



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI AWAL PEMADUAN Cu-Zn-Sn DARI CuZn (60 / 40)
DAN Sn DENGAN METODE *ARC MELTING FURNACE*
UNTUK APLIKASI BAHAN DASAR SEL FOTOVOLTAIK**

SKRIPSI

**MUHARRIR ASYARI SARASWAN
0405040503**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI AWAL PEMADUAN Cu-Zn-Sn DARI CuZn (60 / 40)
DAN Sn DENGAN METODE *ARC MELTING FURNACE*
UNTUK APLIKASI BAHAN DASAR SEL FOTOVOLTAIK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**MUHARRIR ASYARI SARASWAN
0405040503**

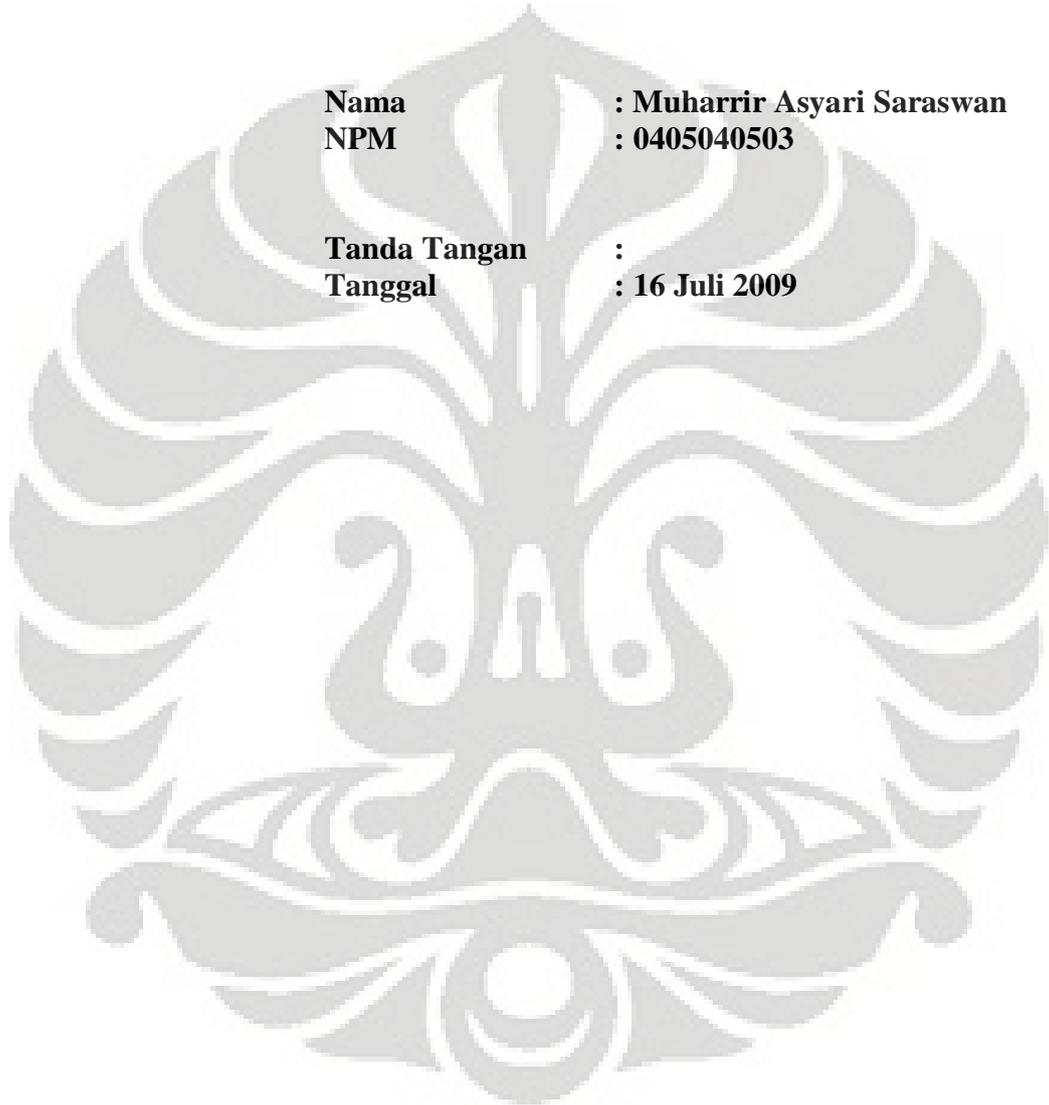
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Muharrir Asyari Saraswan
NPM : 0405040503

Tanda Tangan :
Tanggal : 16 Juli 2009



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Muharrir Asyari Saraswan
NPM : 0405040503
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Awal Pemaduan Cu-Zn-Sn dari CuZn
(60 / 40) dan Sn dengan Metode *Arc Melting*
Furnace untuk Aplikasi Bahan Dasar Sel
Fotovoltaik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Badrul Munir, Ph.D ()

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia Syahril, M.Sc ()

Penguji 2 : Dr. Ir. Akhmad Herman Y. M.Phil.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 15 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya ucapkan kepada Allah.SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terimakasih kepada:

- (1) Badrul Munir, Ph.D, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkanya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendo'akan saya, memberikan perhatian, dan bantuan baik material maupun moral;
- (3) Saudara Aryo Nurwadi, selaku teman kerja pada penelitian skripsi ini yang telah banyak membantu saya dalam melaksanakan penelitian; dan
- (4) Sahabat serta seluruh pihak yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah.SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 15 Juli 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini, :

Nama : Muharrir Asyari Saraswan
NPM : 0405040503
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Studi Awal Pemasukan Cu-Zn-Sn dari CuZn (60 / 40) dan Sn dengan Metode
Arc Melting Furnace untuk Aplikasi Bahan Dasar Sel Fotovoltaik**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 15 Juli 2009
Yang menyatakan

(Muharrir Asyari Saraswan)

ABSTRAK

Nama : Muharrir Asyari Saraswan
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Awal Pemaduan Cu-Zn-Sn dari CuZn (60 / 40) dan Sn dengan Metode *Arc Melting Furnace* untuk Aplikasi Bahan Dasar Sel Fotovoltaik

Tingkat konsumsi energi yang semakin besar, mendorong manusia untuk menciptakan suatu energi alternatif yang dapat diperbaharui dan murah, salah satu adalah sel surya. Namun, sel surya yang ada sekarang begitu mahal apabila dibandingkan dengan energi fosil. Oleh karena itu, kedepannya akan dibuat sel surya jenis lapis tipis karena terdapat reduksi terhadap berat sel surya selain efisiensi dan harga yang bersaing. Pada penelitian ini telah dibuat paduan Cu-Zn-Sn (CZT) dengan metode *arc melting furnace* yang akan digunakan sebagai material target pada penumbuhan lapisan tipis $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) untuk bahan dasar sel fotovoltaik. Pada proses pemaduan didapatkan hasil yang memuaskan, dimana dihasilkan ingot berbentuk solid dan tidak menempel pada krusibel. Pada karakterisasi yang dilakukan dengan menggunakan EDS, XRD dan mikroskop optik terhadap ingot paduan CZT menunjukkan hasil yang memuaskan, dimana dari hasil proses pemaduan telah didapatkan paduan CZT yang homogen dengan membentuk paduan 2Cu/Zn/Sn. Ingot hasil paduan CZT ini dapat digunakan dalam penumbuhan lapisan tipis $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$.

Kata kunci : Cu-Zn-Sn, *arc melting furnace*, pemaduan, sel fotovoltaik

ABSTRACT

Name : Muharrir Asyari Saraswan
Major : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Preliminary Study of Alloying Cu-Zn-Sn From CuZn (60/40) and Sn With Arc Melting Furnace Method for Basic Material of photovoltaic cell

The rate of energy consumption that has been increased, leads human to search for an alternative of energy that is renewable and cheap solar cell. However, until recently solar cell is considered too expensive compared to fossil based energy. Such as a thin film solar cell can be employed to reduce weight and improved efficiency with comparable price. In this research, a Cu-Zn-Sn (CZT) has been successfully made with arc melting furnace method that can be applied for target materials on the growing of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) thin film for basic material of photovoltaic cell. Successfully solid CZT ingot was produced without adhering to the crucible. On characterization utilizing EDS, XRD, and optical microscope, it showed that the alloying process of CZT resulting in a Cu_2ZnSn homogeneous alloy. This resulting ingot alloy is likely usable for CZTS thin film growing process.

Key word : Cu-Zn-Sn, arc melting furnace, alloying, photovoltaic cell

DAFTAR ISI

| | |
|--|----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH | v |
| ABSTRAK | vi |
| <i>ABSTRACT</i> | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR TABEL | x |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiii |
| 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.3. Batasan Penelitian | 3 |
| 1.4. Sistematika Penulisan | 4 |
| 2. DASAR TEORI | 5 |
| 2.1. Sel Surya atau Sel Fotovoltaik | 5 |
| 2.1.1. Semikonduktor | 5 |
| 2.1.2. Sel Surya $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Lapis Tipis | 7 |
| 2.2. Sifat - Sifat Material Penyusun | 7 |
| 2.3. Pemaduan (<i>Alloying</i>) | 9 |
| 2.3.1. Prinsip Teori Paduan | 9 |
| 2.3.2. Paduan Tembaga | 11 |
| 2.3.3. Paduan CZT | 14 |
| 2.4. Teori Solidifikasi Metal | 15 |
| 2.4.1. Keadaan Padatan dan Cairan | 15 |
| 2.4.2. Proses Penumbuhan Kristal | 19 |
| 2.4.3. Redistribusi Larutan Selama Proses Solidifikasi | 20 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5. <i>Arc Melting Furnace</i> | 21 |
| 3. METODE PENELITIAN | 23 |
| 3.1. Diagram Alir Penelitian | 23 |
| 3.2. Alat dan Bahan | 24 |
| 3.2.1 Alat | 24 |
| 3.2.2 Bahan | 24 |
| 3.3. Prosedur Penelitian | 25 |
| 3.3.1. Preparasi Bahan | 25 |
| 3.3.2. Proses Kompaksi | 28 |
| 3.3.3. Proses pepaduan | 29 |
| 3.3.4. Karakterisasi | 30 |
| 4. HASIL DAN PEMBAHASAN | 33 |
| 4.1. Pembuatan Sampel | 33 |
| 4.1.1. Preparasi Sampel | 33 |
| 4.1.2. Proses Kompaksi | 33 |
| 4.2. Proses Pepaduan CZT | 34 |
| 4.2.1. <i>Tube Furnace</i> | 34 |
| 4.2.2. Mesin Las <i>TIG</i> | 35 |
| 4.2.3. <i>Arc Melting Furnace</i> | 36 |
| 4.3. Ingot Paduan CZT | 37 |
| 4.4. Analisa Hasil <i>EDS</i> Paduan CZT | 38 |
| 4.5. Analisa Hasil <i>XRD</i> Paduan CZT | 39 |
| 4.6. Analisa Hasil Foto Mikro Paduan CZT | 41 |
| 4.7. Analisa Hasil Pengujian Kekerasan Mikro Paduan CZT | 45 |
| 5. KESIMPULAN | 47 |
| DAFTAR REFERENSI | 48 |

DAFTAR TABEL

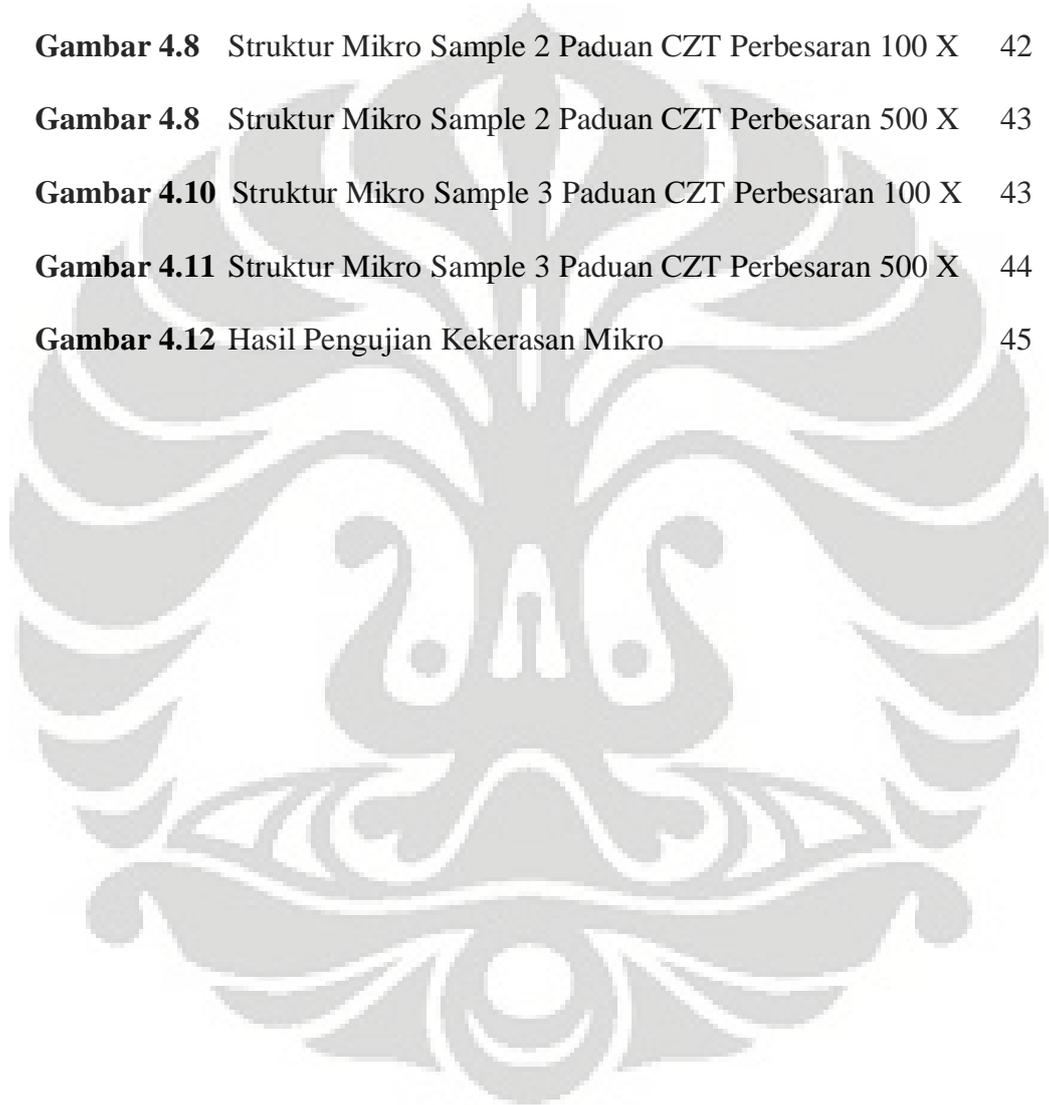
| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Sifat-Sifat Material Penyusun | 8 |
| Tabel 3.1 Bentuk dan Massa Sampel | 28 |



DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Struktur Sel Surya | 5 |
| Gambar 2.2 | Jenis Semikonduktor | 6 |
| Gambar 2.3 | Diagram Fasa Cu-Zn | 13 |
| Gambar 2.4 | Diagram Fasa Cu-Sn | 14 |
| Gambar 2.5 | Setiap Atom Menempati Posisi Tertentu Sesuai dengan Jarak Kisi | 16 |
| Gambar 2.6 | Struktur Suatu Kluster | 16 |
| Gambar 2.7 | Hubungan Antara Kecepatan Pencairan / Pembekuan Terhadap Temperatur (a), Hubungan Antara Kecepatan Pertumbuhan Terhadap Temperatur (b) | 19 |
| Gambar 3.1 | Diagram Alir Penelitian | 23 |
| Gambar 3.2 | Sampel Timah | 25 |
| Gambar 3.3 | Sampel Kuningan | 26 |
| Gambar 3.4 | <i>Ultrasonic Cleaner</i> | 26 |
| Gambar 3.5 | Timbangan Digital | 27 |
| Gambar 3.6 | Mesin Kompaksi Krisbow | 29 |
| Gambar 3.7 | <i>Arc Melting Furnace</i> | 30 |
| Gambar 3.8 | Mesin <i>XRD</i> | 30 |
| Gambar 3.9 | Alat <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> | 31 |
| Gambar 3.10 | Skema Penjajakan Vickers (a), <i>Micro hardness Testing</i> (b) | 32 |
| Gambar 4.1 | Sampel Hasil Kompaksi | 34 |
| Gambar 4.2 | Ingot Hasil Pemasukan | 37 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 4.3 | Hasil Pengujian <i>EDS</i> | 38 |
| Gambar 4.4 | Hasil Pengujian <i>XRD</i> | 39 |
| Gambar 4.5 | Literatur Hasil <i>XRD</i> Cu-Zn-Sn | 40 |
| Gambar 4.6 | Struktur Mikro Sample 1 Paduan CZT Perbesaran 100 X | 41 |
| Gambar 4.7 | Struktur Mikro Sample 1 Paduan CZT Perbesaran 500 X | 42 |
| Gambar 4.8 | Struktur Mikro Sample 2 Paduan CZT Perbesaran 100 X | 42 |
| Gambar 4.8 | Struktur Mikro Sample 2 Paduan CZT Perbesaran 500 X | 43 |
| Gambar 4.10 | Struktur Mikro Sample 3 Paduan CZT Perbesaran 100 X | 43 |
| Gambar 4.11 | Struktur Mikro Sample 3 Paduan CZT Perbesaran 500 X | 44 |
| Gambar 4.12 | Hasil Pengujian Kekerasan Mikro | 45 |



DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|--|----|
| Lampiran 1 Komposisi Timah | 50 |
| Lampiran 2 Komposisi Kuningan | 51 |
| Lampiran 3 Hasil Analisis <i>EDS</i> Sampel 1 | 52 |
| Lampiran 4 Hasil Analisis <i>EDS</i> Sampel 2 | 55 |
| Lampiran 5 Hasil Analisis <i>EDS</i> Sampel 3 | 58 |
| Lampiran 6 Grafik Hasil Analisis <i>XRD</i> | 61 |
| Lampiran 7 Hasil Pengujian Kekerasan Mikro | 63 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

Dewasa ini energi merupakan salah satu masalah yang akan kita hadapi. Diprediksikan konsumsi energi dunia akan meningkat sebesar 70 % antara tahun 2000 sampai 2030. Sebagian besar energi yang kita konsumsi masih dihasilkan dari sumber energi fosil, yang saat ini menyumbang 87,7 % dari total kebutuhan energi dunia. Namun, cadangan sumber energi fosil ini diperkirakan akan semakin menipis. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sumber energi alternatif baru yang dapat diperbaharui dan murah. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar dijadikan sumber energi pengganti adalah energi surya. Suplai energi surya dari sinar matahari yang diterima oleh permukaan bumi mencapai 3×10^{24} joule pertahun, atau setara dengan 2×10^{17} watt. Jumlah energi sebesar itu setara dengan 10.000 kali konsumsi energi dunia.

Energi surya atau lebih dikenal sebagai sel surya, merupakan sebuah peranti semikonduktor yang memiliki permukaan yang luas dan mampu merubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Penelitian sel surya secara intensif baru dimulai sejak 1970-an meski efek fotovoltaiik sudah diketahui efektif sejak tahun 1954 atau lebih jauh lagi sejak Bacquerel menemukan efek ini pertama kali di tahun 1897.

Secara umum teknologi sel surya terbagi atas banyak kategori terkait dengan material penyusunnya maupun teknologi pembuatannya, yaitu sel surya silikon, sel surya jenis lapis tipis, dan *dye sensitized solar cell* (DSSC). Sel surya yang banyak digunakan sekarang ini adalah sel surya silikon yang merupakan hasil dari perkembangan pesat teknologi semikonduktor elektronik. Walaupun sel surya sekarang didominasi oleh bahan silikon, namun mahalnya biaya produksi silikon membuat biaya konsumsi sel surya silikon lebih mahal daripada sumber energi fosil. Selain itu kekurangan dari sel surya silikon adalah penggunaan bahan

kimia berbahaya pada proses fabrikasinya. Ke depannya sel surya lapis tipis memiliki prospek yang sangat cerah karena terdapat reduksi besar-besaran berat sel surya selain efisiensi dan harga yang bersaing dengan sel surya silikon.^[2]

Sel surya jenis lapis tipis terbagi atas beberapa jenis tergantung pada material penyusunnya, yaitu sel surya silikon lapis tipis (c-Si & a-Si), sel surya CdTe lapis tipis, sel surya CuInSe₂ atau Cu(In,Ga)Se₂ lapis tipis, dan sebagainya. Hanya saja, sel surya lapis tipis ini bukan tanpa persoalan. Contoh pada sel surya CuInSe₂ dan Cu(In,Ga)Se₂ lapis tipis, sebagaimana kita lihat bahwa sel surya ini mengandung material yang sangat mahal, yakni indium (In) dan galium (Ga) ditambah juga dengan selenium (Se) yang bersifat racun.

