

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI LOGAM PADUAN Fe-Cr-Al
SEBAGAI MATERIAL TAHAN PANAS**

SKRIPSI

Oleh:
SITI RACHMATUL JANNAH
NIM. 14640008



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2019**

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI LOGAM PADUAN Fe-Cr-Al
SEBAGAI MATERIAL TAHAN PANAS**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**SITI RACHMATUL JANNAH
14640008**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2019**

HALAMAN PERSETUJUAN

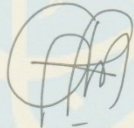
SINTESIS DAN KARAKTERISASI LOGAM PADUAN Fe-Cr-Al
SEBAGAI MATERIAL TAHAN PANAS

SKRIPSI

Oleh:
Siti Rachmatul Jannah
NIM. 14640008

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada Tanggal: 06 November 2019

Pembimbing I



Erna Hastuti, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 009

Pembimbing II



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

Mengetahui,
Ketua Jurusan



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

iii

HALAMAN PENGESAHAN

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI LOGAM PADUAN Fe-Cr-Al
SEBAGAI MATERIAL TAHAN PANAS**

SKRIPSI

Oleh:

Siti Rachmatul Jannah
NIM. 14640008

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal: 06 November 2019

Penguji Utama	: <u>Dr. Imam Tazi, M.Si</u> NIP. 19740730 200312 1 002	
Ketua Penguji	: <u>Ahmad Abekhi, M.Pd</u> NIP. 19761003 200312 1 004	
Sekretaris Penguji	: <u>Erna Hastuti, M.Si</u> NIP. 19811119 200801 2 009	
Anggota Penguji II	: <u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	

Mengesahkan,
Ketua Jurusan Fisika



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Siti Rachmatul Jannah

NIM : 14640008

Jurusan : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Penelitian : Sintesis dan Karakterisasi Logam Paduan Fe-Cr-Al Sebagai
Material Tahan Panas

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan data, tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber kutipan pada daftar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 06 November 2019
Yang Membuat Pernyataan,



Siti Rachmatul Jannah
14640008

v

MOTTO

“Sesungguhnya Bersama Kesulitan Ada Kemudahan”
(Qs. Al-Insyirah 94: 6)

“Keberhasilan Bukanlah Milik Orang Pintar, Keberhasilan adalah Milik Mereka yang
Senantiasa Berusaha”
(B.J. Habibie)

“Sekali Kamu Berhenti Belajar, Kamu Mulai Sekarat”
(Albert Einstein)

“Cobalah untuk Tidak Menjadi Orang Sukses, Tapi Jadilah Orang yang Bernilai”
(Albert Einstein)

“Agama Tanpa Ilmu adalah Buta, Ilmu Tanpa adalah Lumpuh”
(Albert Einstein)



HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah dan karunia-Nya. Sholawat serta salam saya curah limpahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW.

Skripsi ini saya persembahkan untuk kedua orang tua saya bapak Muji Slamet dan ibu Sugiarti, serta bapak dan ibu mertua (bapak Bukhori dan ibu Aminah) terima kasih atas do'a, dukungan, bimbingan, dan motivasi untuk sebuah keberhasilan.

Terima kasih untuk suamiku Muhammad Afifudin atas semua bantuan dan dukunganmu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Adekku kacong (Ahmad Choirudin) dan Adek ipar (Vilda Rizki) terima kasih kalian telah menyemangati.

Terima kasih untuk seluruh keluarga dan kerabatku yang telah mendo'akan dan mendukungku dalam menggapai cita-cita.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb

Alhamdulillah *rabbil'alamin*, puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “ Sintesis dan Karakterisasi Logam Paduan Fe-Cr-Al Sebagai Material Tahan Panas” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) di Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Sholawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Baginda Nabi Muhammad SAW, yang telah membimbing kita dari zaman jahiliah menuju jalan yang terang benerang yakni agama Islam.

Skripsi ini dapat terselesaikan karena tidak lepas dari dukungan dan partisipasi dari berbagai pihak, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya, kepada:

1. Prof. Abdul Haris, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Dr. Rike Yudianti selaku Kepala Pusat Penelitian Fisika – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F – LIPI).
5. Erna Hastuti, M.Si selaku Dosen Pembimbing Skripsi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
6. Bambang Hermanto, S.T, M.Si selaku Pembimbing Lapangan Pusat Penelitian Fisika - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F – LIPI).
7. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Pembimbing Integrasi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
8. Dr. Toto Sudiro yang telah membantu memberikan saran selama proses penelitian di Pusat Penelitian Fisika - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F – LIPI).

9. Segenap Dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
10. Segenap Peneliti, Riset Asisten dan Karyawan di Pusat Penelitian Fisika - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F – LIPI).
11. Kedua orang tua serta keluarga di rumah yang selalu berdo'a dan memberikan dukungan secara moril maupun materiil.
12. Keluarga Kos Mami A4 di Tangerang yang memberikan tempat tinggal dan mendukung penulis dalam penelitian.
13. Muhammad Afifudin, Devi Puspita Sari, Ciswandi, dan Edi yang telah membantu penulis dalam penelitian.
14. Teman-teman Mahasiswa Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang angkatan 2014 yang selalu memotivasi dan berjuang bersama.
15. Teman-Teman Material Science Community (MSC) Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
16. Semua Pihak yang telah membantu penulis skripsi ini.

Penulis menyadari penulisan skripsi ini banyak kekurangan. Oleh sebab itu, penulis mohon maaf apabila ada kata-kata dan bahasa yang kurang baik. Besar harapan penulis semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembacanya.

Wassalamualaikum. Wr. Wb

Malang, 06 November 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Material Tahan Panas.....	7
2.2 <i>Ferrochrome</i> (FeCr).....	9
2.3 Paduan Fe-Cr-Al.....	10
2.4 Metalurgi Serbuk.....	11
2.4.1 Penghalusan Serbuk Logam.....	11
2.4.2 Pencampuran Serbuk Logam.....	12
2.4.3 Pemadatan (Kompaksi).....	13
2.4.4 <i>Sintering</i>	14
2.5 Karakterisasi.....	15
2.5.1 SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)-EDS (<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>).....	15
2.5.2 XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>).....	17
2.6 Densitas.....	19
2.7 Kekerasan Mikro <i>Vickers</i>	22
2.8 Oksidasi.....	23
2.9 Kajian Pustaka.....	25
2.10 Kajian Integrasi Islam.....	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	29
3.2 Jenis Penelitian.....	29
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.3.1 Alat Penelitian.....	29
3.3.2 Bahan Penelitian.....	30
3.4 Tahapan Penelitian.....	31
3.4.1 Persiapan Bahan Baku.....	31
3.4.2 Preparasi Sampel Menggunakan Teknik Metalurgi Serbuk.....	31

3.4.3 Pembuatan Pelet (<i>Green Body</i>).....	32
3.4.4 Karakterisasi Material	33
3.4.5 Pengujian Sampel	33
3.5 Diagram Alir Penelitian	35
3.6 Pengambilan Data	36
3.6.1 Karakterisasi XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	36
3.6.2 Karakterisasi SEM-EDX (<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Diffractometer</i>).....	36
3.6.3 Uji Kekerasan	37
3.6.4 Uji Densitas	37
3.6.5 Uji Ketahanan Oksidasi	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Data Hasil Penelitian	39
4.1.1 Preparasi Paduan Fe-Cr-Al.....	39
4.1.2 Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	40
4.1.3 Karakterisasi Menggunakan SEM-EDX	42
4.1.4 Pengujian Densitas	44
4.1.5 Pengujian Kekerasan	46
4.1.6 Pengujian Oksidasi Pada Suhu Tinggi.....	47
4.2 Pembahasan	48
BAB V PENUTUP	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Kesetimbangan Fe-Cr-Al.....	9
Gambar 2.2	Diagram Perubahan Fasa Paduan Fe-Cr-Al.....	10
Gambar 2.3	Mekanisme Penghalusan Menggunakan Metode <i>Milling</i>	12
Gambar 2.4	Proses Terjadinya Pematatan Serbuk	13
Gambar 2.5	Peristiwa Pertumbuhan Partikel.....	14
Gambar 2.6	Skema Alat SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>).....	16
Gambar 2.7	Prinsip Kerja EDS.....	17
Gambar 2.8	Mekanisme Pemantulan Sinar-X	18
Gambar 2.9	Hukum Bouyancy	21
Gambar 2.10	Pengujian <i>Vickers</i> dan Bentuk Indentor <i>Vickers</i>	22
Gambar 2.11	Mekanisme Pembentukan Lapisan Oksida Pada Suatu Logam.....	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4.1	Serbuk FeCr	39
Gambar 4.2	Kurva Kenaikan Suhu.....	40
Gambar 4.3	Pola Difraksi Sinar-X	41
Gambar 4.4	Hasil Analisa Morfologi Permukaan Sampel (a) 100(FeCr) dan (b) 90(FeCr)-10Al.....	42
Gambar 4.5	Mikrostruktur BSE-SEM dan EDX Point Analisis Pada Paduan (a) 100(FeCr) dan (b) 90(FeCr)-10Al.....	44
Gambar 4.6	Densitas FeCr Pada Variasi Penambahan Al	45
Gambar 4.7	Grafik Nilai Kekerasan FeCr dengan Penambahan Al	46
Gambar 4.8	Grafik Ketahanan Oksidasi Pada FeCr dengan Penambahan Al	48

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi FeCr (<i>Ferrochrome Alloy</i>).....	30
Tabel 3.2	Variasi Komposisi Serbuk FeCr dan Aluminium.....	32
Tabel 3.3	Uji Kekerasan	37
Tabel 3.4	Uji Densitas	37
Tabel 3.5	Pertambahan Massa Rata-Rata Pada Uji Oksidasi	38
Tabel 4.1	Data Difraksi XRD Setiap Sampel	41
Tabel 4.2	Porositas dan % Area Porositas Sampel	43
Tabel 4.3	Nilai Densitas Sampel Uji	45
Tabel 4.4	Perubahan Massa Sampel Karena Oksidasi.....	47



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Hasil Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*)
- Lampiran 2 Hasil Karakterisasi SEM-EDX
- Lampiran 3 Perhitungan Nilai Densitas
- Lampiran 4 Perhitungan Nilai Kekerasan (*Vickers Hardness*)
- Lampiran 5 Perhitungan Uji Oksidasi
- Lampiran 6 Dokumentasi Penelitian
- Lampiran 7 Bukti Konsultasi Skripsi



ABSTRAK

Jannah, Siti Rachmatul. 2019. **Sintesis dan Karakterisasi Logam Paduan Fe-Cr-Al Sebagai Material Tahan Panas**. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang. Pembimbing: (I) Erna Hastuti, M. Si (II) Bambang Hermanto, S.T, M.Si (III) Drs. Abdul Basid, M. Si

Kata Kunci: Material Tahan Panas, Metalurgi Serbuk, Fe-Cr-Al

Material tahan panas merupakan material yang mampu bertahan pada suhu tinggi. Penelitian ini mengkaji tentang pengaruh penambahan aluminium terhadap struktur dan ketahanan oksidasi pada paduan FeCr. Material yang digunakan berupa serbuk FeCr dan aluminium. Serbuk dicampurkan dengan variasi komposisi 0, 5, 10, dan 15 (%at) menggunakan metode metalurgi serbuk. Hasil pencampuran dikompaksi menjadi pelet dan dipanaskan pada suhu 1200 °C selama 2 jam. Struktur paduan dikarakterisasi dan dianalisis menggunakan XRD. Semua paduan menunjukkan adanya fasa FeCr dan tidak terdapat fasa aluminium. Hasil uji morfologi menggunakan SEM-EDX menunjukkan bahwa sampel FeCr memiliki nilai porositas yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel lainnya. Penambahan aluminium pada FeCr menurunkan densitas dan kekerasan paduan. Hasil uji oksidasi menunjukkan bahwa sampel FeCr dan FeCr-10Al 1 (%at) memiliki ketahanan oksidasi baik.

ABSTRACT

Jannah, Siti Rachmatul. 2019. **Synthesis and Characterization of Alloy Metal Fe-Cr-Al as Heat-Resistant Material**. Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University of Malang. Advisor: (I) Erna Hastuti, M. Si (II) Bambang Hermanto, S.T, M.Si (III) Drs. Abdul Basid, M. Si

Kata Kunci: Heat-Resistant Material, Powder Metallurgy, Fe-Cr-Al

Heat-resistant material are material that can withstand high temperatures. The study examines the influence of aluminium's addition to the structure and oxidation resistance of the FeCr alloy. The materials used are FeCr powder is mixed with variations of composition 0, 5, 10, and 15 (%at) using powder metallurgy methods. The mixing result is combination of pellet and heated to 1200 °C for 2 hours. Alloy structures are characterised and analyzed using XRD. All alloys indicate the presence of FeCr phase and no aluminium phase. The morphology test result using SEM-EDX indicate that the FeCr sample has a smaller porosity value compared to other samples. The addition of aluminium to FeCr Lowers alloy density and hardness. Oxidation test results show that the samples of FeCr and FeCr-10Al (%at) have good oxidation resistance.

مستخلص البحث

جنة، سيتي رحمتول. 2019. تركيب وتوصيف سبيكة Fe-Cr-Al المعدنية كمواقد مقاومة الحرارة. أطروحة. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، الجامعة الإسلامية الحكومية مولانا مالك إبراهيم، مالانج. المرشد: إيرنا هستوتي الماجستير، مبنك هرمتوتا الماجستير، عبدالبصيط الماجستير

الكلمات البحث: مواد مقاومة الحرارة، مسحوق المعادن Fe-Cr-Al

المواد المقاومة للحرارة هي مادة يمكنها تحمل درجات الحرارة العالية. تبحث هذه الدراسة في تأثير إضافة الألومنيوم إلى هيكل ومقاومة الأكسدة من السبائك الحديدية. المواد المستخدمة هي مسحوق الكروم والألومنيوم. يخلط المسحوق مع اختلافات في التركيبة في 0، 5، 10، 15 (بنسبة٪) باستخدام طريقة تعدين المسحوق. يتم ضغط نتيجة الخلط في كريات وتسخينها عند 1200 درجة مئوية لمدة ساعتين. تميزت هياكل سبائك وتحليلها باستخدام XRD أظهرت جميع السبائك وجود مرحلة FeCr ولم يكن هناك طور من الألومنيوم. أظهرت نتائج الاختبارات المورفولوجية باستخدام SEM-EDX أن عينة FeCr لها قيمة مسامية أصغر مقارنة بالعينات الأخرى. إضافة الألومنيوم إلى Fe-Cr يقلل من كثافة وصلابة سبيكة. أظهرت نتائج اختبار الأكسدة أن عينات FeCr و FeCr-Al 10 (بنسبة٪) تتمتع بمقاومة جيدة للأكسدة.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material tahan panas yang dikembangkan pada aplikasi suhu tinggi memiliki fasa yang stabil, tahan terhadap *creep*, *warping*, dan oksidasi. Material berbasis logam dibuat dengan paduan unsur tertentu untuk mendapatkan sifat-sifat yang sesuai dengan kebutuhan. Salah satu logam yang digunakan adalah baja paduan. Pada bidang industri sistem pemanasan dapat dimanfaatkan untuk *heat treatment furnace*, *resistance heating elements*, *hot working tools*, komponen alat ruang angkasa, *bearing* pada suhu tinggi, dan gas *turbine engine*.

Stott (1971) membuat material tahan panas dari logam paduan Fe-Cr-Al, Ni-Cr-Al, dan Co-Cr-Al. Paduan logam ini diuji oksidasi pada suhu 1000 dan 1200 °C dengan dialir gas oksigen 1 atm selama 25 jam. Logam paduan Fe-Cr-Al memiliki ketahanan oksidasi yang baik dibandingkan dengan Ni-Cr-Al dan Co-Cr-Al. Pada suhu 1200 °C, Fe-Cr-Al memiliki *weight gain* sebesar 0.5-1 mg/cm³ dan membentuk lapisan Al₂O₃ yang dapat mencegah proses oksidasi.

Zhang (2006) melakukan sintesis logam paduan Fe-Cr-Al dengan variasi komposisi Fe-5Cr-10Al, Fe-10Cr-10Al dan Fe-10Al menggunakan metode *melting mixture* yang dapat mempengaruhi nilai laju oksidasi. Uji oksidasi dilakukan selama 50 jam pada suhu 1000 °C dengan nilai laju oksidasi terendah pada komposisi Fe-10Cr-10Al. Airiskallio (2010) menggunakan metode *induction melting* dengan variasi komposisi Fe-13Al, Fe-18Al, Fe-23Al, dan Fe-10Cr-10Al untuk membuat paduan logam Fe-Al dan Fe-Cr-Al. Penambahan Al dari 13 ke 18

(% at) dapat meningkatkan daya tahan logam terhadap oksidasi di atas suhu 1000 °C.

Ginting (2018), menunjukkan bahwa paduan Fe-Cr-Al dengan penambahan silikon sebesar 4% merupakan hasil paling baik. Hal ini disebabkan karena paduan logam memiliki intensitas tinggi dan porositas yang lebih sedikit serta mempunyai pertambahan massa rata-rata lebih kecil dari yang lainnya. Berbagai penelitian dilakukan untuk meningkatkan kualitas material elemen pemanas yang dapat bekerja lebih optimal, tahan terhadap suhu tinggi dan korosi serta biaya produksi yang lebih murah.

Menurut Silalahi (2014) terdapat beberapa metode sintesis yang dapat digunakan yaitu sintesis paduan yang dapat digunakan ialah metode peleburan, metalurgi serbuk, dan pemaduan teknik. Teknik yang digunakan pada penelitian ini adalah teknik metalurgi serbuk. Metalurgi serbuk merupakan proses mencampurkan serbuk secara bersamaan yang kemudian dikompaksi dan di *sintering*. Metode ini dapat memudahkan dan meningkatkan kehomogenan pencampuran dari elemen-elemen penyusun. Penggunaan metode ini dinilai sangat ekonomis, karena tidak adanya bahan yang terbuang selama proses pembuatan logam paduan.

Al-Qur'an telah menceritakan sejarah metalurgi di dalam kisah Dulqarnain (Prawira, 2016). Firman Allah SWT dalam surat Al-Kahfi ayat 95 dan 96 :

قَالَ مَا مَكَّنِّي فِيهِ رَبِّي خَيْرٌ فَأَعِينُونِي بِقُوَّةٍ أَجْعَلْ بَيْنَكُمْ وَبَيْنَهُمْ رَدْمًا ﴿٩٥﴾ ءَاتُونِي زُبَرَ الْحَدِيدِ حَتَّىٰ إِذَا سَاوَىٰ بَيْنَ الصَّدَفَيْنِ قَالَ أَنْفُخُوا حَتَّىٰ إِذَا جَعَلَهُ نَارًا قَالَ ءَاتُونِي أُفْرِغْ عَلَيْهِ قَطْرًا ﴿٩٦﴾

Artinya: “Dzulkarnain berkata: “Apa yang telah dikuasakan oleh Tuhanku kepadaku terhadapnya adalah lebih baik, Maka tolonglah aku dengan kekuatan (manusia dan alat-alat), agar aku membuatkan dinding antara kamu dan mereka (Q.S Al-Kahfi [18]: 95). Berilah aku potongan-potongan besi”. hingga apabila besi itu telah sama rata dengan kedua (puncak) gunung itu, berkatalah Dzulkarnain: “Tiuplah (api itu)”. hingga apabila besi itu sudah menjadi (merah seperti) api, diapun berkata: “Berilah aku tembaga (yang mendidih) agar aku kutuangkan ke atas besi panas itu” (Q.S Al-Kahfi [18]: 96).

Kata ردم (menutup celah) istilah لصدفين (sisi pinggir). Tembaga yang meleleh dalam bahasa Arab disebut قطرا dan istilah Al-Qur’an الحديدزبر bearti “potongan-potongan besi yang besar”. Imam Shadiq as dalam sebuah hadist mengatakan “Taqiyah bisa menjadi dinding pembatas antara kamu dengan lawan-lawanmu, yang tidak bisa dipanjat ataupun ditembus (Imani, 2005).

Zulqarnain menempuh perjalanan di belahan timur bumi sehingga sampai dihadapan kedua bukit itu, yakni dua gunung yang diantaranya terdapat satu lubang. Lubang tersebut akan mengeluarkan Ya’juj dan Ma’juj menuju negeri Turki (Abdullah, 2003). Zulqarnain memerintahkan kepada penduduk untuk membawakan potongan-potongan besi dan meletakkan di lembah gunung, tempat pembuatan bendungan. Setelah ketinggian besi itu sama dengan tingginya gunung, penduduk tersebut diperintahkan untuk menyalahkan api. Zulqarnain kemudian menuangkan tembaga yang sudah dihancurkan ke atas besi yang sudah

panas. Besi-besi tersebut melekat dan menyubut lubang-lubang, sehingga gunung menjadi licin (Ash-Shiddieqy, 2000).

Meninjau kata قطرا “tembaga”, dapat diterangkan dengan ilmu pengetahuan.

Berdasarkan metalurgi jika logam besi dilapisi tembaga besi akan terlindungi dari korosi. Sebab logam Cu ($E^\circ \text{Cu}^{2+} | \text{Cu} = +0.34 \text{ V}$) dan Sn ($E^\circ \text{Sn}^{2+} | \text{Sn} = -0.14 \text{ V}$) memiliki potensi reduksi yang lebih positif dari pada besi ($E^\circ \text{Fe}^{2+} | \text{Fe} = -0.44 \text{ V}$). Kesimpulan dari kisah tersebut adalah metalurgi telah dikenal pada masa Zulqarnain, yang diaplikasikan untuk pembuatan material bangunan (tembok besar) (Prawira, 2016).

Penelitian pembuatan logam paduan FeCr dengan penambahan Al pada variasi komposisi 100FeCr, 95FeCr-5Al, 90FeCr-10Al, dan 85FeCr-15Al bertujuan untuk membentuk lapisan oksidasi protektif. Hal ini mampu meningkatkan ketahanan paduan ketika diaplikasikan pada suhu tinggi. Karakterisasi pada Fe-Cr-Al dilakukan setelah proses *sintering*. Perubahan fasa dan morfologi yang terbentuk diuji menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*) dan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Diffractometer*). Kekerasan pada logam diuji menggunakan *vickers hardness* dan ketahanan oksidasi diuji pada suhu 800 °C selama 10 siklus. Berdasarkan pemaparan latar belakang tersebut, penelitian ini mempelajari tentang sintesis dan karakterisasi logam paduan Fe-Cr-Al sebagai material tahan panas.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi terhadap morfologi, struktur kristal, densitas, dan kekerasan pada paduan Fe-Cr-Al dari proses metalurgi serbuk?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi terhadap ketahanan oksidasi pada paduan Fe-Cr-Al dari proses metalurgi serbuk?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi terhadap morfologi, struktur kristal, densitas, dan kekerasan pada paduan Fe-Cr-Al dari proses metalurgi serbuk.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi terhadap ketahanan oksidasi pada paduan Fe-Cr-Al dari proses metalurgi serbuk.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini menggunakan bahan bongkahan FeCr yang diubah menjadi serbuk FeCr.
2. Teknik penelitian ini ialah pembuatan material paduan (*alloying*) dengan menggunakan metode metalurgi serbuk.
3. Perbandingan massa antara komposisi (bongkahan FeCr) dengan *ball mill* 1 : 5.
4. Komposisi yang digunakan adalah 100FeCr, 95FeCr-5Al, 90FeCr-10Al, dan 85FeCr-15Al.
5. Proses *sintering* dilakukan pada suhu 1200 °C selama 2 jam.

6. Identifikasi fasa menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*).
7. Karakterisasi struktur mikrografi menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Diffractometer*).
8. Kekerasan paduan diuji menggunakan *vickers hardness*.
9. Ketahanan korosi dilakukan pengujian oksidasi selama 10 siklus pada suhu 800 °C (1 siklus sama dengan 24 jam).

1.5 Manfaat

1. Paduan Fe-Cr-Al dapat diterapkan dalam industri yang menggunakan ketahanan pada suhu tinggi.
2. Mengetahui proses pembuatan paduan Fe-Cr-Al menggunakan metode yang lebih sederhana.
3. Mengetahui struktur kristal, morfologi, kekerasan, nilai densitas, dan ketahanan oksidasi pada paduan Fe-Cr-Al.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Tahan Panas

Material tahan panas adalah material yang mampu mempertahankan sifat-sifatnya (tidak mengalami penurunan kualitas) pada suhu yang tinggi. Material tersebut memiliki ketahanan terhadap oksidasi, *tensil*, *thermal*, dan *shock*. Bahan yang sering digunakan pada aplikasi tersebut yaitu logam. Perpaduan logam dengan unsur-unsur tertentu dapat meningkatkan kualitas material. Salah satu klasifikasi logam paduan yang banyak digunakan sebagai material tahan panas adalah *superalloy* (Yudi, 2013).

