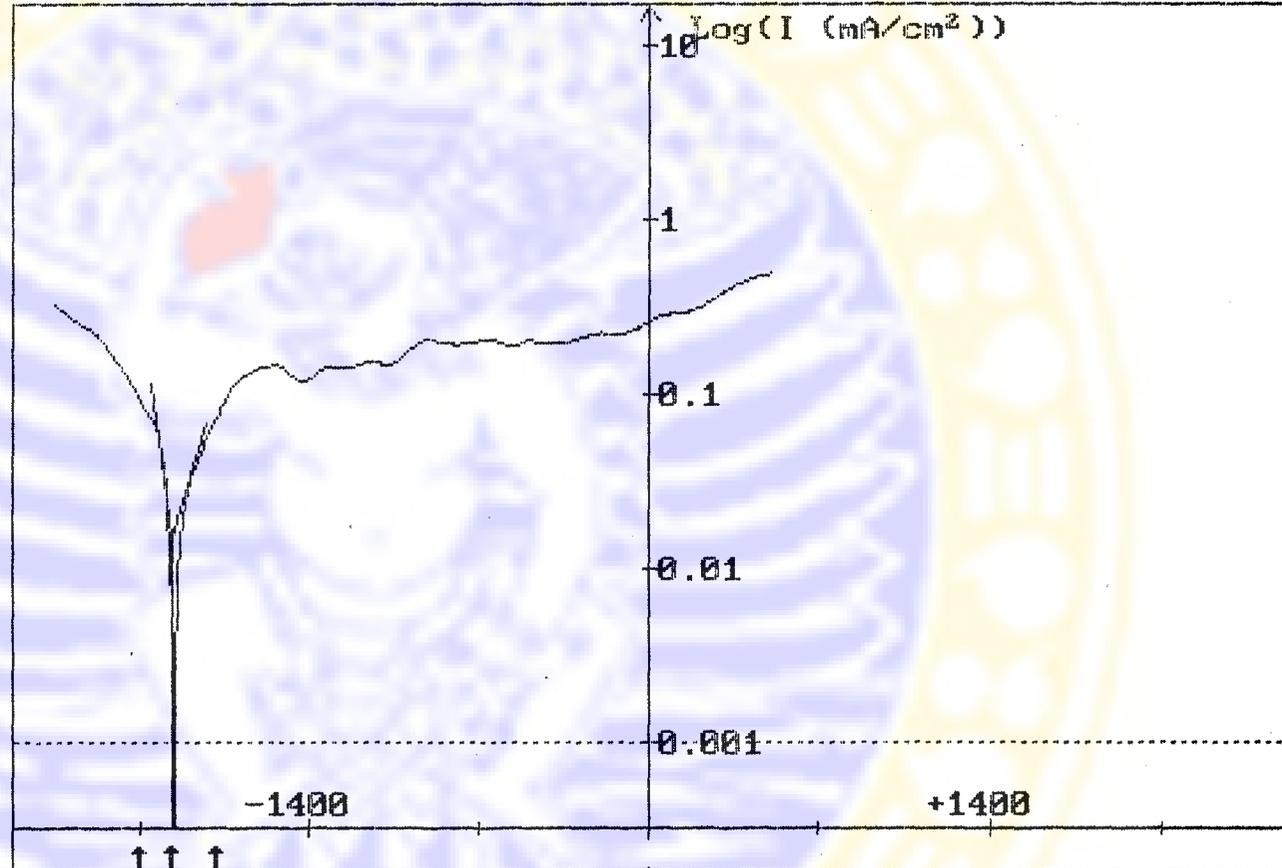
DATA PROCESSING

$E(i=0) = -2004.8 \text{ mV}$

$R_p = 1.56E+03 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$
 $r^2 = 0.9674$