Penelitian yang penulis lakukan berkaitan dengan usaha penggantian material In dan Se di dalam sel surya CuInSe₂ (CIS). Yang dimaksud dengan penggantian In dan Se ialah, bagaimana agar elemen In dan Se di dalam material CIS dapat direduksi dengan mengganti secara parsial elemen tersebut dengan elemen lain yang jauh lebih murah dan aman, namun tetap menghasilkan karakteristik material yang cocok atau setara dengan CIS yang berfungsi menyerap sinar matahari di dalam sebuah sel. Sejauh ini, penggantian total In dapat dilakukan dengan penggunaan seng (Zn) dan timah (Sn) secara bersamaan, sedangkan untuk penggantian total Se dapat dilakukan dengan penggunaan sulfur (S), menghasilkan material yang lebih kompleks yakni Cu₂ZnSnS₄ (CZTS).

CZTS merupakan material yang sangat menjanjikan untuk digunakan dalam menghasilkan sel surya lapis tipis yang lebih murah, karena ketersediaan yang melimpah dari material penyusun CZTS di alam, yaitu meliputi Cu sebanyak 50 ppm, Zn sebanyak 75 ppm, Sn sebanyak 2,2 ppm dan S sebanyak 260 ppm sehingga dapat diperoleh di alam dengan mudah serta murah dan tidak beracun.

1.2. Tujuan Penelitian

Secara khusus, Tujuan penelitian ini antara lain adalah :

1. Membuat paduan Cu-Zn-Sn (CZT) dengan menggunakan metode *arc melting furnace*.
2. Mendapatkan paduan CZT yang dapat digunakan dalam penumbuhan lapisan tipis CZTS.

1.3. Batasan Penelitian

Batasan penelitian ini antara lain :

1. Bahan baku penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut :
 - a. Logam kuningan 60 / 40 dengan berat 75 % dari berat total sampel.
 - b. Logam timah 99,9 persen dengan berat 25 % dari berat total sampel.
2. Proses pembuatan paduan CZT dengan menggunakan metode *arc melting furnace*. Tahapan-tahapan yang dilakukan dimulai dari pembersihan bahan baku, proses kompaksi, peleburan dan pembekuan.
3. Pengujian yang dilakukan, yaitu :
 - a. Pengujian komposisi dengan menggunakan *EDS*.
 - b. Pengamatan fasa yang terbentuk dengan menggunakan difraksi sinar-X.
 - c. Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik.
 - d. Pengujian kekerasan mikro dengan metode *Vickers*.

1.4. Sistematika Penulisan

Skripsi ini di susun menjadi lima bab utama yaitu pendahuluan, dasar teori, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, dan kesimpulan.

Bab 1 Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2 Dasar Teori

Membahas mengenai dasar teori yang terkait, diantaranya tentang sel photovoltaik/ sel surya, sifat-sifat material bahan, prinsip teori paduan, prinsip solidifikasi dan *arc melting furnace*.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Membahas mengenai diagram alir penelitian, peralatan dan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur penelitian, dan prosedur pengujian yang dilakukan.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Membahas mengenai pengolahan data yang di dapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan, baik berupa angka, gambar, maupun grafik serta pembahasan mengenai hasil pengujian dan membandingkannya dengan teori serta hasil penelitian sebelumnya.

Bab 5 Kesimpulan

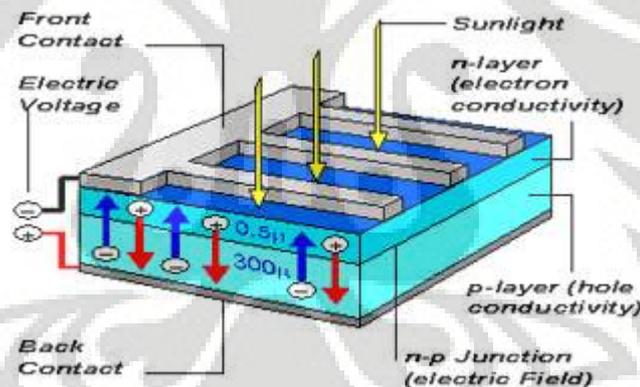
Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1. Sel Surya atau Sel Fotovoltaik

Fotovoltaik adalah suatu proses untuk merubah radiasi matahari atau energi cahaya menjadi energi listrik dengan bekerja menggunakan prinsip efek Fotovoltaik. Efek Fotovoltaik pertama kali ditemukan oleh Henry Becquerel pada tahun 1839, yang didefinisikan sebagai suatu fenomena munculnya voltase listrik diantara dua elektroda berdampingan yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat di expose di bawah energi cahaya. Hampir semua divais Fotovoltaik terdiri dari *pn junction* di dalam sistem semikonduktor. Divais ini juga dikenal sebagai sel surya.^[1] Struktur dari sel surya dapat dilihat pada Gambar 2.1.

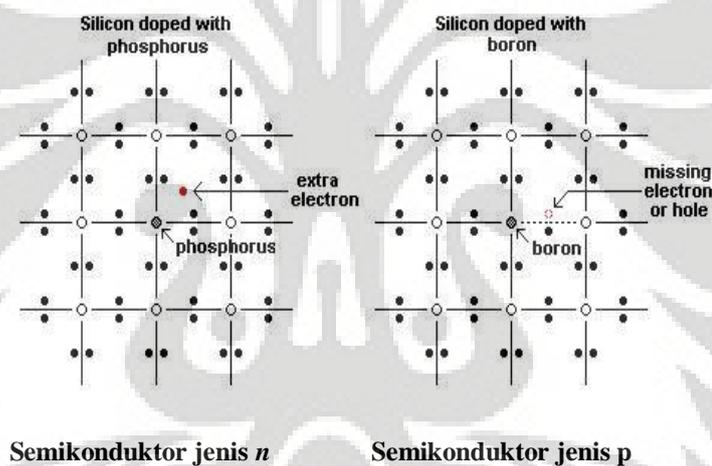


Gambar 2.1 Struktur Sel Surya^[2]

2.1.1. Semikonduktor

Proses pengubahan atau konversi energi cahaya menjadi energi listrik terjadi karena adanya bahan material yang menyusun sel surya berupa semikonduktor, dimana penyerapan energi cahaya terjadi di dalam material semikonduktor. Pada dasarnya, pembuatan dua jenis semikonduktor tipe p dan tipe n dimaksudkan untuk meningkatkan tingkat konduktivitas atau tingkat

kemampuan daya hantar listrik dan panas material semikonduktor.^[3] Di dalam semikonduktor, elektron maupun hole memiliki jumlah yang sama. Kelebihan elektron atau hole dapat meningkatkan daya hantar listrik maupun panas dari sebuah semikonduktor. Semikonduktor jenis p, biasanya dibuat dengan menambahkan unsur boron (B), aluminum (Al), galium (Ga) atau indium (In) ke dalam Silikon (Si). Unsur-unsur tambahan ini akan menambah jumlah hole. Sedangkan semikonduktor jenis n dibuat dengan menambahkan nitrogen (N), fosfor (P) atau arsen (As) ke dalam Si. Dari sini, tambahan elektron dapat diperoleh. Usaha menambahkan unsur tambahan ini disebut dengan *doping* yang jumlahnya tidak lebih dari 1 % dibandingkan dengan berat Si yang hendak di *doping*.^[4] Ilustrasi mekanisme *doping* semikonduktor dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Jenis Semikonduktor^[4]

Ketika energi foton dari matahari mengenai sel fotovoltaik, hanya foton dengan tingkat energi tertentu yang dapat melepaskan elektron dari ikatan atomnya untuk memproduksi arus listrik. Tingkat energi inilah yang dinamakan energi *band-gap*, yaitu jumlah energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan kulit terluar elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Setiap material memiliki energi *band-gap* yang berbeda dan juga untuk struktur atom yang berbeda pada material yang sama memiliki energi *band-gap* yang berbeda juga.

2.1.2. Sel Surya CZTS Lapis Tipis

Sel surya lapis tipis adalah suatu cara untuk mengurangi biaya dengan melakukan reduksi besar-besaran berat sel surya. Ke depannya sel surya lapis tipis ini memiliki prospek yang sangat cerah karena efisiensi dan harga yang bersaing dengan sel surya jenis lainnya. Sel surya lapis tipis merupakan sel photovoltaik yang terdiri dari lapisan-lapisan sangat tipis dari semikonduktor yang diletakkan bertumpuk. Pada dasarnya pembuatan sel surya lapis tipis hanyalah pendeposisian material semikonduktor di atas substrat. Bahan dasar semikonduktor yang digunakan sangat beragam, yakni *amorphous silikon*, *copper indium diselenide*, dan *cadmium telluride*.

CZTS merupakan semikonduktor senyawa *quaternary* $I_2-II-IV-VI_4$ dengan menggantikan selenium dengan sulfur, indium dengan seng dan timah dalam senyawa *ternary* CIS. Seluruh komponen penyusunnya dapat diperoleh di alam dengan mudah dan murah (Cu: 50 ppm, Zn: 75 ppm, Sn: 2.2 ppm, S: 260 ppm) serta tidak beracun. Pada material CIS, kandungan In dan Se di alam hanya 0.05 ppm. Material CZTS sangat menjanjikan untuk digunakan sebagai material penyusun sel surya lapis tipis. Karena memiliki energi *band-gap* yang sesuai, yaitu 1.4-1.5 eV serta besar koefisien penyerapan lebih dari 10^4 cm^{-1} . Parameter kisi dari material CZTS adalah $a = b = 5,43 \text{ \AA}$ dan $c = 10,81 \text{ \AA}$ dengan struktur kristal tetragonal.^[5]

2.2. Sifat - Sifat Material Penyusun

Sejumlah elemen paduan yang ditambahkan dalam suatu logam dapat meningkatkan atau menurunkan sifat dari logam tersebut. Hal ini tergantung dari sifat-sifat material penyusun dari logam paduan. Tabel 2.1 memperlihatkan sifat-sifat material penyusun dari paduan CZT.

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Material Penyusun^{[6],[7],[8]}

| Sifat-Sifat Material | Tembaga (Cu) | Seng (Zn) | Timah (Sn) | Satuan Si |
|-------------------------------|--------------|------------|------------|---|
| Struktur kristal | FCC | Heksagonal | Tetragonal | - |
| Berat atom | 63,546 | 65,409 | 118,710 | $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ |
| Elektronegativitas | 1,90 | 1,65 | 1,96 | <i>Pauling scale</i> |
| Jari-jari atom | 128 | 135 | 145 | pm |
| Densitas | 8,94 | 7,14 | 7,365 | $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |
| Titik lebur | 1084,62 | 419,53 | 231,93 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Titik didih | 2562 | 907 | 2602 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Kalor peleburan | 13,26 | 7,32 | 7,03 | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ |
| Kalor penguapan | 300,4 | 123,6 | 296,1 | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ |
| <i>Ratio poisson</i> | 0,34 | 0,25 | 0,36 | - |
| Modulus young | 110 - 128 | 108 | 50 | GPa |
| Modulus geser | 48 | 43 | 18 | GPa |
| <i>Electrical resistivity</i> | 16,78 | 59 | 115 | $\text{n}\Omega\cdot\text{m}$ |
| <i>Bulk modulus</i> | 140 | 70 | 58 | GPa |
| <i>mohs hardness</i> | 3 | 2,5 | 1,5 | - |
| Kapasitas panas | 24,440 | 25,470 | 27,112 | $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| <i>Konduktivitas thermal</i> | 401 | 116 | 66,8 | $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| <i>Thermal expansion</i> | 16,5 | 30,2 | 22 | $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |

2.3. Pemaduan (Alloying)

Paduan merupakan campuran dengan melebur logam bersamaan. Sebelum dilakukan penambahan elemen paduan pada keadaan lelehan, harus bebas dari oksigen sehingga tidak menimbulkan oksidasi.^[9] Sejumlah elemen paduan yang ditambahkan dalam suatu logam akan meningkatkan karakteristik dari logam tersebut. Pemaduan dapat meningkatkan atau menurunkan kekuatan, kekerasan, konduktivitas listrik dan panas, ketahanan korosi, atau merubah warna dari suatu logam. Penambahan suatu elemen untuk meningkatkan satu sifat mungkin akan memberikan efek yang tidak diharapkan pada sifat yang lain.^[10]

2.3.1. Prinsip Teori Paduan

Bila logam B dipadukan dengan logam A akan didapatkan berbagai struktur dan susunan atom dalam paduan tersebut, bergantung pada jumlah komponen logam dan temperatur paduan. Jadi bila dua jenis atom seolah-olah sama dan terdispersi dengan homogen, terbentuk larutan padat akan tetapi, hanya pada beberapa sistem paduan didapatkan larutan padat dengan variasi komposisi dari A murni hingga B murni, contohnya sistem tembaga-nikel. Biasanya, elemen kedua terbatas kelarutannya dalam larutan padat, dan terbentuk larutan padat primer yang mempunyai struktur kristal yang sama dengan logam induk. Pada konsentrasi logam kedua yang lebih tinggi, terbentuk fase baru yang disebut fase antara (intermediate phase), dengan struktur kristal yang umumnya berbeda dengan struktur logam induk. Fase antara ini disebut juga larutan padat sekunder bila mempunyai variasi komposisi yang luas, atau senyawa intermetalik bila rentang homogenitas kecil.^[11]

2.3.1.1. Larutan Padat Substitusi Primer

Faktor-faktor yang mempengaruhi kelarutan padat primer adalah sebagai berikut :

- a. Faktor ukuran atomik.

Dua logam dapat membentuk larutan padat dengan rentang kontinu apabila mempunyai struktur Kristal sama. Namun, meskipun struktur Kristal kedua

elemen tersebut sama, kelarutan primer terbatas, bilamana persyaratan ukuran atom Kedua logam, yaitu jarak terdekat atom dalam Kristal logam murni, tidak dipenuhi. Bila perbedaan antara atom terlarut dan atom pelarut lebih dari 15 %, kemungkinan terbentuknya larutan pada primer kecil. Dalam hal ini dikatakan bahwa faktor ukuran sangat berpengaruh terhadap larutan padat.

b. Efek elektrokimia.

Semakin elektropositif suatu komponen atau semakin elektronegatif komponen lainnya, semakin besar kecenderungan kedua elemen tersebut untuk membentuk senyawa dibandingkan membentuk larutan padat. Sifat elektronegatif unsur dalam Tabel Periodik meningkat dan kiri ke kanan pada semua periode dan dari bawah ke atas pada setiap golongan.

c. Efek valensi relatif.

Logam dengan valensi lebih tinggi cenderung larut dalam logam dengan valensi lebih rendah daripada sebaliknya. Kaidah umum ini berlaku untuk logam bervalensi satu, tembaga, perak, dan emas serta unsur dengan valensi lebih tinggi. Jadi, sebagai contoh, tembaga akan melarutkan sekitar 40 % seng dan membentuk larutan padat akan tetapi pelarutan tembaga dalam seng terbatas.

2.3.1.2. Larutan Padat Interstisi

Larutan padat interstisi terjadi bila atom larut dapat menyusup di antara kisi pelarut. Akan tetapi, penelaahan pada kisi kristal biasa menunjukkan bahwa ukuran ruang interstisi sangat terbatas, oleh karena itu hanya atom kecil saja, seperti hidrogen, boron, karbon atau nitrogen, dengan jari-jari atom yang jauh lebih kecil dari satu nanometer dapat membentuk larutan seperti ini.

2.3.1.3. Fasa Intermediate

a. Senyawa elektrokimia

Terdapat kecenderungan kuat untuk membentuk senyawa apabila salah satu elemennya bersifat elektropositif dan yang lainnya elektronegatif.

b. Senyawa faktor ukuran

Apabila diameter atomik dari dua elemen berbeda sedikit, akan terbentuk senyawa elektron. Namun, bila perbedaan diameter atom cukup besar, akan terbentuk senyawa faktor-ukuran baik jenis interstisi maupun substitusi. Pembahasan terhadap beberapa larutan padat interstisi menunjukkan bahwa apabila atom interstisi mempunyai radius atomik 0,41 kali radius atom logam, maka atom tersebut menempati lokasi interstisi terbesar dari struktur tanpa menimbulkan distorsi. Jika rasio radius atom interstisi terhadap atom logam lebih besar dari 0,41 tetapi lebih kecil dari 0,59 maka terbentuk senyawa interstisi; seperti : hidrida, borida, karbida, dan nitride logam transisi. Senyawa ini mempunyai struktur sederhana, yaitu kubik atau heksagonal, dengan atom logam menempati lokasi kisi normal serta atom non-logam menempati lokasi interstisi.

c. Senyawa elektron

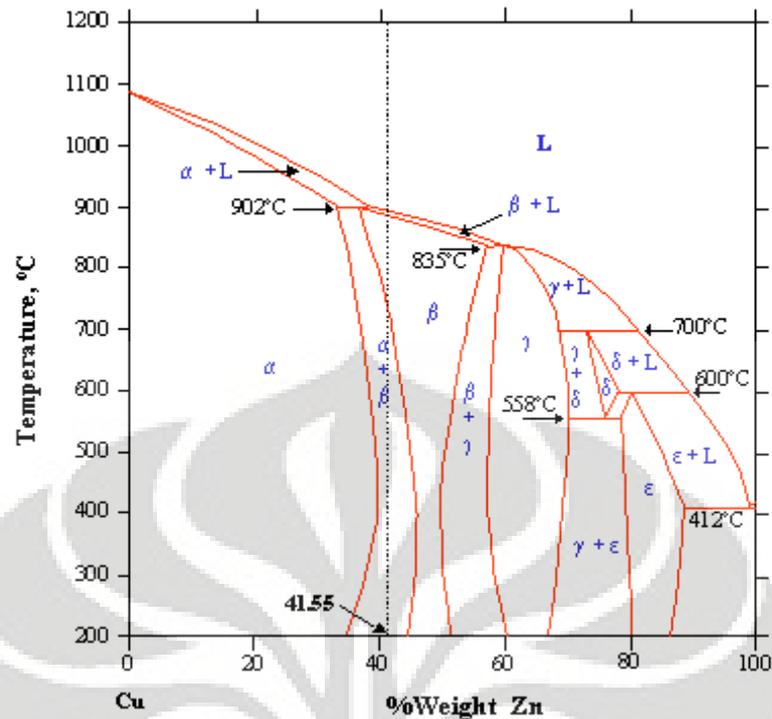
Penelaahan terhadap paduan tembaga, perak dan emas dengan logam subkelompok B menunjukkan bahwa diagram keseimbangannya memiliki kesamaan. Umumnya semuanya memiliki struktur α , β , γ , ϵ yang serupa, dan meskipun tiap fase memiliki komposisi berbeda bila dinyatakan dalam persen berat atau persen atom, komposisi akan sama bila dinyatakan dalam konsentrasi elektron. Hume-Rothery dan rekan-rekannya menunjukkan bahwa rasio elektron per atomik (rasio e/a) di samping penting untuk menentukan batas kelarutan padat- α juga ikut mengendalikan pembentukan beberapa fase antara; oleh karena itu, disebut “senyawa elektron”.

2.3.2. Paduan Tembaga

Mekanisme penguatan fase padatan (*solid solution strengthening*) pada tembaga merupakan metode penguatan yang umum digunakan. Penambahan elemen paduan pada lelehan tembaga akan terlarut sempurna dan membentuk mikrostruktur yang homogen. Pada beberapa kasus, penambahan sejumlah elemen paduan tidak akan larut. Jumlah yang tepat tergantung pada kelarutan padatan dari elemen pembagi di dalam tembaga. Ketika batas kelarutan padatan berlebih, akan terbentuk dua mikrostruktur dengan komposisi dan kekerasan yang berbeda.

