

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN *CARBURIZER* BAJA
KARBON RENDAH PROSES *PACK CARBURIZING*
TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO
UNTUK APLIKASI DODOS**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Yehezkiel Purba

3334180051

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN**

2023

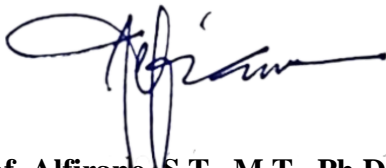
LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN *CARBURIZER* BAJA
KARBON RENDAH PROSES *PACK CARBURIZING*
TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO
UNTUK APLIKASI DODOS**

SKRIPSI

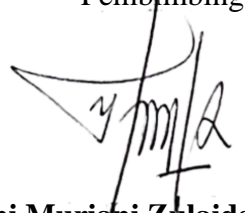
Disusun untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Pembimbing I



Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197406292003121001

Pembimbing II



Yeni Muriani Zulaida, S.T., M.T
NIP. 199012142019032022

LEMBAR PERSETUJUAN

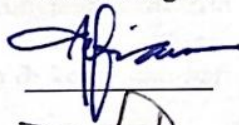
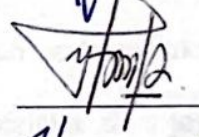
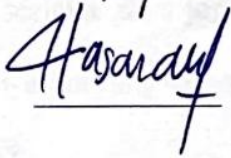
PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN *CARBURIZER* BAJA
KARBON RENDAH PROSES *PACK CARBURIZING*
TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO
UNTUK APLIKASI DODOS

Disusun dan diajukan oleh:

Yehezkiel Purba

3334180051

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 5 Juli 2023

	Susunan Dewan Penguji	Tanda Tangan
Penguji I	: <u>Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D</u>	
Penguji II	: <u>Yeni Muriani Zulaida, S.T., M.T</u>	
Penguji III	: <u>Indah Uswatun Hasanah, S.T., M.T</u>	

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc.

NIP. 197804102003121001

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pengaruh Variasi *Holding Time* dan *Carburizer* Baja
 Carbon Rendah Proses *Pack Carburizing* terhadap Nilai
Kekerasan dan Struktur Mikro untuk Aplikasi Dodos

Nama Mahasiswa : Yehezkiel Purba

NIM : 3334180051

Fakultas : Teknik Metalurgi

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar pernyataan ini.

Cilegon, 7 Juli 2023

Yehezkiel Purba
NIM. 3334180051

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi proses *carburizing* baja SS400 untuk aplikasi dodos dengan variasi komposisi dan waktu tahan, dengan aplikasi potensial dalam industri dodos. *Carburizing* adalah proses perlakuan panas yang melibatkan penambahan *carbon* ke permukaan logam untuk meningkatkan sifat-sifat mekaniknya. Proses *carburizing* dilakukan pada suhu 950°C dengan menggunakan komposisi 60A40E, 70A30, dan 80A20E, serta waktu tahan selama 1 jam, 2 jam, dan 3 jam. Analisis yang dilakukan meliputi kekerasan, fasa, kedalaman case, dan mikrostruktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan fraksi *carbon* sebagai *carburizer* menghasilkan peningkatan kekerasan pada baja SS400, yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap aus dan kekuatan bahan. Kekerasan tertinggi tercapai pada komposisi 80A20E dengan waktu tahan 3 jam, mencapai nilai kekerasan maksimum sebesar 778,36 HV. Penambahan waktu tahan juga meningkatkan difusi *carbon* secara *interstitial*, yang berkontribusi pada peningkatan kekerasan. Katalis *energizer* BaCO₃ terbukti meningkatkan koefisien difusi *carbon* pada baja yang dapat mempercepat proses *carburizing* dan meningkatkan efisiensi produksi dalam industri dodos. Semakin tinggi fraksi *energizer* dan waktu tahan, kedalaman penetrasi *carbon* dalam baja juga meningkat, yang dapat meningkatkan ketahanan permukaan logam terhadap abrasi. Peningkatan kekerasan juga terkait dengan pembentukan fasa *cementite proeutectoid* dimana diperoleh dalam komposisi >60% A dan waktu tahan >1 jam. Analisis *EDS* menunjukkan distribusi *carbon* yang merata dari permukaan hingga inti sampel, yang menghasilkan sifat mekanik yang konsisten dan tahan lama.

Kata Kunci: Baja *carbon* rendah, *Pack Carburizing*, SS400, Perlakuan Panas

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan kakak yang selalu memberikan semangat dan doa selama masa perkuliahan.
2. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc., selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, dan Koordinator Skripsi.
3. Ibu Ir. Soesaptri Oediyani, S.T., M.T., selaku Dosen Wali yang membimbing saya dalam hal akademik.
4. Bapak Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I skripsi yang telah membimbing dan memberikan saran selama proses penelitian sampai sidang laporan skripsi.
5. Ibu Yeni Muriani Zulaida, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II skripsi yang telah membimbing dan memberikan saran penulis dalam penyusunan laporan skripsi sampai sidang skripsi.
6. Keluarga besar Teknik Metalurgi 2018 yang telah membantu dan memberi semangat selama masa perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih banyak kekurangan, sehingga penulis terbuka untuk kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk para pembaca pada umumnya, terima kasih.

Cilegon, _ Januari 2023

Yehezkiel Purba

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI	xii
Bab I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.5 Sistematika Penulisan	7
Bab II Tinjauan Pustaka	9
2.1 Baja <i>Carbon</i> Rendah (<i>Low Carbon Steel</i>).....	9
2.2 Baja SS400	14
2.2.1 Aplikasi Baja SS400 sebagai Dodos	16
2.3 <i>Pack Carburizing</i>	19
2.3.1 Pengaruh Waktu Tahan (<i> Holding Time</i>)	27
2.3.2 Pengaruh Komposisi <i>Carburizer</i>	32
2.4 Difusi <i>Carbon</i>	37
2.5.1 Difusi Tidak Menetap (<i>Unsteady State</i>).....	38
2.5.2 Koefisien Difusi	39
Bab III Metode Penelitian	41
3.1 Diagram Alir.....	41
3.2 Alat dan Bahan	43
3.2.1 Alat-alat.....	43
3.2.2 Bahan-bahan.....	43

3.3	Prosedur Percobaan	44
3.3.1	Preparasi Sampel	44
3.3.2	Proses Perlakuan Panas <i>Pack Carburizing</i>	44
3.3.3	Proses Pendinginan Cepat (<i>Quenching</i>).....	46
3.3.4	Proses <i>Mounting</i>	46
3.3.5	Proses <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i>	46
3.3.6	Proses Etsa.....	47
3.3.7	Pengujian Sampel.....	48
3.3.8	Penamaan Sampel	51
Bab IV Hasil Dan Pembahasan.....		53
4.1	Hasil Kekerasan.....	53
4.2	Hasil <i>Case Depth</i>	54
4.3	Hasil Fasa Mikrostruktur	61
4.5	Hasil SEM-EDS.....	68
4.6	Hasil Kalkulasi Koefisien Difusi	67
4.7	Pengaruh Dari Waktu Tahan <i>Carburizing</i>	68
4.7	Pengaruh Dari Komposisi Fraksi <i>Carburizer</i>	76
Bab V Kesimpulan Dan Saran		83
5.1	Kesimpulan.....	83
5.2	Saran	84
DAFTAR PUSTAKA		85
LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN		89
A.1	Perhitungan Koefisien Difusi	90
A.2	Perhitungan <i>Case Depth</i>	92
A.3	Perhitungan Nilai Kekerasan	94
A.4	Perhitungan Volume.....	95
LAMPIRAN B DATA PENELITIAN.....		97
LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN		115

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2. 1 Komposisi Kimia	15
Tabel 3. 1 Penamaan Sampel	51
Tabel 4. 1 Hasil Data Uji Keras	53
Tabel 4. 2 Hasil Data <i>Case Depth</i>	54
Tabel 4. 3 Hasil Data <i>EDS</i>	69
Tabel 4. 4 Hasil Kalkulasi Koefisien Difusi	70
Tabel 4. 4 Hasil Kalkulasi Koefisien Difusi	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2. 1 Skematik Proses <i>Pack Carburizing</i>	20
Gambar 2. 2 Proses <i>Pack Carburizing</i>	23
Gambar 2. 3 Sampel Hasil <i>Pack Carburizing</i>	37
Gambar 2. 4 Dodos Kelapa Sawit	18
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	42
Gambar 3. 2 Skema Bentuk Pack	45
Gambar 3. 3 Skema dari <i>Scanning Electron Microscope</i>	51
Gambar 4. 1 Hasil <i>Case Depth</i> 1 Jam	56
Gambar 4. 2 Hasil <i>Case Depth</i> 2 Jam	58
Gambar 4. 3 Hasil <i>Case Depth</i> 2 Jam	60
Gambar 4. 4 Hasil Mikrostruktur Sampel 1 Jam.....	62
Gambar 4. 5 Hasil Mikrostruktur Sampel 2 Jam.....	64
Gambar 4. 6 Hasil Mikrostruktur Sampel 3 Jam.....	66
Gambar 4. 7 Hasil <i>EDS</i> Sampel 60A-40E	68
Gambar 4. 8 Hasil <i>EDS</i> Sampel 70A-30E	69
Gambar 4. 9 Hasil <i>EDS</i> Sampel 80A-20E	69
Gambar 4. 11 Pengaruh Waktu <i>Carburizing</i> Terhadap Kekerasan.....	70
Gambar 4. 12 Pengaruh Waktu <i>Carburizing</i> Terhadap Koefisien.....	71
Gambar 4. 13 Pengaruh Waktu <i>Carburizing</i> Terhadap <i>Case Depth</i>	73
Gambar 4. 14 Perbandingan Strutur Mikro Terhadap Waktu <i>Carburizing</i>	74
Gambar 4. 15 Pengaruh Fraksi Terhadap Nilai Kekerasan	76
Gambar 4. 16 Pengaruh Fraksi Komposisi Terhadap Koefisien Difusi.....	78
Gambar 4. 17 Pengaruh Fraksi Komposisi Terhadap <i>Case Depth</i>	80
Gambar 4. 18 Perbandingan Strutur Mikro Terhadap Komposisi <i>Energizer</i>	81
Gambar C. 1 Ampelas	116
Gambar C. 2 Apron	116
Gambar C. 3 <i>Hairdryer</i>	116

Gambar C. 4 Helm.	116
Gambar C. 5 Jangka Sorong.....	116
Gambar C. 6 Mesin <i>Polishing</i>	116
Gambar C. 7 Mesin Potong.	116
Gambar C. 8 Mikrometer Skrup.....	116
Gambar C. 9 Mikroskop Optik.	117
Gambar C. 10 <i>Muffle Furnace</i>	117
Gambar C. 11 Penjepit.	117
Gambar C. 12 Wadah Sampel.....	117
Gambar C. 13 Polish wol	117
Gambar C. 14 Sarung Tangan.....	117
Gambar C. 15 Wadah Media Pendingin.	117
Gambar C. 16 Mesin <i>Mounting</i>	117

DAFTAR NOTASI

Notasi	Nama	Satuan
A	Arang (<i>Carburizer</i>)	%
E	BaCO ₃ (<i>Energizer</i>)	%
D	Koefisien Difusi	m ² /s
t	Waktu	S
T	Temperatur	K
C ₀	Konsentrasi OES	% w.t
C _x	Konsentrasi pada x	% w.t
C _s	Konsentrasi pada permukaan	% w.t
x	Jarak	cm
VHN	<i>Vickers Hardness</i>	HV
BRN	<i>Brinell Hardness</i>	HB
SI	Satuan Internasional	

Bab I

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Baja merupakan jenis logam yang paling sering digunakan untuk pengaplikasian dalam kehidupan sehari-hari. Baja memiliki berbagai macam sifat dan karakter yang sangat bervariasi, sehingga dapat memenuhi kebutuhan masyarakat Indonesia pada umumnya (Darmanto, 2006). Baja kerap kali digunakan sebagai bahan dasar pembuatan komponen, baik itu untuk industri permesinan maupun konstruksi bangunan. Selain itu, baja juga memiliki peranan penting dalam dunia industri, baik itu skala kecil hingga skala besar. Industri dalam skala kecil yang berkembang di masyarakat dapat meningkatkan perekonomian di Indonesia (Muhammad Abdul Azis, 2019). Jenis industri kecil yang berkembang di masyarakat, salah satunya industri pandai besi. Industri pandai besi biasanya memproduksi alat-alat yang digunakan dalam pertanian dan perkebunan, seperti halnya cangkul, sabit dan sekop. Industri pandai besi yang berkembang di masyarakat masih sangatlah konvensional, sehingga produk yang dihasilkan sangatlah dibawah standar. Biasanya produk yang dihasilkan masih memiliki tingkat kekerasan yang rendah, laju keausan tinggi, mudah patah sehingga produknya tidak bertahan lama. Mulai dari bahan yang digunakan, hingga proses perlakuan panas yang diterapkan dapat mempengaruhi hasil akhir produknya. Penyebab utamanya disebabkan karena penggunaan bahan baku utamanya

memiliki tingkat kualitas yang rendah, biasanya memanfaatkan baja-baja bekas (Abidah, 2019).

Pada dasarnya, industri pandai besi dapat menggunakan berbagai macam jenis baja dengan kualitas yang lebih baik, jika dibandingkan menggunakan baja bekas rongsokan. Baja yang dapat digunakan memiliki berbagai macam klasifikasi yang berbeda-beda. Baja dibedakan berdasarkan pengaruh kadar *carbon* pada sedikit atau banyaknya dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu baja *carbon* rendah ($>0,3\%$), baja *carbon* sedang ($0,3-0,7\%$) dan baja *carbon* tinggi ($0,7-1,7\%$). Baja *carbon* rendah dapat digunakan sebagai bahan baku dalam industri pandai besi, karena sifat bajanya memiliki kadar *carbon* rendah sangat lunak, tetapi mempunyai tingkat keuletan yang tinggi, dan permukaannya (*case hardening*) mudah dilas dan ditempa. Baja *carbon* rendah sering digunakan untuk pengaplikasian konstruksi jembatan, mur, baut, pelat, kawat dan pipa (Apriatun, Taufikurahman, & Sundari, 2021). Salah satu baja *carbon* rendah yang dapat digunakan adalah baja SS400. Baja SS400 merupakan baja dengan kadar *carbon* $0,17\%$ C. Namun, baja SS400 tidak dapat dikeraskan (*hardening*) atau perlakuan panas (*heat treatment*) melalui prosesnya *quenching and tempering*. Proses perlakuan panas yang cocok agar baja SS400 dapat dikeraskan melalui *surface hardening*, seperti *pack carburizing* (Kurniawan & Drastiawati, 2019).

Pack carburizing adalah proses *carburizing* untuk mengeraskan permukaan menggunakan media pada *carburizing*. Sumber *carbon* yang biasanya digunakan adalah berasal dari tumbuh-tumbuhan, seperti batok kelapa, kayu jati, bambu dan lain sebagainya yang diiringi penggunaan *energizer* (Zainuri, Sinarep, & Sujita,

2022). Penambahan *energizer* berfungsi untuk mempercepat pembentukan gas CO selama proses berlangsung. Jenis *energizer* yang dapat digunakan antara lain, BaCO_3 , Na_2CO_3 dan CaCO_3 . Berbagai jenis *energizer* sama-sama untuk meningkatkan potensi *carbon* dari agen *carburizing* nya (S Darmo, 2019). *Pack carburizing* sering digunakan untuk mencapai kekerasan permukaan yang tinggi, sambil mempertahankan ketangguhan dan keuletan alami dari baja itu sendiri. Berbagai parameter yang dapat diterapkan, antara lain temperatur kerja, durasi proses, serta komposisi *energizer* dan jenis *carbon* yang digunakan. Secara umum, temperatur *carburizing* yang lebih tinggi dan waktu *carburizing* yang lebih lama menghasilkan kedalaman selubung efektif yang lebih tebal dan kekerasan permukaan yang lebih tinggi (Ramli & Wu, 2022). Pada penelitian yang dilakukan oleh Novi Sukma Drastiawati (Kurniawan & Drastiawati, 2019), baja SS400 dilakukan proses *pack carburizing* pada temperatur 950°C selama 2 jam dengan jenis arang yang berasal dari tempurung kelapa dan *energizer* CaCO_3 , mampu menghasilkan nilai kekerasan *Vickers* sebesar 861 HV, diikuti dengan pembentukan fase *martensite* yang lebih dominan. Selain itu, dipertegas kembali dengan penelitian yang dilakukan oleh Aidha Faizatul Abidah (Abidah, 2019), baja SS400 dilakukan proses *pack carburizing* pada temperatur 955°C selama 3 jam dengan jenis arang yang digunakan adalah tempurung kelapa dengan *energizer*-nya BaCO_3 , mampu menghasilkan nilai kekerasan *Rockwell* sebesar 868,3 HV. Perubahan nilai kekerasan yang mengalami peningkatan pada baja SS400 ini diakibatkan oleh proses *pack carburizing*, sehingga metode ini efektif untuk diterapkan dalam industri perkakas pertanian dan perkebunan. Maka dari itu, pada kesempatan

penelitian kali ini baja SS400 akan dilakukan tahapan proses *pack carburizing* dengan variasi temperatur dan komposisi penambahan *carbon* tempurung kelapa dan *energizer* BaCO₃.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah pengaruh waktu tahan dan persen fraksi berat yang digunakan pada baja ASTM A 36 SS400. Hal ini dilakukan karena limbah dari salah satu industri baja di Indonesia yang hampir sampai 60% dari total produk yang diproses hanya dijual dengan harga yang cukup rendah. Baja SS400 yang bahan bakunya menggunakan baja *carbon* rendah perlu dilakukan proses perlakuan panas yang mampu meningkatkan sifat mekanik baja SS400 sehingga dapat mencapai standar dari alat panen dodos yang akan dibuat. Proses perlakuan panas *pack carburizing* dipilih untuk dilakukan pada material baja SS400 dengan beberapa tahapan yaitu pemanasan, proses *quenching* yang dilakukan dengan perbedaan waktu tahan dan persen fraksi berat. Dalam proses *pack carburizing* ini dapat meningkatkan persen *martensite* yang terbentuk dan meningkatkan kekerasan (*hardness*). Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh waktu tahan dan fraksi komposisi arang:*energizer* pada proses *pack carburizing* terhadap sifat mekanik pada baja *carbon* rendah ASTM A36 SS400 produk PT. Krakatau Baja Konstruksi.
2. Bagaimana pengaruh waktu tahan dan fraksi komposisi arang:*energizer*

pada proses *pack carburizing* terhadap struktur mikro baja SS400 .

3. Bagaimana pengaruh waktu tahan dan fraksi komposisi arang:*energizer* pada proses *pack carburizing* terhadap kedalaman total difusi baja SS400.

1.3 Tujuan Penelitian

Pada kesempatan kali ini, tujuan penelitian secara umum adalah untuk mengkaji pengaruh dari proses *pack carburizing* terhadap nilai kekerasan dan fasa *martensite* yang terbentuk pada baja SS400 sebagai alternatif aplikasi perabotan rumah tangga. Secara khusus, tujuan dilakukannya penelitian ini, antara lain:

1. Menganalisis pengaruh waktu tahan dan fraksi komposisi arang batok kelapa dan BaCO_3 hasil proses *pack carburizing* terhadap nilai kekerasan baja SS400.
2. Menganalisis pengaruh waktu tahan dan fraksi berat arang batok kelapa dan BaCO_3 hasil proses *pack carburizing* terhadap struktur mikro baja SS400.
3. Menganalisis pengaruh waktu tahan dan fraksi berat arang batok kelapa dan BaCO_3 hasil proses *pack carburizing* terhadap kedalaman total difusi baja SS400.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup pada penelitian kali ini, antara lain:

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan baja SS400 hasil *hot rolling* limbah dari PT. Krakatau Baja Konstruksi.
2. Karakterisasi sampel sebelum dilakukan perlakuan panas menggunakan OES.
3. Proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang dilakukan pada penelitian ini *pack carburizing* yang berlangsung di Laboratorium Metalurgi FT. UNTIRTA.
4. Proses pengujian mekanik dan struktur mikro dilakukan pada Laboratorium Material Manufaktur dan Laboratorium Metalurgi FT. UNTIRTA.
5. Variasi bebas:
 - a. Variasi waktu tahan: 1, 2, 3 Jam.
 - b. Variasi % fraksi berat: 60%:40%, 70%:30%, 80%:20%
6. Variasi tetap: a. Bahan baku menggunakan baja SS400.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan laporan penelitian ini terdiri dari lima bab yaitu sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan

Berisi penjelasan pendahuluan pada penelitian ini mengenai latar belakang pada penelitian ini dan standard baja SS400, rumusan masalah yang menjelaskan variabel yang diamati, tujuan penelitian yang menjadi focus utama dalam penelitian ini, ruang lingkup penelitian yang menjelaskan tentang hal-hal yang membatasi pada penelitian ini, dan sistematika penulisan laporan.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Berisi penjelasan terkait teori baja *carbon* rendah secara umum, standar ASTM A36, teori terkait *pack carburizing* yang dihubungkan dengan sifat mekanik melalui pengujian kekerasan dan pengujian SEM.

3. Bab III Metode Penelitian

Pada Bab ini akan menjelaskan tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta prosedur penelitian mulai dari pengkodean sampel sampai dengan proses pengujian.

4. Bab IV Hasil dan Pembahasan

Pada Bab ini menjelaskan terkait data hasil penelitian *pack carburizing* dengan variasi waktu pemanasan dan fraksi berat serta pembahasan mengenai pengaruh-pengaruh variabel yang digunakan terhadap data yang dihasilkan.

5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Pada Bab ini akan menjelaskan tentang kesimpulan penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

6. Daftar Pustaka

Dalam penyusunan laporan skripsi yang baik perlu didukung oleh referensi yang relevan dengan penelitian ini. Daftar pustaka berisi tentang referensi yang digunakan dalam penyusunan skripsi studi pengaruh waktu pemanasan dan fraksi berat terhadap kedalaman total difusi dan sifat mekanik baja *carbon* rendah pada proses *pack carburizing*.

7. Lampiran

Lampiran berisi tentang contoh perhitungan, data hasil pengujian, serta alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini.

Bab II

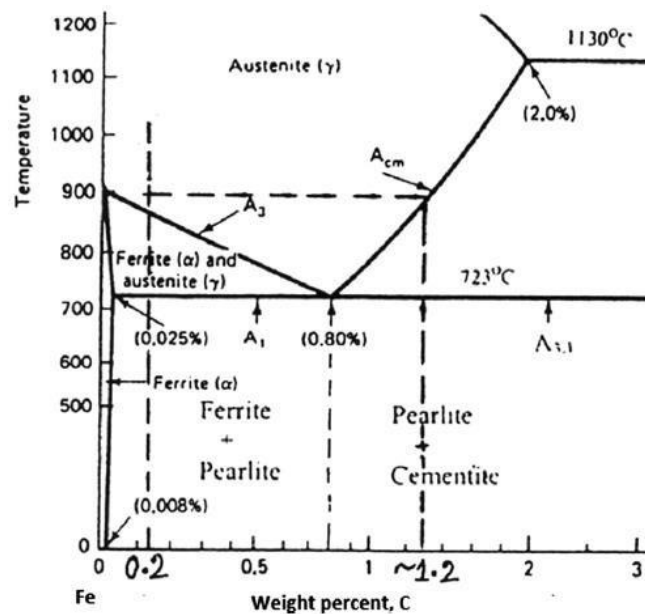
Tinjauan Pustaka

2.1 Baja Carbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja *carbon* rendah memiliki kandungan hingga 0,30% C. Kategori baja terbesar di kelas ini adalah produk canai datar (lembaran atau *strip*), biasanya dalam kondisi canai dingin dan anil. Baja yang dapat dibentuk ini memiliki kandungan *carbon* yang sangat rendah, kurang dari 0,10% C dan kurang dari 0,4% Mn. Penggunaannya secara umum adalah untuk panel bodi, pelat timah, dan produk kawat. Untuk bagian lembaran logam dan baja canai, kandungan *carbon* dapat ditingkatkan menjadi sekitar 0,30% dan mangan dapat ditingkatkan hingga 1,5%. Bahan ini dapat digunakan untuk produksi seperti halnya, stempel, tempa, tabung mulus, dan pelat ketel. Lembaran dan *strip* baja *carbon* rendah canai dingin diproduksi dari gulungan canai panas dengan reduksi dingin ke ketebalan yang diinginkan baik di pabrik tandem kontinu atau pabrik reduksi dingin terbalik. Proses pengerolan dingin memungkinkan produksi alat pengukur yang lebih tipis daripada pengerolan panas. Keuntungan lain dari baja canai dingin adalah penyelesaian permukaan yang sangat baik dan stabilitas dimensi. Karena baja canai keras dan kurang produktif. Baja dianil untuk mengoptimalkan sifat mampu bentuk kecuali diperlukan pengerasan kerja penuh (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Umumnya, baja *carbon* mengandung hingga 2% total tembaga dan dapat dibagi menjadi baja *carbon* rendah, baja *carbon* sedang, baja *carbon* tinggi, dan baja *carbon* ekstra tinggi. Baja *ferriteeik*, baja *carbon* sangat rendah dengan

kemampuan pengerasan yang cukup yang berubah pada pendinginan menjadi struktur *ferrite acicular* kekuatan tinggi yang sangat halus (bainit *carbon* rendah) alih-alih struktur *ferrite poligonal* biasa. Lembaran dan *strip* baja *carbon* rendah canai panas biasanya diproduksi di pabrik canai panas terus menerus. Beberapa *hot rolling mills* dapat menghasilkan ukuran lembaran baja *carbon* rendah serendah 1,214 mm (0,0478 inci), tetapi 1,897 mm (0,0747 inci) dianggap sebagai batas praktis yang lebih rendah (A. S. M. *International & Committee*, 2005).



Gambar 2. 1 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Baja mengandung fasa *austenite* pada temperatur karburisasi. Karburisasi berkaitan dengan larutan padat *carbon* dalam fasa *austenite*. Batas kadar *carbon* pada fasa ini bergantung pada temperatur dan komposisi baja itu sendiri. Kadar *carbon* maksimum yang dapat larut dalam *austenite* pada temperatur karburisasi berada pada garis Acm. Jika temperatur karburisasi yang digunakan sebesar 900 °C, maka kadar *carbon* maksimum yang larut sebanyak 1,2 wt%, hal ini

ditunjukkan pada Gambar 2.1. Baja *carbon* rendah tidak cukup keras untuk membentuk *martensite*, kecuali di bagian yang paling tipis, sehingga mereka terutama diproduksi dengan struktur mikro *ferrite* yang memiliki keuletan yang baik untuk pengerjaan dingin dan operasi pembentukan. Proses *rolling* yang terkontrol serupa digunakan di seluruh dunia untuk menghasilkan baja *carbon* rendah butiran halus. Dalam beberapa kasus, pembentukan lembaran logam baja *carbon* rendah, pemilihan proses deoksidasi dapat berdampak signifikan pada kinerja baja. Dalam kasus seperti itu, tepat untuk menunjukkan praktik yang diinginkan. Pada baja *carbon* rendah silikon biasanya mempengaruhi kualitas permukaan dan kondisi ini lebih terlihat pada kadar *carbon* sulfida rendah (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Selain produk *strip* dan baja *carbon* rendah, banyak produk tambahan tersedia yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan spesifik pelanggan. Produk ini sering dibuat dari baja *carbon* rendah dengan kimia yang sedikit berbeda. Untuk dianggap sebagai kadar *carbon* rendah normal, baja harus mengandung tidak lebih dari 0,25% C, 1,65% Mn, 0,60% S dan 0,60% Cu, tetapi tidak ada nitrogen, fosfor, boron. Mungkin juga mengandung sejumlah kecil unsur lain seperti saat hadir sendiri atau dalam kombinasi, mereka efektif dalam memberikan sifat tertentu. Nilai baja *carbon* rendah yang dijelaskan di bawah ini dirancang untuk memberikan produk lembaran dan *strip* dengan kekuatan, kemampuan bentuk dan/atau ketahanan korosi yang lebih baik. Mangan adalah elemen penguat larutan padat untuk *ferrite* dan juga memiliki efek meningkatkan *hardenability*. Mangan ditambahkan dalam jumlah 1,0 hingga 1,5% ke baja *carbon* rendah (0,15 hingga

0,25% C) untuk memberikan kekuatan dengan keuletan yang baik dalam pengerolan panas (kekuatan hasil sekitar 275 MPa atau 40 ksi), lembaran dan *strip* canai dingin. Nitrogen adalah penambah *interstitial* yang kuat dan fosfor adalah penambah larutan padat *ferritee* yang efektif. Baik sekitar 0,010 hingga 0,015% N atau 0,07 hingga 0,12% P ditambahkan ke baja *carbon* rendah canai panas dan canai dingin dengan kekuatan luluh dalam kisaran 275 hingga 345 MPa (40 hingga 50 ksi). Bagian struktural untuk konstruksi dan mobil. Bagian cetakan yang diperoleh dari baja yang mengandung nitrogen dapat diperkuat lebih lanjut untuk mencapai kekuatan luluh pada kisaran 415-485 MPa (60-70 ksi) sebagai akibat dari penuaan regangan yang terjadi pada suhu *curing*. Boron adalah pembentuk karbida dan nitrida kuat yang meningkatkan kekuatan baja *carbon* rendah yang dipadamkan dan ditempa dengan membentuk *martensite* dan memperkuat kerak *ferritee*.

Cetakan baja *carbon* yang mengandung boron tersedia sebagai alternatif hemat biaya untuk baja *carbon* tinggi dan paduan rendah yang digunakan dalam lembaran dan *strip*. Baja boron *carbon* rendah memiliki sifat pembentuk dingin yang lebih baik dan dapat diberi perlakuan panas dengan kekerasan yang sebanding dan ketangguhan yang lebih tinggi untuk berbagai aplikasi seperti perkakas, bagian mesin, dan pengencang. Tembaga dalam jumlah hingga 0,5% tidak hanya sebagai penguat larutan padat kecil untuk *ferritee*, tetapi juga memberikan ketahanan korosi atmosfer yang lebih baik bersama dengan retensi cat yang lebih baik dalam aplikasi yang terpapar sepenuhnya ke elemen. Akibatnya, pelanggan sering menentukan baja yang mengandung tembaga (minimum 0,20% Cu) untuk digunakan pada lembaran dan *strip* struktural yang terkena korosi atmosferik. Hampir semua produk

pelat dan *strip* baja *carbon* rendah dapat disuplai dalam tingkat bantalan tembaga tertentu (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Penarikan dingin dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh batang baja *carbon* canai panas masing-masing sekitar 10% dan 70%. Sebagai contoh, batang baja *carbon* rendah canai panas dengan rasio titik tarik dan luluh sekitar 0,55 akan memiliki rasio sekitar 0,85 setelah penarikan dingin. Perpanjangan, pengurangan area, dan penurunan resistensi dampak, tetapi perubahan ini relatif kecil untuk banyak aplikasi struktural dan teknik. Peningkatan kekuatan ditarik dingin menarik yang ingin meningkatkan rasio kekuatan-terhadap-berat dan mengurangi biaya dengan menghilangkan penambahan paduan dan perlakuan panas. Ini juga berguna dalam aplikasi yang melibatkan ulir, takik, *cutting*, stabilitas dimensi, dan faktor desain lain yang dapat memengaruhi kekuatan secara negatif. Namun, harus diingat bahwa distribusi sifat mekanik dalam *grade* baja tarik dingin mungkin tidak memberikan kontrol yang ketat seperti yang dapat dicapai dengan perlakuan panas pada tingkat kekuatan yang sama. Perbedaan dalam teknik penggilingan dan derajat pengerjaan dingin dapat menghasilkan beberapa variasi sifat Baja *carbon* rendah biasanya diberi perlakuan panas untuk menambah ketahanan pada sudut kepala atau permukaan penjepit. *Carburizing* ringan atau *carbonitriding* sering digunakan untuk meningkatkan daya tahan. Saat pendinginan dan pengerasan mur, baja harus memiliki kemampuan pengerasan yang memadai. Meningkatkan jumlah *carbon* dan mangan atau menambahkan elemen paduan lain untuk meningkatkan kekerasan mengurangi kesesuaian material untuk pengerjaan dingin. Untuk alasan ini, baja boron *carbon* rendah banyak digunakan untuk bagian

yang dikeraskan dengan kekuatan tinggi. Kandungan *carbon*nya yang rendah memudahkan pengerjaan dingin, dan boron meningkatkan kemampuan pengerasan. Pemotongan benang dapat dilakukan sebelum atau sesudah perlakuan panas, tergantung pada kelas kompatibilitas benang yang diperlukan dan kekerasan mur yang diberi perlakuan panas (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Dalam baja *carbon*, kandungan *carbon* dan mangan adalah konstituen utama dari faktor komposisi yang menentukan kinerja baja dalam kondisi pemanasan dan pendinginan tertentu. Sejumlah besar baja yang digunakan untuk aplikasi pengelasan terdiri dari baja *carbon* rendah yang mengandung hingga 0,30% C. Struktur *nodular* lebih disukai ketika kekerasan minimum dan keuletan maksimum penting. Baja *carbon* rendah jarang dianil untuk pemesinan. Hal ini karena saat dianil, menjadi sangat lunak dan kenyal serta cenderung menghasilkan serpihan berserat panjang yang menyebabkan masalah penanganan pada peralatan mesin dan menyebabkan permukaan akhir yang kasar pada komponen mesin. Ketika baja semacam itu digulung, biasanya dilakukan untuk memungkinkan pengerjaan dingin yang parah. Daktilitas material yang tinggi dalam keadaan canai panas dapat mengurangi kekuatannya secara signifikan tanpa mengalami meningkatkan kekuatan materialnya secara berlebihan (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

2.2 Baja SS400

Baja SS400 adalah material baja dengan kadar *carbon* yang rendah dengan rentangnya berkisar 0,19%, sehingga bajanya tidak dapat dikeraskan secara langsung. Baja SS400 dikenal sebagai baja konstruksi yang sering digunakan dalam

bidang konstruksi bangunan, seperti halnya rangka atap, rangka jembatan dan balok konstruksi (Rahman & Sunyoto, 2021). Berikut dibawah ini merupakan komposisi materialnya (Sujita Darmo, Padang, & Wiratama, 2020).

