

PENGUJIAN KEKERASAN DAN ANALISA STRUKTUR MIKRO PADA BESI COR KELABU DENGAN *SCANNING ELECTRON MICROSCOPE – ENERGY DISPERSIVE X-RAY SPECTROSCOPY* (SEM-EDS)

**Bangun Nugroho, Ir. Agung Setyo Darmawan, S.T., M.T.
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Surakarta**

Abstrak

Secara mekanis, besi cor kelabu bersifat keras dan getas. Hal ini dikarenakan struktur dari serpihan grafit itu tajam dan berujung sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan di ujung-ujungnya ketika dikenai tegangan tarik. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisa struktur mikro, komposisi kimia fasa, serta nilai kekerasan pada besi cor kelabu. Pengujian metalografi dan uji komposisi dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDS), pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *Micro Vickers* dan *Rockwell*. Hasil pengujian SEM-EDS menunjukkan pada besi cor kelabu terdapat fasa perlit, perlit yang terdampak oksidasi dan grafit. Pada fasa perlit terdapat unsur Fe = 92,7%, C = 5,1%, O = 2,2%. Pada fasa perlit yang terdampak oksidasi terdapat unsur Fe = 59,6%, C = 5,3%, O = 35,0%. Pada fasa grafit terdapat unsur Fe = 2,7%, C = 90%, B = 3,5%, O = 3,8%. Kehadiran grafit dalam hal ini berbentuk serpih (*flake*) yang tersebar pada matrik perlit, sehingga dapat disebut besi cor kelabu perlitik. Hasil pengujian kekerasan *Micro Vickers* menunjukkan nilai kekerasan tertinggi pada fasa perlit dengan nilai kekerasan sebesar 229,34 VHN. Sedangkan nilai kekerasan terendah pada fasa grafit dengan nilai kekerasan 86,09 VHN. Hasil pengujian kekerasan Rockwell didapatkan nilai rata-rata kekerasan sebesar 96,71 HRB, dikonversikan ke dalam angka kekerasan *Vickers* sebesar 230 VHN.

Kata kunci: Besi cor kelabu, struktur mikro, kekerasan

Abstract

Mechanically, gray cast iron is hard and brittle. This is because the structure of the graphite flakes is sharp and pointed, causing stress concentrations at the edges when subjected to a tensile stress. This research was conducted with the aim of analyzing the microstructure, chemical composition of the phases, and the hardness value of gray cast iron. Metallographic testing and composition testing were carried out by Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS), hardness testing was carried out by the Micro Vickers and Rockwell methods. The results of the SEM-EDS test showed that gray cast iron contained pearlite, pearlite which was affected by oxidation and graphite. In the pearlite phase there is an element of Fe = 92.7%, C = 5.1%, O = 2.2%. In the pearlite phase affected by oxidation, there are elements of Fe = 59.6%, C = 5.3%, O = 35.0%. In the graphite phase there are elements of Fe = 2.7%, C = 90%, B = 3.5%, O = 3.8%. The presence of graphite in this case is in the form of flakes scattered in the pearlite matrix, so that it can be called pearlitic gray cast iron. The results of the Micro Vickers hardness test showed the highest hardness value in the pearlite phase with a hardness value of 229.34 VHN. While the lowest hardness value is in the graphite phase with a hardness value of 86.09 VHN. The results of the Rockwell hardness test obtained an average hardness value of 96.71 HRB, converted into a Vickers hardness number of 230 VHN.

Keywords: Gray cast iron, microstructure, hardness

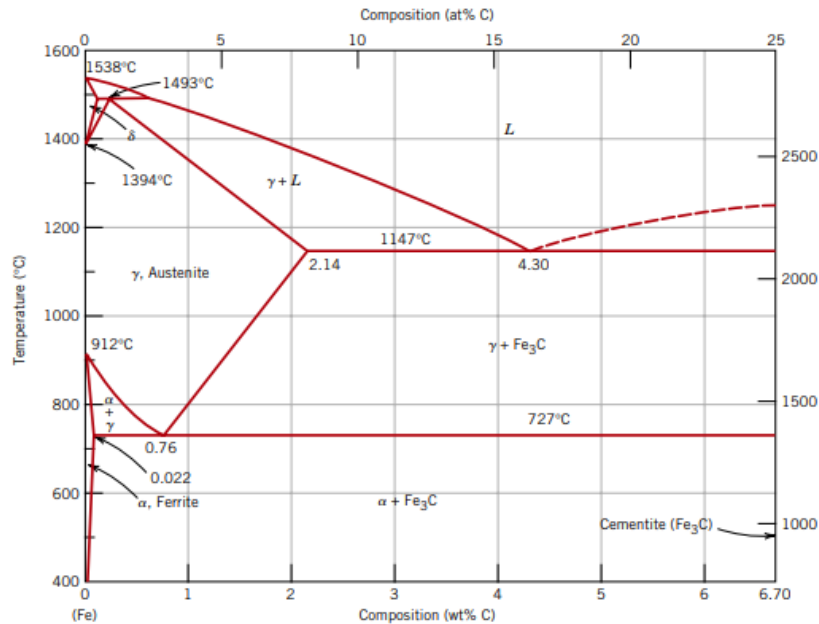
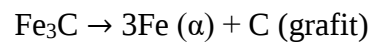
1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur di era modern ini berkembang sangat pesat. Salah satunya adalah industri pengecoran logam, proses pengecoran merupakan proses pembentukan logam dimana logam harus dilebur lalu dituang ke dalam suatu cetakan hingga terjadi solidifikasi. Proses peleburan logam dilakukan di dalam suatu dapur pemanas. Ada banyak dapur pemanas, antara lain *electric arc melting*, *induction melting*, *gas burner (crucible melting)*, *cupola melting*, dan ada beberapa jenis lain yang jarang digunakan. Klasifikasi dari dapur peleburan adalah berdasarkan bahan bakar atau pemanas (Syafi'udin, 2016).

