

**UPAYA PERBAIKAN SIFAT MEKANIK BAJA PLAT JOIN G
3131 SPHC MELALUI SIMULASI PROSES *INTERCRITICAL*
ANNEALING DI INDUSTRI KONSTRUKSI BAJA**

SKRIPSI

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



Oleh:

Imam Nur Fathoni
3334180050

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON – BANTEN
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

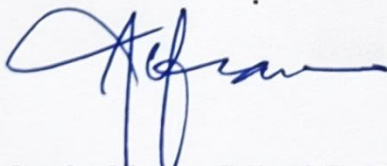
**UPAYA PERBAIKAN SIFAT MEKANIK BAJA PLAT JOIN G
3131 SPHC MELALUI SIMULASI PROSES *INTERCRITICAL*
ANNEALING DI INDUSTRI KONSTRUKSI BAJA**

SKRIPSI

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

Disetujui oleh Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19740629200312100

Pembimbing II



Ir. Djoko Muljono, M.E., M.M.

LEMBAR PERSETUJUAN

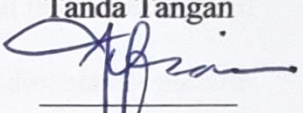
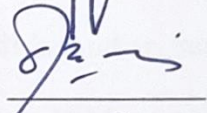
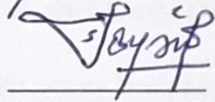
**UPAYA PERBAIKAN SIFAT MEKANIK BAJA PLAT JOIN G
3131 SPHC MELALUI SIMULASI PROSES *INTERCRITICAL*
ANNEALING DI INDUSTRI KONSTRUKSI BAJA**

Disusun oleh:

Imam Nur Fathoni

3334180050

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 19 Juni 2023

	Susunan Dewan Penguji	Tanda Tangan
Penguji I	: Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D.	
Penguji II	: Ir. Djoko Muljono, M.E., M.M.	
Penguji III	: Suryana, S.T., M.Si.	

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 : Upaya Perbaikan Sifat Mekanik Baja Plat Join G3131
SPHC Melalui Simulasi Proses *Intercritical Annealing* di
Industri Konstruksi Baja

Nama Mahasiswa : Imam Nur Fathoni

NIM : 3334180050

Fakultas : Teknik

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 dari karya ini bukanlah 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, 5 Maret 2023



IMAM NUR FATHONI
NIM. 3334180050

ABSTRAK

Salah satu perusahaan yang memproduksi baja SPHC di Indonesia adalah PT Krakatau Steel. Baja SPHC digunakan sebagai bahan baku untuk aplikasi berbagai produk hilir baja. Fasilitas *hot strip mill* milik PT Krakatau Steel saat ini telah berhasil memproduksi baja dengan kualitas JIS G 3131 *grade* SPHC yang setara dengan JIS G 3101 SS330. Pada proses *hot strip mill* tersebut akan dihasilkan sisa potongan lembaran baja yang disebut *scrap*. Limbah *scrap* sisa potongan dari lembaran baja SPHC biasanya diolah kembali sebagai bahan peleburan ulang, sehingga pengolahan *scrap* tersebut dianggap kurang ekonomis. *Intercritical annealing* merupakan metode perlakuan panas, menghasilkan baja fasa ganda yang mempunyai hubungan kekuatan-keuletan yang mempunyai fungsi lebih baik untuk baja karbon rendah. Penelitian dilakukan mulai dari tahapan preparasi sampel sesuai dengan standar uji tarik JIS Z 2201 No. 5 yang dilanjutkan dengan proses perlakuan panas dan diakhiri dengan pengujian untuk mengetahui sifat karakteristik dari baja hasil perlakuan panas tersebut. Nilai rata-rata kuat tarik yang diperoleh sebesar 573 Mpa dengan capaian persentase kenaikan hingga 76,85% dari kekuatan baja sebelum dilakukan proses *intercritical annealing*, dari yang semulanya memiliki kuat luluh (*yield strength*) 249 MPa pada bahan *non-heat treatment* kemudian mengalami kenaikan dengan nilai rata-rata 421 MPa. Melalui proses *intercritical annealing* akan menghasilkan baja fasa ganda. Fasa yang terbentuk pada baja fasa ganda ini yaitu ferit dan martensit. Semakin tinggi temperatur anil (*anneal*) dan waktu tahan (*holding time*) anil akan memperbanyak fasa martensit yang terbentuk, serta memperbesar butir austenit dan ferit yang terbentuk saat pemanasan. Nilai optimal yang didapat pada baja hasil proses *intercritical annealing* dilakukan pada temperatur 750°C dengan durasi penahanan selama 15 menit. Nilai optimal yang dihasilkan yaitu nilai kuat tarik 625 MPa dengan elongasi 23% dengan kombinasi kuat luluh mencapai 434 MPa yang secara standar masuk pada JIS G 3101 SS400. Presentase kenaikan kuat tarik yang diperoleh mencapai 92,90%, sedangkan presentase kenaikan kuat luluh mencapai 74,29%. Pada nilai optimal didapatkan nilai K dan n masing-masing 0,280466778 dan 0,6905 dengan energi aktivasi (Q) sebesar 12,4268517 J/mol dengan nilai A senilai 1,002904209.

Kata Kunci: Baja SPHC, Perlakuan Panas, Baja Fasa Ganda, *Intercritical Annealing*, *Tensile Strength*, dan *Yield Strength*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT berkat rahmat, hidayah, dan karunia-Nya kepada kita semua sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Upaya Perbaikan Sifat Mekanik Baja Plat Joint G 3131 SPHC Melalui Simulasi Proses *Intercritical Annealing* di Industri Konstruksi Baja”. Penulis menyadari dalam proses penyusunan skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan sekaligus Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta.
2. Bapak Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing pertama pada pembuatan dan pelaksanaan skripsi yang telah memberikan bimbingan, saran, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Djoko Muljono, M.E., M.M. selaku Dosen Pembimbing kedua pada pembuatan dan pelaksanaan skripsi yang telah memberikan bimbingan, saran, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Segenap Dosen Jurusan Teknik Metalurgi FT UNTIRTA yang telah memberikan banyak ilmunya kepada penulis.
5. Orang tua penulis yaitu Bapak Karmuji, S.P. dan Ibu Endang Sulistiyowati atas do'a, kasih sayang, serta dukungan baik moril maupun materil.

6. Saudara-saudara penulis yaitu Nur Fajri Ilhamuddin, Abdullah Mushlih Fahrizal Maulana, dan Hafidzan Ghaizan Arsyad Athallah, Serta pasangan penulis yaitu Ika Wulandari yang selalu memberi semangat dan dukungan kepada penulis.
7. Segenap karyawan PT Krakatau Baja Konstruksi khususnya Bapak Agis Priyatna, S.T. dan karyawan PT Krakatau Steel khususnya Bapak M. Kamal Ihsan, S.T. atas arahan dan bantuannya.
8. Keluarga besar Teknik Metalurgi Untirta, khususnya teman-teman seperjuangan angkatan 2018 atas semua dukungan, bantuan, semangat, serta kerjasamanya.
9. Pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu, dengan bantuannya kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Penulis terbuka terhadap saran, koreksi, dan tanggapan untuk perbaikan berikutnya. Akhir kata, penulis berharap hasil penelitian ini nantinya dapat bermanfaat dan memberikan ilmu bagi seluruh pembaca.

Cilegon, 5 Februari 2023

Imam Nur Fathoni

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
Bab I Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Masalah.....	7
1.5 Sistematika Penulisan.....	8
Bab II Tinjauan Pustaka	9
2.1 Baja Karbon Rendah	9
2.1.1 Baja SPHC	10
2.2 Baja Struktural	11
2.2.1 JIS G 3101 SS400	12
2.3 <i>Intercritical Annealing</i>	13

2.4	Perlakuan Panas	16
2.4.1	Diagram Transformasi Isotermal.....	19
2.5	Kinetika Pertumbuhan Butir	20
2.6	Pengujian Tarik	23
Bab III Metode Penelitian		25
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2	Alat dan Bahan.....	26
3.2.1	Alat-alat yang Digunakan	26
3.2.2	Bahan- bahan yang Digunakan	27
3.3	Prosedur Penelitian.....	28
3.3.1	Preparasi Sampel.....	28
3.3.2	Kode Sampel.....	28
3.3.3	Proses Perlakuan Panas <i>Intercritical Annealing</i>	29
3.3.4	Proses Pendinginan Cepat (<i>Quenching</i>).....	30
3.3.5	Karakterisasi dan Pengujian Sampel.....	30
Bab IV Hasil dan Pembahasan		32
4.1	Data Hasil Karakterisasi.....	32
4.1.1	Data Hasil Karakterisasi Awal.....	32
4.1.2	Data Hasil Struktur Mikro.....	34
4.1.3	Data Hasil Perhitungan Fraksi Volume Martensit.....	39
4.1.4	Data Hasil Pengujian Tarik	39
4.1.5	Data Hasil Perhitungan Ukuran Butir	40
4.2	Pembahasan.....	41

4.2.1	Pengaruh Proses <i>Intercritical Annealing</i> terhadap Struktur Mikro.....	41
4.2.1.1	Pengaruh Temperatur <i>Annealing</i> terhadap Fraksi Volume Martensit.....	42
4.2.1.2	Pengaruh Waktu Tahan <i>Annealing</i> terhadap Fraksi Volume Martensit.....	43
4.2.2	Pengaruh Proses <i>Intercritical Annealing</i> terhadap Sifat Mekanik.....	45
4.2.2.1	Pengaruh Temperatur <i>Annealing</i> terhadap Sifat Mekanik.....	47
4.2.2.2	Pengaruh Waktu Tahan <i>Annealing</i> terhadap Sifat Mekanik.....	50
4.2.3	Kinetika Pertumbuhan Austenit pada Proses <i>Intercritical Annealing</i>	51
4.2.4	Perbandingan Hasil sifat mekanik Proses <i>Intercritical Annealing</i> dengan penelitian sebelumnya.....	57
	Bab V Kesimpulan dan Saran.....	59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran.....	60
	DAFTAR PUSTAKA.....	61
	LAMPIRAN.....	64
	Lampiran A. Contoh perhitungan.....	65
	Lampiran B. Data Penelitian	76
	Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan	85

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 2. 1	Simbol Grade JIS G 3101 (JIS, 2015).....	12
Tabel 2. 2	Komposisi Kimia (JIS, 2015).....	12
Tabel 2. 3	Banyaknya kebutuhan baja sesuai standar.	12
Tabel 3. 1	Kode Sampel Penelitian.	29
Tabel 4. 1	Data Hasil Uji Komposisi.	32
Tabel 4. 2	Data Perhitungan Fraksi Volume Martensit.	39
Tabel 4. 3	Data Hasil Pengujian Tarik.	40
Tabel 4. 4	Data Hasil Perhitungan Butir.	40
Tabel 4. 5	Pengukuran Fraksi Volume Austenit dan Perhitungan Harga n dan K.....	55
Tabel 4. 6	Hubungan antara ln K dengan 1/T.	56
Tabel A. 1	Komposisi Kimia Sampel.	65
Tabel A. 2	Perhitungan Ukuran Butir	67
Tabel A. 3	Hubungan antara ln t dan $\ln \left[\ln \left(1 / (1 - f_{\gamma} / f_e) \right) \right]$ pada Temperatur 750°C.....	72
Tabel A. 4	Hubungan antara ln t dan $\ln \left[\ln \left(1 / (1 - f_{\gamma} / f_e) \right) \right]$ pada Temperatur 800°C.....	73
Tabel A. 5	Hubungan antara ln t dan $\ln \left[\ln \left(1 / (1 - f_{\gamma} / f_e) \right) \right]$ pada Temperatur 850°C.....	73
Tabel B. 1	Komposisi Kmia Baja SPHC.	76

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Hasil Struktur mikro Intercritical Annealing (a) Sebelum <i>Intercritical Annealing</i> ;(b) Setelah <i>Intercritical Annealing</i> (Nikkhah <i>et al.</i> , 2019).	15
Gambar 2. 2 Diagram kesetimbangan Fe – Fe ₃ C (Gillespie, 2008).	17
Gambar 2. 3 CCT Diagram Baja karbon rendah 0,035% C (Avner, 1974).	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.	26
Gambar 3. 2 Skema Spesimen Uji Tarik.	28
Gambar 3. 3 Skema Proses <i>Intercritical Annealing</i> variasi temperatur dan waktu anil.	30
Gambar 4. 1 Struktur Mikro <i>Non-Heat Treatment</i> (a) 200×; (b) 500×.	33
Gambar 4. 2 Struktur Mikro hasil <i>Intercritical Annealing</i> (a) sampel 751 200×; (b) sampel 751 500×; (c) sampel 752 200×; (d) sampel 752 500×; (e) sampel 753 200×; (f) sampel 753 500×.	36
Gambar 4. 3 Struktur Mikro hasil <i>Intercritical Annealing</i> (a) sampel 801 200×; (b) sampel 801 500×; (c) sampel 802 200×; (d) sampel 802 500×; (e) sampel 803 200×; (f) sampel 803 500×.	37
Gambar 4. 4 Struktur Mikro hasil <i>Intercritical Annealing</i> (a) sampel 851 200×; (b) sampel 851 500×; (c) sampel 852 200×; (d) sampel 852 500×; (e) sampel 853 200×; (f) sampel 853 500×.	38
Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Temperatur Anil terhadap Volume Martensit.	42
Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Waktu Tahan Anil terhadap Volume Martensit. .	44

Gambar 4. 7	Sifat Mekanik sesudah <i>Intercritical Annealing</i>	46
Gambar 4. 8	Grafik Pengaruh Temperatur Anil terhadap <i>Tensile Strength</i>	47
Gambar 4. 9	Grafik Pengaruh Temperatur Anil terhadap <i>Yield Strength</i>	49
Gambar 4. 10	Grafik Pengaruh Waktu Anil terhadap <i>Tensile Strength</i>	50
Gambar 4. 11	Ukuran Butir Sampel setelah Proses <i>Intercritical Annealing</i>	52
Gambar 4. 12	Grafik Pengaruh Waktu Anil terhadap Diameter Ukuran Butir. ...	52
Gambar 4. 13	Hubungan $\ln t$ dengan $\ln \left[\ln \left(1 / \left(1 - f_{\gamma} / f_e \right) \right) \right]$ pada tiap temperatur.	54
Gambar 4. 14	Grafik hubungan $\ln K$ dengan $1/T$	56
Gambar 4. 15	Grafik perbandingan Hasil proses <i>Intercritical Annealing</i>	58
Gambar A. 1	Garis A_1 dan A_3 pada Diagram Fasa.	66
Gambar A. 2	Diagram Fe_3C	68
Gambar B. 1	Skema Spesimen uji Tarik Standar JIS Z 2201 No. 5.	77
Gambar B. 2	Sampel NHT 200 \times	79
Gambar B. 3	Sampel NHT 500 \times	79
Gambar B. 4	Sampel 751 200 \times	79
Gambar B. 5	Sampel 751 500 \times	79
Gambar B. 6	Sampel 752 200 \times	79
Gambar B. 7	Sampel 752 500 \times	79
Gambar B. 8	Sampel 753 200 \times	80
Gambar B. 9	Sampel 753 500 \times	80
Gambar B. 10	Sampel 801 200 \times	80
Gambar B. 11	Sampel 801 500 \times	80
Gambar B. 12	Sampel 802 200 \times	80

Gambar B. 13 Sampel 802 500×.	80
Gambar B. 14 Sampel 803 200×.	81
Gambar B. 15 Sampel 803 500×.	81
Gambar B. 16 Sampel 851 200×.	81
Gambar B. 17 Sampel 851 500×.	81
Gambar B. 18 Sampel 852 200×.	81
Gambar B. 19 Sampel 852 500×.	81
Gambar B. 20 Sampel 853 200×.	82
Gambar B. 21 Sampel 853 500×.	82
Gambar B. 22 Fraksi Martensit 751.	82
Gambar B. 23 Fraksi Martensit 752.	82
Gambar B. 24 Fraksi Martensit 753.	82
Gambar B. 25 Fraksi Martensit 801.	82
Gambar B. 26 Fraksi Martensit 802.	83
Gambar B. 27 Fraksi Martensit 803.	83
Gambar B. 28 Fraksi Martensit 851.	83
Gambar B. 29 Fraksi Martensit 852.	83
Gambar B. 30 Fraksi Martensit 853.	83
Gambar C. 1 Ampelas.....	85
Gambar C. 2 Apron.....	85
Gambar C. 3 <i>Hairdryer</i>	85
Gambar C. 4 Helm.....	85
Gambar C. 5 Jangka Sorong.	85
Gambar C. 6 Mesin <i>Grinding Polishing</i>	85

Gambar C. 7	Mesin Potong.	85
Gambar C. 8	Mikrometer Skrup.	85
Gambar C. 9	Mikroskop Optik.	86
Gambar C. 10	<i>Muffle Furnace</i>	86
Gambar C. 11	Penjepit.	86
Gambar C. 12	Wadah Sampel.	86
Gambar C. 13	<i>Polish wol</i>	86
Gambar C. 14	Sarung Tangan.	86
Gambar C. 15	Wadah Media Pendingin.	86
Gambar C. 16	Baja SPHC.	86
Gambar C. 17	<i>Cleanser</i>	87
Gambar C. 18	Bahan Nital.	87
Gambar C. 19	Resin dan <i>Hardener</i>	87

Bab I

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Baja SPHC adalah salah satu jenis dari baja karbon rendah yang diproduksi pada industri pembuatan baja yang tergolong sangat melimpah, biasanya digunakan sebagai bahan baku produk baja lain (Gillespie, 2008). Salah satu perusahaan yang memproduksi baja SPHC di Indonesia adalah PT Krakatau Steel. Fasilitas *hot strip mill* milik PT Krakatau Steel (Persero) Tbk saat ini telah berhasil memproduksi baja yang masuk dalam kualitas JIS G 3131 *grade* SPHC yang setara dengan JIS G 3101 SS330. Pada proses *hot strip mill* tersebut akan dihasilkan *scrap* berupa lembaran baja yang disebut *scrap*. *Scrap* tersebut salah satunya berupa *scrap* sisa potongan dari lembaran baja SPHC yang biasanya akan digunakan sebagai bahan peleburan ulang, sehingga pengolahan/pemanfaatan *scrap* tersebut dianggap tidak ekonomis. Upaya peningkatan nilai ekonomis *scrap* ini akan dapat meningkatkan efisiensi produksi baja. Salah satu upayanya adalah sisa potongan tersebut diolah oleh PT Krakatau Baja Konstruksi menjadi produk lain sehingga tercipta produk dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi.