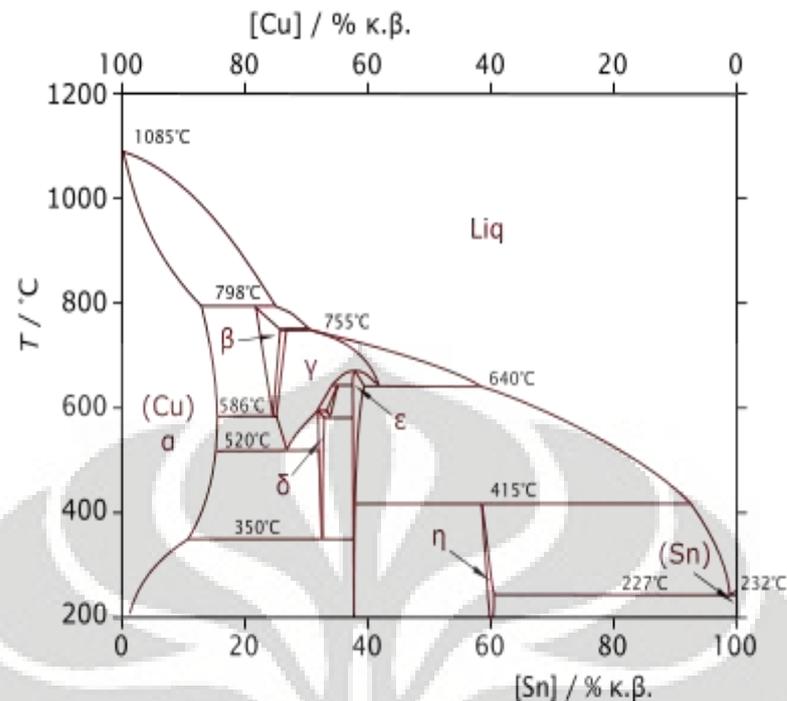
Tembaga yang dipadu dengan timah, dikenal dengan nama perunggu, akan menghasilkan paduan yang lebih kuat dan lebih keras dibandingkan tembaga murni. Sama halnya jika tembaga dipadu dengan seng, dikenal dengan nama kuningan. Timah lebih efektif dalam hal peningkatan kekuatan pada tembaga dibandingkan seng, namun timah lebih mahal dan menurunkan sifat konduktivitas listrik dan panas. Aluminium, mangan, nikel, dan silikon dapat ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan paduan tembaga.^[12]

Paduan tembaga yang banyak dijumpai adalah kuningan (CuZn), dengan seng (Zn) sebagai atom substitusi. Dalam diagram fasa Cu-Zn, Cu melarutkan sampai kurang lebih 40 % Zn dalam larutan padat primer, dan pendinginan setiap paduan dalam kurun ini yang tentunya berstruktur fcc menghasilkan struktur larutan α . Sebaliknya, larutan padat primer lain yaitu fase cph sangat terbatas. Fenomena khusus yang terlihat pada diagram adalah adanya beberapa larutan padat sekunder yaitu fase-fase yang berada di tengah-tengah diagram dengan kurun kehomogenan yang cukup luas, dan terlihat bahwa setiap fase antara (intermediate) terbentuk selama pembekuan dari reaksi peritektik. Juga terlihat fase δ menjadi tidak stabil pada temperatur di bawah 560 °C dan terdekomposisi dengan eutektoid menjadi $\gamma + \epsilon$. Diagram juga memperlihatkan transformasi order-disorder fase β yang terjadi pada paduan yang mengandung kurang lebih 50% Zn dalam kurun temperatur 450 – 470 °C. Di atas 450 °C, fase β bcc merupakan larutan padat tidak teratur (*disordered*), tetapi pada temperatur yang lebih rendah atom-atom Zn terdistribusi teratur dalam kisi bcc dan fase teratur (*ordered*) ini disebut β' .^[12] Diagram Fasa Cu-Zn dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram Fasa Cu-Zn^[12]

Perunggu (CuSn) merupakan salah satu paduan tembaga. Memiliki kekuatan yang lebih baik dari kuningan, dan masih mempunyai ketahanan korosi yang baik. Pada diagram fase Cu-Sn. Fasa β terbentuk sebagai hasil reaksi peritektik pada 798 °C. Pada 586 °C, fasa β mengalami reaksi eutektoid membentuk campuran ($\alpha + \gamma$). Pada 520 °C, γ juga mengalami transformasi eutektoid menjadi ($\alpha + \delta$). Pada ~ 350 °C fasa δ terdekomposisi melalui reaksi eutektoid menjadi ($\alpha + \epsilon$). Kemiringan garis kelarutan dibawah 520 °C menunjukkan penurunan tajam pada kelarutan Sn di dalam fase α .^[13] Diagram fasa Cu-Sn dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram Fasa Cu-Sn^[13]

2.3.3. Paduan CZT

Dalam paduan CZT tingkat efisiensi Sn lebih tinggi dibandingkan dengan Zn dalam hal peningkatan kekuatan paduan, tetapi timah dapat menurunkan konduktivitas listrik dan panas dan juga harga yang lebih mahal. Untuk saat ini, paduan CZT banyak diaplikasikan untuk material *soldering*. Saat ini, teknologi *soldering* telah menjadi kebutuhan dalam bidang interkoneksi dan *packaging* dalam hampir semua peralatan elektronik. *Lead-bearing solders*, khususnya pada eutektik atau dekat eutektik paduan Sn-Pb, telah digunakan secara luas pada perakitan sirkuit elektronik modern. Bagaimanapun juga, timbal (Pb) merupakan bahan kimia yang berbahaya bagi kehidupan manusia dan lingkungan. Sehingga, ini merupakan isu yang penting untuk mengembangkan solder yang bebas timbal untuk perakitan peralatan elektronik. Meskipun beberapa eksperimen dan komersialisasi dari solder dengan bahan dasar timah (Sn) tanpa timbal telah banyak, tidak ada standar yang mengaturnya, seperti sifat material, manufaktur, dan biaya.^[14]

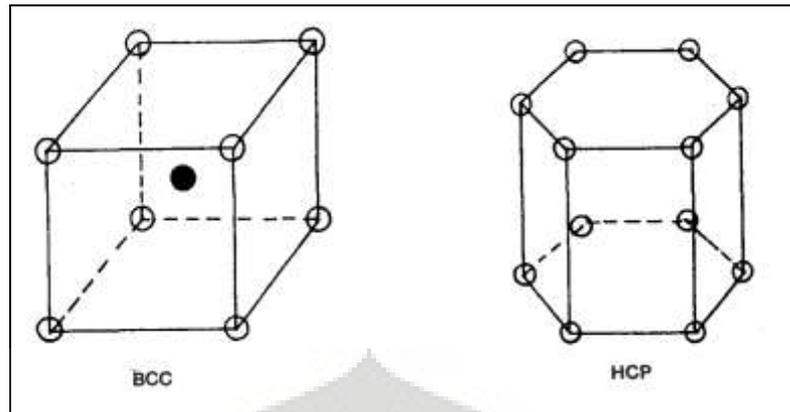
Solder yang bebas timbal kaya akan timah (Sn) dipadu dengan unsur paduan seperti bismut (Bi), argentum (Ag), tembaga (Cu), indium (In), seng (Zn), stibium (Sb), dan lain-lain. Paduan solder tersebut dikembangkan dari diagram biner Sn. Paduan-paduan tersebut antara lain Sn-0,7Cu, Sn-3,5Ag, Sn-9Zn, Sn-58Bi, dan Sn-52In. Saat ini, paduan Sn-Ag-Cu seperti Sn-3,5Ag-0,7Cu, Sn-4,7Ag-1,7Cu dengan unsur tambahan In dan Bi untuk meningkatkan sifat pelekatan (*wetting properties*) telah direkomendasikan sebagai pengganti solder Pb-Sn. Namun unsur Ag, In dinilai sangat mahal. Menyadari hal ini, paduan untuk solder harus memiliki unsur paduan yang tidak mahal seperti Sn, Zn, Cu. Solder dengan paduan Sn-0,7Cu telah digunakan untuk solder gelombang (*wave soldering*) namun paduan ini memiliki kekurangan jika dibandingkan dengan paduan Sn-Pb yaitu ketahanan terhadap *creep* dan kekuatannya lebih rendah. Paduan Sn-9Zn menjadi alternatif dengan temperatur leleh ~ 198 °C, hampir sama dengan paduan Sn-37Pb. Oleh karena itu, banyak penelitian terhadap paduan solder. Paduan Sn-Zn memiliki sifat ketahanan korosi dan pelekatan yang kurang baik karena unsur Zn terlalu aktif. Untuk menghasilkan paduan solder Sn-Zn yang lebih baik, dilakukan dengan menggunakan substrat Cu. Sifat pelekatan meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan Cu.^[15]

2.4. Teori Solidifikasi Metal

2.4.1. Keadaan Padatan dan Cairan

2.4.1.1. Keadaan Padatan

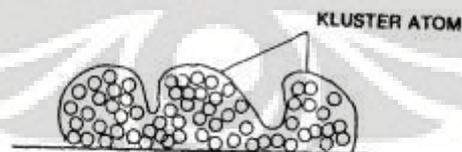
Proses padatan (*solidification*) dari bahan baik metal maupun paduan tidak dapat dilihat hanya dari sifat makro seperti konduktivitas panas saja. Contoh proses padatan dilihat secara atomistik adalah proses penyusunan atom. Kristal adalah susunan atom-atom sejenis atau berlainan. Setiap atom menempati posisi tertentu sesuai dengan jarak kisi (*lattice spacing*)^[16], Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Setiap atom menempati posisi tertentu sesuai dengan jarak kisi (*lattice spacing*).^[16]

2.4.1.2. Keadaan Cairan

Pada dasarnya kita tidak dapat menggambarkan susunan atom dari cairan sama dengan susunan atom di dalam suatu kristal. Oleh karena itu, cairan tidak mempunyai struktur kristal tertentu. Pengertian random adalah jarak di antara atom-atom tidak tertentu. Sifat-sifat cairan dapat diketahui dari sifat-sifat viskositas, listrik, panas, densitas dan sifat difusivitas. Sifat cairan juga dapat dijelaskan dan sifat order jarak pendek (*SRO*) dan order jarak jauh (*LRO*). Struktur cairan dapat dikatakan sebagai struktur suatu kluster yang menyerupai susunan kristal, berorientasi secara random dengan Sejumlah ruangan kosong (*free space*) di antara tetangganya dan beberapa saling berkaitan, sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Struktur suatu kluster.^[16]

2.4.1.3. Perbedaan Antara Padatan dan Cairan

Perbedaan yang nyata antara padatan dan cairan adalah bila dilakukan tegangan/stress, padatan mengalami deformasi elastis maupun plastis akibat

adanya shear stress. Sedangkan cairan hanya akan mengalami perubahan bilamana dilakukan tegangan/stress. Atau hanya mengalami perubahan. Namun yang paling penting untuk menunjukkan perbedaannya adalah secara termodinamika. Secara termodinamika dikatakan bahwa panas laten gabungan (*latent heat of fusion*) harus diberikan pada bahan kristal agar dapat mengubahnya dari kristalin menjadi cairan. Dengan perkataan lain energi potensial dari cairan lebih besar daripada padatan, walaupun kedua-duanya terletak pada suatu minima *free energy* (minima untuk cairan lebih besar daripada minima padatan). Selain dari kriteria termodinamika, kepadatan/densitas bahan padatan lebih besar daripada cairan. Struktur kristal padatan tertentu (bcc, fcc atau hcp), sedangkan struktur cairan bersifat random, namun jumlah atomnya tetap sama.

2.4.1.4. Pendekatan Kuasi Kimia

Pendekatan kuasi kimia (*quasi-chemical approach*) menyatakan bahwa baik kristal maupun cairan diikat oleh gaya-gaya yang bekerja di antara pasangan atom. Sehingga energi yang diperlukan untuk melakukan penguapan sama dengan jumlah seluruh energi untuk memutuskan ikatan-ikatan di antara atom-atom. Pemanasan tidak mengakibatkan terputusnya ikatan atom, tetapi hanya merentangkan ikatan atom, sehingga hanya $1/25$ energi yang dibutuhkan. Di dalam proses pencairan logam, hanya 1 ikatan dari 25 ikatan yang ada yang lepas karena jarak tetangga terdekat dari cairan tidak sama satu dengan lainnya, maka energi yang dibutuhkan untuk melepaskan ikatannya tidak sama satu dengan lainnya. Karena itu dapat dikatakan bahwa energi untuk setiap atom untuk mengubah dari padatan ke cairan sebanding dengan jumlah ikatan atom yang terlepas di dalam susunan atom-atom yang membentuk kristal. Jadi panas laten gabungan untuk setiap atom sebanding dengan pengurangan jumlah 6 ikatan di dalam kristal atau panas yang diperlukan untuk melelehkan kristal sebanding dengan 6 ikatan kristal untuk setiap atomnya.

2.4.1.5. Antarpermukaan Padatan dan Cairan

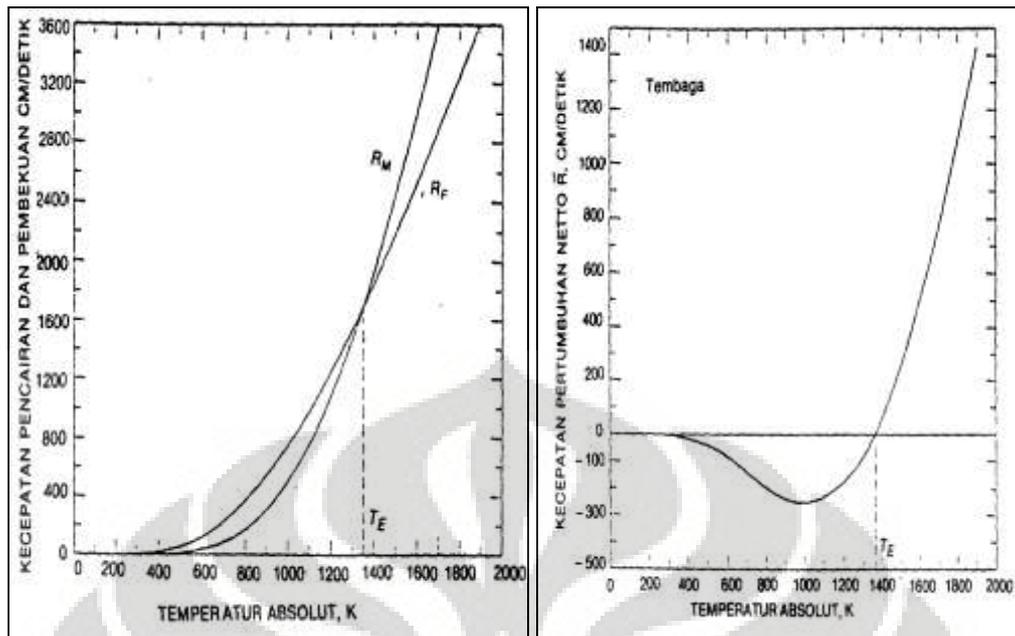
Bila kita memandang susunan atom pada permukaan, di mana susunan atom di dalam kristal tidak terganggu, maka jumlah energi yang ada pada atom

tersebut sebanding dengan jumlah ikatannya dengan tetangga terdekat atom tersebut. Atom yang terletak pada permukaan mempunyai jumlah tetangga atom dan 3 sampai 11 atom. Energi atom yang berada pada permukaan lebih besar dari pada atom yang berada di dalam kristal dan sebanding dengan jumlah ikatan dengan tetangga terdekatnya. Atom dengan 6 tetangga lainnya mempunyai energi panas laten yang 2 kali lebih besar daripada atom dengan 3 tetangga atom. Dengan kata lain untuk melepaskan atom dengan 6 tetangga atom membutuhkan energi tambahan sebanyak jumlah energi dengan tiga tetangga atom. Antarpermukaan padatan dan cairan dapat didefinisikan sebagai permukaan yang memisahkan atom-atom yang menempati suatu struktur kisi (*lattice structure*) maupun yang tidak menempati struktur tersebut. Dengan demikian antarpermukaan bisa halus bisa pula kasar dalam arti atomistik.

Bila permukaan metal dalam keadaan padat bersentuhan dengan permukaan dalam keadaan cair, maka pada temperatur tersebut bila bertambah, permukaan cairan akan bertambah besar, dan sebaliknya akan terjadi bila temperaturnya berkurang. Temperatur di mana permukaannya setimbang disebut T_E . Kecepatan pembekuan dan pencairan dapat dilihat secara eksperimen dan sebanding dengan kecepatan penambahan atau pengurangan panas laten. Proses pencairan dan pembekuan harus melalui apa yang disebut sebagai *activated state*. Pada *activated state* ini terdapat energi yang selalu lebih besar dari pada energi rata-rata atom dalam keadaan cair. Atom-atom yang menempati maupun keluar dari *step*/tempat yang memungkinkan suatu pertumbuhan membutuhkan panas laten yang sama.

Proses pembekuan dan pencairan memerlukan kondisi sebagai berikut:

- a. Harus mempunyai energi yang cukup agar dapat mencapai *activated state*.
- b. Harus mempunyai kecepatan yang cukup besar agar dapat membentuk interface.
- c. Harus dapat menemukan tempat-tempat di mana atom-atom cairan dapat bergabung dengan atom padatan.



Gambar 2.7.a Hubungan antara kecepatan pencairan/pembekuan terhadap temperatur.^[16]

Gambar 2.7.b Hubungan antara kecepatan pertumbuhan terhadap temperatur.^[16]

Pada suatu temperatur keseimbangan T_E kecepatan pencairan maupun pembekuan sama. Pada T_E terjadi kesetimbangan antara R_M dan R_F , dengan kata lain sedikit saja deviasi dan titik kesetimbangan ini akan mengubah keadaan, yaitu mencair bila $> T_E$ dan membeku bila $< T_E$. Dengan demikian maka net rate/kecepatan bersih R adalah perbedaan antara R_F dan R_M . Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2.7.

2.4.2. Proses Penumbuhan Kristal

Proses penumbuhan kristal terjadi melalui suatu kesetimbangan antara atom yang datang ke suatu permukaan dan keluar dari permukaan bahan padatan. Proses penumbuhan kristal selalu terjadi melalui proses atom tunggal. Alternatif lain yang dapat terjadi adalah melalui pembentukan kluster atom atau kelompok atom secara agregat, kemudian membentuk kristal yang kecil. Namun probabilitas kejadian seperti ini sangat kecil untuk membentuk kristal yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena kristal yang kecil tidak stabil. Dengan perkataan lain pengelompokan atom yang memungkinkan untuk berorientasi pada

antarpermukaan dan menjadi bagian dari pertumbuhan kristal, mempunyai masa hidup yang pendek.

Proses penumbuhan bahan kristal selalu melalui penambahan atom satu per satu. Prosesnya tergantung apakah tempat-tempat pada permukaan tersedia untuk proses penumbuhan dan sebaliknya apakah tempat-tempat tersebut memungkinkan atom untuk meninggalkan tempat-tempat tersebut. Demikian pula apakah proses penambahan atom terjadi hanya pada tempat-tempat tertentu seperti tempat-tempat penumbuhan yang menyerupai anak tangga, yang membentuk sisi dari suatu permukaan.

Keseimbangan antara larutan padatan dengan suatu komposisi dengan larutan cairan dengan komposisi lain pada suatu temperatur tertentu ditentukan oleh proses kinetik permukaan. Dengan perkataan lain atom terlarut di dalam kristal, membutuhkan energi (bisa besar atau kecil) untuk mencapai *activated state* dibandingkan dengan atom pelarut. Bila energi yang dibutuhkan atom terlarut kecil, maka atom terlarut lebih mudah mencair daripada atom pelarut, namun untuk membeku tidak ada bedanya. Keseimbangan akan tercapai bila atom terlarut di dalam padatan lebih sedikit daripada di dalam cairan. Untuk atom pelarut, keseimbangan akan tercapai bila jumlah atom pelarut dari padatan ke cairan dan dari cairan ke padatan, khususnya untuk padatan dan cairan dari atom tunggal (murni). Untuk paduan hal ini akan berbeda karena atom terlarut lebih sedikit di dalam cairan daripada di dalam padatan. Peranan atom pelarut adalah memperlambat proses pembekuan atom pelarut dan juga mempercepat proses pencairan

2.4.3. Redistribusi Larutan Selama Proses Solidifikasi

Bila larutan tidak bergerak satu dengan lainnya, maka konsekuensinya tidak akan terjadi campuran baik di dalam padatan maupun di dalam cairan.