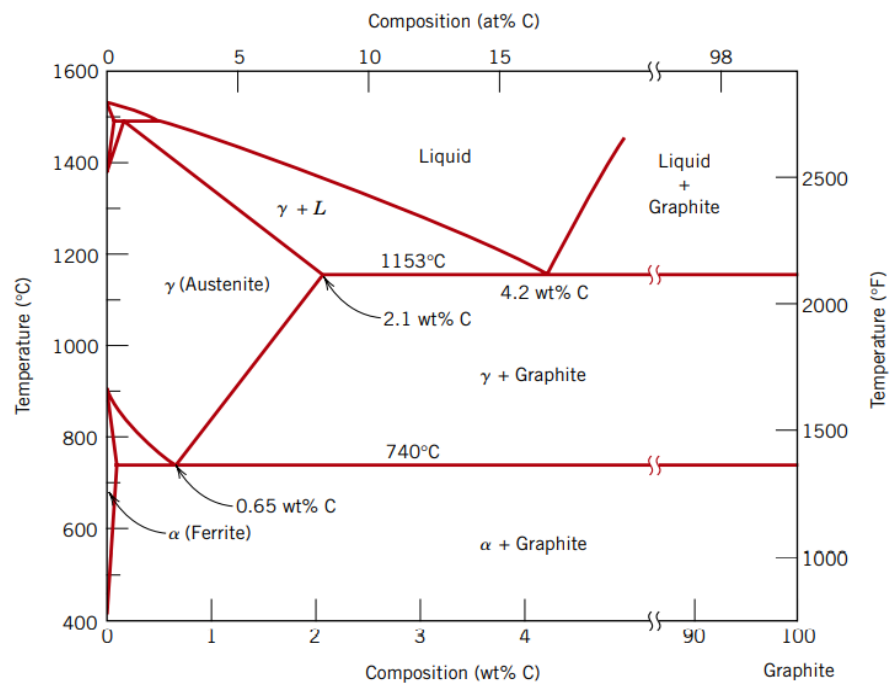
Besi cor merupakan paduan besi yang mengandung karbon (C) lebih dari 2,14%. Namun yang sering kita jumpai di lapangan memiliki kandungan 3% sampai 4,5% dan disertai dengan unsur paduan lainnya. Unsur lain dapat ditambahkan dengan maksud untuk meningkatkan sifat-sifat seperti kekuatan (*strength*), kekerasan (*hardness*), atau ketahanan korosi (*corrosion resistance*). Unsur yang umumnya ditambahkan yaitu Si, Cr, Mg, Mn, dan Ni. Besi cor memiliki selang temperatur cair yang relatif lebih rendah dari baja yaitu sekitar 1150°C - 1300°C atau 2100°F - 2350°F. Sifat mekanis besi cor tergantung pada jenis struktur mikronya, yaitu bentuk dan distribusi elemen-elemen penyusun. Salah satu elemen memiliki pengaruh yang berarti adalah grafit. Jumlah, ukuran, dan bentuk grafit mempengaruhi kekuatan (*strength*), keliatan (*ductility*), dan ketangguhan (*toughness*) dari besi cor. Beberapa jenis besi cor yang paling umum yaitu besi cor putih (*white cast iron*), besi cor kelabu (*gray cast iron*), besi cor nodular (*nodular cast iron*), dan besi cor malleable. Matriks besi cor sama dengan yang terdapat pada baja, yaitu ferit, sementit dan perlit (Surdia & Saito, 1999).

Pada paduan besi karbon terdapat lima jenis fasa yang berbeda, diantaranya fasa cair (L), besi alfa α (ferit), besi gamma γ (austenit) dalam bentuk padat, besi delta δ (ferit) dalam bentuk padat dan senyawa Fe_3C (sementit). Diagram fasa besi – besi karbida dapat dilihat pada gambar 1, sedangkan diagram fasa besi dan karbon lebih tepatnya ditunjukkan pada gambar 2 (Callister, W.D. & Rethwisch, 2007). Namun pada gambar 2 terdapat peluasan sebesar 100% berat C sehingga grafit merupakan fasa yang kaya akan karbon, bukan sementit pada 6,7% berat C pada gambar 1. Pembentukan grafit dipengaruhi oleh komposisi dan laju pendinginan yang

diterapkan (Darmawan, 2020). Fe_3C merupakan senyawa metastabil dan dapat dibuat terdekomposisi membentuk ferit dan grafit sesuai dengan reaksi berikut:

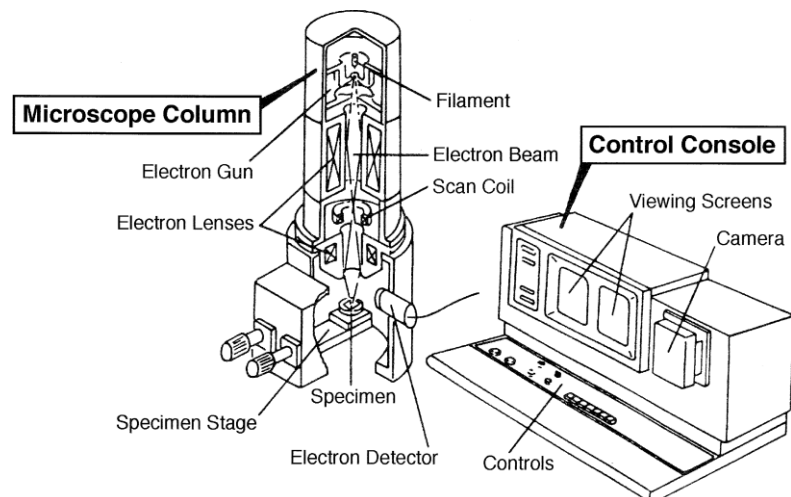


Gambar 1 Diagram fasa besi - besi karbida Fe-Fe₃C



Gambar 2 Diagram keseimbangan fasa besi karbon sebenarnya dengan grafit sebagai fasa stabil

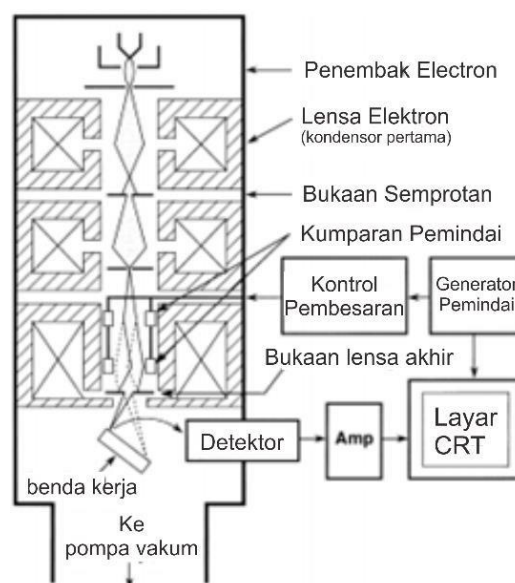
Pengujian metalografi dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah salah satu cara untuk mengetahui sifat fisik seperti struktur mikro. *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggambar permukaan spesimen dengan memindainya menggunakan sinar elektron berenergi tinggi dalam scan pola raster. Elektron memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada cahaya. Cahaya hanya mampu mencapai 200 nm sedangkan elektron bisa mencapai resolusi sampai 0,1 – 0,2 nm. Elektron berinteraksi dengan atom-atom sehingga spesimen menghasilkan sinyal yang mengandung informasi tentang topografi permukaan spesimen, komposisi, dan karakteristik lainnya seperti konduktivitas listrik. Peralatan utama yang terdapat pada SEM yaitu pistol elektron berupa filamen yang terbuat dari tungsten, lensa untuk elektron yang bersifat magnetis, dan sistem vakum. Dua komponen penting pada SEM dapat dilihat pada gambar 3 (Goldstein dkk, 2003).



Gambar 3 Dua komponen utama pada SEM

Ada dua komponen utama pada SEM, yaitu *electron column* dan *control console*. *Electron column* terdiri dari *electron gun* dan dua atau lebih lensa elektron yang mempengaruhi jalur elektron bergerak ke bawah menuju spesimen uji. *Electron gun* berfungsi untuk menghasilkan elektron yang ditembakkan ke spesimen uji. *Control console* terdiri dari *cathode ray tube* (CRT) yang berfungsi sebagai layar tampilan dan keyboard yang mengontrol berkas elektron (Goldstein dkk, 2018).