Inovasi ini dilakukan dengan cara meningkatkan sifat mekanik dari produk baja tersebut. Upaya peningkatannya mempertimbangkan produk yang dihasilkan oleh produsen baja dalam negeri. Material baja yang digunakan sebagai bahan baku berupa baja JIS G 3131 SPHC dimana material ini adalah hasil proses canai panas

yang belum dilakukan perlakuan panas secara maksimal sehingga material tersebut memiliki sifat mekanik yang belum memenuhi standar dari produk hasil dari baja konstruksi yang sering dibutuhkan dengan nilai kuat luluh dan kuat tarik kurang dari 330 MPa, sedangkan untuk memenuhi kriteria baja JIS G 3101 SS400 yang mempunyai sifat mekanik material dengan nilai kuat luluh dan kuat tarik minimum 400 MPa, maka sifat mekanik dari SS330 perlu dinaikkan mengikuti standar SS400 dengan nilai kuat luluh minimum 400 MPa, serta persen elongasi minimum 17% agar kualitas baja tetap kuat dan tidak mudah patah saat digunakan untuk konstruksi (JIS, 2015).

PT Krakatau Baja Konstruksi bergerak di bidang manufaktur khususnya pada industri baja untuk aplikasi konstruksi seperti *bar* dan *profile*. Indonesia mempunyai program pembangunan infrastruktur yang memprioritaskan sektor konstruksi publik untuk pemerataan pembangunan dan ekonomi nasional. Program prioritas pertama adalah penyelesaian Proyek Strategis Nasional yang telah dilaksanakan sejak tahun 2020, antara lain pembangunan Jembatan hingga tahun 2021 terdapat 19.135 unit jembatan Nasional, 201 unit jembatan gantung, 48 unit jembatan khusus yang akan terus bertambah dikarenakan dari segi perekonomian jembatan mengurangi biaya transportasi. Serta infrastruktur lainnya seperti Jalan Nasional, Jalan Tol, Perumahan, dan juga infrastruktur lainnya yang menopang kemajuan perekonomian Indonesia (Informasi Statistik Infrastruktur PUPR 2021, n.d.). Untuk memenuhi kebutuhan pembangunan infrastruktur dalam negeri yang meningkat tinggi, dibutuhkan bahan baku baja yang mempunyai sifat-sifat mekanik yang tinggi seperti ketangguhan, keuletan dan ketahanan jangka panjang. Pada industri komersial baja khususnya pada konstruksi bangunan sangat dibutuhkan

kekuatan yang kuat untuk menopang bangunan-bangunan yang kokoh, serta pemilihan bahan yang sangat berpengaruh pada kekuatan dari struktur bangunan yang didirikan (Miki *et al.*, 2002). Hampir mencapai 60 persen dari *by product* tersebut tidak memenuhi standar kekuatan dan ketahanan dari kerangka bangunan. Sehingga hasil tersebut hanya digunakan untuk tambahan proses pembuatan ulang baja atau *scrap* dan dijual dengan harga yang cukup rendah serta pengaplikasian yang kurang optimal. Sifat kekerasan dan ketahanan dari logam atau material yang menunjukkan kemampuan untuk digunakan kegiatan konstruksi. Baja JIS G 3131 SPHC hasil dari PT Krakatau Steel secara sifat mekanik belum mencapai standar JIS G 3101 SS330 (*structural steel*), sedangkan baja yang dibutuhkan untuk konstruksi memiliki standar JIS G 3101 SS400 dengan kuat tarik minimum 400 MPa (Gunadi *et al.*, 2020). Pada PT Krakatau Baja Konstruksi, pengolahan *scrap* tersebut paling optimal untuk produk pelat join dikarenakan secara dimensi sudah terpenuhi, namun dari aspek sifat mekanik masih belum memenuhi untuk aplikasi rangka bangunan.

Untuk menaikkan sifat mekanik dibutuhkan perlakuan panas yang bisa meningkatkan kekuatan dari baja canai panas JIS G 3101 SS330. Cara paling optimal untuk menaikkan sifat mekanik menggunakan metode *intercritical annealing* dengan menentukan variabel tertentu. Dengan metode *intercritical annealing* dapat membentuk austenit parsial serta melibatkan pembentukan ferit dan austenit pada baja karbon rendah. Proses ini sering digunakan bersamaan dengan proses *hot rolling mill* untuk meningkatkan sifat mekanik dan struktur mikro material. Tujuan dari *intercritical annealing* adalah untuk mendapatkan distribusi karbida *sferoida* yang merata pada baja, sehingga membuat material

menjadi lebih lunak dan lebih tangguh. Proses ini juga digunakan untuk meningkatkan kemampuan mesin material dengan meningkatkan ukuran *sferoida*. Durasi *intercritical annealing* dapat mempengaruhi struktur mikro dan perilaku mekanik material. Variabel paling berpengaruh terhadap sifat mekanik adalah temperatur pemanasan dan waktu tahan *annealing*, karena dengan variabel temperatur pemanasan dapat mengubah fasa perlit menjadi austenit dengan variabel waktu tahan dapat memperbesar jumlah atau persentase austenit yang terbentuk di saat pemanasan dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat sehingga dapat membentuk fasa martensit sebagai fasa penguat pada baja. Pada penelitian sebelumnya Saefudin (2008) telah dilakukan proses *Intercritical Annealing* dengan variasi waktu dan temperatur untuk menganalisis kadar persen martensite yang terbentuk pada baja hasil perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatan baja dikarenakan pemanasan baja pada temperatur kritis dan waktu tahan tertentu serta pendinginan cepat dapat membentuk baja *dual phase*, dengan merubah fasa perlit menjadi martensit. Struktur martensit dalam baja merupakan struktur yang mempunyai kekerasan tertinggi, kekerasan dari martensit selalu dipengaruhi oleh besarnya kandungan karbon dalam baja (Jahanzeb *et al.*, 2017).

Pada penelitian ini dilakukan proses *Intercritical Annealing* dengan variasi temperatur dan waktu tahan untuk meningkatkan nilai *tensile strength* baja JIS G 3131 SPHC dengan kadar karbon 0,045 %. Dalam penelitian yang dilakukan (Maleki *et al.*, 2018), pengaruh waktu tahan anil pada proses *intercritical annealing* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik material telah diteliti. Hasil penelitian (Nouroozi *et al.*, 2018) menunjukkan bahwa peningkatan waktu tahan anil dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan material, namun dapat menurunkan

elongasi dan keuletan material Pada penelitian sebelumnya (Najafkhani *et al.*, 2019) dilakukan *intercritical annealing low carbon steel* 0,035% C dengan variabel temperatur 775-875°C dan waktu tahan 1-240 menit didapat nilai *tensile strength* dari material di atas 400 pada temperatur 825°C dengan waktu tahan 1 menit, dengan keterangan semakin tinggi temperatur anil dan semakin lama waktu tahan maka ukuran partikel fasa semakin besar sehingga persen martensit makin meningkat. Pada penelitian (Maleki *et al.*, 2018) dilakukan *intercritical annealing low carbon steel* 0,035% C dengan variabel temperatur 800, 850, 925, 1050°C dengan waktu tahan 15 menit didapat nilai kritis optimal terdapat pada temperatur 850°C dengan persen martensit 36% dengan *tensile strength* diatas 400 MPa, dan menyatakan mekanisme perkembangan struktur mikro pada *intercritical annealing* terbentuknya matrik ferit kemudian menjadi austenit lalu menjadi martensit saat pendinginan untuk menghasilkan struktur mikro *dual phase*, dengan meningkatnya suhu anil diidentifikasi dapat meningkatnya variasi jumlah martensit. Pada penelitian (Nikkhah *et al.*, 2019) dilakukan *intercritical annealing low carbon steel* 0,035% C dengan temperatur 800°C dan variabel waktu tahan 1, 5, 15 menit didapat nilai *engineering stress* di atas 400 MPa pada sampel dengan waktu tahan 5 menit bahkan pada waktu tahan 1 menit didapat nilai *tensile strength* hampir mencapai 600 MPa dengan elongasi 30%. Berdasarkan pendahuluan diatas penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanik untuk mengoptimalkan penggunaan *by product* SPHC sebagai bahan baku baja konstruksi melewati proses *intercritical annealing* diharapkan bahan baku dari penelitian ini bisa ditingkatkan menjadi baja JIS G 3101 SS400 untuk membantu pemenuhan akan kebutuhan baja konstruksi di Indonesia yang sangat tinggi. Sehingga akan meningkatkan kemampuan dan daya

jual baja dan membuka lapangan pekerjaan untuk memenuhi kebutuhan perekonomian dalam negeri.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang pada sub bab sebelumnya, permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah pengaruh temperatur dan waktu tahan yang digunakan pada baja JIS G 3131 SPHC. 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 sebagai *scrap*. Baja SPHC yang bahan bakunya menggunakan baja karbon rendah perlu dilakukan proses perlakuan panas yang mampu meningkatkan sifat mekanik baja SPHC sehingga dapat mencapai standar dari konstruksi suatu bangunan yang akan dibuat. Proses perlakuan panas *intercritical annealing* dipilih untuk dilakukan pada material baja SPHC dengan beberapa tahapan yaitu pemanasan, proses *quenching* yang dilakukan dengan perbedaan temperatur (*critical temperature*) dan waktu tahan. Dalam proses *intercritical annealing* ini dapat meningkatkan persen martensit yang terbentuk dan meningkatkan kekuatan tarik (*tensile strength*). Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengaruh temperatur dan waktu tahan *intercritical annealing* terhadap sifat mekanik pada baja karbon rendah JIS G 3131 SPHC produk PT Krakatau Baja Konstruksi.
2. Pengaruh peningkatan sifat mekanik dengan mengamati perubahan struktur mikro baja pada temperatur dan waktu yang berbeda pada proses *intercritical annealing*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menaikkan nilai sifat mekanik sehingga sesuai dengan grade baja JIS G 3101 SS400 melalui simulasi proses *intercritical annealing* dengan variasi temperatur dan waktu tahan.
2. Mengetahui peningkatan sifat mekanik dengan mengamati perubahan struktur mikro baja pada temperatur dan waktu tahan yang berbeda pada proses *intercritical annealing*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun ruang lingkup pada penelitian ini yaitu meliputi:

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan baja SPHC hasil *hot rolling* limbah dari PT Krakatau Baja Konstruksi.
2. Karakterisasi sampel sebelum dilakukan perlakuan panas menggunakan *OES*.
3. Proses perlakuan panas dilakukan pada temperatur kritis dengan penahanan waktu dan dilaksanakan di Laboratorium Metalurgi FT UNTIRTA
4. Variasi bebas:
 - a. Variasi suhu: 750, 800, 850°C.
 - b. Variasi waktu tahan: 1, 5, 15 menit.
5. Variasi tetap:
 - a. Bahan baku menggunakan baja SPHC.

6. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian tarik dilakukan di PT Krakatau Steel dan pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Metalurgi FT UNTIRTA.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan proposal seminar ini terdiri dari lima bab, Bab I terdiri dari lima sub bab, yang terdiri dari latar belakang penelitian ini tentang permasalahan kebutuhan baja sebagai bahan konstruksi bangunan dalam negeri menggunakan limbah hasil pengolahan baja di salah satu Industri di Kota Cilegon menggunakan metode perlakuan panas *intercritical annealing* untuk meningkatkan sifat mekanik pada baja, serta tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab II menjelaskan literatur yang digunakan dalam penelitian ini yang meliputi penjelasan mengenai baja karbon rendah, baja fasa ganda, perlakuan panas dan faktor yang mempengaruhi peningkatan sifat mekanik, serta standar yang digunakan sebagai acuan. Bab III menjelaskan tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, prosedur penelitian mulai dari tahap preparasi dan pengujian sampel yang dilakukan pada penelitian ini. Bab IV memaparkan hasil penelitian yang diperoleh dan pembahasan mengenai data tersebut. Bab V berisi tentang kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini serta saran untuk menunjang penelitian yang selanjutnya. Daftar Pustaka berisi referensi-referensi yang meliputi jurnal dan buku yang digunakan untuk meenunjang penyusunan laporan tugas akhir ini. Lampiran berisi mengenai contoh perhitungan yang dilakukan untuk penelitian, data hasil penelitian, serta gambar alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini.

Bab II

Tinjauan Pustaka

2.1 Baja Karbon Rendah

Baja karbon merupakan salah satu jenis baja paduan yang terdiri atas unsur besi (Fe) dan karbon (C). Dimana besi sebagai unsur dasar dengan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Pada proses pembuatan baja akan ditemukan penambahan kandungan unsur kimia lainnya. Seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn) dan unsur paduan lainnya sesuai dengan karakteristik baja yang dibutuhkan. Baja karbon memiliki kandungan unsur karbon dalam besi minimal 0,2% hingga maksimal 2,14%, dimana kandungan unsur karbon tersebut berfungsi sebagai unsur penguat yang pokok dalam struktur baja (Cai *et al.*, 2017).

Baja karbon banyak ditemukan kegunaannya sebagai bahan baku berbagai perkakas, rangka bangunan, transportasi, jembatan, rel kereta api dan lain-lain, komponen mesin, struktur bangunan, dan lain-lain. Baja adalah paduan logam yang tersusun dari besi sebagai unsur utama dan karbon sebagai unsur penguat. Unsur karbon berkontribusi pada peningkatan kekerasan. Baja dapat diklasifikasikan ke dalam berbagai jenis baja yaitu baja karbon dan baja paduan (*alloy steel*). Baja karbon rendah adalah salah satu jenis baja karbon, dimana presentase unsur karbon yang terkandung kurang dari 0,25%, dengan unsur pembentuk lainnya seperti Mn dengan maksimal 0,8%, Si maksimal 0,5%, dan juga unsur Cu maksimal 0,6% (Gillespie, 2008).

Baja karbon terdiri dari besi dan karbon serta elemen paduan lainnya yang memiliki fungsi tertentu. Karbon adalah unsur penguat besi yang efektif. Oleh karena itu, sebagian besar baja hanya mengandung karbon dan sejumlah kecil unsur paduan lainnya (Avner, 1974).

Baja karbon dibagi menjadi 3 kategori, yaitu :

1. Baja karbon rendah. Baja dengan kadar kandungan karbon kurang dari 0,3%.
2. Baja karbon menengah. Baja dengan kadar kandungan karbon antara 0,3% sampai 0,7%.
3. Baja karbon tinggi. Baja dengan kadar kandungan karbon antara 0,7% sampai 1,4%.

2.1.1 Baja SPHC

Salah satu jenis baja yang merupakan produk dari pabrik pengelasan panas (HSM) ialah *hot rolled coil* (HRC) *grade* SPHC dengan standar JIS G 3131. Produk ini masuk dalam golongan baja karbon rendah. Baja *grade* SPHC adalah lembaran baja yang dihasilkan lewat proses canai panas dengan kualitas komersial, lembaran baja yang dihasilkan lewat proses canai panas dengan kualitas komersial. Plat SPHC sering disebut pelat hitam karena pelat ini berwarna kehitam – hitaman. Ketebalan berlaku untuk beban SPHC ini sebagaimana disebutkan dalam JIS 3131 bervariasi dari 1,2 mm sampai 14 mm. Namun lebar bahan SPHC berkisar sampai 2000 mm. Kekuatan tarik dari SPHC Baja dinyatakan dalam Newton per milimeter dengan nilai minimum 270 N/mm² (MPa). Elongasi baja SPHC baja bervariasi tergantung pada rentang ketebalan. Rentang presentase minimum

untuk perpanjangan adalah 27-31 persen mulai dari 1,2 mm hingga 4 mm dan lebih (Taweejun & Kanchanomai, 2015).