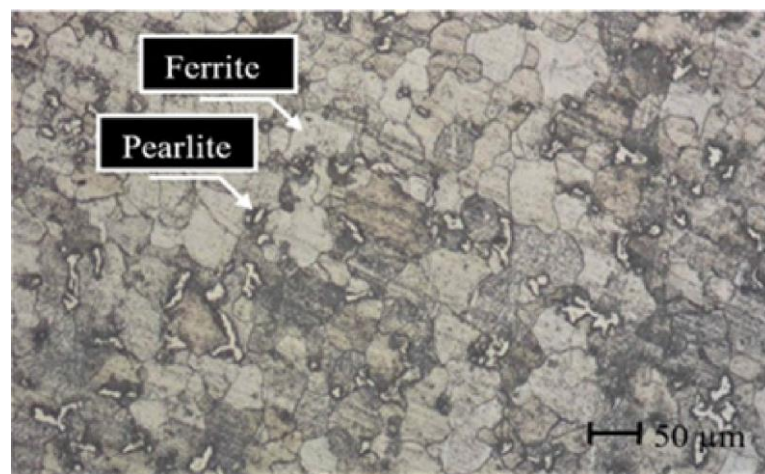
Tabel 2. 1 Komposisi Kimia

Unsur Kimia	Persentase
Besi (Fe)	98,11
Carbon (C)	0,159
Molibdenum (Mo)	0,078
Mangan (Mn)	0,624
Tembaga (Cu)	0,241
Krom (Cr)	0,11
Niobium (Nb)	0,16
Titanium (Ti)	0,008

Baja SS400 adalah jenis baja struktural yang umum digunakan dalam konstruksi dan industri. Baja ini memiliki sifat mekanik yang baik, termasuk nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan kekerasan yang signifikan. Nilai UTS baja SS400 berkisar antara 400 hingga 510 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa baja ini memiliki kekuatan tarik yang tinggi, sehingga mampu menahan beban yang diberikan padanya. Kekuatan tarik yang tinggi ini sangat penting dalam aplikasi struktural, di mana baja SS400 digunakan untuk menahan beban yang berat dan memberikan kestabilan struktur. Selain itu, kekerasan baja SS400 juga cukup tinggi.

Baja SS400 memiliki fasa *ferritee* dan *pearlite*. Fase *ferritee* ditampilkan dalam warna cerah sedangkan *pearlite* ditampilkan dalam warna gelap. Jumlah fase *ferritee* terlihat lebih banyak dibandingkan fase *pearlite*. Kemudian memiliki kekerasan yang rendah sebesar 122,6 HV. Fase *ferritee* sendiri membuat sifat ulet dalam baja. Baja ini biasanya memiliki kekerasan sekitar 150 hingga 180 *Brinell*

Hardness Number (BHN). Kekerasan yang tinggi ini menunjukkan bahwa baja SS400 memiliki ketahanan aus yang baik, sehingga mampu menghadapi tekanan dan gesekan yang tinggi tanpa mengalami deformasi atau keausan yang signifikan. Nilai UTS yang tinggi sebesar 461 MPa dan kekerasan sebesar 160 BHN. (Asrofi, 2020)



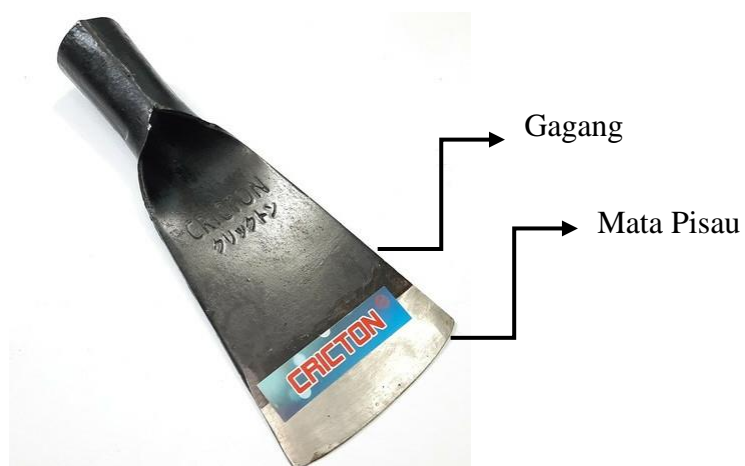
Gambar 2. 2 Struktur mikro Baja SS400 (Baghdadchi, 2021)

2.2.1 Aplikasi Baja SS400 sebagai Dodos

Baja SS400 adalah jenis baja *carbon* rendah yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk aplikasi di industri kelapa sawit. Baja SS400 memiliki kekuatan tarik yang cukup tinggi, yaitu sekitar 400 MPa, dan memiliki kekuatan lentur yang baik. Selain itu, baja SS400 juga memiliki sifat korosi yang baik, sehingga cocok untuk digunakan dalam lingkungan yang korosif seperti di industri kelapa sawit.

Dodos kelapa sawit, juga dikenal sebagai cangkang kelapa sawit, adalah bahan padat yang terbentuk saat buah kelapa sawit diproses. Dodos kelapa sawit memiliki karakteristik khas, seperti tekstur kasar dan serat yang

kuat. Secara umum, dodos kelapa sawit digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan bakar alternatif, bahan bangunan, dan bahan tahan api (Setiawan, 2014). Untuk meningkatkan penggunaan dodos kelapa sawit secara berkelanjutan, penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan metode produksi yang lebih efisien dan aplikasi yang lebih luas. Pemilihan material yang tepat untuk dodos kelapa sawit memainkan peran penting dalam memaksimalkan nilai tambah dari limbah kelapa sawit ini dan mendukung upaya mencapai keberlanjutan dalam industri kelapa sawit. Pemilihan material yang tepat untuk dodos kelapa sawit sangat penting karena berdampak pada kualitas produk akhir dan dampak lingkungan. Salah satu kriteria yang diperhatikan adalah kekuatan dan daya tahan. Dodos kelapa sawit yang memiliki serat kuat memberikan kekuatan dan ketahanan yang dibutuhkan dalam aplikasi tertentu, seperti bahan bangunan. Kemampuan material untuk diolah dan dikombinasikan dengan bahan lain juga menjadi pertimbangan dalam pemilihan material. Standar yang digunakan dalam penggunaan dodos kelapa sawit bervariasi tergantung pada aplikasinya



Gambar 2. 3 Dodos Kelapa Sawit

Apabila ditinjau dari bentuknya, dodos memiliki beberapa bagian seperti yang tertera pada Gambar 2.4, dimana bagian tersebut mencakup kepada mata pisau, gagang, dan pipa besi. Dalam hal ini, yang memiliki fokus utama dalam peningkatan kekerasan adalah mata pisau. Hal ini dikarenakan mata pisau dodos yang akan menjadi syarat mutu untuk memotong kelapa sawit. Beberapa standar umum mencakup pengujian kekuatan, ketahanan terhadap api, dan kompatibilitas dengan bahan lain. Sebagai contoh, dalam penggunaan dodos kelapa sawit sebagai bahan bangunan, diterapkan standar konstruksi dan kebakaran untuk memastikan keamanan struktur dan perlindungan terhadap risiko kebakaran. Dalam aplikasinya, Dodos kelapa sawit memiliki standar yang digunakan, yaitu Standar Nasional Indonesia (SNI) 8205:2016. Standar ini adalah salah satu standar yang diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN) di Indonesia. Standar ini berjudul "Alat panen kelapa sawit - Dodos - Syarat mutu dan metode uji". SNI ini ditetapkan pada tanggal 20 September 2016 oleh Komite Teknis 21-01-S1 Permesinan dan Alsintan (Alat Mesin Pertanian). SNI 8205:2016 mengatur tentang spesifikasi teknis dan metode uji yang harus dipenuhi oleh alat panen kelapa sawit jenis dodos.

Standar ini bertujuan untuk memastikan kualitas dan kesesuaian alat panen kelapa sawit tersebut, sehingga dapat digunakan dengan efektif dan aman dalam proses panen kelapa sawit. Dalam standar ini, terdapat beberapa aspek yang diatur, termasuk persyaratan mutu alat panen kelapa

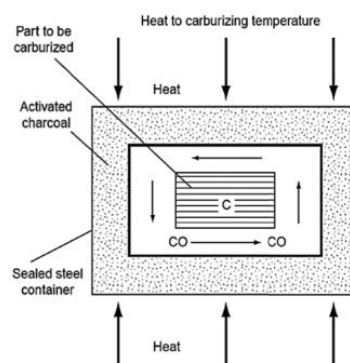
sawit, seperti dimensi, material, ketahanan, kekuatan, dan kemampuan fungsional. Selain itu, standar ini juga memberikan metode uji yang harus dilakukan untuk memastikan bahwa alat panen kelapa sawit tersebut memenuhi persyaratan yang ditetapkan. SNI 8205:2016 merupakan salah satu dari banyak standar yang diterbitkan oleh BSN dalam rangka mengatur berbagai aspek dalam berbagai sektor industri di Indonesia. Standar-standar nasional seperti SNI memiliki peran penting dalam menjaga kualitas, keselamatan, dan keandalan produk atau layanan yang dihasilkan di Indonesia. Dodos sendiri memiliki kekerasan minimum 45 HRC atau sekitar 446 HV. Dengan nilai minimal ini, dodos dapat beroperasi dengan baik pada pemrosesan kelapa sawit untuk skala industri. Nilai 446 HV merupakan nilai minimum operasional dan dapat tetap diterima pada kondisi lebih tinggi daripada nilai tersebut (SNI, 2016).

2.3 Pack Carburizing

Pack Carburizing adalah proses di mana *carbon* monoksida yang berasal dari senyawa padat terurai pada permukaan logam menjadi *carbon* baru dan *carbon* dioksida. *Carbon* yang baru terbentuk diserap ke dalam logam, dan *carbon* dioksida segera bereaksi dengan bahan *carbon* yang ada dalam senyawa *carburizing* padat untuk menghasilkan *carbon* monoksida segar. Pembentukan *carbon* monoksida ditingkatkan oleh *energizer* atau katalis, seperti barium *carbonat* (BaCO_3), kalsium *carbonat* (CaCO_3), kalium *carbonat* (K_2CO_3), dan natrium *carbonat* (Na_2CO_3), yang terdapat dalam senyawa *carburizing*. *Energizer* ini memfasilitasi

pengurangan *carbon* dioksida dengan *carbon* untuk membentuk *carbon* monoksida. Dengan demikian, dalam sistem tertutup, jumlah *energizer* tidak berubah.

Carburizing berlanjut selama *carbon* cukup hadir untuk bereaksi dengan kelebihan *carbon* dioksida (A. International, 2010). *Pack carburizing* tidak lagi menjadi proses komersial utama. Hal ini terutama disebabkan oleh penggantian dengan proses *carburizing* gas dan cair yang lebih terkontrol dan lebih sedikit tenaga kerja. Namun, setiap keuntungan biaya tenaga kerja *carburizing* gas atau *carburizing* cair yang mungkin dimiliki *carburizing* berlebih dapat ditiadakan jika benda kerja memerlukan langkah tambahan seperti pembersihan dan penerapan lapisan pelindung dalam operasi penghentian *carburizing*. Masalah lingkungan juga menyebabkan berkurangnya penggunaan *carburizing* kemasan. Namun, itu masih memiliki aplikasi untuk beberapa penggunaan khusus. Berikut dibawah ini merupakan skematik dari proses *pack carburizing*



Gambar 2. 4 Skematik Proses *Pack Carburizing* (Elmi Hosseini & Li, 2016).

Keuntungan yang didapat dari proses *pack carburizing*, yaitu dapat menggunakan berbagai tungku karena menghasilkan lingkungan yang terkandung

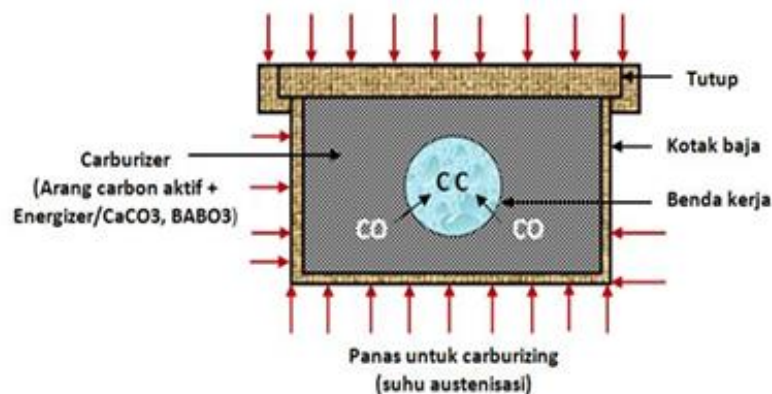
sendiri, cocok untuk pendinginan lambat pekerjaan dari suhu *carburizing*, prosedur yang mungkin menguntungkan untuk bagian yang akan diselesaikan mesinnya setelah karburisasi dan sebelum pengerasan, dibandingkan untuk *carburizing* gas dan menawarkan pilihan teknik *stop-off* yang lebih luas untuk *carburizing* selektif. Sedangkan kekurangan dari proses ini, antara lain tidak cocok untuk produksi kedalaman wadah yang dangkal di mana diperlukan toleransi kedalaman wadah yang ketat, tidak dapat memberikan tingkat fleksibilitas dan akurasi kontrol atas kandungan *carbon* permukaan dan gradien *carbon* yang dapat diperoleh dalam *carburizing* gas, tidak cocok untuk pendinginan langsung atau pendinginan dalam cetakan; dengan demikian, penanganan dan pemrosesan tambahan diperlukan untuk operasi pengerasan, lebih banyak waktu pemrosesan diperlukan untuk *carburizing* kemas daripada untuk *carburizing* gas atau cair karena perlunya pemanasan dan pendinginan massa termal ekstra yang terkait dengan kompon dan wadah, dan ini adalah padat karya (A. International, 2010).

Carburizing adalah penambahan *carbon* ke permukaan baja *carbon* rendah pada suhu (umumnya antara 850 dan 950°C, atau 1560 dan 1740°F) di mana *austenite*, dengan kelarutannya yang tinggi untuk *carbon*, memiliki struktur kristal yang stabil. Pengerasan komponen dilakukan dengan melepas bagian dan pendinginan atau membiarkan bagian menjadi dingin perlahan dan kemudian memanaskan kembali ke suhu *austenite*isasi untuk mempertahankan sifat permukaan yang sangat keras. Pada *quenching*, casing *martensite carbon* tinggi yang tahan aus dan lelah ditumpangkan pada inti baja *carbon* rendah yang keras. Baja *carburizing* yang digunakan dalam pengerasan kasus biasanya memiliki

kandungan *carbon* dasar sekitar 0,2% berat, dengan kandungan *carbon* lapisan *carburizing* ditetapkan antara 0,8 dan 1,0% berat. (Soenoko & Siswanto, 2018)

Pada Gambar 2.2, terdapat beberapa komponen yang digunakan dalam proses *carburizing*, yaitu tutup, kotak baja, benda kerja, panas (suhu austenisasi), dan *carburizer*. . Tutup digunakan dalam proses *carburizing* untuk menutupi kotak baja yang berisi benda kerja. Tutup tersebut berfungsi untuk menciptakan lingkungan yang terkontrol di dalam kotak, sehingga proses *carburizing* dapat berjalan dengan efektif dan mencegah kebocoran gas atau kerusakan lingkungan yang tidak diinginkan. Kotak baja merupakan wadah yang digunakan untuk menempatkan benda kerja selama proses *carburizing*. Kotak baja ini biasanya terbuat dari baja tahan panas yang kuat dan tahan terhadap lingkungan yang korosif. Fungsi utama kotak baja adalah melindungi benda kerja dari kontaminasi lingkungan eksternal dan mempertahankan kondisi lingkungan yang tepat di sekitar benda kerja selama proses *carburizing*. Benda kerja adalah komponen atau material yang akan mengalami proses *carburizing*. Benda kerja biasanya terbuat dari baja yang ingin ditingkatkan kekerasannya dengan mengintroduksi *carbon* ke dalam lapisan permukaan. Proses *carburizing* bertujuan untuk meningkatkan ketahanan aus, kekerasan, dan kekuatan benda kerja. Panas atau suhu austenisasi adalah suhu tinggi yang diterapkan pada benda kerja selama proses *carburizing*. Suhu ini mencapai titik *austenite*, yaitu titik ketika struktur kristal baja berubah menjadi *austeniteik* yang memungkinkan difusi *carbon* yang efektif ke dalam material. *Carburizer* adalah material yang digunakan untuk memasok *carbon* ke permukaan benda kerja selama proses *carburizing*. *Carburizer* biasanya berupa

padatan atau gas yang mengandung *carbon*, seperti paduan *carburizing* atau gas *carburizing*. Fungsi *carburizer* adalah untuk menyediakan sumber *carbon* yang diperlukan agar *carbon* dapat didifusikan ke dalam permukaan benda kerja dan mempengaruhi sifat material tersebut. (Negara, 2016)



Gambar 2. 5 Proses *Pack Carburizing* (Negara, 2016)

Metode *carburizing* meliputi *carburizing* gas, *carburizing* vakum, *carburizing* plasma (ion), *carburizing* rendaman garam, dan *carburizing* kemasan. Metode ini memperkenalkan *carbon* dengan menggunakan atmosfer (gas atmosfer, plasma, dan vakum), cairan (penangas garam), atau senyawa padat (kemasan). Sebagian besar bagian *carburizing* diproses dengan *carburizing* gas, menggunakan gas alam, propana, atau butana. Vakum dan *carburizing* plasma berguna karena tidak adanya oksigen di atmosfer tungku. Rendaman garam dan *carburizing* bungkus memiliki kepentingan komersial yang kecil tetapi masih dilakukan sesekali (Kwetniewski, 2013).

Pack carburizing, juga disebut *carburizing* padat atau kotak, adalah proses *carburizing* tertua. Dalam hal ini metode pengerasan, spesimen dikemas dalam campuran kokas dan arang dengan “*energizers*” kemudian dipanaskan dalam wadah

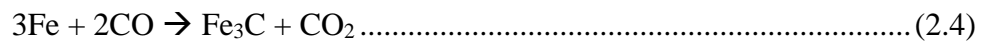
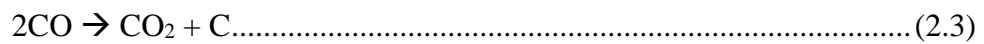
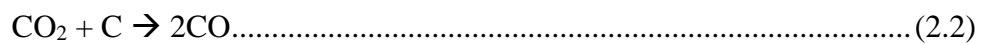
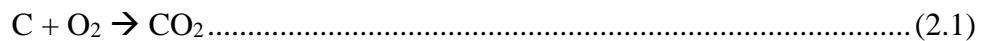
tertutup. Meskipun merupakan proses padat karya, *carburizing* kemasan masih dilakukan di beberapa ruang alat karena persyaratan fasilitasnya minimal. Metode pak adalah yang tertua dari proses *carburizing* dan selama bertahun-tahun yang paling banyak digunakan. Penggunaannya dalam beberapa tahun terakhir, bagaimanapun, telah menurun secara signifikan karena perbaikan dalam prosedur *carburizing* alternatif (terutama *carburizing* gas) dan juga karena keterbatasan proses yang melekat. Senyawa *carburizing* komersial umum dapat digunakan kembali dan mengandung 10 sampai 20% *carbonat* logam alkali atau alkali tanah yang terikat pada arang kayu keras atau kokas dengan minyak, tar, atau *molase*. Barium *carbonat* adalah *energizer* utama, biasanya terdiri dari sekitar 50 sampai 70% dari total kandungan *carbonat*. Sisa *energizer* biasanya terbuat dari kalsium *carbonat*, meskipun natrium *carbonat* dan kalium *carbonat* juga dapat digunakan. Dapat diketahui bahwa barium *carbonat*, yang sekarang ditunjuk oleh peraturan pemerintah sebagai bahaya kesehatan karena toksisitasnya dan masalah pembuangan yang ditimbulkannya, secara bertahap dihentikan oleh pabrikan AS sebagai katalis dalam operasi *carburizing* kemasan. Arang kayu keras lebih reaktif daripada kokas sebagai sumber *carbon* untuk *carburizing* kemasan. Namun demikian, kokas menawarkan keuntungan tertentu, seperti penyusutan minimum, kekuatan panas yang baik, dan konduktivitas termal yang baik. Oleh karena itu, senyawa *carburizing* yang lebih aktif mengandung arang dan kokas, dengan senyawa tipikal yang mengandung persentase kokas yang lebih besar (A. International, 2010). Karena kerugian yang terkait dengan penggunaan senyawa

carburizing kemasan, senyawa baru biasanya ditambahkan ke senyawa bekas sebelum digunakan kembali.

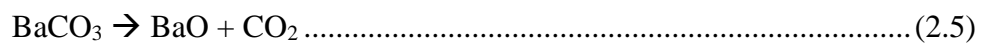
Kehilangan *energizer* biasanya sedikit lebih tinggi daripada kehilangan senyawa lainnya. Oleh karena itu, persentase senyawa baru yang sedikit lebih besar digunakan untuk memastikan bahwa tingkat *energizer* tidak turun di bawah kira-kira 5 sampai 8%. Ketika pendinginan langsung atau metode penanganan mekanis yang berat digunakan, laju penambahan mungkin setinggi satu bagian senyawa baru menjadi dua bagian senyawa bekas. Ketika pendinginan tungku dan metode penanganan yang hati-hati digunakan, laju penambahan dapat berupa satu bagian senyawa baru menjadi tiga sampai lima bagian senyawa bekas. Senyawa yang digunakan sering disaring untuk menghilangkan denda. Senyawa tersebut kemudian dicampur secara menyeluruh dengan bahan *make up*. Karena banyak senyawa, terutama yang dari jenis arang terlapis, sangat rapuh, mereka memerlukan penanganan yang hati-hati untuk meminimalkan kerugian akibat pembentukan debu atau partikel halus (A. International, 2010).

Proses *Pack carburizing* berisi udara. Oksigen di udara paket bergabung dengan *carbon* pada suhu tinggi dan menghasilkan *carbon* dioksida (reaksi 2.1). Kemudian, *carbon* dioksida bereaksi dengan atom *carbon* yang ada dalam kemasan, dan sebagai hasilnya dihasilkan *carbon* monoksida (reaksi 2.2). *Carbon* monoksida terurai pada permukaan baja menjadi atom *carbon* dan *carbon* dioksida (reaksi 2.3). Atom *carbon* (atom C) dengan cepat diserap pada permukaan logam dan berdifusi ke dalam logam. Sekali lagi, menurut reaksi 2.2, *carbon* dioksida yang direproduksi bereaksi dengan lebih banyak *carbon* untuk menghasilkan lebih

banyak *carbon* monoksida. *Cementite* terbentuk di bagian paling permukaan baja (reaksi 2.4). *Carbon* yang ada dalam *cementite* kemudian larut dalam *austenite* dan berdifusi ke dalam (Elmi Hosseini & Li, 2016). Berikut rincian reaksinya dapat dilihat dibawah ini



Saat ini, bahan *energizer* digunakan untuk meningkatkan kedalaman *casing*. Pembentukan *carbon* monoksida ditingkatkan oleh *energizer* atau katalis, seperti barium *carbonat* ($BaCO_3$), kalsium *carbonat* ($CaCO_3$), kalium *carbonat* (K_2CO_3), dan natrium *carbonat* (Na_2CO_3), yang terdapat dalam senyawa *carburizing* . *Energizer* ini memfasilitasi pengurangan *carbon* dioksida dengan *carbon* untuk membentuk *carbon* monoksida. Dengan demikian, dalam sistem tertutup, jumlah *energizer* tidak berubah. *Carburizing* berlanjut selama *carbon* cukup hadir untuk bereaksi dengan kelebihan *carbon* dioksida. Namun, *energizer* yang paling terkenal dan mungkin paling efektif adalah $BaCO_3$. Misalnya, barium *carbonat* terurai pada suhu tinggi dan menghasilkan *carbon* dioksida (reaksi 2,5) (Elmi Hosseini & Li, 2016).

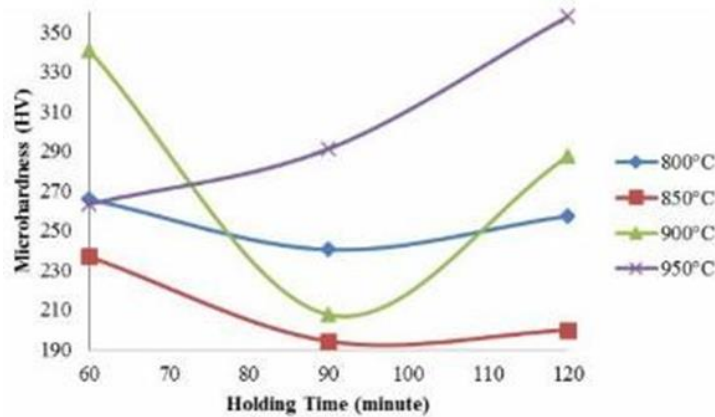


Dengan menghasilkan *carbon* dioksida dalam kemasan, tekanan CO_2 meningkat. Menurut reaksi 2.2, *carbon* dioksida bereaksi dengan atom *carbon* yang ada dalam kemasan dan menghasilkan *carbon* monoksida. Jika rasio *carbon* monoksida menjadi *carbon* dioksida pada suhu konstan lebih dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah yang benar, dan fenomena karburisasi terjadi. Tetapi ketika rasio *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida pada suhu konstan kurang dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah kiri, dan fenomena *decarburizing* terjadi. Ketika *carbon* berdifusi ke dalam baja, kandungan *carbon* di permukaan meningkat dibandingkan dengan inti baja, sehingga setelah pendinginan baja di dalam minyak, kekerasan permukaan meningkat dan inti tetap fleksibel

2.3.1 Pengaruh Waktu Tahan (*Holding Time*)

Tingkat perubahan kedalaman kasus pada suhu *carburizing* tertentu sebanding dengan akar kuadrat waktu. Tingkat karburisasi demikian tertinggi pada awal siklus dan secara bertahap berkurang seiring dengan perpanjangan siklus. Hal ini berbanding lurus berkembangnya struktur fasa yang terbentuk. Dengan seiring lamanya proses yang dilakukan, maka fasa yang terbentuk selama proses berlangsung akan semakin cepat, dan diikuti dengan menaikkan laju difusi atom *carbon* menuju permukaan bajanya agar

mengalami pengerasan. Lama waktu tahan dalam proses *carburizing* memiliki pengaruh langsung terhadap kedalaman penetrasi *carbon* ke dalam material. Semakin lama waktu tahan, semakin dalam *carbon* dapat meresap ke dalam permukaan material. Ini mengartikan bahwa material akan memiliki lapisan yang lebih dalam dengan kandungan *carbon* yang lebih tinggi, yang pada gilirannya akan meningkatkan kekerasan permukaan material tersebut. Selain itu, lama waktu tahan juga mempengaruhi proses difusi *carbon* ke dalam material. Dalam proses *carburizing*, *carbon* harus difusikan ke dalam material secara merata untuk mencapai hasil yang diinginkan. Lama waktu tahan yang cukup akan memberikan waktu yang lebih baik bagi *carbon* untuk difusikan secara merata, sehingga menghasilkan lapisan *carburizing* yang homogen dan konsisten di seluruh permukaan material. Selain meningkatkan kekerasan permukaan, lama waktu tahan yang tepat juga dapat mempengaruhi ketahanan aus material. Lama waktu tahan yang cukup akan memungkinkan *carbon* meresap lebih dalam ke dalam material, sehingga meningkatkan kekerasan dan ketahanan ausnya. Material yang telah mengalami proses *carburizing* dengan lama waktu tahan yang optimal akan mampu menghadapi beban dan gesekan yang lebih tinggi tanpa mengalami keausan yang signifikan (Hosseini, 2016).



Gambar 2. 6 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Kekerasan
(ASM International, 1991)

Didapatkan pengaruh dari waktu tahan terhadap kekerasan pada baja, dapat dilihat pada Gambar 2.6 dimana terjadi fluktuasi terhadap kekerasan material dengan variasi temperatur dan waktu tahan. Didapatkan bahwa semakin tinggi waktu tahan proses karburisasi maka cenderung menghasilkan nilai kekerasan yang meningkat. Selain itu, didapatkan pula bahwa temperatur yang ideal adalah 950°C dimana kekerasan meningkat secara eksponensial (ASM International, 1991).

Selain itu, waktu penahanan juga berpengaruh terhadap terbentuknya struktur mikro dan fasa pada paduan. Proses *carburizing* pada baja dapat mempengaruhi struktur mikro dan fasa dari baja tersebut. Beberapa faktor yang mempengaruhi perubahan struktur mikro dalam baja selama proses *carburizing* adalah waktu penahanan, waktu, dan siklus pendinginan. Struktur mikro yang terjadi setelah pendinginan akan tergantung pada laju pendinginan. Selama proses *carburizing*, terjadi beberapa perubahan struktur mikro, dimana perubahan ini akan

menyebabkan terjadinya perubahan sifat dari logam tersebut. Tujuan dari proses *carburizing* adalah untuk meningkatkan ketahanan aus dengan jalan mempertinggi kekerasan permukaan baja *carbon* dan meningkatkan karakteristik fatik dari baja *carbon* tersebut. Pada proses pengerasan permukaan dengan metode *carburizing*, penambahan kadar *carbon* dilakukan dengan mendifusikan *carbon* melalui permukaan baja sehingga permukaan baja mengandung cukup *carbon* untuk dikeraskan dengan pendinginan (Brien, 2020). Dari lamanya waktu penahanan ini cenderung akan menghasilkan banyaknya fasa *pearlite* pada mikrostruktur, dan berkurangnya fasa *ferrite*.

Dalam proses *carburizing*, waktu menjadi faktor kritis yang mempengaruhi penetrasi *case depth*. Penetrasi *case depth* adalah parameter yang mengukur sejauh mana unsur *carbon* dapat menembus permukaan benda kerja. Penetrasi yang lebih dalam dapat dicapai dengan meningkatkan waktu paparan benda kerja dalam proses *carburizing* atau dapat dikatakan bahwa *case depth* meningkat seiring dengan meningkatnya waktu *carburizing* (Ramli & Wu, 2022). Hal ini terjadi karena adanya reaksi difusi antara *carbon* dalam atmosfer gas *carburizing* dan permukaan benda kerja. Selama proses *carburizing*, *carbon* berdifusi melalui permukaan benda kerja dan memperkaya komposisi *carbon* pada lapisan permukaan. Dengan peningkatan waktu *carburizing*, molekul *carbon* dapat bergerak lebih jauh ke dalam, menghasilkan penetrasi *depth case* yang lebih besar. Dari nilai

case depth juga akan mempengaruhi kekerasan dan pembentukan fasa dari material.

Waktu tahan juga berpengaruh terhadap kekerasan dan fasa yang terbentuk pada material. Diketahui bahwa seiring dengan meningkatnya waktu tahan maka akan menghasilkan distribusi fasa *pearlite* yang lebih menyeluruh. Hal ini akan meningkatkan kekerasan dikarenakan difusi yang terjadi cenderung lebih tinggi seiring dengan meningkatnya waktu tahan. Dengan demikian, jika bahan atau logam tertentu dikenai waktu tahan yang lebih lama, maka akan terjadi peningkatan distribusi fasa *pearlite* secara keseluruhan. Peningkatan ini kemudian berkontribusi pada peningkatan kekerasan bahan tersebut. Hal ini disebabkan oleh tingginya tingkat difusi yang terjadi selama proses waktu tahan yang lebih lama, di mana partikel-partikel dalam bahan memiliki lebih banyak waktu untuk bergerak dan berinteraksi satu sama lain. Akibatnya, struktur fasa *pearlite* yang terbentuk lebih merata dan padat, yang pada gilirannya meningkatkan kekerasan bahan tersebut (Okwesileze, 2022).