$I(i=0) = 14.62 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

$\beta_c = -112.2 \text{ mV}$
 $r^2 = 0.9870$
 $\beta_a = +215.9 \text{ mV}$



Sampel Zr 70 Cu 15 Ni 15 dalam HNO_3 0.005 M

Lampiran 6

****DATA PROCESSING****

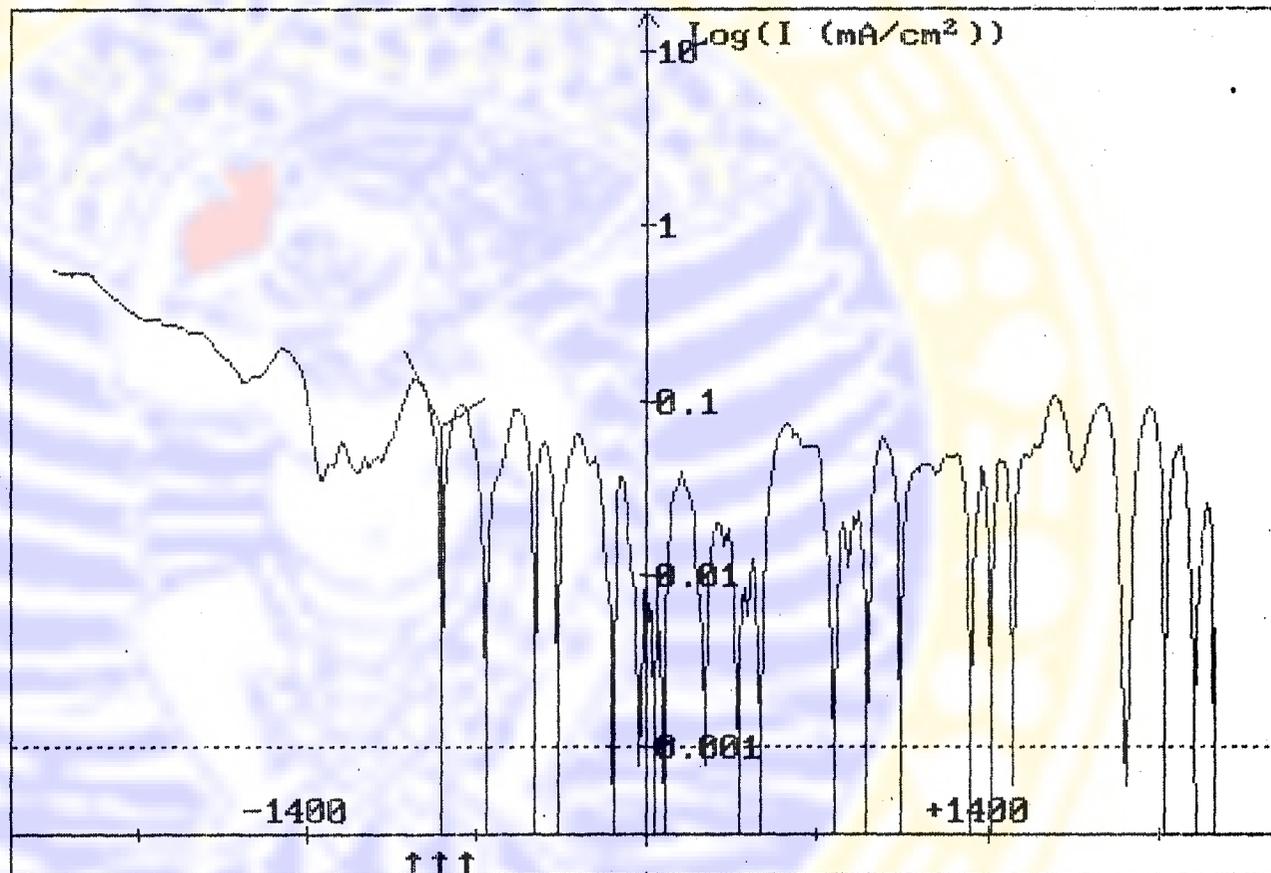
$E(i=0) = -863.8 \text{ mV}$

$R_p = 6.27E+02 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$
 $r^2 = 0.9788$