2.2 Baja Struktural

Pembangunan infrastruktur merupakan hal penting dalam proses pertumbuhan negara baik pada bidang ekonomi, pendidikan, sosial, budaya, pertanian, dan bidang-bidang lainnya. Dengan semakin meningkatnya pembangunan infrastuktur yang diperlukan masyarakat, kebutuhan dari bahan pembangunan infrastuktur akan semakin meningkat. Dibuktikan dengan kementerian PUPR terus melanjutkan program pembangunan salah satunya jembatan, hingga pada tahun 2021 terdapat 19.135 unit jembatan nasional dengan panjang mencapai 539.477 m, dan juga pembangunan perumahan yang semakin meningkat dari tahun 2015-2020 (Informasi Statistik Infrastruktur PUPR 2021, n.d.).

Proses pembangunan infrastruktur membutuhkan kualitas baja struktural dengan kualitas yang tinggi, dikarenakan dengan pemilihan kualitas baja struktural akan mempengaruhi ketahanan dan keamanan infrastruktur yang dibutuhkan oleh masyarakat. Penggunaan baja dengan kekuatan tinggi yang memiliki sifat lebih baik masih dikembangkan. Dalam bangunan terdapat bagian sambungan (pelat *joint*) yang memiliki bentuk lempengan yang disambungkan dengan lasan ataupun sekrup antar pelat maupun baja profil. Dari karakteristik tersebut dalam standar baja struktural kekuatan sifat mekanik dari baja pelat *joint* harus memiliki kekuatan dan ketangguhan sesuai pada standar JIS G 3101 SS400 (JIS, 2015). Karena kebutuhan baja struktural yang menunjang bangunan yang kokoh untuk berdiri.

2.2.1 JIS G 3101 SS400

Standar industri Jepang ini disusun berdasarkan ISO/DIS 3574 diterbitkan pada tahun 2015. Baja struktural diklasifikasikan menjadi empat kelas dan simbol yang telah ditetapkan. Kebutuhan kualitas komersial dan pembagian sesuai dengan aplikasi dan komposisi dari baja tersebut. Adapun tingkat kebutuhan baja JIS G3101 dalam kebutuhan komersial dicantumkan pada Tabel 2.3

Tabel 2. 1 Simbol *Grade* JIS G 3101 (JIS, 2015).

<i>Grade</i>	Aplikasi
SS330	Sebagai bahan pengolahan lanjutan
SS400	Struktur bangunan tingkat menengah
SS490	Struktur bangunan tingkat menengah
SS540	Struktur bangunan tingkat tinggi

Tabel 2. 2 Komposisi Kimia (JIS, 2015).

Simbol <i>Grade</i>	C	Mn	P	S
SS330	-	-	≤0,050	≤0,050
SS400	≤0,17	-	≤0,050	≤0,050
SS490	≤0,17	-	≤0,050	≤0,050
SS540	≤0,30	≤1,60	≤0,040	≤0,040

Tabel 2. 3 Banyaknya kebutuhan baja sesuai standar.

Simbol <i>Garde</i>	Kebutuhan Komersial
SS330	-
SS400	80%
SS490	
SS540	20%

Dari beberapa *grade* yang ada di atas keperluan komersial yang paling banyak digunakan yaitu *grade* SS400 untuk kebutuhan struktur bangunan. SS400 termasuk golongan baja karbon rendah yang memiliki kuat tarik minimal 400 MPa dengan kadar karbon maksimal 0,17%.

2.3 *Intercritical Annealing*

Proses *annealing* untuk baja *hypoeutektoid* terdapat beberapa metode yang digunakan. Proses pertama *full annealing* dengan pemanasan austenisi yaitu melakukan pemanasan di atas temperatur A_3 dengan waktu tahan tertentu maka akan terjadi perubahan pada fasa yang terbentuk menjadi fasa austenit secara keseluruhan. Proses kedua, *intercritical annealing* dengan pemanasan pada temperatur kritis yaitu dengan melakukan pemanasan di antara temperatur A_1 dan A_3 dengan waktu tahan tertentu maka akan terjadi perubahan fasa austenit parsial, proses ini sering digunakan bersamaan dengan deformasi hangat untuk meningkatkan struktur mikro dan sifat mekanik material, tujuan dari *intercritical annealing* adalah untuk mendapatkan distribusi karbida *sferoida* yang merata pada baja, sehingga membuat material menjadi lebih lunak dan lebih tangguh. Proses ketiga, *subcritical annealing* dengan pemanasan di bawah temperatur A_1 pada baja hasil pengerjaan dingin, proses ini tidak melibatkan pembentukan fasa austenit dengan durasi yang cukup lama hingga mencapai puluhan jam. Dari ketiga proses *annealing* tersebut memiliki fungsi dan karakteristik hasil baja yang berbeda.

Proses *intercritical annealing* yang bertujuan untuk meningkatkan nilai kuat tarik dari baja dilakukan dengan pemanasan pada temperatur kritis yang dilanjutkan dengan pendinginan secara cepat yang menghasilkan *dual phase steel*. Fasa ferit

sebagai fasa yang mempertahankan keuletan dan fasa martensit yang mempunyai peran untuk memperkuat sifat mekanik baja. Untuk menentukan temperatur kritis yang digunakan pada proses *intercritical annealing* digunakan persamaan Hougardy dan Trzaska yang dibahas di penelitian sebelumnya (Maleki *et al.*, 2018).

a) Hougardy

$$A_1 = 739 - 22C - 7Mn + 2Si + 14Cr + 13Mo - 13Ni \dots \dots \dots (2.1)$$

$$A_3 = 902 - 255C - 11Mn + 19Si - 5Cr + 13Mo - 20Ni + 55V \dots \dots \dots (2.2)$$

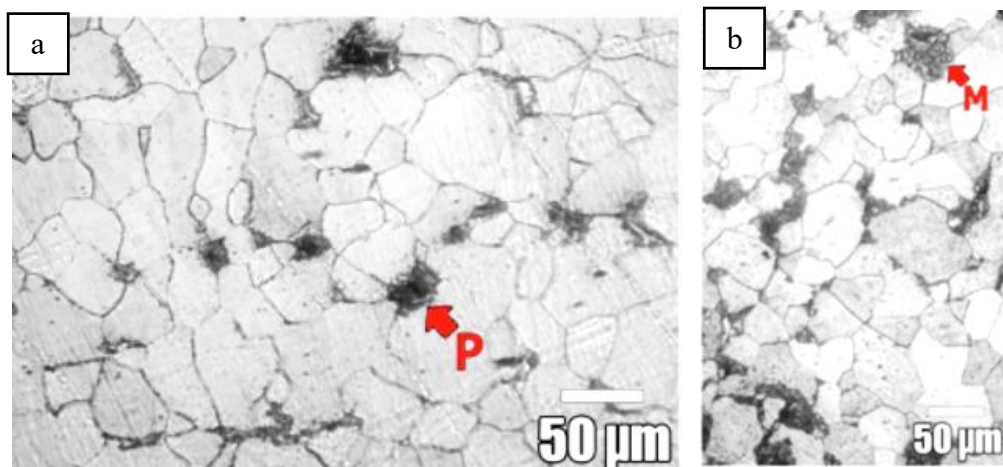
b) Trzaska

$$A_1 = 739 - 22,8C - 6,8Mn + 18,2Si + 11,7Cr - 15Ni - 6,4Mo - 5V - 28Cu \dots \dots (2.3)$$

$$A_3 = 937,3 - 224,5\sqrt{C} - 17Mn + 34Si - 14Ni + 21,6Mo + 41,8V - 20Cu \dots \dots (2.4)$$

Dengan persamaan di atas didapat temperatur A_1 dan A_3 dari baja karbon rendah untuk melakukan perlakuan panas. Pada proses *intercritical annealing* terdapat pengaruh temperatur dan waktu tahan anil yang dapat mengubah sampel menjadi hasil akhir dari proses ini, pengaruh temperatur pada struktur mikro semakin tinggi temperatur anil, fraksi volume martensit meningkat. Berlaku juga untuk temperatur anil di atas A_3 tapi belum sepenuhnya martensit disebabkan dari komposisi mangan (Mn) yang tinggi sedangkan untuk sifat mekanik semakin tinggi temperatur anil menyebabkan banyaknya dislokasi yang terbentuk setelah pendinginan cepat sehingga meningkatkan sifat mekanik dari baja (Maleki *et al.*, 2018). Pengaruh temperatur pada proses *intercritical annealing* menjadi faktor mulainya pembentukan fasa atau rekristalisasi dari fasa perlit berubah menjadi austenit (Nakada *et al.*, 2012). Selain itu, terdapat waktu tahan yang mempengaruhi, yang mana semakin lama penahanan waktu akan memperbesar pembentukan fasa yang terjadi pada tumbuhnya partikel fasa pada *annealing* (Najafkhani *et al.*, 2019).

Pada hasil proses *intercritical annealing* didapat baja *dual phase* yang terdiri dari fasa ferit dan martensit, fasa martensit terbentuk dari perubahan dari fasa perlit (Nikkhah *et al.*, 2019) dapat dilihat pada Gambar 2.1. Untuk hasil proses *intercritical annealing* fasa martensit yang terbentuk dari perubahan fasa perlit ketika pemanasan berubah menjadi fasa austenit dilakukan pendinginan cepat akan berubah menjadi martensit. Namun, bukan hanya fasa martensit yang semakin membesar fasa ferit pun mengalami pertumbuhan selama penahanan waktu dengan perbesaran tersebut ukuran butir dari tiap fasa akan semakin membesar (Maleki *et al.*, 2018). Struktur mikro yang dihasilkan dapat memiliki dampak signifikan pada sifat mekanik baja. Secara umum, karakteristik martensit yang terbentuk melalui *intercritical annealing* dapat bergantung pada berbagai faktor, seperti komposisi baja, suhu dan waktu *annealing*, dan laju pendinginan. Oleh karena itu, karakteristik spesifik martensit yang terbentuk melalui *intercritical annealing* dapat bervariasi tergantung pada kondisi khusus yang digunakan dalam proses perlakuan panas. pada hasil dari proses *intercritical annealing* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Hasil Struktur mikro *Intercritical Annealing* (a) Sebelum *Intercritical Annealing* ;(b) Setelah *Intercritical Annealing* (Nikkhah *et al.*, 2019).

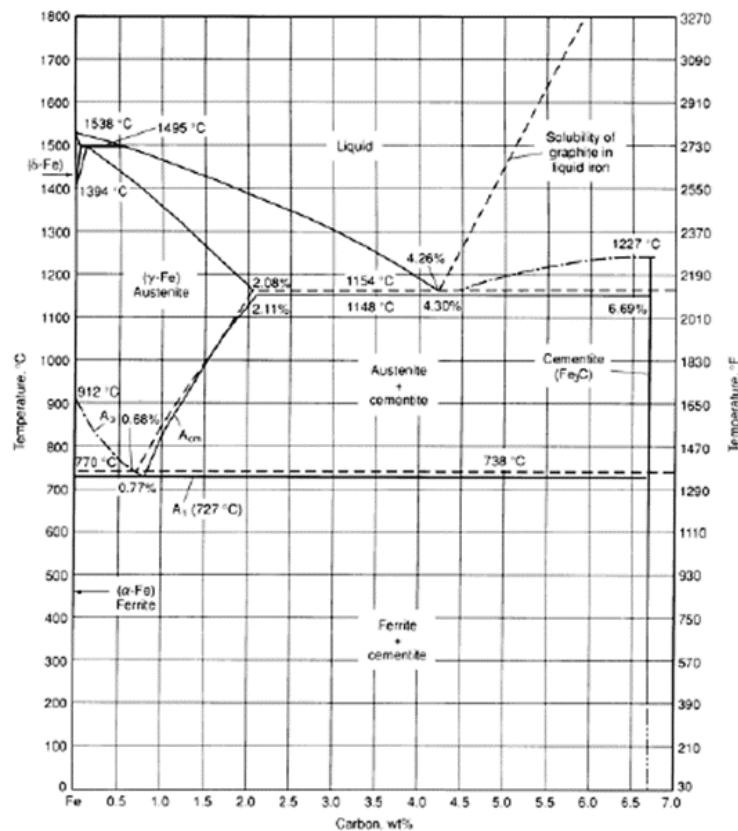
Struktur mikro dari baja SPHC hasil dari *hot rolling* ini dijelaskan pada Gambar 2.1 (a) terlihat terdapat fasa ferit yang berwarna dominan terang dan fasa martensit yang berwarna dominan gelap. Sedangkan pada Gambar 2.1 (b) struktur mikro hasil terlihat fasa ferit yang dominan terang dan fasa martensit yang dominan gelap. Baja hasil *hot rolling* terbentuk butir yang lebar karena hasil canai panas (Nikkhah *et al.*, 2019).

2.4 Perlakuan Panas

Perlakuan panas (*heat treatment*) didefinisikan sebagai kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan yang terkontrol dalam keadaan padat untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu pada baja/logam atau paduan. Terjadinya perubahan sifat tersebut dikarenakan terjadi perubahan struktur mikro selama proses pemanasan dan pendinginan, di mana sifat baja/logam atau paduan sangat dipengaruhi oleh struktur mikronya. Perlakuan panas dibedakan: (a) proses perlakuan panas dengan kondisi *equilibrium*, seperti pelunakan (*annealing*), *normalising* (b) proses laku panas *non-equilibrium*, seperti pengerasan (*hardening*). Proses *annealing* untuk baja *hypoeutectoid* dilakukan dengan memanaskan baja hingga temperatur sedikit diatas temperatur kritisnya A_3 , dan ditahan beberapa saat pada temperatur tersebut dan didinginkan dengan pendinginan lambat sehingga menghasilkan sifat baja yang lebih lunak. Sedangkan proses *hardening* pada baja *hypoeutectoid*, besaran temperatur pemanasannya berada di atas temperatur kritisnya atau berada di fasa austenit dan dilakukan pendinginan cepat menggunakan media pendingin zat cair, seperti air, oli dan sejenisnya sehingga

membentuk struktur martensit yang keras dan menghasikan sifat baja yang keras dan rapuh (Wardoyo, 2005).

Untuk mengkombinasikan antara kekuatan dan keuletan sebagaimana tujuan dari pengoptimalan sifat mekanik, maka dilakukan pada proses perlakuan panas *intercritical annealing* dengan mengkombinasikan antara pemanasan *annealing* dengan waktu tahan serta pendinginan cepat menghasilkan baja fasa ganda. Perlakuan panas pada baja fasa ganda ini didasarkan pada diagram kesetimbangan Fe – Fe₃C. Dari diagram ini dapat memperlihatkan fasa-fasa pada kondisi tertentu. Fasa-fasa yang terdapat adalah ferit (α), sementit (Fe₃C), austenit (γ), besi (δ) atau campuran dari fasa-fasa tersebut yang keberadaannya tergantung pada temperatur dan kadar karbon (Avner, 2015).



Gambar 2. 2 Diagram kesetimbangan Fe – Fe₃C (Gillespie, 2008).