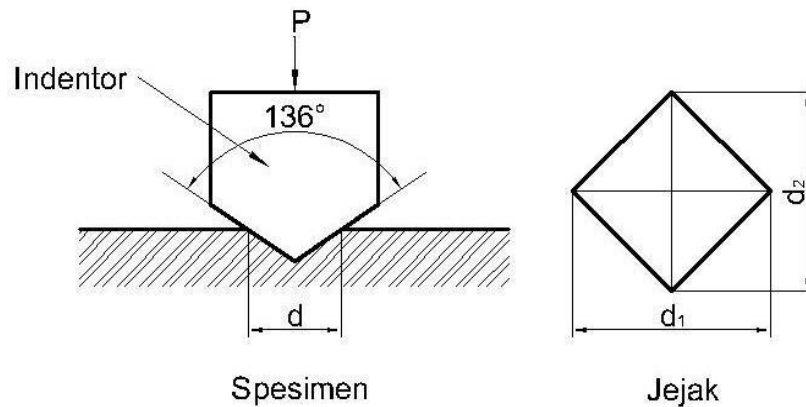
Untuk mengenali jenis atom di permukaan yang mengandung multi atom para peneliti lebih banyak menggunakan teknik EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*). Sebagian besar alat SEM dilengkapi dengan kemampuan ini, namun tidak semua SEM memiliki fitur ini. EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) yang dihasilkan dari Sinar X, yaitu dengan menembakkan sinar X pada posisi yang ingin diketahui komposisinya. Setelah ditembakkan pada posisi yang diinginkan, maka akan muncul puncak-puncak tertentu yang mewakili suatu unsur yang terkandung. Pada EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) dapat digunakan untuk membuat elemental mapping (pemetaan elemen) dengan memberikan warna yang berbeda beda dari masing-masing elemen di permukaan bahan dan bisa digunakan untuk menganalisis secara kuantitatif dari persentase masing-masing elemen.



Gambar 4 Skema dasar pengujian SEM-EDS

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui harga kekerasan benda uji pada beberapa bagian sehingga akan diketahui distribusi dan harga rata-rata kekerasan dari benda uji tersebut. Pengujian kekerasan dapat dilakukan dengan berbagai metode, salah satunya dengan menggunakan metode *Micro Vickers*. Berdasar standar ASTM E384, metode ini dilakukan dengan cara memberikan tekanan pada permukaan material siap uji menggunakan indenter intan berbentuk

piramida yang presisi dengan dasar persegi dan membentuk sudut 136° pada puncak piramida. Rentang beban uji yang dipakai dalam pengujian *Micro Vickers* ini adalah kecil, yakni antara 1 gf sampai 1000 gf (1 kgf). Waktu penerapan beban uji (*dwell time*) standar dilakukan selama 10-15 detik. Skema metode *Micro Vickers* dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5 Skema pengujian kekerasan dengan metode *Micro Vickers*

Pada setiap pengujian, bekas lekukan atau jejak hasil indentasi diamati dengan menggunakan mikroskop dan kemudian diukur panjang diagonal rata-rata dari jejak tersebut. Kekerasan *Micro Vickers* dihitung dengan membagi besar beban uji yang digunakan dengan luas lekukan permukaan bekas tekanan pada benda uji. Hasil kekerasan dikonversikan ke angka kekerasan yang dilambangkan dengan satuan VHN (*Vickers Hardness Number*) (Darmawan dan Masyrukan, 2019). Nilai kekerasan *Micro Vickers* dinyatakan dengan:

$$\text{VHN} = \frac{1,854P}{d^2} \frac{(\text{Kgf})}{(\text{mm}^2)}$$

Keterangan:

VHN = Nilai kekerasan *Vickers* (Kgf/mm^2)

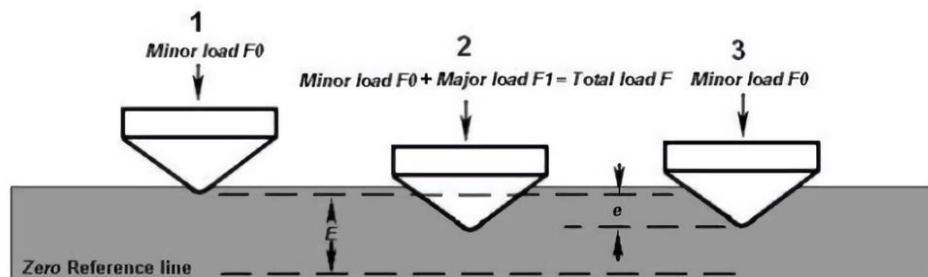
P = Besar beban penekanan (kgf)

d = Panjang diagonal rata-rata jejak hasil indentasi *Micro Vickers* (kgf/mm^2)

Di mana:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Pengujian kekerasan *Rockwell* merupakan satu metoda yang umum digunakan untuk mengukur kekerasan. Pengujian *Rockwell* mengacu pada ASTM E18. Pada pengujian *Rockwell*, beberapa skala yang berbeda merupakan hasil kombinasi yang mungkin dari beberapa jenis penekanan dan tiga beban yang berbeda. Dua dari penekanan yang umum digunakan adalah bola baja keras yang mempunyai diameter 1/16 dan 1/8 in. Ketiga adalah penekanan kerucut intan atau “ Brale “ untuk menguji material yang keras. Besarnya beban adalah 60, 100, dan 150 kg. Dengan sistem pengukuran ini, angka kekerasan ditentukan oleh perbedaan kedalaman penekanan antara beban minor awal 10 kg dan beban mayor 60, 100, dan 150 kg (Darmawan dan Masyrukan, 2019). Harga kekerasan metode *Rockwell* ditentukan berdasarkan kedalaman injakan *identor*. Dengan mekanisme tertentu kedalaman ini bisa langsung di konversi menjadi harga kekerasan. Dengan demikian metode pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* lebih sederhana. Berikut adalah penjelasan bagaimana metode ini dilakukan. Skema metode *Rockwell* dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6 Prinsip kerja metode pengukuran kekerasan *Rockwell*