Waktu tahan pada proses *carburizing* memainkan peran penting dalam menentukan laju difusi *carbon* ke dalam bahan logam. *Carburizing* adalah proses perlakuan panas di mana bahan logam ditempatkan dalam atmosfer yang kaya akan *carbon* untuk meningkatkan kadar *carbon* di permukaannya. Pada umumnya, semakin lama bahan logam terkena waktu tahan dalam atmosfer *carburizing*, semakin tinggi laju difusi *carbon*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan konsentrasi *carbon* antara permukaan bahan

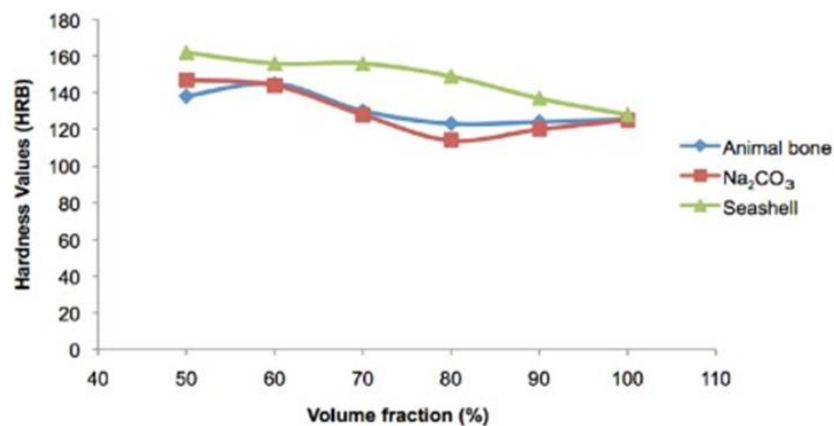
logam yang memiliki kandungan *carbon* rendah dan atmosfer *carburizing* yang memiliki kandungan *carbon* tinggi. Selama waktu tahan yang lebih lama, atom *carbon* akan berdifusi secara perlahan dari atmosfer *carburizing* ke permukaan bahan logam. Hal ini akan meningkatkan koefisien difusi seiring bertambahnya waktu tahan (Utami & Istana, 2019).

2.3.2 Pengaruh Komposisi *Carburizer*

Untuk jumlah bahan *energizer* yang berbeda, dengan menambah waktu *carburizing*, kedalaman wadah akan mengalami peningkatan. Bahan *energizer* digunakan untuk meningkatkan kedalaman *casing*. Pembentukan *carbon* monoksida ditingkatkan oleh *energizer* atau katalis, seperti barium *carbonat* (BaCO_3), kalsium *carbonat* (CaCO_3), kalium *carbonat* (K_2CO_3), dan natrium *carbonat* (Na_2CO_3), yang terdapat dalam senyawa *carburizing*. *Energizer* ini memfasilitasi pengurangan *carbon* dioksida dengan *carbon* untuk membentuk *carbon* monoksida. Dengan demikian, dalam sistem tertutup, jumlah *energizer* tidak berubah. *Carburizing* berlanjut selama *carbon* cukup hadir untuk bereaksi dengan kelebihan *carbon* dioksida. Namun, *energizer* yang paling terkenal dan mungkin paling efektif adalah BaCO_3 . Misalnya, barium *carbonat* terurai pada suhu tinggi dan menghasilkan *carbon* dioksida (reaksi 2.5) (Elmi Hosseini & Li, 2016).



Dengan menghasilkan *carbon* dioksida dalam kemasan, tekanan CO_2 meningkat. Menurut reaksi 2.2, *carbon* dioksida bereaksi dengan atom *carbon* yang ada dalam kemasan dan menghasilkan *carbon* monoksida. Jika rasio *carbon* monoksida menjadi *carbon* dioksida pada suhu konstan lebih dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah yang benar, dan fenomena karburisasi terjadi. Tetapi ketika rasio *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida pada suhu konstan kurang dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah kiri, dan fenomena *decarburizing* terjadi. Ketika *carbon* berdifusi ke dalam baja, kandungan *carbon* di permukaan meningkat dibandingkan dengan inti baja, sehingga setelah pendinginan baja di dalam minyak, kekerasan permukaan meningkat dan inti tetap fleksibel (Ihom & Andona, 2018)



Gambar 2. 7 Hubungan Kekerasan dan Fraksi (ASM International, 1991)

Didapatkan pengaruh dari fraksi *energizer* terhadap kekerasan material. Pada Gambar 2.6 dapat dilihat bahwa kekerasan cenderung

meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi *energizer* yang menandakan bahwa fraksi kaburizer cenderung menurun dalam satuan volume fraksi. Kondisi ini dapat ditinjau berdasarkan fenomena yang terjadi selama proses *hardening* pada material dimana melibatkan jumlah kandungan *carbon* pada permukaan (ASM Internasional, 1991).

Nilai fraksi berat komposisi *carburizer* dapat mempengaruhi jenis dan distribusi fasa yang terbentuk dalam struktur mikro baja. Penambahan *carburizer* dengan nilai fraksi berat komposisi yang tinggi akan meningkatkan kandungan *carbon* pada permukaan baja. Lonjakan kandungan *carbon* ini dapat menyebabkan terbentuknya fasa *pearlite* yang memiliki kekerasan yang tinggi. Selain itu, fasa *pearlite* yang terbentuk juga dapat menghasilkan kekuatan yang baik pada baja (Benarioua, 2018). Lebih dari itu, peningkatan komposisi juga dapat menginisiasi fasa karbida ataupun *cementite* pada permukaan yang dapat menghasilkan kekerasan yang meningkat secara signifikan (Soenoko & Siswanto, 2018). Selain itu, nilai fraksi berat komposisi *carburizer* juga dapat mempengaruhi ukuran dan distribusi butir dalam struktur mikro baja. Dalam proses *carburizing*, *carburizer* yang ditambahkan dapat berinteraksi dengan matriks baja, membentuk karbida dan mengubah ukuran butir. Penambahan *carburizer* dengan nilai fraksi berat komposisi yang tinggi cenderung menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil dan distribusi yang lebih homogen. Hal ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja. Namun, seiring dengan peningkatan nilai fraksi berat komposisi *carburizer*, ada kemungkinan

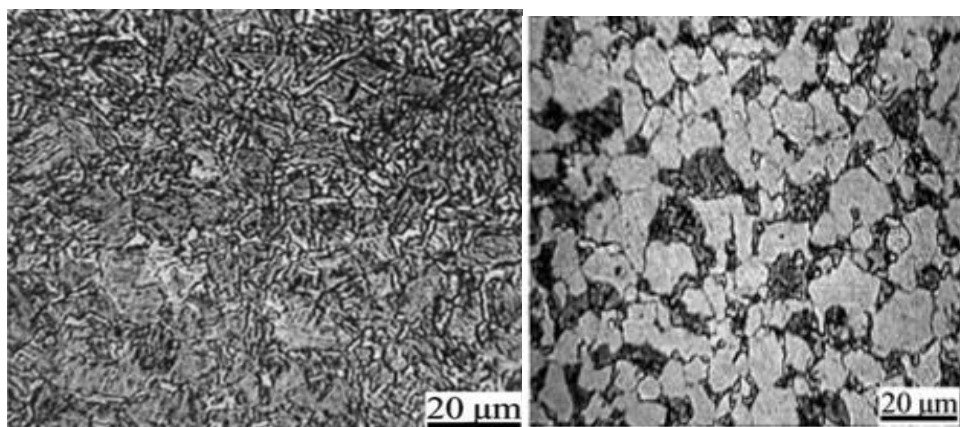
terjadinya segregasi *carbon* pada struktur mikro baja. Segregasi *carbon* dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam sifat mekanik dan ketangguhan baja.

Selanjutnya diketahui mengenai pengaruh komposisi *carburizer* yang tinggi terhadap meningkatnya kekerasan material. Tingginya konsentrasi dari *carburizer* akan menghasilkan deposit *carbon* yang terkonsentrasi pada permukaan. *Carburizer* yang memiliki kandungan *carbon* yang tinggi akan memberikan sumber *carbon* yang melimpah selama proses *carburizing*. *Carbon* yang ditambahkan ke permukaan benda kerja akan berdifusi dan memperkaya lapisan permukaan dengan kandungan *carbon* yang lebih tinggi. Hal ini akan menyebabkan peningkatan kekerasan material pada permukaan dan membentuk lapisan *case* yang keras dan tahan aus. Selain itu, deposit *carbon* yang terkonsentrasi pada permukaan juga memberikan perlindungan terhadap korosi dan abrasi (Ihom & Andona, 2018).

Peningkatan jumlah *energizer* yang tinggi dalam proses karburisasi memiliki pengaruh signifikan terhadap meningkatnya koefisien difusi pada material. Secara teoritis, semakin tinggi nilai katalis, maka akan menghasilkan difusi yang cenderung cepat dalam rentang waktu tertentu. Hal ini akan menghasilkan peningkatan difusivitas atom *carbon* yang lebih tinggi dibandingkan sampel dengan nilai katalis yang lebih rendah. Energi yang tinggi memungkinkan partikel *carbon* untuk bergerak secara lebih aktif dan menembus permukaan material dengan lebih efisien. Hal ini

mengakibatkan peningkatan laju difusi *carbon* ke dalam material, yang pada gilirannya meningkatkan kandungan *carbon* pada lapisan permukaan. (Joshua, 2021).

Terdapat pengaruh yang signifikan dari komposisi nilai *carburizer* terhadap kekerasan material. Nilai fraksi berat komposisi *carburizer* mengacu pada persentase *carbon* yang terkandung dalam bahan *carburizer* yang ditambahkan ke dalam proses *carburizing*. Pada umumnya, semakin tinggi nilai fraksi berat komposisi *carburizer*, semakin tinggi pula nilai kekerasan baja yang terbentuk. Hal ini dikarenakan penambahan *carburizer* dengan kandungan *carbon* yang tinggi akan meningkatkan konsentrasi *carbon* pada permukaan baja. *Carbon* yang terlarut dalam matriks baja akan membentuk fasa *martensite* yang memiliki kekerasan yang tinggi. Oleh karena itu, penambahan *carburizer* dengan nilai fraksi berat komposisi yang tinggi dapat meningkatkan kekerasan baja secara signifikan. Namun, perlu diperhatikan bahwa nilai fraksi berat komposisi *carburizer* yang terlalu tinggi juga dapat memiliki dampak negatif. Jika terlalu banyak *carburizer* yang ditambahkan, dapat terjadi pembentukan fasa karbida yang berlebihan.



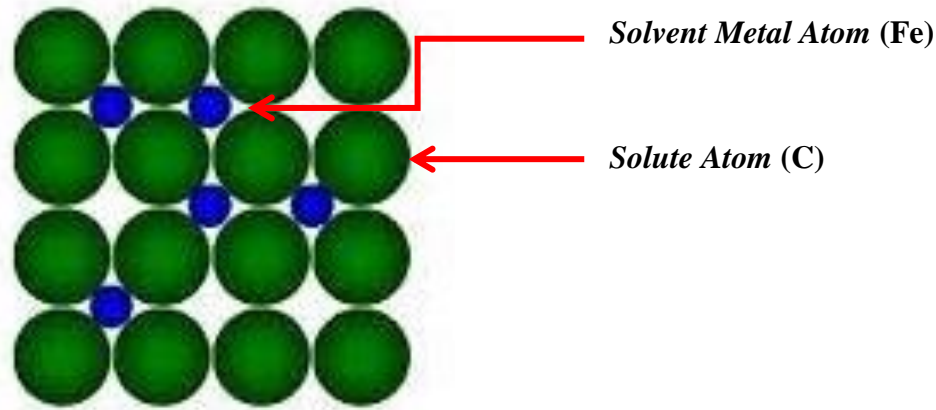
Gambar 2. 8 Sampel Hasil *Pack Carburizing* (Elmi Hosseini & Li, 2016).

2.4 Difusi Carbon

Difusi pada proses *carburizing* adalah fenomena penting yang terjadi dalam perlakuan panas logam untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan ausnya. *Carburizing* adalah proses pengenalan *carbon* ke permukaan logam, khususnya baja, untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Dalam proses ini, logam ditempatkan dalam atmosfer yang kaya akan *carbon*, seperti gas amonia atau campuran gas metana dan hidrogen, pada suhu tinggi. Dalam proses *carburizing*, difusi menjadi aspek utama yang mempengaruhi penyerapan *carbon* oleh logam. Difusi adalah pergerakan atom atau molekul dari area berkonsentrasi tinggi ke area berkonsentrasi rendah. Dalam hal ini, *carbon* berdifusi dari atmosfer yang kaya akan *carbon* ke permukaan logam yang memiliki konsentrasi *carbon* yang lebih rendah. Berbagai faktor mempengaruhi laju difusi dalam proses *carburizing*. Salah satunya adalah suhu. Semakin tinggi suhu, semakin cepat laju difusi *carbon* ke dalam logam. Selain itu, komposisi logam juga berpengaruh. Logam yang memiliki struktur mikro yang lebih longgar atau serbuk logam yang memiliki luas permukaan yang besar memiliki laju difusi yang lebih tinggi. Selain itu, durasi proses juga menjadi faktor penting dalam difusi pada proses *carburizing*. Proses yang lebih lama memberikan waktu yang lebih banyak bagi *carbon* untuk berdifusi ke dalam logam, sehingga meningkatkan kedalaman lapisan *carburizing* yang dihasilkan.

Pengendalian difusi dalam proses *carburizing* dapat dilakukan dengan memperhatikan parameter-parameter seperti suhu, komposisi atmosfer, dan durasi proses. Misalnya, suhu yang dikontrol secara cermat dapat memastikan laju difusi

yang sesuai untuk mencapai tingkat *carburizing* yang diinginkan tanpa menyebabkan distorsi atau kerusakan pada logam.



Gambar 2. 9 Skema Difusi *Carbon C* pada Fe (Benarioua, 2018)

Dalam difusi *carbon*, dikenal istilah difusi *interstitial*. Difusi ini merupakan fenomena dimana atom *carbon* menembus secara *interstitial* atau celah antara atom-atom besi dalam struktur kristal. Dapat dilihat pada Gambar 2.5 bahwa difusi *interstitial* umumnya terjadi pada celah antara atom besi dengan koordinasi tetrahedral. Atom *carbon* yang cukup kecil dapat masuk ke dalam celah ini. Proses difusi interstitial terjadi pada suhu tinggi, ketika atom besi memiliki energi kinetik yang cukup untuk memungkinkan atom *carbon* bergerak melalui celah *interstitial*. Difusi interstitial terjadi melalui pergerakan atom *carbon* dari celah ke celah di sepanjang jalur yang tersedia antara atom besi (Utami H. , 2017).

2.5.1 Difusi Tidak Menetap (*Unsteady State*)

Unsteady state diffusion, juga dikenal sebagai difusi tidak mantap, mengacu pada proses difusi di mana konsentrasi partikel atau zat yang sedang berdifusi tidak mencapai kesetimbangan dalam jangka waktu

tertentu. Dalam unsteady state diffusion, terdapat perubahan yang signifikan dalam konsentrasi partikel selama periode waktu tertentu. Dalam kondisi difusi mantap, konsentrasi partikel di seluruh sistem mencapai kesetimbangan, di mana laju difusi masuk sama dengan laju difusi keluar. Namun, dalam unsteady state diffusion, kondisi kesetimbangan belum tercapai dan perubahan konsentrasi masih terjadi (Utami H. , 2017).

Unsteady state diffusion dapat terjadi pada beberapa kondisi, antara lain adalah:

1. Perubahan konsentrasi awal: Jika terdapat perubahan tiba-tiba dalam konsentrasi awal partikel di suatu daerah, maka akan terjadi unsteady state diffusion. Contohnya adalah ketika konsentrasi partikel berubah akibat perubahan suhu atau komposisi atmosfer.
2. Perubahan kondisi batas: Jika kondisi batas sistem berubah, seperti perubahan suhu atau konsentrasi pada permukaan atau batas sistem, maka akan terjadi unsteady state diffusion. Misalnya, ketika ada perubahan tiba-tiba pada konsentrasi partikel di permukaan yang mempengaruhi laju difusi masuk atau keluar dari sistem.
3. Perubahan waktu: Jika waktu difusi masih dalam rentang yang signifikan, unsteady state diffusion terjadi karena partikel belum mencapai kesetimbangan. Ini sering terjadi pada proses difusi pada skala waktu yang sangat kecil, seperti pada skala nano atau mikro.

2.5.2 Koefisien Difusi

Koefisien difusi adalah ukuran yang menggambarkan seberapa

cepat atau lambat atom atau molekul dapat berdifusi atau bergerak melalui suatu medium. Secara spesifik, koefisien difusi mengukur laju pergerakan partikel-partikel tersebut sebagai respons terhadap perbedaan konsentrasi, gradien konsentrasi, atau perbedaan potensial lainnya dalam sistem.

Koefisien difusi dapat dinyatakan dalam berbagai satuan tergantung pada jenis difusi dan medium yang terlibat. Satuan umum untuk koefisien difusi adalah meter persegi per detik (m^2/s). Namun, tergantung pada jenis materi yang berdifusi, satuan lain seperti centimeter persegi per detik (cm^2/s) atau milimeter persegi per detik (mm^2/s) juga dapat digunakan.

Dalam menentukan koefisien difusi, digunakan sebuah hukum yang dicetuskan oleh fisikawan Jerman bernama Adolf Fick pada abad ke-19. Hukum ini disebut sebagai Hukum Fick Kedua yang menjelaskan kalkulasi mengenai konstanta pada permukaan yang ditulis sebagaimana persamaan di bawah ini:

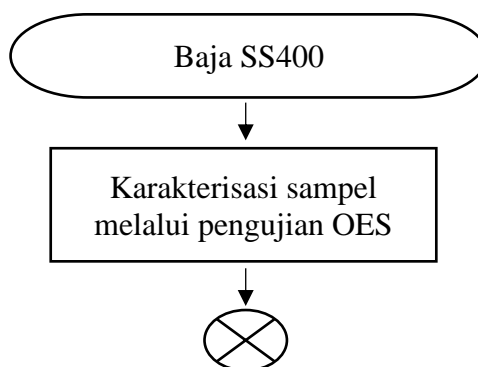
$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

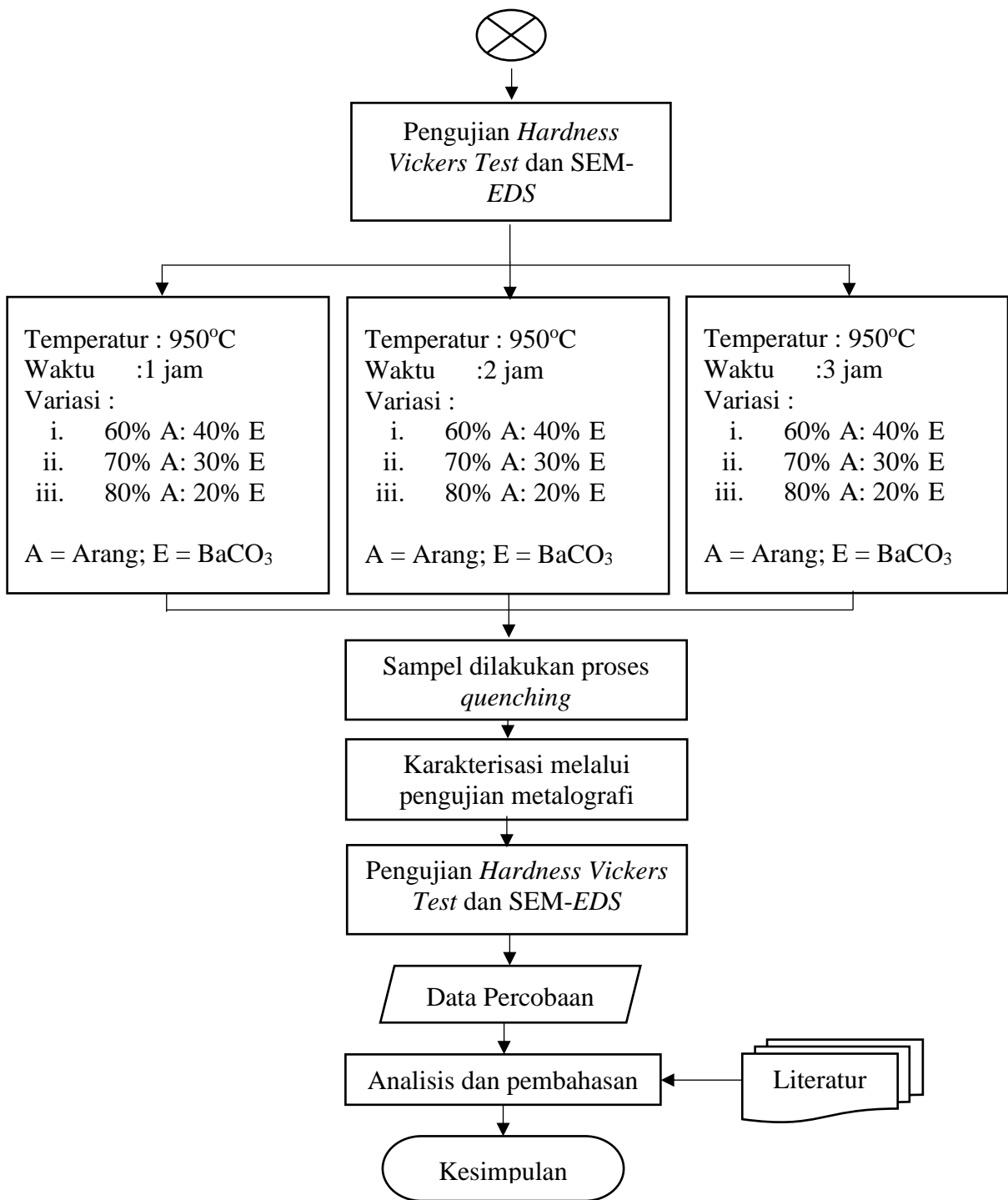
Hukum Fick Kedua dengan kondisi permukaan konsentrasi konstan (constant *surface* concentration) adalah variasi dari Hukum Fick Kedua yang mempertimbangkan situasi di mana konsentrasi partikel pada permukaan difusi tetap konstan sepanjang waktu. Ini berarti bahwa pada permukaan di mana difusi terjadi, konsentrasi partikel dijaga pada tingkat yang konstan.

Bab III Metode Penelitian

3.1 Diagram Alir

Diagram alir penelitian digunakan untuk menggambarkan proses penelitian ini. Pada penelitian ini menggunakan material baja SS400 yang dipersiapkan dan melakukan pemotongan sampel sebanyak 9 sampel, dibuat dengan ukuran panjang 30 mm, lebar 30 mm dan tebal 10 mm. Kemudian pada masing-masing sampel diberikan kode untuk mempermudah pada saat proses penelitian berlangsung. Setelah itu sampel dimasukkan ke dalam *furnace* untuk melewati proses *pack carburizing* dengan temperatur 900°C menggunakan komposisi % fraksi berat (60% arang ditambah 40% *energizer*, 70% arang ditambah 30% *energizer*, 80% arang ditambah 20% *energizer*) arang batok kelapa dan BaCO₃, serta variasi waktu tahan pada masing-masing % fraksi berat, 1 jam, 2 jam, dan 3 jam, kemudian dilanjutkan dengan pendinginan dengan media air. Proses berikutnya yaitu dilakukan pengamatan metalografi menggunakan mikroskop optik, pengujian kekerasan dengan menggunakan *Vickers Hardness*. Secara garis besar diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat

Berikut adalah alat-alat yang digunakan selama penelitian berlangsung, yaitu:

1. Apron
2. Helm
3. Jangka sorong
4. Mesin uji kekerasan *vickers*
5. Mikrometer sekrup
6. Mesin *milling*
7. Mesin potong
8. Mesin *grinding & polishing*
9. Mikroskop optik
10. *Muffle Furnace*
11. Mesin *mounting*
12. Penjepit
13. Sarung tangan
14. *Stopwatch*
15. *Thermogun*
16. Wadah tempat *pack carburizing*
17. Wadah media pendingin

3.2.2 Bahan-bahan

Berikut adalah bahan-bahan yang digunakan selama penelitian berlangsung, yaitu:

1. Air
2. Arang batok kelapa
3. Ayakan 80 *mesh*
4. Baja SS400
5. Bubuk BaCO₃

6. Bubuk *mounting*
7. Serbuk alumina
8. Es
9. *Ethanol*
10. Nital 3%
11. Plastik sampel
12. Kertas ampelas

3.3 Prosedur Percobaan

Prosedur penelitian berikut digunakan untuk mengetahui pengaruh waktu tahan dan fraksi berat arang batok kelapa dan barium *carbonat* terhadap nilai kekerasan baja SS400 dengan menggunakan metode *pack carburizing*. Prosedur penelitian dimulai dari:

3.3.1 Preparasi Sampel

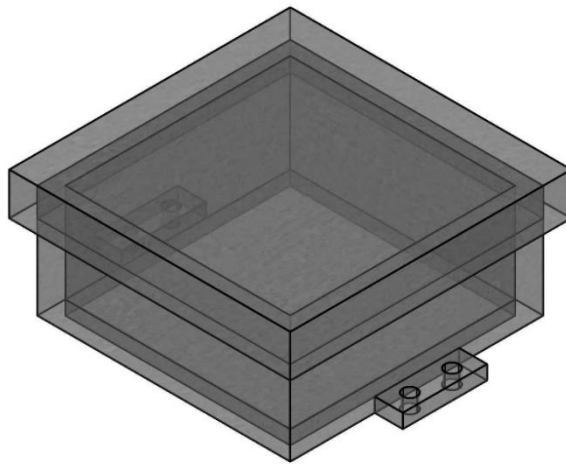
1. Sampel baja SS400 dipotong dengan ukuran 30x30x6 mm³.
Material yang akan dipotong sebanyak 9 buah yang akan melalui proses *pack carburizing*.
2. Sampel baja SS400 dilakukan pengujian awal, yaitu pengujian kekerasan *vickers* dan metalografi. Agar mengetahui nilai kekerasan dan bentuk struktur mikro awal dari baja SS400.

3.3.2 Proses Perlakuan Panas *Pack Carburizing*

Adapun Langkah-langkah proses *carburizing* adalah sebagai berikut:

1. Sebelum dilakukan *carburizing* sampel dibersihkan dan dihaluskan permukaannya dari kotoran dan karat yang melekat dengan cara mengikir dan mengamplas sampel.

2. Menghancurkan arang batok kelapa hingga menjadi serbuk arang yang digunakan sebagai bahan *carburizing* dengan ukuran serbuk 80 *mesh*.
3. Mencampurkan serbuk arang batok kelapa dan BaCO_3 dengan variasi fraksi berat yaitu 60% serbuk arang batok kelapa-30% serbuk BaCO_3 ; 70% serbuk arang batok kelapa-30% serbuk BaCO_3 dan 80% serbuk arang batok kelapa-20% serbuk BaCO_3 .
4. Timbang sampel sebelum dilakukan proses *pack carburizing*.
5. Sampel dimasukkan ke dalam *pack* yang telah terisi campuran serbuk *carbon* dan BaCO_3 kemudian *pack* ditutup.



Gambar 3. 2 Skema Bentuk Pack

6. Pack yang telah diisi sampel, *carburizer*, dan *energizer* sesuai dengan variasi % berat fraksi dapat melakukan proses perlakuan panas yang dilakukan di dalam *furnace*. Proses menggunakan

temperature 950°C dengan variasi waktu tahan selama 1 jam, 2 jam dan 3 jam.

3.3.3 Proses Pendinginan Cepat (*Quenching*)

Setelah dilakukan proses perlakuan panas, sampel dilakukan tahapan pendinginan cepat (*quenching*) di dalam media air. Proses *quenching* ini dilakukan agar terbentuk fasa *martensite*. Proses *quenching* ini dilakukan untuk meningkatkan kekerasan dari baja SS400 yang telah mengalami proses *carburizing* .

3.3.4 Proses *Mounting*

Langkah Langkah proses *mounting* adalah:

1. Menyiapkan cetakan pipa dengan diameter 4,5 cm dan tinggi 3 cm untuk proses *mounting*.
2. Letakkan pipa pada permukaan yang halus
3. Letakkan sampel secara *vertical*
4. Tuangkan cairan resin *polyester* yang telah dicampur dengan katalis pada pipa yang berisi sampel, tunggu hingga mengeras.
5. Keluarkan resin dan sampel yang telah mengeras dari pipa
6. Simpan ditempat yang steril.

3.3.5 Proses *Grinding* dan *Polishing*

Langkah-langkah proses *polishing* adalah:

1. Gunakan perlengkapan keselamatan kerja sebelum melakukan pekerjaan.
2. Siapkan sampel yang telah *dimounting*.

3. Nyalakan mesin amplas.
4. Sampel memasuki tahap *grinding* dengan kertas ampelas level, yaitu 100#, 240#, 320#, 400#, 600#, 800#, 1000#, 1200#, 1500# dan 2000#.
5. Lakukan pengamplasan dengan waktu maksimal 10 menit tiap ukuran amplas.
6. sampel memasuki tahap *polishing* dengan menggunakan pasta alumina.

3.3.6 Proses Etsa

Langkah-langkah proses etsa adalah:

1. Siapkan peralatan etsa seperti, pipet, spuit ukuran 3 ml, gelas ukur dengan kapasitas 100 ml dan gelas ukur kapasitas 500 ml
2. Siapkan bahan seperti, HNO_3 , *Ethanol* dan air
3. Untuk melihat struktur mikro baja perbandingannya adalah 98% *ethanol* dan 2 % HNO_3 .
4. Pada pengujian ini menggunakan takaran 100 ml, jadi untuk takaran *ethanol* adalah 98 ml dan HNO_3 adalah 2 ml.
5. Letakkan cairan *ethanol* dalam gelas ukur kapasitas 100 ml (cairan *ethanol* 98 ml).
6. Ambil cairan HNO_3 sebanyak 2 ml dengan spuit.
7. Tuangkan *ethanol* kedalam gelas ukur kapasitas 500 ml.
8. Injeksikan cairan HNO_3 pada gelas ukur kapasitas 500 ml yang terdapat *ethanol*

9. Aduk selama 1 menit
10. Ambil sampel yang telah dipoles
11. Celupkan permukaan yang telah dipoles kecairan campuran tersebut selama 60 detik untuk sampel tanpa perlakuan dan 120 detik untuk sampel setelah perlakuan *pack carburizing*
12. Angkat dan bilas dengan air bersih
13. Bersihkan sisa-sisa air dengan tisu kering lalu keringkan dengan *heat gun*

3.3.7 Pengujian Sampel

Pengujian sampel dilakukan sebanyak dua kali, yaitu sebelum dilakukannya proses perlakuan panas dan setelah dilakukannya proses perlakuan panas. Dilakukannya pengujian diawal dan diakhir proses bertujuan untuk membandingkan hasil karakterisasinya.