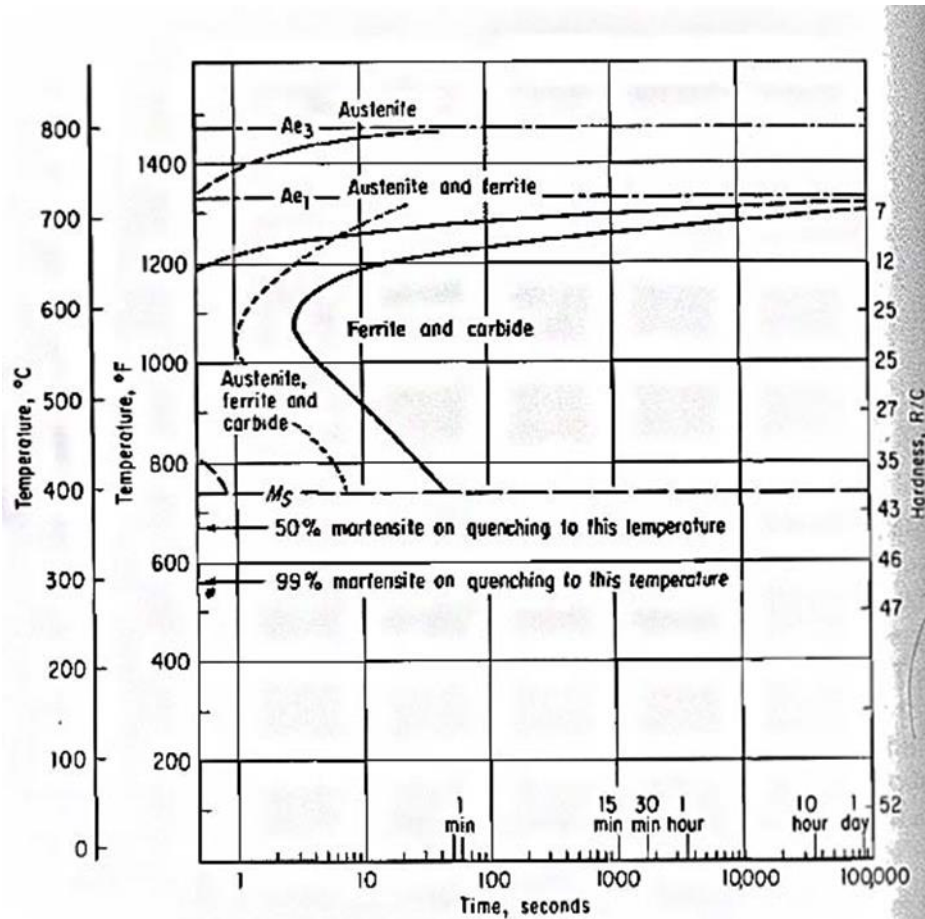
Dari diagram pada Gambar 2.2 dapat diketahui proporsi dari tiap-tiap fasa yang hadir dalam kesetimbangan dua fasa. Karena percobaan ini menyangkut baja karbon rendah, maka pembahasan difokuskan pada daerah baja *hypoeutectoid*, yaitu dimana kadar karbonnya di bawah 0,8% C (Avner, 2015).

Pada daerah *hypoeutectoid* ini terdapat dua garis yang mempunyai arti penting, pertama adalah garis A_1 atau garis temperatur kritis bawah (*low critical temperature line*) dan kedua adalah garis A_3 atau garis temperatur kritis atas (*upper critical temperature line*). Pada garis A_1 terdapat kesetimbangan antara austenit dan perlit (ferit + sementit). Apabila temperatur dinaikkan, maka kesetimbangan akan bergeser kekiri (pembentukan austenit), dan jika temperatur diturunkan maka kesetimbangan akan bergeser kearah pembentukan perlit. Pada garis A_3 terdapat kesetimbangan antara austenit dan untuk menghitung proporsi ferit dan austenit di dalam daerah dua fasa (*intercritical region*) pada daerah tertentu digunakan hukum *Level Rule* tentang jumlah relatif dan kandungan karbon dari masing-masing fasa (Thomas, 1985).



Transformasi yang terjadi pada garis A_1 , A_3 , A_{cm} dikendalikan oleh laju difusi, oleh karenanya temperatur kritis dipengaruhi oleh komposisi kimia. Laju pemanasan yang cepat menyebabkan waktu difusi yang singkat dan akan menaikkan temperatur kritis. Demikian pula dengan pendinginan cepat yang akan menurunkan temperatur kritis. Pengaruh laju pemanasan dan laju pendinginan terhadap garis kesetimbangan di defenisikan menjadi garis temperatur kritis yang baru yaitu A_c untuk pemanasan dan A_f untuk pendinginan (Saefudin. 2008).

2.4.1 Diagram Transformasi Isotermal



Gambar 2. 3 CCT Diagram Baja karbon rendah 0,035% C (Avner, 1974).

Pada prinsipnya perbedaan diagram CCT dan TTT adalah dari perbedaan cara pembuatan diagram tersebut. Diagram TTT dibuat pada temperatur tetap, sedangkan diagram CCT dibuat pada temperatur pendinginan kontinu. Perbedaan diagram TTT dan CCT akan mudah dimengerti dengan memperhatikan kurva diagram untuk baja komposisi *hypoeutectoid* seperti Gambar 2.3. Garis tipis menunjukkan diagram transformation isothermal, sedangkan garis tebal adalah diagram transformasi pendinginan kontinu. Kurva dari diagram transformasi

isothermal digeser agak ke bawah dan kekanan oleh pendinginan kontinu. Baja *hypoeutectoid* dipanaskan diantara temperatur kritis atas (A_3) dan temperatur kritis bawah (A_1), kemudian didinginkan dengan cepat melebihi laju pendinginan kritisnya, maka akan mendapat baja fasa ganda (*dual phase*) (Wardoyo, 2005).

Pada Gambar 2.3 diperlihatkan wilayah austenit ke ferit, hidung kurva tidak terlihat, ini menandakan bahwa proses pendinginan cepat akan sangat sulit untuk mendapatkan fasa martensit saja. Peningkatan kandungan karbon telah menggeser kurva cukup jauh. Secara teoritis, untuk membentuk hanya fasa martensit, itu diperlukan untuk mendinginkan cukup cepat untuk mendapatkan temperatur 537°C dalam waktu sekitar 0,7 detik. Untuk wilayah $\alpha + F$ menjadi lebih sempit dan bahkan menghilangkan daerah hidung. Maka dari itu untuk membentuk martensit dilakukan pemanasan diatas temperatur A_1 dan dilanjutkan dengan pendinginan secepatnya agar terbentuk fasa martensit cukup besar (Avner, 1974).

2.5 Kinetika Pertumbuhan Butir

Struktur mikro baja fasa ganda (*dual phase*) berfasa ferit – martensit. Dengan pemanasan pada titik *intercritical annealing* pada baja karbon rendah terdapat dua fasa, yaitu ferit dan austenit. Austenit merupakan fasa yang dapat bertransformasi menjadi martensit setelah pemanasan pada titik *intercritical annealing* yang dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media pendingin air. Peningkatan waktu tahan pada pemanasan di titik *intercritical annealing* akan meningkatkan fraksi volume austenit (Nouroozi *et al.*, 2018).

Kinetika pembentukan austenit selama proses pemanasan pada titik *intercritical annealing* telah lama diteliti. Kinetika pembentukan austenit ini menunjukkan bahwa pembentukan austenit pada baja fasa ganda adalah pertumbuhan kontrol difusi. Persamaan Johnson mehlavrami (JMA) dengan kolomogrov (JMAK) dapat digunakan untuk transformasi austenit selama *intercritical annealing*. Persamaannya sebagai berikut (Etesami, S. A., & Enayati, M. H. 2016).

$$f_{\gamma} = 1 - \exp(-Kt^n) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan f_{γ} volume austenit dimana nilainya dapat dianggap sebanding dengan volume martensit yang terbentuk. t merupakan waktu tahan pada pemanasan pada titik *intercritical annealing*. K merupakan konstanta kecepatan pertumbuhan austenit, n merupakan eksponen avrami. Avrami eksponen adalah konstanta ketika konstanta kecepatan fungsi dari temperatur. Ini menunjukkan bahwa K tergantung dari parameter temperatur yang berhubungan dengan kecepatan pertumbuhan, frekuensi nukleasi dan faktor bentuk. Sedangkan n tergantung dari nukleasi dan proses pertumbuhan untuk morfologi, kecepatan nukleasi bernilai sangat signifikan terhadap nilai n (Etesami *et al.*, 2017).

Beberapa investigasi menggunakan persamaan 2.6 untuk menghitung fraksi volume austenit pada waktu berbeda. Tetapi permasalahannya dengan model ini hanya untuk fraksi volume austenit yang tak terbatas (di atas titik A_3) dimana fraksi austenit menjadi satu. Sedangkan baja fasa ganda pada temperatur *intercritical annealing* mempunyai fraksi austenit yang tidak 100% dalam struktur mikro. Jika fraksi volume austenit dan fraksi volume austenit pada saat kesetimbangan, maka persamaannya menjadi sebagai berikut (Oh *et al.*, 2004):

$$\frac{f_{\gamma}}{f_e} = 1 - \exp(-Kt^n) \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana f_e merupakan volume austenit pada saat kesetimbangan, nilai tersebut dapat dicari dengan menggunakan *level rule* pada diagram Fe₃C. Ada tiga wilayah signifikan yang dapat dibuat terkait dengan bagian baja dari diagram. Mereka adalah *eutektoid E*, *hipoeutektoid A*, dan *hipereutektoid B*. Fraksi massa dari masing-masing fasa dapat ditentukan dengan menggunakan aturan tuas (*lever rule*) pada diagram fasa. Dijelaskan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara komposisi paduan, dan komposisi dari dua fasa yang berbeda. Fraksi massa dari fasa pertama dan fasa kedua dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Persamaan baru ini valid jika nilai logaritma $\frac{f_e}{f_e - f_{\gamma}}$ adalah fungsi linier terhadap terhadap nilai ln t. Persamaannya dapat ditulis menjadi:

$$\ln \left[\ln \left(1 / 1 - \frac{f_{\gamma}}{f_e} \right) \right] = n \ln t + \ln K \dots \dots \dots (2.8)$$

Jika kecepatan nukleasi turun maka nilai eksponen avrami (n) pun turun. Pemanasan pada titik *intercritical annealing* merupakan difusi kontrol pertumbuhan. Pada baja fasa ganda, austenit bernukleasi dan tumbuh pada batas butir ferit sehingga menurunkan harga n. Dari konstanta (K) dapat dihubungkan dengan persamaan arhenius sebagai berikut:

$$K = A \exp \left(- \frac{Q}{RT} \right) \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana A merupakan konstanta yang berhubungan dengan sistem, Q merupakan energi aktivasi, R merupakan konstanta gas dan bernilai konstan sedangkan T adalah temperatur pemanasan *intercritical annealing* (dalam Kelvin). Secara logaritma persamaan arhenius dapat diubah menjadi:

$$\ln K = \ln A - \left(\frac{Q}{RT}\right) \dots \dots \dots (2.10)$$

Melalui persamaan arhenius maka dapat dicari nilai energi aktivasi (Q) dan konstanta (A) yang didapat dari slope dan *intercept* yang dihasilkan dari persamaan linier hubungan antara ln K dengan 1/T (Etesami *et al.*, 2017). Fungsi dari energi aktivasi, konstanta A, dan eksponen Avrami adalah parameter penting dalam kinetika pertumbuhan austenit selama pemanasan interkritis. Energi aktivasi mewakili hambatan energi yang harus diatasi agar transformasi terjadi, sedangkan konstanta A terkait dengan jumlah situs nukleasi yang tersedia untuk pertumbuhan austenit. Eksponen Avrami memberikan informasi mekanisme transformasi perubahan fasa yang terjadi selama proses austenisasi.

2.6 Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian untuk mengetahui sifat – sifat suatu bahan. Dengan menarik suatu bahan, kita akan dapat mengetahui bagaimana bahan tersebut bereaksi terhadap besaran tarikan dan mengetahui sejauh mana material itu mengalami pertambahan panjang. Alat eksperimen untuk uji tarik ini harus memiliki cengkeraman (*grip*) yang kuat dan kekakuan yang tinggi (*highly stiff*).

Banyak hal yang dapat kita pelajari dari hasil uji tarik. Jika kita terus menarik suatu bahan (dalam hal ini suatu logam) hingga putus, maka akan didapatkan data tarikan yang lengkap antara lain berupa nilai kuat tarik, kuat luluh dan elongasi untuk mengetahui karakteristik khususnya pada sifat mekanik suatu material. Data ini sangat diperlukan dalam desain yang memakai bahan tersebut.

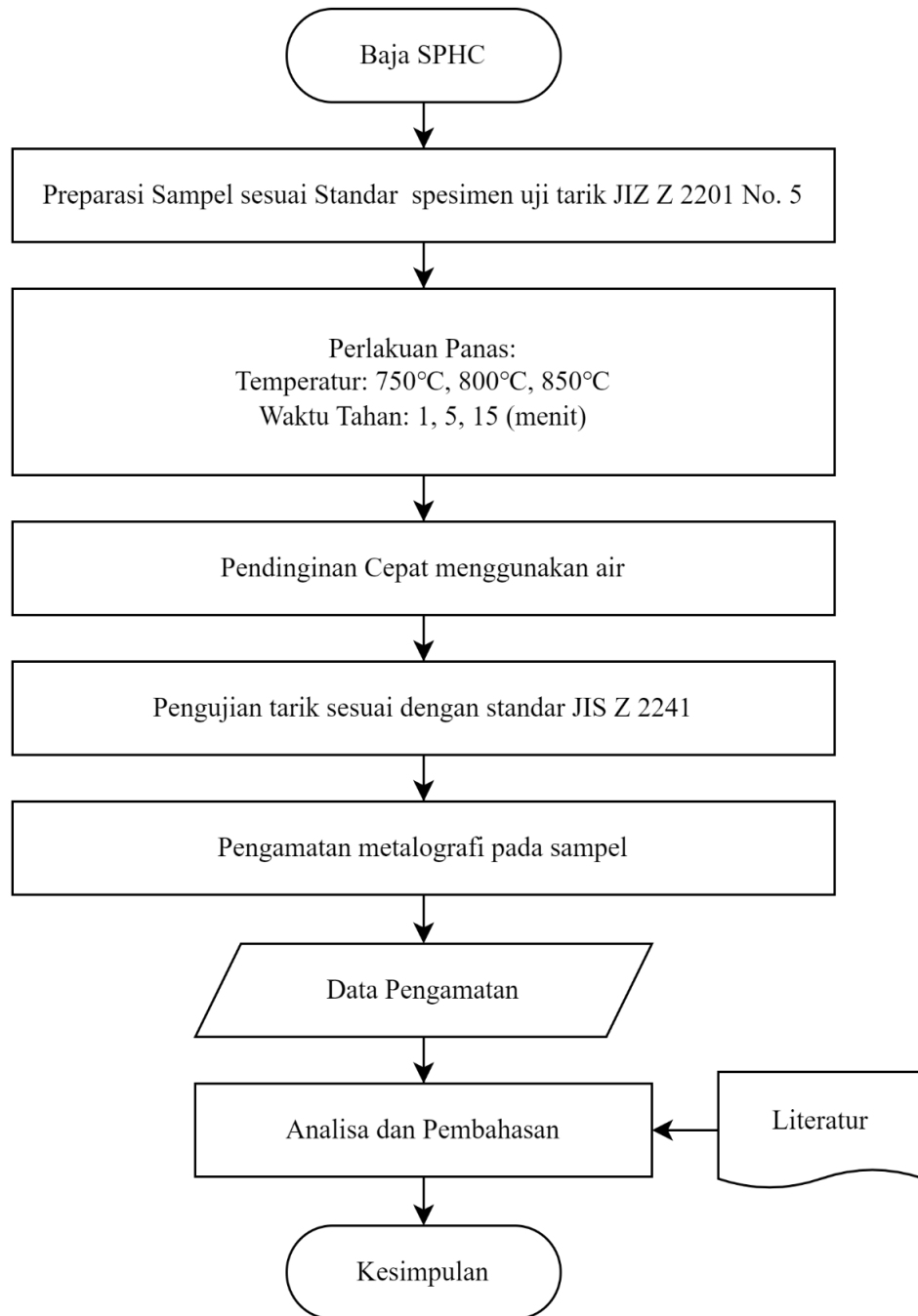
Uji tarik adalah metode pengujian kekuatan suatu bahan atau material dengan memberikan beban gaya yang sesumbu dengan spesimen. Beban gaya tersebut diberikan pada spesimen dengan cara menariknya hingga spesimen tersebut putus. Uji tarik dilakukan dengan menggunakan alat yang disebut *tensile testing machine*. Mesin uji tarik akan mencatat besarnya beban tarik yang diberikan terhadap spesimen setiap saat beserta besarnya perpanjangan (*elongation*) yang terjadi pada spesimen setelah dilakukan uji tarik.

Bab III

Metode Penelitian

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian kali ini digunakan material awal baja karbon rendah hasil dari *Hot Rolled Coil* (HRC) dengan standar JIS G 3131 SPHC dari PT Krakatau Steel yang spesifikasinya sama dengan limbah hasil potongan produk yang ada di PT Krakatau Baja Konstruksi, untuk komposisi merupakan data pengujian langsung oleh Laboratorium Mekanik PT Krakatau Steel sebagaimana tercantum di Lampiran pada Tabel B.1. Proses lanjutan berupa karakterisasi menggunakan mikroskop optik untuk mengetahui struktur mikro awal pada sampel di Laboratorium Metalurgi FT UNTIRTA. selanjutnya sampel dipreparasi dengan dimensi ukuran panjang dan tebal sesuai dengan standar uji tarik JIS Z 2201 No. 5 yang berlaku di PT Krakatau Steel. Setelah itu, dilanjutkan proses *heat treatment* di Laboratorium Metalurgi FT UNTIRTA sampel dimasukkan ke dalam furnace untuk melewati proses pemanasan pada temperatur *intercritical annealing* dengan variasi temperatur masing-masing yaitu 750°C, 800°C, 850°C dan waktu penahanan selama 1 menit, 5 menit, 15 menit kemudian dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media pendingin air. Proses selanjutnya yaitu dilakukan pengujian tarik dan pengamatan Metalografi pada semua sampel yang telah diproses dan sebelum proses untuk membandingkan peningkatan sifat mekanik dan perubahan struktur mikro pada sampel yang dilakukan di PT Krakatau Steel. 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 yang Digunakan

Adapun alat-alat yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Apron.