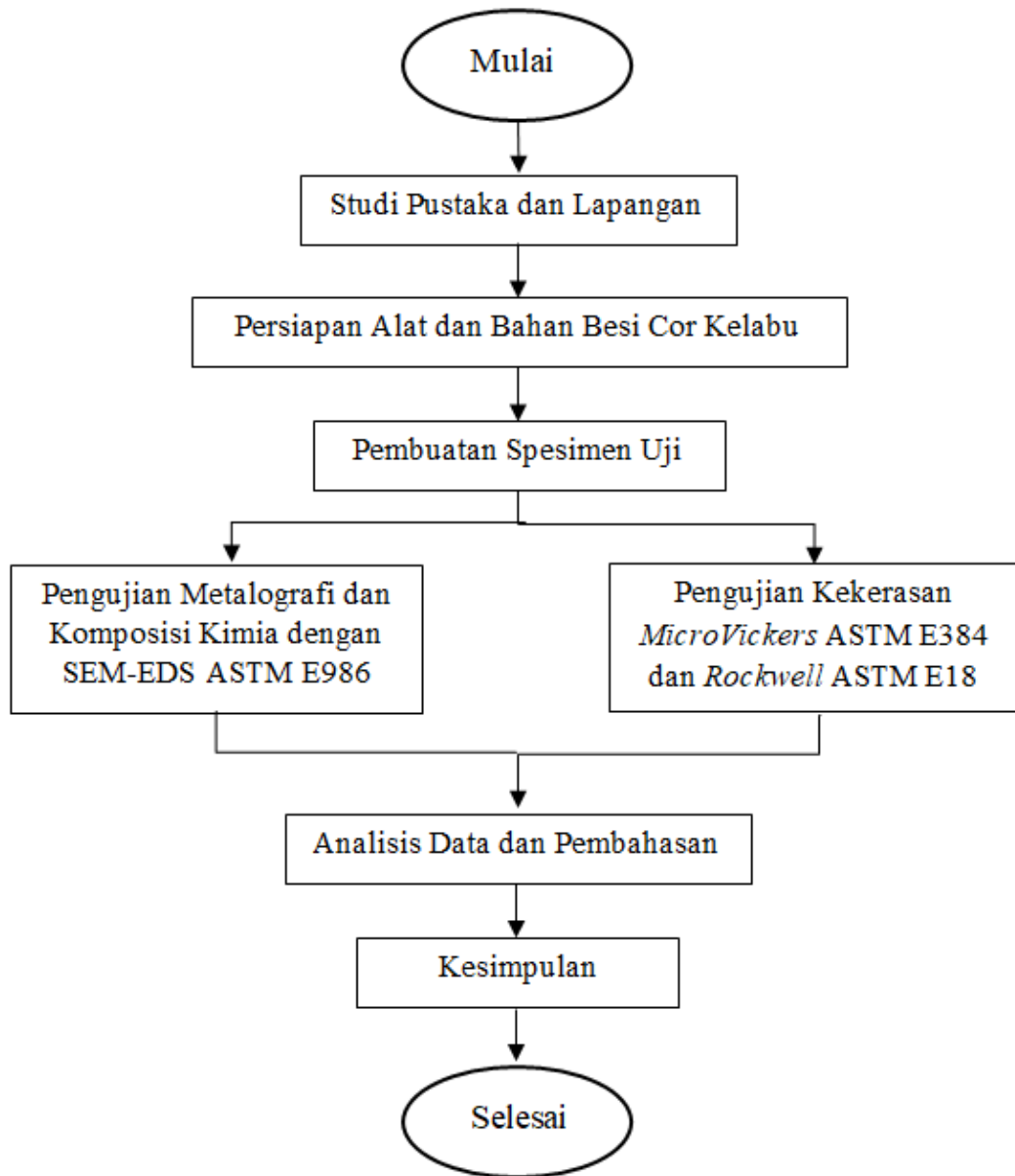
2. METODE

2.1 Metode Penelitian

Pengujian metalografi dan uji komposisi dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDS) berdasar ASTM E986. Pengujian kekerasan pada fasa besi cor kelabu (*gray cast iron*) dilakukan dengan metode *Micro Vickers* dengan standar pengujian ASTM E384. Kemudian pengujian kekerasan pada permukaan besi cor kelabu (*gray cast iron*) dilakukan dengan metode *Rockwell* dengan standar pengujian ASTM E18. Konversi nilai kekerasan *Rockwell* kedalam nilai kekerasan *Vickers* menggunakan *Hardness Conversion Table* sesuai standar SAE J 417.

2.2 Diagram Alir

Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, diagram alir tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7 Diagram alir

2.3 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini, alat dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut:

Alat:

- a. Mesin Gerinda Potong
- b. Mesin Poles
- c. Larutan Etsa
- d. Alat Uji *Scanning Electron Microscope* (SEM)
- e. Alat Uji Kekerasan *Micro Vickers*
- f. Alat Uji Kekerasan *Rockwell*

Bahan:

- a. Besi Cor Kelabu (*gray cast iron*)

2.4 Proses Penelitian

Berikut langkah-langkah yang perlu dilakukan dalam proses pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM).

1. Menyiapkan beberapa perlengkapan pengujian terkait spesimen uji dengan pemeriksaan kebersihan maupun konduktivitas spesimen.
2. Menjepit spesimen yang akan diuji ke dalam meja yang sudah disediakan, serta pastikan terpasang dengan kaku agar getaran semakin kecil.
3. Setelah itu mengatur ketinggian dan kemiringan meja tanpa merubah penjepit spesimen agar tembakan elektron tepat pada titik spesimen uji.
4. Menggunakan vakum bersih $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} mm Hg) atau lebih untuk meminimalkan kontaminasi spesimen yang dihasilkan dari sinar elektron dan hidrokarbon sisa berinteraksi selama pemeriksaan. Kehadiran lapisan kontaminasi memiliki efek yang mengurangi kualitas tepi gambar.
5. Memilih tegangan senjata elektron dalam rentang kondisi pengoperasian yang diinginkan (pengukuran kinerja harus diulang untuk setiap pengaturan kV yang digunakan).
6. Menemukan bidang pada spesimen yang dipilih dengan menunjukkan detail tepi yang diinginkan atau lokasi yang akan discan dengan mengatur *trackball*.
7. Mendapatkan foto jejak garis di tepi yang diinginkan menggunakan waktu perekaman setidaknya 2 detik dan bandwidth 4 kHz (jika SEM dilengkapi dengan kontrol *bandwidth*).
8. Tampilan foto struktur mikro dapat dilihat pada layar monitor, dan dapat diatur kecerahan maupun pembesarannya menggunakan kontrol panel.

Berikut langkah-langkah yang dilakukan pada proses pengujian kekerasan *Micro Vickers*.