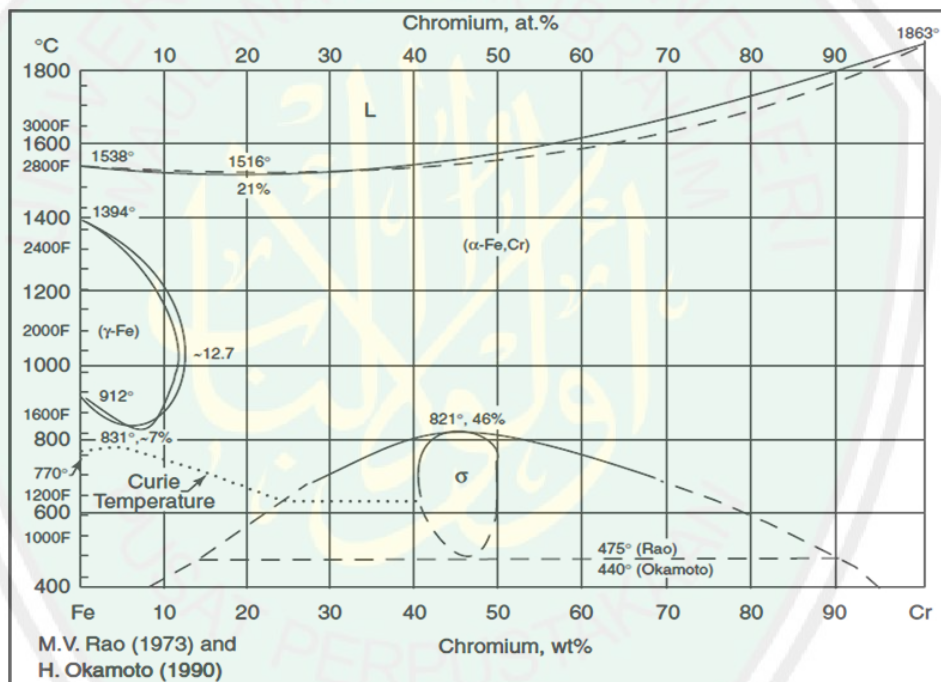
Superalloy merupakan paduan yang memiliki kekuatan dan ketahanan mulur yang baik pada suhu tinggi. Bahan tersebut sering digunakan dibagian terpanas pada mesin jet dan roket, dimana suhunya mencapai 1200 °C–1400 °C. Bahan dasar *superalloy* yaitu nikel, kobalt atau besi yang dipadukan dengan unsur-unsur tertentu untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, dan daya tahan pada suhu tinggi (Mouritz, 2012). Berdasarkan unsur paduan, *superalloy* dapat dibedakan menjadi 3 golongan, yaitu (Tjahjono, 2013):

- a. *Superalloy* berbasis nikel merupakan paduan super yang unsur dominannya berupa nikel. Paduan ini mengandung 10-20% Cr, 5-10% Co, 8% maksimum Al dan Ti, serta sejumlah kecil B, Zr, dan C. Terkadang unsur Mo, W, Ta, Hf, Fb, dan Nb sering ditambahkan. Fasa yang terbentuk pada paduan tersebut cenderung membentuk fasa γ dan γ' . Fasa tersebut dapat membentuk endapan yang merata, stabil, ulet, tangguh, dan tahan

- b. terhadap suhu tinggi. Paduan ini digunakan pada turbin, sistem pembuangan mobil formula 1, dan boiler.
- c. *Superalloy* berbasis kobalt merupakan paduan super yang unsur dominannya adalah kobalt. Paduan ini mengandung 10-30% Ni, 25% Cr, 15% W, serta unsur-unsur lain dalam jumlah kecil. Penguatan pada paduan ini yaitu penguatan larutan padat dan larutan karbida. Paduan dengan penguatan karbida biasanya mengandung 0,4-0,84% unsur karbon. UMco-50 adalah salah satu produk paduan super berbasis kobalt yang sering diaplikasikan pada komponen dapur pembakaran. MP-35N dan MP-159 sering digunakan sebagai baut pada suhu tinggi. Produk lainnya yaitu Heynes 25 yang sering digunakan pada turbin gas, reaktor nuklir, dan baut yang memerlukan kebutuhan khusus.
- d. *Superalloy* berbasis Besi (*Ferrum*) merupakan paduan super yang unsur dominannya adalah besi. *Superalloy* ini memiliki struktur FCC yang lebih tahan terhadap mulur. Unsur paduan seperti aluminium, nikel, titanium, dan niobium dapat ditambahkan untuk memperkuat *superalloy*. Ketahanan oksidasi dapat ditingkatkan dengan menambahkan unsur nikel, kromium, dan mangan. Contoh *superalloy* berbasis besi yaitu A-268, Incoly 901, INCO 768, INCO 901, dan Multimet. Logam paduan tersebut sering diaplikasikan pada turbin, roket, reaktor nuklir, dan lain-lain.

2.2 Ferrochrome (FeCr)

Ferrochrome adalah paduan yang terbentuk dari besi dan kromium dengan perbandingan variasi kromium antara 50-70 %. Kromium ditambahkan pada besi untuk meningkatkan ketahanan arus, kekerasan, dan kekuatan pada suhu tinggi (Shingerling, 2015). FeCr memiliki titik leleh pada suhu 1600 °C dengan nilai densitas sebesar 6,8 gr/cm³ (Niemela, 2007). Logam FeCr biasa digunakan pada *stainless* dan baja tahan panas (Shingerling, 2015).



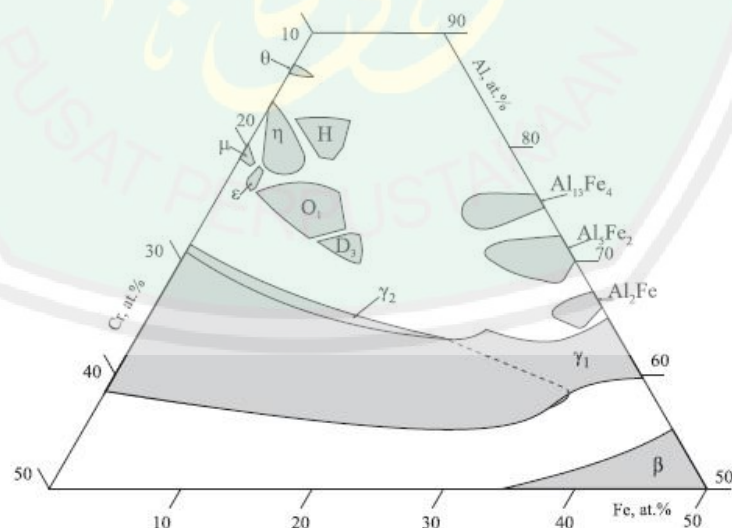
Gambar 2.1 Diagram Kesetimbangan Fe-Cr-Al (Al-Mangour, 2015)

Fasa perubahan logam FeCr yang dipengaruhi oleh suhu dapat dilihat pada Gambar 2.1. Logam FeCr dipanaskan pada suhu tertentu dengan variasi berat dapat menghasilkan fasa-fasa yang berbeda-beda. Perubahan fasa yang terbentuk yaitu α , σ , X, dan Y (Kartikasari, 2009). Fasa oksidasi yang terbentuk pada logam

FeCr adalah FeO, Cr₂O₃, dan Cr₂O₄. Fasa-fasa tersebut terbentuk dan stabil pada suhu rendah. Cr₂O₃ terbentuk pada suhu 700 °C (Hilty, 1955).

2.3 Paduan Fe-Cr-Al

Paduan Fe-Cr-Al pertama kali dikembangkan di Sweden dan diaplikasikan untuk elemen pemanas (*heater*). Paduan tersebut terdiri dari tiga elemen, yaitu besi (Fe), kromium (Cr), dan aluminium (Al). Fe-Cr-Al memiliki ketahanan oksidasi pada suhu tinggi. Hal ini dikarenakan kemampuannya membentuk lapisan oksida Cr₂O₃ dan Al₂O₃. Lapisan tersebut berfungsi sebagai pelindung oksida dengan mencegah terjadinya difusi oksigen ke dalam paduan. Lapisan Cr₂O₃ dapat menahan oksidasi hingga suhu 1000 °C, sedangkan Al₂O₃ dapat menahan oksidasi hingga suhu 1200 °C. Paduan ini dapat membentuk intermetalik seperti FeAl₂O₄ dan FeCr₂O₄ setelah periode oksidasi yang panjang dan meningkatkan nilai konstanta oksidasi (Ginting, 2018).



Gambar 2.2 Diagram Perubahan Fasa Paduan Fe-Cr-Al (Pavlyuchkov, 2014)

Logam Fe-Cr-Al yang dipadukan dengan variasi komposisi tertentu akan menghasilkan fasa yang berbeda seperti pada Gambar 2.2. Fasa μ terbentuk hanya pada paduan dengan 1% unsur Fe. Fasa ε banyak muncul pada paduan dengan konsentrasi Fe yang banyak. Konsentrasi Al yang tinggi pada paduan memunculkan fasa orthorombic O_1 dan hexagonal H_1 pada pemanasan dibawah suhu 1000 °C (Pavlyuchkov, 2014). Paduan Cr dan Al dioksidasi membentuk lapisan Cr_2O_3 yang berada diatas lapisan Al_2O_3 . Hal tersebut menunjukkan bahwa unsur Cr lebih mudah bereaksi dengan oksigen daripada unsur Al (Giggins, 2014).

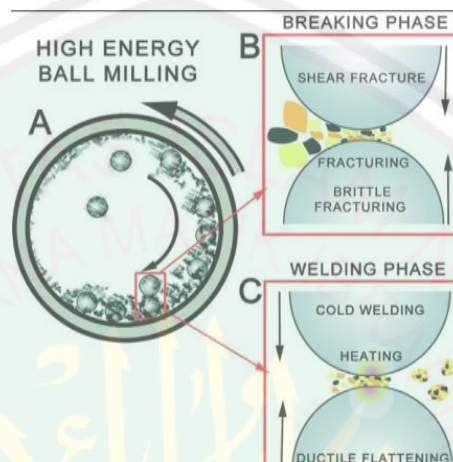
2.4 Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk merupakan teknik fabrikasi logam menggunakan penekanan (kompaksi) pada serbuk logam yang dilanjutkan dengan proses pemanasan. Metode ini digunakan untuk membuat logam yang memiliki tingkat kelunakan yang rendah, karena partikel serbuk memiliki deformasi plastis yang kecil (Callister, 2014). Langkah-langkah pada metode metalurgi antara lain, pembuatan serbuk logam, pencampuran, pemadatan, dan pemanasan (Yafie, 2014).

2.4.1 Penghalusan Serbuk Logam

Bahan dasar pembuatan logam paduan yang berbentuk bongkahan memerlukan proses penghalusan agar menjadi serbuk. Salah satu teknik penghalusan yang dapat dilakukan yaitu metode *milling*. Mekanisme penghalusan menggunakan metode *milling* dapat dilihat pada Gambar 2.3. Teknik ini

menggunakan energi tumbukan antara bola-bola penghancur dan dinding *chamber* yang diputar dan digerakkan dengan cara tertentu. Penghalusan menggunakan metode *milling* lebih murah dan efektif, sehingga didapatkan serbuk logam yang lebih banyak dalam waktu yang relatif singkat (Sarimai, 2016).



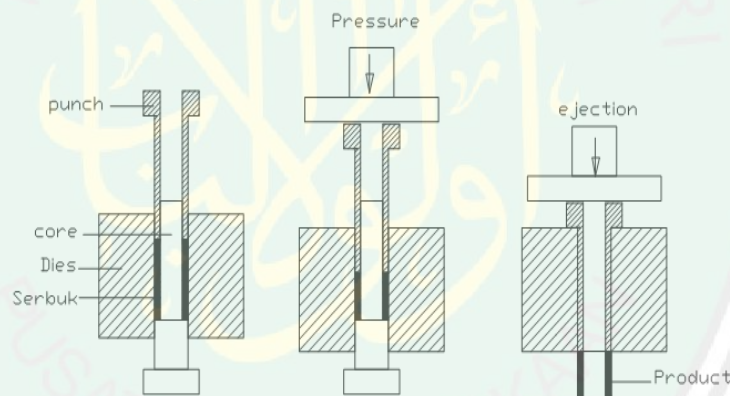
Gambar 2.3 Mekanisme Penghalusan Menggunakan Metode *Milling* (Sarimai, 2016).

2.4.2 Pencampuran Serbuk Logam

Butiran-butiran serbuk yang bervariasi harus terdistribusi merata, sehingga perlu dilakukan pencampuran. Bahan-bahan yang berbeda jenisnya atau berbeda titik leburnya harus tercampur merata, dengan demikian akan dihasilkan serbuk yang bersifat homogen. Ada dua metode pencampuran yaitu, basah dan kering. Pencampuran basah dilakukan dengan memberikan zat pelarut sehingga bahan tidak teroksidasi, sedangkan pencampuran kering tidak menggunakan zat pelarut (Suwanda, 2006).

2.5.3 Pemasatan (Kompaksi)

Kompaksi dilakukan untuk memadatkan, meningkatkan massa jenis dan membuat ikatan mekanik pada serbuk. Gambar 2.4 menunjukkan proses terjadinya pepadatan serbuk. Tekanan luar diberikan pada serbuk yang telah dicetak dengan bentuk dan ukuran yang diinginkan sehingga menjadi (Yafie, 2014). Metode kompaksi dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu, kompaksi dingin, panas, searah, dan dua arah. Kompaksi dingin adalah kompaksi yang dilakukan pada suhu ruang, sedangkan kompaksi panas dilakukan pada suhu di atas suhu ruang. Kompaksi searah hanya dilakukan dari atas ke bawah, sedangkan kompaksi dua arah dilakukan dari atas dan bawah (Rusianto, 2009).



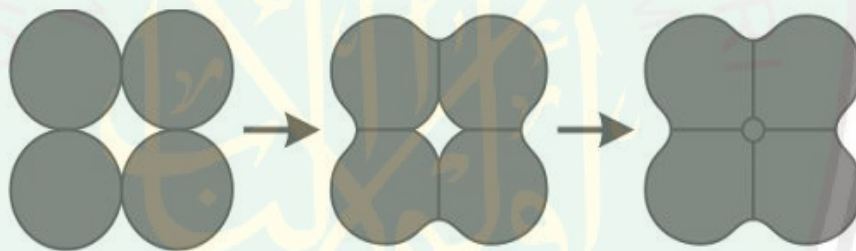
Gambar 2.4 Proses Terjadinya Pemasatan Serbuk (Rusianto, 2009).

Kompaksi bertujuan untuk menyusun butiran serbuk menjadi bentuk yang diinginkan, memperoleh jenis mutu, kerapatan, dan kekuatan yang diinginkan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas penekanan antara lain, kekerasan logam atau paduan, bentuk partikel, distribusi ukuran partikel, pengotor, penggunaan pelumas padat, dan penambahan unsur pepadu. Tekanan yang

diberikan pada bahan berkisar antara $1,2 \text{ ton/cm}^2$ - 48 ton/cm^2 , tergantung pada material yang digunakan (Hermansyah, 2009).

2.4.4 Sintering

Pelet yang diperoleh dari hasil kompaksi pada suhu ruang belum memiliki ikatan atom yang kuat. Penguatan ikatan atom dilakukan dengan cara dipanaskan. *Sintering* (pemanasan) adalah proses penggabungan partikel-partikel serbuk melalui peristiwa difusi pada saat suhu meningkat dan terjadi penghilangan pori-pori antara partikel bahan (Ramlan, 2011). Pemanasan *pellet* dilakukan pada suhu antara 70 % -90 % dari titik lebur bahan (Suwanda, 2006).



Gambar 2.5 Peristiwa Pertumbuhan Partikel (Ramlan, 2011).

Penyusutan partikel selama proses *sintering* akan diikuti dengan pertumbuhan *grain* dan peningkatan ikatan antar partikel yang berdekatan. Hal tersebut akan menghasilkan bahan yang lebih padat dan kuat. Peristiwa pertumbuhan partikel ditunjukkan pada Gambar 2.5. Tahap awal yaitu terjadi perataan permukaan partikel, dengan terbentuknya batas butir melalui pertumbuhan leher antar partikel (*necking*). Tahap selanjutnya yaitu terjadi penyusutan pori-pori antara batas butir yang menyebabkan pertumbuhan *grain*.

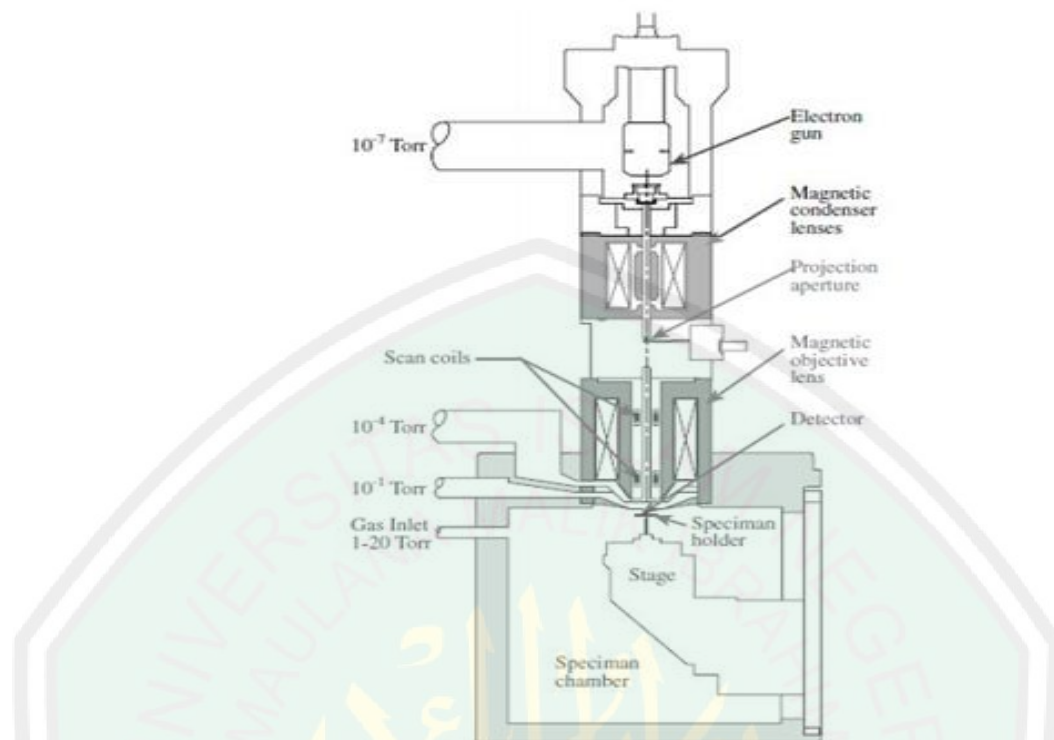
Tahap terakhir pori-pori menutup, mengecil dan menyelinap hingga berbentuk *grain* yang besar (Ramlan, 2011).

2.5 Karakterisasi

2.5.1 SEM (*Scanning Electron Microscope*)-EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan jenis mikroskop elektron yang dapat menggambarkan spesimen dengan memindai menggunakan sinar elektron berenergi tinggi dalam *scan* pola raster (Wijayanto, 2014). Komponen utama SEM adalah tiga pasang lensa elektromagnetik yang berfungsi memfokuskan berkas elektron menjadi sebuah titik kecil. Dua pasang *scan coil* dipaparkan pada sampel dengan frekuensi tertentu. Semakin kecil berkas yang difokuskan, maka semakin besar resolusi lateral dicapai. Kesalahan fisika pada lensa elektromagnetik dikoreksi oleh perangkat stigmator (Sujatno, 2015).

Sumber elektron biasanya berupa filamen dari bahan kawat tungsten atau berupa jarum dari paduan Lantanum Hexaboride (LaB_6) atau Cerium Hexaboride (CeB_6), yang terdapat berkas elektron yang teoretis memiliki energi tunggal (monokromatik). *Imaging detector* berfungsi untuk mengubah sinyal elektron menjadi gambar. Skema alat SEM dilihat pada Gambar 2.6 (Sujatno, 2015).



Gambar 2.6 Skema Alat SEM (*Scanning Electron Microscopy*) (Tristiana 2016).

SEM dapat digunakan untuk menganalisis unsur atau karakterisasi kimia dari spesimen dengan menggunakan teknologi EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Sinar-X yang dikeluarkan mampu mengidentifikasi unsur kimia karena pada setiap elemen memiliki struktur atom yang berbeda-beda saat berinteraksi dengan sinar-X. Gambar 2.7 menjelaskan prinsip kerja EDS antara lain (Wijayanto, 2014):

- a. Sinar-X dipancarkan atau difokuskan ke spesimen yang akan diteliti.
- b. Sinar yang dipancarkan mengeksitasi elektron dikulit dalam dan mengeluarkannya, sehingga terdapat lubang pada daerah tersebut.
- c. Elektron dari kulit luar yang berenergi lebih tinggi mengisi lubang tersebut.

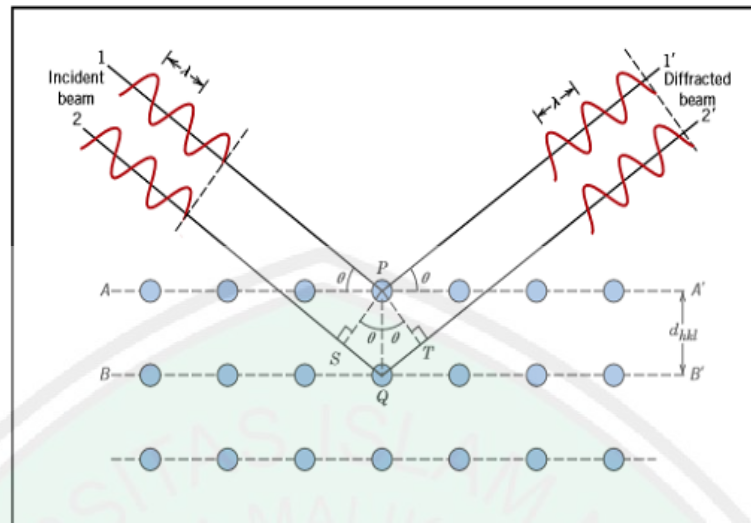
- d. Elektron yang berpindah dari kulit terluar kekulit dalam mengeluarkan energi.
- e. Energi yang dihasilkan diukur oleh spektrometer energi dispersif, sehingga didapatkan unsur komposisi yang diuji.



Gambar 2.7 Prinsip Kerja EDS (Wijayanto, 2014).

2.5.2 XRD (*X-Ray Diffraction*)

Sinar-X adalah bentuk radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi dengan panjang gelombang pendek. Seberkas sinar-X yang dikenakan pada bahan padat, sebagian akan dipantulkan ke semua arah oleh elektron pada setiap atom. Sinar yang dipantulkan akan ditangkap oleh detektor dan dikeluarkan berupa puncak-puncak difraktogram. Setiap unsur atau senyawa memiliki puncak difraksinya sendiri (Callister, 2014).



Gambar 2.8 Mekanisme Pemantulan Sinar-X (Callister, 2014).

Mekanisme pemantulan sinar-X ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dua bidang atom sejajar A dan B yang memiliki indeks miller h , k , dan l yang sama dan dipisahkan oleh jarak antar (d_{hkl}). Gelombang sinar-X yang paralel, monokromatik, dan koheren mengenai bidang A dan B pada sudut θ . Gelombang dipantulkan oleh atom P dan Q pada sudut θ , maka nilai difraksinya yaitu (Callister, 2014):

$$n\lambda = SQ + QT \quad (2.1)$$

$$n\lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta \quad (2.2)$$

maka,

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 digunakan untuk menghasilkan output data difraksi. Data difraksi dapat digunakan untuk menghitung ukuran kristal dengan menggunakan persamaan Debay Scherrer berikut (Sumadiyasa, 2018):

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (2.4)$$

Keterangan : λ = Panjang Gelombang Sinar-X
 θ = Sudut Difraksi
 K = Konstanta
 β = *Full Width at Half Maximum* (FWHM)

Persamaan tersebut juga menunjukkan bahwa lebar puncak bervariasi dengan sudut 2θ dalam bentuk $\cos(\theta)$. Lebar puncak difraksi juga dipengaruhi oleh *microstrain* (*strain* kisi), yaitu efek dari perpindahan suatu unit sel di sekitar posisi normalnya. Ini sering dihasilkan oleh beberapa faktor antara lain (Sumadiyasa, 2018):

- a. Distorsi kisi tidak seragam, dapat diakibatkan oleh tegangan permukaan *nanocrystal*, morfologi bentuk kristal, dan pengotor interstisial.
- b. Perbatasan domain antar fase, terbentuk pada saat penyusunan struktur material mengalami gangguan transformasi penyusunan.

2.6 Densitas

Massa jenis (densitas) adalah besarnya massa setiap satuan volume benda. Benda yang memiliki densitas yang besar akan memiliki kerapatan massa yang besar. Volume benda berbanding terbalik dengan densitas, semakin besar volume benda dengan massa yang sama memiliki densitas rendah (Alim, 2017). Persamaan 2.5 adalah persamaan umum yang digunakan untuk menghitung densitas pada benda padat dan teratur. Densitas pada benda yang belum diketahui

tingkat kepadatannya dan tidak teratur dapat dihitung menggunakan Hukum Bouyancy (Young, 2002).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.5)$$

Keterangan : ρ = Densitas (kg/m^3)
 m = Massa (kg)
 v = Volume (m^3)

Bouyancy adalah gaya apung yang dipengaruhi oleh densitas massa (volume) dan gravitasi, seperti pada Gambar 2.9. Gaya apung terjadi karena adanya reaksi dari fluida terhadap massa benda yang tercelup ke dalam air. Besarnya gaya apung F_A dirumuskan sebagai berikut (Joko, 2016):

$$F_A = \rho_f \times g \times V_{bf} \quad (2.6)$$

Keterangan : F_A = Gaya Ke Atas (N)
 ρ_f = Massa Jenis Fluida (kg/m^3)
 g = Percepatan Gravitasi Bumi (m/det^2)
 V_{bf} = Volume Benda yang Tercelup Dalam Fluida (m^3)

Persamaan (2.5) dan (2.6) jika digabungkan dengan persamaan Hukum Archimedes, maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$F_A = \rho_a \times g \times V_b$$

$$W_b - W_a = \rho_a \times g \times V_b$$

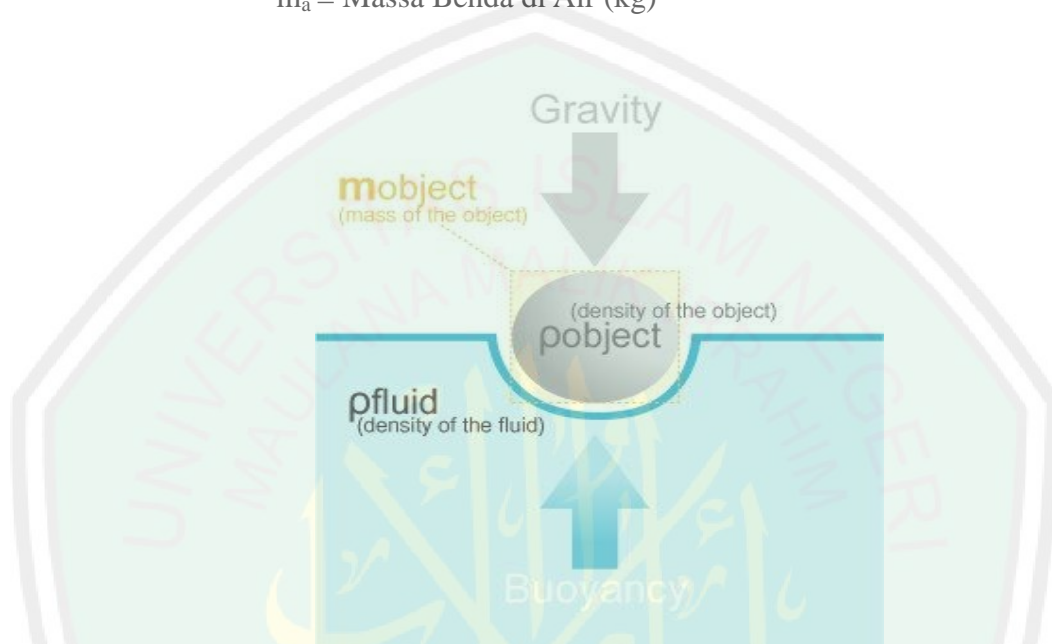
$$W_b - W_a = \rho_a \times g \times \frac{m_b}{\rho_b}$$

$$W_b - W_a = \rho_a \times \frac{W_b}{\rho_b}$$

$$\frac{\rho_b}{W_b - W_a} = \rho_a \times W_b$$

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{W_b}{W_b - W_a} \quad (2.7)$$

Keterangan : F_A = Gaya Apung (N)
 ρ_a = Massa Jenis Zat Cair (kg/m^3)
 ρ_b = Massa Jenis Zat Padat (kg/m^3)
 W_b = Berat Benda di Udara (kg)
 W_a = Berat Benda di Air (kg)
 m_b = Massa Benda di Udara (kg)
 m_a = Massa Benda di Air (kg)



Gambar 2.9 Hukum Bouyancy (Winarto, 2010).