2. *Hairdryer*.
3. Helm.
4. Jangka sorong.
5. Mesin uji kekuatan tarik.
6. Mikrometer sekrup.
7. Mesin *milling*.
8. Mesin potong.
9. Mesin *grinding*.
10. Mesin *polishing*.
11. Mikroskop optik
12. *Muffle furnace*.
13. Penjepit
14. Polish wol
15. Sarung tangan
16. *Stopwatch*.
17. *Thermogun*.
18. Wadah tempat media pendingin
19. Wadah tempat sampel

3.2.2 Bahan- bahan yang Digunakan

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini seperti berikut:

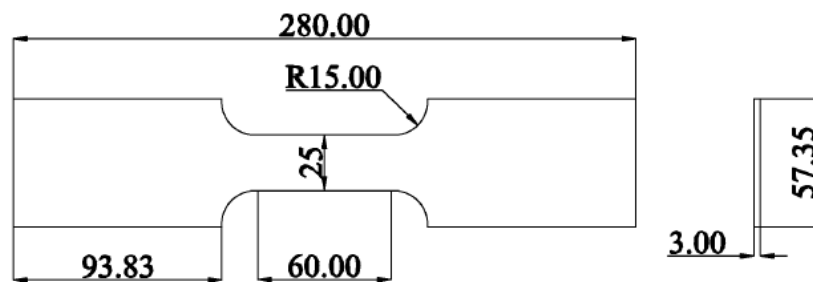
1. Air
2. Baja canai panas *grade* SPHC standar JIS G 3131
3. *Cleanser*

4. Etanol
5. *Hardener*.
6. Nital 3%
7. Resin
8. Kertas ampelas ukuran #100 - #2000

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Sampel

- a) Sampel baja canai panas karbon rendah JIS G 3131 SPHC dipotong sesuai ukuran spesimen uji tarik dengan standar JIS Z 2201 No. 5 menggunakan mesin dengan standar pengujian kuat tarik sesuai arah *rolling*.



Gambar 3. 2 Skema Spesimen Uji Tarik.

- b) Sampel dikarakterisasi awal dengan OM untuk mengetahui struktur mikro awal sebelum perlakuan panas.

3.3.2 Kode Sampel

Berikut adalah kode sampel yang digunakan, kode sampel dibuat untuk memudahkan analisa hasil penelitian. Sampel yang melalui proses

perlakuan panas diberi kode sesuai proses yang diberikan, kode sampel disajikan dalam bentuk tabel pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Kode Sampel Penelitian.

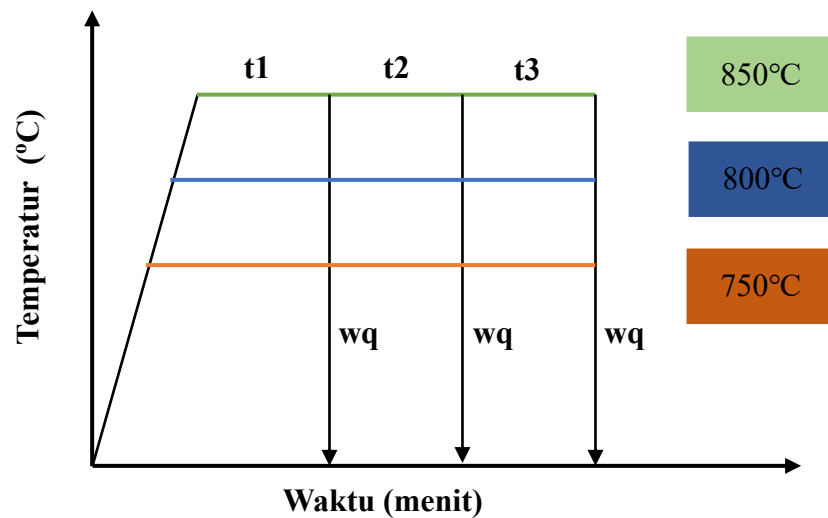
Kode Sampel	Temperatur <i>Annealing</i> (°C)	Waktu Tahan <i>Annealing</i> (Menit)
NHT	-	-
751	750	1
752	750	5
753	750	15
801	800	1
802	800	5
803	800	15
851	850	1
852	850	5
853	850	15

3.3.3 Proses Perlakuan Panas *Intercritical Annealing*

1. Proses pemanasan, *muffle furnace* dipanaskan sampai temperatur *intercritical annealing*. Pemanasan dilakukan pada temperatur daerah di atas A_1 dan di bawah A_3 yang mana pada temperatur 750°C, 800°C dan 850°C, kemudian sampel dimasukkan ke dalam *muffle furnace* dan ditutup.
2. Penahanan temperatur, pada saat *muffle furnace* telah mencapai temperatur yang tertera pada step sebelumnya kemudian dilakukan penahanan temperatur anil untuk memperbesar ukuran butir pada proses *intercritical annealing* dengan waktu tahan masing-masing 1 menit, 5 menit dan 15 menit. Oleh karena itu, ditunggu waktu tahan tertentu untuk memastikan pembuatan baja fasa ganda terjadi dan perlit yang terdapat pada baja SPHC berubah menjadi austenit.

3.3.4 Proses Pendinginan Cepat (*Quenching*)

Setelah proses perlakuan panas *intercritical annealing* dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*) di dalam media pendingin air sehingga terbentuk fasa martensit dari fasa austenit yang terbentuk sebelumnya. Kegunaan fasa martensit disini sebagai fasa penguat pada baja fasa ganda ini.



Gambar 3. 3 Skema Proses *Intercritical Annealing* variasi temperatur dan waktu anil.

3.3.5 Karakterisasi dan Pengujian Sampel

Pengujian yang dilakukan adalah sebanyak dua kali yaitu pada sampel dengan kondisi sebelum dan sesudah perlakuan panas, dengan tujuan untuk membandingkan hasil percobaan dengan yang sebelumnya.

- a) Setelah material baja lembaran canai panas karbon rendah dilakukan proses *Intercritical Annealing* kemudian dilakukan analisa metalografi menggunakan metode ASTM 5 – 8.

- b) Sampel di-*mounting* dengan menggunakan resin, kemudian sampel dihaluskan dengan kertas ampelas ukuran 100#, 120#, 240#, 320#, 400#, 600#, 800#, 1000#, 1200#, 1500#, 2000#. Setelah proses *grinding* dilakukan proses pemolesan dengan menggunakan pasta alumina dan dibersihkan dengan menggunakan etanol dan air. Proses selanjutnya yaitu dilakukan etsa dengan menggunakan larutan nital 3% selama 7 detik pencelupan. Benda uji hasil proses etsa tersebut diamati struktur mikronya menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 100, 200, dan 500 kali.
- c) Pengujian selanjutnya yaitu pengujian kekuatan tarik untuk mengetahui nilai *tensile strength*, *yield strength*, dan elongasi dari sampel yang telah diproses. Pembebanan yang diberikan pada benda yaitu dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung sampel hingga putus (*break*). Pengujian ini menggunakan standar JIS Z 2241 dengan bentuk dan dimensi sampel seperti pada Gambar 3.2.

Engineering stress, atau tegangan nominal, S , didefinisikan sebagai :

$$S = F/A_0 \dots\dots\dots (3.1)$$

F adalah gaya tarik dan A_0 adalah luas penampang awal bagian pengukur. *Engineering strain*, atau regangan nominal, e , didefinisikan sebagai:

$$e = \Delta L/L_0 \dots\dots\dots (3.2)$$

L_0 adalah panjang pengukur awal dan ΔL adalah perubahan panjang pengukur ($L - L_0$).

Bab IV

Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini disajikan data hasil karakterisasi dan pengujian yang telah dilakukan serta pembahasan mengenai sampel baja SPHC yang telah diproses dengan perlakuan panas dengan variabel temperatur dan waktu tahan yang berbeda.

4.1 Data Hasil Karakterisasi

4.1.1 Data Hasil Karakterisasi Awal

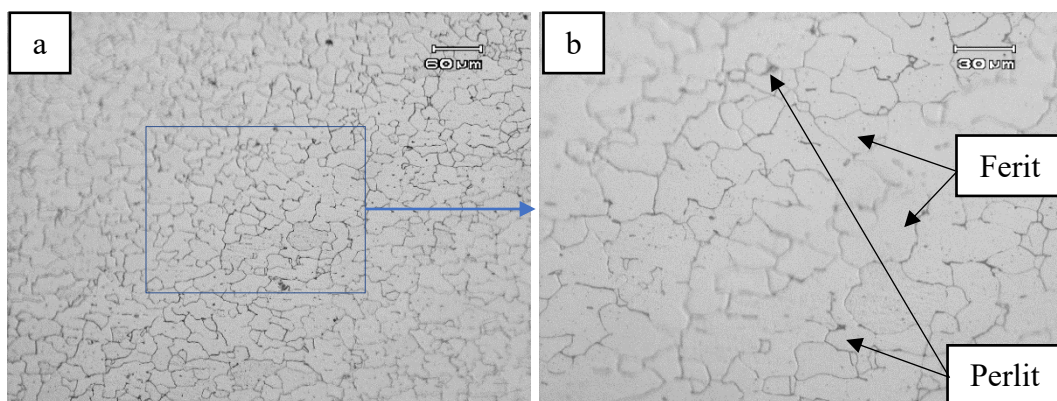
Pada penelitian ini sampel diuji komposisi menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Diperoleh data hasil uji komposisi yang menunjukkan karakteristik atau grade dari sampel termasuk golongan baja karbon rendah khususnya tergolong baja SPHC dengan standar yang berlaku sesuai JIS G 3131 (*Japan Industrial Standard*, 2005). Data hasil uji disajikan pada Tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Data Hasil Uji Komposisi.

Kode Sampel	Unsur (% berat)			
	C	Mn	P	S
NHT	0,0420	0,1860	0,0100	0,0150
751	0,0600	0,1954	0,0148	0,0052
752	0,0420	0,1850	0,0130	0,0056
753	0,0320	0,1820	0,0120	0,0097
801	0,0500	0,2300	0,0070	0,0070
802	0,0420	0,1840	0,0120	0,0110
803	0,0600	0,1750	0,0050	0,0050
851	0,0373	0,2050	0,0146	0,0096
852	0,0388	0,1930	0,0123	0,0083
853	0,0500	0,2600	0,0090	0,0090

Pada Tabel 4.1 didapat hasil komposisi dari seluruh sampel pada penelitian ini memenuhi kriteria grade baja SPHC sesuai pada standar JIS G 3131. Untuk komposisi grade SPHC pada standar dengan kadar karbon (C) maksimal 0,15, mangan (Mn) maksimal 0,60, fosfor (P) maksimal 0,050, sulfur (S) maksimal 0,050 (*Japan Industrial Standar. 2005*).

Struktur mikro material JIS G 3131 SPHC hasil canai panas pada penelitian ini sebelum dilakukan proses perlakuan panas *intercritical annealing* ditunjukkan pada Gambar 4.1, pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200× dan 500×. Pada gambar tersebut tampak jelas struktur mikro baja yang terbentuk setelah proses canai panas yaitu halus dan memiliki fasa dominan ferit dan perlit, struktur perlit sendiri terlihat sedikit dikarenakan kadar karbon yang sangat rendah pada paduan baja sampel awal. Baja SPHC hasil preparasi pengujian mikroskop optik selanjutnya diproses grinding untuk proses pemolesan dengan menggunakan pasta alumina dan dibersihkan menggunakan etanol dan air. Proses selanjutnya yaitu etsa menggunakan larutan nital 3% dengan durasi pencelupan selama 7 detik.



Gambar 4. 1 Struktur Mikro *Non-Heat Treatment* (a) 200×; (b) 500×.

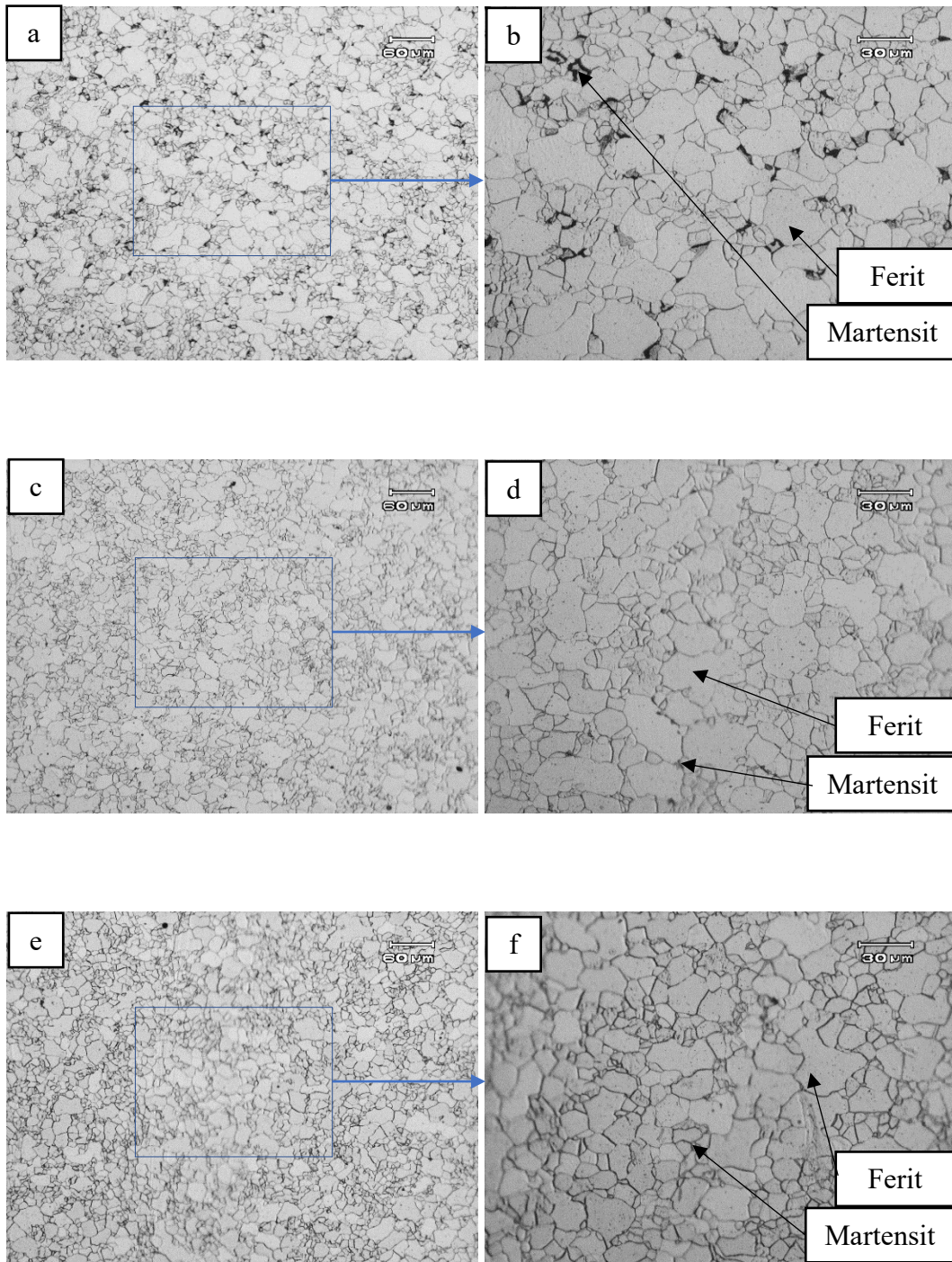
4.1.2 Data Hasil Struktur Mikro

Pada pengambilan data struktur mikro bertujuan untuk mengetahui fasa yang didapatkan, bentuk struktur mikro, serta banyaknya fraksi volume fasa yang dihasilkan. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada seluruh sampel metalografi dengan perbesaran 200× dan 500×. Data hasil struktur mikro yang didapat pada penelitian ini disajikan pada Gambar 4.2 untuk variasi temperatur 750°C dan waktu tahan 1 menit untuk (a); (b), 5 menit untuk (c); (d), dan 15 menit untuk gambar (e); (f). Gambar 4.3 merupakan struktur mikro sampel dengan variasi temperatur 800°C dan waktu tahan 1 menit untuk (a); (b), 5 menit untuk (c); (d), dan 15 menit untuk gambar (e); (f). Gambar 4.4 merupakan struktur mikro sampel dengan variasi temperatur 850°C dan waktu tahan 1 menit untuk (a); (b), 5 menit untuk (c); (d), dan 15 menit untuk gambar (e); (f). Struktur mikro yang terlihat dari hasil pengamatan metalografi pada sampel menunjukkan adanya baja dual fasa yang terdiri dari fasa ferit dan martensit, fasa ferit lebih mendominasi daripada fasa martensit yang terbentuk.