$I(i=0) = 69.50 \ \mu\text{A}/\text{cm}^2$

$\beta_c = -383.1 \text{ mV}$
 $r^2 = 0.9702$

$\beta_a = +1114.2 \text{ mV}$



Sampel Zr 65 Cu 27.5 Al 7.5 dalam $\text{HN03 } 0.005 \text{ M}$

Lampiran 7

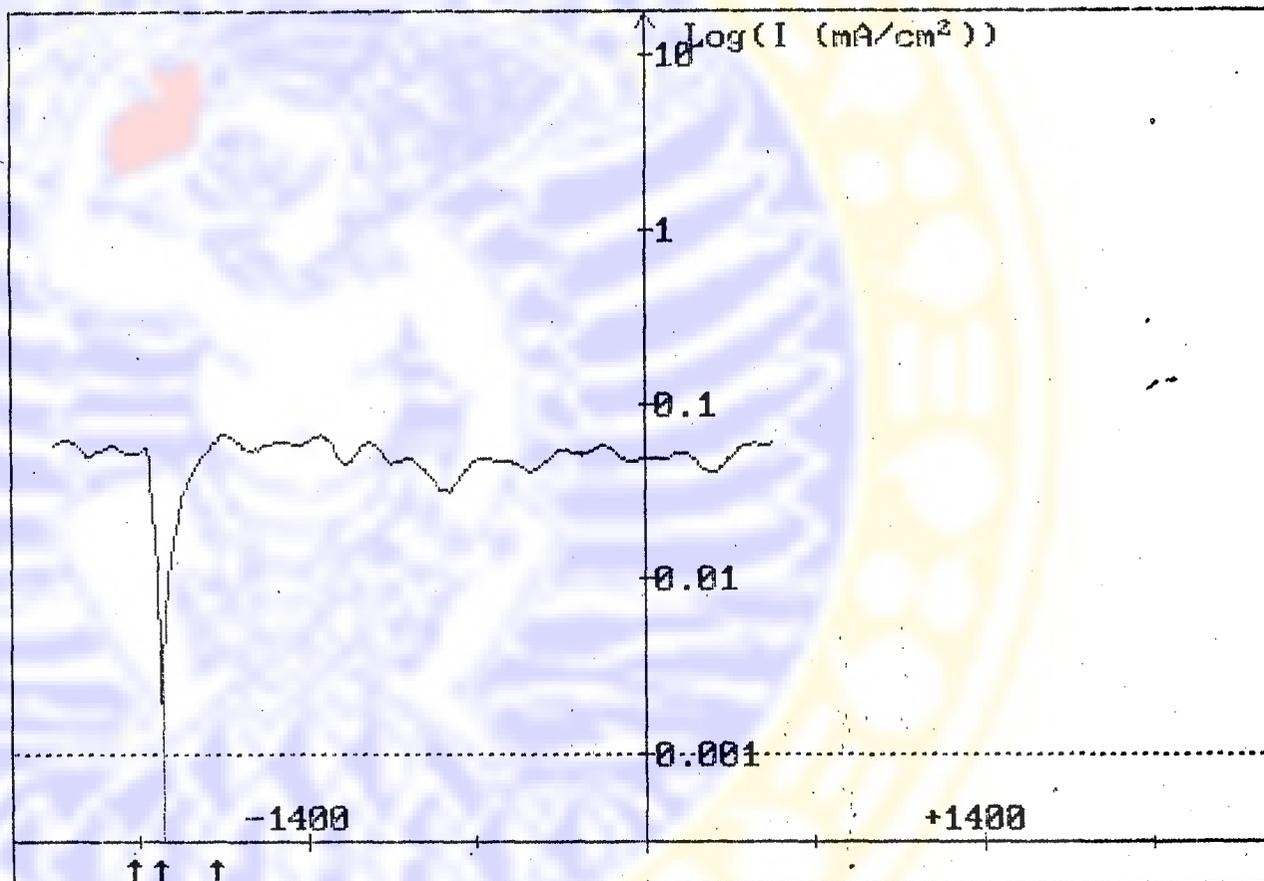
****DATA PROCESSING****

$E(i=0) = -1968.1 \text{ mV}$

$R_p = 1.62E+03 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$
 $r^2 = 0.9795$

$I(i=0) = 25.12 \ \mu\text{A}/\text{cm}^2$

$\beta_c = -189.3 \text{ mV}$
 $r^2 = 0.9778$
 $\beta_a = +245.0 \text{ mV}$

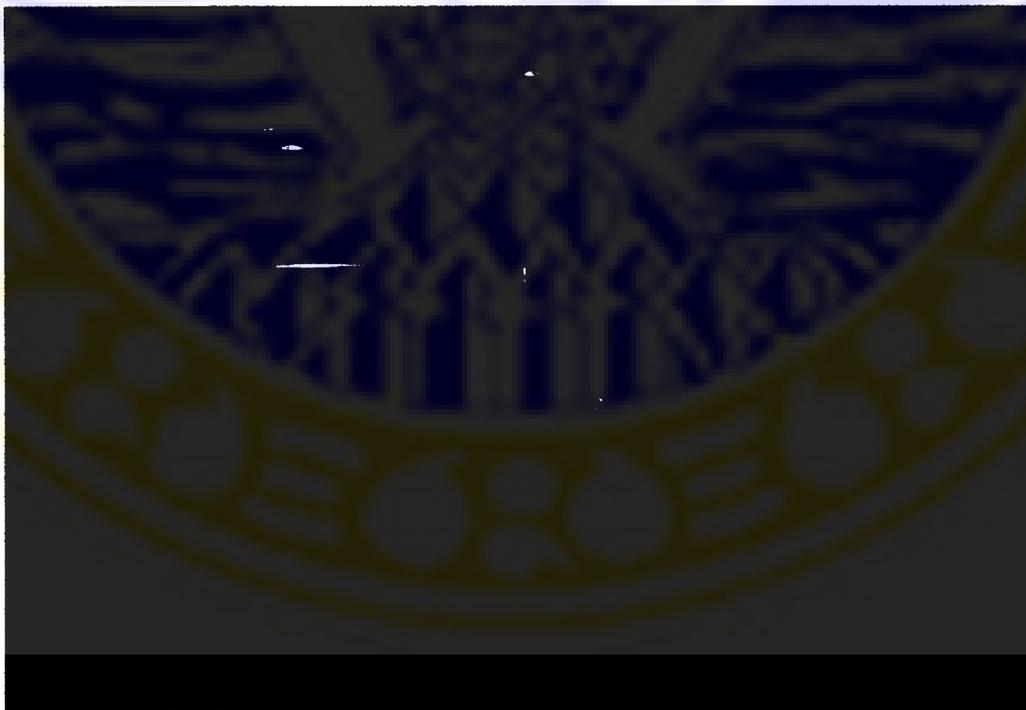


Sampel Zr 69.5 Cu 12 Ni 11 Al 7.5 dalam HNO_3 0.005 M

Lampiran 8

Lampiran 9

Gambar bahan penelitian



Lampiran 10

Gambar alat penelitian



Labu Media Elektrolit



Elektroda kerja, Elektroda Acuan, dan Elektrode Pembantu

Lampiran 10 (lanjutan)**Potensiostat PGS 201-T****Potensiostat yang telah dirangkai dengan komputer**