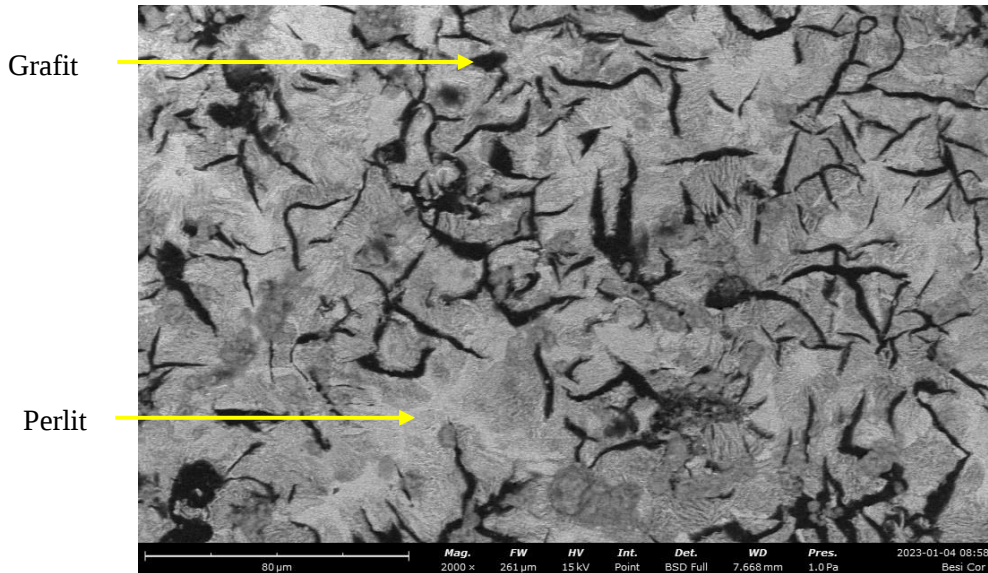
1. Menyiapkan beberapa perlengkapan pengujian berupa spesimen uji dan perangkat uji keras *Micro Vickers*.
2. Spesimen uji diletakkan pada meja uji dan dinaikkan sampai mendekati penekanan (0,2mm – 0,5mm).
3. Memilih beban penekanan 25gf sesuai standar ASTM E384.
4. Tombol start ditekan untuk menghidupkan mesin uji kekerasan *Micro Vickers*.
5. Waktu penerapan beban uji (*dwel time*) standar dilakukan selama 10 - 15 detik.
6. Bekas jejak hasil indentasi diamati dengan menggunakan optik pada mesin dengan cara memutar rumah penekanan dan digantikan dengan lensa mikroskop.
7. Mengukur panjang diagonal pada masing-masing titik bekas penekanan indenter.
8. Hasil pengukuran dihitung menggunakan rumus persamaan Vickers kemudian diambil nilai kekerasan rata-rata.

Berikut langkah-langkah yang dilakukan pada proses pengujian kekerasan *Rockwell*.

1. Menyiapkan beberapa perlengkapan pengujian berupa spesimen uji dan perangkat uji keras *Rockwell*.
2. Memilih tipe *Hardness Rockwell B* (HRB) sesuai jenis material uji (besi cor) pada standar ASTM E18.
3. Memasang indenter bola baja berdiameter 1/16” pada holder.
4. Spesimen uji diletakkan pada meja uji dan dinaikkan sampai mendekati penekanan (8mm – 5mm).
5. Menentukan waktu pembebanan $T_1 = 1$ detik, $T_2 = 15$, detik, $T_3 = 1$ detik
6. Tombol start ditekan untuk menghidupkan mesin uji kekerasan *Rockwell*.
7. Hasil nilai kekerasan *Rockwell* dapat dilihat langsung pada layar alat uji keras *Rockwell*.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisa Hasil Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) Besi Cor Kelabu (*Gray Cast Iron*)



Gambar 8 Foto Struktur Mikro Besi Cor Kelabu

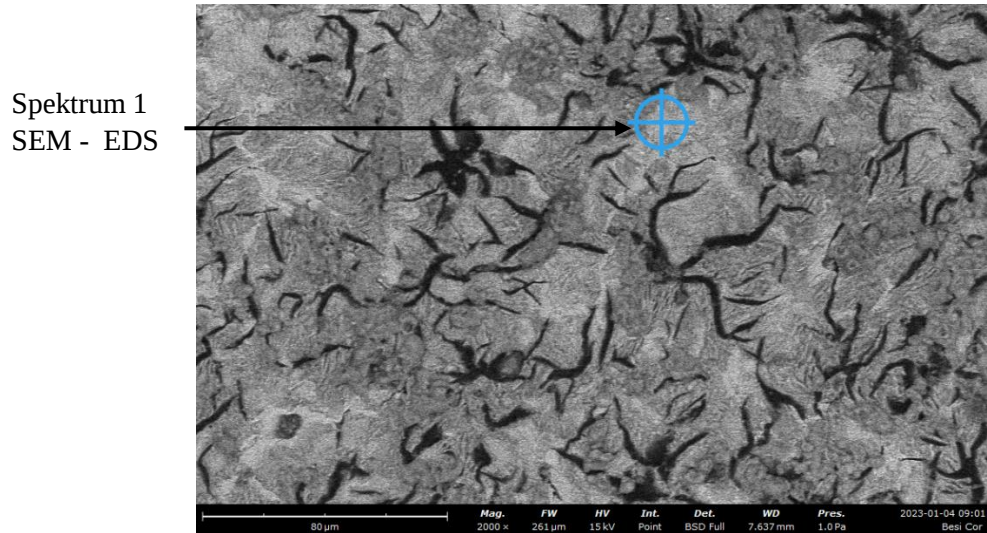
Gambar 8 merupakan foto struktur mikro besi cor kelabu hasil pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*). Dengan sekilas terlihat jelas perbedaan bentuk dan kontras warna struktur mikro pada gambar tersebut, terdapat warna hitam yg berbentuk serpih (*flake*), corak berwarna abu-abu gelap dan corak abu-abu terang. Seperti yang tertera pada gambar 8 bahwa bagian yang berwarna hitam berbentuk flake/serpih merupakan fasa grafit, corak berwarna abu-abu terang yang menunjukkan fasa perlit, dan corak abu-abu gelap merupakan fasa perlit yang teroksidasi. Kehadiran grafit dalam gambar diatas adalah dalam bentuk *flakes* atau serpih dengan dikelilingi oleh fasa perlit. Dikarenakan perlit mendominasi pada gambar tersebut yg memungkinkan grafit tertanam didalam matriks perlit. Sehingga besi cor kelabu ini disebut besi cor kelabu perlitik.

3.2 Analisa Hasil Pengujian EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) Besi Cor Kelabu (*Gray Cast Iron*)

Pengujian EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia fasa besi cor kelabu. Pada penelitian ini

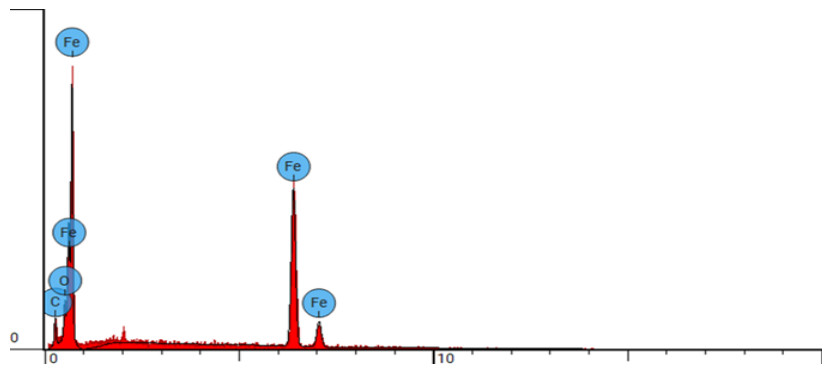
spektrum pertama dilakukan pada fasa perlit, spektrum kedua dilakukan pada fasa perlit yang teroksidasi dan spektrum ketiga dilakukan pada fasa grafit.