1. Pengujian *Vickers Hardness*

Untuk pengujian mikro akan dihitung dengan menggunakan metode Vickers sesuai dengan standar ASTM E 92 "*Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*". Metode ini menggunakan beban 200 grf dalam waktu 10 detik. Indentor yang digunakan adalah intan berbentuk piramida dengan sudut 136°. Prinsip pengujiannya sama dengan metode kekerasan Brinell, namun jejak yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal.[15] Panjang diagonal diukur dengan skala pada

mikroskop pengukur jejak. Perhitungan nilai kekerasan ini sesuai dengan rumus:

$$VHN = \frac{1,854 P}{d^2} \dots\dots\dots(3.1)$$

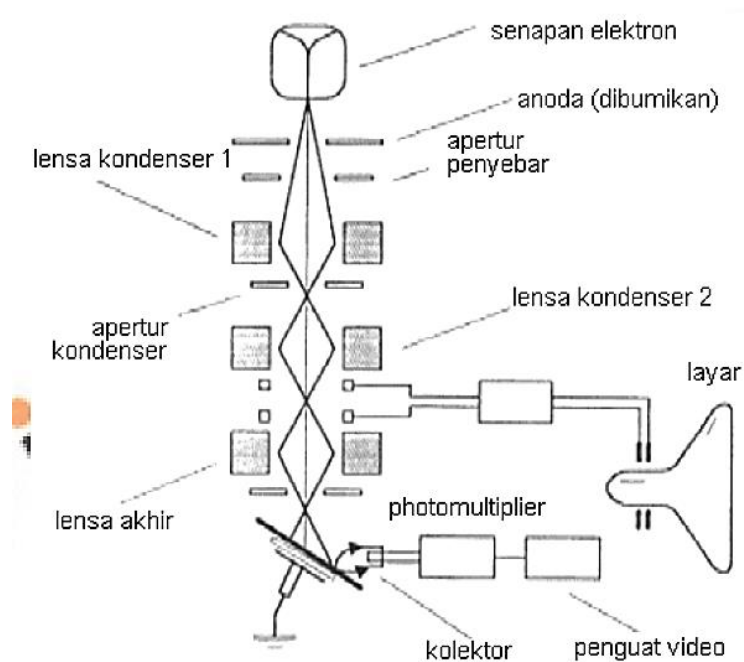
dimana: VHN = *Vickers Hardness Number* P = Beban yang diberikan (dalam Kg) D = diameter jejak rata-rata (dalam mm)

2. Pengujian Scanning Electron Mircroscope (SEM) dan Energy Dispersicce X-Ray Spectroscopy (*EDS*)

Pengujian SEM-*EDS* pada sampel dilakuka karena dalam penelitian ini terdapat karbida yang tersebar di permukaan dan sub-permukaan dari matial SS400 setelah proses karburisasi. Adanya pengujian SEM-*EDS* akan semakin memperjelas dan juga mempertajam Analisa mengenai inti permasalahan dari penelitian ini. Teknik SEM pada dasarnya merupakan pemeriksaan dan analisis permukaan. Data atau tampilan yang diperoleh adalah data dari permukaan atau lapisan yang tebalnya sekitar 20µm dari permukaan. Gambar topografi diperoleh dari penangkapan pengolah electron sekunder yang dipancarkan oleh sampel. Dalam sistem SEM, senapan elektron (electron gun) menghasilkan aliran elektron yang diarahkan ke permukaan spesimen yang dituju. Elektron dipancarkan dari anoda dalam senapan elektron dan melalui apertur penyebar (*beam deflection aperture*), yang mengatur ukuran dan bentuk jalur lintasan elektron. Setelah melewati apertur penyebar, elektron melewati

lensa kondenser 1 (*condenser lens 1*) yang mengarahkan dan memfokuskan aliran elektron menjadi sebuah balok. Kemudian, elektron melewati apertur kondenser (*condenser aperture*), yang mengontrol ukuran balok elektron. Selanjutnya, elektron melewati lensa kondenser 2 (*condenser lens 2*), yang berfungsi untuk memfokuskan dan mengontrol balok elektron sebelum mencapai spesimen. Lensa kondenser 2 membantu dalam menghasilkan balok elektron yang lebih terfokus dan tajam. Setelah melewati lensa kondenser 2, elektron mencapai spesimen dan berinteraksi dengan permukaannya. Beberapa elektron terpantul dan tersebar, sedangkan yang lainnya akan menembus spesimen. Elektron yang terpantul dan tersebar kemudian diarahkan ke arah kolektor oleh lensa akhir (*final lens*) dan dikumpulkan oleh *photomultiplier* atau detektor lainnya. Sinyal elektron yang diterima oleh *photomultiplier* atau detektor dikirimkan ke penguat video (*video amplifier*) untuk memperkuat dan memproses sinyal tersebut. Penguat video mengubah sinyal listrik menjadi sinyal yang dapat ditampilkan pada layar. Terakhir, gambar mikrostruktur yang dihasilkan ditampilkan pada layar. Pada layar, pengguna dapat melihat dan menganalisis gambar dengan menggunakan perangkat lunak khusus untuk memperbesar, memanipulasi, dan mempelajari karakteristik mikrostruktur spesimen. Dalam keseluruhan proses penembakan

SEM, aliran elektron dikendalikan melalui berbagai komponen dan lensa untuk menghasilkan gambar mikrostruktur yang akurat dan terperinci. Berikut skema alat dari *Scanning Electron Microscope* (SEM) terdapat pada Gambar 3.3



Gambar 3. 3 Skema dari *Scanning Electron Microscope*

3.3.8 Penamaan Sampel

Pada penelitian ini, didapatkan beberapa variasi sampel dengan komposisi dan perlakuan yang berbeda. Untuk memudahkan dalam perlakuan dan variasi yang diberikan kepada sampel, dilakukan sebuah penamaan yang dimana kode A merepresentasikan jumlah Arang, dan E merepresentasikan jumlah *energizer*. Penamaan tersebut dapat dilihat sesuai dengan Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Penamaan Sampel

Waktu Carburizing	Komposisi (%)		Kode Sampel
	Arang	BaCO₃	
1 Jam	60%	40%	1-60A40E
	70%	30%	1-70A30E
	80%	20%	1-80A30E
2 Jam	60%	40%	2-60A40E
	70%	30%	2-70A30E
	80%	20%	2-80A30E
3 Jam	60%	40%	3-60A40E
	70%	30%	3-70A30E
	80%	20%	3-80A30E

Bab IV

Hasil Dan Pembahasan

Pada pengamatan ini, telah dilakukan proses observasi terhadap kekerasan dan struktur mikro baja SS400 dengan perlakuan panas yaitu *pack carburizing*. Pengujian ini membandingkan material SS400 dengan variasi waktu tahan dan fraksi berat *pack carburizing*. Pengambilan data kekerasan dan struktur mikro baja dilakukan menggunakan alat uji kekerasan *Vickers* dan mikroskop optik. Pengamatan nilai kekerasan dan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui secara spesifik pengaruh variasi pengujian.

4.1 Hasil Kekerasan

Dilakukan uji keras dengan metode pengujian keras jenis *vickers*. Pengujian ini dilakukan dengan total tiga indentasi pada masing-masing variasi sampel dengan gaya tekan sebesar 1 Kg.

Tabel 4. 1 Hasil Data Uji Keras

Kode Sampel	Nilai Kekerasan (HV)
1-60A40E	240,9
1-70A30E	243,7
1-80A30E	267,9
2-60A40E	379,5
2-70A30E	401,8
2-80A30E	406,3
3-60A40E	619,2
3-70A30E	663,1
3-80A30E	778,3

Setelah dilakukan pengujian kekerasan pada sampel SS400 yang diberi perlakuan *pack carburizing* selama 1; 2; dan 3 jam dengan tiga variasi fraksi komposisi 60% arang ditambah 40% *energizer*; 70% arang ditambah 30%

energizer; 80% arang ditambah 20% *energizer*, didapatkan nilai kekerasan tertinggi berada pada sampel 3-80A40E sebesar 778,36 HV. Sementara itu, nilai terendah pada kekerasan didapatkan pada sampel 3-60A40E dimana hanya mencapai 240,93 HV. Batas kekerasan untuk Dodos menurut standar adalah 446 HV, sehingga melalui pengujian yang dilakukan, dapat dilihat bahwa perlakuan yang memenuhi *acceptance criteria* merupakan perlakuan dengan waktu tahan 3 jam dikarenakan masing-masing komposisi mewakili nilai yang lebih tinggi dari 446 HV pada pengujian kekerasan. Untuk melihat data secara menyeluruh, dapat dilihat pada tabel 4.1 dimana direpresentasikan mengenai hasil dari total pengujian mengenai kekerasan material.

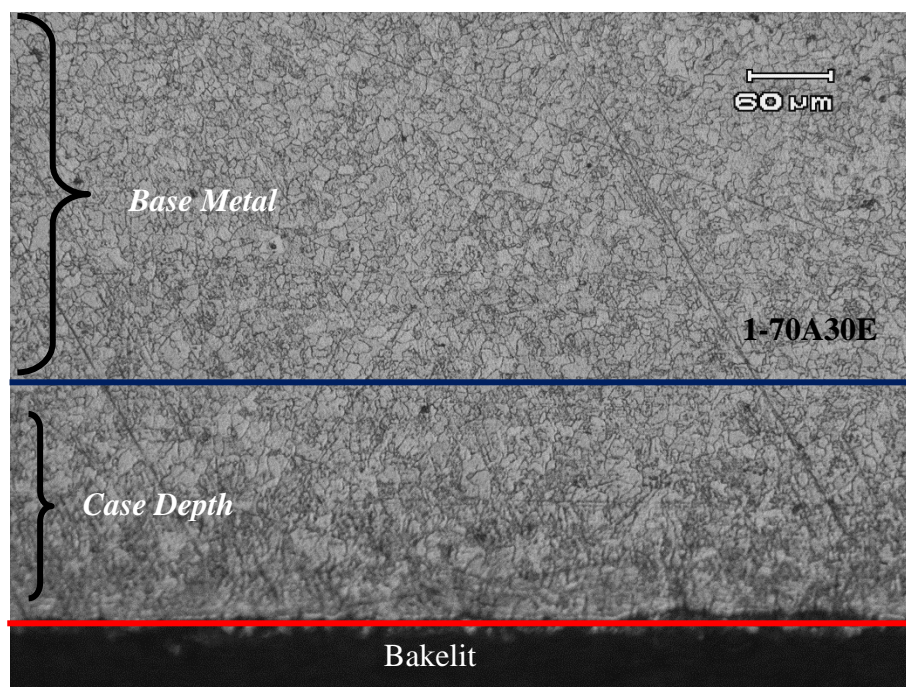
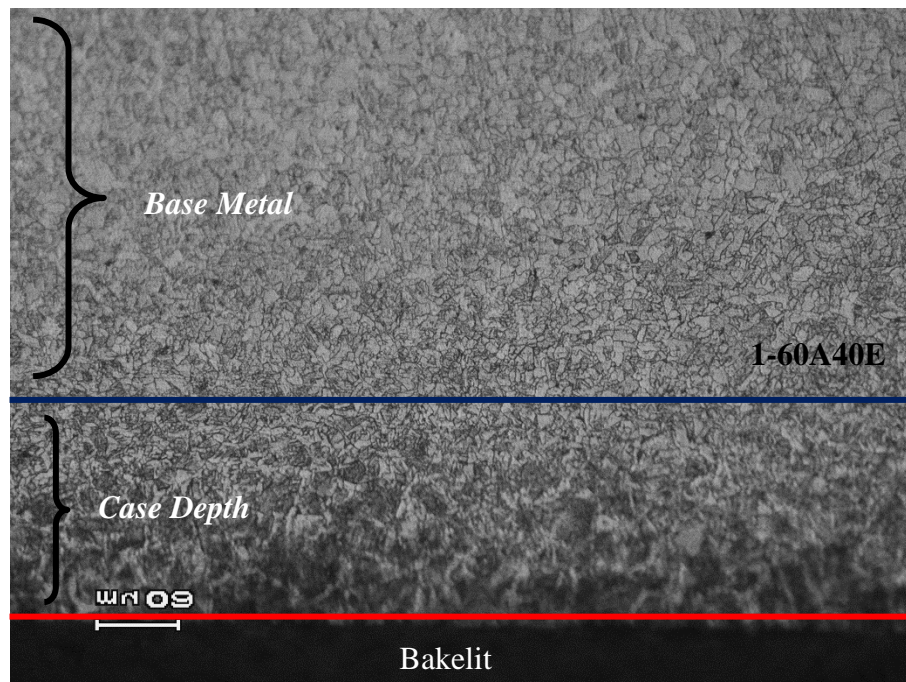
4.2 Hasil Case Depth

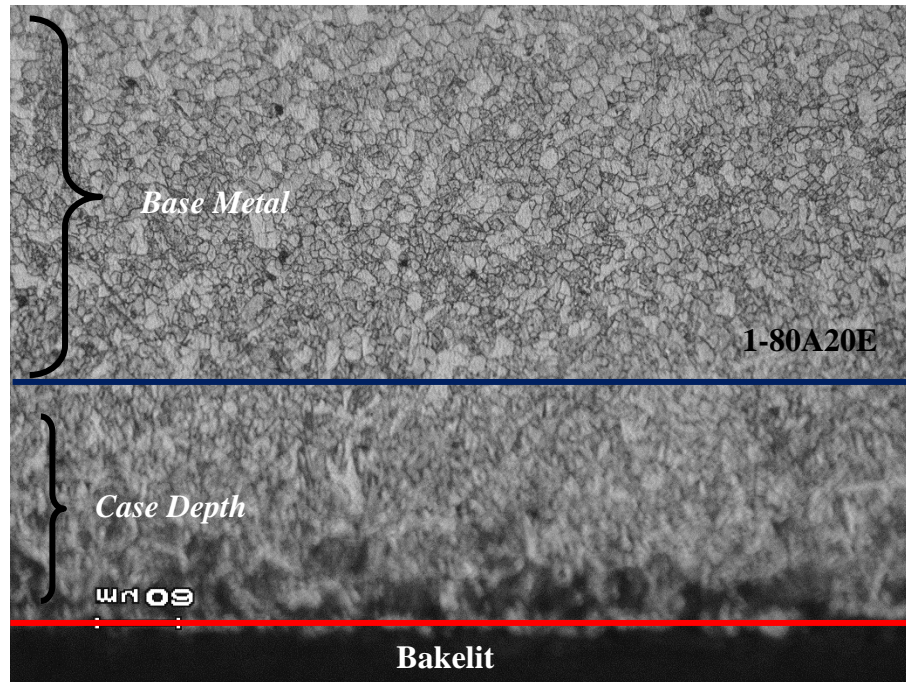
Melalui pengujian yang sudah dilakukan, didapatkan nilai *case depth* tertinggi berada pada kondisi 3-60A40E sebesar 141,55 μm . Sementara itu, nilai terendah berada pada kondisi 1-80A20E 104,51 μm . Perubahan nilai *case depth* dapat dilihat akan menurun secara progresif dengan nilai persentase hampir 10% seiring dengan berkurangnya fraksi *energizer*.

Tabel 4. 2 Hasil Data *Case Depth*

Kode Sampel	<i>Case Depth</i> (μm)
1-60A40E	108,02
1-70A30E	105,44
1-80A30E	104,51
2-60A40E	115,34
2-70A30E	113,24
2-80A30E	110,92
3-60A40E	141,55
3-70A30E	136,53
3-80A30E	130,83

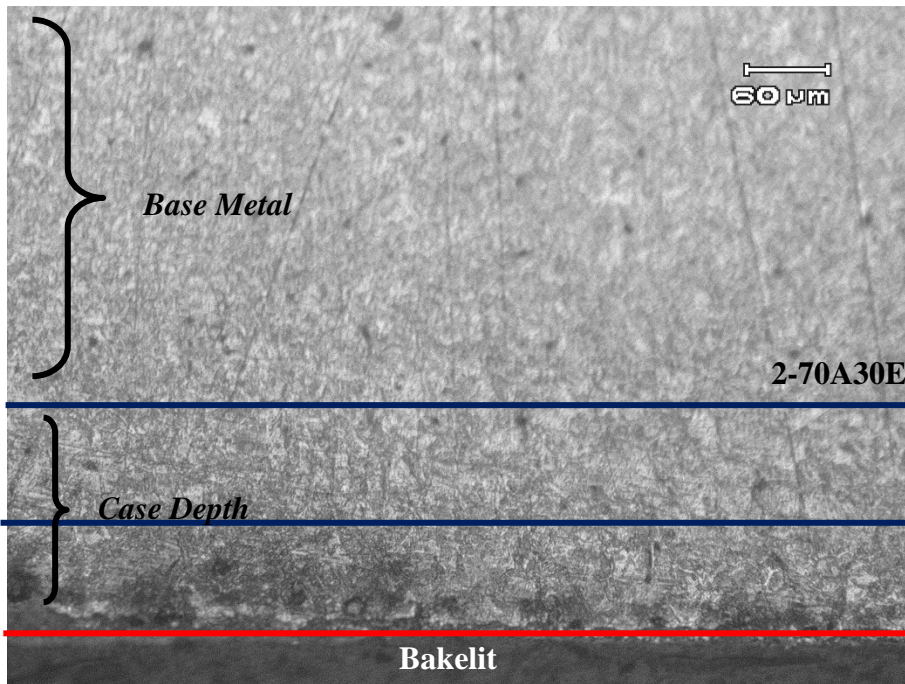
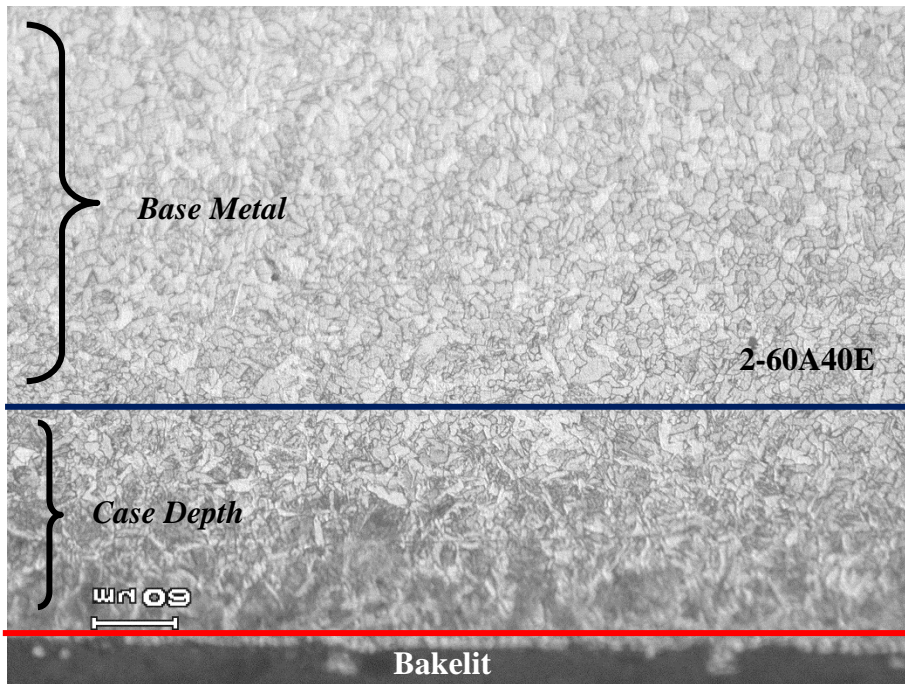
Nilai dari *case depth* dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti temperatur *carburizing*, komposisi *carburizer*, dan waktu tahan. Namun, pengaruh paling utama adalah komposisi dari fraksi *energizer*. Fraksi *energizer* cenderung akan mempercepat laju difusi *carbon* pada baja.

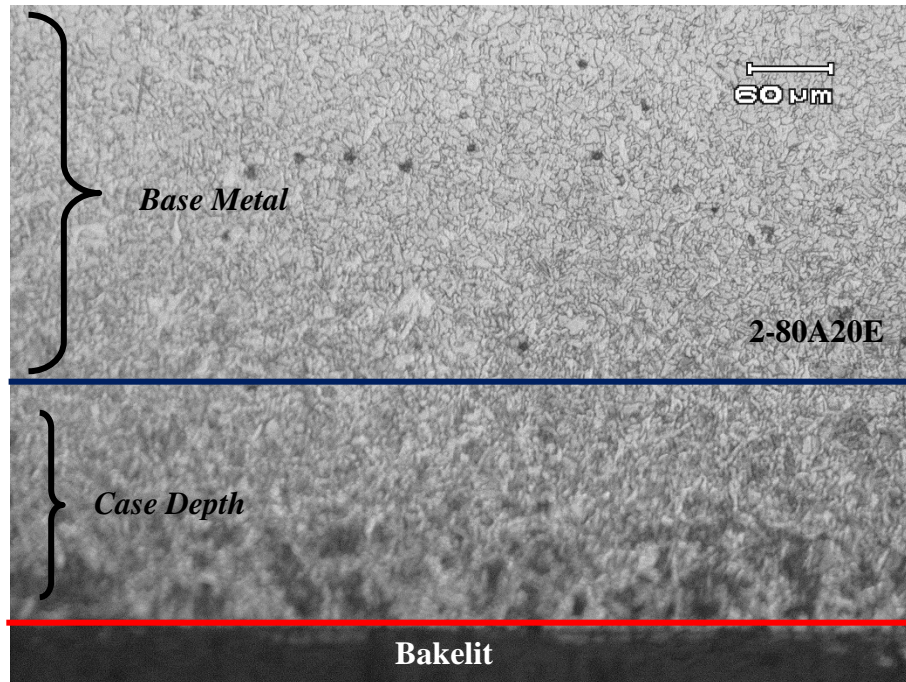




Gambar 4. 1 Hasil *Case Depth* 1 Jam

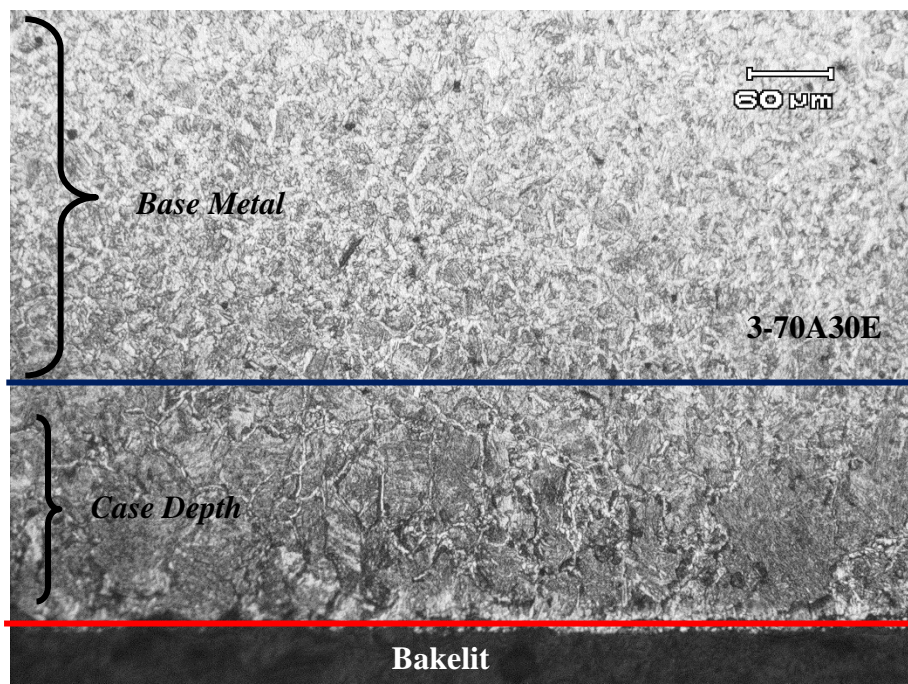
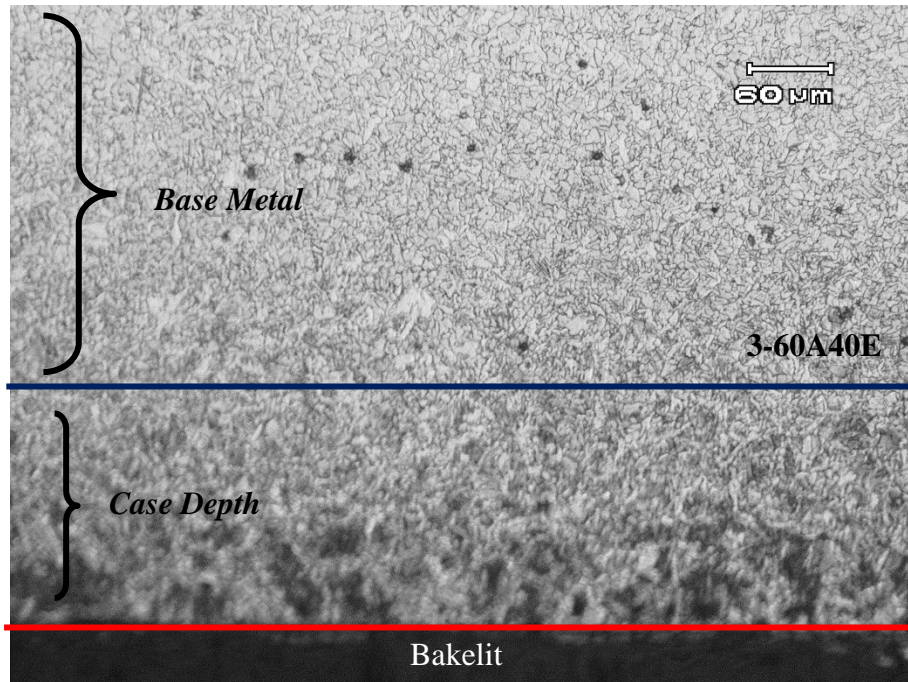
Berdasarkan Gambar 4.1, terlihat adanya kecenderungan penurunan *case depth* seiring dengan menurunnya fraksi *energizer* pada komposisi *carburizer*. Pada kondisi fraksi *energizer* 40% *case depth* mencapai 108,02 μm . Namun, ketika fraksi *energizer* turun menjadi 30%, *case depth* menurun menjadi 105,44 μm . Selanjutnya, pada fraksi *energizer* 20%, terjadi penurunan *case depth* menjadi 104,51 μm . Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa penurunan fraksi *energizer* dalam komposisi *carburizer* memiliki pengaruh signifikan terhadap *case depth* yang terbentuk. Semakin rendah fraksi *energizer*, semakin rendah pula *case depth* yang terbentuk. Hal ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa dengan fraksi *energizer* yang lebih rendah, jumlah *carbon* yang tersedia untuk difusi menjadi lebih sedikit. Dengan demikian, kecepatan difusi *carbon* menjadi lebih lambat, memberikan waktu yang lebih lama bagi *carbon* untuk menyebar ke dalam material dan membentuk lapisan karburisasi yang lebih dangkal.

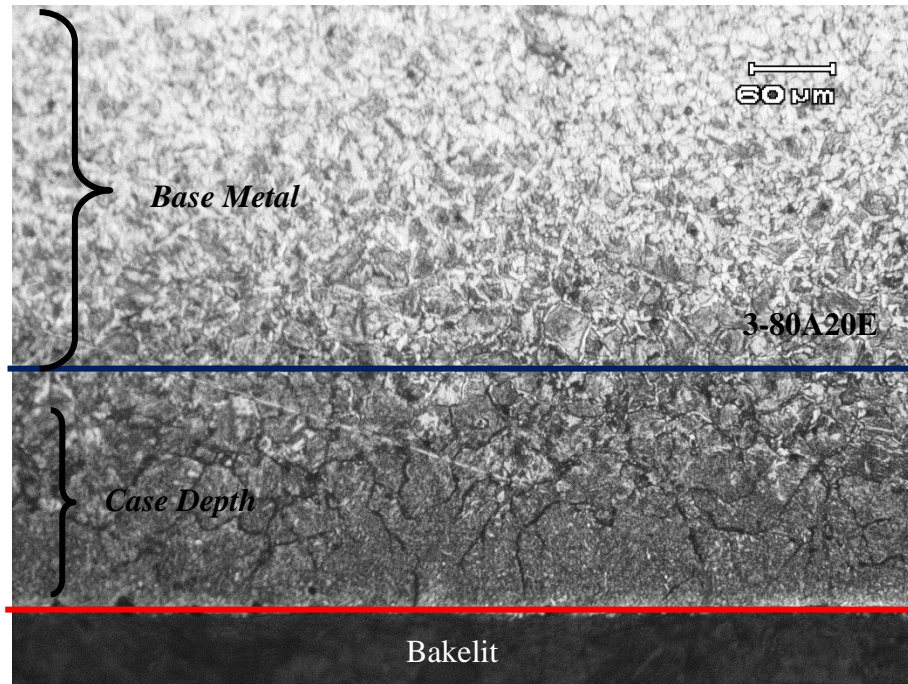




Gambar 4. 2 Hasil *Case Depth* 2 Jam

Dalam Gambar 4.2, terlihat bahwa *case depth* cenderung lebih tinggi pada kondisi waktu tahan 2 jam dibandingkan dengan kondisi waktu tahan 1 jam. Selain itu, terdapat kecenderungan penurunan *case depth* seiring dengan penurunan fraksi *energizer* (40%, 30%, dan 20%) pada komposisi *carburizer*. Pada kondisi fraksi *energizer* 40%, *case depth* mencapai 115,34 μm . Namun, ketika fraksi *energizer* turun menjadi 30%, *case depth* menurun menjadi 113,24 μm . Selanjutnya, pada fraksi *energizer* 20%, terjadi penurunan *case depth* menjadi 110,92 μm . Penurunan fraksi *energizer* dalam komposisi *carburizer* memiliki dampak signifikan terhadap proses difusi *carbon* ke dalam material. Dengan fraksi *energizer* yang lebih rendah, jumlah *carbon* yang tersedia untuk difusi menjadi lebih sedikit, menyebabkan kecepatan difusi *carbon* menjadi lebih lambat. Hal ini memberikan waktu yang lebih lama bagi *carbon* untuk menyebar ke dalam material dan membentuk lapisan karburisasi yang lebih dalam.