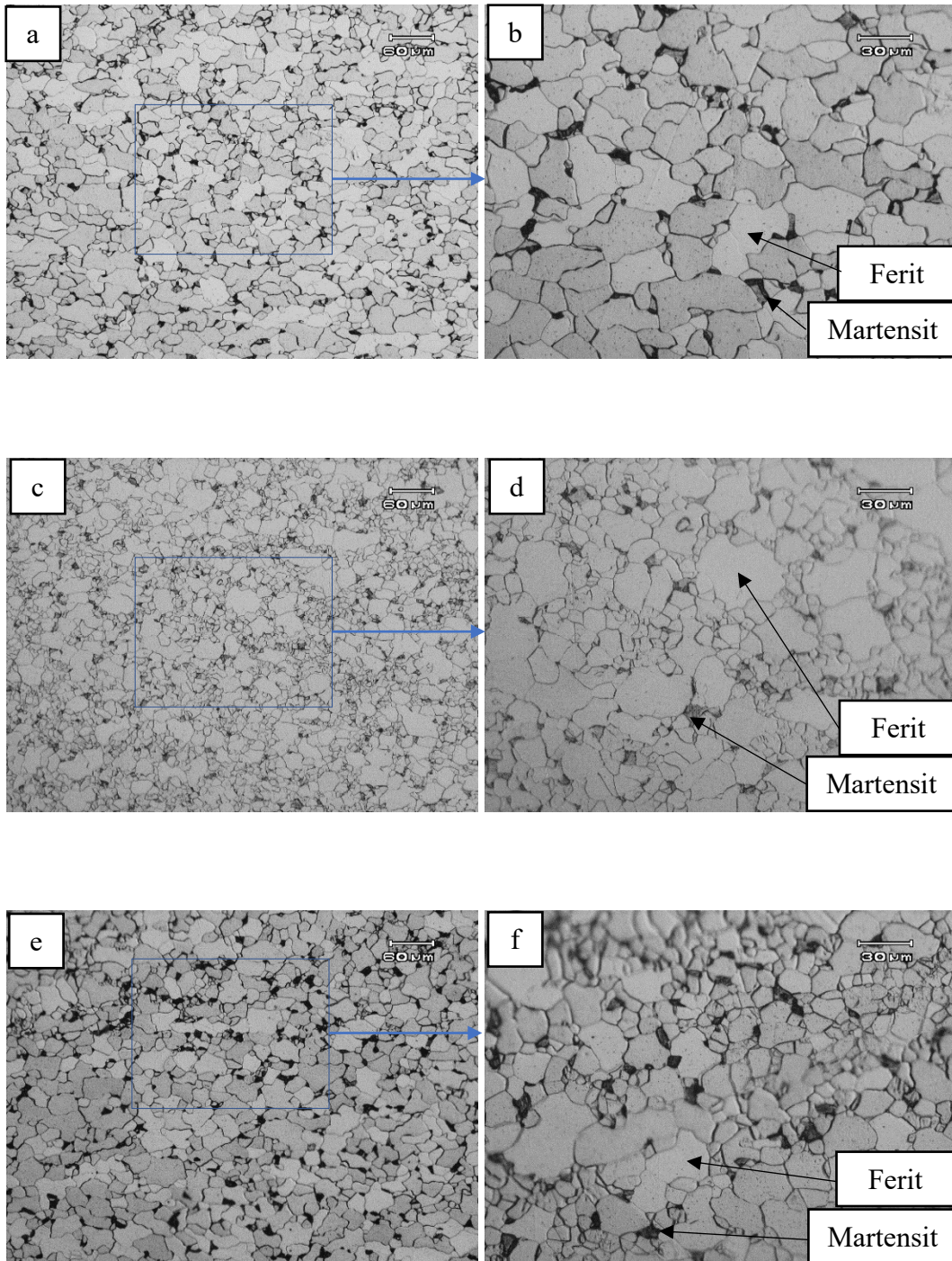
Namun, struktur mikro yang terbentuk pada hasil proses *intercritical annealing* dan *quenching* tidak seutuhnya berfasa ferit dan martensit tetapi juga mengandung sedikit perlit. Hal ini dapat terjadi dikarenakan proses pendinginan yang tidak homogen. Pendinginan yang tidak homogen disebabkan pendinginan pada logam atau baja tertahan oleh gelembung air saat pendinginan dan tertahan oleh *scale* yang terbentuk setelah pemanasan. Dipelajari tentang pendinginan *quenching* bahwasannya pendinginan baja kadar karbon yang sangat rendah diperlukan waktu yang cepat.

Martensit adalah fasa padat yang terbentuk melalui pendinginan cepat dari austenit. Fasa martensit memiliki struktur kristal yang berbeda dari fasa lainnya, yaitu struktur kristal tetragonal. Pada umumnya, martensit terbentuk melalui pendinginan cepat dari austenit pada suhu di bawah suhu M_s (temperatur martensitik), yang tergantung pada komposisi kimia baja. Namun, beberapa studi telah meneliti pembentukan fasa martensit pada hasil *intercritical annealing*. Salah satu studi (Nikkhah *et al.*, 2019) meneliti peningkatan sifat mekanik baja *dual-phase* dengan *intercritical annealing* yang repetitif. Hasil studi menunjukkan bahwa *intercritical annealing* dari mikrostruktur awal martensitik efektif untuk meningkatkan keseimbangan kekuatan-keuletan, dan membentuk fasa martensitik. Oleh karena itu, fasa martensit dapat terbentuk pada hasil *intercritical annealing* tergantung pada kondisi khusus yang digunakan dalam proses perlakuan panas.

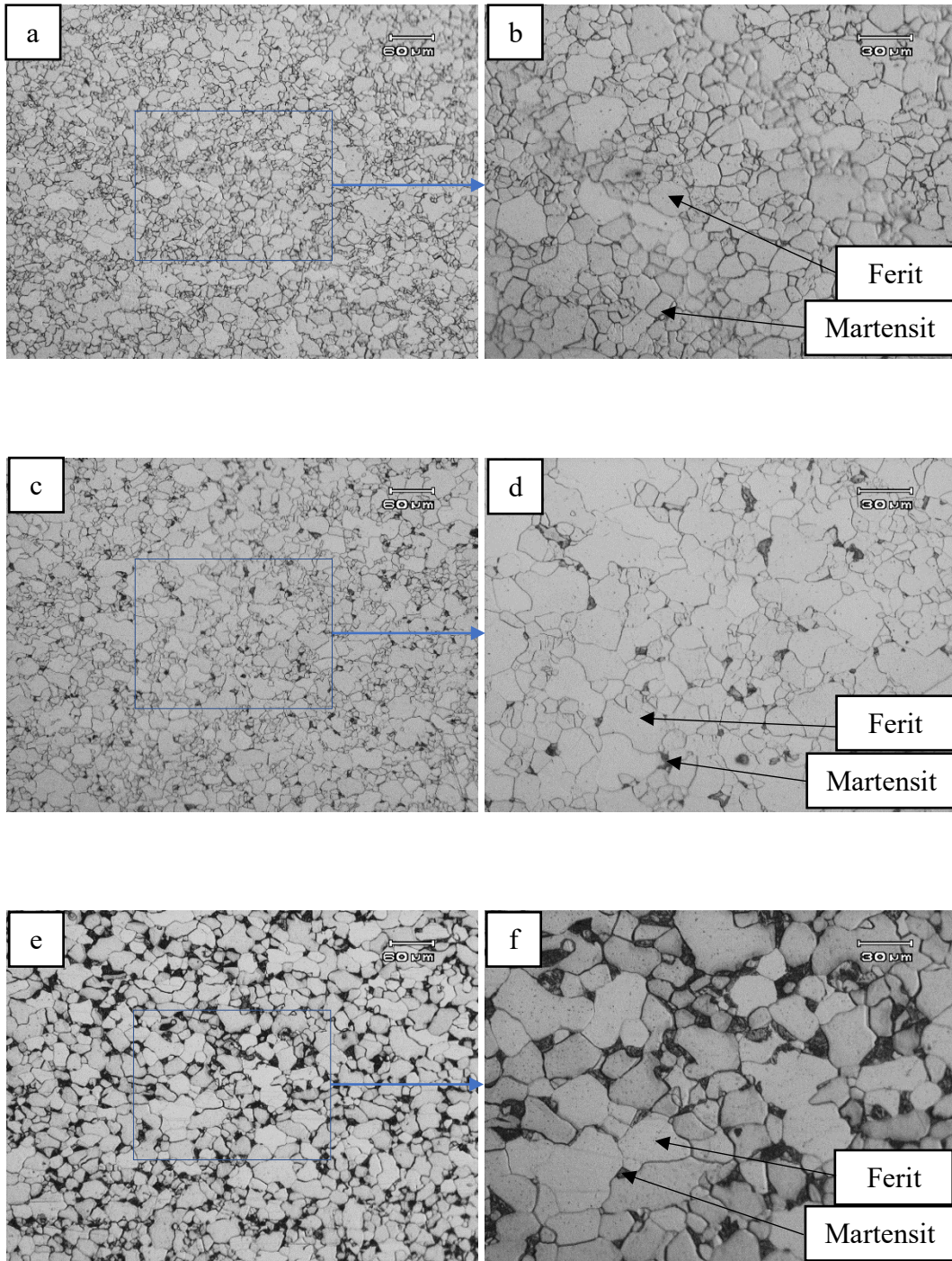
Pada Gambar 4.2 – 4.4 menunjukkan hasil proses *intercritical annealing* yang terdiri dari fasa ferit dan martensit karena mempunyai karakteristik seperti pada Gambar 2.1 dibuktikan dengan pemanasan pada temperatur di antara A_1 dan A_3 serta dilanjutkan dengan pendinginan cepat sesuai dengan temperatur M_s (*martensit start*) sehingga fasa perlit berubah menjadi martensit memperkuat kekuatan pada baja *dual phase*. Perbedaan fasa yang terbentuk pada hasil proses *intercritical annealing* ini dapat dilihat dan dibandingkan dengan hasil gambar mikroskop optik dengan ciri-ciri fasa ferit terlihat lebih terang sedangkan fasa martensit terlihat lebih gelap.



Gambar 4. 2 Struktur Mikro hasil *Intercritical Annealing* (a) sampel 751 200×; (b) sampel 751 500×; (c) sampel 752 200×; (d) sampel 752 500×; (e) sampel 753 200×; (f) sampel 753 500×.



Gambar 4. 3 Struktur Mikro hasil *Intercritical Annealing* (a) sampel 801 200×; (b) sampel 801 500×; (c) sampel 802 200×; (d) sampel 802 500×; (e) sampel 803 200×; (f) sampel 803 500×.



Gambar 4. 4 Struktur Mikro hasil *Intercritical Annealing* (a) sampel 851 200×; (b) sampel 851 500×; (c) sampel 852 200×; (d) sampel 852 500×; (e) sampel 853 200×; (f) sampel 853 500×.

4.1.3 Data Hasil Perhitungan Fraksi Volume Martensit

Perhitungan fraksi volume martensit dilakukan dengan sampling menggunakan aplikasi *imageJ* melalui hasil mikroskop optik dengan perbesaran 500× dan dibuat pada bentuk tabel sesuai dengan kode sampel diberikan yang telah melewati proses *Intercritical Annealing*, hasil dari perhitungan tersebut dikonversikan dengan tabel pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data Perhitungan Fraksi Volume Martensit.

Kode Sampel	Temperatur <i>Annealing</i> (°C)	Waktu Tahan (menit)	Fraksi Volume Martensit (%)
751	750	1	2,6480
752	750	5	1,1670
753	750	15	4,0590
801	800	1	4,7190
802	800	5	3,8170
803	800	15	8,4800
851	850	1	8,4260
852	850	5	4,2750
853	850	15	17,2030

4.1.4 Data Hasil Pengujian Tarik

Hasil dari proses *intercritical annealing* pada variasi temperatur *annealing* 750, 800, dan 850°C serta variasi waktu tahan *annealing* 1, 5, dan 15 menit. Selanjutnya dilakukan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media pendingin air. Sampel yang telah melewati proses ini kemudian dilakukan pengujian tarik untuk mengetahui sifat mekanik dari material hasil perlakuan panas tersebut. Data yang didapat meliputi kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan elongasi. Data pengujian tarik disajikan dalam bentuk tabel pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Tarik.

Kode Sampel	Kekuatan		Elongasi (%)
	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	
751	592	450	23
752	636	467	14
753	625	434	23
801	590	432	23
802	572	418	23
803	544	416	23
851	598	417	15
852	521	394	25
853	479	365	23

4.1.5 Data Hasil Perhitungan Ukuran Butir

Proses *intercritical annealing* berpengaruh juga pada ukuran butir dari struktur mikro fasa yang terbentuk, perhitungan ukuran butir didapat dilakukan pada seluruh sampel dengan metode *Heyn Intercept Method* standar ASTM E 112. Pengukurannya menggunakan data hasil dari mikroskop optik pada perbesaran 500 \times . Data tersebut ditampilkan pada tabel pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Data Hasil Perhitungan Butir.

Kode Sampel	Temperatur Annealing (°C)	Waktu Tahan (menit)	Ukuran Butir (μm)
NHT	-	-	18,0531
751	750	1	9,3443
752	750	5	7,8059
753	750	15	8,2983
801	800	1	14,5843
802	800	5	10,4934
803	800	15	9,0669
851	850	1	8,1493
852	850	5	10,1392
853	850	15	16,3541

4.2 Pembahasan

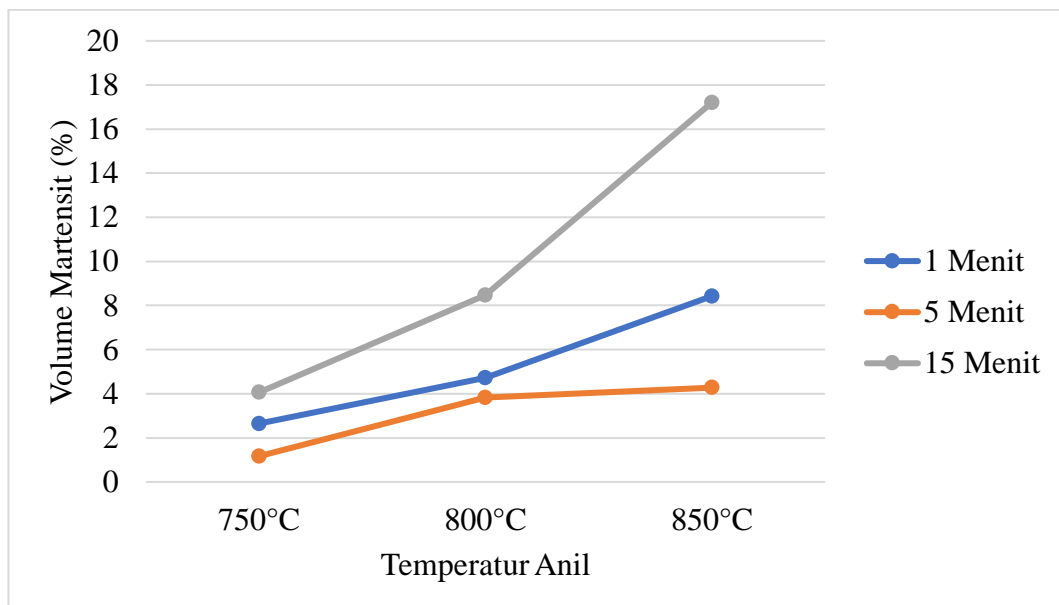
4.2.1 Pengaruh Proses *Intercritical Annealing* terhadap Struktur Mikro

Hasil dari proses *intercritical annealing* ini menghasilkan baja *dual phase* yang terdiri dari fasa ferit dan fasa mertensit. Pada Gambar 4.2 - 4.4, merupakan keseluruhan sampel yang telah dipreparasi dan metalografi. setelah dianalisis dapat diketahui bahwa fasa yang terbentuk adalah dominan fasa ferit dan terbentuk juga fasa martensit. Pada saat dilakukan proses pemanasan hingga temperatur kritis, fasa ferit dan perlit akan bertransformasi menjadi 50% ferit (α) dan 50% austenit (γ) dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat dari temperatur kritis menghasilkan struktur fasa martensit dalam matrik ferit, dimana butir ferit yang terbentuk setelah proses pembentukan fasa ganda adalah poligonal (memiliki sisi banyak) (Avner, 2015).