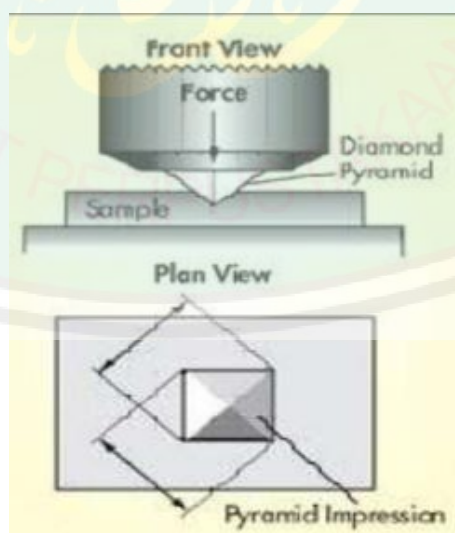
Perhitungan densitas menggunakan persamaan (2.7) dilakukan pada logam paduan karena terdapat porositas pada bahan. Porositas adalah ukuran dari ruang kosong di antara material atau fraksi dari volume ruang kosong terhadap total volume. Porositas tergantung pada jenis bahan, ukuran bahan, distribusi pori, riwayat diagenetik, dan komposisinya. Densitas dan porositas merupakan suatu besaran yang identik. Kedua besaran tersebut saling berbanding terbalik. Benda yang mempunyai nilai densitas lebih besar, maka benda memiliki porositas yang kecil (Alim, 2017).

2.7 Kekerasan Mikro *Vickers*

Kekerasan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen. Uji kekerasan *vickers* menggunakan indenter piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar, seperti pada Gambar 2.10. Besar sudut antar permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136° . Nilai ini dipilih karena mendekati sebagian besar nilai perbandingan yang diinginkan antara diameter lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan *brinell*. Angka kekerasan *vickers* didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan. Luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. HV dapat ditentukan dari persamaan berikut (Wijayanto, 2014):

$$HV = \frac{2000 P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} = \frac{1854,4 P}{d^2} \quad (2.8)$$

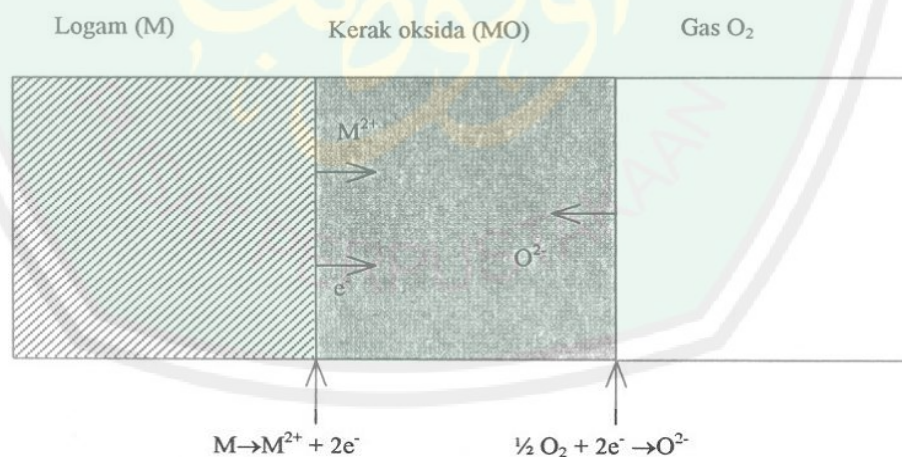
Keterangan : d = rata-rata diagonal (μm)
 P = beban yang diberikan (gf)
 α = sudut permukaan (136°)



Gambar 2.10 Pengujian *Vickers* dan Bentuk Indenter *Vickers* (Kumayasari, 2017).

2.8 Oksidasi

Proses oksidasi dibedakan menjadi dua yaitu, oksidasi secara fisika dan kimia. Oksidasi secara fisika merupakan sebuah proses terjadinya pengkaratan yang biasanya terjadi pada logam yang disimpan terlalu lama, sedangkan oksidasi secara kimia dapat diartikan sebagai pengurangan kandungan elektron atau penambahan oksigen pada suatu unsur. Unsur yang menyebabkan oksidasi dinamakan unsur pengoksidasi. Oksidasi sangat dipengaruhi oleh keadaan lingkungan udara sekitar, apabila lingkungan udara sekitar lembab maka akan mempercepat terjadinya oksidasi. Peristiwa reduksi dan oksidasi atau reaksi perubahan bilangan oksidasi disebut redoks. Oksidasi merupakan peristiwa terlepasnya elektron dari unsur, sedangkan reduksi adalah penerimaan elektron ke suatu unsur (Vitrajaya, 2017).

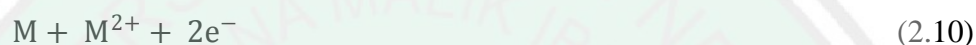


Gambar 2.11 Mekanisme Pembentukan Lapisan Oksida Pada Suatu Logam (Kambali, 2003).

Proses pembentukan lapisan atau kerak oksidasi (*oxide layer or scalling*) merupakan reaksi elektrokimia. Reaksi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.11. Contoh logam divalen M, reaksi yang terjadi adalah (Kambali, 2003):



Reaksi (2.9) terdiri dari setengah reaksi oksidasi dan reduksi. Setengah reaksi oksidasinya (pembentukan ion logam) terjadi pada batas permukaan kerak-logam, yaitu (Kambali, 2003):



Sedangkan setengah reaksi reduksinya (pembentukan ion oksigen) terjadi pada batas permukaan gas-kerak yang dirumuskan pada persamaan (2.11), sedangkan untuk bahan selain logam divalen mekanisme reaksinya ditunjukkan pada persamaan (2.12).



Laju oksidasi dapat ditentukan dengan menimbang berat oksidasi yang terbentuk sebagai fungsi waktu. Ketika oksidasi yang terbentuk tidak berpori dan mengikat kuat permukaan logam, laju oksidasi ditentukan oleh difusi ion, sehingga hubungan antara berat oksida tiap satuan luas (W) dan waktu (t) adalah parabolik dengan persamaan (Kambali, 2003):

$$W^2 = K_1t + K_2 \quad (2.13)$$

Oksidasi yang terbentuk berpori dan mudah mengelupas, laju oksidasinya adalah linier dengan persamaan (Kambali, 2003):

$$W = K_3 t \quad (2.14)$$

Oksida yang terbentuk sangat tipis dan terjadi pada suhu rendah, laju oksidasinya berbentuk logaritmik dengan persamaan:

$$W = K_4 \log (K_5 t + K_6) \quad (2.15)$$

K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 dan K_6 adalah konstan.

2.9 Kajian Pustaka

Paduan Fe-Cr-Al merupakan paduan logam yang memiliki ketahanan oksidasi pada suhu tinggi. Paduan logam Fe-Cr-Al dirancang untuk digunakan pada suhu 1400 °C. Paduan mampu menahan panas karena adanya oksidasi pada permukaan logam melalui pembentukan lapisan Al_2O_3 . Penambahan Cr pada paduan bermanfaat untuk meningkatkan kemampuan logam untuk menahan tegangan tarik pada suhu ruang. Meningkatnya kekerasan dan penambahan aluminium pada paduan dapat dijelaskan dengan menurunnya kelarutan paduan dengan suhu dalam larutan besi-kromium (Geanta, 2011).

Nanoquasicrystalline Fe-Cr-Al yang berbasis paduan logam memiliki struktur kecil dengan kekuatan yang tahan pada suhu tinggi. Keberadaan fase *quasicrystalline* dapat membatasi penggunaan paduan ini pada suhu tinggi sehingga diperlukan unsur ke empat yang mampu mempertahankan paduan pada suhu tinggi. Penambahan unsur ke empat pada $Al_{93}(Fe_3Cr_2)_7$ mampu meningkatkan stabilitas termal dan menunda transformasi fasa menuju peleburan paduan. Hasilnya diperoleh bahwa semua paduan menunjukkan kekuatan yang sangat tinggi hingga 350°C (Agili, 2012).

Fe-Cr-Al memiliki ketahanan korosi, karena kestabilan fasanya dan perbaikan struktur kristalnya sangat kuat. Fe-Al dan Fe-Cr-Al dengan penambahan suatu unsur lain seperti Yttrium yang mampu mempengaruhi pertumbuhan kerak dan meningkatkan ketahanan oksidasi pada suhu tinggi sekitar 160% (Sudjatmoko, 2009). Melapisi baja menggunakan paduan logam Fe-Cr-Al dapat diaplikasikan pada material tahan panas. Metode pelapisan yang digunakan adalah teknik pemaduan mekanik. Paduan logam dipanaskan pada suhu 700 °C. Difusi Fe-Cr-Al pada baja dapat menghambat laju oksidasi karena struktur mikro yang terbentuk lebih padat, rapat, dan homogen (Ciswandi, 2006).

Uji oksidasi paduan Fe-Cr-Al yang dilakukan dengan teknik penambahan berat sensitif. Uji komparasi dilakukan menggunakan XRD untuk menentukan struktur kristal komposisi film oksida. Hasil oksidasinya menunjukkan bahwa perubahan laju oksidasi pada suhu antara 900 hingga 1050 °C memiliki nilai konstan, namun di atas 1050 °C nilai oksidasi mengalami peningkatan kembali. Data laju oksidasi diinterpretasikan menggunakan hukum laju parabola (Gulbransen, 2015).

Material tahan panas dibuat dari paduan Fe-Cr-Al-Y dengan perbandingan komposisi Al dan Cr. Uji ketahanan oksidasi dilakukan pada suhu 1200 °C selama 4 jam. Proses oksidasi membentuk lapisan pelindung Al₂O₃ (alumina). Semakin banyak komposisi Cr yang ditambahkan maka laju oksidasi semakin menurun. Hal ini mengakibatkan laju oksidasi mengalami penurunan (Unocic, 2017).

2.10 Kajian Integrasi Islam

Fe (besi) merupakan unsur yang banyak membentuk bumi kira-kira 4,7-5% pada kerak bumi. Besi banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Selain itu, Al-Qur'an menceritakan tentang penurunan zat besi ke bumi dari langit beserta dengan potensi dan manfaatnya bagi umat manusia. Allah SWT berfirman dalam Surat Al-Hadid [57]: 25 yang berbunyi:

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنْفَعٌ لِلنَّاسِ وَلِيَعْلَمَ اللَّهُ مَنْ يَنْصُرُهُ وَرُسُلَهُ بِالْغَيْبِ إِنَّ اللَّهَ قَوِيٌّ عَزِيزٌ ﴿٢٥﴾

“Sesungguhnya Kami telah mengutus Rasul-rasul Kami dengan membawa bukti-bukti yang nyata dan telah Kami turunkan bersama mereka Al kitab dan neraca (keadilan) supaya manusia dapat melaksanakan keadilan. dan Kami ciptakan besi yang padanya terdapat kekuatan yang hebat dan berbagai manfaat bagi manusia, (supaya mereka mempergunakan besi itu) dan supaya Allah mengetahui siapa yang menolong (agama)Nya dan rasul-rasul-Nya Padahal Allah tidak dilihatnya. Sesungguhnya Allah Maha kuat lagi Maha Perkasa”(Q.S Al-Hadid [57]: 25).

Penafsiran pada ayat ini menghindari penerjemahan *وانزلنا الحديد* “Kami ciptakan besi”. Secara intrinsik “Kami turunkan besi”, sebagaimana artinya “Kami turunkan bersama mereka Al-Kitab dan mizan (keadilan, keseimbangan, keselarasan, dan kesepadanan)”. Ilmuwan Profesor Armstrong dari NASA atau Mohammad Asadi mengkaji tentang struktur penyusun dan teori terbentuknya bumi. Sains menjelaskan bahwa besi termasuk logam berat yang dapat dihasilkan oleh bumi (Mulyono, 2006).

Kode matematika dalam surat Al-Hadid ialah surat ke-57 yang memiliki nilai numerik dari kata “Hadid” berjumlah 26 yang sesuai dengan nomor atom besi (Mulyono, 2006). Kecocokan ini tidak mungkin terjadi secara kebetulan. Firman Allah SWT dalam surat An-Nisa’ ayat 166 memberikan gambaran tentang Al-Qur’an (El-Naggar, 2010):

لَكِنِ اللَّهُ يَشْهَدُ بِمَا أَنْزَلَ إِلَيْكَ أَنْزَلَهُ بِعِلْمِهِ وَالْمَلَائِكَةُ يَشْهَدُونَ وَكَفَى بِاللَّهِ شَهِدًا

“(Mereka tidak mau mengakui yang diturunkan kepadamu itu), tetapi Allah mengakui Al Quran yang diturunkan-Nya kepadamu. Allah menurunkannya dengan ilmu-Nya dan malaikat-malaikat pun menjadi saksi (pula). Cukuplah Allah yang mengakuinya”(Q.S An-Nisa’ [4]: 166).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan mulai bulan November 2018 sampai Januari 2019, bertempat di Laboratorium High Resistant Material (HRM), Pusat Penelitian Fisika–Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F–LIPI) Kawasan Puspitek No. 441–442, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314.

3.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian eksperimen. Pembuatan paduan Fe-Cr-Al menggunakan teknik metalurgi serbuk dengan variasi komposisi FeCr, FeCr-95Al-5, FeCr-90Al-10, dan FeCr-85Al-15. Sampel dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM-EDX. Sampel diuji uji kekerasan, densitas, dan ketahanan oksidasi.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat Penelitian

- a. Penumbuk manual
- b. Spatula
- c. Penyaring
- d. Neraca digital (AND GF–600)
- e. Bola giling (*ball mill*)
- f. Wadah *milling* (*jar mill*)
- g. *High Energy Milling* (*Shaker Mill* PPF–UG)

- h. Ayakan 200 Mesh
- i. Cawan
- j. Cetakan (*dies*)
- k. *Hydrolic press* (press manual)
- l. *Beaker glass* ukuran 250 mL
- m. *Ceramic crucible*
- n. Tungku vakum tubular (*vacum furnace*)
- o. Amplas (1000, 2000, dan 5000)
- p. Amplas beludru
- q. Jangka sorong
- r. *X-Ray Diffraction* (XRD) Rigaku SmartLab
- s. *Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-Ray Diffractometer* (SEM-EDX) HITACHI SU3500
- t. *Microhardness tester* (LECO LM 100 AT)
- u. *Muffle furnace* (PPF – 1300)

3.3.2 Bahan Penelitian

- a. FeCr lump (*Ferrochrome alloy*), komposisi FeCr ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komposisi FeCr (*Ferrochrome Alloy*)

Komposisi FeCr (<i>Ferrochrome Alloy</i>)		
Element	%wt	%at
Fe (<i>Ferro</i>)	28.92	21.16
Cr (<i>Cromium</i>)	60	47.15

- b. Serbuk aluminium (Al)
- c. Serbuk *ferrochrome* (FeCr)
- d. Heksan (*solvent*)
- e. Methanol

3.4 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini antara lain: persiapan bahan baku, preparasi sampel menggunakan teknik metalurgi serbuk, pembuatan pelet (*green body*) dengan kompaksi dan *sintering*, karakterisasi material serta pengujian sampel.

3.4.1 Persiapan Bahan Baku

- a. Bongkahan FeCr ditumbuk menggunakan penumbuk manual hingga berbentuk menjadi serpihan yang lebih kecil.
- b. Serpihan FeCr diayak untuk mendapatkan FeCr yang lebih halus untuk proses *milling*.

3.4.2 Preparasi Sampel Menggunakan Teknik Metalurgi Serbuk

- a. Jar dan *ball mill* dibersihkan menggunakan metanol dan digiling selama 15 menit agar terhindar kontaminasi. selanjutnya dibersihkan dan dikeringkan dengan *dyrer*.
- b. *Ball mill* dan serbuk FeCr ditimbang dengan perbandingan 1 : 5.
- c. *Ball mill* dan serbuk FeCr dimasukkan ke dalam jar dan ditambahkan heksan sebanyak 15 ml.

- d. Proses penggilingan dilakukan selama 6 jam (30 menit run dan 10 menit stop) menggunakan *high energy milling* (Shaker Mill PPF–UG).
- e. Serbuk dikeringkan selama 24 jam dan diayak ukuran 200 mesh untuk mendapatkan serbuk FeCr.
- f. Komposisi serbuk Fe-Cr dan Al ditimbang sesuai variasi pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variasi Komposisi Serbuk FeCr dan Aluminium

Variasi Komposisi	FeCr (gram)	Aluminium (gram)
FeCr	1.00	0
FeCr-95Al-5	9.74	0.260
FeCr-90Al-10	9.47	0.534
FeCr-85Al-15	9.18	0.822

- g. Serbuk FeCr dan Al dimasukkan ke dalam jar dengan perbandingan 1 : 5 dan ditambahkan 10 ml heksan.
- h. Proses penggilingan dilakukan selama 2 jam.
- i. Hasil penggilingan dikeringkan selama 24 jam untuk mendapatkan serbuk Fe-Cr-Al.

3.4.3 Pembuatan Pelet (*Green Body*)

- a. Serbuk Fe-Cr-Al ditimbang sebanyak 1.25 gram.
- b. Serbuk dimasukkan ke dalam cetakan (*dies*) yang memiliki diameter ± 10.07 mm dengan ketebalan ± 2.06 mm.
- c. Serbuk ditekan menggunakan kompaksi manual (Press Manual Takeda) dengan daya tekan 8 ton selama 5 menit dan pelet dikeluarkan untuk proses *sintering*.

- d. Pelet diletakkan pada *ceramic crucible* dan dimasukkan kedalam tungku vakum tubular.
- e. Tungku divakum selama 15 menit untuk menghindari udara yang masuk. Proses *sintering* dilakukan pada suhu 1200 °C selama 2 jam.
- f. Suhu diturunkan secara perlahan sampai suhu ruang. Sampel dikeluarkan dan diukur diameternya menggunakan jangka sorong.
- g. Sampel diamplas menggunakan kertas *carbide* ukuran 1000, 2000, dan 5000 hingga permukaan rata dan mengkilap.
- h. Sampel di *polish* menggunakan metal polish untuk mengurangi goresan.

3.4.4 Karakterisasi Material

- a. Sampel dikarakterisasi menggunakan XRD (Rigaku model SmartLab 3 kW tipe 2080B212) untuk mengetahui fasa-fasa yang terbentuk pada paduan Fe-Cr-Al.
- b. Morfologi pada paduan Fe-Cr-Al dikarakterisasi menggunakan SEM (HITACHI SU3500 dan untuk mengetahui komposisi serbuk pada paduan digunakan EDX).

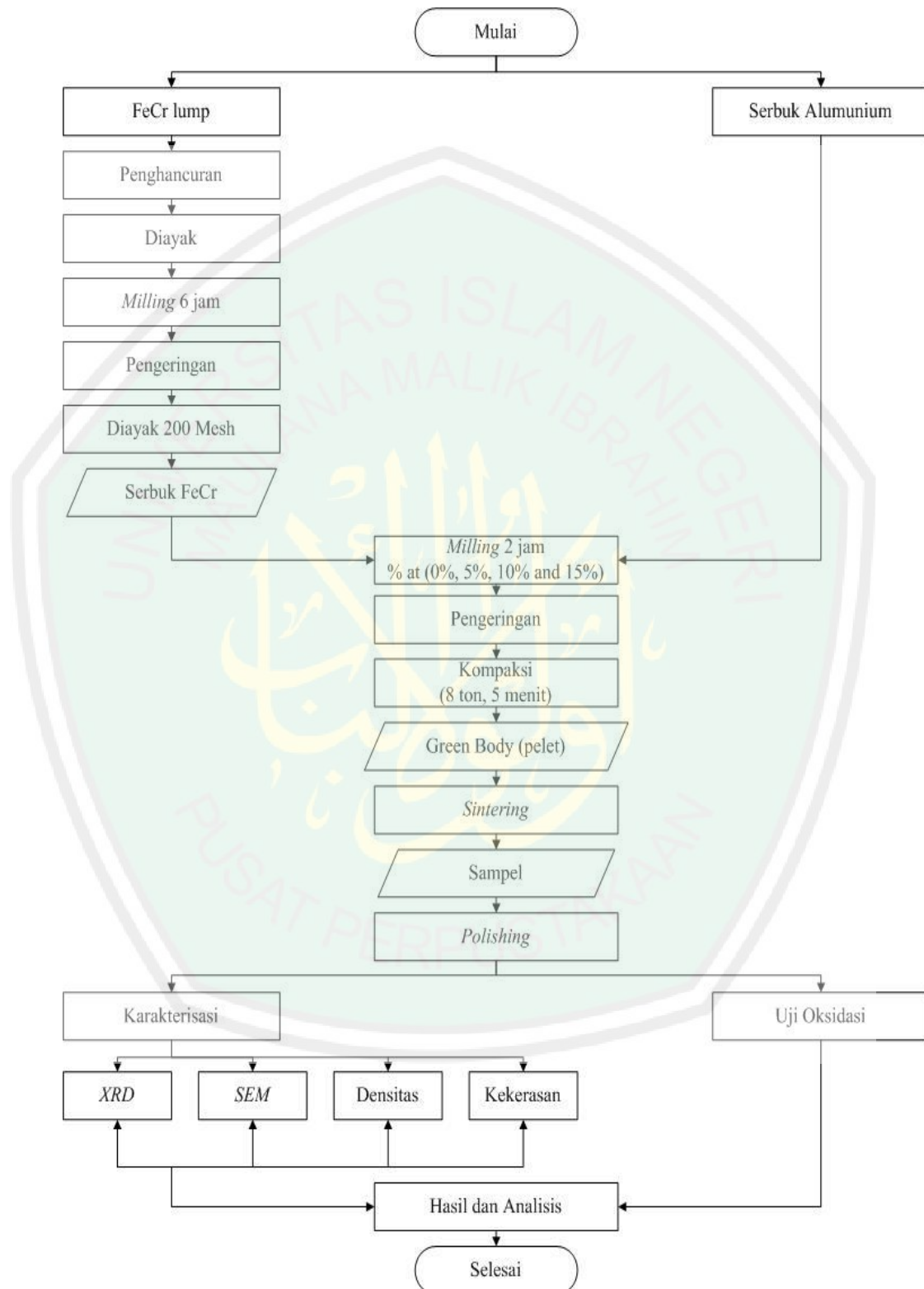
3.4.5 Pengujian Sampel

- a. Kekerasan sampel diuji menggunakan *microhardness tester* (LECO LM 100 AT) dengan daya tekan 500 gf selama 13 detik.
- b. Uji densitas menggunakan hukum bouyancy untuk mengetahui nilai densitas.

- c. Ketahanan paduan Fe-Cr-Al diuji oksidasi pada suhu 800 °C selama 10 siklus (1 siklus 24 jam dengan sampel dipanaskan selama 20 jam dan 4 jam didingink



5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.6 Pengambilan Data

3.6.1 Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*)

Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (Rigaku SmartLab) digunakan untuk menganalisis material hasil sintesis paduan Fe-Cr-Al. Tujuan dari karakterisasi ini adalah untuk mengetahui fasa-fasa yang terbentuk, struktur kristal dan ukuran kristal dari material. Pada proses ini sampel diletakkan pada holder menggunakan pinset. Selanjutnya dilakukan penembakan sinar-X pada rentang sudut 2θ dari 20° sampai 90° dengan logam target Cu $K\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Hasil karakterisasi dengan XRD adalah difraktogram yang dibandingkan dengan standart *Inorganic Crystak Structure Database* (ICSD). Pengolahan data yang diperoleh akan program *High Score*.

3.6.2 Karakterisasi SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-Ray Diffractometer*)

Karakterisasi SEM (HITACHI-SU3500) digunakan untuk mengetahui ukuran partikel, bentuk morfologi, dan struktur paduan Fe-Cr-Al. Sedangkan EDX digunakan untuk mengetahui komposisi serbuk pada lapisan Fe-Cr-Al. Sebelum sampel dimasukkan ke dalam SEM-EDX, sampel terlebih dahulu diletakkan pada holder. Kemudian pengamatan sampel dilakukan pada perbesaran 10, 20, 50, 100 dan 500 μm . Hasil karakterisasi SEM-EDX diolah menggunakan *software image-j* untuk mengetahui porositas yang ada pada paduan Fe-Cr-Al.