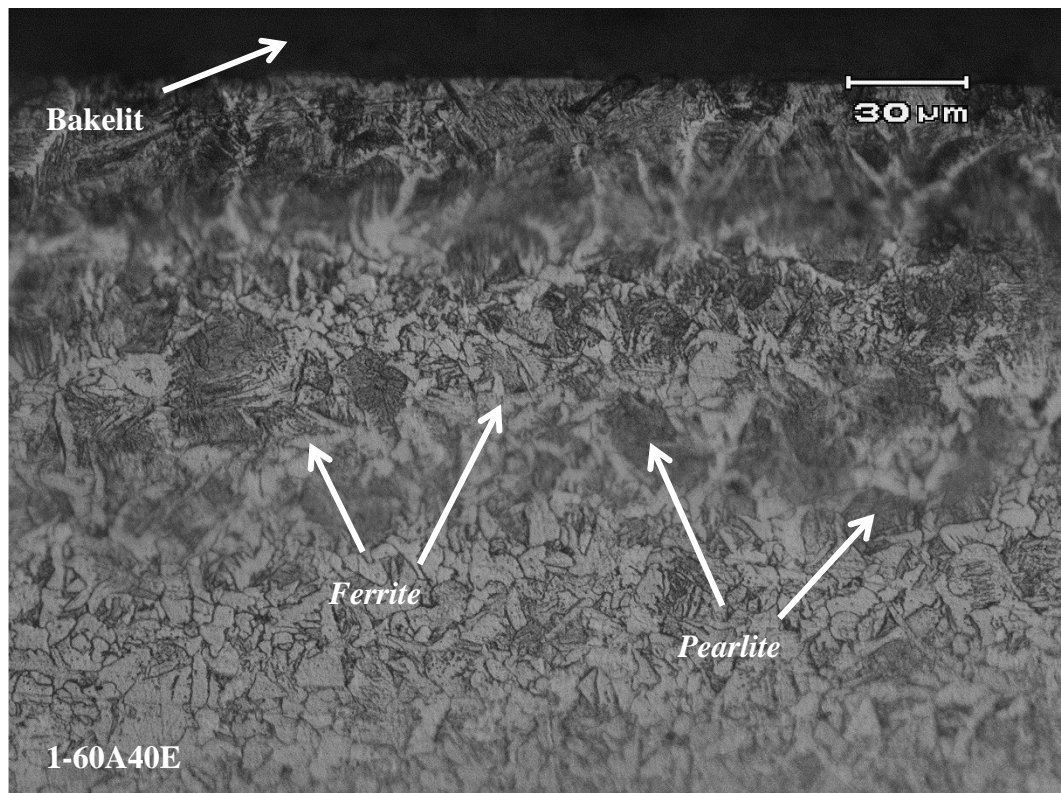


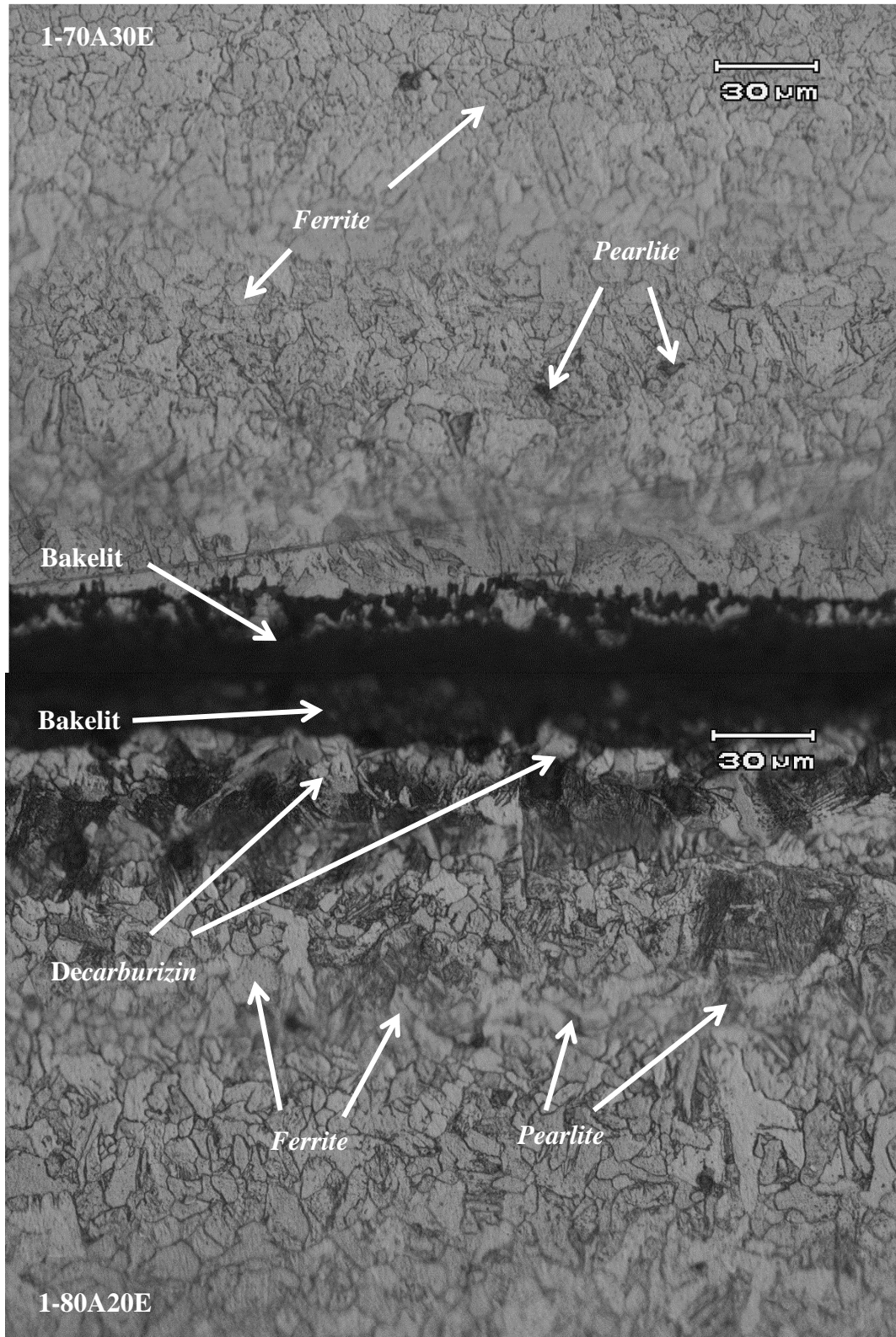
Gambar 4.3 Hasil *Case Depth* 2 Jam

Berdasarkan Gambar 4.3, dapat dilihat bahwa *case depth* cenderung lebih tinggi pada kondisi waktu tahan 2 jam dibandingkan dengan kondisi waktu tahan 1 jam. Selain itu, terlihat kecenderungan penurunan *case depth* seiring dengan penurunan fraksi *energizer* (40%, 30%, dan 20%) pada komposisi *carburizer*. Pada kondisi fraksi *energizer* 40%, *case depth* mencapai 141,55 μm. Namun, ketika fraksi *energizer* turun menjadi 30%, *case depth* menurun menjadi 136,53 μm. Selanjutnya, pada fraksi *energizer* 20%, terjadi penurunan *case depth* menjadi 130,83 μm. Penurunan fraksi *energizer* dalam komposisi *carburizer* memberikan dampak signifikan terhadap difusi *carbon* ke dalam material. Dengan fraksi *energizer* yang lebih rendah, jumlah *carbon* yang tersedia untuk difusi menjadi lebih sedikit, sehingga kecepatan difusi *carbon* menjadi lebih lambat. Hal ini memberikan waktu yang lebih lama bagi *carbon* untuk menyebar ke dalam material dan membentuk lapisan karburisasi yang lebih dalam

4.3 Hasil Fasa Mikrostruktur

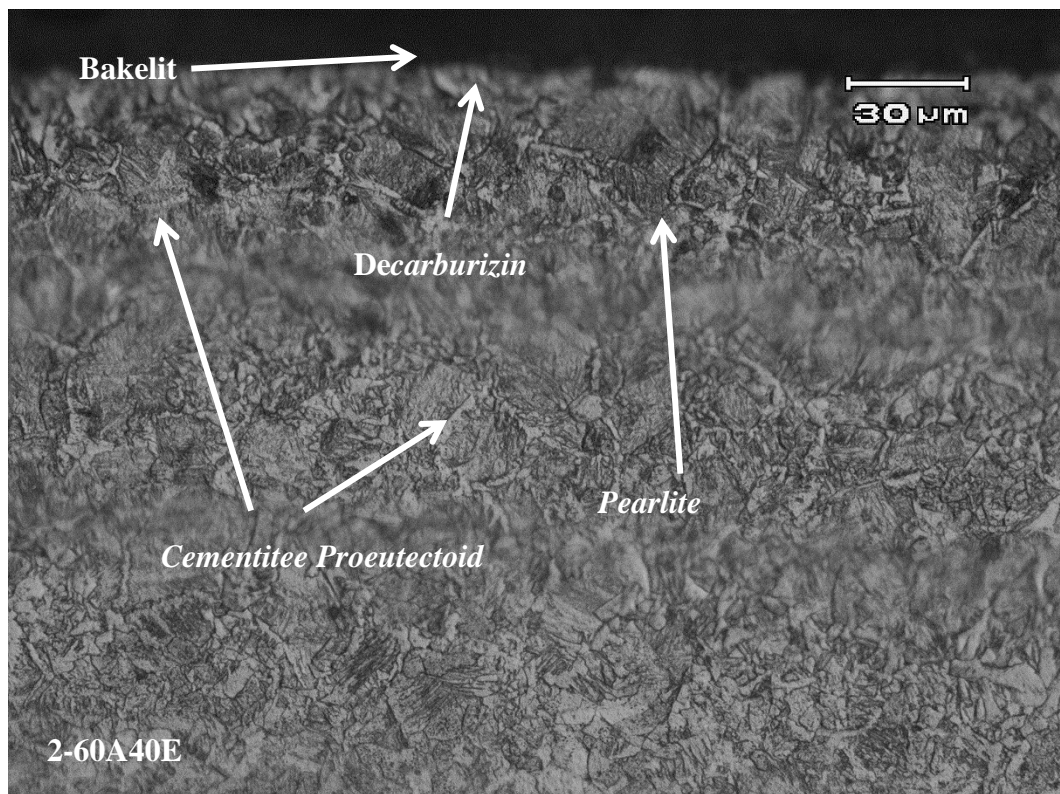
Dari hasil karakterisasi mikroskop optik, didapatkan beberapa fasa konstituen pada baja yang di *carburizing* . Fasa tersebut antara lain adalah *pearlite* dan *ferrite* pada waktu tahan 1 jam. *Pearlite* dan *cementite* untuk waktu tahan 2 dan 3 jam. Hal ini menunjukkan adanya 3 fasa berbeda yang terbentuk selama proses *carburizing* . Perubahan fasa ini terjadi karena proses *carburizing* melibatkan peningkatan kandungan *carbon* dalam material, yang pada gilirannya mempengaruhi struktur mikro baja. Pada waktu tahan 1 jam, kandungan *carbon* yang lebih rendah menyebabkan terbentuknya fasa *pearlite* dan *ferrite*, yang merupakan campuran dari fasa *ferrite* dan *cementite*. Namun, seiring dengan peningkatan waktu tahan menjadi 2 dan 3 jam, kandungan *carbon* dalam material meningkat, sehingga fasa *cementite* mulai terbentuk.

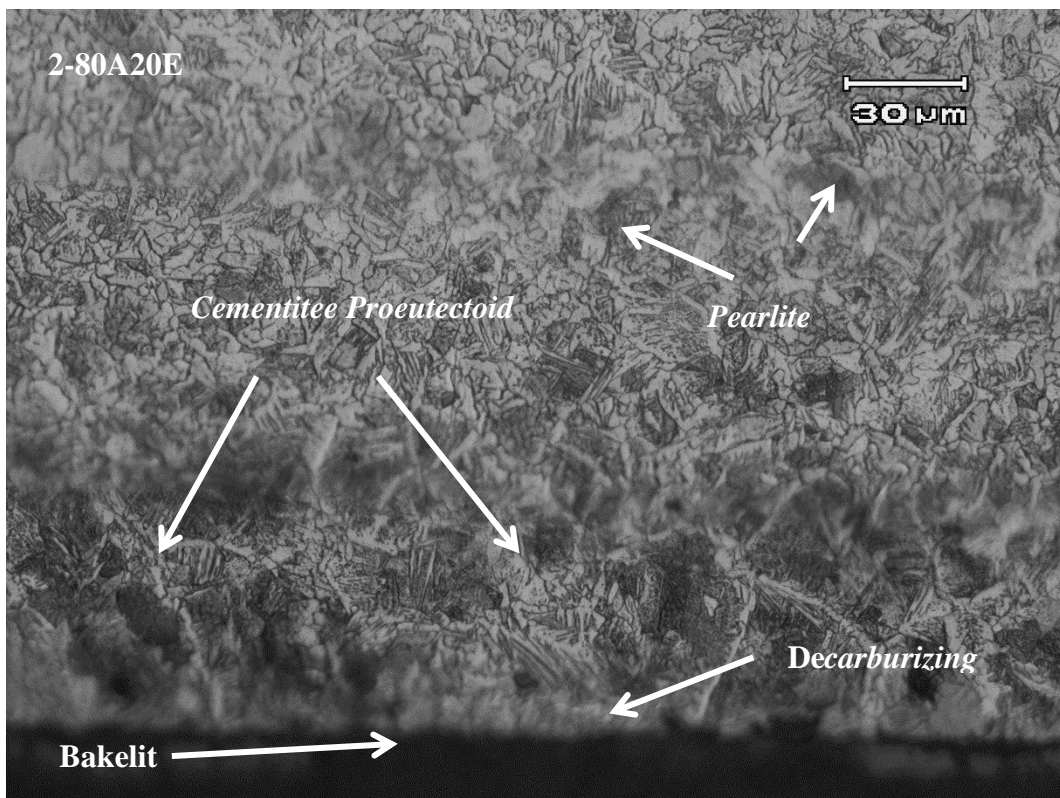
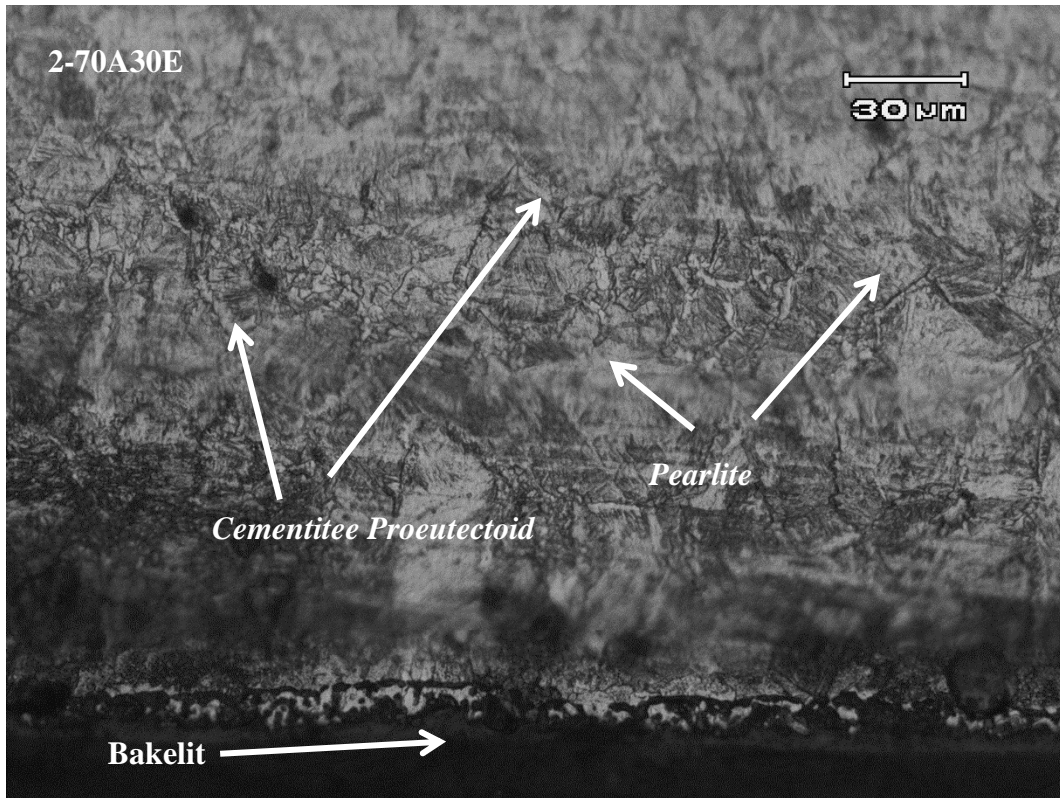




Gambar 4. 4 Hasil Mikrostruktur Sampel 1 Jam

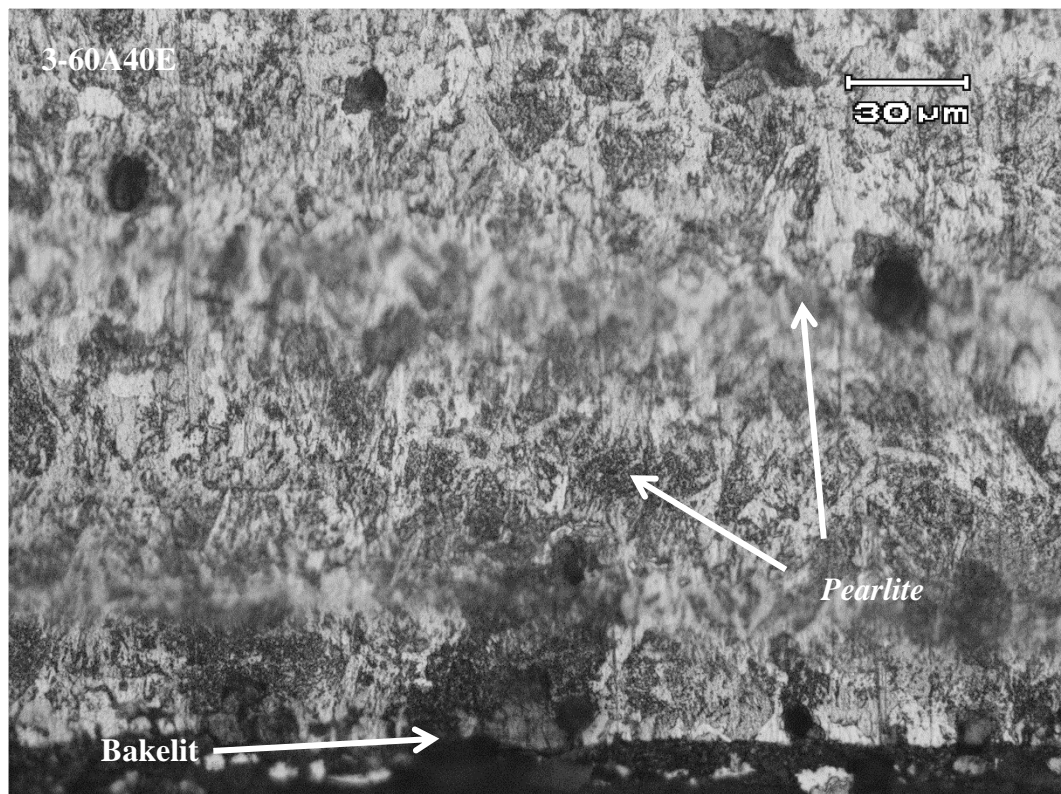
Pada Gambar 4.4 dalam konteks ini memberikan penjelasan yang menarik mengenai komposisi arang pada fraksi *carburizer* dan dampaknya terhadap jumlah fasa *pearlite* pada permukaan. Dalam gambar tersebut, terlihat bahwa seiring dengan meningkatnya komposisi arang pada fraksi *carburizer*, jumlah fasa *pearlite* pada permukaan juga meningkat secara signifikan. Penjelasan ini dapat dihubungkan dengan proses *carburizing*, yang merupakan metode perlakuan panas yang digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan material logam. Dalam proses ini, komposisi arang pada *carburizer* berperan penting dalam mempengaruhi hasil akhir perlakuan panas. Dengan meningkatnya komposisi arang pada fraksi *carburizer*, jumlah *carbon* yang ditransfer ke permukaan logam juga meningkat. *Carbon* yang ditransfer ini kemudian akan berinteraksi dengan logam dan membentuk fasa *pearlite* pada permukaan.

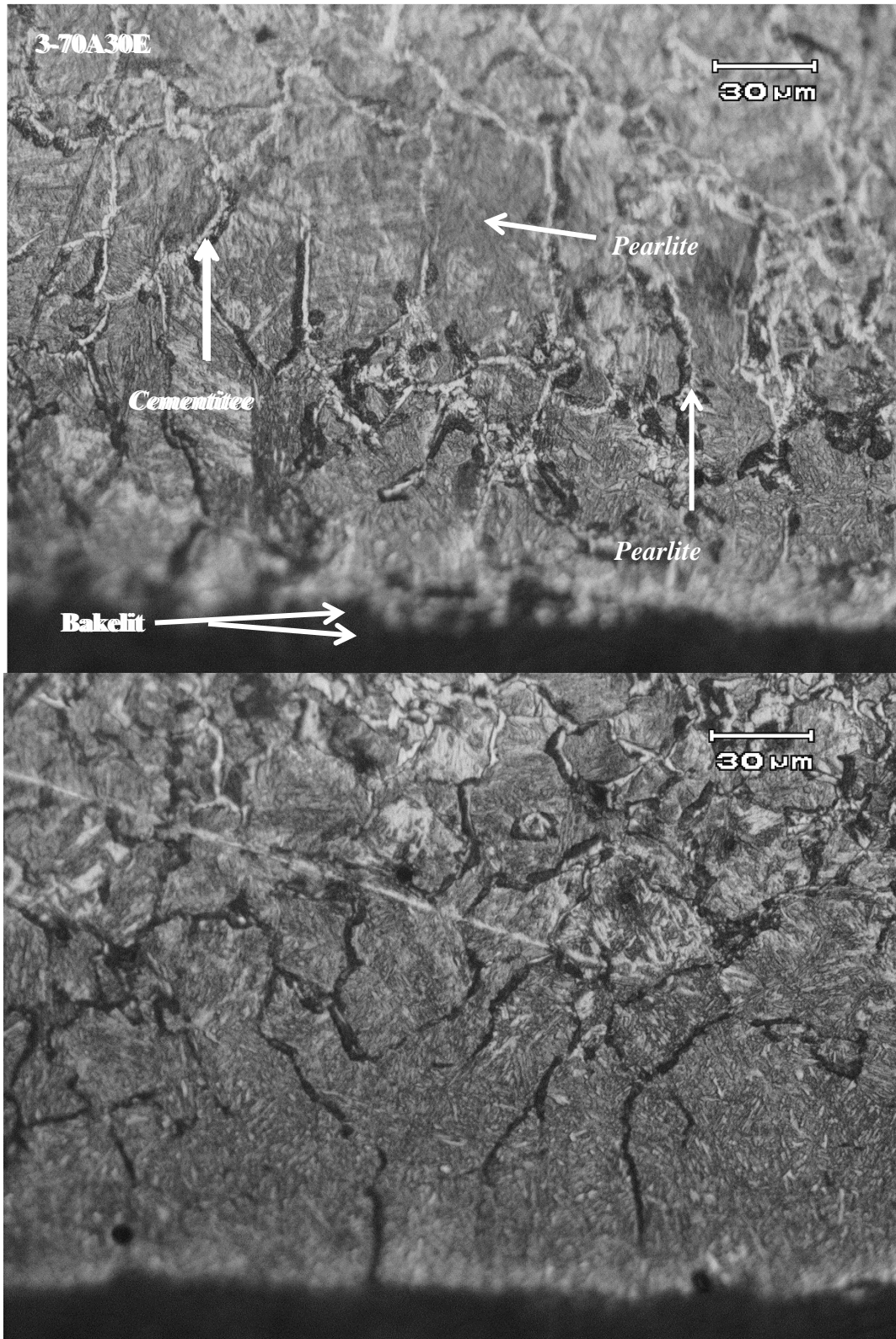




Gambar 4. 5 Hasil Mikrostruktur Sampel 2 Jam

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya waktu tahan menjadi 2 jam, terjadi pembentukan fasa *cementite* proeutectoid yang sebelumnya tidak ditemukan. Hal ini menunjukkan bahwa waktu tahan dalam proses *carburizing* memiliki pengaruh signifikan terhadap pembentukan fasa tersebut. Pada waktu tahan yang lebih singkat, pembentukan fasa *cementite* proeutectoid terbatas dan tidak signifikan. Namun, dengan meningkatnya waktu tahan menjadi 2 jam, *carbon* memiliki lebih banyak waktu untuk berinteraksi dengan logam, yang menyebabkan pembentukan fasa *cementite* proeutectoid yang lebih banyak pada permukaan material. Keberadaan fasa *cementite* proeutectoid dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik material.





Gambar 4. 6 Hasil Mikrostruktur Sampel 3 Jam

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan yang signifikan dalam pembentukan fasa *cementite* proeutectoid ketika waktu tahan pada proses *carburizing* diperpanjang menjadi 3 jam dibandingkan dengan kondisi 2 jam. Hal ini mengindikasikan bahwa waktu tahan yang lebih lama memungkinkan *carbon* untuk lebih berdifusi dan berinteraksi dengan material, yang berkontribusi pada peningkatan pembentukan fasa *cementite* proeutectoid. Dalam kondisi 3 jam, terlihat adanya peningkatan yang lebih nyata dalam jumlah fasa *cementite* proeutectoid pada permukaan material. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa *carbon* memiliki lebih banyak waktu untuk berdifusi ke dalam material dan menggabungkan dengan atom-atom logam untuk membentuk fasa *cementite* proeutectoid.

4.6 Hasil Kalkulasi Koefisien Difusi

Selanjutnya didapatkan hasil mengenai kalkulasi dari koefisien difusi *carbon* pada masing-masing sampel.

$$\frac{Cx - Co}{Cs - Co} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Didapatkan hasil dari perhitungan koefisien difusi berdasarkan kalkulasi menggunakan Hk. II Fick's sebagaimana persamaan di atas dengan nilai $Q=148$ kJ/mol dan $T=1223$ K (950 °C), dan C_o adalah $0,261$ atau $26,1\%$.

$$D = \frac{\left(\frac{x}{2 * \sqrt{t}}\right)^2}{-2 \log\left(\frac{Cx - Co}{Cs - Co}\right) - 1}$$

Diperoleh variabel sebagai berikut :

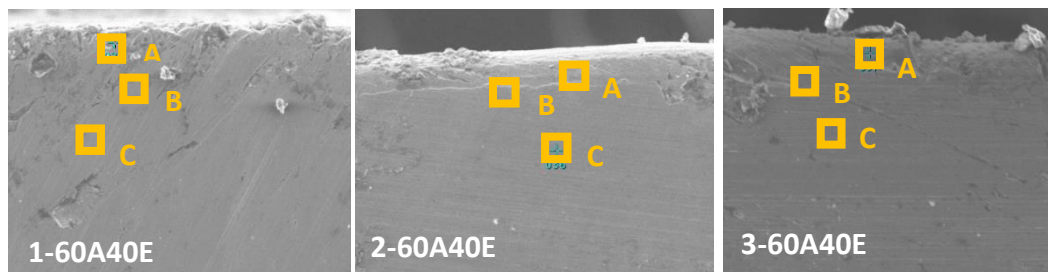
Tabel 4.3 Hasil Kalkulasi Koefisien Difusi

Kode Sampel	X (cm)	Cs (%)	C _x (%)	D (x 10 ⁻¹⁰ cm ² /s)
1-60A40E	0,0119	10%	5,38%	0,057
1-70A30E	0,0081	25,10%	7,67%	0,163
1-80A30E	0,0083	7,88%	2,85%	1,573
2-60A40E	0,0091	7,80%	6,23%	0,040
2-70A30E	0,0137	9,34%	8,28%	0,066
2-80A30E	0,0060	35,92%	9,45%	0,411
3-60A40E	0,0092	14,94%	8,84%	0,027
3-70A30E	0,0058	48,70%	28,04%	0,061
3-80A30E	0,0057	13,83%	6,23%	0,367

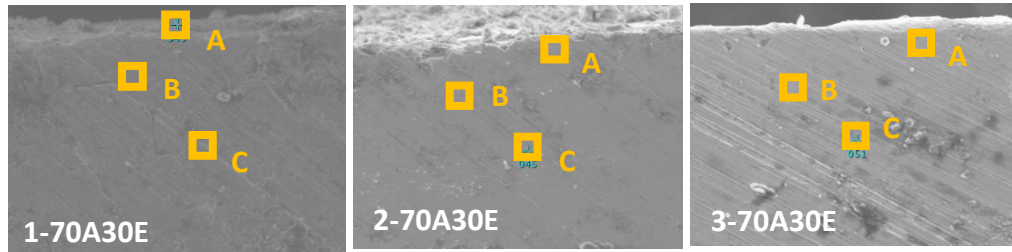
Pada Tabel di atas dapat diketahui mengenai hasil dari koefisien difusi yang terjadi pada sampel selama proses *carburizing*. Dari hasil pengujian, didapatkan bahwa terdapat pengaruh dari komposisi sampel dan waktu tahan pada proses *carburizing*.

4.5 Hasil SEM-EDS

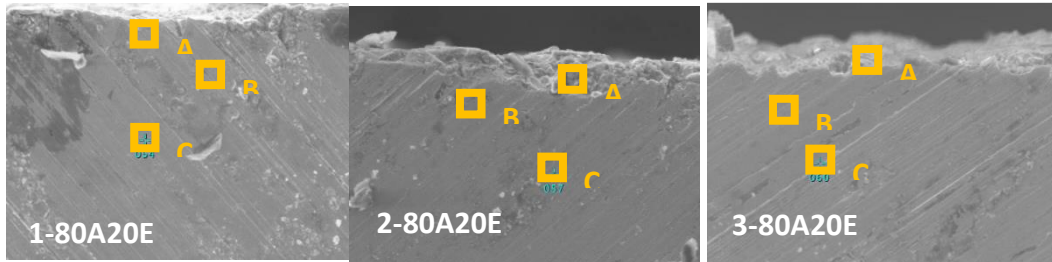
Pada Pengujian *EDS* ini, nilai komposisi lebih mengarah kepada unsur C yang ditinjau dari permukaan hingga ke bagian dalam pada sampel. Hal ini ditujukan untuk mengaitkan perihal pengaruh dari masing-masing variabel terhadap distribusi unsur C dan tingkat penetrasi difusi.



Gambar 4. 7 Hasil *EDS* Sampel 60A-40E



Gambar 4. 8 Hasil *EDS* Sampel 70A-30E



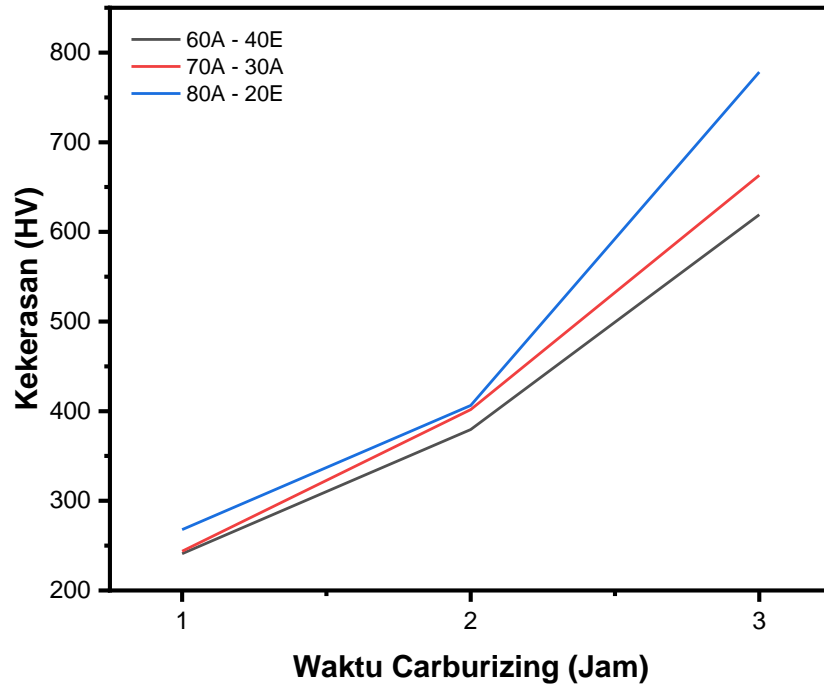
Gambar 4. 9 Hasil *EDS* Sampel 80A-20E

Melalui Gambar 4.7 sampai dengan Gambar 4.9, didapatkan beberapa lokasi sampling *EDS* pada masing-masing komposisi sampel. Pada setiap gambar, titik A hingga C menandakan lokasi dari permukaan (*surface*) hingga bagian inti atau dalam sampel (*sub-surface*). Hal ini bertujuan untuk mengetahui tentang *case depth* dan distribusi *carbon* selama proses *carburizing* dan keterkaitannya dengan variabel yang diteliti.

4.7 Pengaruh Dari Waktu Tahan *Carburizing*

Setelah melihat mengenai pembahasan yang sudah dilakukan, dapat diketahui bahwa waktu penahanan dalam proses *carburizing* memiliki andil yang besar dalam mikrostruktur, sifat mekanik, dan penetrasi *carbon* pada baja. Dalam proses *carburizing*, meningkatnya waktu tahanan akan berdampak pada peningkatan kekerasan material. Sebagai contoh, pada sampel dengan fraksi berat 60% arang ditambah 40% *energizer*, pengolahan selama 1 jam hingga 2 jam

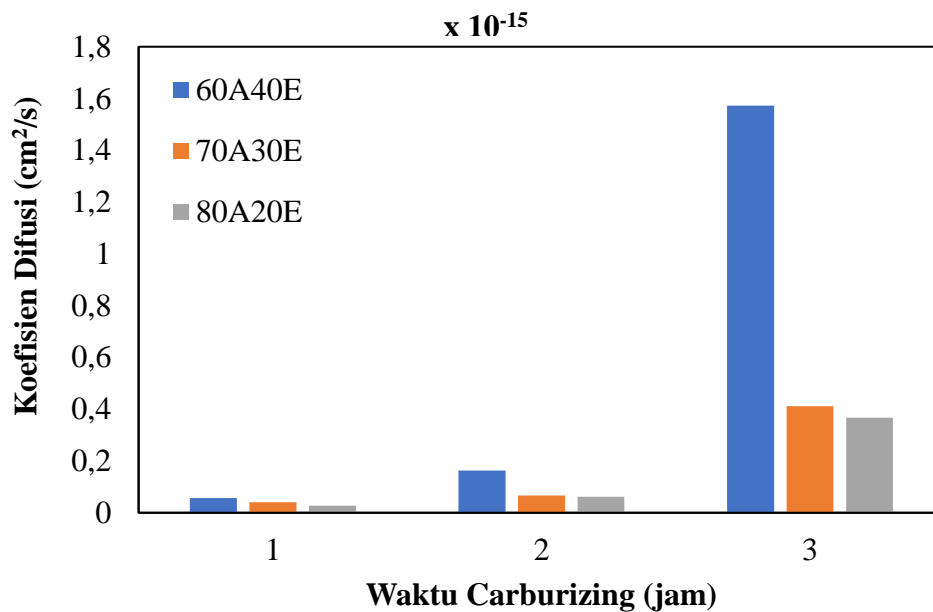
menghasilkan peningkatan kekerasan dari 240 HV menjadi 246 HV, dan meningkat lagi menjadi 452 HV saat waktu tahanan mencapai 3 jam, sebagaimana yang ditampilkan oleh Gambar 4.11.