Cairan → padatan (komposisi tetap)

Proses ini terjadi hanya pada lokasi tertentu akibat cairan mengalami supercooling yang cukup besar (pendinginan cukup besar), namun kenyataannya jarang terjadi.

Yang dimaksud dengan solidifikasi tanpa pencampuran pada kenyataannya proses transpor atom terjadi secara difusi. Karena difusi di dalam padatan jauh lebih kecil daripada difusi di dalam cairan, maka difusi di dalam padatan diabaikan. Semua difusi yang terjadi di dalam cairan terjadi tegak lurus antar permukaan padatan dan cairan. Oleh karena itu kita dapat menyatakan kecepatan gerak dan batas antar permukaan sebagai R cm/detik (variabel ini diabaikan untuk padatan karena kecepatan geraknya sangat kecil).^[16]

2.5. Arc Melting Furnace

Sangat tidak mudah untuk memperoleh hasil yang memenuhi standar yang sesuai dalam hal kandungan gas, kebersihan dan tingkat homogenitas, apabila proses peleburan dilakukan dengan cara peleburan konvensional, proses-proses casting lainnya ataupun *vacuum induction furnace*.

Arc melting furnace pertama kali digunakan untuk pembuatan *superalloy*. Pada akhir tahun 1950 digunakan untuk memproduksi material bagi industri *aircraft*. Untuk memproduksi ingot yang homogen memerlukan keserasian dari parameter-parameter proses peleburan. Dimana besarnya arus mempunyai keistimewaan untuk menentukan pengaruh pada geometri dari penyatuan cairan dan kondisi pembekuan. Keistimewaan dari proses peleburan dalam lingkungan vakum adalah sebagai berikut :^[17]

1. Menghilangkan gas-gas yang terperangkap seperti hidrogen dan nitrogen.
2. Mengurangi kandungan elemen-elemen terperangkap yang tidak diinginkan dengan tekanan uap tinggi.
3. Meningkatkan pembersihan oksida.

Busur listrik yang dihasilkan oleh *arc melting furnace* sangat sensitif terhadap perubahan material . Oleh karena itulah, maka kebersihan merupakan hal yang amat esensial dalam proses peleburan. Untuk mewujudkan kebersihan tersebut, maka elektroda, busur yang timbul, dan material yang akan dilebur harus senantiasa terlindung dan pengaruh udara sekitar (terutama oksigen). Fungsi utama dan gas pelindung adalah untuk melindungi elektroda, busur, dan material

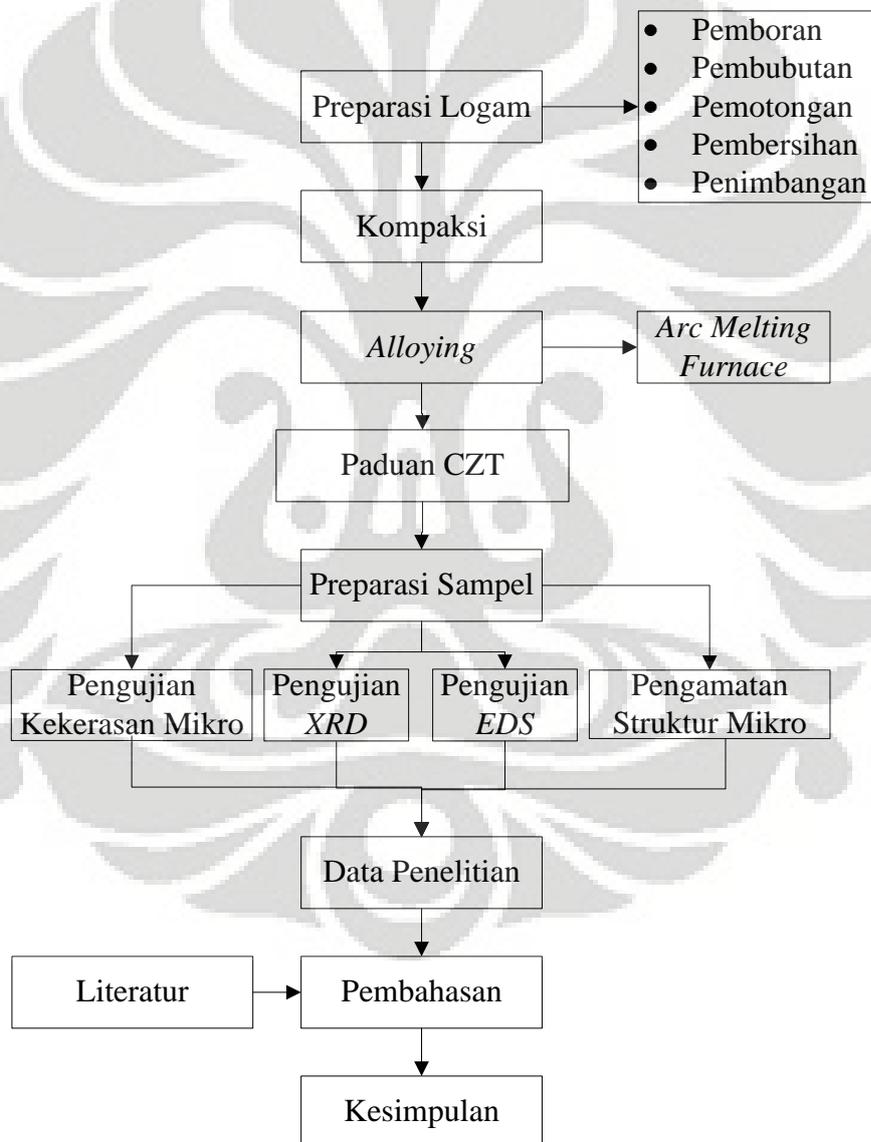
yang akan dilebur dan kontaminasi udara sekitar. Dengan adanya sejumlah gas oksigen yang larut dalam metal cair akan membentuk oksida logam berupa lapisan pengotor baik luar maupun dalam permukaan logam yang dilas. Terdapat beberapa gas pelindung yang dapat digunakan dalam proses peleburan, yaitu: Nitrogen (N_2), helium (He), argon (Ar), dll. Gas argon merupakan gas pelindung yang paling baik untuk digunakan. Hal ini dikarenakan gas argon memiliki beberapa keistimewaan, antara lain :

1. Biaya relatif lebih rendah dari gas jenis lain.
2. Mudah diperoleh (0,9% keberadaan di alam).
3. Lebih 'berat' dari udara (oksigen) dan *draft-resistant*:
4. Hanya diperlukan sejumlah kecil gas untuk menghasilkan proteksi yang memadai.
5. Panjang busur yang dihasilkan baik.
6. Pembersihan terhadap oksida aluminium dan paduannya baik.
7. Kemudahan dalam penyalaan busur awal.
8. Halus (tidak berisik).
9. Menstabilkan busur.
10. *Non-Flamable*.
11. *Colorless*.
12. *Odorless*.
13. *Chemically inactive gas*.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini akan dibuat paduan CZT dengan menggunakan metode *arc melting furnace*. Secara umum, diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Mesin bor
2. Gergaji besi
3. *Ultrasonic cleaner*
4. Timbangan digital, sendok dan plastik
5. Cetakan sampel (*dies*) dan mesin kompaksi *Krisbow*
6. *Arc melting furnace*
7. *Beaker glass*
8. *Hair dryer*
9. Mesin amplas dan poles
10. *SEM*
11. *XRD*
12. *Micro Hardness Testing*

3.2.2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. Logam Timah 99,9 % dalam bentuk ingot.
2. Logam Kuningan 60 / 40 dalam bentuk batangan (*rod*) dengan diameter 19 mm.
3. Alkohol 70 %.
4. Kertas amplas, kain poles dan alumina.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Bahan

3.3.1.1. Preparasi Sampel Timah

Logam timah berbentuk ingot setengah bola di lakukan proses pemboran untuk mendapatkan sampel timah dalam bentuk geram-geram atau serbuk-serbuk kasar. Geram-geram ini diharapkan dapat mempermudah proses pencampuran dengan sampel kuningan. Geram-geram timah hasil proses pemboran dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Sample Timah

3.3.1.2. Preparasi Sampel Kuningan

Logam kuningan berbentuk seperti pipa di potong untuk mendapatkan panjang ± 5 mm, sedangkan logam kuningan berbentuk batangan di potong untuk mendapatkan ketebalan $\pm 0,5$ mm. Pemotongan dilakukan dengan menggunakan gergaji besi. Hal ini dilakukan untuk menempatkan serbuk timah di dalam kuningan mengingat temperatur lebur timah lebih rendah dari kuningan. Pada logam kuningan juga dilakukan proses pembubutan untuk mendapatkan geram-geram kuningan sehingga mempermudah proses pencampuran material yang akan dibuat paduan. Geram-geram kuningan hasil pembubutan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Sample Kuningan

3.3.1.3. Pembersihan Sampel

Pembersihan logam kuningan yang telah dipotong dilakukan dengan pengamplasan untuk menghilangkan oksida yang terdapat pada logam kuningan tersebut. Untuk pembersihan serbuk timah dilakukan dengan menggunakan alat *ultrasonic cleaner*. Tahapan pembersihan serbuk timah ini adalah sebagai berikut :

- a. Mempersiapkan dan membersihkan *ultrasonic cleaner* yang akan digunakan.
- b. Mengisi *ultrasonic cleaner* dengan air sampai batas yang ditentukan.
- c. Memasukkan serbuk timah yang akan dibersihkan ke dalam *beaker glass* dan menambahkan alkohol 70% ke dalamnya.
- d. Meletakkan *beaker glass* yang berisi serbuk timah dan Alkohol ke dalam *ultrasonic cleaner*.
- e. Mengatur waktu pembersihan dan menyalakan alat *ultrasonic cleaner*.



Gambar 3.4 Ultrasonic Cleaner

3.3.1.4. Penimbangan Sampel

Langkah-langkah yang dilakukan untuk menentukan berat masing-masing Sample adalah sebagai berikut :

1. Menentukan berat sampel kuningan yang akan digunakan
2. Menentukan berat sampel timah yang akan digunakan dengan rumus :

Paduan yang diinginkan adalah 2Cu/Zn/Sn sehingga,

$$m_{Sn} = \frac{1}{3} \left(\frac{m_{CuZn}}{\left(\frac{Ar_{Cu} + Ar_{Zn}}{2} \right)} \right) Ar_{Sn} \quad (3.1)$$

Dimana:

m = berat

Ar = berat atom relatif



Gambar 3.5 Timbangan Digital

Tabel 3.1 Bentuk dan Massa Sampel

| Sampel | Bentuk | Massa Kuningan (gr) | Massa Timah (gr) | % Atomik | | |
|--------|------------------------------------|---------------------|------------------|----------|----|----|
| | | | | Cu | Zn | Sn |
| 1 | Serbuk kuningan & serbuk timah | 5 | 3,07 | 50 | 25 | 25 |
| 2 | Selongsong kuningan & serbuk timah | 11,96 | 7,3 | 50 | 25 | 25 |
| 3 | Selongsong kuningan & serbuk timah | 16,41 | 10,06 | 50 | 25 | 25 |

3.3.2. Proses Kompaksi

Proses kompaksi dilakukan dengan menggunakan mesin kompaksi *Krisbow*. Kompaksi yang digunakan adalah *single pressing* dalam keadaan *cold compacting* dilingkungan atmosfer. Tahapan kompaksi adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan dan membersihkan cetakan kompaksi.
2. Memasukkan bahan ke dalam cetakan.
3. Meletakkan cetakan pada mesin kompaksi.
4. Memberikan pembebanan tekukan kompaksi sebesar 12 TonF.
5. Melepaskan cetakan dari mesin kompaksi.
6. Mengeluarkan bakalan paduan dari dalam cetakan.



Gambar 3.6 Mesin Kompaksi *Krisbow*

3.3.3. Proses Pemaduan

Pada dasarnya pembuatan paduan CZT dilakukan dengan menggunakan *arc melting furnace*. Namun untuk skala yang lebih besar (~ 200 gram) dilakukan dengan *induction melting furnace*. Proses peleburan dilakukan dalam suasana gas argon untuk menghindari oksidasi. Untuk proses peleburan di dalam dapur busur, dilakukan paling sedikit 2 kali untuk mendapatkan ingot paduan dengan tingkat homogenitas yang tinggi. Berikut adalah tahapan peleburan :

1. Sampel dimasukkan ke dalam ruang (*chamber*).
2. Dilakukan proses pem-vakuman.
3. Menginjeksi gas Argon ke dalam *chamber*.
4. Proses peleburan dengan menggunakan busur las.
5. Panas (temperatur) yang dikeluarkan diatur dari arus yang ditentukan.



Gambar 3.7 *Arc melting furnace*

3.3.4. Karakterisasi

3.3.4.1. Pengujian *XRD*

Pengujian *X-Ray Diffraction (XRD)* digunakan untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk pada sampel. Pengujian dilakukan di Departemen Metalurgi & Material FTUI menggunakan *PHILIPS X-Ray Diffractometer* dengan radiasi monokromatik $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54056\text{\AA}$). Gambar mesin *XRD* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Mesin *XRD*

Fasa kristal yang muncul diidentifikasi menggunakan perangkat lunak *PCPDF-WIN* dan *APD*. Selanjutnya didapatkan grafik dengan axis berupa 2θ dan ordinat berupa intensitas. Suatu senyawa memiliki 2θ dan intensitas spesifik sehingga untuk mengetahui senyawa apakah yang berada pada puncak suatu grafik *XRD* dapat dilakukan dengan mencocokkan data grafik tersebut dengan *database* yang dirangkum oleh *International Centre for Diffraction Data*.

3.3.4.2. Pengujian *EDS*

Pengujian komposisi dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* LEO 420 dengan voltase 300 – 30 kV dan *working distance* 5 – 12 mm yang dilengkapi dengan *Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS)*.



Gambar 3.9 Alat *Scanning Electron Microscope (SEM)*

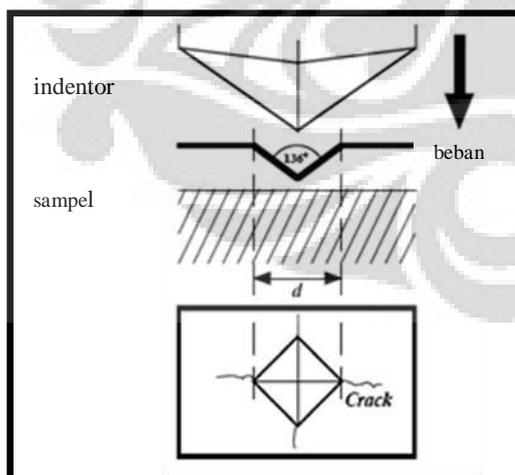
Pengujian komposisi dilakukan dengan *EDS* untuk mengetahui komposisi fasa-fasa yang terbentuk, kemudian dengan membandingkan prosentase dari unsur-unsur yang menyusunnya dapat diketahui jenis fase yang terbentuk.

3.3.4.3 Pengamatan struktur mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 100 kali dan 500 kali. Berikut ini merupakan tahapan untuk pengamatan struktur mikro:

1. Mempersiapkan sampel yang akan diamati:
 - a. Membuat mounting pada sampel untuk memudahkan memegang sampel pada saat pengerjaan berikutnya.
 - b. Mengamplas permukaan sampel menggunakan kertas amplas dengan grit 800, 1000, 1200, dan 1500.
 - c. Memoles permukaan sampel yang telah rata dan halus dengan menggunakan zat poles alumina yang dituangkan di atas kain beludru hingga permukaan sampel mengkilat dan bebas dari goresan.
 - d. Mengetsa sampel dengan larutan 15% FeCl_3 ditambah HNO_3 .
 - e. Membilas permukaan sampel dengan air dan alkohol kemudian mengeringkannya dengan alat pengering.
 2. Mengamati struktur mikro dan komposisi paduan yang terbentuk dengan menggunakan mikroskop optik.
- 3.3.4.4. Pengujian Kekerasan Mikro

Pengujian kekerasan ini bertujuan untuk mengamati distribusi kekerasan pada paduan. Metode yang digunakan dalam pengujian adalah metode penjejakan *Vickers*. Sampel yang digunakan adalah sampel yang sudah dilakukan pengujian struktur mikro, sehingga pada saat penjejakan bisa dilihat struktur mikro dari sampel. Skema penjejakan dan alat pengujian kekerasan *Vickers* dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10.a Skema Penjejakan
Vickers



Gambar 3.10.b *Micro Hardness Testing*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembuatan Sampel

4.1.1. Preparasi Sampel

Untuk mendapatkan hasil pemaduan yang homogen, maka diperlukan proses pencampuran material-material penyusun dari paduan CZT. Proses pencampuran secara homogen terjadi apabila material yang digunakan dalam bentuk serbuk. Untuk itu logam timah dan kuningan yang akan digunakan dalam proses pemaduan sebaiknya dalam bentuk serbuk-serbuk kasar atau geram-geram. Untuk mendapatkan geram-geram material dapat dilakukan dengan menggunakan proses pembubutan. Proses pembubutan digunakan karena proses yang mudah dan tidak membutuhkan waktu yang lama. Tetapi untuk logam timah tidak dapat dilakukan dengan menggunakan proses pembubutan dikarenakan sifat timah yang sangat ulet dan memiliki temperatur lebur yang sangat rendah sehingga akan menghasilkan geram-geram kasar. Sehingga untuk mendapatkan geram-geram timah dilakukan dengan proses pemboran, akan tetapi proses pemboran ini membutuhkan waktu yang cukup lama.

4.1.2. Proses Kompaksi

Proses kompaksi dilakukan untuk mendapatkan sampel dengan tingkat *densitas* tinggi sehingga akan memudahkan *handling* sampel dalam proses pemaduan. Kompaksi dilakukan pada temperatur ruang dengan tekanan sekitar 12 TonF, manual (pengukit) dan tanpa pengikat dengan hanya menggunakan kekuatan mekanik. Kompaksi dilakukan secara perlahan-lahan untuk memberikan kesempatan geram-geram logam mengatur diri serapat mungkin. Penekanan dilakukan dengan beban terhadap penekan sampai geram-geram tersebut tertekan. Setelah proses kompaksi selesai, penekan diangkat secara perlahan-lahan agar dapat lebih mudah dilepas dari cetakan. dan selanjutnya dilakukan pengguncangan dan penorehan untuk mengetahui kekuatan mekanik dari sampel hasil kompaksi

tersebut. Hasil pengguncangan dan penorehan dari sampel hasil kompaksi menunjukkan hasil yang memuaskan, dimana sampel hasil kompaksi tidak mudah runtuh ketika dilakukan proses pengguncangan dan penorehan. Sampel hasil kompaksi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Sampel Hasil Kompaksi

4.2. Proses Pemaduan CZT

Pada penelitian ini, proses pemaduan CZT telah dilakukan dengan menggunakan beberapa alat atau metode, sampai akhirnya didapatkan ingot paduan yang cukup baik dengan menggunakan *arc melting furnace*.

4.2.1. *Tube Furnace*

Pada proses pemaduan CZT dengan menggunakan *tube furnace* digunakan sampel dalam bentuk geram-geram tanpa dilakukan proses kompaksi sebelumnya, pada proses ini yang terpenting adalah proses pencampuran material telah terdistribusi secara homogen untuk menghasilkan paduan yang homogen juga. Pada proses pemaduan dengan menggunakan *tube furnace*, sampel yang telah dilakukan penimbangan dan pencampuran dimasukkan kedalam wadah keramik yang kemudian diletakkan di bagian dalam dari *tube furnace* untuk dilakukan proses pemaduan.