3.6.3 Uji Kekerasan

Uji kekerasan digunakan untuk mengetahui kekerasan pada paduan Fe-Cr-Al. Pengujian ini menggunakan *microhardness tester* LM 100 AT. Hasil yang diperoleh berupa data pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Uji Kekerasan

Sampel	HV			
	X ₁ (gf)	X ₂ (gf)	X ₃ (gf)	\bar{X} (gf)
FeCr				
FeCr-95Al-5				
FeCr-90Al-10				
FeCr-85Al-15				

3.6.4 Uji Densitas

Uji densitas digunakan untuk mengetahui nilai densitas pada paduan Fe-Cr-Al. Pengujian dilakukan pada udara terbuka dan di dalam air, masing-masing sampel ditimbang sebanyak 3 kali pengulangan untuk diambil nilai rata-rata. Hasil dari uji densitas berupa data yang tertera pada Tabel 3.4. Pada uji ini menggunakan hukum Bouyancy:

$$D = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \quad (3.1)$$

dimana D = densitas

W₁ = berat benda di udara

W₂ = berat benda di air

Tabel 3.4 Uji Densitas

Sampel	\bar{W}_{udara} (g/cm ³)	\bar{W}_{air} (g/cm ³)	D (g/cm ³)
FeCr			
FeCr-95Al-5			
FeCr-90Al-10			
FeCr-85Al-15			

3.6.5 Uji Ketahanan Oksidasi

Uji ketahanan oksidasi dilakukan pada suhu tinggi menggunakan Murffle Furnace (PPF-1300). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan oksidasi dari paduan Fe-Cr-Al. Sampel dan *crusibel* ditimbang menggunakan neraca digital untuk mengetahui massanya. Selanjutnya sampel diukur dimensinya menggunakan jangka sorong untuk mengetahui luas permukaan. *Crusibel* dipanaskan selama 1 jam untuk mengetahui massa antara *crusibel* sebelum dan sesudah dipanaskan. Pengujian dilakukan selama 10 siklus pada suhu 800 °C, dimana 1 siklus berlangsung selama 20 jam pemanasan dan pendinginan sampel dilakukan diudara terbuka selama 4 jam. *Crusibel* dengan sampel ditimbang kembali untuk mengetahui pertambahan massa setiap proses uji oksidasi. Hasil dari uji oksidasi ini berupa data setelah penimbangan sebanyak 3 kali untuk diambil nilai rata-rata. Data dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Pertambahan Massa Rata-Rata Pada Uji Oksidasi

Sampel	Dimensi	Berat Awal (g)	Berat (g) Siklus Ke											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
FeCr														
FeCr-95 Al-5														
FeCr-90 Al-10														
FeCr-85 Al-15														

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Preparasi Paduan Fe-Cr-Al

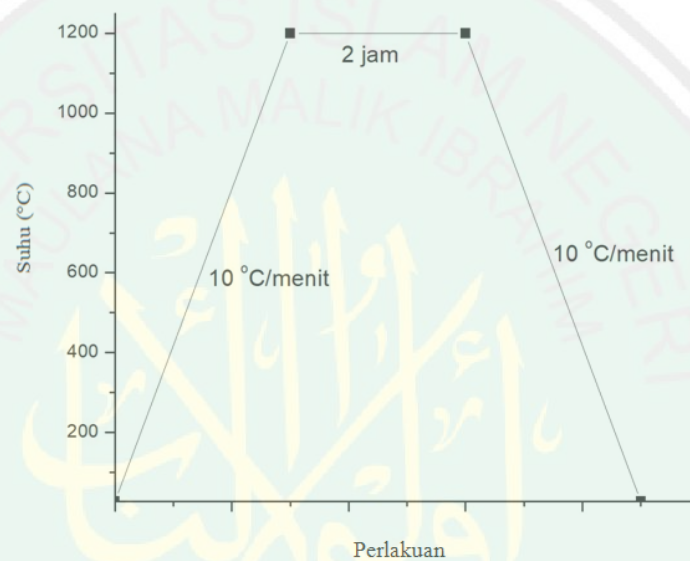
Penelitian logam paduan Fe-Cr-Al sebagai material tahan panas dilakukan pada bulan November 2018 sampai Januari 2019. Preparasi sampel dan karakterisasi dilakukan di Laboraturium High Resistant Material (HRM) Pusat Penelitian Fisika–Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F-LIPI) Kawasan Puspitek No. 441–442 Serpong, Tangerang Selatan.

Paduan Fe-Cr-Al dibuat dari bahan baku *ferrochrome lumps*(FeCr) yang ditambahkan dengan Aluminium (Al). Bongkahan *ferrochrome* ditumbuk dan diayak secara manual hingga menjadi serpih-serpihan kecil. FeCr yang lolos dari ayak kemudian di *milling* basah selama 6 jam. Kemudian serbuk dikeringkan diudara terbuka selama \pm 24 jam dan diayak dengan ukuran ayakan 200 mesh. Dihasilkan serbuk FeCr seperti pada Gambar 4.1. Serbuk Fe-Cr selanjutnya ditambahkan Al dan di *milling* selama 3 jam dengan variasi komposisi 95(FeCr)-5Al, 90(FeCr)-10Al dan 85(FeCr)-15Al.



Gambar 4.1 Serbuk FeCr

Serbuk paduan kemudian ditimbang massanya sebanyak 1,25 gram dan dikompaksi dengan daya tekan 8 ton selama 5 menit untuk menghasilkan pelet. Selanjutnya dilakukan proses *sintering* pada suhu 1200 °C dengan kenaikan suhu 10 °C/menit. Pemanasan dilakukan di dalam tungku *vacum* tubular. Kurva kenaikan temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.2.

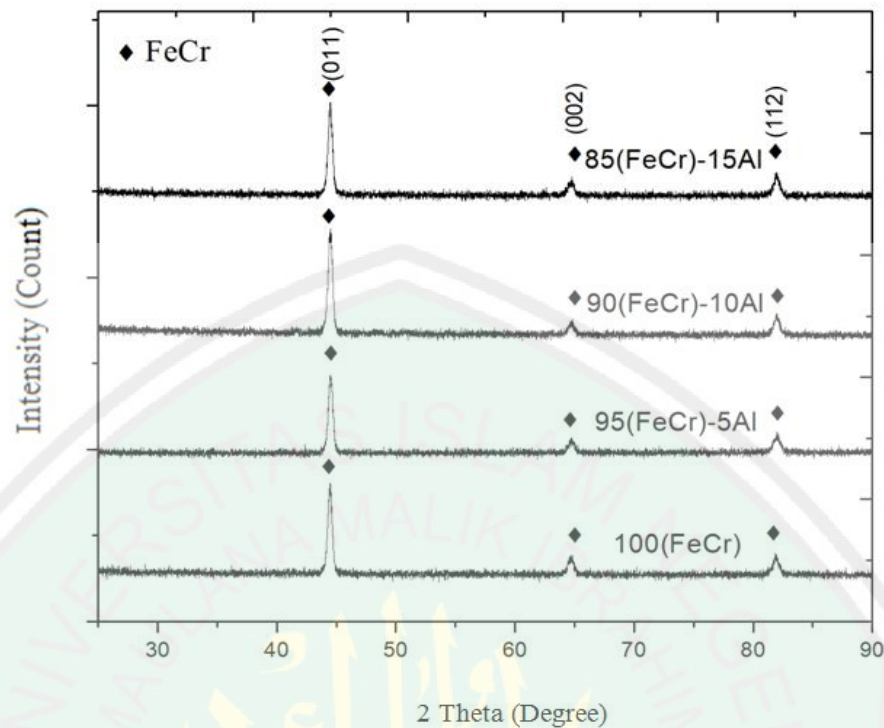


Gambar 4.2 Kurva Kenaikan Suhu

Sampel diampelas dengan kertas karbid dan dipoles menggunakan metal polish. Setelah itu, sampel dikarakterisasi dengan XRD dan SEM-EDX. Sampel diuji kekerasan, densitas dan oksidasi pada suhu tinggi.

4.1.2 Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD)

Sampel dikarakterisasi menggunakan XRD (Rigaku *Smartlab*) dengan panjang gelombang 1,541862 Å untuk mengetahui fasa-fasa yang terbentuk. Pola difraksi sinar-X ditampilkan pada Gambar 4.3. Data XRD sampel diolah dan dibandingkan dengan *International Crystallography Standard Data* (ICSD).



Gambar 4.3 Pola Difraksi Sinar-X

Gambar 4.3 menunjukkan pola XRD membentuk tiga puncak utama pada setiap sampel. Puncak terbentuk pada bidang hkl (011), (002), dan (112). Fasa yang terbentuk dari analisis data XRD adalah Fasa FeCr dengan struktur kubik. Puncak XRD mengalami pergeseran dan perbedaan intensitas (tinggi puncak) yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

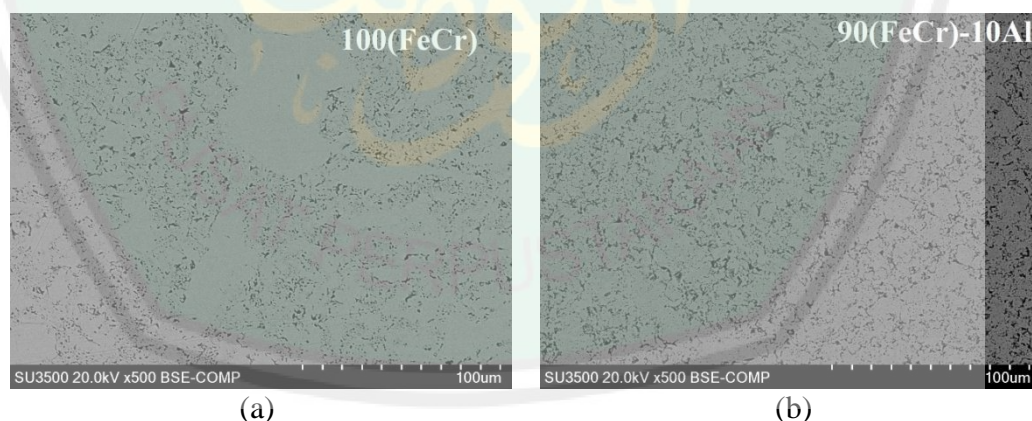
Tabel 4.1 Data Difraksi XRD Setiap Sampel

No	Sampel	2theta (011) (deg)	2theta (002) (deg)	2theta (112) (deg)	Intensitas (011) (count)
1	100(FeCr)	44,43	64,64	81,86	1580,42
2	95(FeCr)-5Al	44,48	64,75	81,91	1352,02
3	90(FeCr)-10Al	44,47	64,63	81,91	1697,03
4	85(FeCr)-15Al	44,46	64,80	81,93	1584,05

Nilai 2θ pada Tabel 4.1 mengalami perubahan pada setiap puncaknya. Penambahan logam Al menyebabkan Puncak XRD bergeser ke arah kanan (nilai yang lebih besar). Pergeseran berkurang saat konsentrasi Al ditingkatkan. Pergeseran puncak terjadi karena adanya cacat pada kristal. Data XRD menunjukkan perbedaan tinggi puncak pada setiap sampel pada bidang (011). Sampel 90(FeCr)-10A memiliki intensitas tertinggi dibandingkan dengan sampel yang lain. Perbedaan tinggi puncak mempengaruhi kualitas kristal yang terbentuk.

4.1.3 Karakterisasi Menggunakan SEM-EDX

Karakterisasi sampel menggunakan SEM dilakukan untuk mengetahui porositas sampel. Sedangkan EDX digunakan untuk mengetahui unsur penyusun dari paduan logam Fe-Cr-Al. Sampel yang diuji menggunakan SEM-EDX adalah 100(FeCr) dan 90(FeCr)-10Al. Hasil analisis SEM ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil Analisa Morfologi Permukaan Sampel (a) 100(FeCr) dan (b) 90(FeCr)-10Al

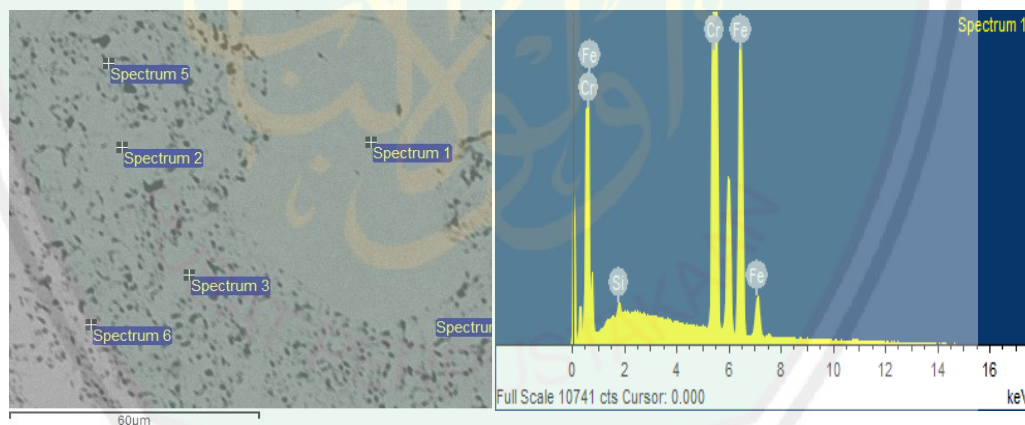
Gambar 4.4 menunjukkan bahwa sampel 100(FeCr) memiliki porositas yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel 90(FeCr)-10Al. Porositas pada sampel 90(FeCr)-10Al lebih banyak dibandingkan dengan sampel 100(FeCr). Estimasi

ukuran porositas dan persen luas porositas di analisis menggunakan *software* ImageJ. Hasil analisa ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Porositas dan % Area Porositas Sampel

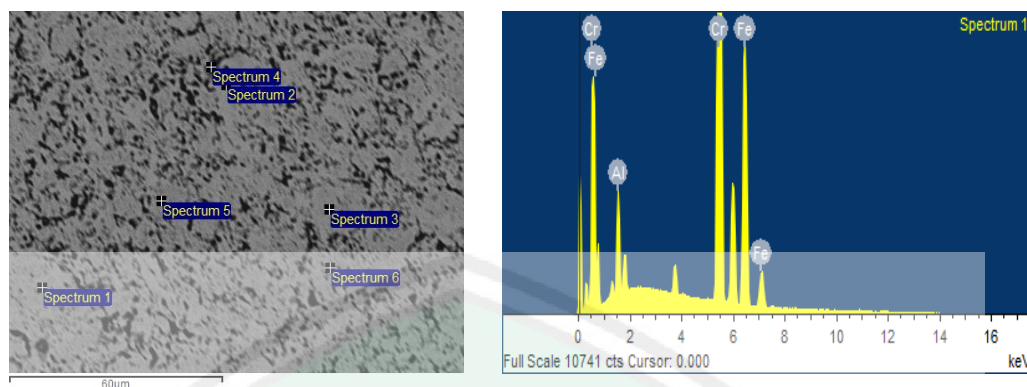
No.	Sampel	Rata – rata ukuran porositas(μm)	% area porositas
1	100(FeCr)	0,32	10,99
2	90(FeCr)-10Al	0,45	16,75

Komposisi logam paduan dapat dianalisis menggunakan SEM-EDX *point analysis*. Karakterisasi dilakukan di 6 titik pada sampel 100(FeCr) dan 90(FeCr)-10Al. Hasil analisis tersebut menunjukkan %at unsur yang menyusun logam paduan. Analisis poin pada sampel 100(FeCr) ditunjukkan pada Gambar 4.5 (a) dan sampel 90(FeCr)-10Al pada Gambar 4.5 (b)



Element	1	2	3	4	5	6
Cr K	72.72	71.80	71.59	71.16	71.70	71.25
Fe K	27.28	28.20	28.41	28.84	28.30	28.75

(a)



Element	1	2	3	4	5	6
Al K	7.41	0.59	10.38	27.69	3.57	6.08
Cr K	64.95	72.86	62.95	51.09	67.87	65.90
Fe K	27.63	26.55	26.67	21.22	28.56	28.02

(b)

Gambar 4.5 Mikrostruktur BSE-SEM dan EDX Point Analisis Pada Paduan (a) 100(FeCr) dan (b) 90(FeCr)-10Al.

Gambar 4.5 menunjukkan besarnya komposisi penyusun pada sampel 100(FeCr) dan 90(FeCr)-10Al. Hasil analisa pada sampel 100(FeCr) menunjukkan konsentrasi Cr pada semua poin sangat dominan. Hal tersebut menunjukkan partikel pada poin tersebut adalah Cr. Sampel 90(FeCr)-10Al memiliki konsentrasi Cr yang besar pada semua poin, menandakan bahwa partikel tersebut adalah milik Cr.

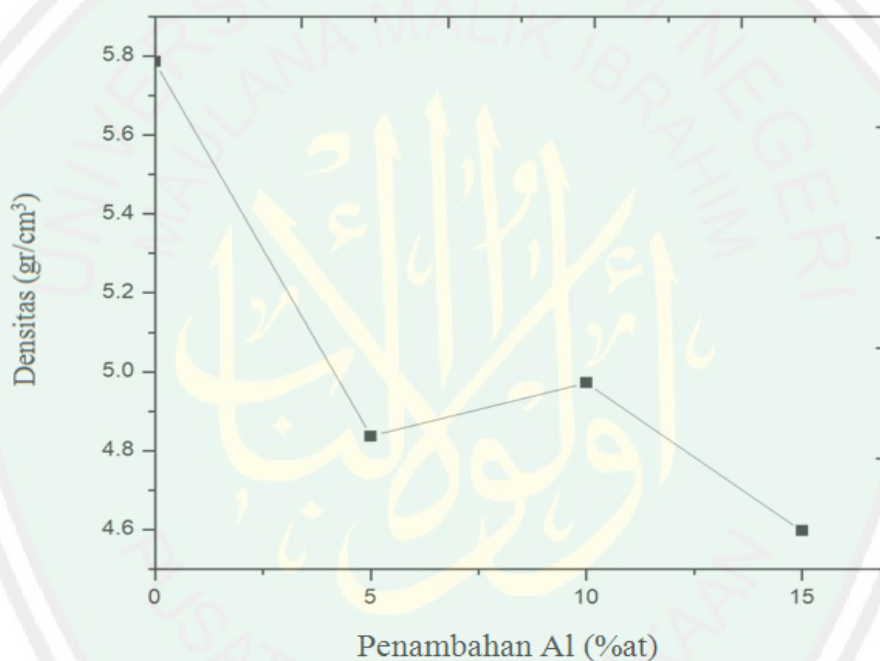
4.1.4 Pengujian Densitas

Uji Densitas dilakukan untuk mengetahui kerapatan pada sampel. Pengukuran densitas dilakukan menggunakan gabungan prinsip hukum archimedes dan hukum bouyancy. Hasil analisis diperlihatkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai Densitas Sampel Uji

No.	Sampel	Densitas (gr/cm ³)
1	100(FeCr)	5,786
2	95(FeCr)-5Al	4,837
3	90(FeCr)-10Al	4,972
4	85(FeCr)-15Al	4,597

Nilai densitas pada setiap sampel bervariasi. Penambahan Al menyebabkan penurunan densitas. Perbandingan nilai densitas setiap sampel dapat dilihat pada Gambar 4.6.

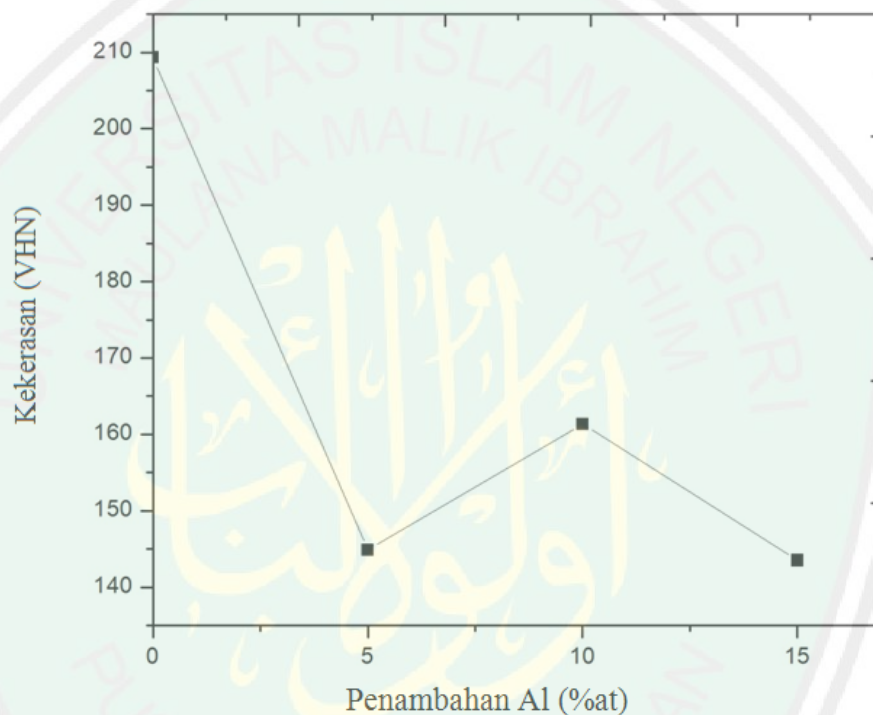


Gambar 4.6 Densitas FeCr Pada Variasi Penambahan Al

Sampel 100(FeCr) memiliki densitas tertinggi. Densitas cenderung menurun setelah (FeCr) dipadukan dengan logam Al. Nilai densitas dapat dilihat pada Tabel 4.3. Logam paduan 90(FeCr)-10Al memiliki nilai yang lebih tinggi daripada logam paduan 95(FeCr)-5Al dan 85(FeCr)-15Al. Densitas terendah yaitu 4,597 gr/cm³ pada sampel 85(FeCr)-15Al.

4.1.5 Pengujian Kekerasan

Kekerasan sampel diuji dan dianalisis menggunakan alat *Microhardness Tester* (LECO LM 100 AT). Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur Al terhadap tingkat kekerasan logam paduan. Hasil analisis ditampilkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Nilai Kekerasan FeCr dengan Penambahan Al

Gambar 4.7 Menunjukkan bahwa nilai kekerasan bervariasi setiap komposisi paduan. Nilai kekerasan tertinggi yaitu 209,35 VHN pada sampel tanpa penambahan Al. Sampel 90(FeCr)-10Al memiliki kekerasan yang lebih baik daripada sampel 95(FeCr)-5Al yaitu 161,36 VHN. Kekerasan terendah yaitu 143,53 VHN pada sampel 85(FeCr)-15Al. Sampel 95(FeCr)-5Al memiliki kekerasan sebesar 144,67 VHN.

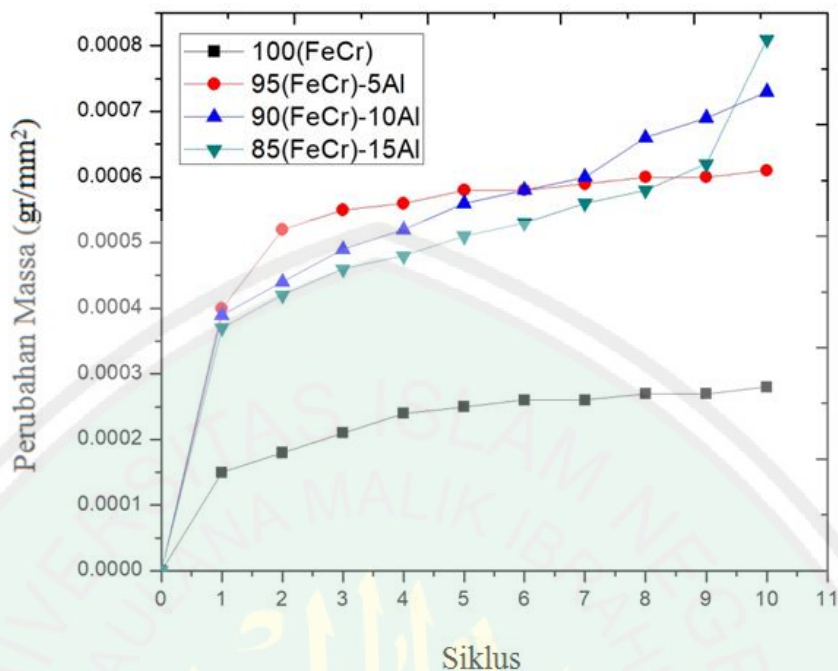
4.1.6 Pengujian Oksidasi Pada Suhu Tinggi

Uji oksidasi dilakukan menggunakan *muffle furnace* (PPF-1300). Oksidasi dilakukan pada suhu 800 °C selama 20 jam dan didinginkan pada suhu ruang selama 4 jam. Pengujian dilakukan berulang kali hingga sepuluh siklus. Pertambahan massa karena oksidasi dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perubahan Massa Sampel Karena Oksidasi

Siklus Ke-	Perubahan massa (gr/mm ²)			
	100(FeCr)	95(FeCr)-5Al	90(FeCr)-10Al	85(FeCr)-15Al
1	0,00015	0,00040	0,00039	0,00037
2	0,00018	0,00053	0,00044	0,00042
3	0,00021	0,00055	0,00049	0,00046
4	0,00024	0,00056	0,00052	0,00048
5	0,00025	0,00058	0,00056	0,00051
6	0,00026	0,00058	0,00058	0,00053
7	0,00026	0,00059	0,00060	0,00056
8	0,00027	0,00060	0,00066	0,00058
9	0,00027	0,00060	0,00069	0,00062
10	0,00028	0,00061	0,00073	0,00081

Perubahan massa pada sampel 100(FeCr) dan 95(FeCr)-5Al memiliki nilai yang tidak terlalu besar. sampel 85(FeCr)-15Al memiliki perubahan massa yang cukup besar terutama pada siklus kesepuluh. Perubahan massa lebih jelas ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Ketahanan Oksidasi Pada FeCr dengan Penambahan Al

Gambar 4.8 Menunjukkan ketahanan oksidasi dari setiap sampel. Grafik ketahanan oksidasi pada sampel membentuk kurva linier. Logam paduan (FeCr)-Al mengalami peningkatan massa yang lebih besar dari pada logam 100(FeCr) pada siklus pertama. Logam paduan dengan komposisi 95(FeCr)-5Al memiliki kenaikan massa yang lebih rendah daripada logam paduan 90(FeCr)-10Al dan 85(FeCr)-15Al. Pertambahan massa tertinggi pada sampel 85(FeCr)-15Al. Logam tersebut mengalami peningkatan massa yang tinggi pada siklus ke sebelas.

4.2 Pembahasan

Logam paduan dibuat dengan variasi komposisi 100(FeCr), 95(FeCr)-5Al, 90(FeCr)-10Al, dan 85(FeCr)-15Al. Logam dipanaskan selama 2 jam pada suhu 200 °C. Sampel dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM. Selain itu, sampel

diuji densitas, kekerasan menggunakan *Microhardness Tester*, dan uji oksidasi selama 10 siklus (240 jam).

Analisa data XRD menunjukkan terbentuk fasa FeCr dengan struktur kubik pada semua sampel. Penambahan logam Al pada paduan FeCr menyebabkan pergeseran puncak dan perbedaan intensitas pada sampel (Tabel 4.1). Sampel 90(FeCr)-10Al memiliki intensitas tertinggi yaitu 1697,03 count. Intensitas terendah yaitu pada sampel 95(FeCr)-5Al. Sampel 85(FeCr)-15Al memiliki intensitas yang lebih tinggi dari sampel 100(FeCr). Perbedaan intensitas menunjukkan kualitas kristal yang terbentuk. Menurut Husein (2015) semakin tinggi intensitasnya maka semakin kuat ikatan kristalnya. Penambahan Al menyebabkan puncak bergeser ke arah kanan (sudut yang lebih besar). Hal tersebut menandakan adanya penguapan pada sampel. Logam Al memiliki titik lebur ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan titik didih ($2452\text{ }^{\circ}\text{C}$) yang lebih rendah dari pada Cr dan Fe, sehingga memungkinkan terjadinya penguapan Al. Hal tersebut juga ditunjukkan dengan tidak terbentuknya senyawa Al pada puncak XRD. Penambahan konsentrasi Al yang semakin banyak mengurangi pergeseran puncak. Hal tersebut terjadi karena konsentrasi logam Al yang masih menyisip pada paduan.