Gambar 4. 10 Pengaruh Waktu *Carburizing* Terhadap Kekerasan

Hal ini juga terjadi pada sampel dengan fraksi berat 70% arang ditambah 30% *energizer* dan 80% arang ditambah 20% *energizer*, di mana kekerasan meningkat seiring dengan peningkatan waktu *carburizing*, misalnya dari 1 jam hingga 2 jam sebesar 243,73 HV dan 267,9 HV, dan dari 2 jam hingga 3 jam sebesar 463 HV dan 778,4 HV. Peningkatan bertahap ini terjadi akibat pengaruh dari waktu proses terhadap difusi *carbon* kepada permukaan sampel. Meningkatnya waktu *carburizing* maka akan menghasilkan proses yang lebih lama, hal ini akan menghasilkan banyaknya *carbon* yang terakumulasi pada permukaan dan terdifusi (Joshua, 2021). Hal ini sesuai dengan literatur yang dicetuskan oleh Hosseini dkk

(2016) dimana material yang telah mengalami proses *carburizing* akan mengalami peningkatan kekerasan. Waktu *carburizing* yang lebih lama juga menghasilkan nilai difusivitas *carbon* yang diukur menggunakan hasil dari *EDS* mengenai konsentrasi nilai *carbon* pada 3 titik sebagaimana yang terlampir pada tabel 4.4 dan persamaan Hukum Fick's mengenai koefisien difusi, dapat dilihat hasil yang didapatkan sebagaimana Gambar 4.12:

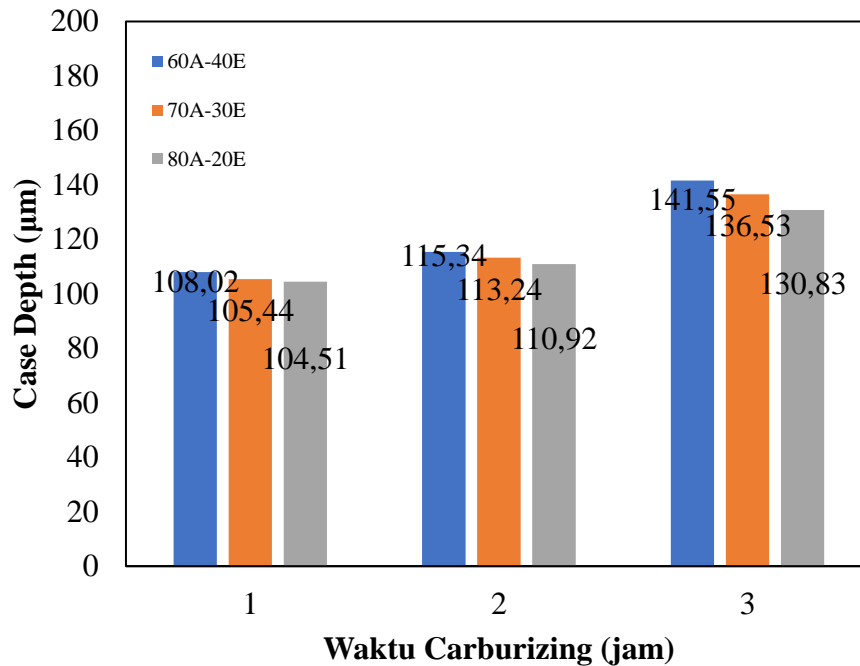


Gambar 4. 11 Pengaruh Waktu *Carburizing* Terhadap Koefisien

Didapatkan pola yang menandakan bahwa semakin lama waktu penahanan proses *carburizing* maka menghasilkan nilai koefisien difusi yang meningkat. Pada penelitian ini, didapatkan bahwa nilai koefisien difusi tertinggi berada pada sampel 3-60A40E yaitu sebesar $1,57 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ dimana nilai ini merupakan nilai maksimal pada waktu tiga jam. Dapat dilihat pada Gambar 4.12 bahwa seiring dengan bertambahnya waktu *carburizing*, maka akan menghasilkan nilai koefisien difusi yang meningkat. Pada kasus ini, meingkatnya waktu *carburizing*

menghasilkan kondisi dimana atom *carbon* memiliki lebih banyak waktu untuk berdifusi ke dalam baja. Hal ini mengakibatkan penetrasi *carbon* yang lebih dalam ke dalam struktur baja (Satria & Setiawan, 2019). Dengan demikian, lapisan *carburizing* yang dihasilkan menjadi lebih tebal dan merata, yang mempengaruhi sifat-sifat material seperti kekerasan permukaan. Selain itu, dalam proses *carburizing*, difusi *carbon* ke dalam baja adalah suatu proses yang bergantung pada waktu. Semakin lama waktu *carburizing*, semakin banyak atom *carbon* yang memiliki kesempatan untuk berdifusi ke dalam baja. Ini disebabkan oleh perbedaan konsentrasi *carbon* antara permukaan baja dan dalam material. Seiring dengan berjalannya waktu, gradien konsentrasi ini mendorong laju difusi *carbon* yang lebih tinggi dan menghasilkan koefisien difusi yang meningkat pada permukaan. Hal ini sesuai dengan pernyataan Utami dkk (2019) yang menyatakan bahwa selama waktu tahan yang tinggi, *carbon* akan berdifusi secara perlahan dari atmosfer *carburizing* ke permukaan sehingga akan meningkatkan koefisien difusi pada permukaan.

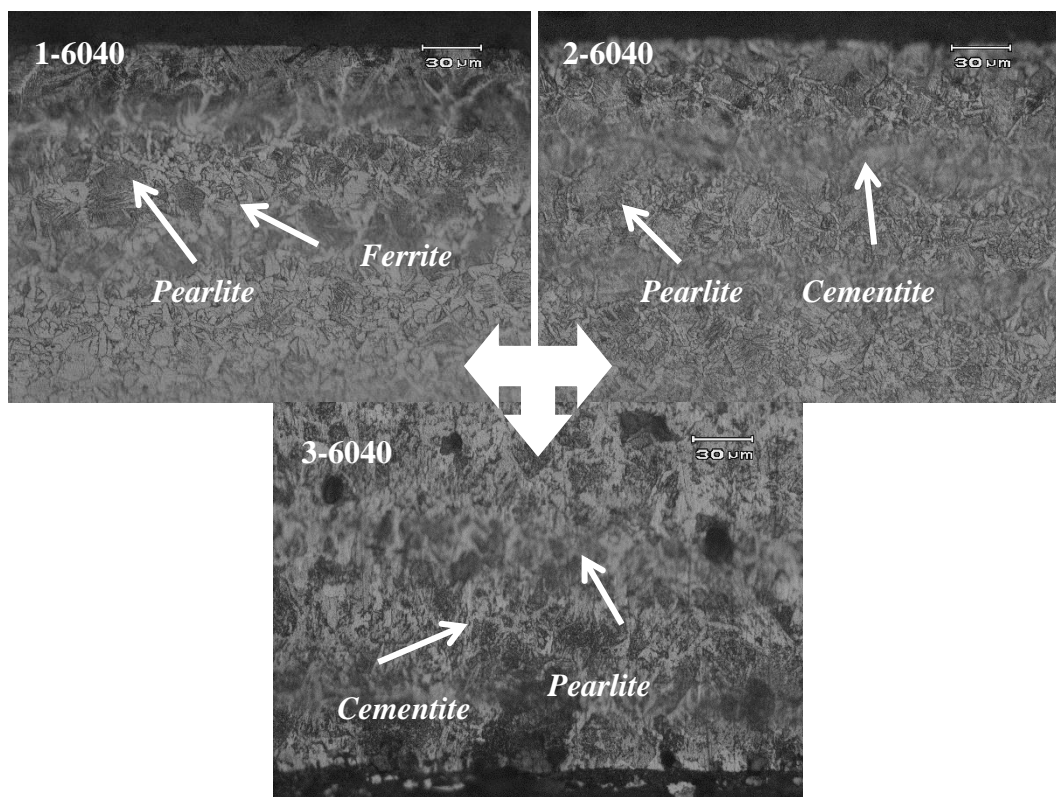
Selanjutnya, dilakukan analisa kedalaman *case depth* yang terbentuk dan mencari kaitannya dengan meningkatnya difusi *carbon* dari permukaan seiring dengan bertambahnya waktu *carburizing* sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 4.13:



Gambar 4. 12 Pengaruh Waktu *Carburizing* Terhadap *Case Depth*

Nilai *case depth* cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu *carburizing*. Pada sampel dengan fraksi berat 60% arang ditambah 40% *energizer*, didapatkan nilai *case depth* sebesar 67,62 µm pada waktu 1 jam, dan meningkat menjadi 74,94 dan 101,15 µm untuk waktu *carburizing* selama 2 dan 3 jam, secara berurutan. Hal ini juga terjadi pada sampel dengan fraksi berat 70% arang ditambah 30% *energizer* dan sampel dengan fraksi berat 80% arang ditambah 20% *energizer* yang mengalami kondisi serupa. Secara teori, semakin lama waktu *carburizing*, maka jumlah atom *carbon* yang terdifusi ke permukaan spesimen akan semakin banyak dan semakin dalam, sehingga menghasilkan deposit *carbon* yang tinggi. Selain itu, semakin lama waktu tahan, maka difusi yang terjadi juga akan semakin meningkat dikarenakan atom *carbon* memiliki waktu lebih untuk masuk mengisi rongga pada atom Fe. Dari hal ini, didapatkan *case depth* yang akan meningkat secara drastis. Fenomena ini sesuai dengan literatur yang dijelaskan pada BAB

sebelumnya oleh Ramli & Wu (2022) yang mengatakan bahwa nilai *case depth* akan meningkat seiring dengan meningkatnya waktu *carburizing*. Selain itu, sebuah penelitian yang menggunakan arang tulang kambing dan CaCO_3 sebagai *energizer* menunjukkan bahwa *case depth* meningkat seiring dengan peningkatan waktu penahanan pada temperatur pemanasan (Karim, 2012). Lama waktu *carburizing* menghasilkan peningkatan kedalaman *case depth* dikarenakan semakin banyak dan semakin dalam *carbon* yang terdifusi dari permukaan.



Gambar 4. 13 Perbandingan Strukur Mikro Terhadap Waktu *Carburizing*

Dilakukan pula analisa mengenai fasa yang terbentuk selama proses *carburizing* dimana didapatkan fasa *pearlite* dan *ferrite* pada kondisi 1 jam, namun saat kondisi 2 jam waktu *carburizing* didapatkan fasa *cementite* dan *pearlite*. Proses *carburizing* akan meningkatkan kandungan *carbon* pada material, yang pada

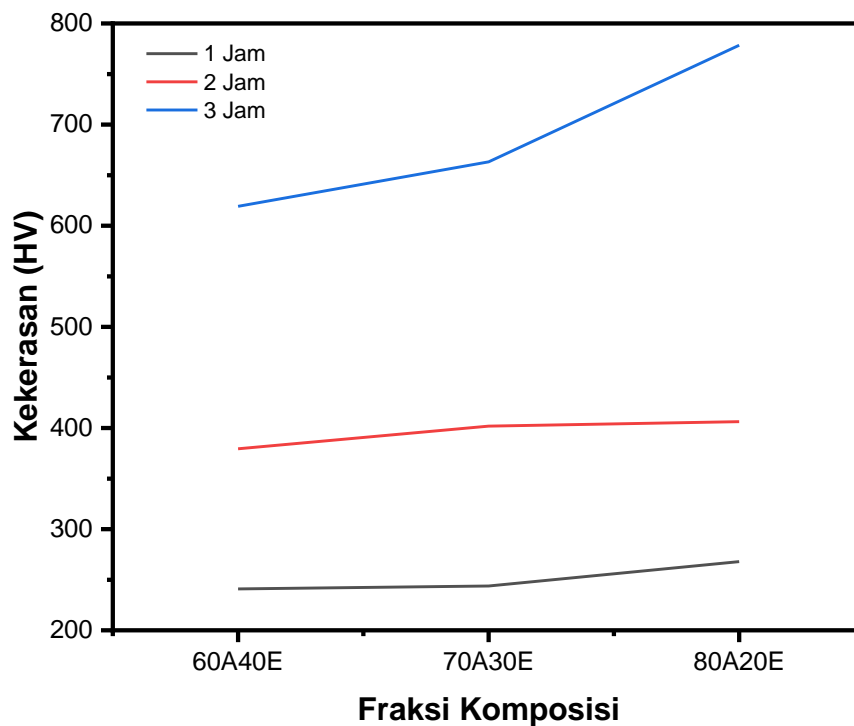
gilirannya akan meningkatkan jumlah fasa *pearlite* yang ada. Fasa *pearlite* ini memiliki sifat kekerasan yang lebih tinggi daripada fasa *ferrite*, sehingga peningkatan jumlah fasa *pearlite* akan meningkatkan kekerasan material secara keseluruhan. Didapatkan bahwa pada sampel 2 jam cenderung menghasilkan lebih banyak fasa *pearlite* dan cenderung tidak terdeteksinya fasa *ferrite* dikarenakan transformasinya menjadi *pearlite*. Selain itu, dapat dilihat pada waktu tahan 2 jam. Didapatkan fasa *cementite proeutectoid* yang terbentuk dimana fasa ini tidak terdeteksi sebelumnya pada kondisi 1 jam. Perubahan fasa ini dapat dijelaskan melalui perubahan mikrostruktur yang terjadi seiring dengan waktu tahan proses *carburizing*. Menurut literatur yang dicetuskan oleh Okwesileze (2022), pada waktu tahan yang lebih lama, seperti 2 jam, proses *carburizing* memiliki kesempatan lebih besar untuk meningkatkan kandungan *carbon* pada material. Dengan demikian, terbentuk lebih banyak fasa *pearlite* yang memiliki sifat kekerasan yang lebih tinggi daripada fasa *ferrite*. Selain itu, terbentuknya fasa *cementite proeutectoid* pada waktu tahan 2 jam menunjukkan bahwa proses *carburizing* telah mencapai tahap dimana *cementite* mulai terbentuk sebelum *pearlite* (Zuchry M., 2019). Fasa *cementite proeutectoid* ini memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada fasa *ferrite*, sehingga peningkatan jumlah fasa *cementite proeutectoid* juga akan meningkatkan kekerasan material secara keseluruhan.

Melalui analisa yang dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi waktu *carburizing* maka akan menghasilkan nilai difusivitas *carbon* yang lebih tinggi dan meningkatkan konsentrasi *carbon* pada *sub-surface*. Kondisi ini akan menghasilkan nilai *case depth* yang semakin dalam dan menghasilkan transformasi fasa *ferrite* menjadi *pearlite* dan *pearlite* menjadi *cementite*

dikarenakan nilai *carbon* yang tinggi akibat difusi. Hadirnya fasa *cementite* pada baja akan menghasilkan nilai kekerasan yang meningkat. Hal ini menandakan bahwa seiring dengan meningkatnya waktu *carburizing* maka akan menghasilkan peningkatan kekerasan pada material.

4.7 Pengaruh Dari Komposisi Fraksi *Carburizer*

Pada percobaan yang dilakukan, didapatkan bahwa nilai katalis atau *energizer* BaCO_3 s pada komposisi menurun seiring dengan meningkatnya fraksi komposisi *carbon* yang dibawa oleh arang. *Energizer* sendiri berfungsi sebagai pengikat CO_2 yang dilepaskan oleh Arang selama proses *carburizing* dan mempercepat difusi *carbon* pada permukaan.



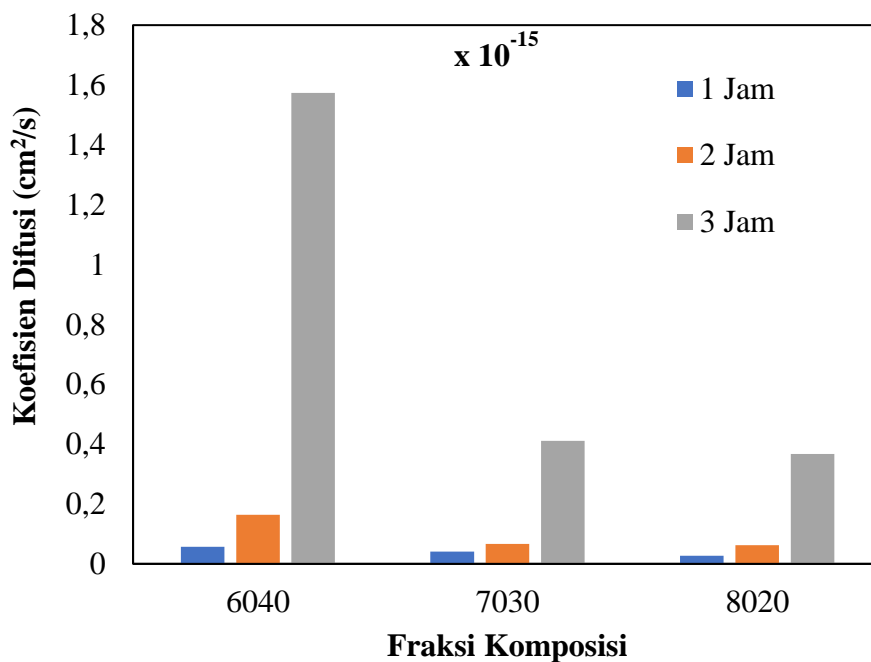
Gambar 4. 14 Pengaruh Fraksi Terhadap Nilai Kekerasan

Dalam penelitian ini, nilai *energizer* yang lebih rendah disertai dengan komposisi *carbon* yang lebih tinggi menghasilkan peningkatan kekerasan pada sampel baja SS400 sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar di atas. Pada kondisi 1 jam, terjadi peningkatan ini sebesar 1,18% dan kembali meningkat hingga 9,88% untuk kondisi fraksi berat arang 60%-70% dan 70%-80%. Peningkatan ini terjadi akibat meningkatnya jumlah arang saat proses *carburizing* dimana jumlah arang akan mempengaruhi kandungan *carbon* selama proses. Hal ini sesuai dengan literatur dimana peningkatan kekerasan yang terjadi seiring dengan meningkatnya komposisi arang diakibatkan oleh tingginya jumlah volume fraksi dari arang yang bersifat sebagai *carburizer*. Kondisi ini sesuai dengan literatur yang dicetuskan oleh Soenoko & Siswanto (2018) yang mengatakan bahwa tingginya kandungan *carbon* pada arang akan mempengaruhi jumlah atom *carbon* yang berdifusi kepada baja dan cenderung akan menghasilkan lebih banyak fraksi fasa *pearlite* seiring dengan meningkatnya jumlah *carburizer* arang. Kandungan *carbon* yang terdifusi ke permukaan akan membentuk lapisan permukaan ber*carbon* tinggi dan meningkatkan kekerasan baja.

Selanjutnya, digunakan katalis BaCO_3 sebagai *energizer* pada proses ini yang komposisinya menurun seiring dengan peningkatan komposisi arang. *Energizer* sendiri berfungsi sebagai pengikat dari CO_2 yang dilepaskan oleh arang selama proses *carburizing* dan mempercepat difusi interstisi dari *carbon* pada permukaan, atau dapat disebut sebagai katalis. Pada kasus ini didapatkan hasil bahwa semakin tinggi nilai *energizer* cenderung menghasilkan kekerasan yang menurun dari baja SS400. Pada kasus ini didapatkan kandungan *carbon* yang tinggi pada arang yang akan menjadi tolak ukur perihal kekerasan permukaan pada

material. Hal ini menghasilkan ketersediaan jumlah *carbon* pada permukaan selama proses *carburizing* berlangsung yang terdispersi ke permukaan sehingga menjadikan jumlah atom C yang tersedia pada permukaan dan berdifusi lebih tinggi apabila dibandingkan dengan sampel yang memiliki konsentrasi fraksi *carburizer* rendah. Hal ini sesuai dengan pernyataan Ihom & Andona (2018) yang menyatakan bahwa peningkatan kekerasan dapat terjadi apabila konsentrasi dari *carburizer* meningkat dan cenderung menghasilkan deposit *carbon* pada permukaan. Oleh karena itu, nilai *energizer* yang menurun yang diiringi dengan nilai *carburizer* yang meningkat akan menghasilkan peningkatan kekerasan pada sampel.

Selanjutnya, dilakukan analisis mengenai nilai koefisien difusi (D) antara fraksi komposisi *energizer* dan didapatkan grafik sebagaimana gambar di bawah :

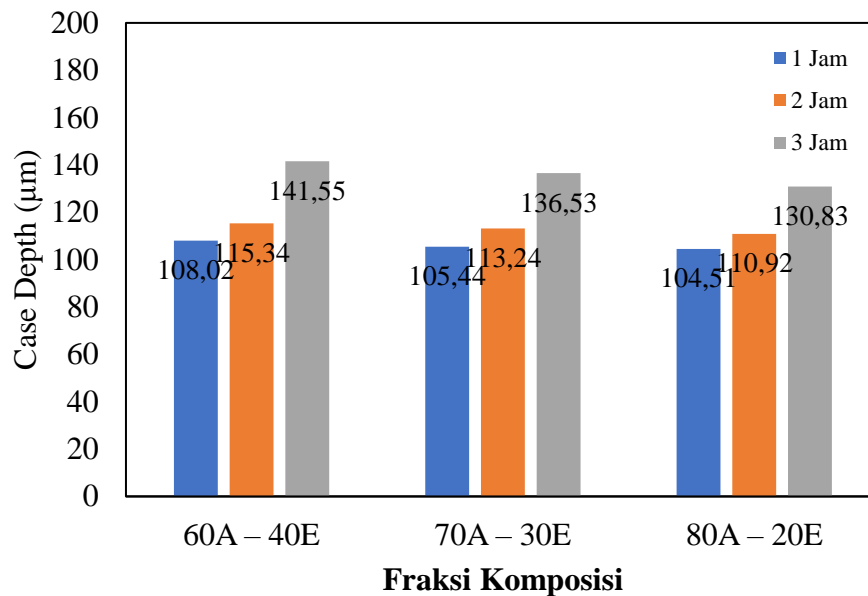


Gambar 4. 15 Pengaruh Fraksi Komposisi Terhadap Koefisien Difusi

Dapat dilihat pada grafik dimana menampilkan bahwa koefisien difusi

menurun seiring dengan menurunnya fraksi *energizer* yang diiringi dengan meningkatnya fraksi arang atau *carburizer*. Didapatkan bahwa nilai tertinggi terdapat pada sampel 3-60A40E dengan koefisien difusi senilai $1,57 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$. Nilai ini terus menurun seiring dengan meningkatnya komposisi arang hingga pada sampel 3-80A20E senilai $0,36 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$. *Energizer* dapat mempengaruhi konsentrasi partikel yang berdifusi. Jika fraksi *energizer* menurun, maka konsentrasi partikel dalam medium juga dapat menurun. Hal ini dapat mengurangi kepadatan partikel yang berdifusi dan menghambat laju difusi (Ihom & Andona, 2018). Hal ini juga sesuai dengan literatur yang dijelaskan oleh Joshua (2021) pada BAB II dimana fraksi *energizer* juga dapat mempengaruhi interaksi antara partikel yang berdifusi. Jika fraksi *energizer* menurun, maka interaksi antara partikel-partikel tersebut dapat menjadi lebih kuat. Interaksi yang lebih kuat ini dapat menghambat pergerakan partikel dan memperlambat laju difusi. Hal ini berpengaruh terhadap interstisi *carbon* dimana dengan nilai *energizer* yang rendah cenderung *carbon* tidak terdifusi dengan baik dan cenderung mengendap pada permukaan.

Selanjutnya, dilakukan pengamatan dari nilai *case depth* yang dihasilkan sebagaimana Gambar 4.17. Didapatkan mengenai pengaruh dari komposisi arang dan katalis terhadap kedalaman penetrasi difusi atom *carbon* yang ditandai dengan *case depth*. Melihat pada Gambar 4.17, didapatkan jarak *case depth* cenderung meningkat seiring dengan menurunnya komposisi arang yang bertindak sebagai *carburizer*.

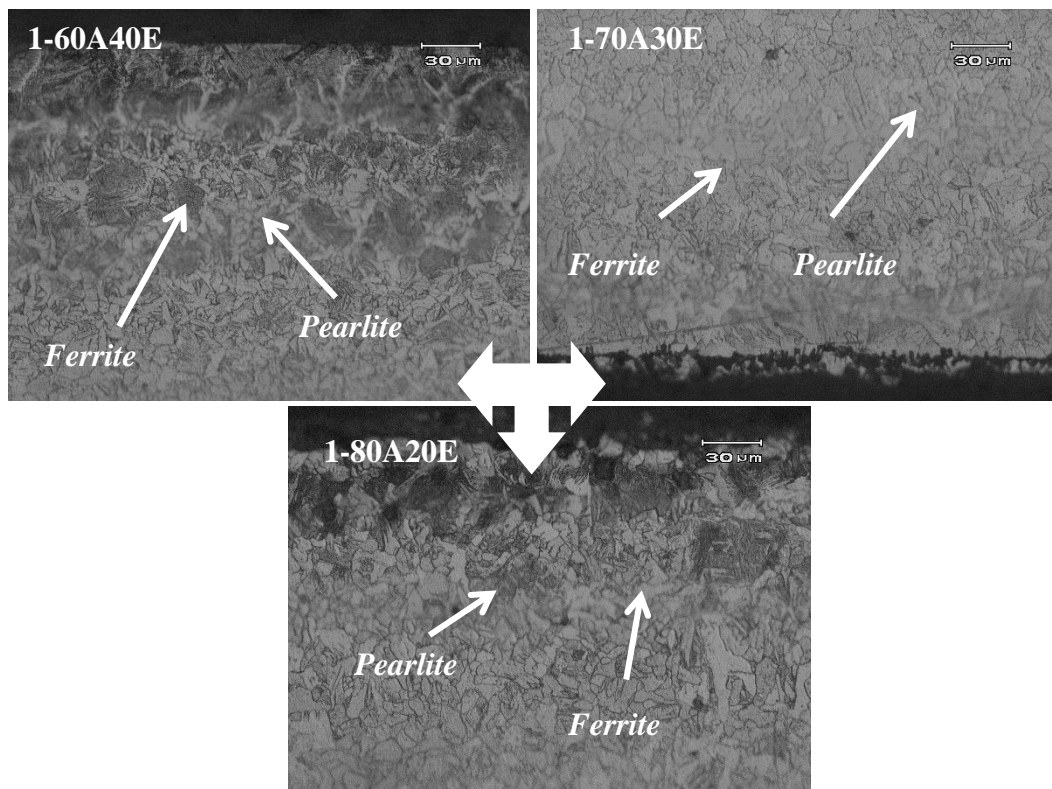


Gambar 4. 16 Pengaruh Fraksi Komposisi Terhadap *Case Depth*

Didapatkan nilai *case depth* yang semakin menurun seiring dengan berkurangnya fraksi *energizer*. Berdifusinya atom C dapat terjadi dikarenakan atom C memiliki radius yang lebih kecil 15% apabila dibandingkan dengan atom Fe. Hal ini akan memudahkan atom C untuk menyusup secara interstisi di antara atom Fe. Hal ini dapat terjadi dikarenakan *energizer* bertindak sebagai katalis dan pengikat CO₂ pada permukaan. Akan tetapi, apabila jumlah dari atom C yang terakumulasi sedikit, maka cenderung hanya akan mengisi pada permukaan tanpa terjadi penetrasi yang berlebih hingga ke substrat atau inti. Kondisi ini memungkinkan terjadinya penetrasi yang tinggi di awal sehingga menciptakan nilai *case depth* yang tinggi, namun seiring dengan bertambahnya nilai *energizer* tanpa diiringi oleh nilai *carburizer* yang cukup maka cenderung akan menghasilkan nilai *case depth* yang tinggi namun kekerasan yang rendah (Hosseini, 2016). Hal ini sesuai dengan literatur dimana meningkatnya konsentrasi dari *energizer* selama proses

carburizing akan menghasilkan tingkat difusi yang tinggi untuk atom C masuk secara interstisi melalui permukaan (Ramli & Wu, 2022).

Selanjutnya, dilakukan analisa mengenai struktur mikro yang terbentuk selama proses *carburizing* dengan komposisi fraksi yang berbeda. Dapat dilihat mengenai perbandingan dari hasil mikrostruktur antara dua fraksi komposisi yang ditampilkan pada Gambar di bawah ini:



Gambar 4. 17 Perbandingan Strutur Mikro Terhadap Komposisi *Energizer*

Dapat diketahui bahwa pada analisa visual didapatkan fasa *pearlite* yang tinggi pada sampel fraksi berat 80% arang ditambah 20% *energizer*. Peningkatan jumlah fasa *pearlite* akan menjadikan peningkatan kekerasan pada permukaan sampel (Atanda, Olorunniwo, & Umoru, 2009). Dalam konteks ini, peningkatan kekerasan material seiring dengan meningkatnya

komposisi arang sebagai *carburizer* dapat dijelaskan melalui perubahan mikrostruktur yang terjadi. Proses *carburizing* akan meningkatkan kandungan *carbon* pada material, yang pada gilirannya akan meningkatkan jumlah fasa *pearlite* yang ada. Fasa *pearlite* ini memiliki sifat kekerasan yang lebih tinggi daripada fasa *ferrite*, sehingga peningkatan jumlah fasa *pearlite* akan meningkatkan kekerasan material secara keseluruhan.

Bab V

Kesimpulan Dan Saran

Data penelitian kekerasan dan struktur mikro perlakuan panas *pack carburizing*, dan *quenching* pada baja SS400, telah dilakukan analisa. Dari analisa tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut:

5.1 Kesimpulan

1. Waktu tahan dalam proses *carburizing* berpengaruh signifikan terhadap kekerasan baja SS400. Semakin lama waktu tahan, semakin tinggi kekerasan materialnya karena adanya peningkatan difusi *carbon* dan pembentukan lapisan *carburizing* yang lebih tebal dan merata. Fraksi komposisi arang batok kelapa dan BaCO_3 juga mempengaruhi kekerasan baja SS400. Semakin tinggi kandungan *carbon* dalam arang, serta semakin rendah nilai *energizer* (BaCO_3), maka semakin tinggi kekerasan material baja.
2. Waktu tahan dalam proses *carburizing* memiliki pengaruh besar terhadap struktur mikro baja SS400. Peningkatan waktu tahan menyebabkan pembentukan fasa *pearlite* dan *cementite* proeutectoid, yang menyebabkan peningkatan kekerasan baja secara keseluruhan. Fraksi berat arang batok kelapa dan BaCO_3 juga mempengaruhi struktur mikro baja SS400. Semakin tinggi komposisi arang, semakin tinggi kekerasan materialnya, serta mempengaruhi koefisien difusi *carbon* dan penetrasi *carbon* pada permukaan baja.

3. Peningkatan waktu tahan dalam proses *pack carburizing* menghasilkan peningkatan *case depth* (kedalaman permukaan yang *tercarburizing*) dan penetrasi *carbon* yang lebih dalam ke struktur baja. Peningkatan waktu tahan dari 1 jam menjadi 3 jam menghasilkan peningkatan kekerasan dari 240 HV menjadi 778,4 HV. Fraksi berat arang batok kelapa dan BaCO_3 juga mempengaruhi kedalaman total difusi baja SS400. Semakin rendah komposisi arang, semakin dalam penetrasi *carbon* dan peningkatan *case depth* yang dihasilkan.

5.2 Saran

Didapatkan beberapa saran setelah melakukan percobaan ini. Saran tersebut antara lain adalah

1. Menggunakan variasi dari *carburizer* dan *energizer* untuk mengetahui perihai pengaruh dari masing-masing komponen
2. Melakukan analisa EBSD untuk mendapatkan nilai aktual dari total volume tiap fasa yang terbentuk pada mikrostruktur

DAFTAR PUSTAKA

- Abidah, A. F. (2019). Analisa SS400 Hasil *Carburizing* Media Arang Tempurung Kelapa- BaCO₃ Dengan Variasi Temperatur Pemanasan Dan *Holding Time* Ditinjau Dari Pengujian Kekerasan Dan Struktur Mikro. *Jtm*, 07(02), 1–8.
- Apriatun, Taufikurahman, & Sundari, E. (2021). Analisa Pengaruh Variasi Waktu Penahanan Pada Proses *Pack Carburizing* Terhadap Kekerasan Baja *Carbon* Rendah St 37. *MACHINERY JURNAL TEKNOLOGI TERAPAN*, 2(1), 2021. Retrieved from <http://doi.org/10.5281/zenodo.4748538>
- Asrofi, M. (2020). The effect of *temperature* and volume fraction of mahoni (Swietenia mahogani) wood charcoal on SS400 steel using *pack carburizing* method: study of *hardness* and *microstructure*. *AIMS Material Science*, 354-363.
- Atanda, P., Olorunniwo, O., & Umoru, L. (2009). A Study of Processing Parameters on the Carburization of C2R Steels. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 79-92.
- Baghdadchi, A. (2021). Identification and quantification of *martensite* in *ferriteic-austenitic* stainless steels and welds. *Journal of Material Research and Technology*, 3610-3621.
- Benarioua, Y. (2018). *Carburizing* Treatment of Low alloy Steel: Effect of Technological Parameters. *Joint Event of International Conference MicroTherm and SENM*, 1033.
- Brien, E. C. (2020). Multi-length scale modeling of carburization, *martensiteic microstructure* evolution and fatigue properties of steel gears. *Journal of Materials Science & Technology*, 157-165.
- Callister, W. D. (2007). *Material Science and Engineering - An Introduction*. USA: John Wiley & Sons.
- CMA directors. (2012). *COOKWARE MANUFACTURERS ASSOCIATION*. (December),110.Retrievedfrom<http://www.calxbb.com/dq/upload/news/20160401160159272.pdf>

- Darmanto. (2006). "Pengaruh *Holding Time* Terhadap Sifat Kekerasan Dengan Refining The Core Pada Proses *Carburizing* Material Baja *Carbon* Rendah." *Traksi* , 4(2), 91–99.
- Darmo, S. (2019). *Pack Carburizing* of Ss400 Steel Using Cow Bone Crossbreed Powder As *Energizer* . *Jurnal Internasional Global Scientific Journal (GSJ)* , 7(12), 267–273. Retrieved from <http://eprints.unram.ac.id/id/eprint/24130>
- Darmo, Sujita, Padang, Y. A., & Wiratama, I. K. (2020). Fatigue Strength of *Low Carbon Steel* SS400 on *Pack Carburizing* Treatment with Pinctada Maxima Shell Powder *Energizer* . *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering* , 05(12), 105–111. <https://doi.org/10.31695/ijasre.2019.33660>
- Elmi Hosseini, S. R., & Li, Z. (2016). *Pack Carburizing* : Characteristics, *Microstructure* , and Modeling. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys* , (September 2016), 1–24. <https://doi.org/10.1081/e-eisa-120051080>
- Erdogan, M., & Tekeli, S. (2003). The effect of *martensite* volume fraction and particle size on the tensile properties of a *surface* -carburized AISI 8620 steel with a dual-phase core *microstructure* . *Material Characterization* 49, 445–454.
- Hosseini, S. R. (2016). *Pack Carburizing* : Characteristics, *Microstructure* , and Modeling. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys* .
- Ihom, & Andona, P. (2018). The efficacy of *carburizing* compound with different *carbon* source and added industrial *energizers* for *surface* treatment of mild steel for mechanical property improvement. *MOJ Applied Bionics and Biomechanics* , 130.
- International, A. (2010). ASM Handbook Volume 4 Heat Treating. In *ASM International* (Vol. 5). <https://doi.org/10.1088/1748-6041/5/5/054108>
- International, A. S. M., & Committee, H. (2005). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys* . Ohio: ASM International.
- Joshua, T. (2021). Comparative Effect of Some *Carbon* Rich Materials on the *Hardness* Property of Carburized Low Alloy *Carbon* Steel. *International Conference on Engineering for Sustainable World* , 1107.