- Material : Geram kuningan dan geram timah (dicampur)
- Parameter pemaduan : - Menggunakan gas argón;
 - Temperatur ke-1 = 650 °C (12 °C / menit)
 - Temperatur ke-2 = 1050 °C (12 °C / menit)
 - Waktu tahan ke-1 = 1 jam
 - Waktu tahan ke-2 = 3 jam
- Hasil Pengamatan : - Logam timah melebur, sedangkan logam kuningan tidak melebur
 - Tidak terbentuk paduan
 - Terjadi oksidasi (sampel gosong)

Proses pemaduan CZT dengan menggunakan *tube furnace* memberikan hasil yang tidak diharapkan, dimana tidak terbentuk paduan CZT. Hal ini dikarenakan pada proses pemaduan telah terjadi oksida yang menyebabkan sampel juga ikut teroksidasi sehingga diperlukan temperatur yang lebih tinggi lagi untuk meleburkan sampel. Oksida terjadi dikarenakan penggunaan gas argón yang kurang maksimal, dimana gas argón banyak yang keluar dari *tube* melewati retak-retak yang terdapat pada *tube* sehingga untuk mendapatkan proses pemaduan dengan kondisi gas argón sulit didapatkan dan juga penutupan lobang-lobang yang kurang maksimal sehingga memudahkan oksigen untuk masuk ke dalam *tube*.

4.2.2. Mesin Las TIG

Proses pemaduan dengan mesin las TIG menggunakan sampel dari geram-geram logam dengan melakukan proses kompaksi sebelum peleburan. Proses kompaksi dilakukan untuk mendapatkan densitas yang tinggi sehingga pada saat proses peleburan dilakukan sampel tidak ada yang terbang atau keluar dari wadah akibat tekanan yang sangat tinggi dari busur las, sebagaimana apabila kita menggunakan geram-geram tanpa kompaksi.

- Material : Sampel hasil kompaksi
- Parameter pemaduan : - Tanpa gas argón
 - Arus Tig = 20 A
 - Waktu = 15 detik
- Hasil pengamatan : - Lapisan kerak tipis (kehitaman) pada permukaan paduan
 - Terdapat gas yang keluar dari sampel pada saat proses peleburan

Hasil pemaduan menggunakan las TIG memperlihatkan pada permukaan paduan terdapat kerak tipis berwarna kehitaman, kemungkinan disebabkan karena terjadinya proses oksidasi akibat tidak adanya gas argón sebagai pelindung pada saat proses pemaduan sehingga kadar oksigen pada saat itu cukup tinggi. Sedangkan gas yang tampak keluar selama proses peleburan adalah uap logam seng, dikarenakan seng memiliki kalor penguapan yang rendah.

4.2.3. Arc Melting Furnace

Proses pemaduan dengan *arc melting furnace* menggunakan sampel dari geram-geram yang telah dilakukan proses kompaksi. Hal ini dilakukan untuk memudahkan *handling* sampel dalam proses pemaduan.

- Material : sampel hasil kompaksi
- Parameter pemaduan : - Kondisi vakum dengan gas argón;
 - Arus TIG = 3 A;
 - Waktu = 20 detik.
- Hasil pengamatan : - Nyala busur terlihat lebih terang dan lebih terfokus;
 - Hasil pemaduan terbebas dari oksida-oksida

Proses pemaduan dengan menggunakan *arc melting furnace* terlihat lebih 'bersih' dari proses pemaduan sebelumnya. Hal ini dikarenakan proses peleburan yang dilakukan dalam kondisi vakum dengan penggunaan gas argón. Hasil ingot yang didapatkan juga terlihat terbebas dari oksida-oksida. Ingot hasil pemaduan dengan *arc melting furnace* dapat dilihat pada gambar 4.2.

Pada saat proses peleburan terlihat bahwa nyala busur selama proses peleburan stabil. Sewaktu proses peleburan, busur akan berhenti pada waktu tertentu sewaktu sampel mulai melebur. Hal ini dikarenakan (tingkat hambatan) resistivitas logam, dimana semakin tinggi temperatur suatu logam, maka resistivitas akan semakin tinggi juga. Dengan resistivitas yang maksimal, maka arus yang terjadi akan minimal sehingga kemungkinan busur tidak akan terjadi.^[18]

4.3. Ingot Paduan CZT

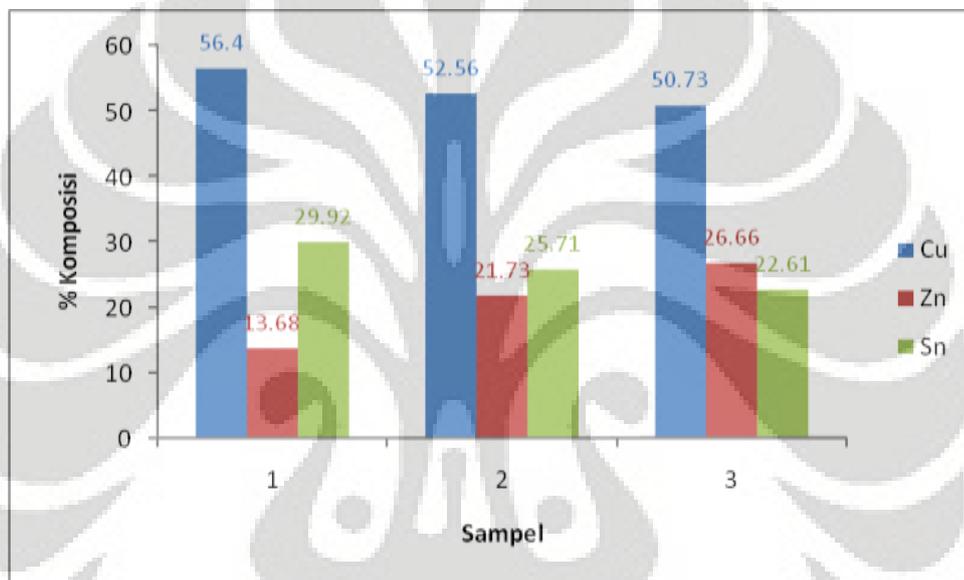
Ingot hasil pemaduan logam kuningan (CuZn) dan logam timah (Sn) ini sangat memuaskan, dimana secara visual terlihat solid. Ingot yang dihasilkan pun terlihat tidak melekat pada krusibel setelah proses pembekuan. Namun demikian, pada permukaan sampel terdapat lubang pori-pori kecil di beberapa bagian, hal ini dikarenakan proses vakum yang belum sempurna sehingga pada sampel masih terdapat gas-gas yang terperangkap pada saat dilakukan proses peleburan. Karena proses pemaduan ini relatif 'bersih' dari kontaminasi, maka paduan yang dihasilkan juga relatif baik. Pada saat proses peleburan terlihat adanya gas yang berasal dari sampel. Gas ini diperkirakan merupakan uap logam timah dan seng, karena logam timah dan seng memiliki sifat mudah menguap. Ingot hasil pemaduan menunjukkan bahwa prosedur pembuatan paduan CZT menggunakan metode *arc melting furnace* cukup memadai. Ingot hasil pemaduan dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Ingot Hasil Pemaduan

4.4. Analisa Hasil EDS Paduan CZT

Pengujian dengan menggunakan EDS akan memberikan hasil secara kuantitatif akan setiap unsur yang terkandung di dalam paduan CZT. Pengujian nilai kadar unsur yang dilakukan bertujuan untuk menghitung komposisi masing-masing unsur dan memperkirakan senyawa yang terbentuk. Dari data yang diperoleh pada pengujian dengan menggunakan EDS diambil satu data yang mewakili untuk setiap sampel. Hasil pengujian EDS tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3.



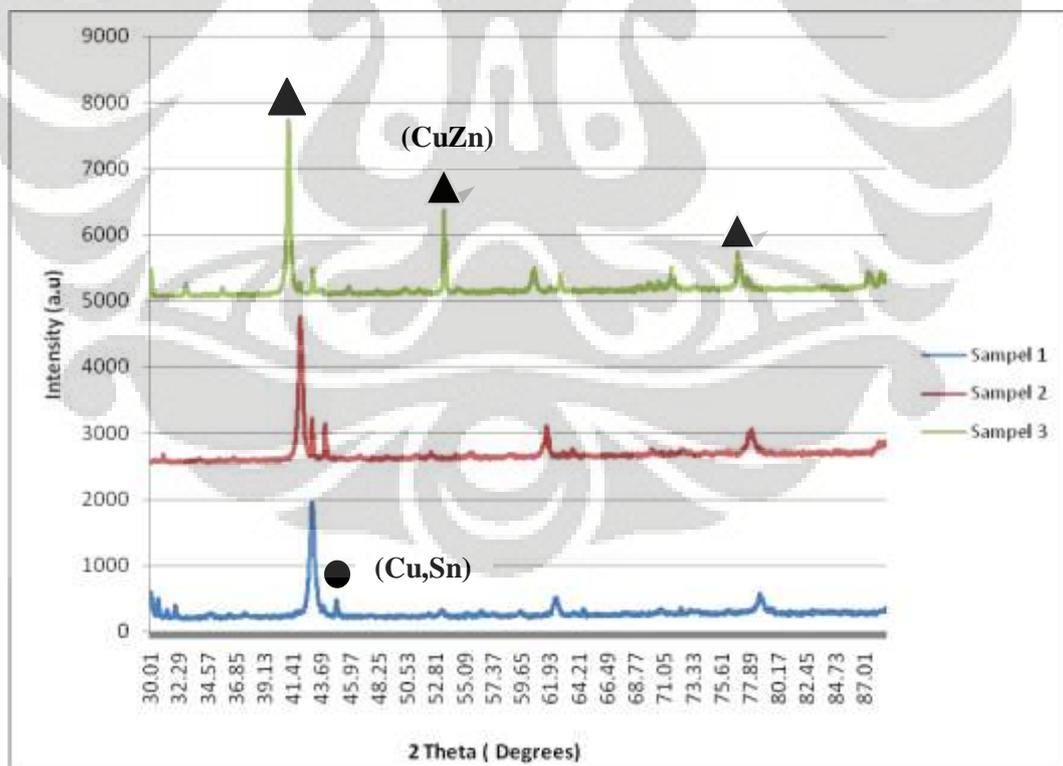
Gambar 4.3 Hasil Pengujian EDS

Dari data hasil pengujian komposisi pada Gambar 4.3 di atas dapat dilihat bahwa ingot menunjukkan komposisi yang cukup sesuai, walaupun seharusnya komposisi yang diinginkan adalah; Cu = 50 %, Zn = 25 %, Sn = 25 %. Namun demikian, dari hasil komposisi ini membuktikan bahwa prosedur pemaduan yang dilaksanakan pada penelitian cukup memadai. Pada sampel 1 terlihat bahwa kadar seng pada paduan sangat rendah, hal ini dikarenakan logam kuningan yang digunakan pada sampel 1 berbentuk geram-geram atau serbuk-serbuk kasar sehingga sangat mudah terjadi penguapan seng pada saat proses peleburan yang menyebabkan kadar seng pada paduan menjadi rendah. Pada sampel 3 terjadi penurunan kadar timah, hal ini dikarenakan pada saat proses kompaksi masih terdapat serbuk timah yang menempel pada cetakan sehingga berat timah menjadi

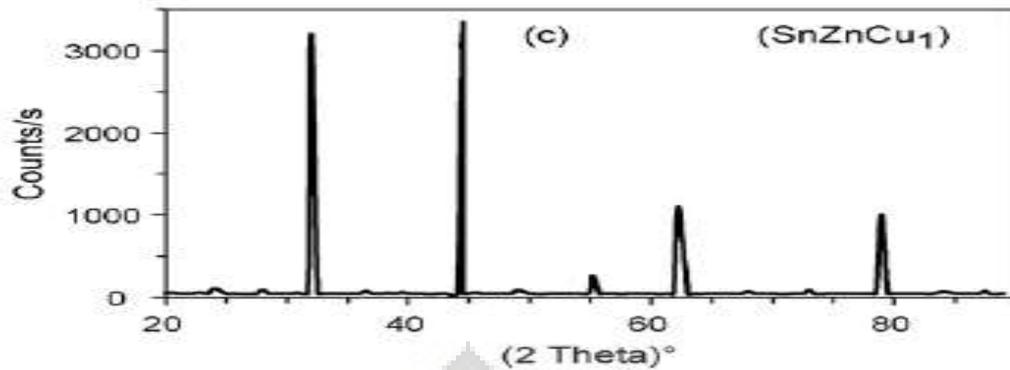
berkurang, serta masih ada serbuk timah yang tertinggal karena selongsong kuningan tidak bisa menampung serbuk timah lagi. Untuk mendapatkan komposisi paduan CZT yang diharapkan dapat dilakukan dengan penggunaan selongsong kuningan dengan menempatkan serbuk timah dalam selongsong tersebut. Dari nilai persentase elemen dapat disimpulkan bahwa paduan CZT sangat mungkin membentuk Cu_2ZnSn

4.5. Analisa Hasil XRD Paduan CZT

Pengujian dengan menggunakan XRD akan memberikan hasil secara kualitatif akan setiap senyawa yang terkandung di dalam paduan CZT. Pengujian dengan menggunakan XRD tidak dapat memberikan hasil secara kuantitatif. Oleh karena itu hasil penelitian data dengan menggunakan XRD akan menganalisa senyawa yang terbentuk dari paduan CZT dengan melihat 2θ pada grafik yang terbentuk. Hasil pengujian XRD paduan CZT dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil Pengujian XRD



Gambar 4.5 Literatur Hasil XRD CZT.^[18]

Dari hasil XRD memperlihatkan *peak-peak* (puncak) grafik mempunyai kemiripan satu dengan lainnya. Pada sample 2 terdapat peak yang berbeda dengan sampel lainnya, yaitu pada nilai 2θ sebesar 55° menunjukkan fase CuZn, hal ini dikarenakan pada paduan, seng mempunyai kadar yang paling tinggi sehingga fase CuZn yang terbentuk banyak. *Peak-peak* grafik yang dihasilkan juga mempunyai kemiripan dengan hasil XRD literatur yang dapat dilihat pada Gambar 4.5. Sehingga dapat dikatakan bahwa proses pemaduan yang telah dilakukan sangat memadai untuk dilakukan kedepannya, dimana terbentuknya paduan CZT dengan membentuk Cu_2ZnSn . *Peak-peak* yang dihasilkan juga merupakan *peak-peak* dari [Cu,Sn] dan CuZn.

Hasil XRD memperlihatkan terbentuknya CuZn dan (Cu,Sn). Terbentuknya CuZn menjelaskan bahwa Cu membentuk *solid solution* dengan Zn. Hal ini terjadi dikarenakan ukuran atom dari kedua material ini hampir sama, sehingga kemungkinan terbentuknya *solid solution* CuZn sangat tidak terbatas. Sedangkan terbentuknya (Cu,Sn) menjelaskan bahwa *solid solution* CuSn yang terbentuk sangat terbatas. Sesuai dengan literatur yang ada, hal ini dikarenakan perbedaan ukuran atomik antara Cu dan Sn mendekati 15 % sehingga kelarutan Sn dalam Cu terbatas walaupun sifat elektrokimia kedua unsur sama dan atom larut dilarutkan dalam logam dengan valensi lebih rendah.^[11]

Grafik hasil pengujian XRD ketiga sampel yang dapat dilihat pada Gambar 4.4, memperlihatkan perbedaan nilai 2θ dari *peak-peak* utama ketiga sampel tersebut atau terjadi pergeseran *peak* pada grafik tersebut. hal ini dikarenakan terdapat perbedaan sudut pantulan (θ) yang mengenai kisi atom.

Perbedaan sudut ini akan mempengaruhi jarak antar bidang (d) dalam kisi atom. Semakin besar nilai jarak antar bidang dalam kisi atom maka nilai $\sin \theta$ akan semakin kecil, atau grafik akan bergeser ke kiri, sebagaimana yang diperlihatkan pada hukum Bragg's (*Bragg's law*).^[19]

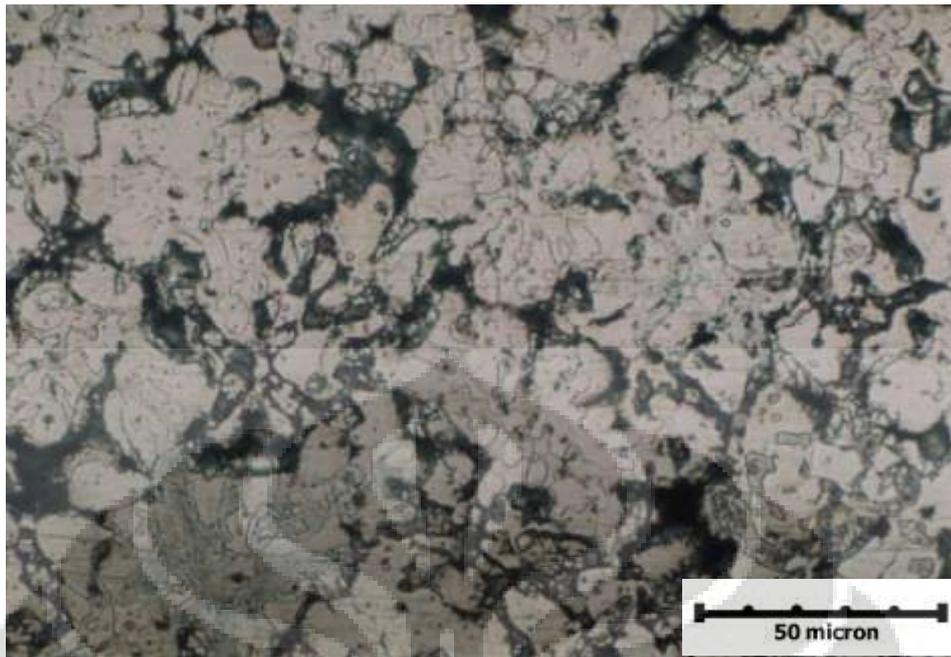
$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4.1)$$

4.6. Analisa Hasil Foto Mikro Paduan CZT

Pengujian dengan menggunakan SEM akan memberikan hasil secara kualitatif akan setiap senyawa yang terkandung di dalam paduan CZT. Hal ini dapat dilakukan dengan melihat struktur mikro pada sampel, kemudian membedakan setiap warna daerah yang dihasilkan kemudian mengamati unsur yang terkandung dalam suatu warna tersebut. Gambar 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, dan 4.11 memperlihatkan foto mikro dari paduan CZT,



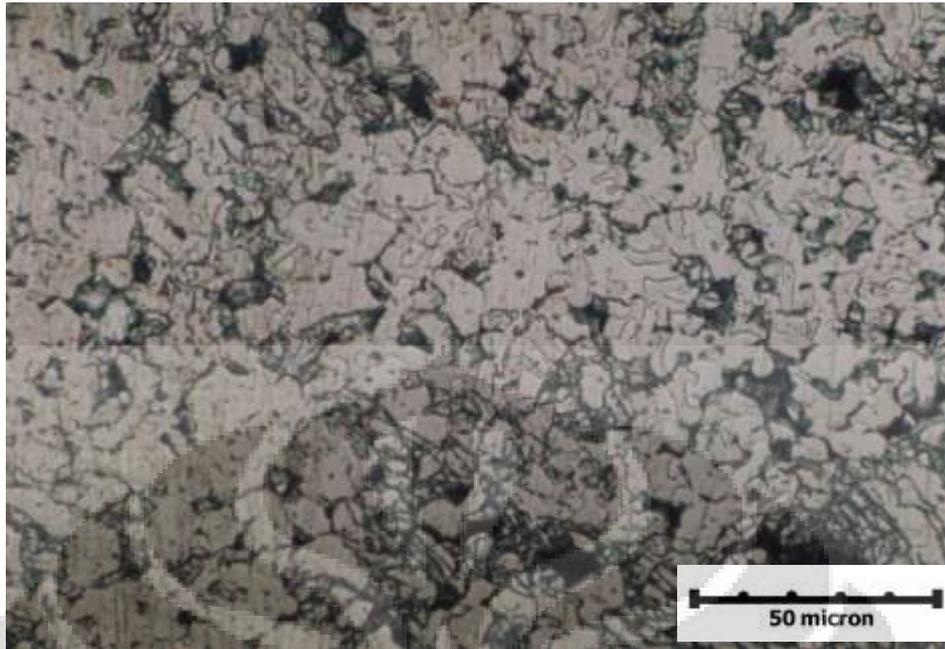
Gambar 4.6 Struktur Mikro Sampel 1 Paduan CZT Perbesaran 100 X



Gambar 4.7 Struktur Mikro Sampel 1 Paduan CZT Perbesaran 500 X



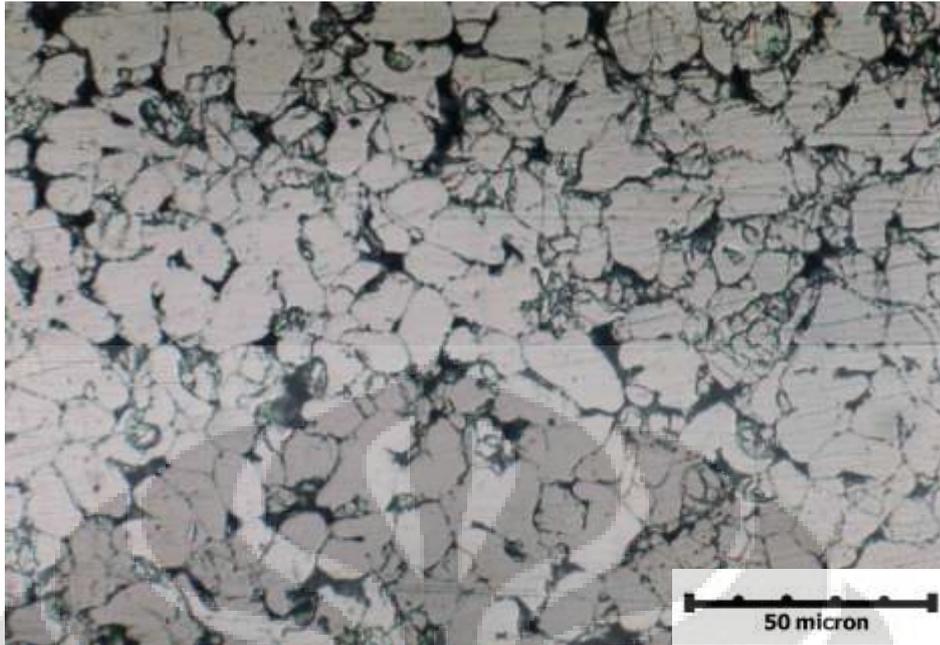
Gambar 4.8 Struktur Mikro Sampel 2 Paduan CZT Perbesaran 100 X



Gambar 4.9 Struktur Mikro Sampel 2 Paduan CZT Perbesaran 500 X



Gambar 4.10 Struktur Mikro Sampel 3 Paduan CZT Perbesaran 100 X



Gambar 4.11 Struktur Mikro Sampel 3 Paduan CZT Perbesaran 500 X

Pada pengamatan mikrostruktur hasil dari foto mikro menggunakan mikroskop optik memperlihatkan daerah-daerah dengan warna yang berbeda. Setelah dilakukan penjajakan pada beberapa daerah yang memiliki warna berbeda, diperoleh kadar Cu-Zn pada daerah yang berwarna kuning, kadar Cu-Sn pada daerah yang berwarna keabu-abuan, dan kadar Cu-Zn-Sn pada daerah yang berwarna putih.