3.2.1 Hasil Pengujian EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) Pada Fasa Perlit.



Gambar 9 Titik mikrograf SEM untuk EDS *line analysis* fasa perlit pada besi cor kelabu

Berdasarkan penentuan titik uji EDS gambar 9 pada fasa perlit maka didapatkan *line analysis* EDS fasa perlit seperti yang ditunjukkan gambar 10. Dari *line analysis* fasa perlit diketahui bahwa terdeteksi beberapa unsur komposisi kimia pada spektrum fasa perlit besi cor kelabu. Fe (*Ferro*) merupakan unsur dengan kapasitas tertinggi sebesar 92,7% berat. Sedangkan untuk unsur lainnya dapat dilihat pada tabel 1 dengan presentase komposisi yaitu, unsur C (*Carbon*) sebesar 5,1% berat, O (*Oxygen*) sebesar 2,2% berat.

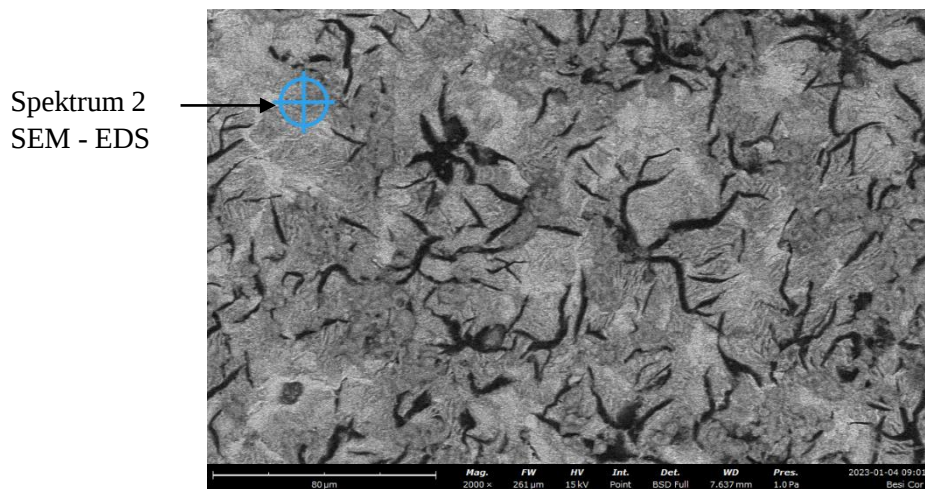


Gambar 10 *line analysis* fasa perlit besi cor kelabu (spektrum 1)

Tabel 1 Hasil *line analysis* fasa perlit besi cor kelabu (spektrum 1)

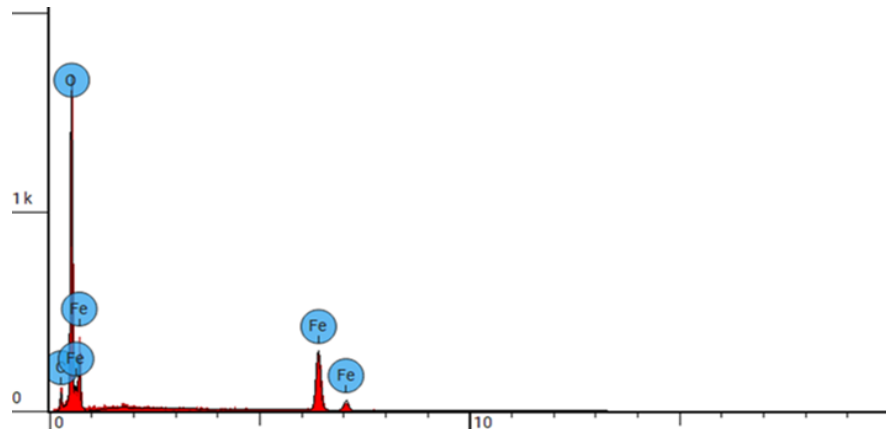
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
6	C	Carbon	19.111	5.100
8	O	Oxygen	6.188	2.200
26	Fe	Iron	74.700	92.700

Pengujian EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) spektrum kedua juga dilakukan pada fasa perlit yang terdampak oksidasi.



Gambar 11 Titik mikrograf SEM untuk EDS *line analysis* fasa Perlit yang teroksidasi pada besi cor kelabu.

Pada pengujian EDS fasa perlit yang terdampak oksidasi didapatkan *line analysis* EDS seperti pada gambar 12 yang menunjukkan munculnya perbedaan beberapa unsur penyusun fasa perlit yang telah teroksidasi. Untuk data prosentase komposisi spektrum fasa perlit, dapat dilihat pada tabel 2 Pada tabel menunjukkan bahwa unsur tertinggi fasa perlit adalah Fe (*Ferro*) sebesar 59,6% berat dan diikuti unsur C (*Carbon*) sebesar 5,3% berat dan unsur O (*Oxygen*) sebesar 35,0%. Pada fasa perlit ini terjadi oksidasi oksigen dengan persentase yang sangat banyak yaitu 35%, hal ini menyebabkan kandungan unsur Fe (*Ferro*) berkurang dan perubahan sifat mekanis kemungkinan dapat terjadi.

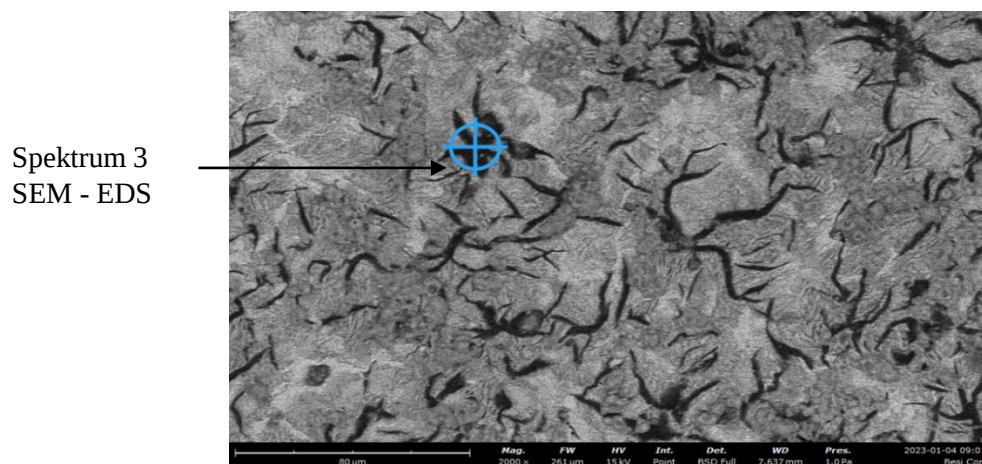


Gambar 12 *line analysis* fasa perlit teroksidasi besi cor kelabu

Tabel 2 Hasil *line analysis* fasa perlit teroksidasi besi cor kelabu (spektrum 1)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
6	C	Carbon	11.940	5.305
8	O	Oxygen	59.187	35.035
26	Fe	Iron	28.873	59.660

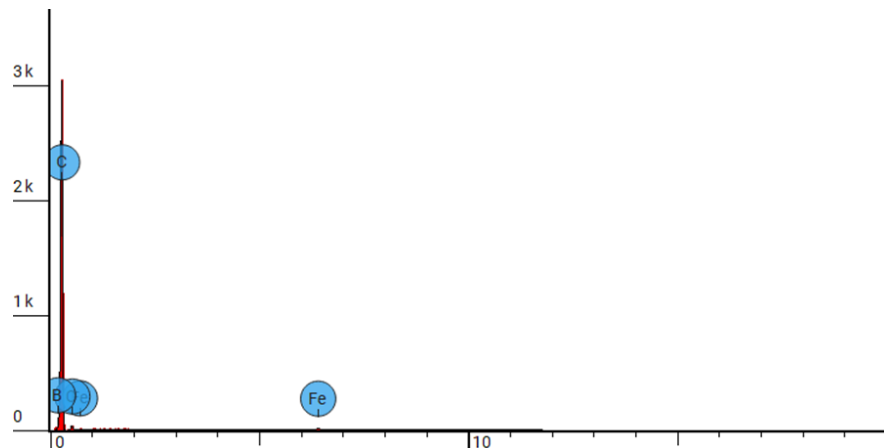
3.2.2 Hasil Pengujian EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) Pada Fasa Grafit.