- Karim, A. (2012). Analisis Peningkatan Kualitas Sproket Sepeda Motor Buatan Lokal Dengan Metode *Carburizing* . *MeTrik Polban*, 7-14.
- Kurniawan, O., & Drastiawati, N. S. (2019). Pengaruh Variasi Media Arang Tempurung Kelapa, Tongkol Jagung, Dan Kayu Jati Pada Metode *Pack Carburizing* Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja SS400. *Jurnal Teknik Mesin*, VII(02), 55–62.
- Kwetniewski, C. E. (2013). *Carburizing and Carbonitriding*. Boston: Springer.
- Materials, T., & Company, I. (n.d.). *Asm metals handbook, vol 09 metallography and microstructure*. Retrieved from <http://es.slideshare.net/miftaAlHkiem/asm-metals-handbook-vol-09-metallography-and-microstructure>
- Muhammad Abdul Azis, N. S. D. (2019). Analisis Kekerasan Permukaan Dan Struktur Mikro Baja SS400 Pada Metode *Pack Carburizing* Menggunakan Media Arang Tongkol Jagung Dengan Variasi Temperatur Pemanasan. *Jtm*, 07(14), 1–8. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US10376291B2/en>
- Negara, D. N. (2016). Efektivitas *Carburizer* dari Sumber *Carbon* Berbeda Pada Proses *Pack Carburizing*. *Jurnal METTEK Vol. 2*, 5-10.
- Oluwafemi, O., & Oke, S. (2015). Effect of *carburizing temperature* and time on mechanical properties of AISI/SAE 1020 steel using *carbonized palm kernel shell*. *Leonardo Electronic Journal of Practice and Technologies*, 27.
- Rahman, H. K., & Sunyoto. (2021). Pengaruh Arus Smaw Terhadap Kekuatan Tarik Dan Impak Baja Konstruksi Iwf Jis G3101 Ss400. *Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 6(1), 35–45.
- Ramli, & Wu, C.-C. (2022). Effective *Case Depth* and Wear Resistance of Pack Carburized SCM 420 Steel Processed Using Different Concentrations of Natural Shell Waste Powders and *Carburizing Duration*. *Crystals*, 12(2), 296. <https://doi.org/10.3390/cryst12020296>
- Ramli, & Wu, C.-C. (2022). Effective *Case Depth* and Wear Resistance of Pack Carburized SCM 420 Steel Processed Using Different Concentration of Natural Shell Waste Powders and *Carburizing Duration*. *Crystals*, 296.

- Satria, D., & Setiawan, I. (2019). Pengaruh Waktu Tahan Proses *Pack Carburizing* Baja AISI 3115 dengan Menggunakan Calcium *Carbonat* dan Batubara Sub Bituminous dan Mendapatkan Perlakuan Panas *Quenching* Media Pendingin Air. *Jurnal ROTASI*, 88-95.
- Setiawan, A. (2014). Perancangan Handle Dodos Kelapa Sawit Dengan Metode Anthropometri Tangan. *Jurnal Fakultas Teknik UNS*.
- SNI. (2016). Alat Panen Kelapa Sawit - Dodos : Syarat Mutu dan Metode Uji. *SNI 8205:2016*.
- Soenoko, R., & Siswanto, E. (2018). Study on Mechanical Properties of *Pack Carburizing* SS400 Steel with *Energizer* Pomacea Canalikulata Lamarck Shell Powder. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*.
- Utami, H. (2017). *Transfer Massa dan Panas*. Bandar Lampung: Tekkim Publishing.
- Zainuri, A., Sinarep, S., & Sujita, S. (2022). STUDY PACK CARBURIZING OF THE *LOW CARBON STEEL* USING BAMBOO CHARCOAL AND BROILER CHICKEN BONE POWDER AS ENERGIZER. *Global Scientific Journal*,10(6),1627–1632.Retrieved from https://www.globalscientificjournal.com/researchpaper/STUDY_PACK_CARBURIZING_OF_THE_LOW_CARBON_STEEL_USING_BAMBOO_CHARCOAL_AND_BROILER_CHICKEN_BONE_POWDER_AS_ENERGIZER.pdf
- Zuchry M., M. (2019). Pengaruh *Carburizing* Dengan Variasi Media Pendingin Terhadap Mikrostruktur Baja *Carbon*. *Majalah Ilmiah Mektek*.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

A.1 Perhitungan Koefisien Difusi

Koefisien difusi adalah ukuran yang menggambarkan kemampuan suatu zat untuk berdifusi atau menyebar dalam medium lainnya. Dalam konteks ilmiah dan teknis, koefisien difusi mengacu pada laju perpindahan zat dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah melalui difusi. Dalam perhitungan ini didapatkan mengenai nilai koefisien difusi *carbon* pada baja yang dipengaruhi oleh jumlah dan komposisi dari *carburizer* dan *energizer*

Digunakan Hukum 2 Fick;s sebagaimana persamaan di bawah ini:

$$\frac{Cx - Co}{Cs - Co} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Didapatkan hasil dari perhitungan koefisien difusi berdasarkan kalkulasi menggunakan Hk. II Fick's sebagaimana persamaan di atas dengan nilai

$$Q = 148 \text{ kJ/mol}$$

$$T = 1223 \text{ K (950 } ^\circ\text{C)}$$

$$C_o = 0,261\%$$

Dikarenakan persamaan dengan variabel yang ditanyakan sudah diketahui, maka dilakukan invers perhitungan dengan mencari nilai D sehingga diperoleh persamaan sebagaimana di bawah ini:

$$D = \frac{\left(\frac{x}{2 * \sqrt{t}}\right)^2}{-2 \log\left(\frac{Cx - Co}{Cs - Co}\right) - 1}$$

Diperoleh variabel sebagai berikut :

Tabel 4. 4 Hasil Kalkulasi Koefisien Difusi

Komposisi	t (jam)	X (cm)	Cs (%)	C _x (%)	D (x 10 ⁻¹⁰ cm ² /s)
60-40	1	0,0119	10%	5,38%	0,057
	2	0,0091	7,80%	6,23%	0,040
	3	0,0092	14,94%	8,84%	0,027
70-30	1	0,0081	25,10%	7,67%	0,163
	2	0,0137	9,34%	8,28%	0,066
	3	0,0058	48,70%	28,04%	0,061
80-20	1	0,0083	7,88%	2,85%	1,573
	2	0,0060	35,92%	9,45%	0,411
	3	0,0057	13,83%	6,23%	0,367

Contoh perhitungan laju difusi pada sampel 1 Jam 60-40

Diketahui : Q = 148 kJ/mol (Callister, 2007)
t = 3600; 7200; dan 10800 s
C₀ = 0,261%

Sehingga untuk 1-60A40E sebagai berikut :

$$D = \frac{\left(\frac{x}{2 * \sqrt{t}}\right)^2}{-2 \log\left(\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0}\right) - 1}$$

$$D = \frac{\left(\frac{0.0119}{2 * \sqrt{3600}}\right)^2}{-2 \log\left(\frac{5,38\% - 0,261\%}{10\% - 0,261\%}\right) - 1}$$

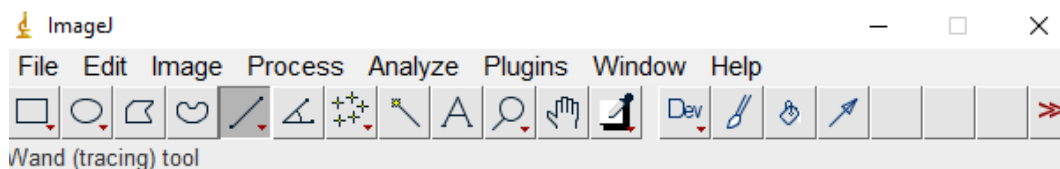
$$D = 0,057 \times 10^{-10} \frac{cm^2}{s}$$

A.2 Perhitungan *Case Depth*

Case depth, juga dikenal sebagai *depth of hardening*, merujuk pada ketebalan lapisan permukaan yang mengalami proses pengerasan pada logam. Proses pengerasan permukaan seperti pengerasan pada permukaan baja dilakukan untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, dan ketahanan terhadap keausan. Cara menghitung *case depth* melibatkan software ImageJ dan gambar *cross section* hasil OEM.

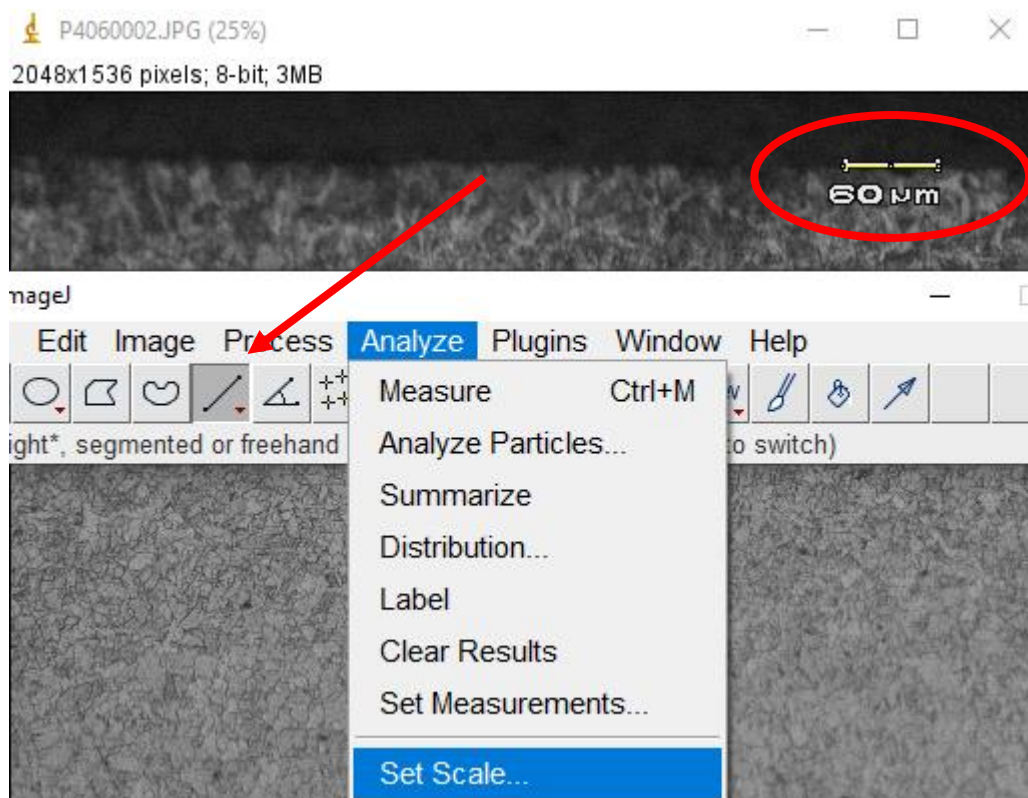
Langkah-langkah perhitungan

1. Buka aplikasi ImageJ, dan *drag* gambar OM yang ingin diuji perihal *case depth*

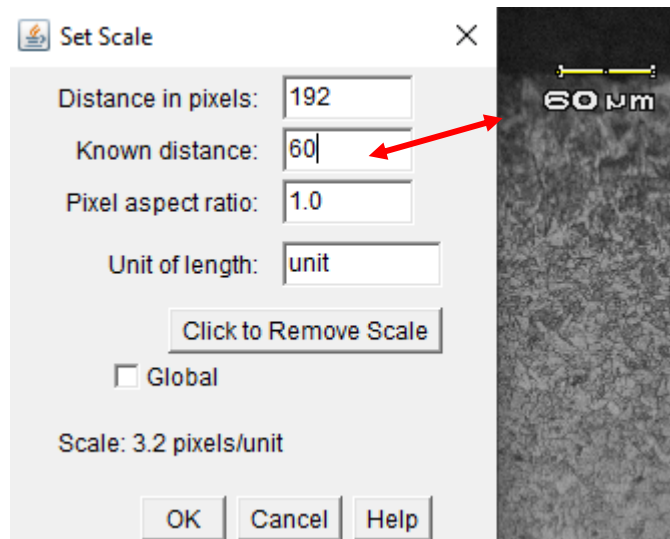


2. Klik *line tool* dan buat garis pada skala yang terdapat pada gambar.

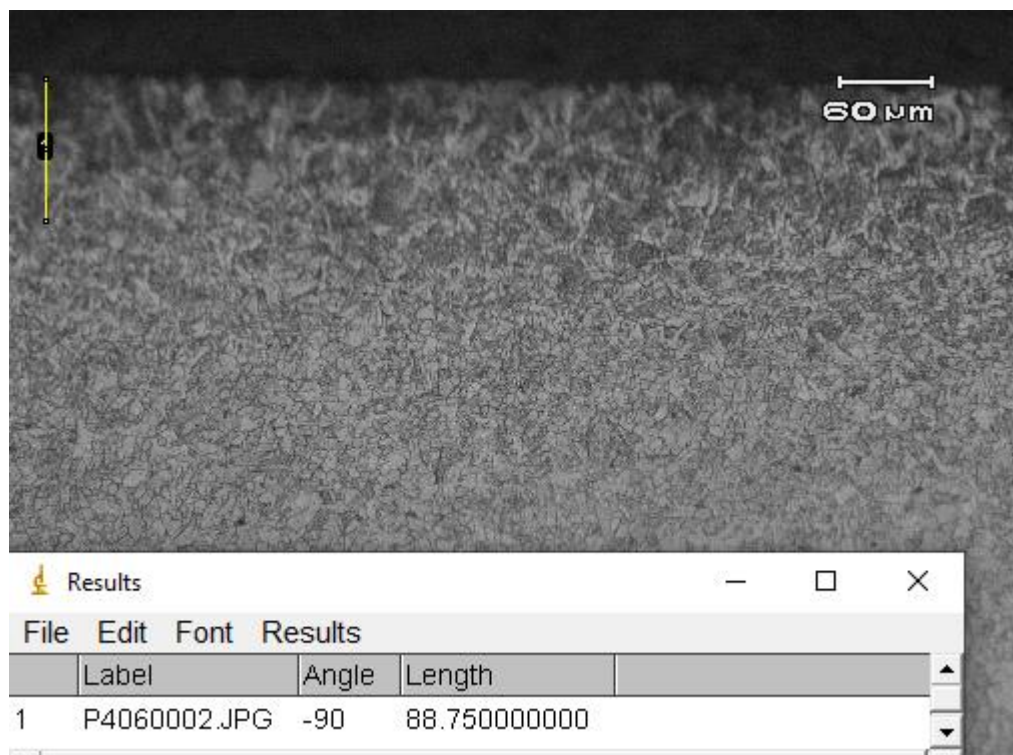
Selanjutnya *Analyze > Set Scale*



3. Selanjutnya isi nilai *Known Distance* sesuai dengan skala, dan klik Ok



4. Buat Garis dan klik “m” untuk mengukur jarak, lakukan ini hingga beberapa garis dan didapat nilai *length* yang dapat dirata-ratakan.



A.3 Perhitungan Nilai Kekerasan

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{\text{Indentasi 1} + \text{Indentasi 2} + \text{Indentasi 3}}{\text{Total Indentasi}}$$

a. 1 Jam Waktu Tahan

- 60A40E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{213,8 + 267,1 + 241,9}{3} = 240,93 \text{ HV}$$

- 70A30E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{268,1 + 260,6 + 202,5}{3} = 243,73 \text{ HV}$$

- 80A20E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{401,8 + 197,5 + 204,4}{3} = 267,9 \text{ HV}$$

b. 2 Jam Waktu Tahan

- 60A40E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{450,5 + 395 + 293}{3} = 379,5 \text{ HV}$$

- 70A30E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{412,9 + 354,9 + 437,6}{3} = 401,8 \text{ HV}$$

- 80A20E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{412,9 + 354,9 + 438,9}{3} = 406,3 \text{ HV}$$

c. 3 Jam Waktu Tahan

- 60A40E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{646,3 + 539,4 + 672}{3} = 619,23 \text{ HV}$$

- 70A30E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{674,7 + 642,8 + 671,5}{3} = 663 \text{ HV}$$

- 80A20E

$$\text{Kekerasan (HV)} = \frac{742,6 + 712,2 + 880,3}{3} = 778,36 \text{ HV}$$

A.4 Perhitungan Volume

Diketahui :

$$P \times L \times T : 14 \times 14 \times 5 = 980 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densitas Arang} = 0,716 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densitas BaCO}_3 = 4,29 \text{ g/cm}^3$$

a. Arang : BaCO₃ = 60% : 40%

$$\text{Arang} = 60\% \times 980 \times 0,716 = 432,008 \text{ g}$$

$$\text{BaCO}_3 = 40\% \times 980 \times 4,29 = 1681,68 \text{ g}$$

$$\text{Total} = 2113,68 \text{ g atau } 2,1 \text{ Kg}$$

b. Arang : BaCO₃ = 70% : 30%

$$\text{Arang} = 70\% \times 980 \times 0,716 = 491,178 \text{ g}$$

$$\text{BaCO}_3 = 30\% \times 980 \times 4,29 = 1261,26 \text{ g}$$

$$\text{Total} = 1752,43 \text{ g atau } 1,8 \text{ Kg}$$

c. Arang : BaCO₃ = 80% : 20%

$$\text{Arang} = 80\% \times 980 \times 0,716 = 561,348 \text{ g}$$

$$\text{BaCO}_3 = 20\% \times 980 \times 4,29 = 840,84 \text{ g}$$

$$\text{Total} = 1402 \text{ g atau } 1,4 \text{ Kg}$$

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Hasil Pengujian Uji Keras

Micro/Vickers Hardness (HV) Test Results

Submitter				Date Submitted											
Part Name		1		Part #		1									
# of Samples				Sample Descri.											
Qual. UL		650.0		Qual. LL		450.0									
Sample Cyl./Sph. Diam (mm)		0.0		Test Load		1kg									
Test Results															
#	Depth	Y	D1	D2	Hard.	Conver.	#	Depth	Y	D1	D2	Hard.	Conver.		
	mm	mm	µm	µm	HV	HRB;HRC ;HBS;HR A		mm	mm	µm	µm	HV	HRB;HRC ;HBS;HR A		
1			93.4	92.8	231.8	96.5; ;208.8 ;	6			73.2	75.0	202.5	;35. 8;329.6 ;68.3		
2			83.5	83.2	267.1	;27. 2;264.1 ;63.9	7			74.4	79.6	401.8	;33. 0;305.9 ;66.9		
3			85.0	90.1	241.9	;23. 2;240.6 ;61.8	8			84.7	82.0	197.5	;27. 2;264.1 ;63.9		
4			78.0	75.9	268.1	;33. 0;305.9 ;66.9	9			72.0	75.9	204.4	;35. 9;330.9 ;68.4		
5			85.6	85.0	260.6	;25. 3;252.9 ;62.9									
Case Hardness (HV)								Case Depth (mm)							

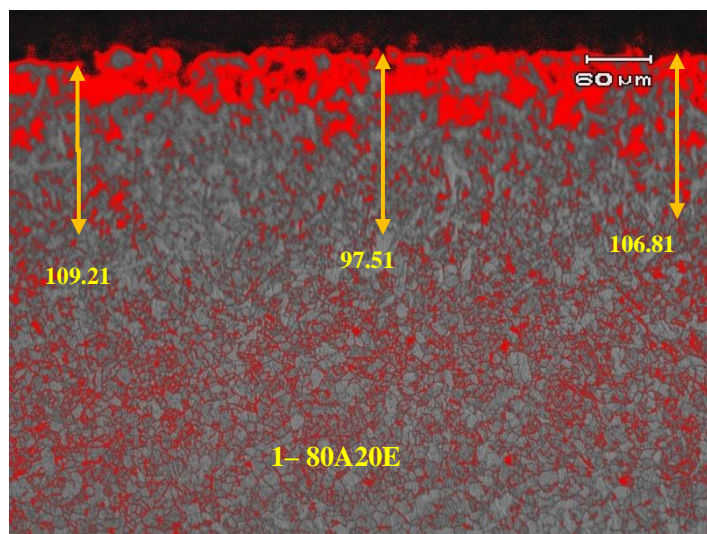
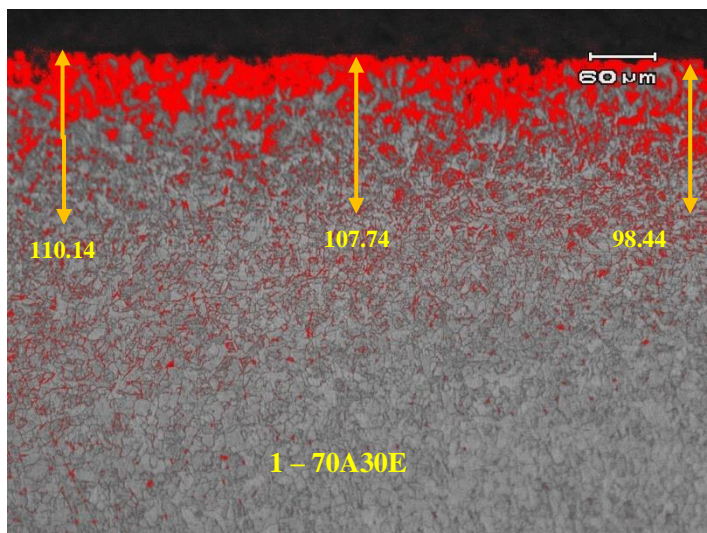
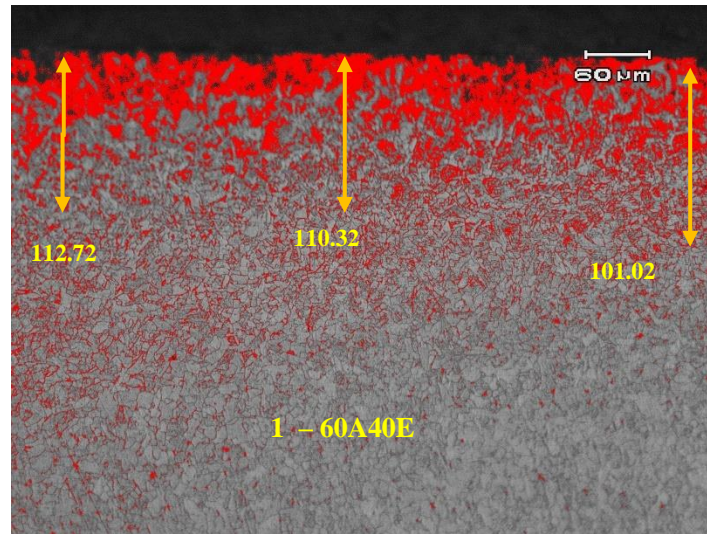
Micro/Vickers Hardness (HV) Test Results

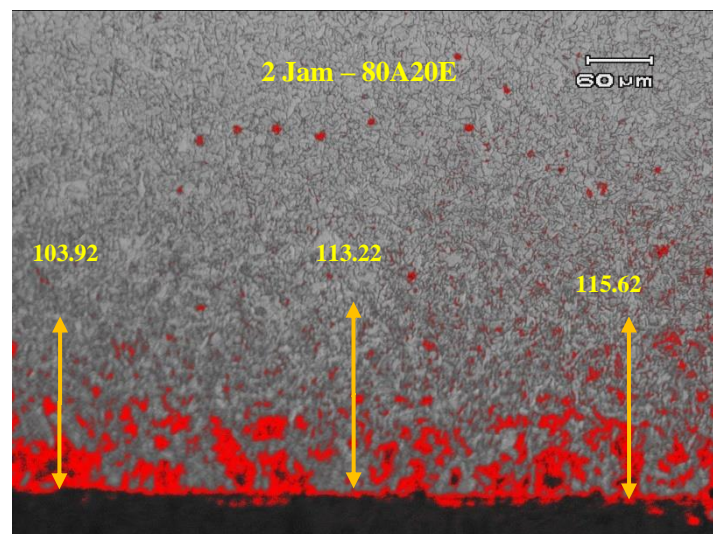
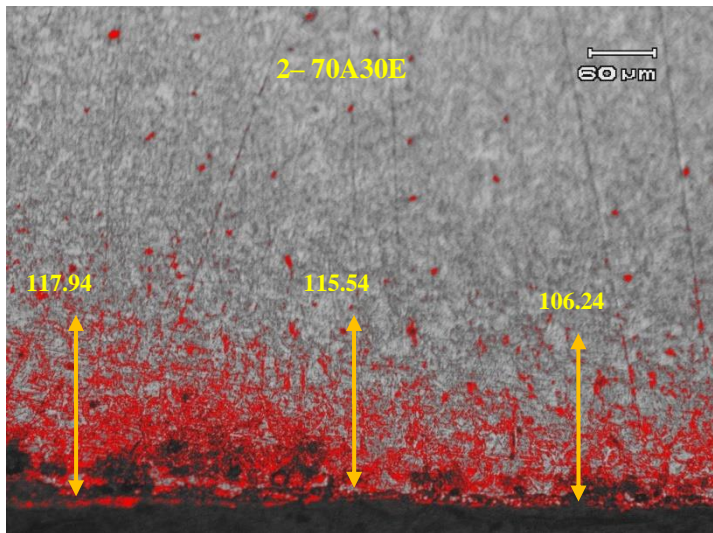
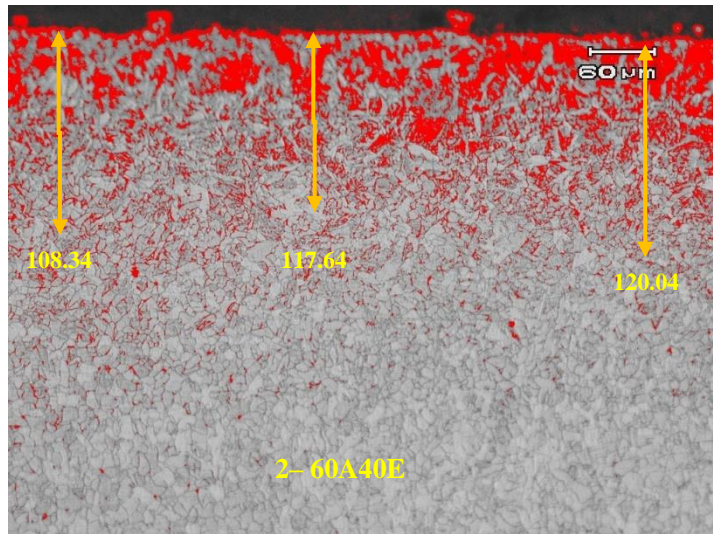
Submitter								Date Submitted							
Part Name				1				Part #				1			
# of Samples								Sample Descri.							
Qual. UL				650.0				Qual. LL				450.0			
Sample Cyl./Sph. Diam (mm)				0.0				Test Load				1kg			
Test Results															
#	Depth	Y	D1	D2	Hard.	Conver.	#	Depth	Y	D1	D2	Hard.	Conver.		
	mm	mm	μm	μm	HV	HRB;HRC ;HBS;HR A		mm	mm	μm	μm	HV	HRB;HRC ;HBS;HR A		
1			86.5	85.6	450.5	:24. 6;248.5 ;62.5	6			92.2	99.2	497.6	94.4; ;196.5 ;		
2			100.4	94.6	395	92.8; ;188.0 ;	7			65.1	70.8	412.9	;41. 8;388.8 ;71.5		
3			79.3	79.9	293.0	:30. 6;288.0 ;65.6	8			97.7	96.2	367	93.3; ;190.5 ;		
4			83.2	83.2	412.9	:27. 4;265.1 ;63.9	9			94.6	95.9	438.9	94.7; ;198.4 ;		
5			97.4	107.0	354.9	88.9; ;171.6 ;									
Case Hardness (HV)								Case Depth (mm)							

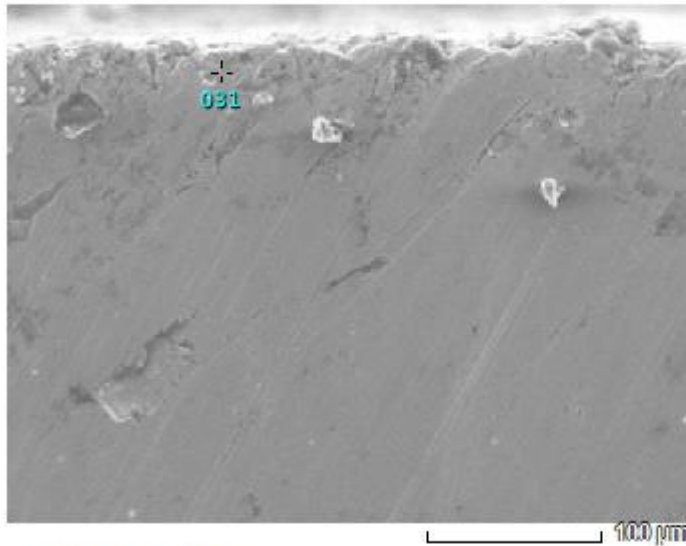
Micro/Vickers Hardness (HV) Test Results

Submitter				Date Submitted									
Part Name		1		Part #		1							
# of Samples				Sample Descri.									
Qual. UL		650.0		Qual. LL		450.0							
Sample Cyl./Sph. Diam (mm)		0.0		Test Load		1kg							
Test Results													
#	Depth	Y	D1	D2	Hard.	Conver.	#	Depth	Y	D1	D2	Hard.	Conver.
	mm	mm	µm	µm	HV	HRB:HRC ;HBS;HR A		mm	mm	µm	µm	HV	HRB:HRC ;HBS;HR A
1			60.8	68.1	646.3	:45. 4;428.5 ;73.4	6			69.3	72.0	671.5	:39. 0;360.5 ;70.0
2			87.1	88.9	539.4	:22. 7;238.4 ;61.6	7			49.1	50.9	742.6	:61. 9; ;8 2.2
3			82.9	82.3	672	:27. 9;268.3 ;64.2	8			49.1	53.0	712.2	:60. 6; ;8 1.5
4			71.7	69.0	674.7	:39. 4;363.7 ;70.2	9			44.5	47.3	880.3	:67. 0; ;8 5.0
5			85.3	89.5	642.8	:23. 3;241.2 ;61.9							
Case Hardness (HV)						Case Depth (mm)							

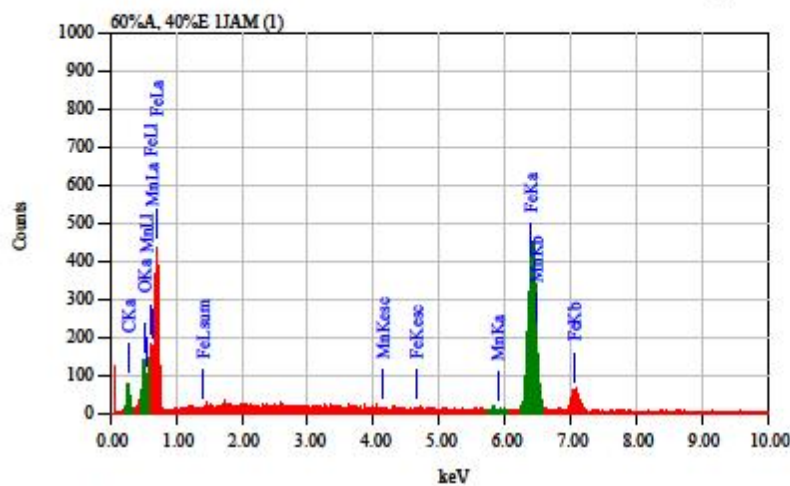
A. Hasil Analisa Case Depth







Title	: IMG1
Instrument	: JCM-6000PLUS
Volt	: 15.00 kV
Mag.	: x 300
Date	: 2023/03/24
Pixel	: 512 x 384