Analisa data SEM menunjukkan bahwa ukuran porositas pada sampel 90(FeCr)-10Al lebih besar dibandingkan sampel 100(FeCr). Hasil analisa SEM-EDX menunjukkan bahwa unsur Cr memiliki konsentrasi tertinggi pada sampel 100(FeCr) dan 90(FeCr)-10Al. Unsur Al memiliki konsentrasi yang sangat rendah pada sampel 90(FeCr)-10Al. Hal tersebut terjadi karena adanya penguapan unsur Al pada sampel, sehingga porositas meningkat dan menyebabkan rendahnya unsur

Al pada paduan. Porositas dan unsur penyusun logam paduan akan mempengaruhi besar densitasnya.

Densitas tertinggi yaitu pada sampel 100(FeCr), saat dipadukan dengan logam Al densitasnya menurun. Densitas material dipengaruhi oleh berat atom penyusunya. Atom Al memiliki berat yang lebih ringan (26,98 amu) dibandingkan atom Cr (52,00 amu) dan Fe (55,85 amu), sehingga saat logam FeCr dipadukan dengan Al akan mengalami penurunan massa material. Besarnya densitas sebanding dengan besarnya massa benda. Semakin besar massa benda, maka densitasnya juga akan besar. Porositas logam paduan hasil analisis data SEM juga memengaruhi besarnya nilai densitas. Material yang memiliki porositas yang kecil dan sedikit volume yang lebih kecil. Densitas berbanding terbalik dengan volume benda. Semakin besar porositasnya maka densitasnya semakin kecil, sehingga nilai densitas FeCr lebih besar daripada 90(FeCr)-10Al. Sampel 90(FeCr)-10Al memiliki densitas yang lebih besar dibandingkan dengan sampel 95(FeCr)-5Al dan 85(FeCr)-15Al. Hal tersebut terjadi karena kristal 90(FeCr)-10Al lebih kuat dari pada sampel 95(FeCr)-5Al dan 85(FeCr)-15Al, ditandai dengan lebih tingginya puncak XRD pada sampel. Kristal yang baik menandakan kepadatan material yang baik. Besarnya densitas juga akan mempengaruhi tingkat kekerasan material.

Kekerasan material paduan ditunjukkan pada Gambar 4.7. Sampel 100(FeCr) memiliki nilai kekerasan tertinggi dibandingkan sampel yang dipadukan dengan Al. Hal tersebut terjadi karena Al memiliki sifat yang lebih ulet dibandingkan dengan Cr dan Fe, sehingga penambahan logam Al akan

menurunkan kekerasan material. Sampel dengan 10 %at logam Al memiliki kekerasan yang lebih baik daripada sampel 5 %at dan 15 %at. Hal tersebut terjadi karena kekerasan juga dipengaruhi oleh densitas benda. Semakin besar densitasnya, maka kekerasannya juga akan meningkat. Sampel 90(FeCr)-10Al pada uji densitas memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan logam 95(FeCr)-15Al dan 85(FeCr)-15Al.

Ketahanan oksidasi pada bahan ditampilkan pada Gambar 4.8. Kurva yang terbentuk dari hasil uji ketahanan oksidasi adalah kurva linier. Kurva tersebut menandakan ketahanan oksidasi yang baik, protektif dan menandakan pertambahan massa yang tidak konsisten. Pertambahan Massa semakin berkurang pada siklus selanjutnya. Hal tersebut menandakan terbentuknya lapisan oksida yang menghambat oksidasi lanjutan pada sampel. Oksidasi merupakan peristiwa berikatannya oksigen dengan unsur lain. Sehingga oksidasi akan menyebabkan peningkatan massa dan dapat menurunkan kualitas material tersebut. Paduan 95(FeCr)-5Al dan 100(FeCr) memiliki ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan paduan 90(FeCr)-10Al dan 85(FeCr)-15Al. Hal tersebut terjadi karena paduan memiliki konsentrasi Cr yang lebih banyak. Cr membentuk lapisan kromium oksida pada permukaan material dan melindungi sampel dari oksidasi lanjutan. Al juga dapat membentuk lapisan oksida, tetapi konsentrasi Al berkurang karena penguapan, sehingga tidak terbentuk lapisan aluminium oksida.

Pada penelitian ini memanfaatkan besi sebagai material tahan panas. Al-qur'an memberikan contoh pemanfaatan besi pada kisah Nabi Daud as. Firman

Allah SWT dalam surat Al-Anbiyaa' ayat 80 tentang proses pembentukan suatu produk atau barang:

وَعَلَّمْنَاهُ صَنْعَةَ لَبُوسٍ لَكُمْ لِتُحْصِنَكُمْ مِنْ بَأْسِكُمْ ۖ فَهَلْ أَنْتُمْ شَاكِرُونَ ﴿٨٠﴾

Artinya: “Dan telah kami ajarkan kepada Dawud membuat baju besi untukmu, guna memeliharamu dalam peperangan, Maka hendaklah kamu bersyukur (kepada Allah)” (Q.S Al-Anbiyaa' [21]: 80).

Allah SWT berfirman وَعَلَّمْنَاهُ صَنْعَةَ لَبُوسٍ لَكُمْ “Dan telah kami ajarkan kepada Dawud membuat baju besi untukmu” yakni membuat baju besi dengan dilunakkannya besi baginya. Menurut orang-orang Arab, *al-labuus* adalah semua jenis senjata, baik itu perisai, baju besi, pedang maupun tombak. Adapun yang dimaksud Allah pada ayat ini yang bermakna *al malbuus* (yang dikenakan) seperti pola kata *ar-rukuub* dan *al-huluub* (Al-Qurthubi, 2008).

Qatadah mengatakan, “Yang pertama kali membuat baju besi adalah Dawud, dan itu berupa lempengan-lempengan. Dialah yang pertama kali melingkarkan dan mengenakannya. لِيُحْصِنَكُمْ “guna memelihara kamu” yakni melindungi kamu, فَهَلْ أَنْتُمْ “dalam peperangan” yakni *min harbikum* (dalam peperanganmu).

شَاكِرُونَ “Maka hendaklah kamu bersyukur (kepada Allah)” yakni atas penganugerahan nikmat pembuatan perisai bagi kalian (Al-Qurthubi, 2008).

Ilmu mengenai paduan logam diajarkan untuk mendapatkan manfaat dalam kehidupan sehari-hari. Surat Al-Hadid ayat 25 menjelaskan tentang adanya tambahan tembaga pada besi. Ilmu pengetahuan modern saat ini, dapat membuat

suatu produk logam (besi) yang dipadukan dengan unsur-unsur lain untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu:

1. Penambahan Aluminium pada FeCr menghasilkan paduan Fe-Cr-Al. Hasil XRD menunjukkan bahwa senyawa yang terbentuk adalah Fe-Cr. Aluminium dapat mempengaruhi perubahan karakteristik paduan dan menyebabkan perubahan intensitas. SEM-EDX menunjukkan bahwa porositas terbesar terjadi karena penambahan Al. Nilai densitas dan kekerasan tertinggi pada paduan 100(FeCr) yaitu $5,786 \text{ g/cm}^3$ dan 209,35 HVN.
2. Penambahan Aluminium pada FeCr dapat mempengaruhi ketahanan oksidasi pada paduan Fe-Cr-Al. Sampel yang memiliki ketahanan oksidasi tertinggi adalah 100(FeCr) dan 95(FeCr)-5Al

5.2 Saran

Penelitian ini masih perlu dikembangkan dengan cara menemukan variasi komposisi yang lebih tepat, sehingga ditemukan logam paduan Fe-Cr-Al yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, 2003. *Lubaabut Tafsir Min Ibni Katsiir*. Jakarta: Pustaka Imam Asy-Syafi'i.
- Aghili, S., Enayati, M., dan Karimzadeh, F. 2012. Synthesis of Nanocrystalline (Fe,Cr)₃Al Powder by Mechanical Alloying. *Materials and Manufacturing Process*. 27: 647-471.
- Airiskallio, E., Nurmi E., Heinonen, M., Vayrymen, I., Kokko, K., Ropo, M., Punkkinen, M., Pitkanen, H., Alatalo, M., Kollar, J., Johanson, B., dan Vitos, L. 2010. High Temperature Oxidation of Fe-Al and Fe-Cr-Al Alloy: The Role of Cr as a Chemically Active Element. *Corrosion Science*. 52: 3394-3404.
- Alim, Istajarul, M., Firdausi, A., Nurmalasari, Muthia Diah. 2017. Densitas dan Porositas Batuan. *Laporan Praktikum Laboraturium Fisika Material*. 1-3.
- Al-Mangour, Bandar. 2015. *Powder Metallurgy of Stainless Steel: State of The Art, Challenges, and Development*.
- Al-Qur'an Al-Karim. 2010. *Al-Qur'an dan Terjemahnya*. Departemen Agama Republik Indonesia Al-Hikmah. Bandung: Diponegoro.
- As-Shiddieqy, Teungku Muhammad Hasbi. 2000. *Tafsir Al-Qur'anul Majid An-Nuur*. Semarang: Pustaka Rizki Putra.
- Callister, D. William. 2014. *Material Science and Engineering*. USA: Willy.
- Ciswandi. 2006. Analisis Struktur Lapisan Fe-Cr-Al yang Dideposisikan Pada Baja Karbon Rendah Menggunakan Teknik Pemaduan Mekanik. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.
- El-Naggar, Dr. Zaghoul. 2010. *Selekta dari Tafsir Ayat - Ayat Kosmos dalam Al-Qur'an Al-Karim Jilid 3*. Jakarta: Shorouk International Bookshop.
- Geanta, V., Voiculescu, I., Stefanoiu, R., dan Jianu, A. 2011. Researches Regarding The Chemical Composition Influence on The Microhardness of FeCrAl Alloys. *Metalurgia International*. XVI (1).
- Giggins. 2014. Oxidation of Ni-Cr-Al Alloys Between 1000 and 1200 °C. *J.Electrochem.Soc*. 118: 1782-1790.

- Ginting, Yan Putra Kelana. 2018. Efek Penambahan Silikon Terhadap Struktur dan Ketahanan Oksidasi Paduan Fe-Cr-Al. *Skripsi*. Universitas Sumatera Utara.
- Gulbransen, E., dan Andrew, K. 2015. Oxidation Studies on The Iron-Chromium-Aluminum Heater Alloys. *Research Laboratories*. 106(4).
- Hermansyah, Hafid, A., dan Prayudie, Untung. 2009. Pengaruh Komposisi Bahan dan Suhu Sintering Pada Pembuatan Magnet Permanen Neodibium (NdFeB) dengan Proses Metalurgi Serbuk. *Jurnal Riset Industri*. 3(1): 75-85.
- Hitly, D. C., Forgeng W. D., Folkman R. L. 1955. Oxygen Solubility and Oxide Phases in The Fe-Cr-O System. *Journal of The Mineral, Metals and Materials Society*. 7(2): 253-268.
- Husain, H., Risal, M., Sujiono, Eko Hadi. 2015. Struktur Kristal dan Konduktivitas Paduan Oksida $Nd_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_7$ yang Disintesis dengan Metode Reaksi Padatan. *Jurnal Sainsmat*. 4(1): 1-6.
- Imani, Allamah Kamal Faqih. 2005. *Tafsir Nurul Qur'an*. Jakarta: Al-Huda.
- Joko, Wahyu. 2016. *Laporan Praktikum Bouyancy*. <https://deadlinemahasiswa.blogspot.com/2016/10/laporanpraktikumbouyancy.html>. 15 Maret 2019.
- Kambali, I., Sujitno, T., dan Kusnanto. 2003. Efek Implantasi Vitrium dan Cerium Terhadap Sifat Ketahanan Oksidasi Material FeNiCr Selama Siklus Termal. *Jurnal Radio Isotop dan Radio Formaka*. 6(1): 26-40.
- Kartikasari, Ratna. 2009. Studi Pengaruh Temperatur Temper Terhadap Sifat Mekanik dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-1,2Al-1,05C. *Media Mesin*. 10(1): 22-29.
- Kumayasari, Magdalena Feby dan Arif Indro Sultoni. 2017. Studi Uji Kekerasan Rockwell Superficial VS Micro Vickers. *Jurnal Teknologi Proses dan Inovasi Industri*. 2(2): 85-89.
- Mouritz, Andrian P. 2012. *Introduction to Aeroscope Material*. New Dehli: Woodhead Publishing.
- Mulyono, Agus dan Ahmad Abtokhi. 2006. *Fisika dan Al-Qur'an*. Malang: UIN Malang Press.
- Niemela, P., and Kauppi, M. 2007. Production, Characteristics and Use of Ferrochromium Slags. In: Infacon XI, New Delhi, India: 171-179.

- Pavlyuchkov, D. 2014. Al-Cr-Fe Phase Diagram Isothermal Section in The Region Above 30 at% Al. *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagram and Thermochemistry*. 45: 194-203.
- Prawira. 2016. *Metalurgi dan Islam*. <http://metalurgi-islam.blogspot.com/2016/01/metalurgi-dan-islam.html>. 21 April 2019.
- Ramlan, dan Bama, Ahmad Aminudin. 2011. Pengaruh Suhu dan Waktu Sintering Terhadap Sifat Bahan Porselen Untuk Bahan Elektrolit Padat (Komponen Elektronik). *Jurnal Penelitian Sains*. 14(3): 22-25.
- Rusianto, Toto. 2009. Hot Pressing Metalurgi Serbuk Aluminium Dengan Variasi Suhu Pemanasan. *Jurnal Teknologi*. 2(1): 89-95.
- Sarimai, Ratnawulan, Ramli, dan Fauzi, Ahmad. 2016. Pengaruh Waktu Milling Terhadap dan Ukuran Butir Forsterite (Mg_2SiO_4) Mineral Serpetin dari Kabupaten Solok Selatan. *Pillar of Physics*. 8: 65-72.
- Shingerling. 2015. *Mineral Yearbook: Ferroalloys*. U.S: USGS.
- Silalahi, Marzuki, Pudji Untoro, Bambang Suharno, dan Sri Harjanto. 2014. Pengaruh Jenis Paduan Mikro Fe-Cr Hasil Metode Ultrasonik Pada Pembentukan Bongkah Paduan Fe-Cr Melalui Sintering Dua Tahap. *Jurnal Sains Material Indonesia*. 15(3): 158-165.
- Stott, F., Wood, G., dan Hobby, M. G. 1971. A Comparison of The Oxidation Behavior of Fe-Cr-Al, Ni-Cr-Al, and Co-Cr-Al. *Oxidation of Metals*. 3(2): 103-113.
- Sudjatmoko. 2009. Pengaruh Penambahan Suatu Elemen Reaktif Pada Pertumbuhan Kerak Alumina dalam Material Paduan Suhu Tinggi. *J. Iptek Nuklir Ganendra*. 12(2): 50-58.
- Sujatno, Agus. 2015. Studi Scanning Elektron Microscopy (SEM) untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*. 9: 44-50.
- Sumadiyasa, M., I B. S. Manuaba. 2018. Penentuan Ukuran Kristal Menggunakan Formula Scherrer, Williamson-Hull Plot dan Ukuran Partikel SEM. *Buletin Fisika*. 19(1): 28-35.
- Suwanda, Totok. 2006. Optimalisasi Tekanan Kompaksi, Temperatur, dan Waktu Sintering Terhadap Kekerasan dan Berat Jenis Aluminium Pada Proses Pencetakan dengan Metalurgi Serbuk. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknikal*. 9: 187-198.

- Tjahjono, Arif. 2013. *Fisika Logam dan Alloy*. Jakarta: UIN Jakarta Press.
- Tristiana, Ade Lia. 2016. Struktur Mikro dan Konduktivitas Listrik Keramik Cordierite dengan Penambahan Magnesium Oksida (0, 10, 15 wt%) Berbasis Silika Sekam Padi. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Unocic, K., Yamamoto, Y., dan Pint, B. 2017. Effect of Al and Cr Content on Air and Steam Oxidation of FeCrAl Alloys and Commercial APMT Alloy. *Original Paper*. DOI 10.1007/s1108-017-9745-1.
- Virtajaya, Angga Roby. 2017. Perilaku Oksidasi Uap Air Baja Cr-Mo-Ni Melalui Pelapisan Al. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Wijayanto, Sanjaya Okky, A. P Bayuseno. 2014. Analisis Kegagalan Material Pipa Ferrule Nickel Alloy N06025 Pada Waste Heat Boiler Akibat Suhu Tinggi Berdasarkan Pengujian: Mikrografi dan Kekerasan. *Jurnal Teknik Mesin SI*. 2(1): 33-39.
- Winarto, Andi Tri. 2010. *Hukum Archimedes (Hukum Pengapungan)*. <http://andyjeparas.Blogspot.com/2010/04/hukum-archimedes-hukum-pengapungan.html>. 01 Agustus 2019
- Yafie, Safrudin, M., dan Widyastuti. 2014. Pengaruh Variasi Temperatur Sintering dan Waktu Tahan Sintering Terhadap Densitas dan Kekerasan Pada Mmc W-Cu Melalui Proses Metalurgi Serbuk. *Jurnal Teknik Pomits*. 3(1): F44-F49.
- Yudi, D. 2013. *Pemilihan Material Tahan Panas*. <https://yudiprasetyo53.wordpress.com/2013/02/23/pemilihan-material-tahan-panas.html>. 01 Agustus 2019.
- Young, Hugh D. dan Freedman. 2002. *Fisika Universitas Edisi Sepuluh Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Zhang, Z., Gesmundo, F., Hou, P., dan Niu. 2006. Criteria for The Formation of Protective Al₂O₃ Scales on Fe-Al and Fe-Cr-Al Alloys. *Corrosion Science*. 48: 741-765.

Lampiran 1 Hasil Karakterisasi XRD(X-Ray Diffraction)

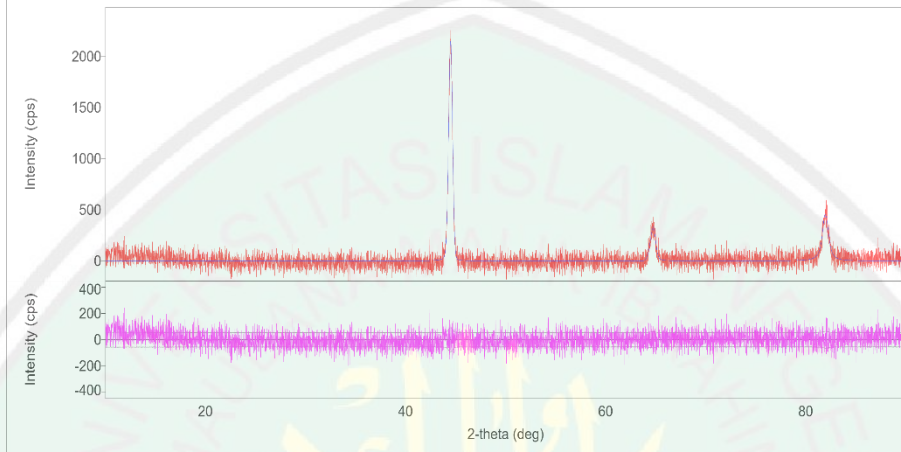
1. (100)FeCr



No.	2-theta (deg)	d (ang.)	Height (cps)	FWHM (deg)	Int. I (cps deg)	Size (ang.)
1	44.433(6)	2.0372(3)	1702(65)	0.422(5)	793(10)	213(2)
2	64.64(3)	1.4407(6)	321(28)	0.55(3)	201(9)	179(8)
3	81.86(3)	1.1758(3)	414(32)	0.48(6)	353(9)	227(27)

2. 95(FeCr)-5Al

FeCrAl1.ras					
Sample name	: 0301 FeCrAl1	Scan mode	: STEP	Incident slit	: 1.000mm
Comment	:	Scan speed / Duration time	: 0.4000	Length limiting slit	: 2.0mm
Date	: 2019/01/10 10:32:21	Step width	: 0.0100 deg	Receiving slit # 1	: 20.000mm
Operator	: administrator	Scan axis	: 2 Theta/Omega	Filter	: None
Analysis date	: 2019/01/10 11:37:24	Scan range	: 10.0000 - 90.0000 deg	Receiving optical device	: PSA_0.5deg
Analyst	: administrator	2-Theta	: 10.0000 deg	Receiving parallel slit	: Soller_slit_5.0deg
X ray	: CuK α / 15.41862 Å	Omega	: 5.0000 deg	Receiving slit # 2	: 20.000mm
Wavelength	: CuK α / 1.541862 Å	Chi	:	Attenuator	: 1/10000
Generator	: SmartLab(In-plane)	Phi	: 0.0000 deg	Diffraction beam mono.	: None
Base att. config.	: Z Phi Stage	2 Theta/Chi	: 0.0000 deg	Monochromator slit	: None
Attachment	: Raky	CB0 selection slit	: P3	Optics attribute	:
Detector	: SC-70	Incident parallel slit	: Soller_slit_5.0deg		
Motor	: PE				

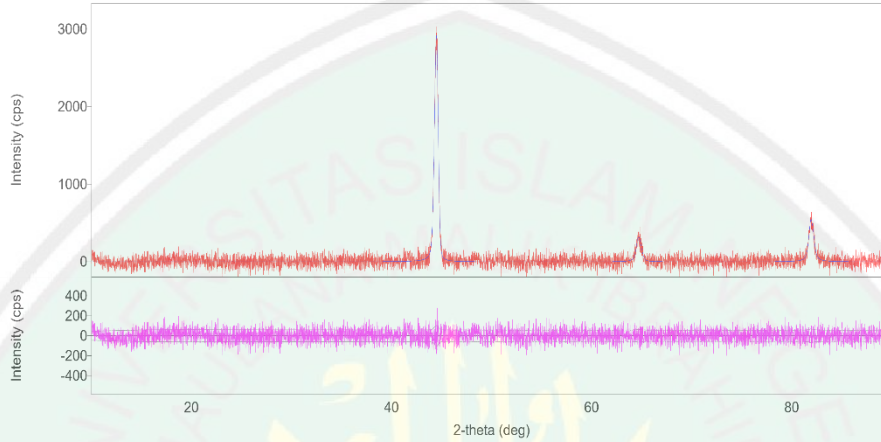


No.	2-theta	d	Height	FWHM	Int. I	Size
	(deg)	(ang.)	(cps)	(deg)	(cps deg)	(ang.)
1	44.478(7)	2.0353(3)	1500(61)	0.440(5)	738(9)	204(2)
2	64.75(5)	1.4386(9)	234(24)	0.59(4)	160(10)	167(11)
3	81.91(5)	1.1752(6)	345(29)	0.61(5)	315(11)	181(14)

3. 90(FeCr)-10Al

FeCrAl2.ras

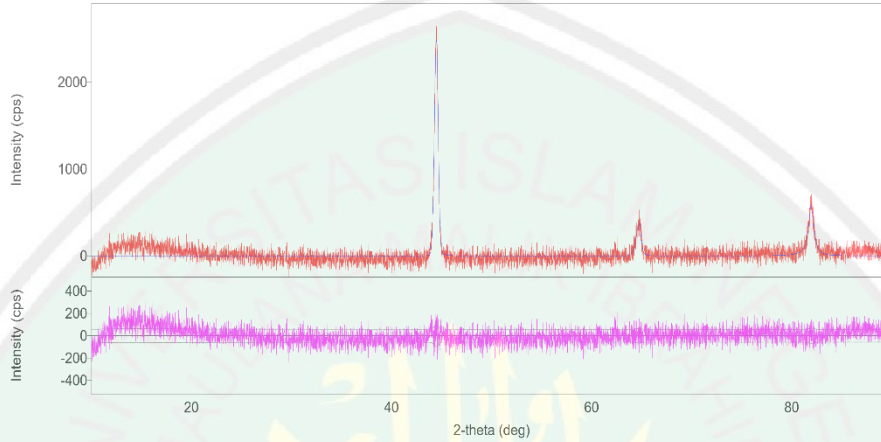
Sample name	: FeCrAl2	Scan mode	: STEP	Incident slit	: 1.000mm
Comment	:	Scan speed / Duration time	: 0.4000	Length limiting slit	: 2.0mm
Date	: 2018/12/21 08:49:15	Step width	: 0.0100 deg	Receiving slit # 1	: 20.000mm
Operator	: administrator	Scan axis	: 2 Theta/Omega	Filter	: None
Analysis date	: 2018/12/21 10:00:53	Scan range	: 10.0000 - 90.0000 deg	Receiving optical device	: PSA_0.5deg
Analyst	: administrator	2-Theta	: 10.0000 deg	Receiving parallel slit	: Soller_slit_5.0deg
X ray	: CuK α / 15.41862 Å	Omega	: 5.0000 deg	Receiving slit # 2	: 20.000mm
Wavelength	: CuK α / 1.541862 Å	Chi	:	Attenuator	: 1/10000
Goniometer	: SmartLab(In-plane)	Phi	: 0.0000 deg	Diffraction beam mono.	: None
Base att. config.	: Z Phi Stage	2 ThetaChi	: 0.0000 deg	Monochromator slit	: None
Attachment	: Raky	CB0 selection slit	: P3	Optics attribute	:
Detector	: SC-70	Incident parallel slit	: Soller_slit_5.0deg		
Memo	: PE				



No.	2-theta (deg)	d (ang.)	Height (cps)	FWHM (deg)	Int. I (cps deg)	Size (ang.)
1	44.470(6)	2.0356(3)	2037(71)	0.425(5)	1038(10)	211(2)
2	64.63(5)	1.4410(10)	231(24)	0.53(4)	160(9)	185(14)
3	81.91(3)	1.1752(3)	430(33)	0.47(3)	280(9)	236(17)