Gambar 13 Titik mikrograf SEM untuk EDS *line analysis* fasa grafit pada besi cor kelabu

Pada pengujian EDS fasa grafit didapatkan *line analysis* EDS seperti pada gambar 14 yang menunjukkan munculnya beberapa unsur penyusun fasa

grafit. Untuk data prosentase komposisi spektrum fasa grafit, dapat dilihat pada tabel 3 Pada tabel menunjukkan adanya unsur Fe (*Ferro*) sebesar 2.7% berat dan diikuti unsur C (*Carbon*) sebesar 90% berat serta unsur B (*Boron*) sebesar 3,5% berat dan unsur O (*Oxygen*) sebesar 3,8%. Kandungan karbon pada fasa grafit hampir mendekati 100% yang artinya hampir keseluruhan merupakan unsur karbon.



Gambar 14 *Line analysis* fasa grafit besi cor kelabu (spektrum 3)

Tabel 3 Hasil *line analysis* fasa grafit besi cor kelabu (spektrum 3)

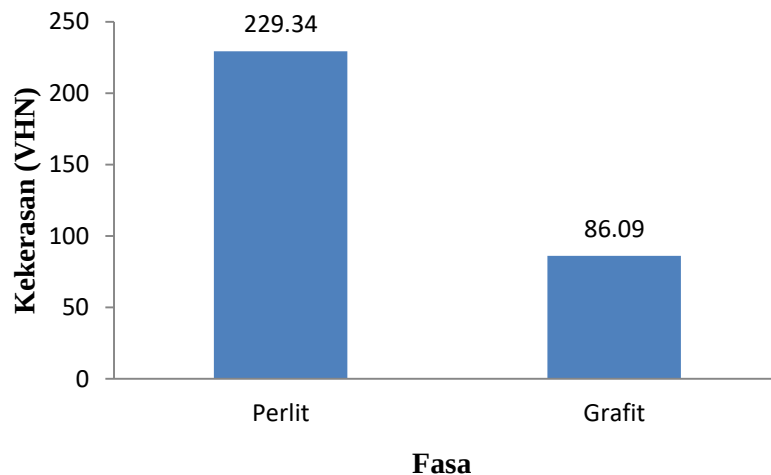
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
5	B	Boron	3.996	3.500
6	C	Carbon	92.477	90.000
8	O	Oxygen	2.931	3.800
26	Fe	Iron	0.597	2.700

3.3 Hasil Pengujian Kekerasan *Micro Vickers*

Data hasil pengujian kekerasan *Micro Vickers* dapat dilihat pada tabel 4, diketahui bahwa nilai kekerasan tertinggi didapat pada fasa perlit sebesar 229,34 VHN. Perlit memiliki strukur yang lebih keras daripada grafit, yang terutama disebabkan oleh adanya fasa sementit atau karbida dalam bentuk lamel-lamel. Sedangkan nilai kekerasan terendah didapat pada fasa grafit dengan nilai kekerasan sebesar 86,09 VHN. Hal ini dikarenakan fasa grafit yang secara umum mempunyai sifat mekanik lunak dikarenakan prosentase C (*Carbon*) yang sangat tinggi.

Tabel 4 Data Hasil Pengujian Kekerasan *Micro Vickers*

Lokasi Titik Uji	Diagonal (μm)		Kekerasan (VHN)	Kekerasan Rata-rata (VHN)
	d ₁	d ₂		
Fasa Perlit	14,30	14,14	229,34	157,715
Fasa Grafit	23,15	23,26	86,09	

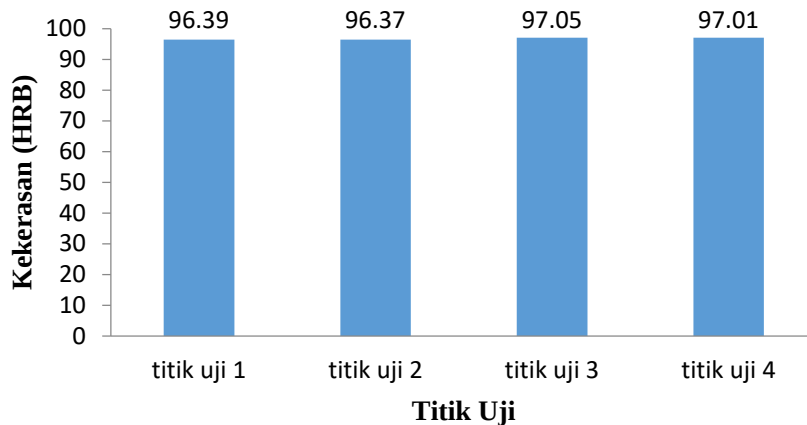
Gambar 15 Histogram hasil pengujian kekerasan *Micro Vickers*

3.4 Hasil Pengujian Kekerasan *Rockwell*

Pengujian kekerasan ini dilakukan dengan metode *Hardness Rockwell B* (HRB) yang bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan pada setiap titik yang di ujikan pada spesimen besi cor kelabu. Berdasar standar ASTM E18, metode ini dilakukan dengan cara memberikan tekanan pada permukaan material siap uji menggunakan indenter bola baja berdiameter 1/16” dengan beban penekanan 100 kgf. Dalam pengujian ini diambil 4 nilai kekerasan. Data hasil pengujian kekerasan *Rockwell* dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5 Hasil pengujian kekerasan *Rockwell*

Titik Uji	Kekerasan (HRB)	Rata-rata (HRB)	Standar Deviasi
Titik uji 1	96,39	96,71	0,38
Titik uji 2	96,37		
Titik uji 3	97,05		
Titik uji 4	97,01		



Gambar 16 Histogram hasil pengujian kekerasan *Rockwell*

Dapat dilihat pada tabel 5, hasil nilai rata-rata dari kekerasan *Rockwell* sebesar 96,71 HRB, kemudian dikonversikan ke dalam angka kekerasan *Vickers* sesuai *Hardness Conversion Table* standar SAE J 417 didapatkan nilai sebesar 230 VHN. Dapat disimpulkan perbandingan angka kekerasan besi cor kelabu sebesar 230 VHN hampir sama dengan kekerasan pada fasa perlit sebesar 229,34 VHN. Hal tersebut terjadi dikarenakan spesimen uji besi cor kelabu didominasi oleh fasa perlit.