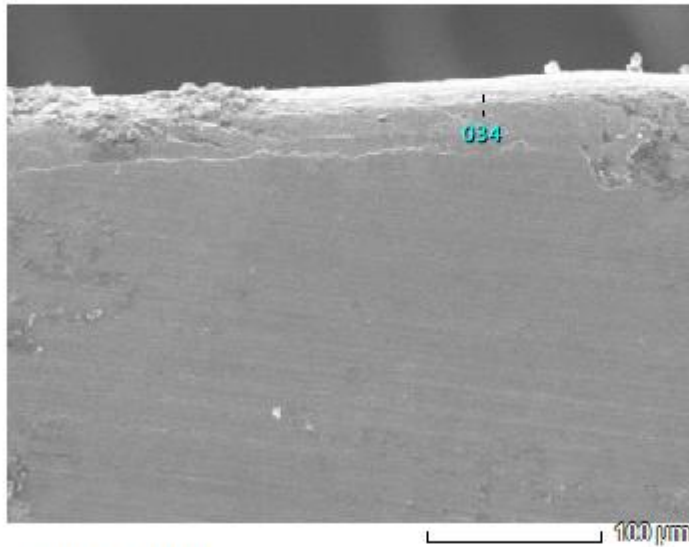


Acquisition Parameter	
Instrument	: JCM-6000PLUS
Acc. Voltage	: 15.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
PHA mode	: T3
Real Time	: 30.43 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 1 %
Counting Rate	: 1084 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

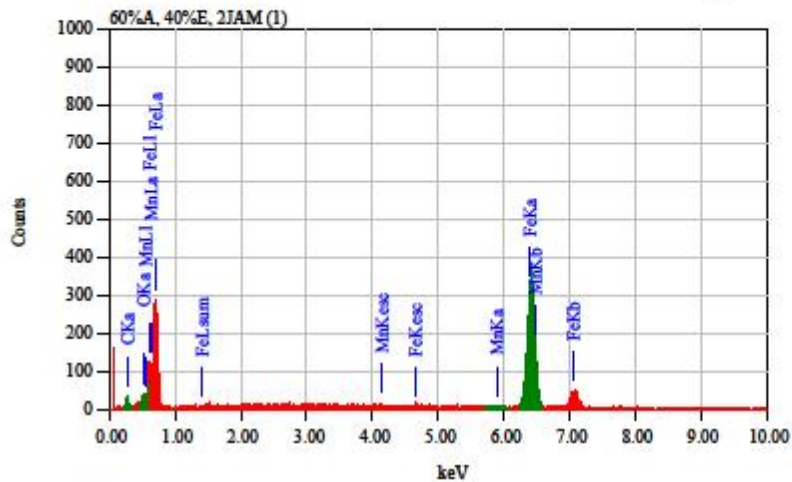
EAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.2190

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	10.06	0.29	30.62				3.5662
O K	0.525	6.43	0.28	14.69				8.8503
Mn Kα	5.894	0.23	0.15	0.15				0.2351
Fe K	6.398	83.29	1.48	54.54				87.3484
Total		100.00		100.00				



Title	: IMG1
Instrument	: JCM-6000PLUS
Volt	: 15.00 kV
Mag.	: x 300
Date	: 2023/03/24
Pixel	: 512 x 384

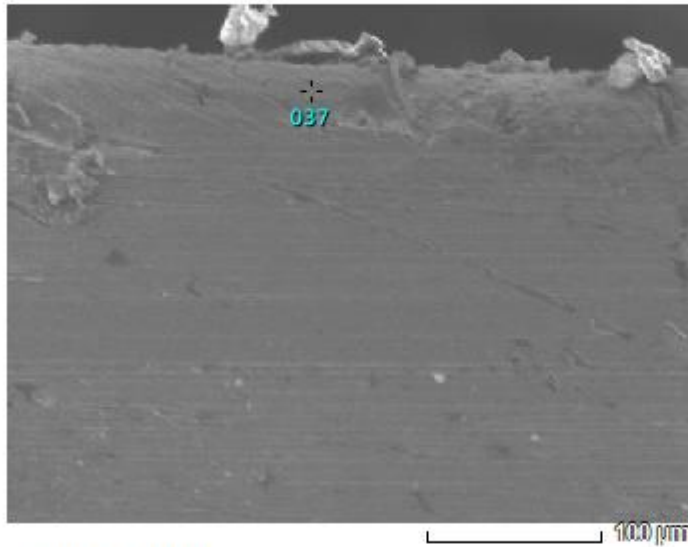


Acquisition Parameter	
Instrument	: JCM-6000PLUS
Acc. Voltage	: 15.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
PHA mode	: T3
Real Time	: 30.43 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 1 %
Counting Rate	: 900 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

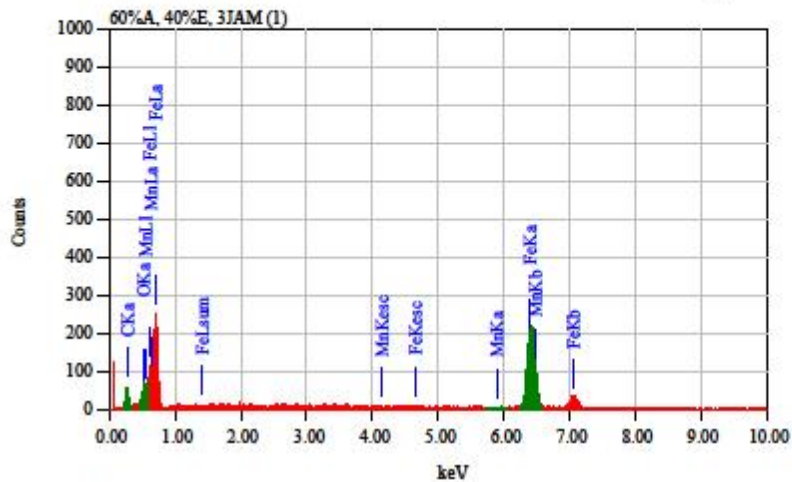
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.2428

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K*	0.277	6.15	0.28	22.83				2.1148
O K*	0.525	1.14	0.16	3.18				1.6606
Mn K*	5.894	0.32	0.20	0.26				0.3298
Fe K	6.398	92.38	1.86	73.73				95.8948
Total		100.00		100.00				



Title : IMG1
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Volt : 15.00 kV
 Mag. : x 300
 Date : 2023/03/24
 Pixel : 512 x 384

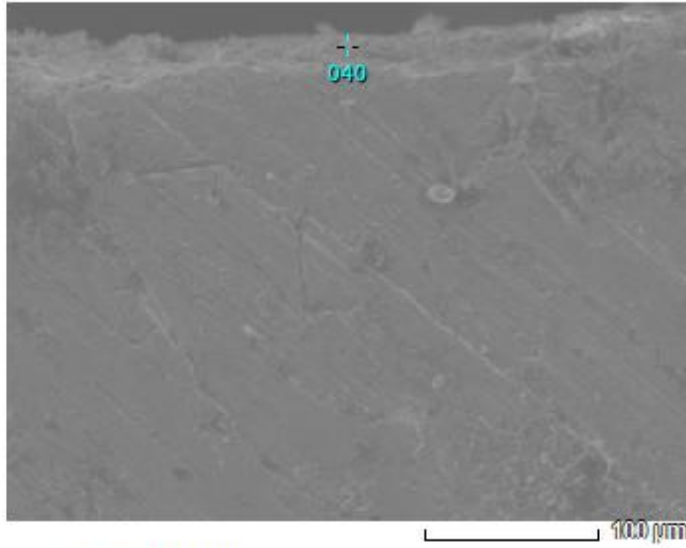


Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 30.36 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 1 %
 Counting Rate : 776 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

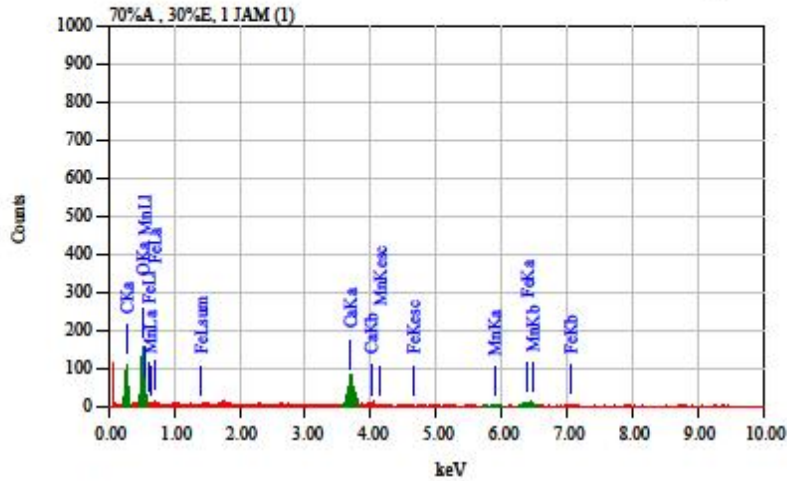
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.2925

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	14.94	0.50	41.58				5.6364
O K	0.525	5.04	0.38	10.53				6.5773
Mn K*	5.894	0.08	0.19	0.05				0.0860
Fe K	6.398	79.94	2.05	47.85				87.7003
Total		100.00		100.00				



Title : IMC1
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Volt : 15.00 kV
 Mag. : x 300
 Date : 2023/03/24
 Pixel : 512 x 384

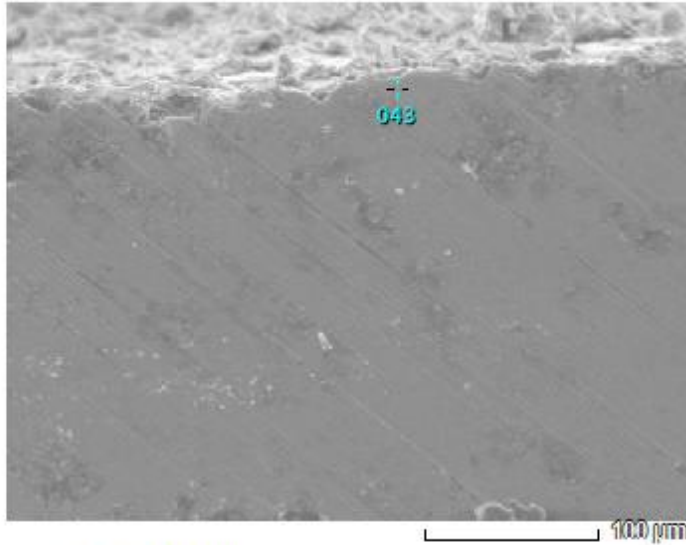


Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 30.26 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 0 %
 Counting Rate : 526 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

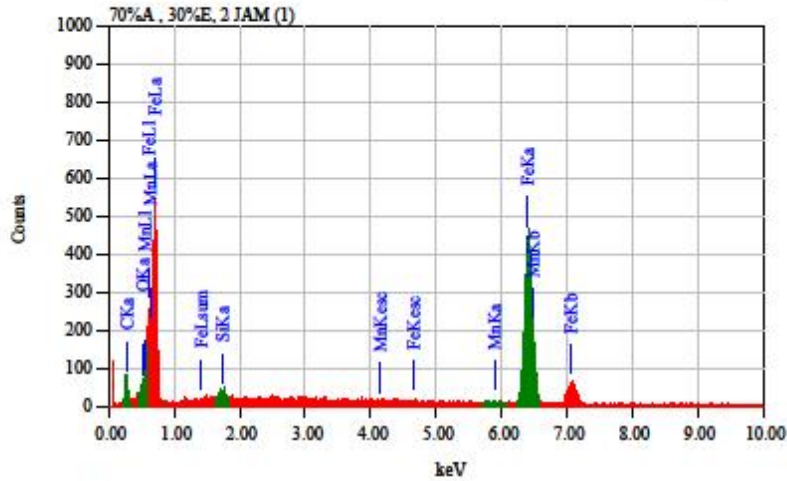
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.3653

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	25.10	0.63	34.90				19.4207
O K	0.525	55.41	1.86	57.85				51.9751
Ca K*	3.690	11.96	0.61	4.99				19.1385
Mn K*	5.894	0.46	0.24	0.14				0.5750
Fe K	6.398	7.07	0.81	2.11				8.8907
Total		100.00		100.00				



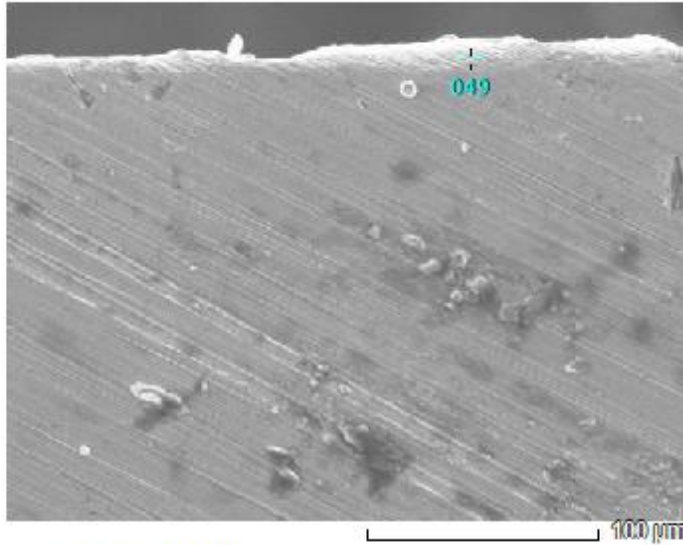
Title : IMC1
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Volt : 15.00 kV
 Mag. : x 300
 Date : 2023/03/24
 Pixel : 512 x 384



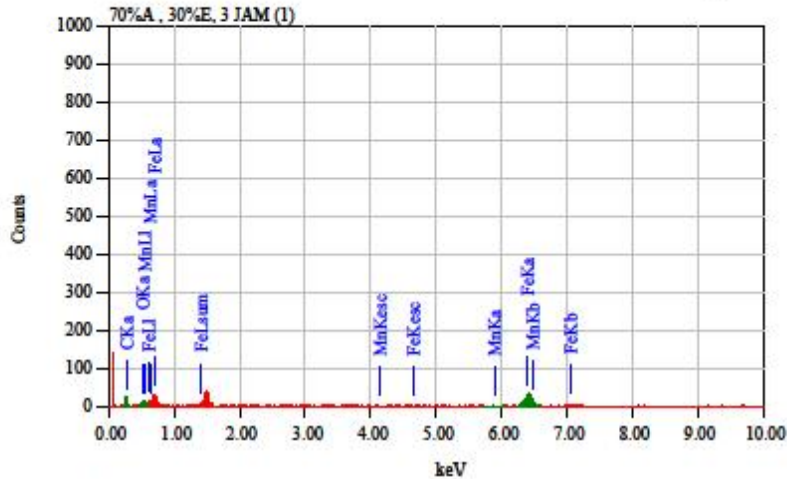
Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 30.43 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 1 %
 Counting Rate : 1166 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.2154

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	9.34	0.30	31.73				3.2584
O K*	0.525	0.83	0.15	2.11				1.1531
Si K	1.739	0.77	0.11	1.12				0.5568
Mn K*	5.894	0.30	0.17	0.22				0.3160
Fe K	6.398	88.76	1.57	64.82				94.7157
Total		100.00		100.00				



Title : IMC1
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Volt : 15.00 kV
 Mag. : x 400
 Date : 2023/03/24
 Pixel : 512 x 384



Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 30.24 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 0 %
 Counting Rate : 453 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

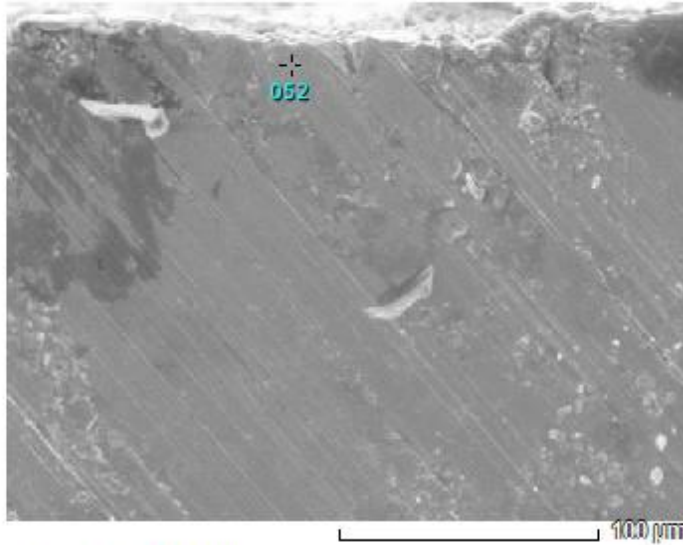
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.6625

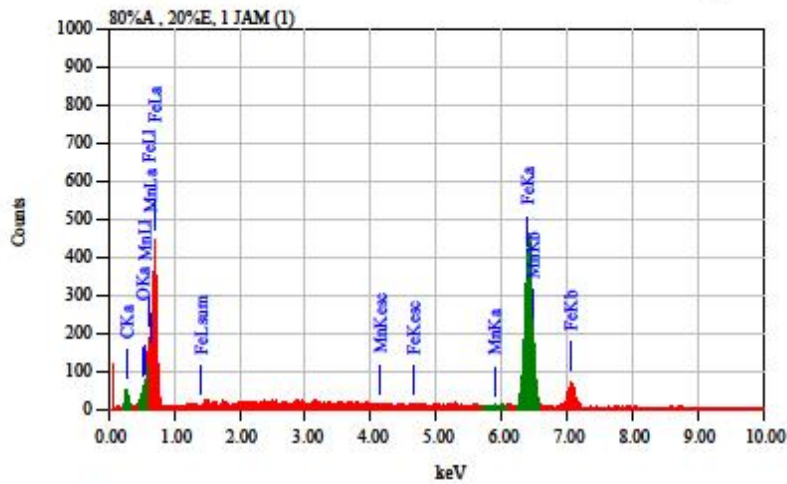
Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K*	0.277	28.04	1.55	58.63				12.9718
O K*	0.525	8.02	1.23	12.59				9.1566
Mn K*	5.894	1.25	0.68	0.57				1.4938
Fe K	6.398	62.70	4.35	28.20				76.3778
Total		100.00		100.00				

View024

JEDOL 1/1



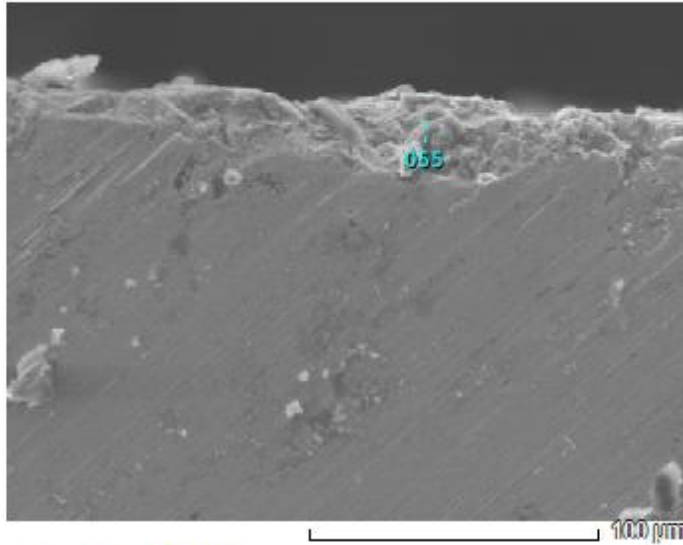
Title : IMC1
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Volt : 15.00 kV
 Mag. : x 450
 Date : 2023/03/24
 Pixel : 512 x 384



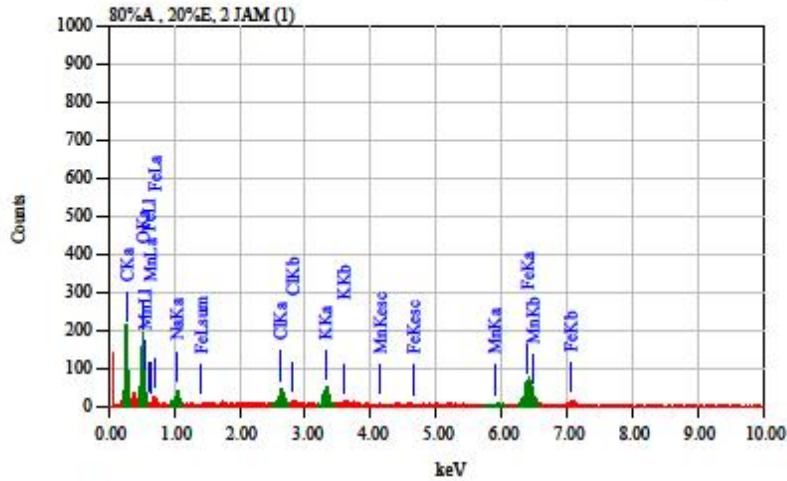
Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 30.46 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 1 %
 Counting Rate : 1098 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.2135

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	7.88	0.27	27.60				2.7507
O K	0.525	1.61	0.16	4.24				2.2908
Mn K*	5.894	0.20	0.16	0.15				0.2048
Fe K	6.398	90.31	1.60	68.01				94.7537
Total		100.00		100.00				



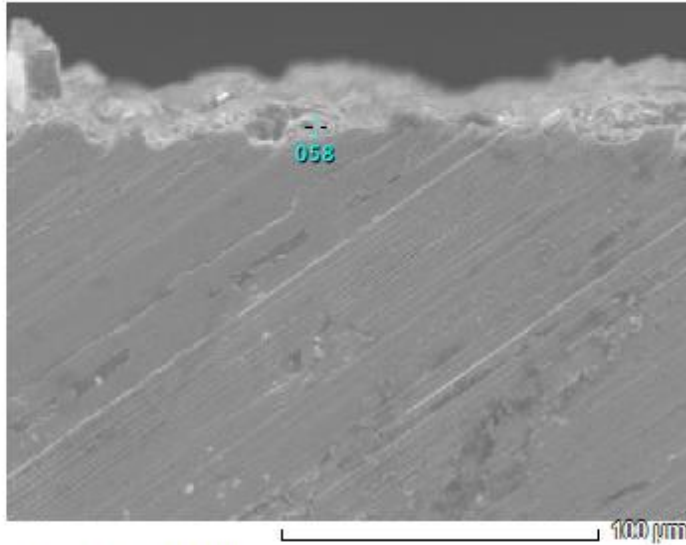
Title : IMC1
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Volt : 15.00 kV
 Mag. : x 500
 Date : 2023/03/24
 Pixel : 512 x 384



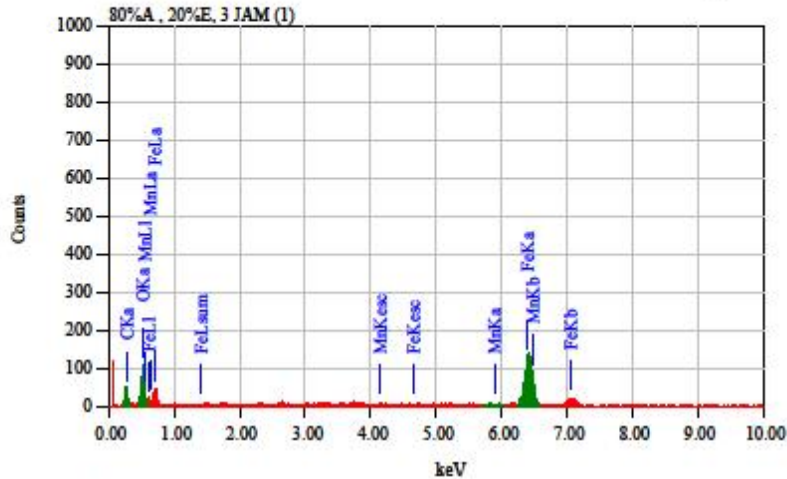
Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 30.26 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 0 %
 Counting Rate : 656 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.3086

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	35.92	0.62	51.80				22.3509
O K	0.525	34.00	1.02	36.81				35.8844
Na K*	1.041	2.80	0.25	2.11				2.2988
Cl K	2.621	2.06	0.15	1.00				3.3879
K K*	3.312	3.40	0.23	1.51				5.6076
Mn K*		ND		ND				
Fe K	6.398	21.82	0.98	6.77				30.4705
Total		100.00		100.00				



Title : IMC1
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Volt : 15.00 kV
 Mag. : x 550
 Date : 2023/03/24
 Pixel : 512 x 384

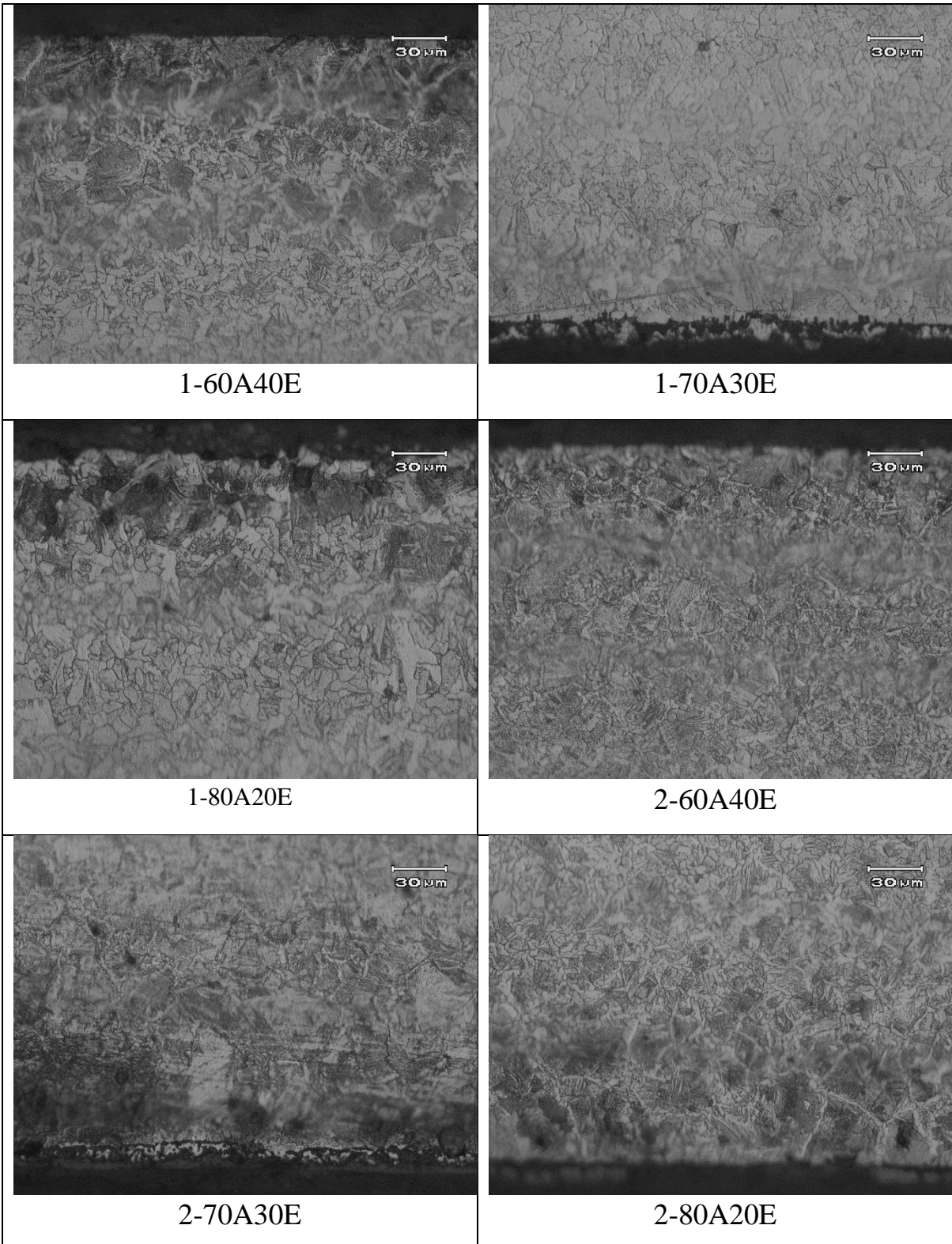


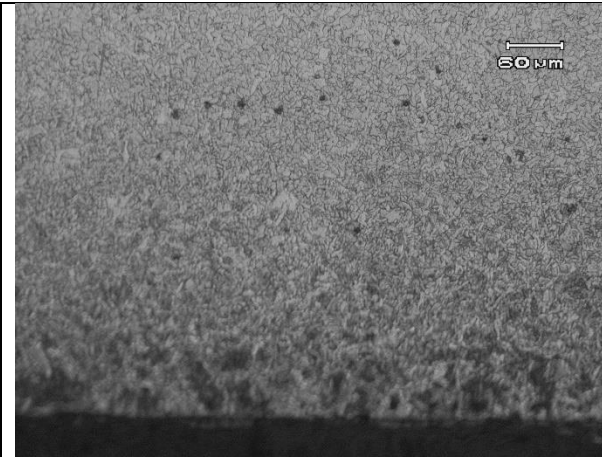
Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 30.26 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 0 %
 Counting Rate : 580 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.3513

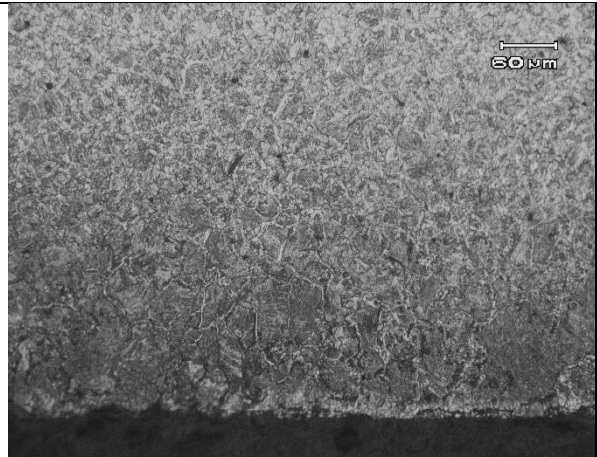
Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K*	0.277	13.83	0.54	33.27				5.1919
O K	0.525	17.16	0.71	31.00				22.5698
Mn K*	5.894	1.68	0.37	0.88				1.7266
Fe K	6.398	67.34	2.16	34.85				70.5117
Total		100.00		100.00				

Struktur Mikro

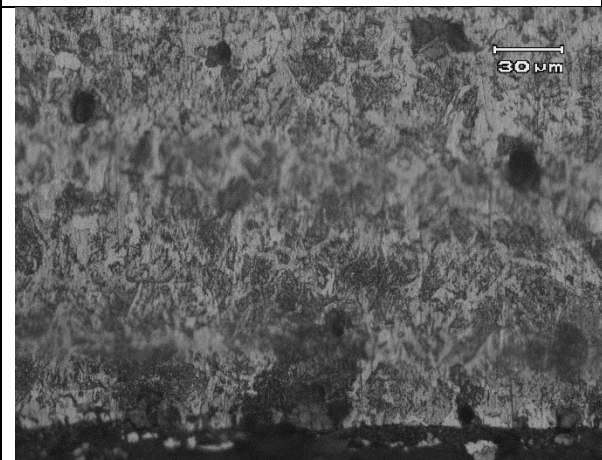




3-60A40E



3-70A30E



3-80A20E

Hasil Uji OES

	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
Min					0.0000	0.0000		
Max					0.0500	0.0500		
1	96.5	0.528	0.388	1.74	0.0247	0.0087	0.0297	0.0212
2	97.5	0.0838	0.418	1.77	0.0102	< 0.0010	0.0278	< 0.0010
3	97.3	0.174	0.403	1.80	0.0165	< 0.0010	0.0247	< 0.0010
Ave	97.1	0.262	0.403	1.77	0.0172	0.0029	0.0274	0.0070

	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Nb %	Ti %	V %	W %
Min								
Max								
1	0.0269	0.108	0.0047	0.0213	0.0600	0.0547	0.0128	0.272
2	0.0096	0.0529	0.0033	0.0113	0.0333	0.0287	0.0026	< 0.0100
3	0.0075	0.0610	0.0031	0.0135	0.0469	0.0378	0.0025	0.0214
Ave	0.0147	0.0738	0.0037	0.0153	0.0467	0.0404	0.0060	0.101

	Pb %	Sn %	B %	Ca %	Zr %	Zn %	Bi %	As %
Min								
Max								
1	0.0842	0.0093	0.0047	> 0.0080	0.0033	0.0061	< 0.0010	0.0146
2	0.0086	0.0024	0.0007	< 0.0001	0.0007	0.0025	< 0.0010	0.0079
3	0.0174	0.0059	0.0016	0.0011	0.0067	0.0034	< 0.0010	0.0126
Ave	0.0367	0.0059	0.0023	> 0.0080	0.0035	0.0040	< 0.0010	0.0117

	Se %	Sb %
Min		
Max		
1	0.0026	0.0044
2	0.0031	< 0.0030
3	0.0047	< 0.0030
Ave	0.0035	< 0.0030

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN



Gambar C. 1 Ampelas.



Gambar C. 2 Apron.



Gambar C. 3 Hairdryer.



Gambar C. 4 Helm.



Gambar C. 5 Jangka Sorong.



Gambar C. 6 Mesin Polishing.



Gambar C. 7 Mesin Potong.



Gambar C. 8 Mikrometer Skrup.



Gambar C. 9 Mikroskop Optik.



Gambar C. 10 *Muffle Furnace*.



Gambar C. 11 Penjepit.



Gambar C. 12 Wadah Sampel.



Gambar C. 13 Polish wol



Gambar C. 14 Sarung Tangan.



Gambar C. 15 Wadah Media Pendingin.



Gambar C. 16 Mesin *Mounting*