Struktur martensit dalam bentuk matrik ferit memiliki ciri atau sifat tengangan luluh rendah karena adanya tegangan sisa dari proses transformasi austenit ke martensit dan penguatan regang yang mengikat. Pada temperatur kamar, baja *hypoeutectoid* terdiri dari butiran kristal ferit dan perlit. Setelah pemanasan mencapai temperatur kritis di bawah A_1 , maka perlit mengalami reaksi *eutectoid* sehingga lamel-lamel ferit dan sementit dari perlit bereaksi menjadi austenit yang nantinya setelah pendinginan cepat akan berubah menjadi martensit (Avner, 2015).

4.2.1.1 Pengaruh Temperatur *Annealing* terhadap Fraksi Volume Martensit

Pada proses *intercritical annealing* dihasilkan dua fasa yang terbentuk, yakni fasa ferit dan martensit. Pada beberapa paduan yang terdapat pada baja, terdapat beberapa paduan yang mempengaruhi kepada temperatur *intercritical annealing* khususnya Mn. Dan saat dilakukan pendinginan secara cepat austenit dapat menghambat pembentukan fasa lain, sementara tidak homogen kimia masih ada. Nyatanya pendinginan cepat ini akan menghasilkan kekuatan pendorong yang lebih tinggi untuk reaksi ferit, dan perbedaan suhu A_3 antara daerah Mn tinggi dan daerah Mn rendah. Beberapa struktur mikro dua fasa juga ditunjukkan pada Gambar 4.2-4.4 dan telah dianalisis jumlah fraksi volume martensit. Pada Gambar 4.5 telah disajikan dengan grafik garis.



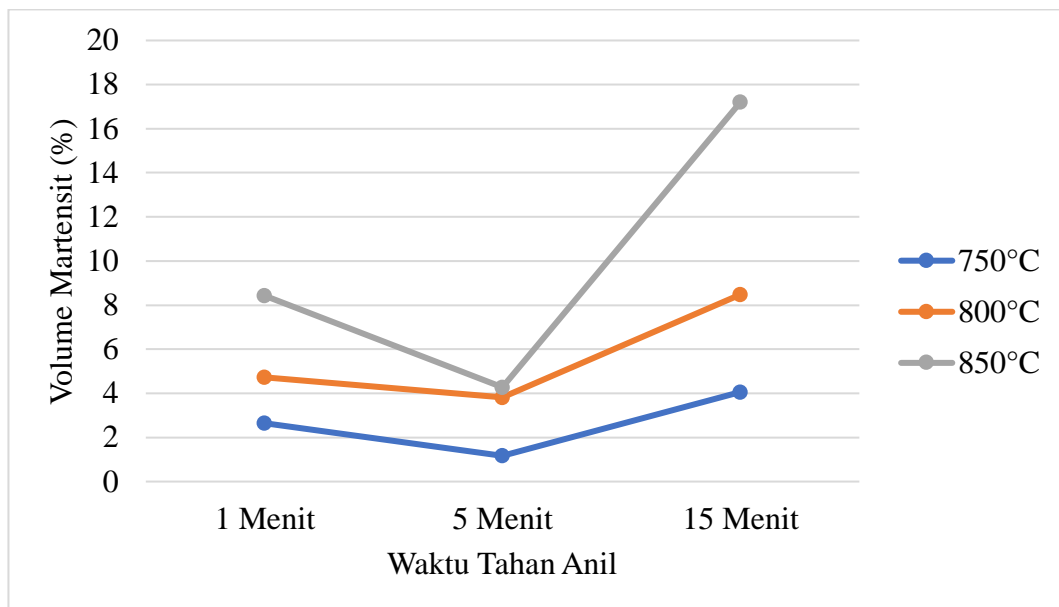
Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Temperatur Anil terhadap Volume Martensit.

Dilihat pada gambar grafik pada Gambar 4.5 dengan naiknya temperatur terjadinya kenaikan fraksi volume martensit yang terbentuk. Dari temperatur anil di suhu 750°C didapat pada waktu tahan 5 menit didapat nilai fraksi martensit sebesar 1,167% dan pada suhu 850°C pada waktu tahan 15 menit didapat nilai fraksi martensit tertinggi sebanyak 17,203%. Pada penelitian sebelumnya disebutkan bahwasannya semakin tinggi temperatur anil, maka akan semakin tinggi fraksi volume martensit yang terbentuk dan kenaikan terbesar didapat pada temperatur 850°C pada waktu tahan 15 menit, dapat dilihat nilainya melebihi nilai dari temperatur anil 800°C pada waktu tahan anil 15 menit. Namun besar volume martensit yang terbentuk pada waktu tahan 5 menit masing-masing temperatur lebih kecil daripada waktu tahan 15 menit hasil berikut menunjukkan nilai tidak optimal pada waktu tahan 5 menit (Najafkhani *et al.*, 2019).

4.2.1.2 Pengaruh Waktu Tahan *Annealing* terhadap Fraksi Volume Martensit

Waktu tahan *annealing* mempengaruhi pembentukan struktur mikro dari baja, baja yang telah dipanaskan di atas temperatur A_1 atau pemanasan dilakukan pada temperatur kritisnya menjadikan baja tersebut memiliki dua fasa. Dapat dilihat pada hasil uji metalografi pada Gambar 4.1 yang awalnya baja terdiri dari fasa ferit yang tercampur dengan perlit. Ketika dilakukan pemanasan di bawah A_3 , austenit terbentuk dalam struktur mikro feritik-perlitik,

dimana transformasi menjadi fasa ganda pertama dimulai pada area perlit dan batasan butiran ferit. Selain itu, sebagian besar austenit terbentuk di area perlitik dan menebal, tetapi hanya lapisan tipis yang terbentuk di batas butir ferit. Daerah ini menjadi martensit selama pendinginan cepat (Maleki *et al.*, 2018).



Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Waktu Tahan Anil terhadap Volume Martensit.

Pada hasil perhitungan persen martensit yang didapat, pada Gambar 4.6 dapat dilihat pengaruh waktu tahan anil pada persen martensit. Didapatkan bahwa semakin lama waktu tahan anil akan meningkatkan persen martensit yang terbentuk dari waktu tahan 1 menit pada setiap temperatur memiliki nilai paling kecil dan nilai pada waktu tahan anil 15 menit pada setiap temperatur memiliki nilai lebih besar. Pada temperatur 750°C dengan waktu tahan 5 menit memiliki nilai 1,167% dan nilai tertinggi didapat pada

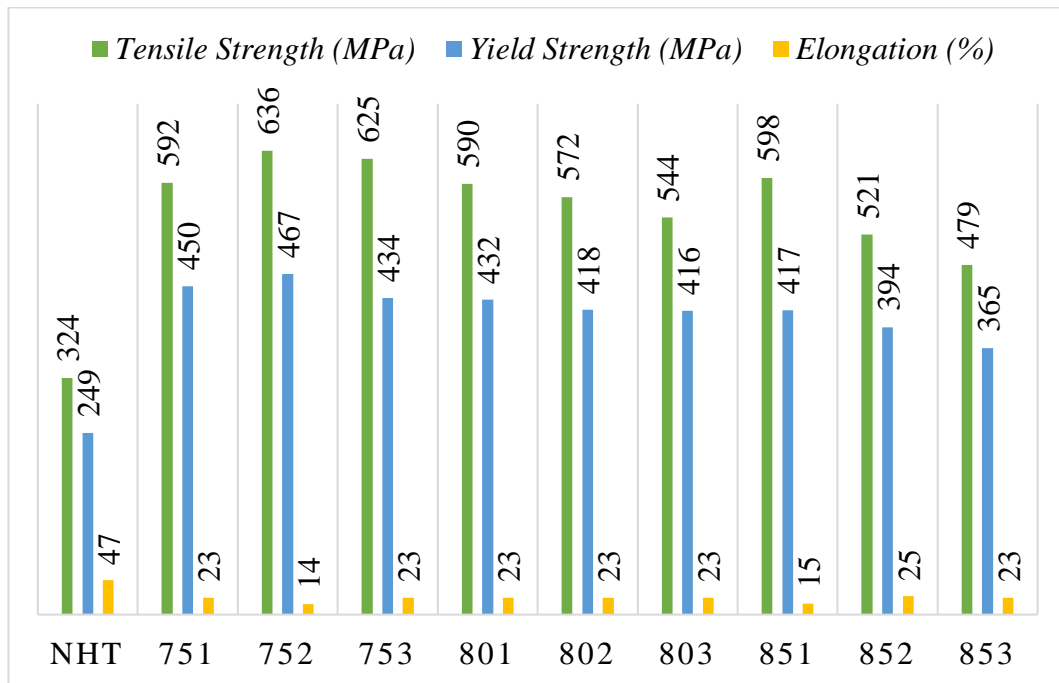
temperatur anil 850°C dengan waktu tahan anil 15 menit. Pada penelitian sebelumnya (Najafkhani *et al.*, 2019) menyatakan bahwasannya semakin lama waktu tahan anil dapat meningkatkan jumlah volume fraksi martensit.

Maka dilihat grafik pada Gambar 4.6 yang mana pada tiap temperatur persen martensit penahanan semakin lama mengakibatkan volume martensit semakin naik. Hal didukung dengan mekanisme pembentukan struktur mikro pada *intercritical annealing* terbentuknya matrik ferit kemudian menjadi austenit lalu menjadi martensit saat pendinginan untuk menghasilkan struktur mikro fasa ganda, dengan meningkatnya suhu anil diidentifikasi untuk variasi jumlah martensit (Maleki *et al.*, 2018).

4.2.2 Pengaruh Proses *Intercritical Annealing* terhadap Sifat Mekanik

Secara umum setelah melakukan penelitian perlakuan panas *intercritical annealing* dengan variasi temperatur *annealing* 750, 800, 850°C menyebabkan sifat mekanik material berubah, yang mana dapat meningkatkan sifat mekanik dari baja SPHC. Dari hasil data pengujian tarik yang diperoleh pada Gambar 4.7, kuat tarik pada baja meningkat dengan sangat drastis. Nilai rata-rata kuat tarik yang diperoleh sebesar 573 MPa dengan persentase rata-rata kenaikan nilai kuat tarik pada baja sampai dengan 76,85% dari kekuatan baja sebelum dilakukan proses *intercritical annealing*. Dengan naiknya nilai *tensile strength* (kuat tarik) membuat baja

SPHC ini yang semulanya setara dengan standar JIS G3101 SS330 menjadi baja dengan standar JIS G3101 SS400 bahkan mencapai grade SS540, yang membuktikan bahwasannya proses *intercritical annealing* ini dapat meningkatkan sifat mekanik baja SPHC karena nilai kuat tarik dari baja mencapai lebih dari 400 Mpa (JIS, 2015).



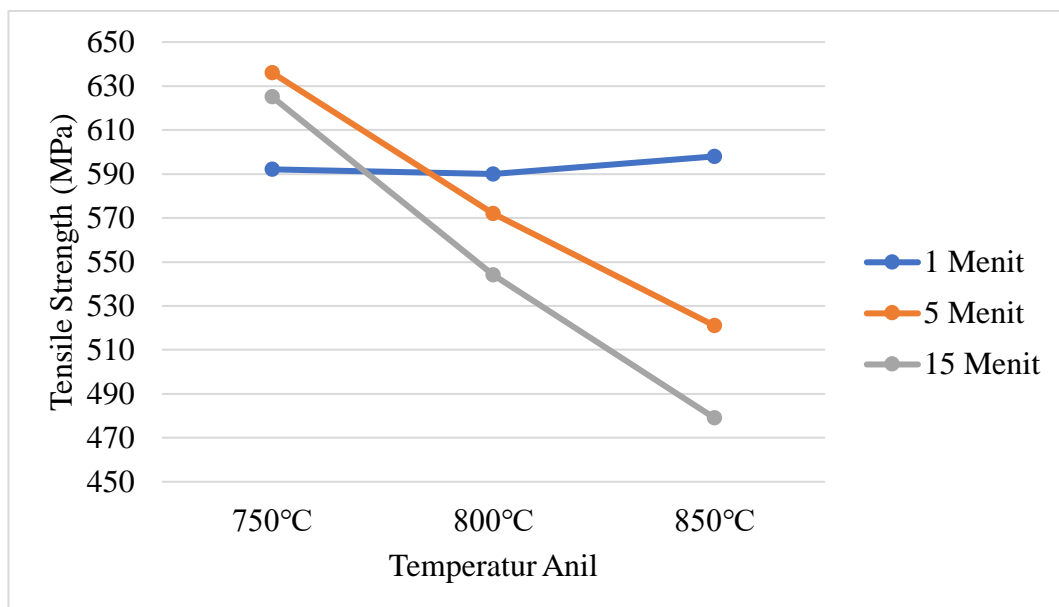
Gambar 4. 7 Sifat Mekanik sesudah *Intercritical Annealing*.

Sifat mekanik kuat luluh baja ini juga mengalami kenaikan yang sangat signifikan. Dari yang semulanya memiliki kuat luluh (*yield strength*) 249 MPa pada bahan *non-heat treatment* kemudian mengalami kenaikan dengan nilai rata-rata 421 MPa. Sebagaimana fungsi dari baja *dual phase* yang memiliki hubungan kekuatan dan keuletan, baja fasa ganda memiliki diskontinuitas luluh akan tetapi mengalami pengerasan pengerjaan yang cepat. Dari data pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa persen elongasi pada

baja mengalami penurunan setelah melalui proses *intercritical annealing*. Untuk standar minimum dari persen elongasi SS400 sebesar 21%, maka terdapat 7 sampel yang telah dilakukan proses dapat memenuhi syarat standar SS400 (JIS, 2015).

4.2.2.1 Pengaruh Temperatur *Annealing* terhadap Sifat Mekanik

Pengaruh temperatur pada proses anil sangat mempengaruhi sifat mekanik dari material yang mendapat perlakuan panas tersebut, hal ini dapat dibuktikan dari grafik yang diperoleh dengan variasi temperatur kritis 750, 800, dan 850°C pada grafik-grafik dari data hasil uji tarik yang terlihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Grafik Pengaruh Temperatur Anil terhadap *Tensile Strength*.

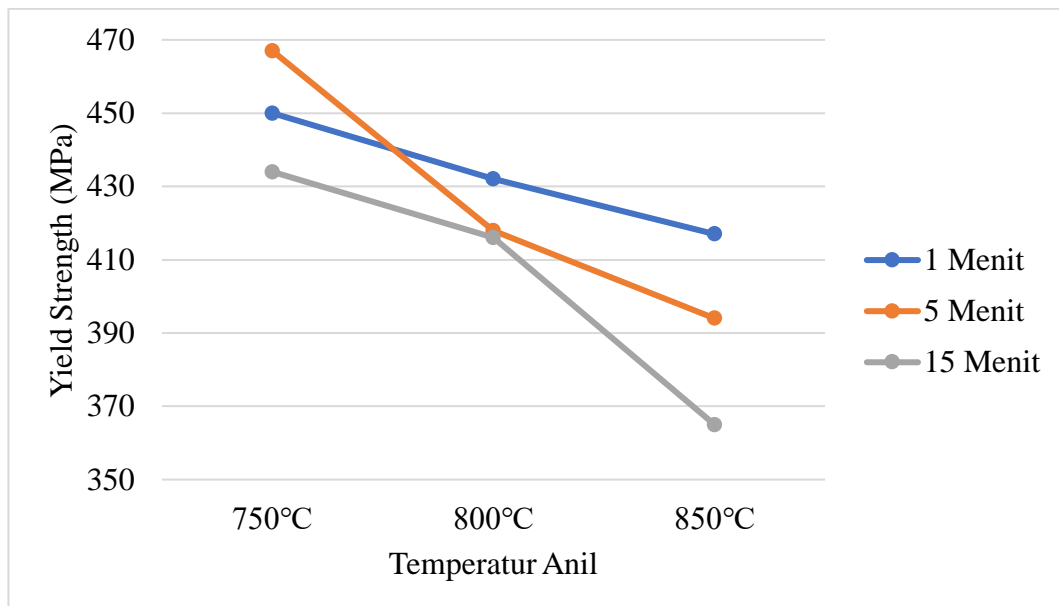
Pada Gambar 4.8 menunjukkan grafik pengaruh temperatur anil terhadap kuat tarik, dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa

nilai temperatur sebagai variabel dengan masing-masing waktu tahan dapat menentukan nilai kuat tarik pada sampel yang diuji, sehingga dapat dilihat pengaruh perlakuan panas yang dilakukan pada sampel. Data uji tarik yang didapat pada tiap temperatur didapat konstan. Pada waktu anil 1 menit didapat nilai konstan naik seiring kenaikan temperatur anil, sedangkan pada waktu anil 5 dan 15 menit data yang didapat konstan turun seiring kenaikan temperatur anil dikarenakan pada waktu tahan 5 dan 15 menit pertumbuhan butir yang semakin besar dan pengaruh ukuran butir terhadap nilai *tensile strength* didapat makin menurun (Maleki *et al.*, 2018).