4. PENUTUP

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Setelah dilakukan pengujian metalografi dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*), terdapat warna hitam yg berbentuk serpih (*flake*), corak berwarna abu-abu gelap dan corak abu-abu terang. Berdasarkan dengan kandungan unsur penyusun pada setiap fasa yang telah diuji, dapat disimpulkan bahwa warna hitam berbentuk flake serpih (*flake*) merupakan fasa grafit, corak berwarna abu-abu terang merupakan fasa perlit, dan corak berwarna abu – abu gelap merupakan fasa perlit yang terdampak oksidasi.
2. Pada komposisi kimia penyusun besi cor kelabu terdapat beberapa unsur pada setiap fasanya, untuk persentase berdasarkan berat pada fasa perlit terdapat unsur Fe (*Ferro*) sebesar 92,7 % berat, unsur C (*Carbon*) sebesar 5,1 % berat, O (*Oxygen*) sebesar 2,2% berat. Dan persentase berdasarkan berat pada fasa perlit yang terdampak oksidasi terdapat unsur Fe (*Ferro*) sebesar 59,6% berat dan

diikuti unsur C (*Carbon*) sebesar 5,3% berat dan unsur O (*Oxygen*) sebesar 35,0%. Sedangkan persentase berdasarkan berat pada fasa grafit terdapat unsur Fe (*Ferro*) sebesar 2.7% berat, unsur C (*Carbon*) sebesar 90% berat, unsur B (*Boron*) 3,5% dan unsur O (*Oxygen*) sebesar 3,8% berat.

3. Berdasarkan hasil pengujian *Micro Vickers*, dapat diketahui bahwa nilai kekerasan tertinggi didapat pada fasa perlit sebesar 229,34 VHN. Sedangkan nilai kekerasan terendah didapat pada fasa grafit dengan nilai kekerasan sebesar 86,09 VHN. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *Rockwell*, didapatkan nilai rata-rata dari kekerasan *Rockwell* sebesar 96,71 HRB, kemudian dikonversikan ke dalam angka kekerasan *Vickers* didapatkan nilai sebesar 230 VHN.

PERSANTUNAN

Terima kasih kepada Bapak Ir. Agung Setyo Darmawan, S.T., M.T. selaku Pembimbing Tugas Akhir, Bapak Ir. Agus Dwi Anggono, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Ir. H. Bambang Waluyo Febriantoko, S.T., M.T. selaku Anggota Dewan Penguji I dan II atas bimbingannya dalam penulisan laporan Tugas Akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Bayuseno, Athanasius P. 2010. "Penambahan Magnesium-Ferrosilikon Pada Proses Pembuatan Besi Cor Grafit Bulat: Evaluasi Terhadap Peningkatan Sifat Mekanik Dan Impak". Magister Teknik Mesin, Pascasarjana Universitas Diponegoro. <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/rotasi/article/view/1987>
- Callister Jr, W. D. & Rethwisch, D. G. 2014. "Materials Science and Engineering: An Introduction (10 th Edition)". United States of America: John Wiley, Inc
- Darmadi, Wahyu, Ngafwan, dan Sedyono, J. 2015. "Pengaruh Media Pendinginan Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Pada Besi Cor". <http://eprints.ums.ac.id/38332/1/Naskah%20Publikasi.pdf>.
- Darmawan, A. S. 2020. Ilmu Bahan Teknik. Surakarta: Muhammadiyah University Press.
- Darmawan, A. S., & Masyrukan. 2019. Struktur dan Sifat Material. Surakarta: Muhammadiyah University Press.
- Darmo, S. 2008. "Pengaruh Tebal Besi Cor Kelabu Terhadap Struktur Mikro Coran". Prosiding Seminar Nasional Teknoin. Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada. <https://journal.uui.ac.id/Teknoin/article/view/2057/1867>.

- Dawson, Steve. 1999. *Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design*. Germany : Werkstoff und Automobilantrieb (Materials in Powertrain VDI (Verein Deutscher Ingenieure))
- Genculu, Semih. 2017. *Cast Irons -- Properties and Applications*. CAB Worldwide.
- Goldstein, Joseph I. et al. 2003. *Scanning Electron Microscope and X-Ray Microanalysis*. Third Edition. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-0215-9>.
- Goldstein, Joseph I. et al. 2018. *Scanning Electron Microscope and X-Ray Microanalysis*. Fourth Edition. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- Gregorian, Alexander D. 2021. “Investigasi Pengaruh Variasi Holding Time Proses Quenching Dan Tempering Terhadap Kekuatan Mekanis Besi Cor FC-25”. Teknik Mesin Universitas Sanata Dharma Yogyakarta.
- Higgins, Raymond A, 1994. *The Properties and Material*. Industrial Press. England : Hodder and Stoughton.
- Hidayat, Muhammad A. & Darmawan, A. S. 2021. “Analisa Fasa Pada Besi Cor Kelabu dan Besi Cor Nodular Menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) Dengan Backscattered Electron (BSE)”. <http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/95886>.
- Massalski, T. B. 1990. “Binary Alloy Phase Diagrams (Second Edition)”. United States Of America: ASM International, Metals Park.
- Oktavianto, D. D. 2019. “Analisis Pengaruh Media Pendingin Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Besi Cor Kelabu FC-25 Dengan Mangan 1,2%”. Teknik Mesin Universitas Sanata Dharma.
- Sudiyanto, A. & Shiddiq, Najmullah A. 2020 “Proses Pengecoran Logam dan Analisa Cacat pada Produk B3x6”. Program Studi Teknik Metalurgi, Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.
<http://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/jmept/article/view/5010>
- Supriyono. 2017. *Material Teknik*. Cetakan 1. Surakarta: Muhammadiyah University Press.
- Surdia, T. & Saito, S. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. 4th ed. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Surdia, T. & Saito, S. 1996. *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Surdia, T. & Chijiwa, K. 1996. *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Surdia, Tata., 2000. *Teknik Pengecoran Logam edisi ke 8*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita.

- Syafi'I, Imam. 2017. "Pengaruh Variasi Unsur Silikon Terhadap Ketangguhan Besi Cor Kelabu (*Grey Cast Iron*). Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang".
- Syafi'udin, I. 2016. "Pengaruh Kadar Mangan (Mn) Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Baja Paduan Fe-17Cr-xMn Melalui Metode Peleburan". Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember. <https://repository.its.ac.id/48808/1/2712100039-Undergraduate-Thesis.pdf>
- Wijayanto, Sanjaya O. & Bayuseno, Athanasius P. 2014. "Analisis Kegagalan Material Pipa Ferrule Nickel Alloy N06025 pada Waste Heat Boiler Akibat Suhu Tinggi Berdasarkan Pengujian : Mikrografil dan Kekerasan". Teknik Mesin Universitas Diponegoro. <https://media.neliti.com/media/publications/140883-ID-none.pdf>