Pengamatan secara mikroskopis pada seluruh bagian, memperlihatkan distribusi senyawa cenderung tersebar merata (homogen). Hal ini dapat dikarenakan panas yang diterima oleh sampel cenderung fokus serta pembuatan paduan dilakukan dalam waktu yang cukup signifikan sehingga penyebaran fase-fase tersebut dapat merata, dan logam paduan yang dilebur dalam jumlah sedikit (mikro).

4.7. Analisa Hasil Pengujian Kekerasan Mikro Paduan CZT

Pada pengujian kekerasan mikro menggunakan metode vickers akan didapatkan nilai diagonal jejak yang kemudian dikonversikan menjadi besaran kekerasan material dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1.854F}{d^2} \quad (4.2)$$

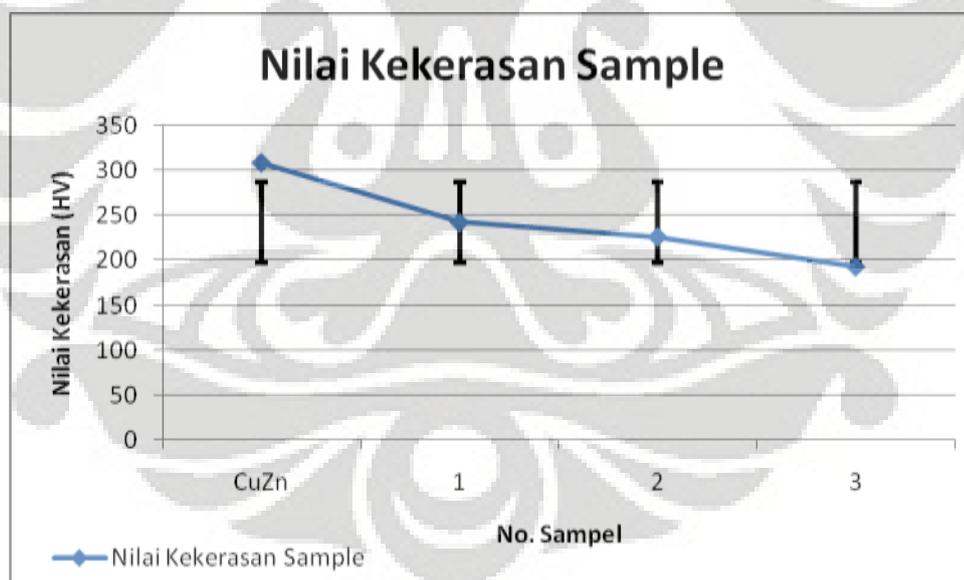
dimana :

HV : Nilai kekerasan *Vickers* (HV)

F : Beban penjejakan (300 g)

A : Luas daerah yang dijejak

d : Diagonal rata-rata jejak



Gambar 4.12 Hasil Pengujian Kekerasan

Dari hasil pengujian kekerasan mikro menggunakan metode vickers, yang dapat dilihat pada Gambar 4.12 didapatkan nilai kekerasan sebesar 242 HV untuk sample 1, 226 HV untuk sample 2, dan 193 HV untuk sample 3. Sedangkan pada

sample CuZn, kekerasan yang dihasilkan sebesar 308 HV. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar tembaga, maka nilai kekerasan juga akan semakin meningkat. Hal ini bisa dilihat dari komposisi masing-masing sampel, dimana kadar tembaga pada sampel CuZn sebesar 60 %, sampel 1 paduan CZT sebesar 56 %, sampel 2 paduan CZT sebesar 53 %, dan sampel 3 paduan CZT sebesar 51 %.



BAB 5

KESIMPULAN

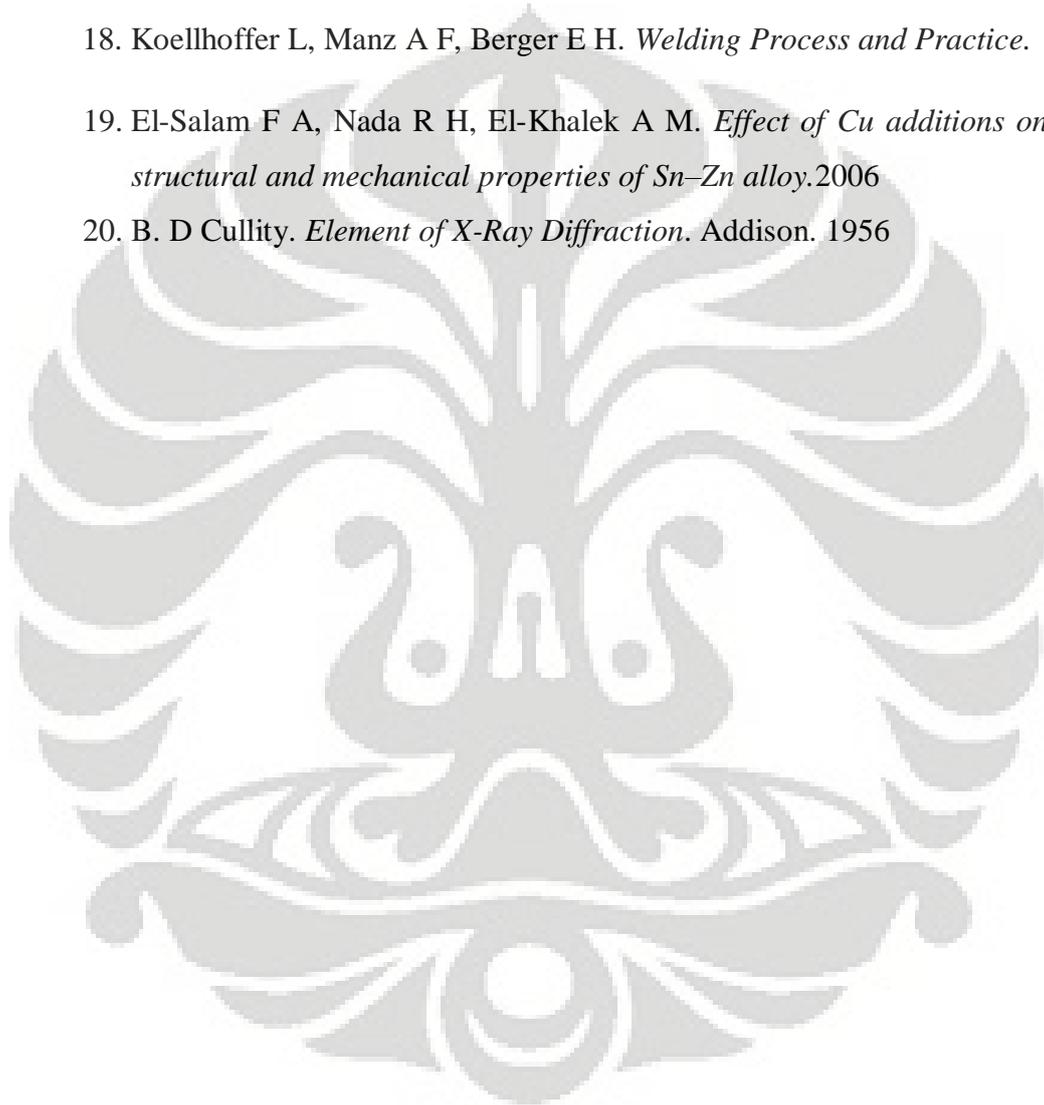
Berdasarkan penelitian yang dilakukan terhadap paduan Cu-Zn-Sn, dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Paduan Cu-Zn-Sn dapat dibuat dengan menggunakan metode *arc melting furnace*.
2. Kontaminasi paduan yang dihasilkan dengan udara dapat dicegah dengan pemakaian gas argon selama proses peleburan berlangsung.
3. Dengan jumlah logam penyusun paduan relatif sedikit (mikro) serta laju solidifikasi yang lambat, memungkinkan terjadi homogenisasi pada matriks paduan.
4. Pada sampel yang berbentuk selongsong menghasilkan komposisi paduan yang lebih baik bila dibandingkan dengan sampel dalam bentuk geram-geram, dimana komposisi paduan yang didapatkan mendekati komposisi yang diinginkan.
5. Dari hasil karakterisasi yang dilakukan dengan menggunakan *EDS*, *XRD*, dan mikroskop optik menunjukkan terbentuknya paduan Cu-Zn-Sn dengan membentuk senyawa CuZn dan (Cu,Sn) menghasilkan paduan yang diinginkan, yaitu 2Cu/Zn/Sn.

DAFTAR REFERENSI

1. Brian, Yulianto. *Energi Surya : Alternatif Sumber Energi Masa Depan Indonesia. Berita Iptek*. 16 Februari 2006. <http://www.indeni.org> (Diakses Oktober 2008)
2. <http://ec.europa.eu/research/energy> (Diakses 11 Mei 2009)
3. Goetzberger, A., Hoffmann, V.U. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer. 2005
4. Wibowo, R. A. *Melihat prinsip kerja sel surya lebih dekat*. <http://energisurya.wordpress.com> (Diakses Maret 2009)
5. Chawla V, King J S, Runnerstorm E, Bent S F, Clemens B M. *Investigation of Inexpensive, Abundant Materials for Thin Film Solar Cell Applications*.
6. www.en.wikipedia.org/wiki/copper (Diakses 19 Mei 2009)
7. www.en.wikipedia.org/wiki/zinc (Diakses 19 Mei 2009)
8. www.en.wikipedia.org/wiki/tin (Diakses 19 Mei 2009)
9. <http://encyclopedia.farlex.com/alloying> (Diakses 2 Juni 2009)
10. <http://encyclopedia.farlex.com/alloy> (Diakses 2 Juni 2009)
11. Smallman, R. E. *Metalurgi Fisik Modern*. Gramedia. 1991
12. Callister. *Material science and engineering an introduction*. Hal 345-347
13. Tiara, Bondan. *Pengaruh Kandungan Sn dan Variable Proses Metalurgi Serbuk Terhadap Karakterisasi Paduan dari Serbuk Cu dan Sn*. Tesis, Program Sarjana Universitas Indonesia, 1995
14. <http://www.matweb.com/reference/copper-alloys.aspx> (Diakses Juni 2009)

15. Yu D P, Xie H P, Wang L. *Investigation of interfacial microstructure and wetting property of newly developed Sn–Zn–Cu solders with Cu substrate.* 2004
16. Rusli, H. R. *Dasar Teori Solidifikasi Metal.* UI-Press. 1995
17. Choudhury, A. *Vacuum Metallurgy.* ASM International. 1990
18. Koellhoffer L, Manz A F, Berger E H. *Welding Process and Practice.*
19. El-Salam F A, Nada R H, El-Khalek A M. *Effect of Cu additions on the structural and mechanical properties of Sn–Zn alloy.* 2006
20. B. D Cullity. *Element of X-Ray Diffraction.* Addison. 1956



Lampiran 1
Komposisi Timah



PT.DONNA KEMBARA JAYA
Kawasan Industri Ketapang Pangkalpinang
Telp. : (0717) 424875, 7000664
Fax : (0717) 433545



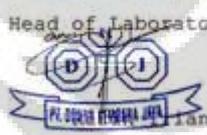
| | | | |
|---------------|----------|---------------|------------------------|
| Sample Name | : MHS UI | Instrument | : 3460 Metals Analyzer |
| Operator Code | : ELMAN | Method | : Sn-10 |
| Remarks | : | Sample Number | : 1 |

Result 06-May-09 09:01:22

| | Cu | Sb | Zn | Cd | Bi | Ag | As | Pb |
|-----|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % |
| min | | | | | | | | |
| avg | 0.00199 | 0.00467 | 0 | 0.00006 | 0.00289 | 0 | 0.00909 | 0.03772 |
| max | 0.0500 | 0.0500 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0300 | 0.0010 | 0.0300 | 0.0500 |

| | Ni | Fe | Al | Co | In | Sn |
|-----|---------|---------|--------|---------|-------|----------|
| | % | % | % | % | % | % |
| min | | | | | | 99.85 |
| avg | 0.00065 | 0.00361 | 0 | 0.00019 | 0.003 | 99.93612 |
| max | 0.100 | 0.0100 | 0.0010 | 0.0100 | | |

Head of Laboratorium



```

06/05/2009 9:00:32 AM Sample: MHS.UI 1 ELMAN PT. DONNA KJ
Program: SPPUSNR Task: SPPUSNR

```

| Run | Cu | Sb | Zn | Cd | Bi | Ag | As | Pb | Ni | Fe | Al |
|-----|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 1> | 0.00213 | 0.00430 | 0.00000 | 0.00004 | 0.00303 | 0.00000 | 0.00868 | 0.03569 | 0.00066 | 0.00233 | 0.00000 |
| 2> | 0.00184 | 0.00480 | 0.00000 | 0.00006 | 0.00277 | 0.00000 | 0.00924 | 0.03539 | 0.00063 | 0.00254 | 0.00000 |
| 3> | 0.00200 | 0.00492 | 0.00000 | 0.00008 | 0.00287 | 0.00000 | 0.00935 | 0.03808 | 0.00067 | 0.00555 | 0.00000 |
| Avg | 0.00199 | 0.00467 | 0.00000 | 0.00006 | 0.00289 | 0.00000 | 0.00909 | 0.03772 | 0.00065 | 0.00361 | 0.00000 |
| Sd | 0.00015 | 0.00033 | 0.00000 | 0.00002 | 0.00013 | 0.00000 | 0.00036 | 0.00218 | 0.00002 | 0.00203 | 0.00000 |
| Sdk | 7.51231 | 7.01773 | 0.00000 | 28.90567 | 4.58902 | 0.00000 | 3.94813 | 5.76714 | 3.29711 | 56.25644 | 0.00000 |

| Run | Co | In | Sn |
|-----|----------|---------|---------|
| 1> | 0.00020 | 0.00308 | 99.9358 |
| 2> | 0.00017 | 0.00290 | 99.9397 |
| 3> | 0.00020 | 0.00303 | 99.9328 |
| Avg | 0.00019 | 0.00300 | 99.9361 |
| Sd | 0.00002 | 0.00009 | 0.0034 |
| Sdk | 10.22714 | 3.15667 | 0.0034 |



Lampiran 2
Komposisi Kuningan

FORGING BRASS BAR C3771BD

KOMPOSISI KIMIA (%)

| Cu | Pb | Zn | Al | Mn | Ni | P | Lain-lain |
|-----------|---------|---------|----|----|----|---|-----------|
| 57.0-61.0 | 1.0-2.5 | Min. 10 | | | | | |

SIFAT-SIFAT MEKANIS

| KODE MATERIAL | Diameter (mm) | UJI TARIK | | UJI KEKERASAN | |
|---------------|---------------|-------------------------------------|-----------------|---------------|------------|
| | | Kekuatan Tarik (N/mm ²) | Pemanjangan (%) | Vickers (Hv) | Rockwell B |
| C3771BD | 8-20 | Min. 315 | Min. 15 | | |

EKUIVALEN STANDAR KODE MATERIAL

| STANDAR | KODE | NO. | BARU |
|---------------|------|---------------|--------|
| JEPANG | JIS | H8250-92 | C3771B |
| AMERIKA | CDA | C37700 | |
| ASTM | | C37700 (B314) | |
| INDONESIA | IS | 2874-01 | C3771B |
| ISO 2700 | EN | 7663-01 | |
| INTERNASIONAL | ISO | 6831-01 | |

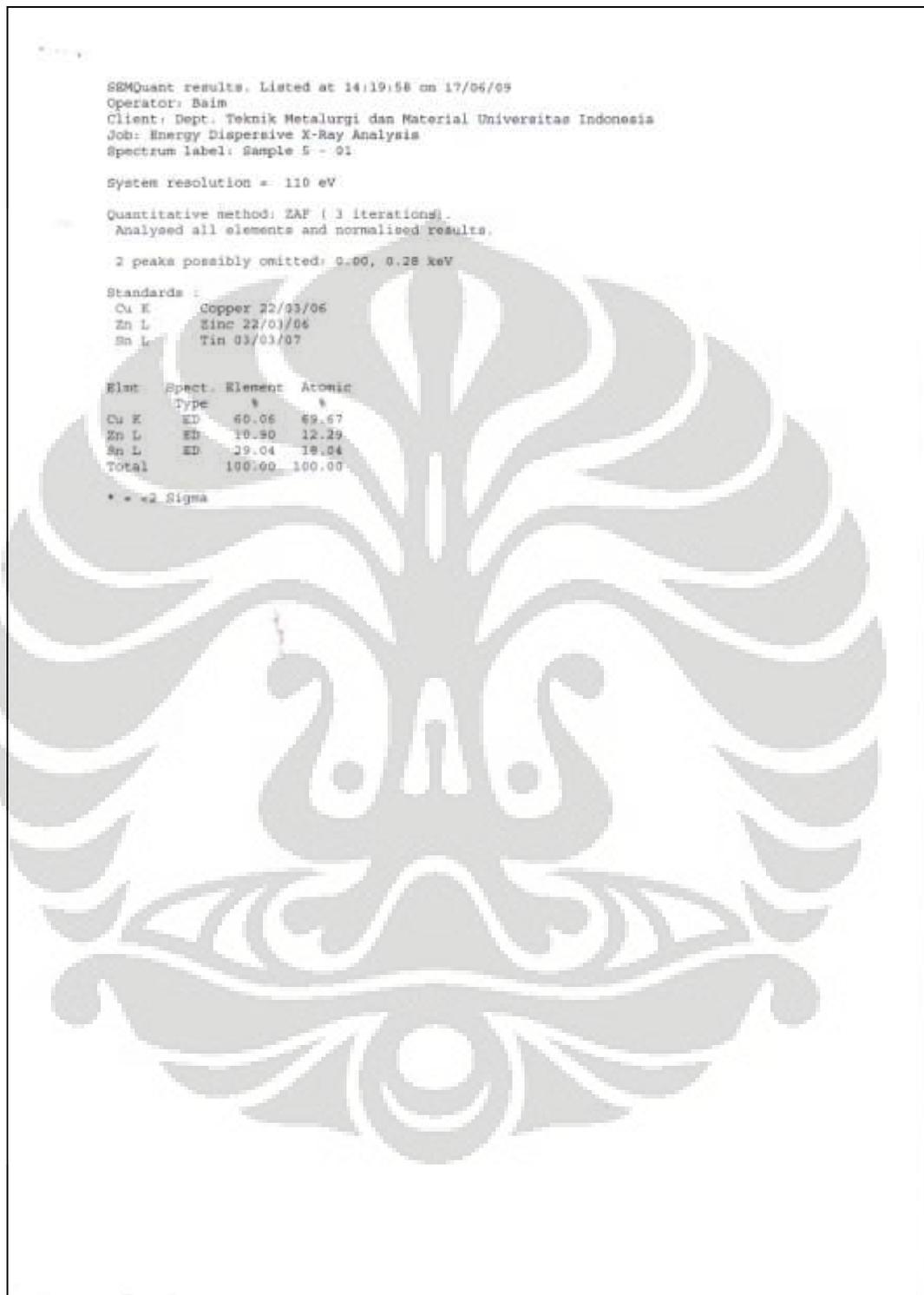
FORGING BRASS BAR C3771BD
BENTUK PENAMPANG: Bulat