4. 85(FeCr)-15Al

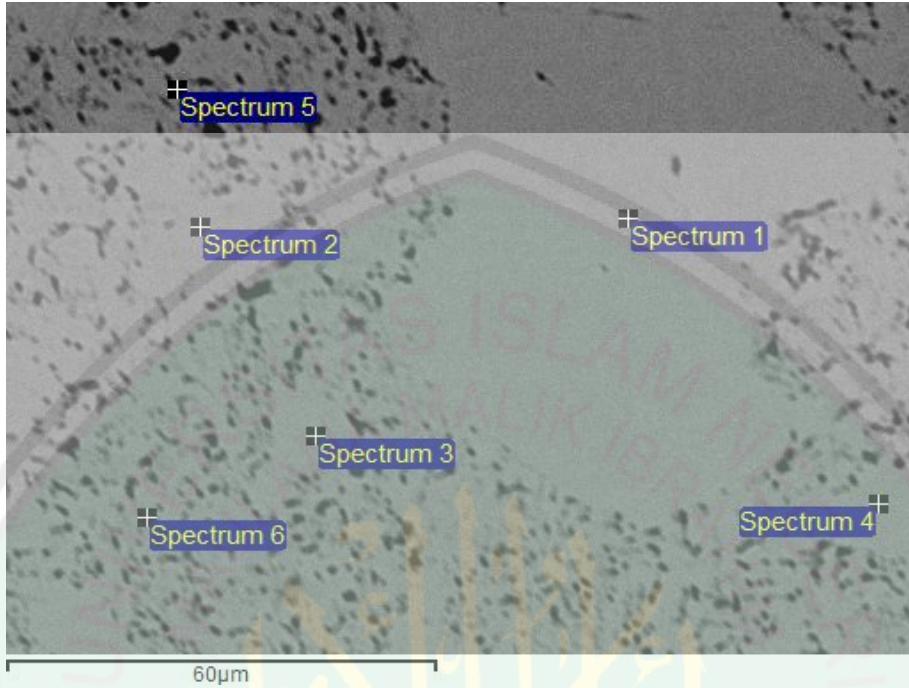
FeCrAl3.ras					
Sample name	: FeCrAl3	Scan mode	: STEP	Incident slit	: 1.000mm
Comment	:	Scan speed / Duration time	: 0.4000	Length limiting slit	: 2.0mm
Date	: 2018/12/21 10:00:32	Step width	: 0.0100 deg	Receiving slit # 1	: 20.000mm
Operator	: administrator	Scan axis	: 2 Theta/Omega	Filter	: None
Analysis date	: 2018/12/21 13:20:13	Scan range	: 10.0000 - 90.0000 deg	Receiving optical device	: PSA_0.5deg
Analyst	: administrator	2-Theta	: 10.0000 deg	Receiving parallel slit	: Solter_slit_5.0deg
X ray	: CuKα / 15.41862 Å	Omega	: 5.0000 deg	Receiving slit # 2	: 20.000mm
Wavelength	: CuKα / 1.541862 Å	Chi	:	Attenuator	: 1/10000
Goniometer	: SmartLab(In-plane)	Phi	: 0.0000 deg	Diffraacted beam mono.	: None
Base att. config.	: 2 Phi Stage	2 ThetaChi	: 0.0000 deg	Monochromator slit	: None
Attachment	: Ruby	CB0 selection slit	: P3	Optics attribute	:
Detector	: SC-70	Incident parallel slit	: Solter_slit_5.0deg		
Memo	: PE				



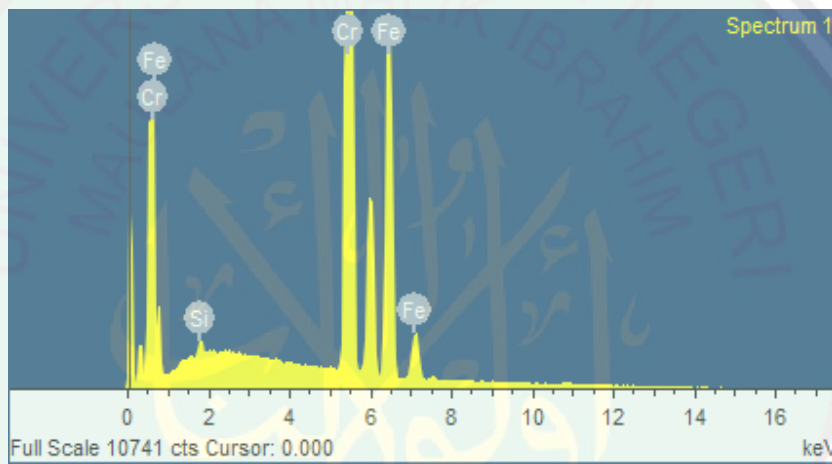
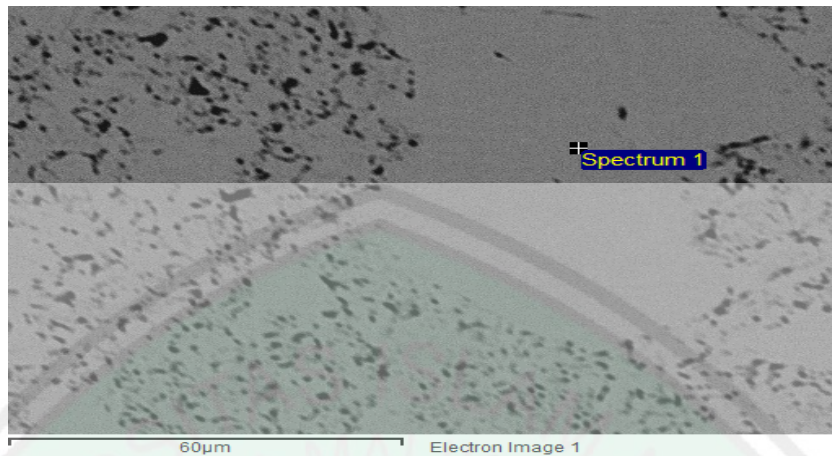
No.	2-theta	d	Height	FWHM	Int. I	Size
	(deg)	(ang.)	(cps)	(deg)	(cps deg)	(ang.)
1	44.464(7)	2.0359(3)	1731(66)	0.426(5)	809(10)	210(2)
2	64.80(4)	1.4376(7)	265(26)	0.54(4)	167(9)	181(12)
3	81.93(2)	1.1750(3)	448(33)	0.50(5)	375(9)	220(21)

Lampiran 2 Hasil Karakterisasi SEM-EDX

1. 100(FeCr)



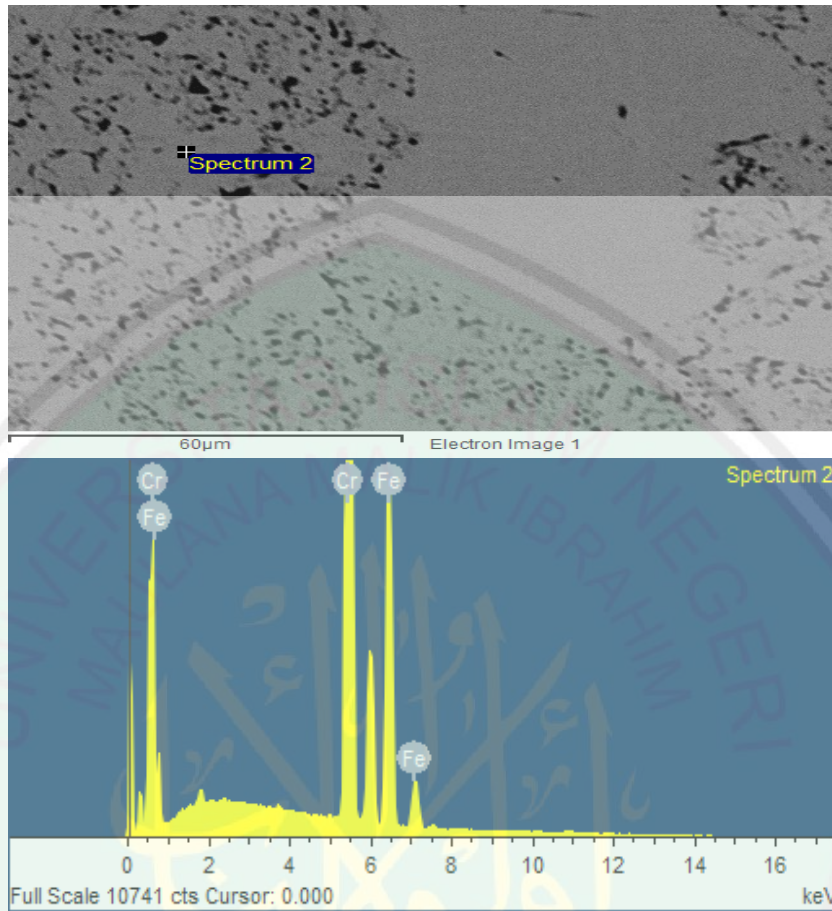
Spectrum 1



Peaks possibly omitted : 0.266, 7.472, 10.830, 11.398 keV

Element	Weight %	Atomic %
Si K	0.33	0.62
Cr K	71.04	72.26
Fe K	28.63	27.11
Totals	100.00	

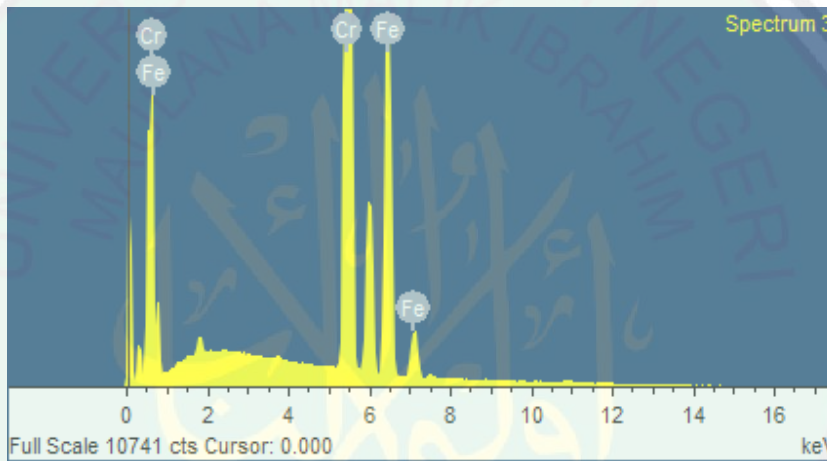
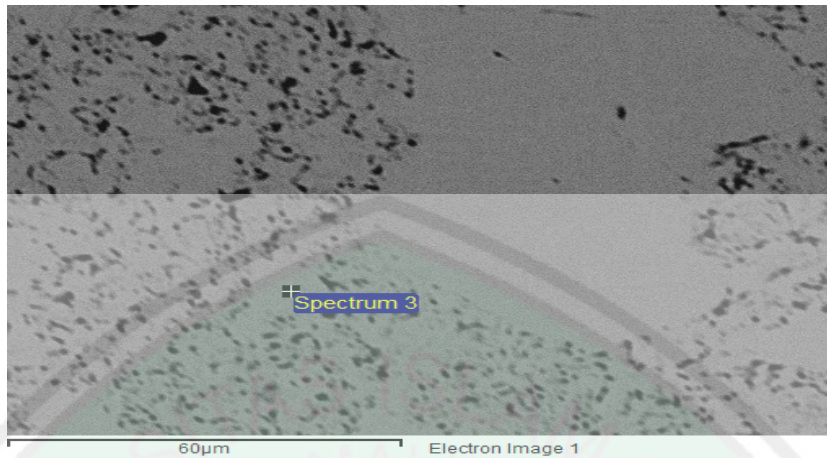
Spectrum 2



Peaks possibly omitted : 0.266, 1.748, 3.670, 7.469, 10.839, 11.379, 11.829, 14.320 keV

Element	Weight %	Atomic %
Cr K	70.33	71.80
Fe K	29.67	28.20
Totals	100.00	

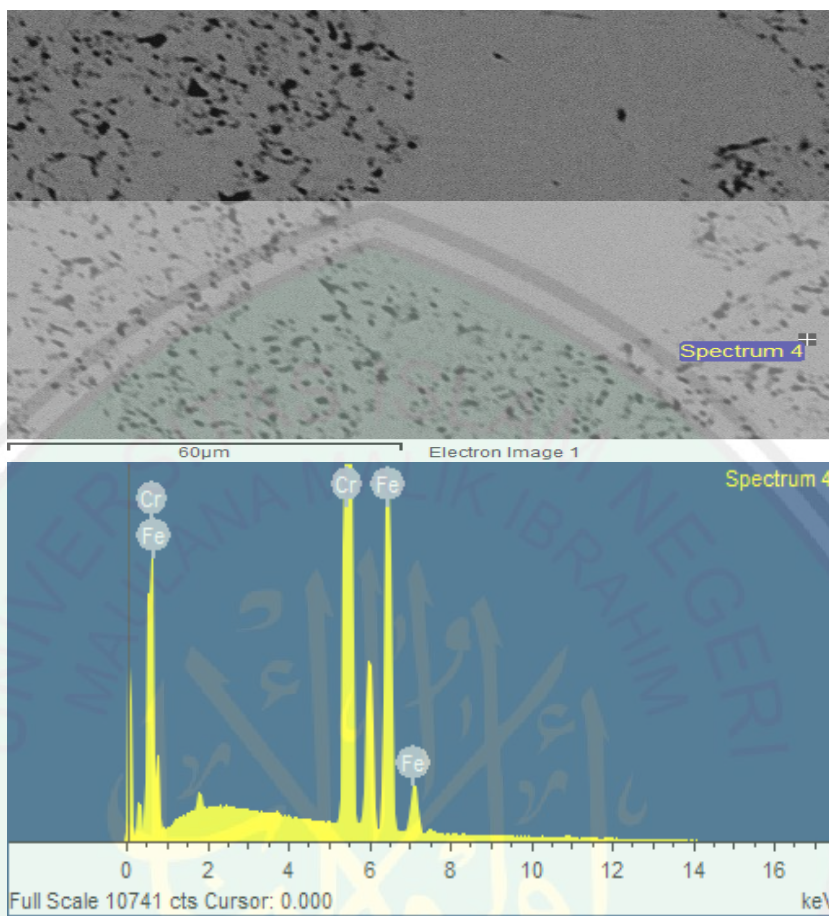
Spectrum 3



Peaks possibly omitted : 0.265, 1.750, 3.680, 7.477, 10.849, 11.840 keV

Element	Weight %	Atomic %
Cr K	70.12	71.59
Fe K	29.88	28.41
Totals	100.00	

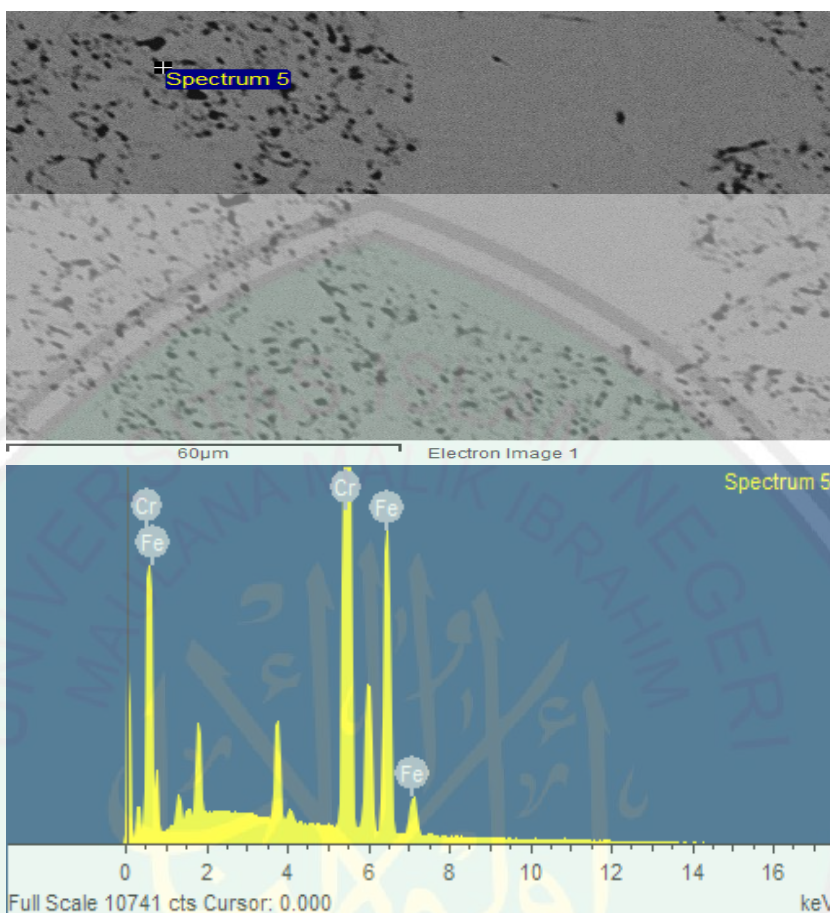
Spectrum 4



Peaks possibly omitted : 0.266, 1.745, 2.400, 3.659, 7.463, 10.835, 11.812 keV

Element	Weight %	Atomic %
Cr K	69.67	71.16
Fe K	30.33	28.84
Totals	100.00	

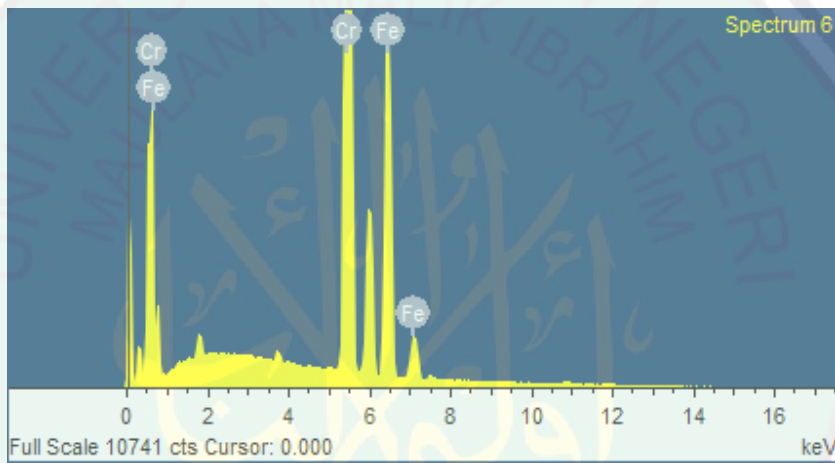
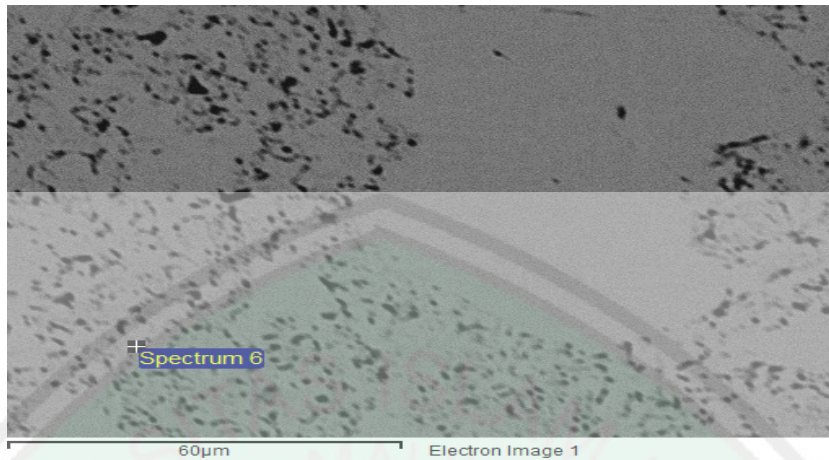
Spectrum 5



Peaks possibly omitted : 0.266, 1.258, 1.491, 1.743, 3.696, 4.015, 7.469, 10.811, 11.831 keV

Element	Weight %	Atomic %
Cr K	70.23	71.70
Fe K	29.77	28.30
Totals	100.00	

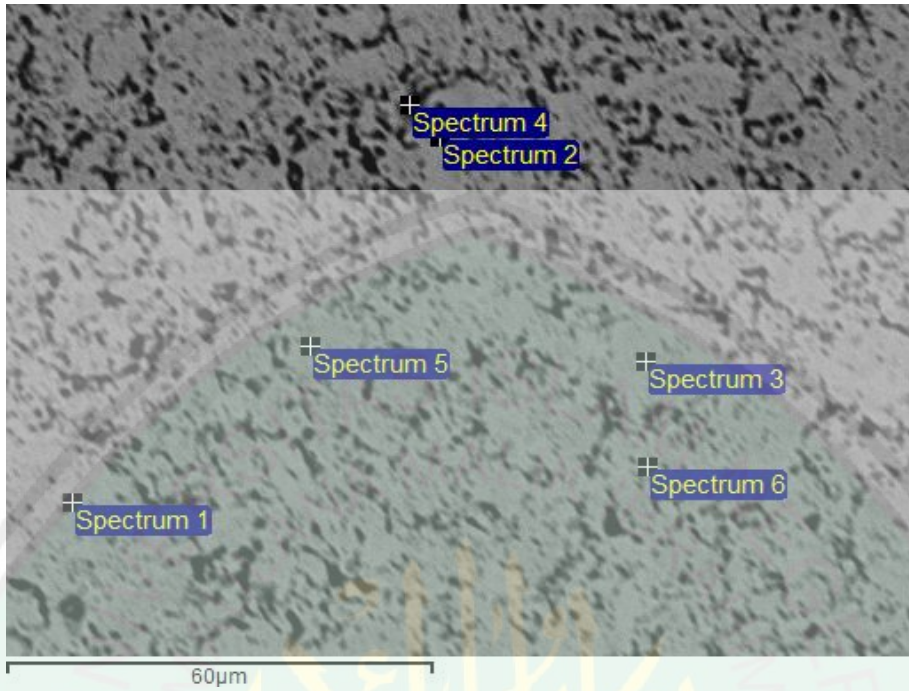
Spectrum 6



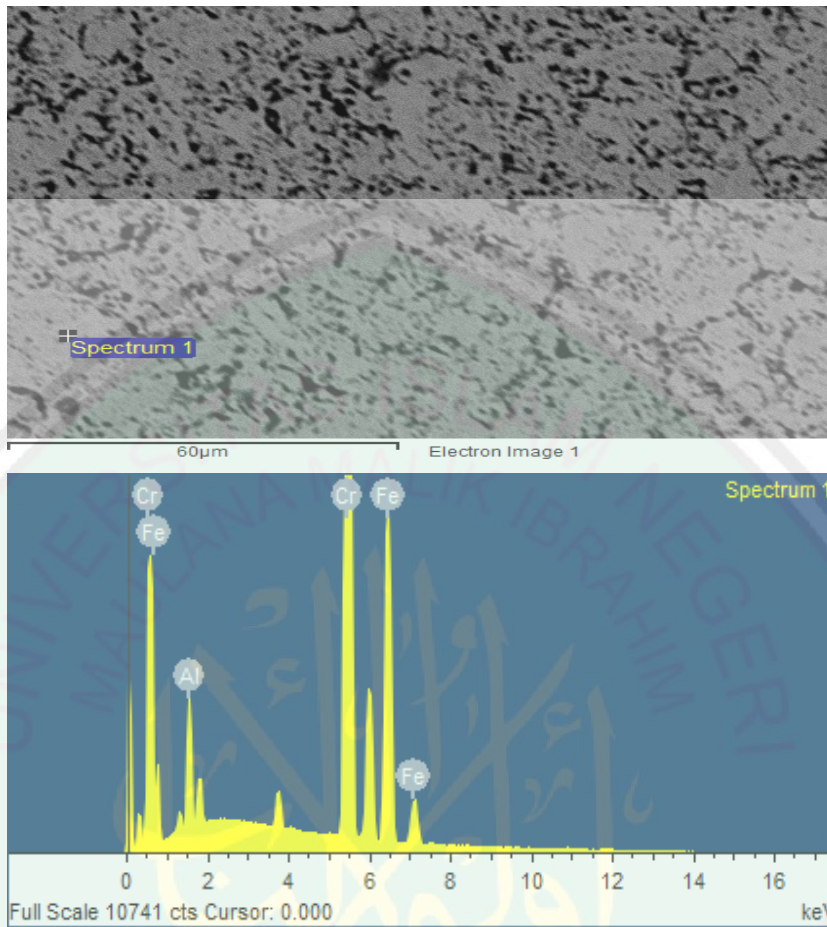
Peaks possibly omitted : 0.268, 1.240, 1.746, 3.691, 7.471, 10.818, 11.350, 11.805 keV

Element	Weight %	Atomic %
Cr K	69.76	71.25
Fe K	30.24	28.75
Totals	100.00	

2. 90(FeCr)-10Al



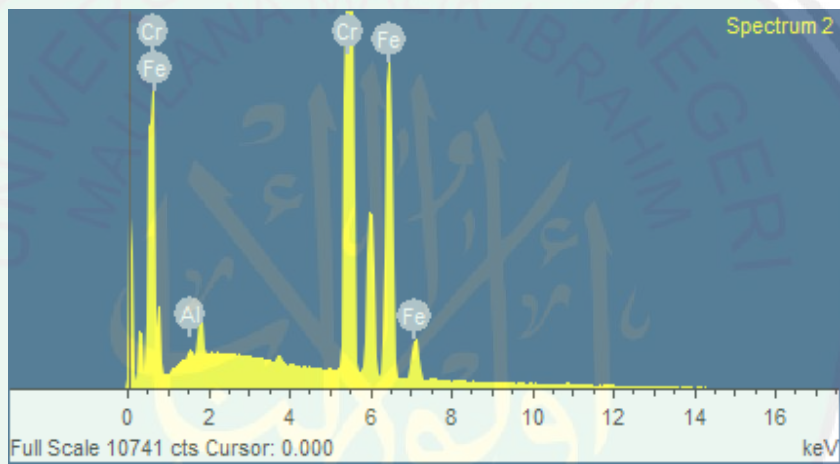
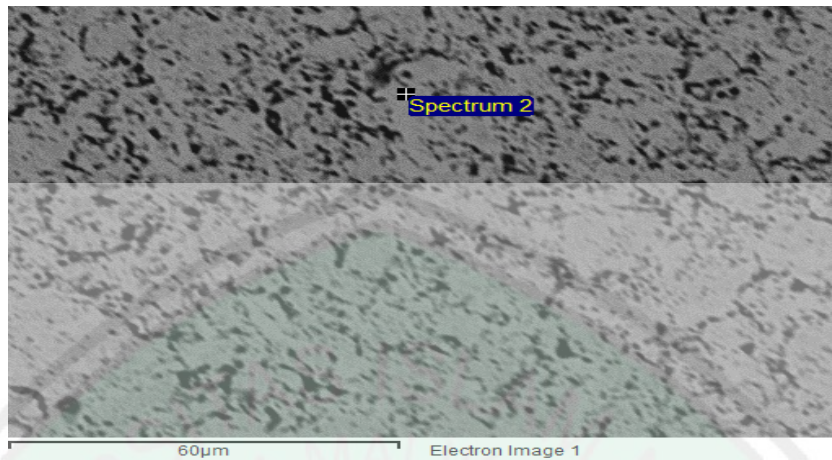
Spectrum 1



Peaks possibly omitted : 0.265, 3.694, 4.030, 7.466, 10.819, 11.850 keV

Element	Weight %	Atomic %
Al K	3.91	7.41
Cr K	65.96	64.95
Fe K	30.14	27.63
Totals	100.00	

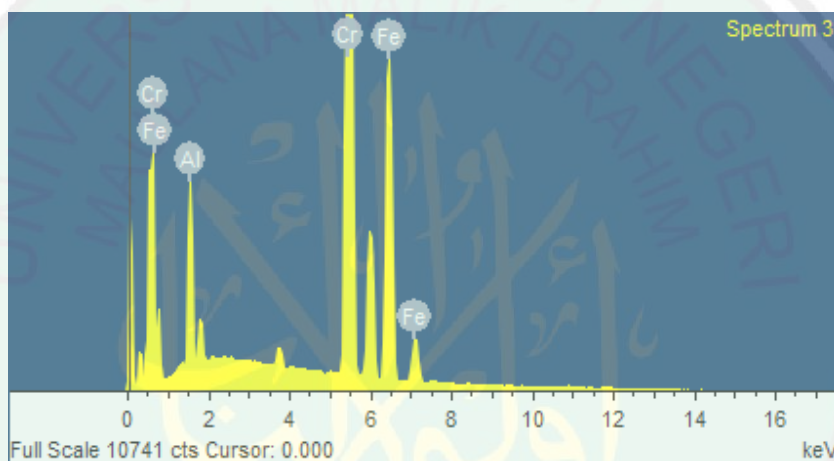
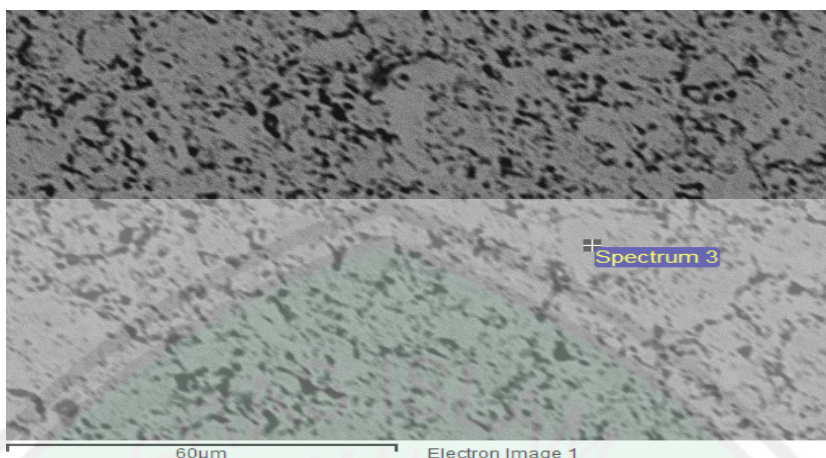
Spectrum 2



Peaks possibly omitted : 0.267, 3.688, 7.480, 10.832, 11.820 keV

Element	Weight %	Atomic %
Al K	0.30	0.59
Cr K	71.65	72.86
Fe K	28.04	26.55
Totals	100.00	

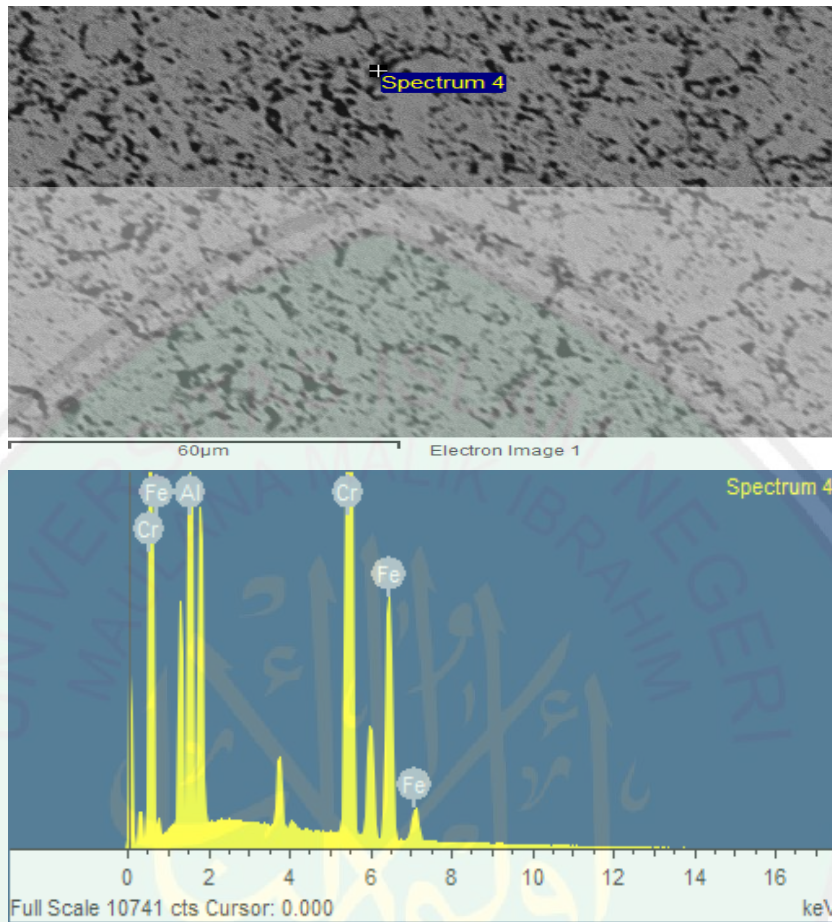
Spectrum 3



Peaks possibly omitted : 0.264, 3.692, 4.940, 7.468, 10.819, 11.371, 11.820 keV

Element	Weight %	Atomic %
Al K	5.55	10.38
Cr K	64.91	62.95
Fe K	29.54	26.67
Totals	100.00	

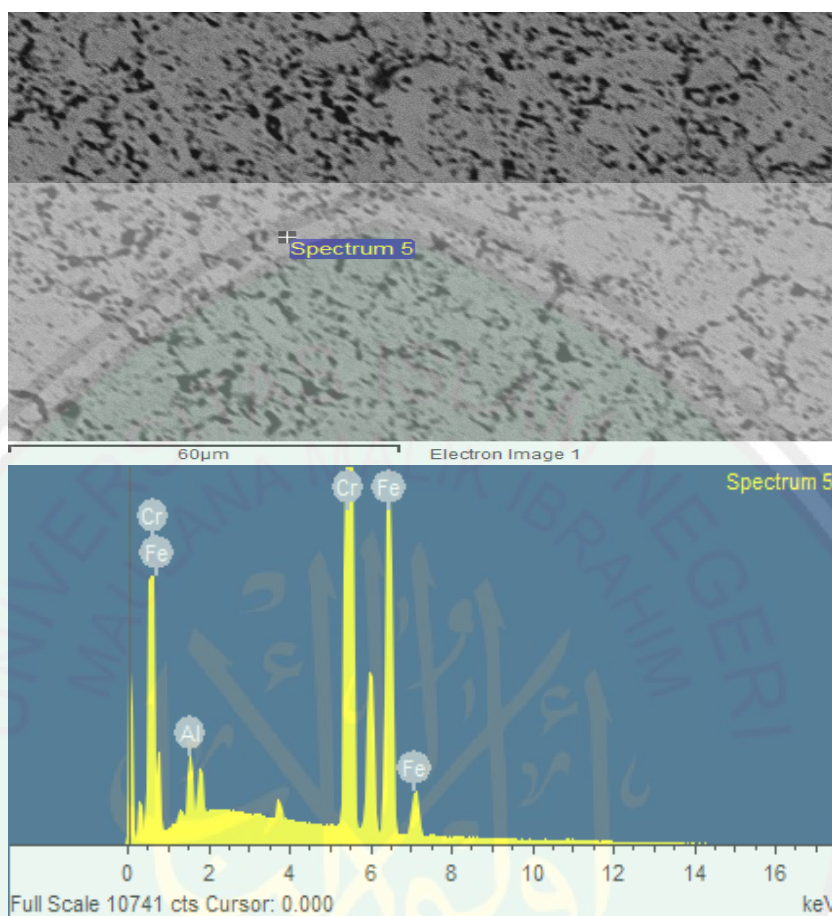
Spectrum 4



Peaks possibly omitted : 0.268, 3.696, 4.019, 7.475, 8.200 keV

Element	Weight %	Atomic %
Al K	16.28	27.69
Cr K	57.89	51.09
Fe K	25.83	21.22
Totals	100.00	

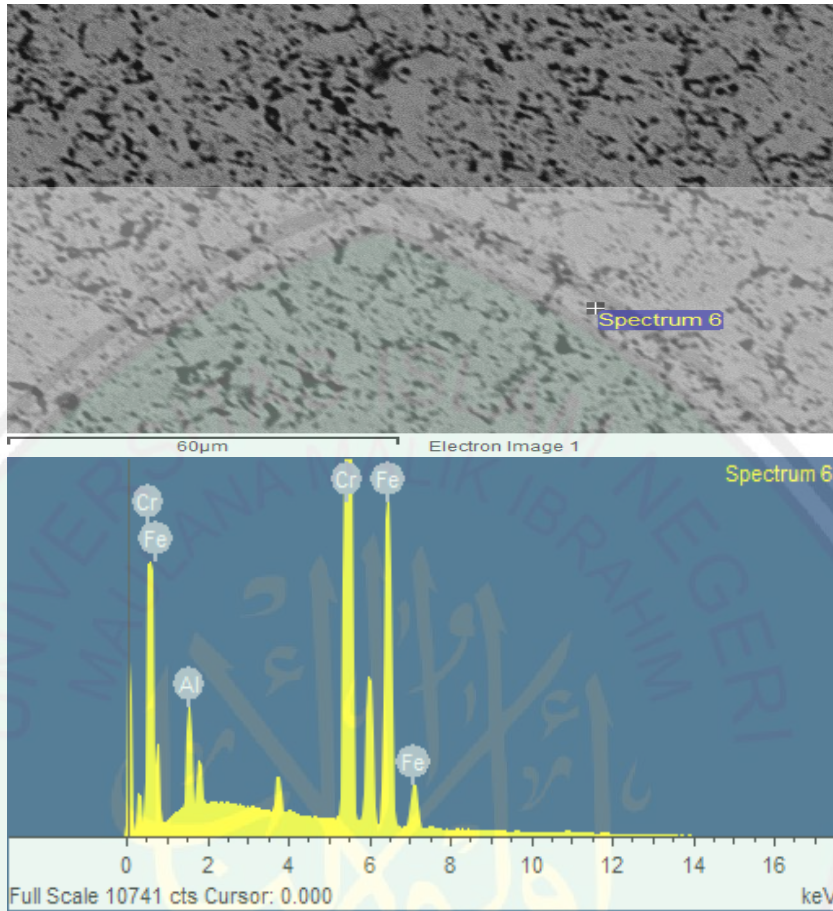
Spectrum 5



Peaks possibly omitted : 0.265, 3.693, 7.475, 10.836, 11.812, 13.260 keV

Element	Weight %	Atomic %
Al K	1.84	3.57
Cr K	67.60	67.87
Fe K	30.56	28.56
Totals	100.00	

Spectrum 6



Peaks possibly omitted : 0.266, 3.693, 7.483, 10.848 keV

Element	Weight %	Atomic %
Al K	3.18	6.08
Cr K	66.46	65.90
Fe K	30.35	28.02
Totals	100.00	

Lampiran 3 Perhitungan Nilai Densitas

Sampel di Udara

No	Sampel	W benda di udara			
		W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₃ (g)	W _{rata-rata} (g)
1.	100(FeCr)	1,167	1,167	1,167	1,167
2.	95(FeCr)-5Al	1,160	1,160	1,160	1,160
3.	90(FeCr)-10Al	1,083	1,083	1,083	1,083
4.	85(FeCr)-15Al	1,122	1,122	1,120	1,121

Sampel di Air

No	Sampel	W benda di air			
		W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₃ (g)	W _{rata-rata} (g)
1.	100(FeCr)	0,968	0,966	0,965	0,966
2.	95(FeCr)-5Al	0,920	0,922	0,922	0,921
3.	90(FeCr)-10Al	0,863	0,864	0,872	0,866
4.	85(FeCr)-15Al	0,877	0,878	0,879	0,878

Perhitungan

1. 100(FeCr)

Diketahui : $\rho_a = 0,99651 \text{ g/cm}^3$ pada temperatur ruang 27°C

$$W_b = 1,167 \text{ g}$$

$$W_a = 0,966 \text{ g}$$

Ditanya : $\rho_b \dots?$

Jawab :

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{W_b}{W_b - W_a}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,167}{1,167 - 0,966}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,167}{0,201}$$

$$0,201 \rho_b = 0,99651 \times 1,167$$

$$0,201 \rho_b = 1,163$$

$$\rho_b = \frac{1,163}{0,201} = 5,789 \text{ g/cm}^3$$

2. 95(FeCr)-5Al

Diketahui : $\rho_a = 0,099651 \text{ g/cm}^3$ pada temperatur ruang $27 \text{ }^\circ\text{C}$

$$W_b = 1,160 \text{ g}$$

$$W_a = 0,921 \text{ g}$$

Ditanya : $\rho_b \dots ?$

Jawab :

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{W_b}{W_b - W_a}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,160}{1,160 - 0,921}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,160}{0,239}$$

$$0,239 \rho_b = 0,99651 \times 1,160$$

$$0,239 \rho_b = 1,156$$

$$\rho_b = \frac{1,156}{0,239} = 4,837 \text{ g/cm}^3$$

3. 90(FeCr)-10Al

Diketahui : $\rho_a = 0,099651 \text{ g/cm}^3$ pada temperatur ruang $27 \text{ }^\circ\text{C}$

$$W_b = 1,083 \text{ g}$$

$$W_a = 0,866 \text{ g}$$

Ditanya : $\rho_b \dots ?$

Jawab :

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{W_b}{W_b - W_a}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,083}{1,083 - 0,866}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,083}{0,217}$$

$$0,217 \rho_b = 0,99651 \times 1,083$$

$$0,217 \rho_b = 1,079$$

$$\rho_b = \frac{1,079}{0,217} = 4,972 \text{ g/cm}^3$$

4. 85(FeCr)-15Al

Diketahui : $\rho_a = 0,099651 \text{ g/cm}^3$ pada temperatur ruang $27 \text{ }^\circ\text{C}$

$$W_b = 1,121 \text{ g}$$

$$W_a = 0,878 \text{ g}$$

Ditanya : $\rho_b \dots ?$

Jawab :

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{W_b}{W_b - W_a}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,121}{1,121 - 0,878}$$

$$\frac{\rho_b}{0,99651} = \frac{1,121}{0,243}$$

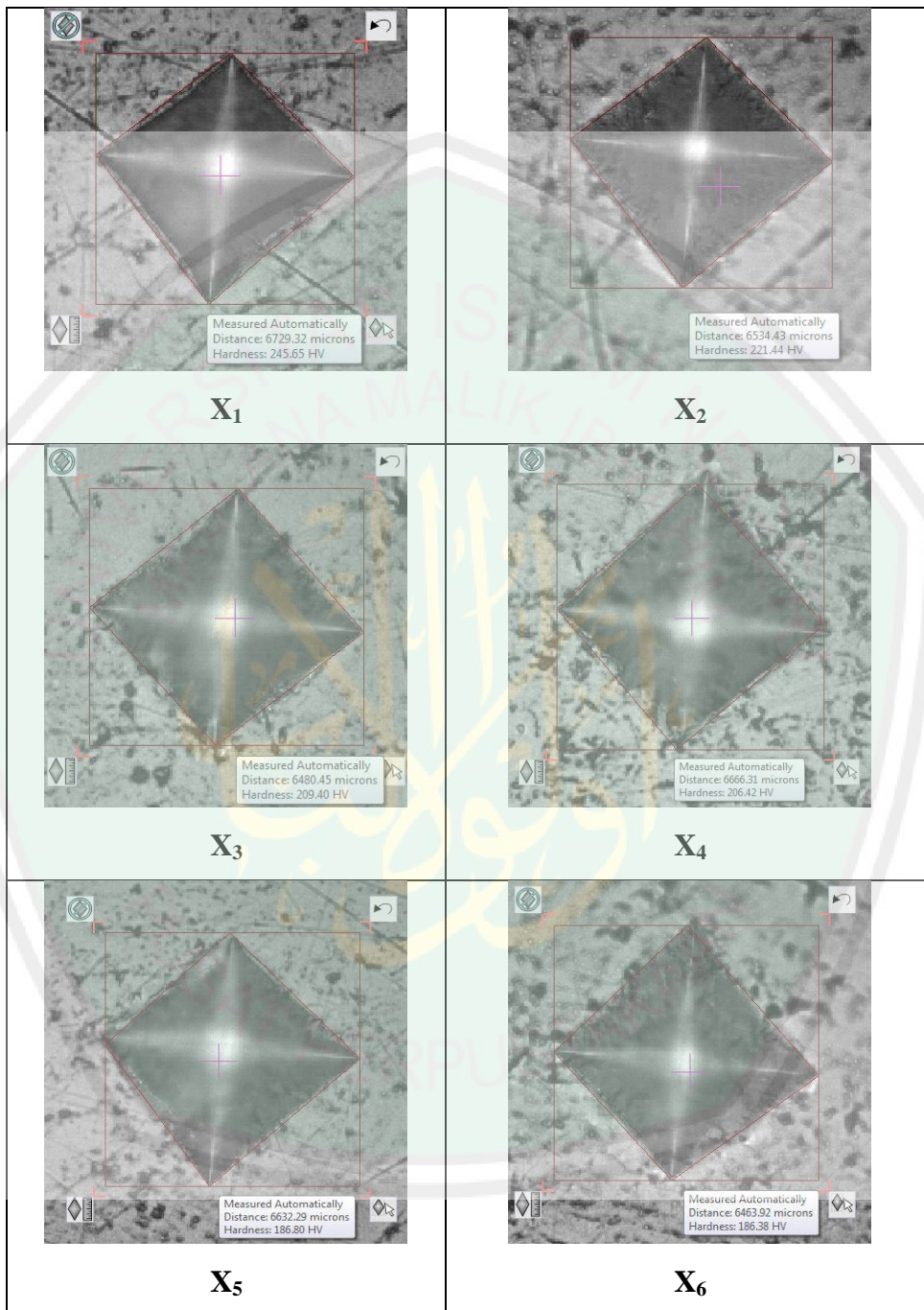
$$0,243 \rho_b = 0,99651 \times 1,121$$

$$0,243 \rho_b = 1,117$$

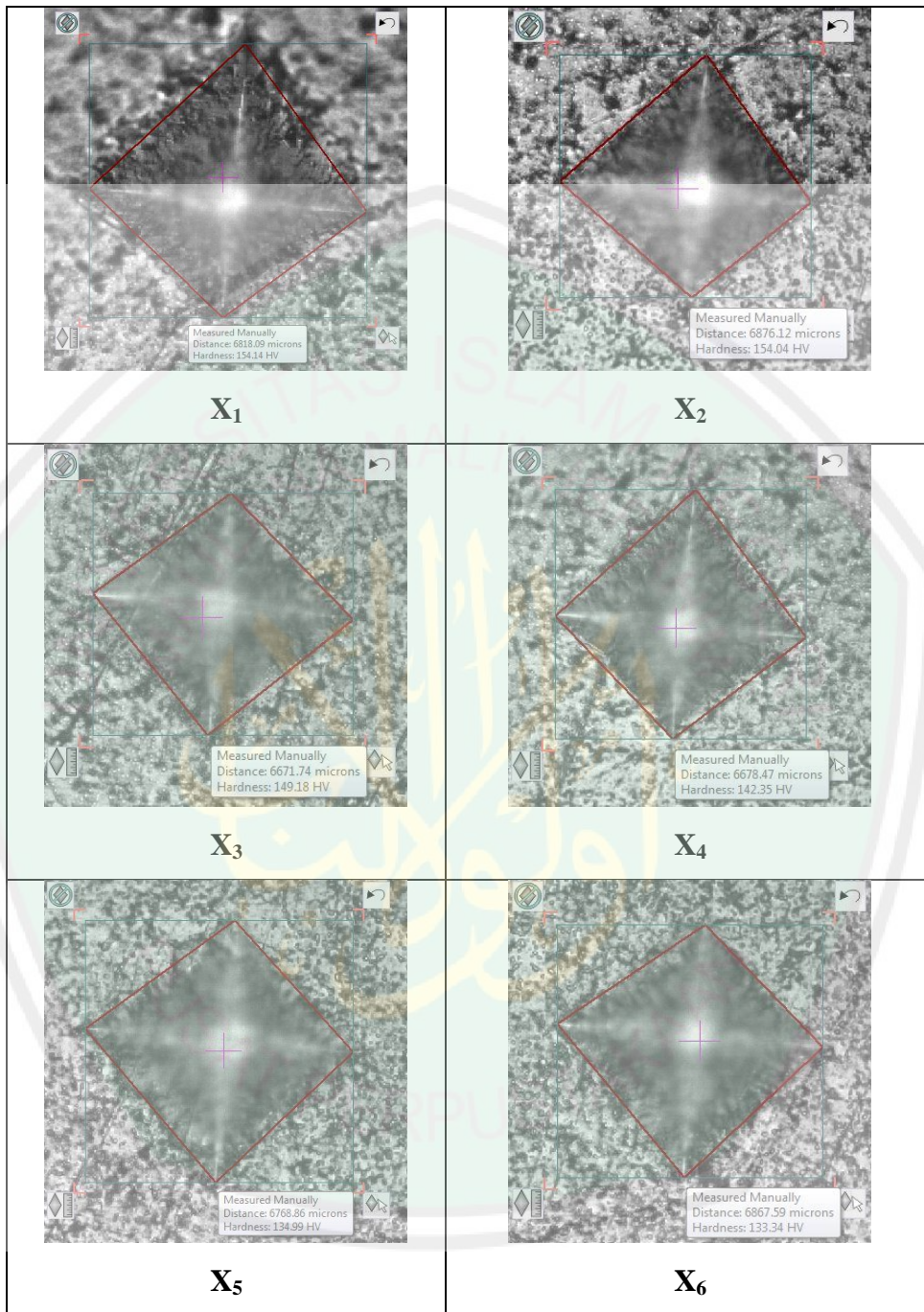
$$\rho_b = \frac{1,117}{0,243} = 4,597 \text{ g/cm}^3$$

Lampiran 4 Perhitungan Nilai Kekerasan (*Vickers Hardness*)

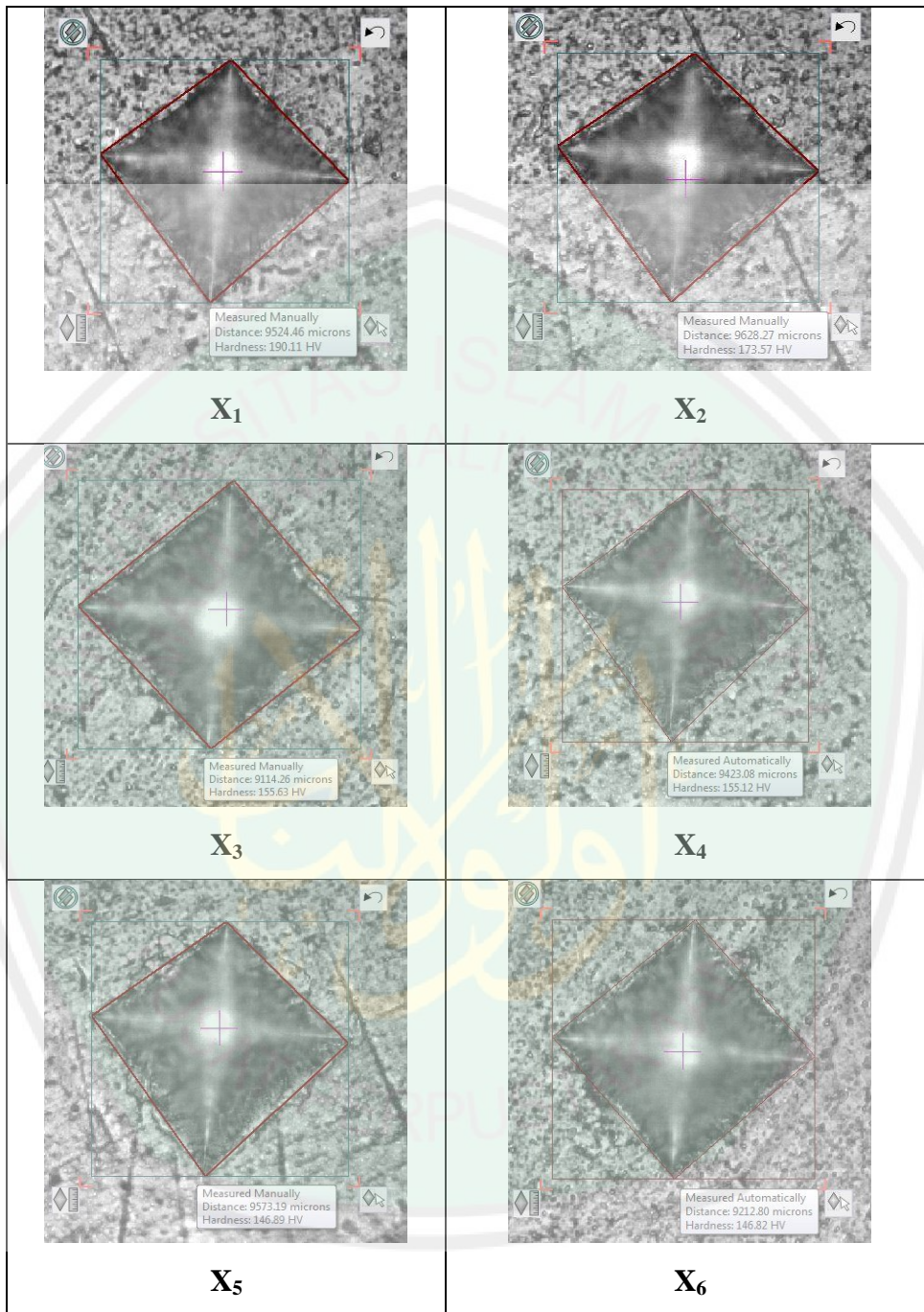
Sampel 100(FeCr)