TOLERANSI: ±0.03 mm

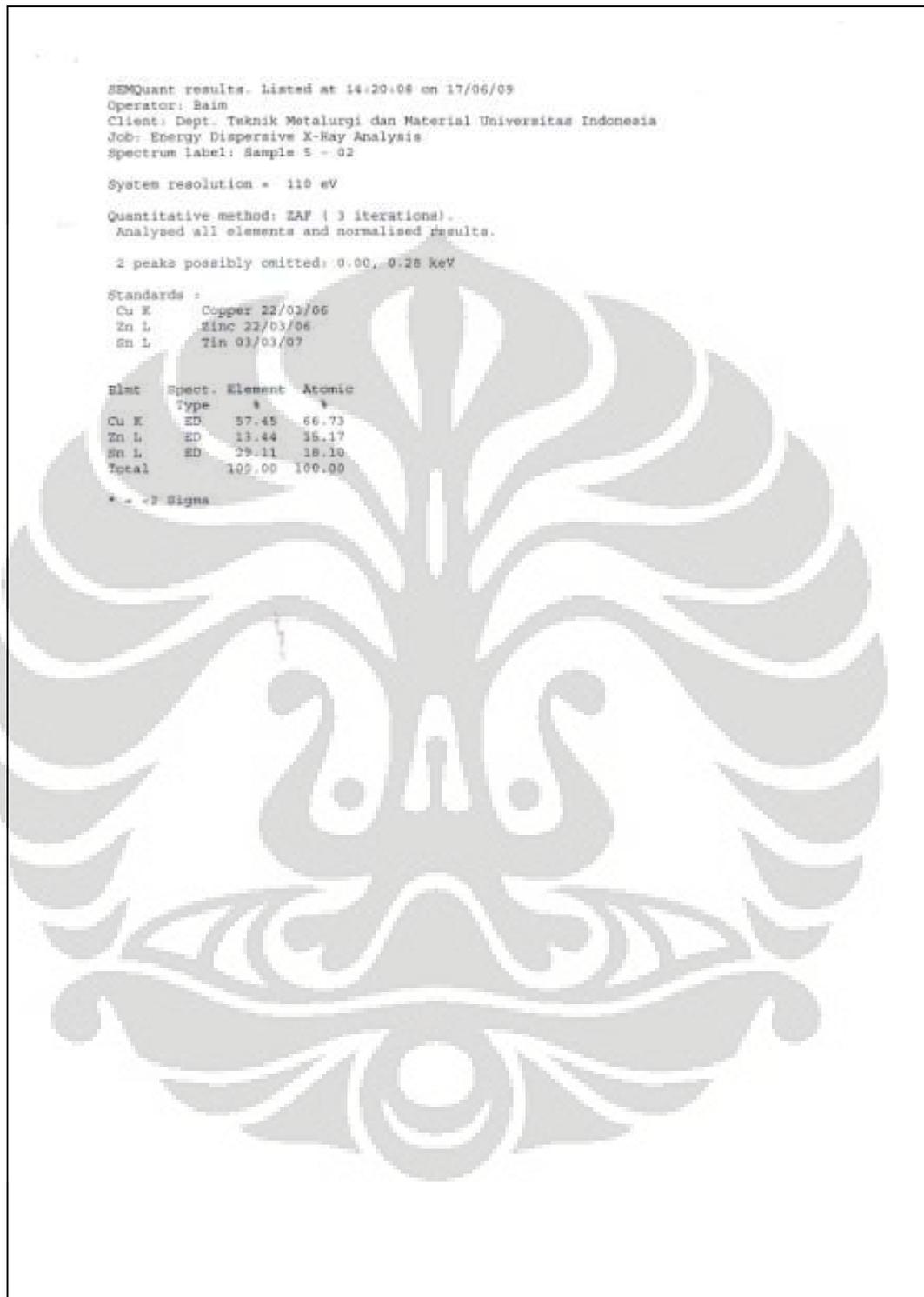
APLIKASI: Valve, nozzle, sanitary, kapak, pompa, gas, kapak, silinder, TRD, Valve, nozzle, sanitary, kapak, pompa, gas, kapak, silinder, TRD, Valve, nozzle, sanitary, kapak, pompa, gas, kapak, silinder, TRD.

MESIN YANG DAPAT DIPAKAI: Casting, hot

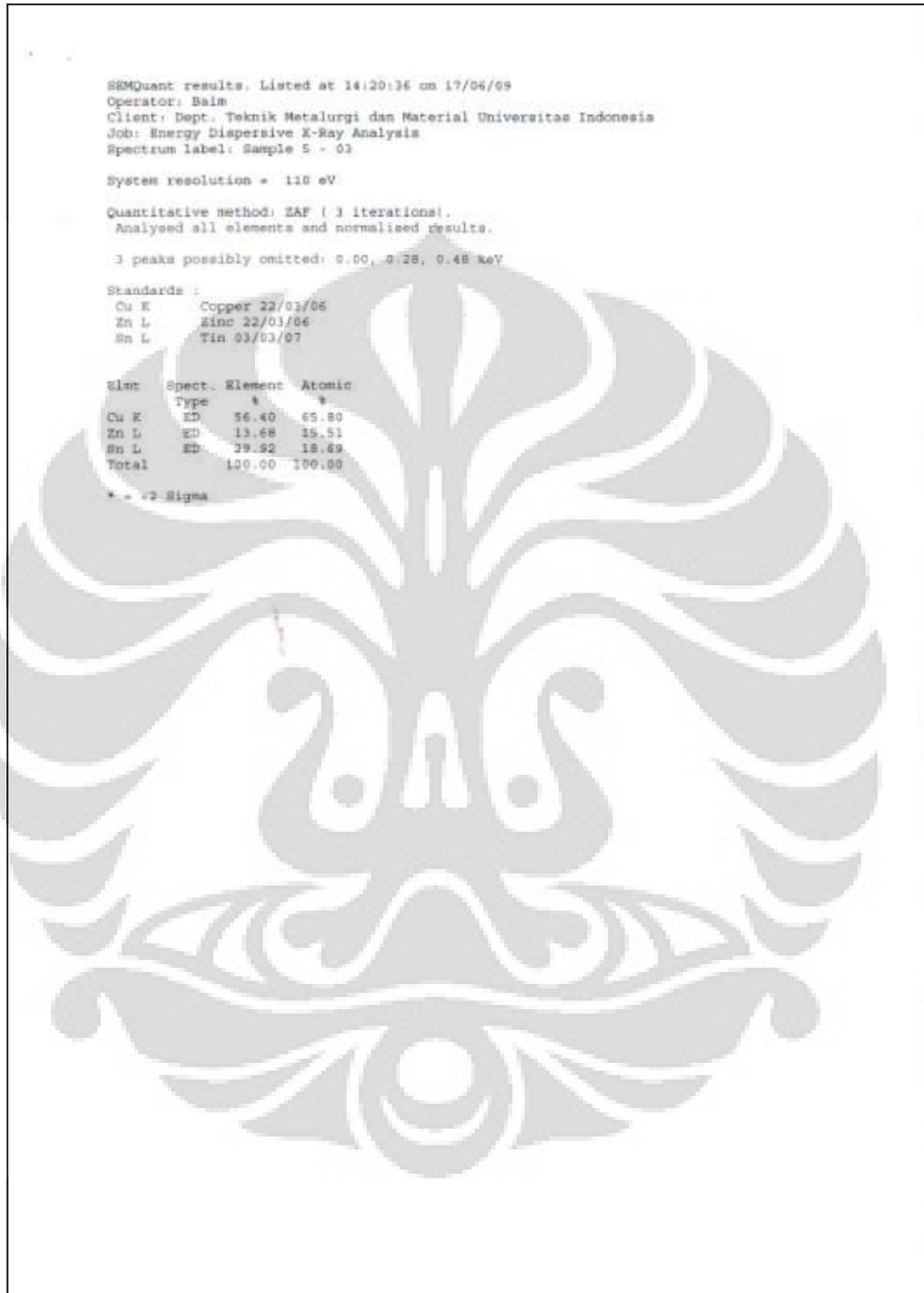
Lampiran 3
Hasil analisis EDX sampel 1 (1 dari 3)



Hasil analisis EDX sampel 1 (2 dari 3)

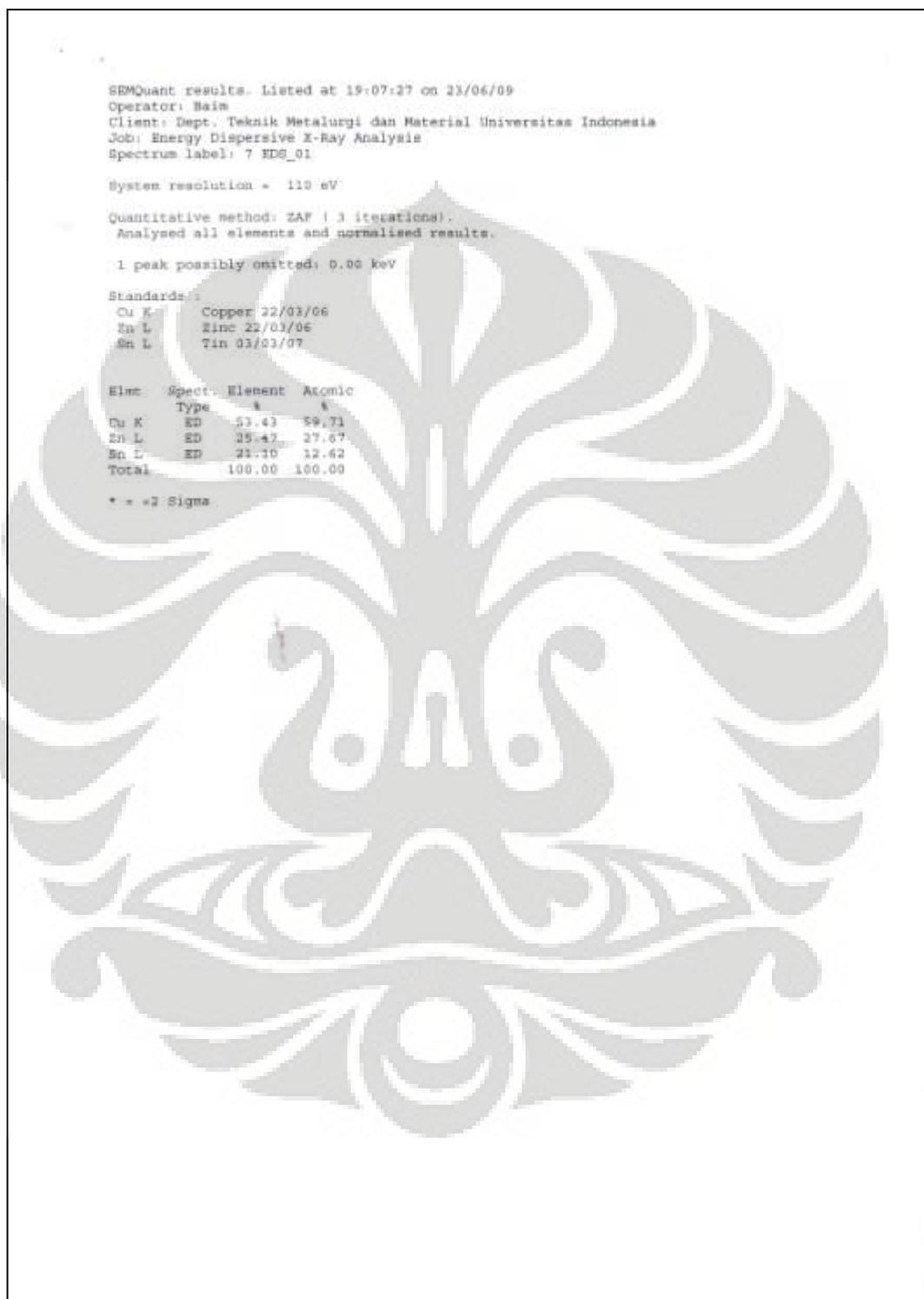


Hasil analisis EDX sampel 1 (3 dari 3)

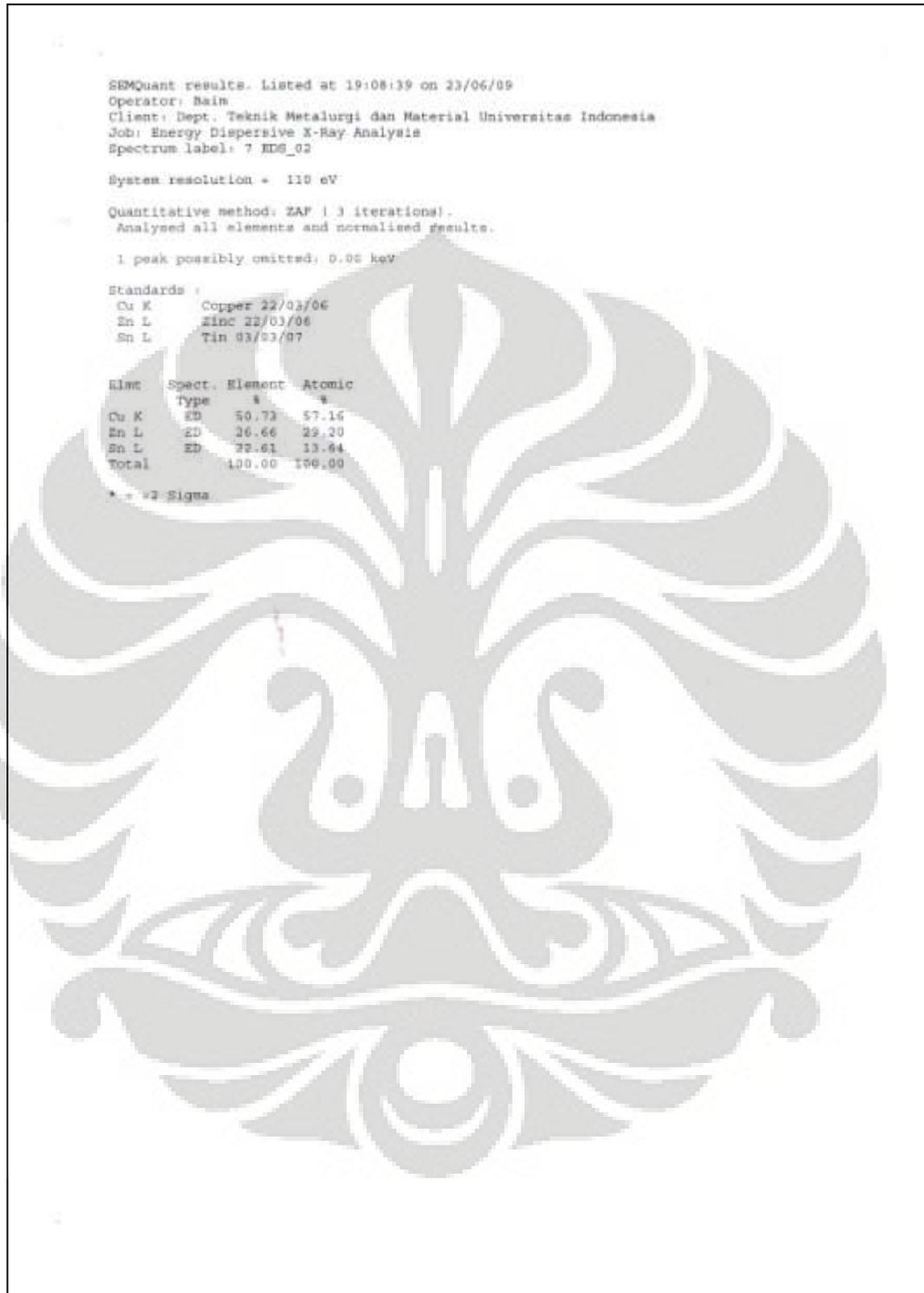


Lampiran 4

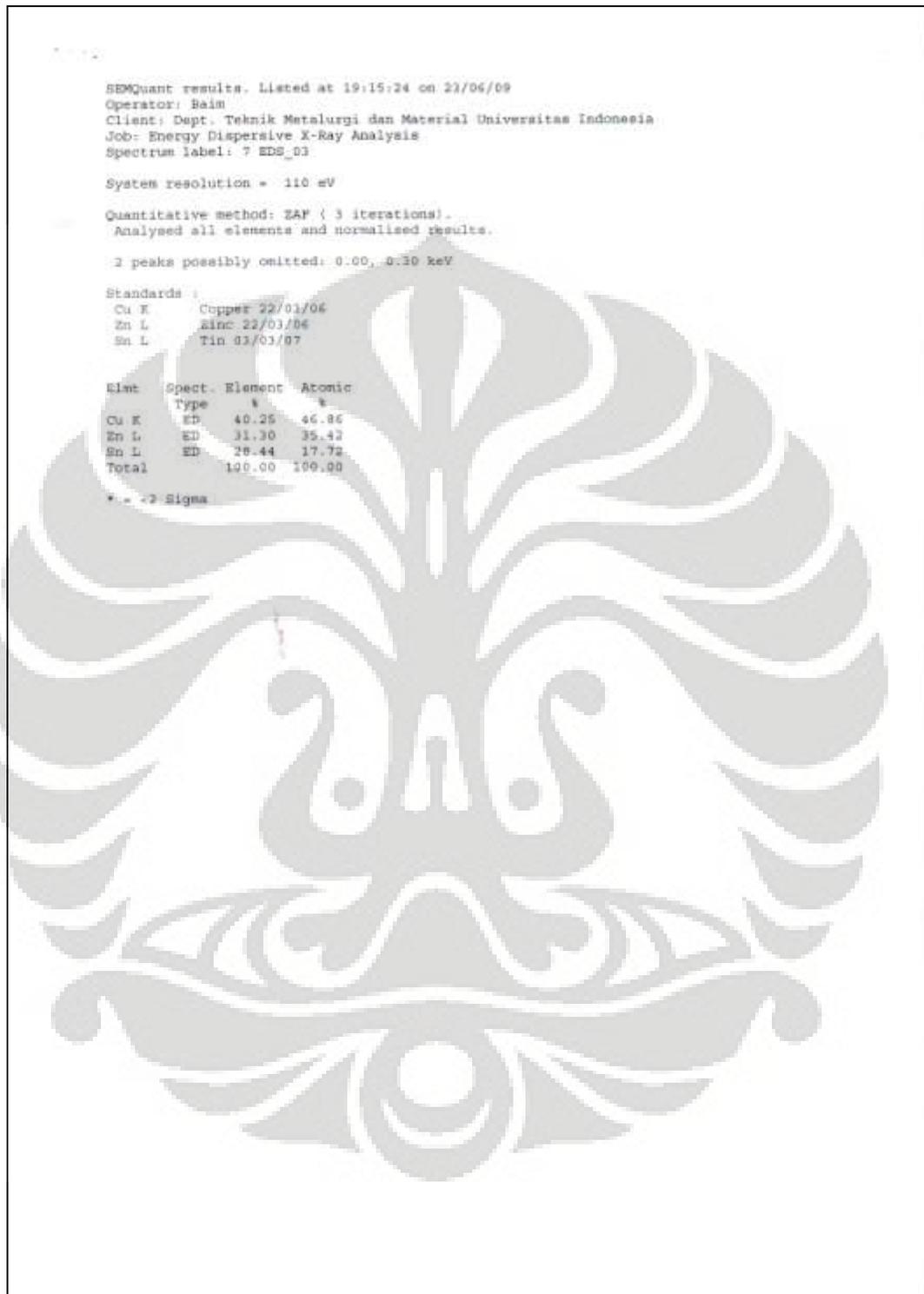
Hasil analisis EDX sampel 2 (1 dari 3)