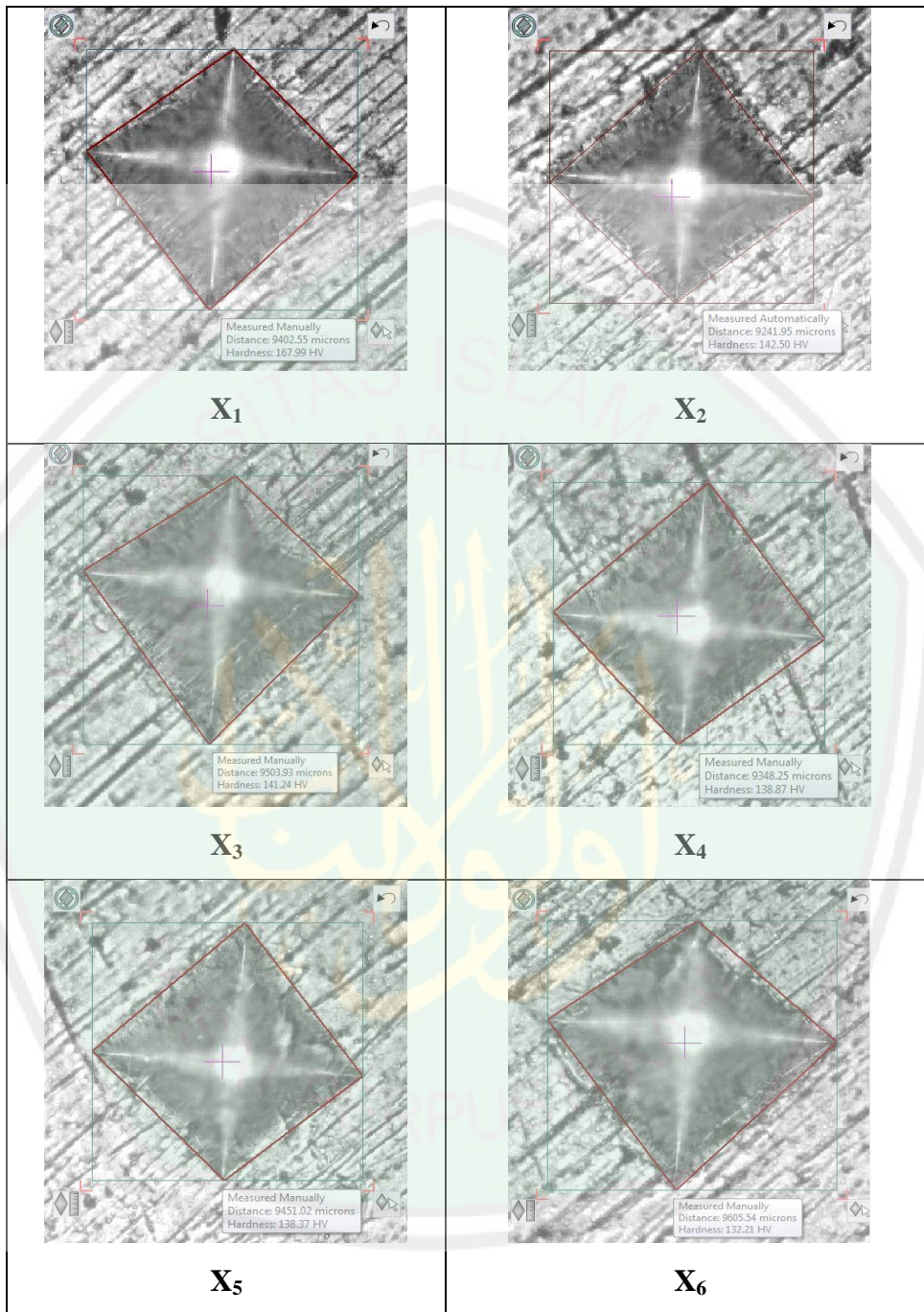
Sampel 95(FeCr)-5Al



Sampel 90(FeCr)-10Al



Sampel 85(FeCr)-15Al



Hasil Uji Kekerasan

No	Sampel	Nilai Kekerasan (HV)					
		X ₁ (gf)	X ₂ (gf)	X ₃ (gf)	X ₄ (gf)	X ₅ (gf)	X ₆ (gf)
1.	100(FeCr)	245,65	221,44	209,40	206,42	186,80	186,38
2.	95(FeCr)-5Al	154,14	154,04	149,18	142,35	134,99	133,34
3.	90(FeCr)-10Al	190,11	173,57	155,63	155,12	146,89	146,82
4.	85(FeCr)-15Al	167,90	142,50	141,24	138,87	138,37	132,21

Perhitungan

1. 100(FeCr)

Diketahui : X₁ = 245,65 gf X₄ = 206,42 gf

X₂ = 221,44 gf X₅ = 186,80 gf

X₃ = 209,40 gf X₆ = 186,38 gf

Ditanya : X_{rata-rata}...?

Jawab :

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{245,65 + 221,44 + 209,40 + 206,42 + 186,80 + 186,38}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{1256,09}{6} = 209,35 \text{ gf}$$

2. 95FeCr-5Al

Diketahui : X₁ = 154,14 gf X₄ = 142,35 gf

X₂ = 154,04 gf X₅ = 134,99 gf

X₃ = 149,18 gf X₆ = 133,34 gf

Ditanya : X_{rata-rata}...?

Jawab :

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{154,14 + 154,04 + 149,18 + 142,35 + 134,99 + 133,34}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{868,04}{6} = 144,67 \text{ gf}$$

3. 90FeCr-10Al

Diketahui : $X_1 = 190,11 \text{ gf}$ $X_4 = 155,12 \text{ gf}$
 $X_2 = 173,57 \text{ gf}$ $X_5 = 146,89 \text{ gf}$
 $X_3 = 155,63 \text{ gf}$ $X_6 = 146,82 \text{ gf}$

Ditanya : $X_{\text{rata-rata}} \dots ?$

Jawab :

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{190,11 + 173,57 + 155,63 + 155,12 + 146,89 + 146,82}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{968,14}{6} = 161,36 \text{ gf}$$

4. 85FeCr-15Al

Diketahui : $X_1 = 167,99 \text{ gf}$ $X_4 = 138,87 \text{ gf}$
 $X_2 = 142,50 \text{ gf}$ $X_5 = 138,37 \text{ gf}$
 $X_3 = 141,24 \text{ gf}$ $X_6 = 132,21 \text{ gf}$

Ditanya : $X_{\text{rata-rata}} \dots ?$

Jawab :

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{167,99 + 142,50 + 141,24 + 138,87 + 138,37 + 132,21}{6}$$

$$X_{\text{rata-rata}} = \frac{861,18}{6} = 143,53 \text{ gf}$$

Lampiran 5 Perhitungan Uji Oksidasi

Sampel Sebelum Dipanaskan

No	Sampel	Massa Sampel			
		m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m _{rata-rata} (g)
1.	100(FeCr)	1,19475	1,19462	1,19461	1,19466
2.	95(FeCr)-5Al	1,13210	1,13208	1,13212	1,13210
3.	90(FeCr)-10Al	1,12766	1,12761	1,12754	1,12760
4.	85(FeCr)-15Al	1,12809	1,12812	1,12811	1,12810

Keramik Boat Sebelum Dipanaskan

No	Sampel	Massa Keramik Boat			
		m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m _{rata-rata} (g)
1.	100(FeCr)	14,62567	14,62574	14,62576	14,62572
2.	95(FeCr)-5Al	14,66604	14,66602	14,66596	14,66600
3.	90(FeCr)-10Al	14,93997	14,93999	14,93981	14,93992
4.	85(FeCr)-15Al	14,51033	14,51027	14,51029	14,51029

Keramik Boat Ditambah Sampel Sebelum Dipanaskan

No	Sampel	Massa Keramik Boat + Sampel			
		m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m _{rata-rata} (g)
1.	100(FeCr)	15,82034	15,82036	15,82040	15,82036
2.	95(FeCr)-5Al	15,79800	15,79811	15,79812	15,79807
3.	90(FeCr)-10Al	16,06757	16,06749	16,06751	15,06752
4.	85(FeCr)-15Al	15,63838	15,63842	15,63834	15,63838

Diameter Sampel

No	Sampel	Diameter Sampel			
		d ₁ (cm)	d ₂ (cm)	d ₃ (cm)	d _{rata-rata} (cm)
1.	100(FeCr)	9,71	9,64	9,67	9,67
2.	95(FeCr)-5Al	9,96	9,94	9,97	9,95
3.	90(FeCr)-10Al	9,93	9,98	9,90	9,93
4.	85(FeCr)-15Al	10,08	10,10	10,08	10,08

Tinggi Sampel

No	Sampel	Tinggi Sampel			
		t ₁ (cm)	t ₂ (cm)	t ₃ (cm)	t _{rata-rata} (cm)
1.	100(FeCr)	2,72	2,69	2,75	2,72
2.	95(FeCr)-5Al	2,92	2,90	2,92	2,92
3.	90(FeCr)-10Al	3,02	3,01	3,02	3,01
4.	85(FeCr)-15Al	3,09	3,12	3,07	3,09

Keramik Boat Ditambah Sampel Sesudah Dipanaskan

Cycle	Massa Keramik Boat + Sampel (g)			
	100(FeCr)	95(FeCr)-5Al	90(FeCr)-10Al	85(FeCr)-15Al
1	15,85534	15,89812	16,16364	15,73486
	15,85531	15,89811	16,16363	15,73484
	15,85528	15,89809	16,16367	15,73483
Rata-rata	15,85531	15,89810	16,16364	15,73484
2	15,86300	15,92683	16,17802	15,74661
	15,86305	15,92684	16,17798	15,74664
	15,86306	15,92681	16,17800	15,74662
Rata-rata	15,86303	15,92682	16,17800	15,74662
3	15,86966	15,93268	16,18923	15,75572
	15,86959	15,93264	16,18923	15,75573
	15,86957	15,93266	16,18926	15,75573
Rata-rata	15,86960	15,93266	16,18924	15,75573
4	15,87548	15,93571	16,19707	15,76274
	15,87558	15,93588	16,19717	15,76283
	15,87559	15,93594	16,19722	15,76287
Rata-rata	15,87555	15,93584	16,19715	15,76281
5	15,87809	15,94005	16,20628	15,76961
	15,87812	15,94002	16,20630	15,76960
	15,87815	15,94000	16,20629	15,76963
Rata-rata	15,87812	15,94002	16,20629	15,76961
6	15,87968	15,94176	16,21207	15,77561
	15,87978	15,94172	16,21208	15,77561
	15,87978	15,94170	16,21203	15,77561
Rata-rata	15,87974	15,94172	16,21206	15,77561
7	15,88124	15,94354	16,21738	15,78129
	15,88135	15,94358	16,21746	15,78130
	15,88140	15,94354	16,21739	15,78129
Rata-rata	15,88133	15,94355	16,21741	15,78129
8	15,88262	15,94530	16,23090	15,78742
	15,88267	15,94529	16,23092	15,78743
	15,88265	15,94527	16,23090	15,78740
Rata-rata	15,88264	15,94528	16,23090	15,78741
9	15,88336	15,94638	16,23803	15,79842
	15,88340	15,94643	16,23805	15,79840
	15,88341	15,94644	16,23814	15,79849
Rata-rata	15,88339	15,94641	16,23807	15,79843
10	15,88390	15,94759	16,25007	15,84714
	15,88408	15,94778	16,25009	15,84711
	15,88408	15,94771	16,25013	15,84714
Rata-rata	15,88402	15,94769	16,25009	15,84713

Selisih Keramik Boat Ditambah Sampel Sesudah dan Sebelum Dipanaskan

Cycle	Massa Keramik Boat + Sampel (g)			
	100(FeCr)	95(FeCr)-5Al	90(FeCr)-10Al	85(FeCr)-15Al
1	0,03495	0,10003	0,09612	0,09646
2	0,04267	0,12875	0,11048	0,10824
3	0,04924	0,13459	0,12172	0,11734
4	0,05519	0,13777	0,12963	0,12443
5	0,05776	0,14195	0,13877	0,13123
6	0,05938	0,14365	0,14454	0,13723
7	0,06097	0,14548	0,14989	0,14291
8	0,06228	0,14721	0,16338	0,14903
9	0,06303	0,14834	0,17055	0,16005
10	0,06366	0,14962	0,18257	0,20875

Perhitungan Luas Permukaan Silinder

1. 100(FeCr)

Diketahui : $r = 4,835 \text{ cm}$ $t = 2,72 \text{ cm}$

Ditanya : Luas permukaan silinder ?

Jawab :

$$L = 2\pi r(r + t)$$

$$L = 2 \times 3,14 \times 4,835(4,835 + 2,72)$$

$$L = 30,3638(7,555)$$

$$L = 229,399 \text{ cm}^2$$

2. 95(FeCr)-5Al

Diketahui : $r = 4,975 \text{ cm}$ $t = 2,91 \text{ cm}$

Ditanya : Luas permukaan silinder ?

Jawab :

$$L = 2\pi r(r + t)$$

$$L = 2 \times 3,14 \times 4,975(4,975 + 2,91)$$

$$L = 31,243(7,885)$$

$$L = 246,351 \text{ cm}^2$$

3. 90(FeCr)-10Al

Diketahui : $r = 4,965 \text{ cm}$

$t = 3,01 \text{ cm}$

Ditanya : Luas permukaan silinder ?

Jawab :

$$L = 2\pi r(r + t)$$

$$L = 2 \times 3,14 \times 4,965(4,965 + 3,01)$$

$$L = 31,1802(7,975)$$

$$L = 248,662 \text{ cm}^2$$

4. 85(FeCr)-15Al

Diketahui : $r = 5,04 \text{ cm}$

$t = 3,09 \text{ cm}$

Ditanya : Luas permukaan silinder ?

Jawab :

$$L = 2\pi r(r + t)$$

$$L = 2 \times 3,14 \times 5,04(5,04 + 3,09)$$

$$L = 31,6512(8,13)$$

$$L = 257,324 \text{ cm}^2$$

Perhitungan Pertambahan Massa Setiap Cycle

1. 100(FeCr)

Cycle 1

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$m_2 = 15,85531 \text{ g}$

$L = 229,399 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,85531 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,03498}{229,399} = 0,00015 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 2

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$m_2 = 15,86303 \text{ g}$

$L = 229,399 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,86303 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,04267}{229,399} = 0,00018 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 3

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$
 $m_2 = 15,86960 \text{ g}$
 $L = 229,399 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,86960 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,04924}{229,399} = 0,00021 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 4

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$
 $m_2 = 15,87555 \text{ g}$
 $L = 229,399 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,87555 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,05519}{229,399} = 0,00024 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 5

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$$m_2 = 15,87812 \text{ g}$$

$$L = 229,399 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,87812 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,05776}{229,399} = 0,00025 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 6

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$$m_2 = 15,87974 \text{ g}$$

$$L = 229,399 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,87974 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,05938}{229,399} = 0,00026 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 7

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$$m_2 = 15,88133 \text{ g}$$

$$L = 229,399 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,88133 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,06097}{229,399} = 0,00026 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 8

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$$m_2 = 15,88264 \text{ g}$$

$$L = 229,399 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,88264 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,06228}{229,399} = 0,00027 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 9

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$$m_2 = 15,88339 \text{ g}$$

$$L = 229,399 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,88339 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,06303}{229,399} = 0,00027 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 10

Diketahui : $m_1 = 15,82036 \text{ g}$

$$m_2 = 15,88402 \text{ g}$$

$$L = 229,399 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,88402 - 15,82036)}{229,399}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,06366}{229,399} = 0,00028 \text{ g/cm}^2$$

2. 95(FeCr)-5Al

Cycle 1

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$

$m_2 = 15,89810 \text{ g}$

$L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,89810 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,10003}{246,351} = 0,00040 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 2

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$

$m_2 = 15,92682 \text{ g}$

$L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,92682 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,12875}{246,351} = 0,00053 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 3

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,93266 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,93266 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,13459}{246,351} = 0,00055 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 4

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,93584 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,93584 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,13777}{246,351} = 0,00056 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 5

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,94002 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,94002 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14195}{246,351} = 0,00058 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 6

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,94172 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,94172 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14365}{246,351} = 0,00058 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 7

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,94355 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,94355 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14548}{246,351} = 0,00059 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 8

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,94528 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,94528 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14721}{246,351} = 0,00060 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 9

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,94641 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,94641 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14834}{246,351} = 0,00060 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 10

Diketahui : $m_1 = 15,79807 \text{ g}$
 $m_2 = 15,94769 \text{ g}$
 $L = 246,351 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,94769 - 15,79807)}{246,351}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14962}{246,351} = 0,00061 \text{ g/cm}^2$$

3. 90(FeCr)-10Al

Cycle 1

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$

$m_2 = 16,16364 \text{ g}$

$L = 248,662 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,16364 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,09612}{248,662} = 0,00039 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 2

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$

$m_2 = 16,17800 \text{ g}$

$L = 248,662 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,17800 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,11048}{248,662} = 0,00044 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 3

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$
 $m_2 = 16,18924 \text{ g}$
 $L = 248,662 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,18924 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,12172}{248,662} = 0,00049 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 4

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$
 $m_2 = 16,19715 \text{ g}$
 $L = 248,662 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,19715 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,12963}{248,662} = 0,00052 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 5

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$

$$m_2 = 16,20629 \text{ g}$$

$$L = 248,662 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,20629 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,13877}{248,662} = 0,00056 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 6

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$

$$m_2 = 16,21206 \text{ g}$$

$$L = 248,662 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,21206 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14454}{248,662} = 0,00058 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 7

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$

$$m_2 = 16,21741 \text{ g}$$

$$L = 248,662 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,21741 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14989}{248,662} = 0,00060 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 8

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$

$$m_2 = 16,23090 \text{ g}$$

$$L = 248,662 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,23090 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,16338}{248,662} = 0,00066 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 9

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$
 $m_2 = 16,23807 \text{ g}$
 $L = 248,662 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,23807 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,17055}{248,662} = 0,00069 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 10

Diketahui : $m_1 = 16,06752 \text{ g}$
 $m_2 = 16,25009 \text{ g}$
 $L = 248,662 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(16,25009 - 16,06752)}{248,662}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,18257}{248,662} = 0,00073 \text{ g/cm}^2$$

4. 85(FeCr)-15Al

Cycle 1

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$

$m_2 = 15,73484 \text{ g}$

$L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,73484 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,09646}{257,324} = 0,00037 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 2

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$

$m_2 = 15,74662 \text{ g}$

$L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,74662 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,10824}{257,324} = 0,00042 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 3

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$
 $m_2 = 15,75572 \text{ g}$
 $L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,75572 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,11734}{257,324} = 0,00046 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 4

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$
 $m_2 = 15,76281 \text{ g}$
 $L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,76281 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,12443}{257,324} = 0,00048 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 5

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$
 $m_2 = 15,76961 \text{ g}$
 $L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,76961 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,13123}{257,324} = 0,00051 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 6

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$
 $m_2 = 15,77561 \text{ g}$
 $L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,77561 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,13723}{257,324} = 0,00053 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 7

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$

$$m_2 = 15,78129 \text{ g}$$

$$L = 257,324 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,78129 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14291}{257,324} = 0,00056 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 8

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$

$$m_2 = 15,78741 \text{ g}$$

$$L = 257,324 \text{ cm}^2$$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,78741 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,14903}{257,324} = 0,00058 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 9

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$
 $m_2 = 15,79843 \text{ g}$
 $L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,79843 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,16005}{257,324} = 0,00062 \text{ g/cm}^2$$

Cycle 10

Diketahui : $m_1 = 15,63838 \text{ g}$
 $m_2 = 15,84713 \text{ g}$
 $L = 257,324 \text{ cm}^2$

Ditanya : Pertambahan Massa ?

Jawab :

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(m_2 - m_1)}{L}$$

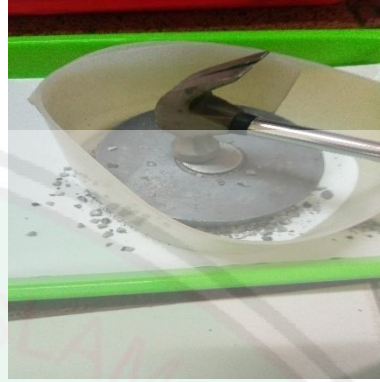
$$\text{Pertambahan massa} = \frac{(15,84713 - 15,63838)}{257,324}$$

$$\text{Pertambahan massa} = \frac{0,20875}{257,324} = 0,00081 \text{ g/cm}^2$$

Lampiran 6 Dokumentasi Penelitian



Fe-Cr lumps



Proses penumbukan Fe-Cr lumps



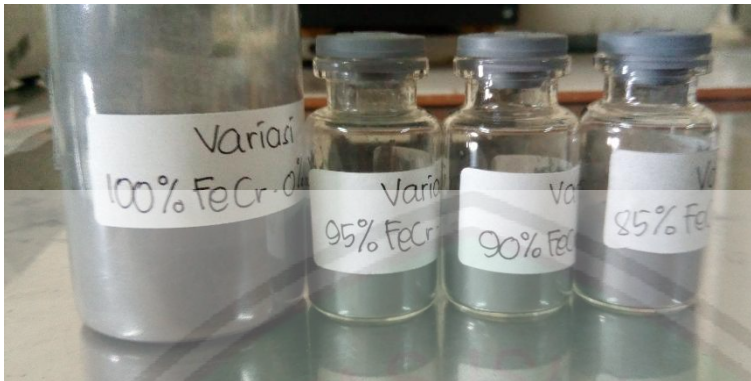
Proses *milling* (pencampuran)



Serbuk Fe-Cr



Proses *sintering* dalam keadaan *vacuum*



Sampel berbentuk serbuk



Penimbangan serbuk sebelum proses kompaksi



Sampel setelah dikompaksi



Serbuk Aluminium



Proses kompaksi (pemadatan)

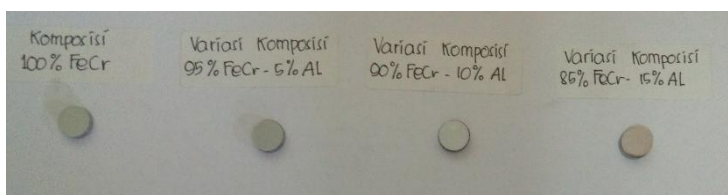


Uji kekerasan

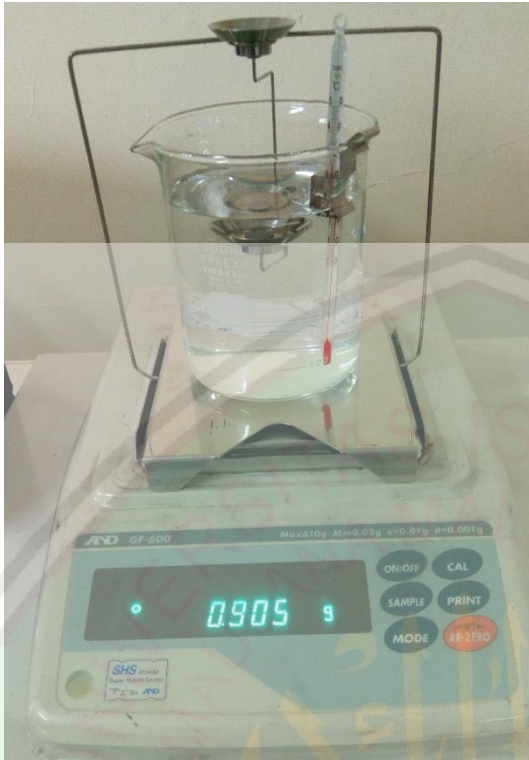


Sampel setelah dipanaskan (*sintering*)

Proses *polish*



Sampel setelah diampelas



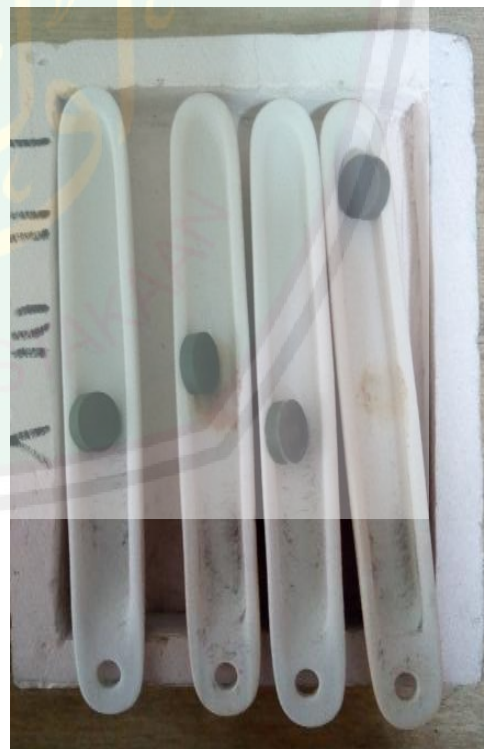
Uji densitas di air



Karakterisasi XRD



Karakterisasi SEM-EDX



Hasil uji oksida



KEMENTERIAN AGAMA RI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN)
MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Gajayana No. 50 Duroyo Malang (0341) 551345 Fax. (0341) 572533

BUKTI KONSULTASI SKRIPSI

Nama : Siti Rachmatul Jannah
NIM : 14640008
Fakultas/ Jurusan : Sains dan Teknologi/ Fisika
Judul Skripsi : Sintesis dan Karakterisasi Logam Paduan Fe-Cr-Al Sebagai Material Tahan Panas
Pembimbing I : Erna Hastuti, M.Si
Pembimbing II : Drs. Abdul Basid, M.Si

No	Tanggal	HAL	Tanda Tangan
1.	19 Agustus 2019	Konsultasi Bab I	
2.	27 Agustus 2019	Konsultasi Bab I, II dan III	
3.	09 September 2019	Konsultasi Bab II, III dan IV	
4.	11 September 2019	Konsultasi Bab IV	
5.	18 September 2019	Konsultasi Bab IV	
6.	19 September 2019	Konsultasi Data	
7.	04 Oktober 2019	Konsultasi Bab V dan Acc	
8.	31 November 2019	Konsultasi Kajian Agama	
9.	13 November 2019	Konsultasi Kajian Agama dan Acc	
10.	15 November 2019	Konsultasi Semua Bab, Abstrak dan Acc	

Malang, 12 November 2019
Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika,



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003