Hasil analisis EDX sampel 2 (2 dari 3)

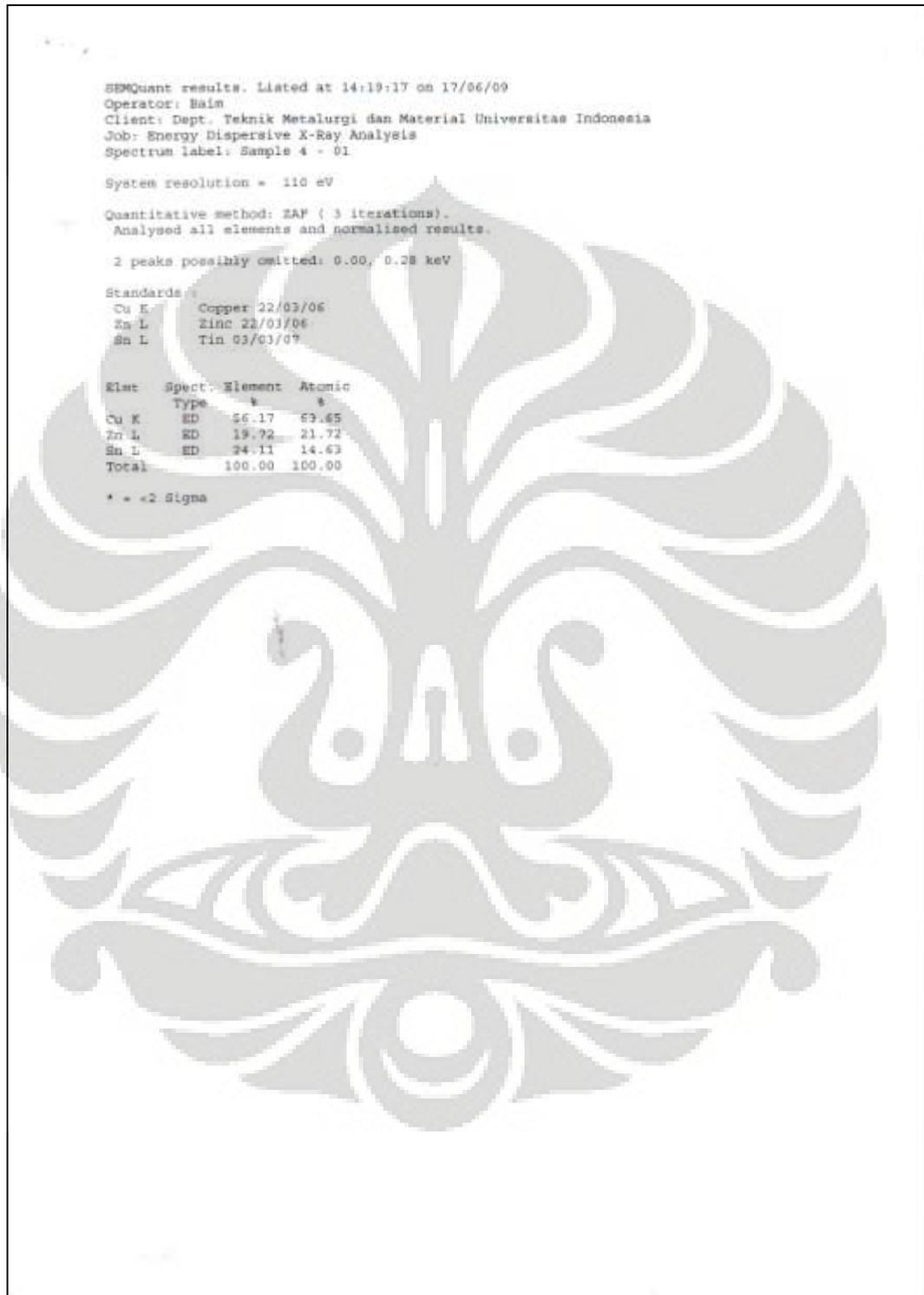


Hasil analisis EDX sampel 2 (3 dari 3)

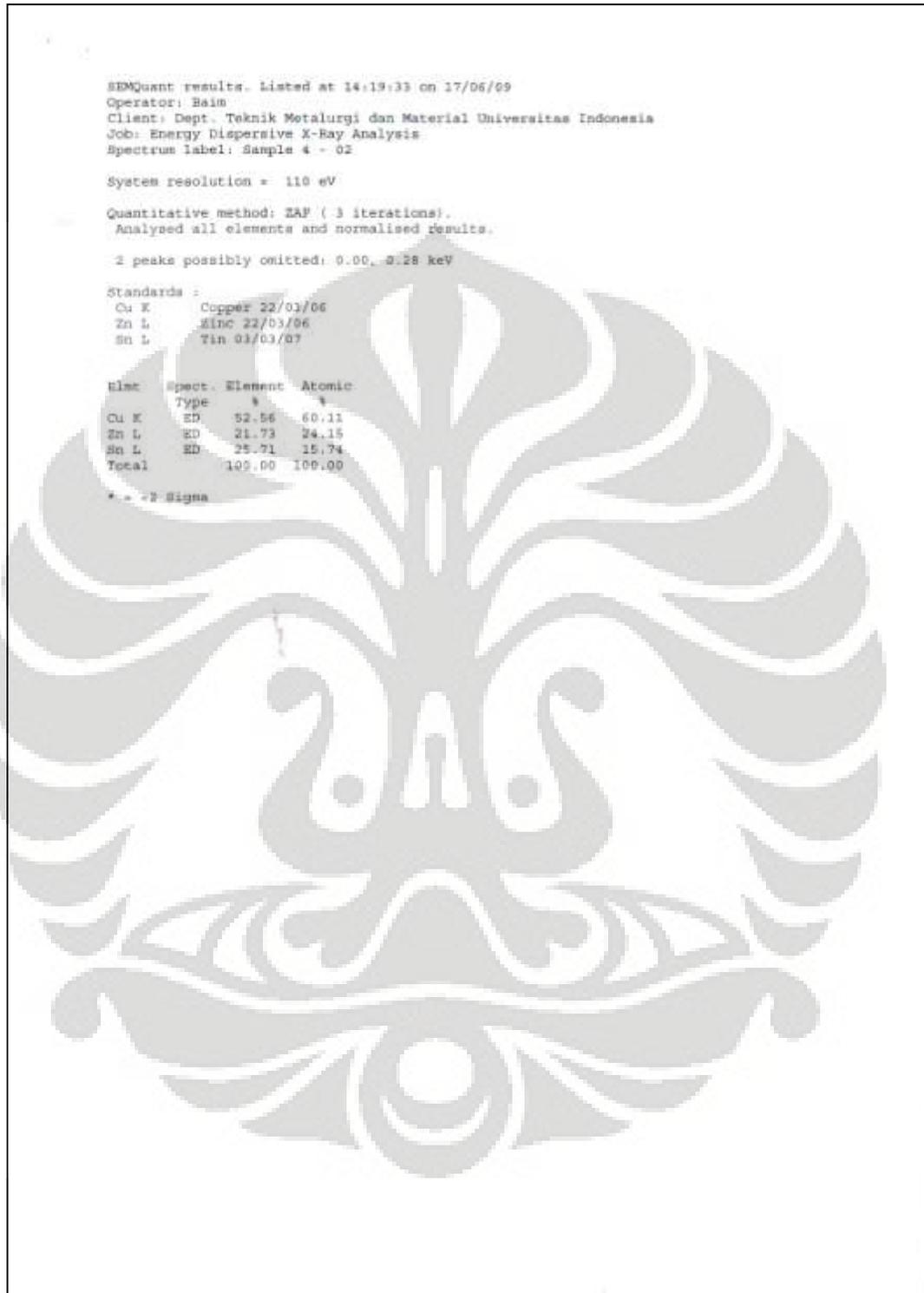


Lampiran 5

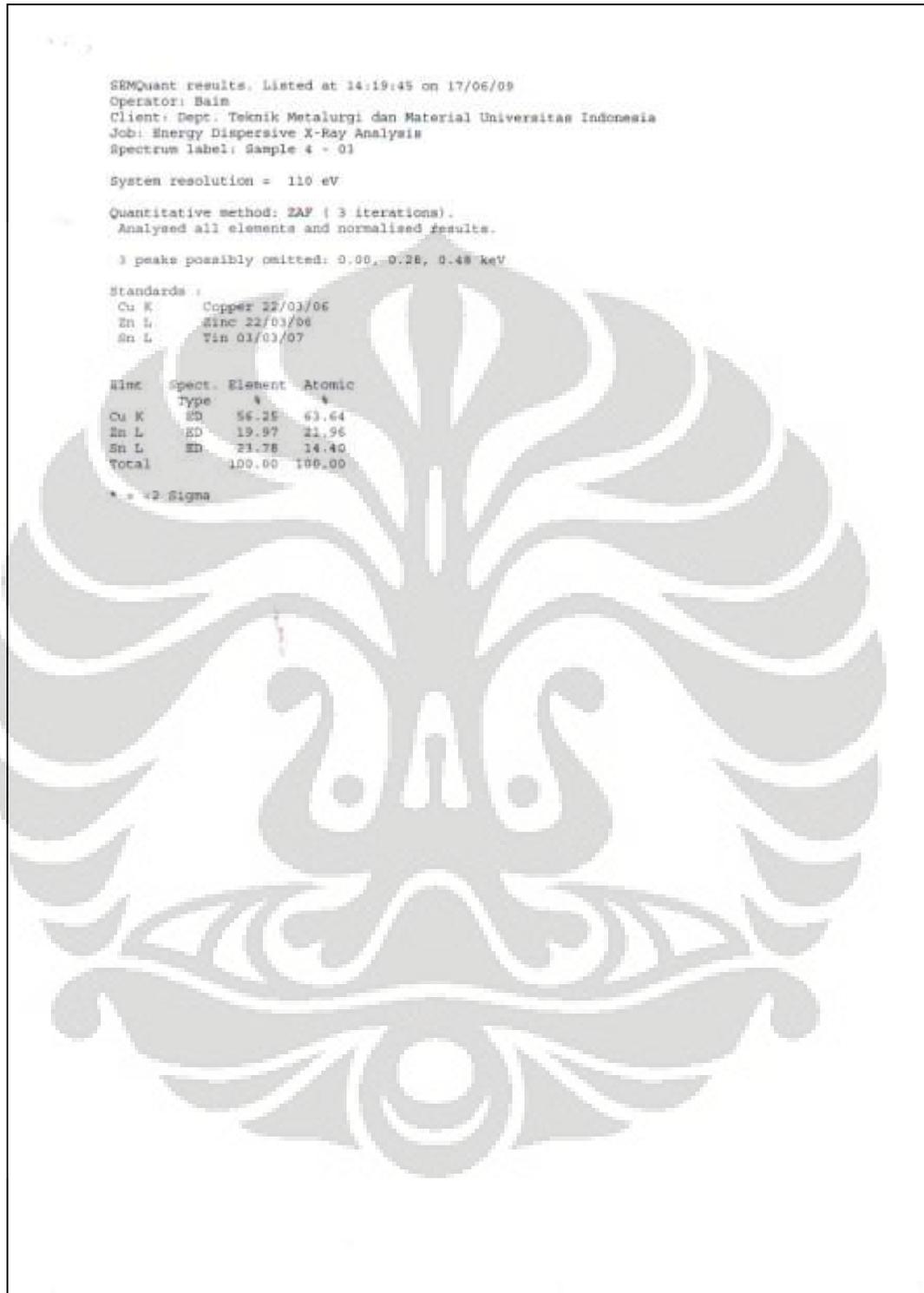
Hasil analisis EDX sampel 3 (1 dari 3)



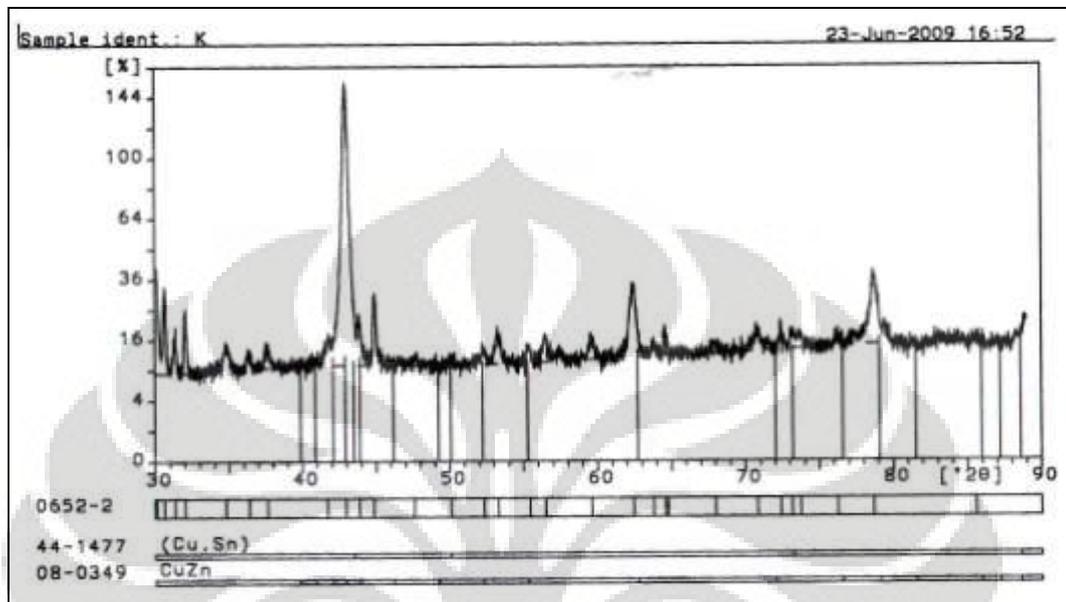
Hasil analisis EDX sampel 3 (2 dari 3)



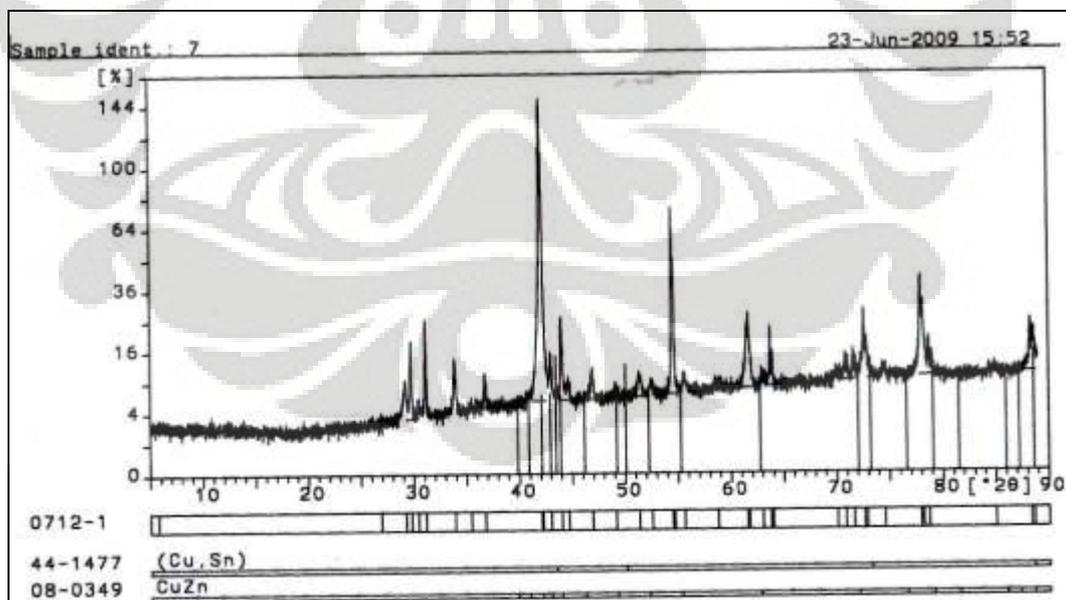
Hasil analisis EDX sampel 3 (3 dari 3)



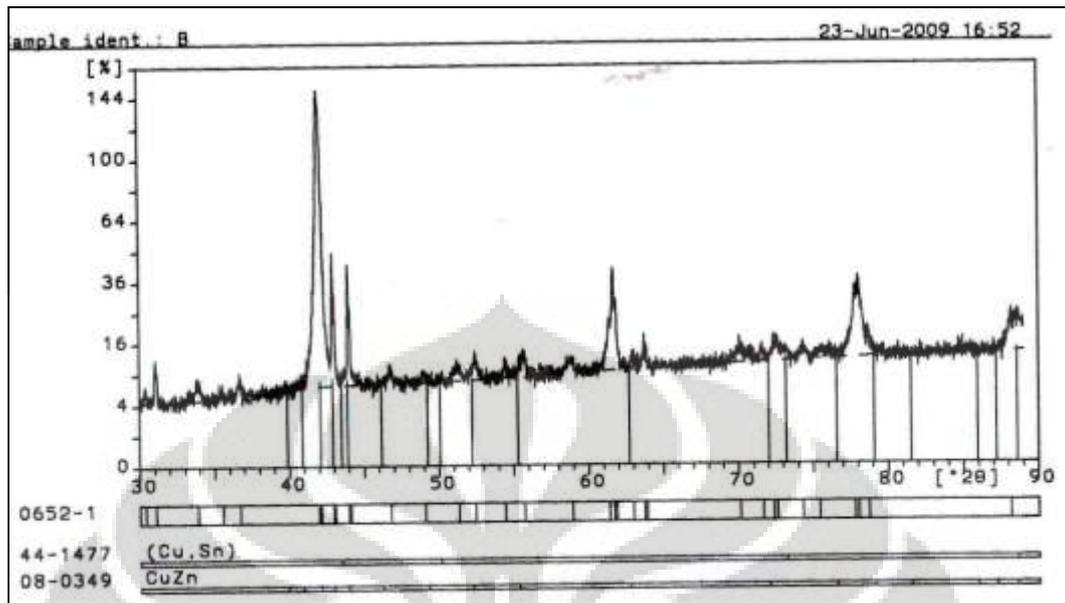
Lampiran 6
Grafik hasil analisis XRD



Grafik hasil analisis XRD pada sampel 1



Grafik hasil analisis XRD pada sampel 2



Grafik hasil analisis XRD pada sampel 3

Lampiran 7
 Hasil Pengujian Kekerasan Mikro

Tabel Hasil Pengujian Kekerasan Mikro Sampel 1

| | Titik 1 | Titik 2 | Titik 3 | Titik 4 | Titik 5 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| d1 (μm) | 48 | 50 | 45 | 49 | 50 |
| d2 (μm) | 45 | 48 | 45 | 50 | 51 |
| Rata-rata | 46,5 | 49 | 45 | 49,5 | 50,5 |

Tabel Hasil Pengujian Kekerasan Mikro Sampel 2

| | Titik 1 | Titik 2 | Titik 3 | Titik 4 | Titik 5 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| d1 (μm) | 55 | 48 | 51 | 50 | 47 |
| d2 (μm) | 55 | 46 | 49 | 51 | 47 |
| Rata-rata | 55 | 47 | 50 | 50,5 | 47 |

Tabel Hasil Pengujian Kekerasan Mikro Sampel 3

| | Titik 1 | Titik 2 | Titik 3 | Titik 4 | Titik 5 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| d1 (μm) | 51 | 54 | 53 | 52 | 53 |
| d2 (μm) | 52 | 56 | 57 | 56 | 53 |
| Rata-rata | 51,5 | 55 | 55 | 54 | 53 |