Jika dilihat pada grafik, sampel yang memiliki kuat tarik paling tinggi yaitu sampel dengan temperatur anil 750°C dan waktu tahan selama 5 menit. Sampel yang memiliki nilai kuat tarik paling rendah didapatkan oleh sampel dengan temperatur anil 850°C dengan waktu tahan 15 menit. Pada kondisi ini dapat dijelaskan, jika pada literatur mengatakan semakin tinggi temperatur maka hasil kuat tarik akan semakin tinggi, sedangkan pada penelitian ini hasil yang didapat tidak sesuai dengan literatur dikarenakan pengaruh dari jumlah volume dari fasa martensit yang terbentuk ketika dilakukan perlakuan panas *intercritical annealing* (Najafkhani *et al.*, 2019).

Penyebab dari penurunan sifat mekanik yang terjadi seiring dengan peningkatan temperatur anil dikarenakan pertumbuhan volume martensit hanya terbentuk pada lapisan tipis. Pada sampel

dengan penahanan 1 menit mengalami peningkatan pada temperatur yang lebih tinggi dikarenakan pertumbuhan martensit tipis yang terbentuk sangat signifikan dan terjadi pertumbuhan butir baru dari fasa ferit yang terbentuk dan pengaruh pertumbuhan butir yang singkat. Sedangkan seiring bertambahnya waktu tahan dan tingginya temperatur anil bukan pertumbuhan martensit yang membesar melainkan membesarnya butiran ferit di baja *dual phase* hasil *intercritical annealing* disebabkan kadar karbon pada penelitian ini sangat rendah (Najafkhani *et al.*, 2019).



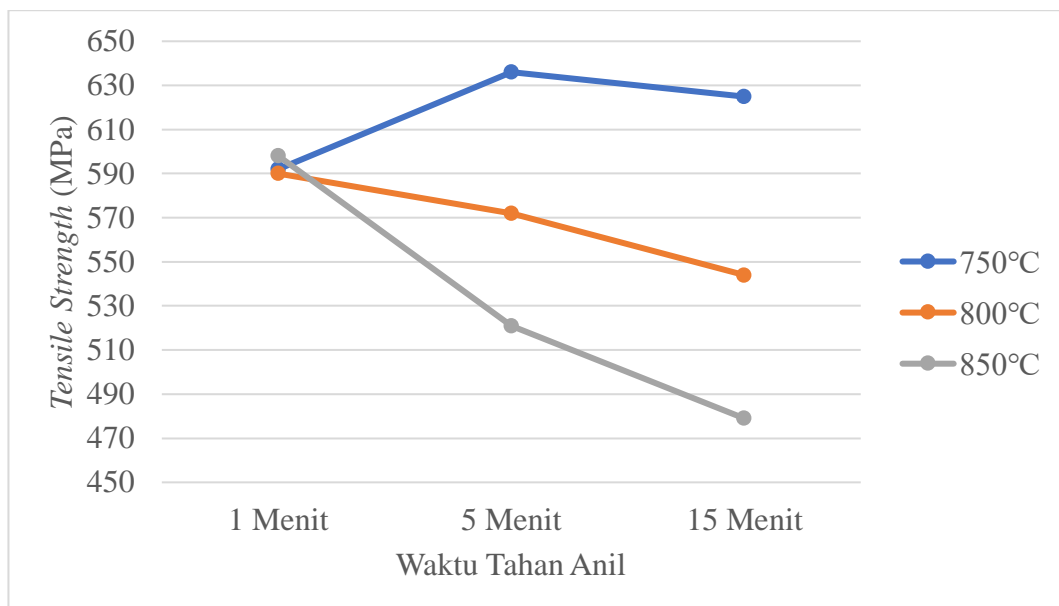
Gambar 4. 9 Grafik Pengaruh Temperatur Anil terhadap *Yield Strength*.

Pada grafik Gambar 4.9 menjelaskan pengaruh temperatur anil terhadap salah satu sifat mekanik sampel yaitu kuat luluh ataupun tingkat keuletan suatu material, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur anil interkritis dari suatu material menyebabkan

penurunan nilai kuat luluh dari material pada proses *intercritical annealing*. Dalam kombinasi pada baja fasa ganda ini, hubungan kekuatan dan keuletan sangat berperan sebagai nilai jual pada baja ini. Dilihat dari grafik pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 nilai optimal dari sampel yang diteliti pada penelitian ini yaitu pada pemanasan pada temperatur 750°C dengan waktu tahan anil 5 menit.

4.2.2.2 Pengaruh Waktu Tahan *Annealing* terhadap Sifat Mekanik

Pada penelitian ini juga dibahas pengaruh waktu tahan anil terhadap sifat mekanik suatu material, semakin lama waktu tahan anil pada proses *intercritical annealing*. Data tersebut dibentuk pada grafik pada Gambar 4.10.



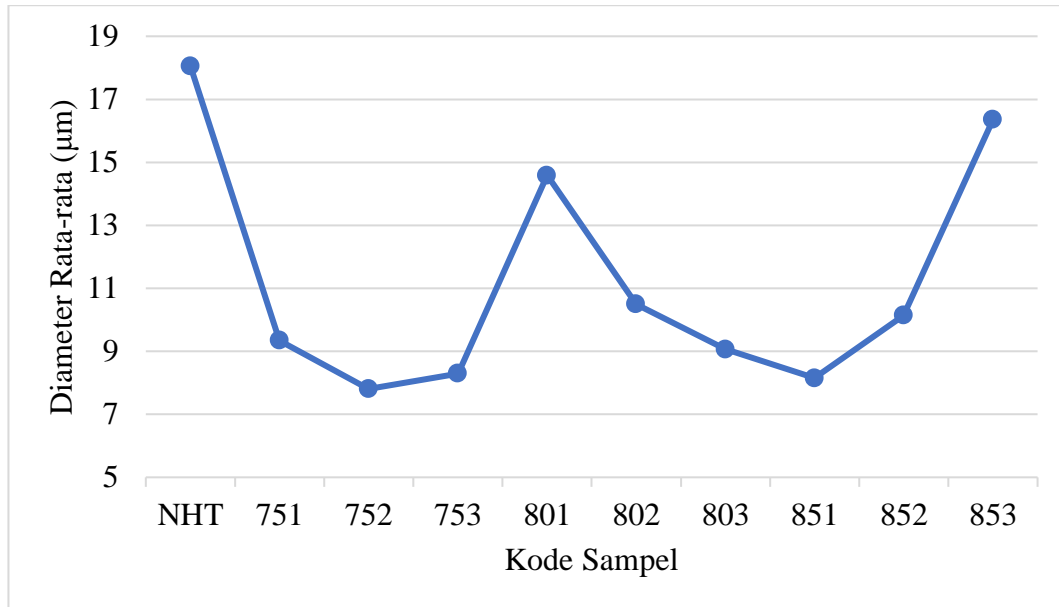
Gambar 4. 10 Grafik Pengaruh Waktu Anil terhadap *Tensile Strength*.

Pada Gambar 4.10 dapat dilihat grafik pengaruh waktu anil terhadap *tensile strength*, semakin lama waktu tahan anil pada proses *intercritical annealing* akan terjadi homogenisasi terhadap fasa austenit pada temperatur kritis. Semakin lama waktu tahan pada saat anil dilakukan nilai *tensile strength* semakin tinggi. Dikarenakan semakin lama waktu tahan anil berdampak pada besar butir dan fasa penguat pada material yaitu fasa martensit. Ketika fraksi fasa semakin meningkat bukan hanya fasa martensit yang semakin banyak, beriringan dengan fasa lain yang lain juga seperti fasa ferit (Saefudin. *et al.* 2008).

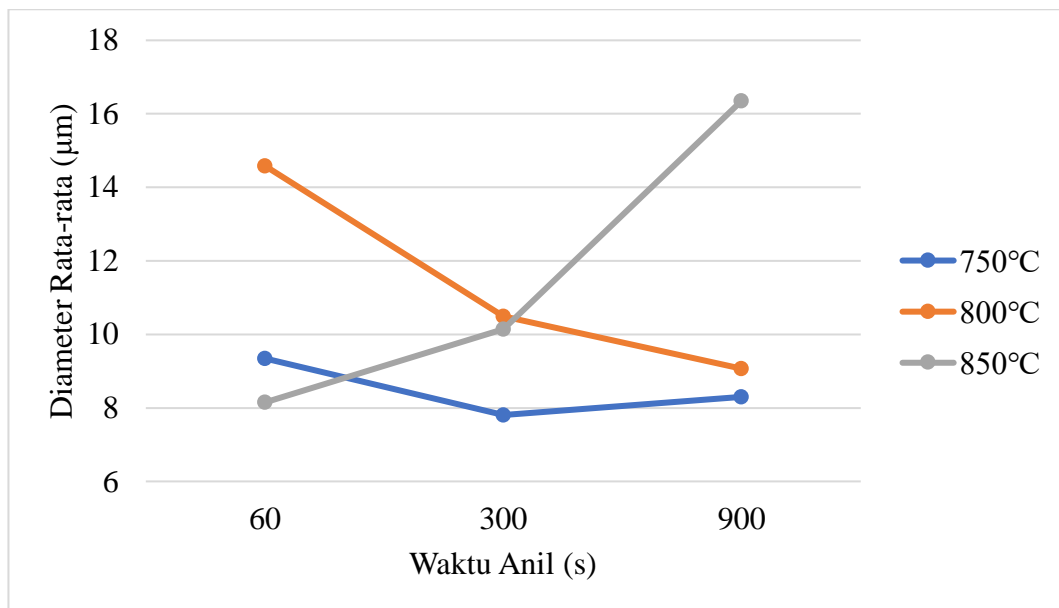
4.2.3 Kinetika Pertumbuhan Austenit pada Proses *Intercritical Annealing*

Pada proses *intercritical annealing* dipengaruhi pada ukuran butir pada fasa ferit khususnya dikarenakan pemanasan pada temperatur kritis dengan melakukan penahanan waktu mempengaruhi hasil. Pada Gambar 4.11 dan 4.12 dapat dilihat nilai ukuran butir baja SPHC hasil *intercritical annealing*. Agar dapat diketahui perbandingan ukuran butir dengan perlakuan panas *intercritical annealing* dan dibandingkan dengan sampel awal *non-heat treatment*. Pada Gambar 4.11 dapat dilihat perbesaran butir pada tiap temperatur dan waktu tahan anil mengalami perbedaan. Pada temperatur 750°C dari waktu tahan 1 ke 5 menit mengalami penurunan sedangkan dari 5 ke 15 menit mengalami peningkatan. Pada temperatur 800°C dari waktu tahan 1 sampai 15 menit mengalami penurunan ukuran

butir pada tiap waktu tahan dikarenakan tingkat homogenisasi dari fasa austenit. Pada temperatur 850°C dari waktu tahan anil 1 sampai 15 menit mengalami peningkatan sangat signifikan (Oh *et al.*, 2004).



Gambar 4. 11 Ukuran Butir Sampel setelah Proses *Intercritical Annealing*.

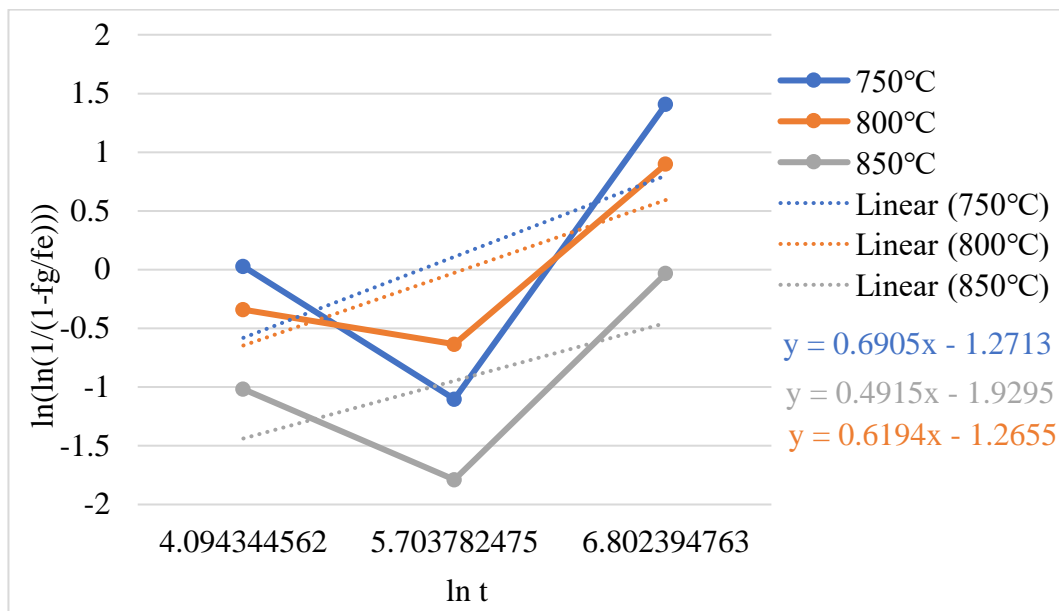


Gambar 4. 12 Grafik Pengaruh Waktu Anil terhadap Diameter Ukuran Butir.

Untuk mengetahui pertumbuhan butir pada baja dapat dihitung dari ukuran butir akhir dari hasil proses, hal ini menjadi salah satu faktor pada sifat mekanik dari suatu material khususnya logam. Dapat dilihat pada Gambar 4.12 bahwasanya semakin lama waktu tahan anil pada tiap temperatur seperti pada literatur semakin besar ukuran butir ferit yang terbentuk. Baja fasa ganda pada temperatur *intercritical annealing* mempunyai fraksi austenit di bawah 100%. Maka digunakan persamaan untuk mencari nilai konstanta kecepatan (K) dan eksponen avrami (n) (Etesami *et al.*, 2017). Dengan menghitung menggunakan persamaan 2.8, dimana f_γ volume austenit dimana nilainya dapat dianggap sebanding dengan volume martensit yang terbentuk. f_e merupakan volume austenit pada saat kesetimbangan, nilai tersebut dapat dicari dengan menggunakan *level rule* pada diagram Fe₃C. T merupakan waktu tahan pada pemanasan pada titik *intercritical annealing*. K merupakan konstanta kecepatan pertumbuhan austenit, n merupakan eksponen avrami. Melalui persamaan JMA yang telah dimodifikasi maka dapat dicari nilai konstanta kecepatan pertumbuhan butir (K) dan nilai eksponen avrami (n) yang dapat dari slope dan *intercept* yang dihasilkan dari persamaan linier hubungan antara $\ln \left[\ln \left(1 / \left(1 - f_\gamma / f_e \right) \right) \right]$ dengan $\ln t$. Berikut ini hubungan antara $\ln t$ dan $\ln \left[\ln \left(1 / \left(1 - f_\gamma / f_e \right) \right) \right]$ pada berbagai temperatur (Alfirano *et al.*, 2014).

Didapat perhitungan yang telah disajikan dalam bentuk tabel sesuai sumbu X dan Y pada persamaan berikut agar didapat nilai $\ln \left[\ln \left(1 / \left(1 - f_\gamma / f_e \right) \right) \right]$ dari persamaan tersebut (Etesami *et al.*, 2017).

Setelah didapat nilai $\ln t$ dan $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$, kemudian dibuat grafik hubungan antara $\ln t$ dan $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$ pada tiap temperatur anil. Jika dijadikan grafik maka akan didapat garis linier seperti pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Hubungan $\ln t$ dengan $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$ pada tiap temperatur.

Dari Gambar 4.13 hubungan antara $\ln t$ dengan $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$ pada tiap temperatur dapat dicari nilai konstanta kecepatan pertumbuhan butir (K) dan nilai eksponen avrami (n). Dari hasil regresi yang berupa garis linier, nilai *intercept* merupakan $\ln K$ dan slope merupakan nilai n (Alfirano *et al.*, 2014). Dari persamaan didapat nilai konstanta kecepatan pertumbuhan butir (K) serta eksponen avrami (n) pada berbagai temperatur pemanasan *intercritical annealing*.

Tabel 4. 5 Pengukuran Fraksi Volume Austenit dan Perhitungan Harga n dan K.

Temperatur Anil (°C)	Fraksi volume austenit pada saat kesetimbangan	Eksponen avrami (n)	Konstanta kecepatan pertumbuhan (K)
750	0,0413	0,6905	0,2805
800	0,0928	0,4915	0,1452
850	0,2776	0,6194	0,2821

Konstanta kecepatan pertumbuhan (K) adalah parameter yang tergantung dengan temperatur dan berhubungan dengan kecepatan pertumbuhan butir dan frekuensi nukleasi. Semakin tinggi temperatur pemanasan pada titik *intercritical annealing* maka akan meningkatkan nilai K begitupun sebaliknya. Sedangkan eksponen avrami (n) bergantung pada nukleasi dan proses pertumbuhan butir dan kecepatan nukleasi mempunyai efek yang signifikan terhadap nilai n (Alfirano *et al.*, 2014).

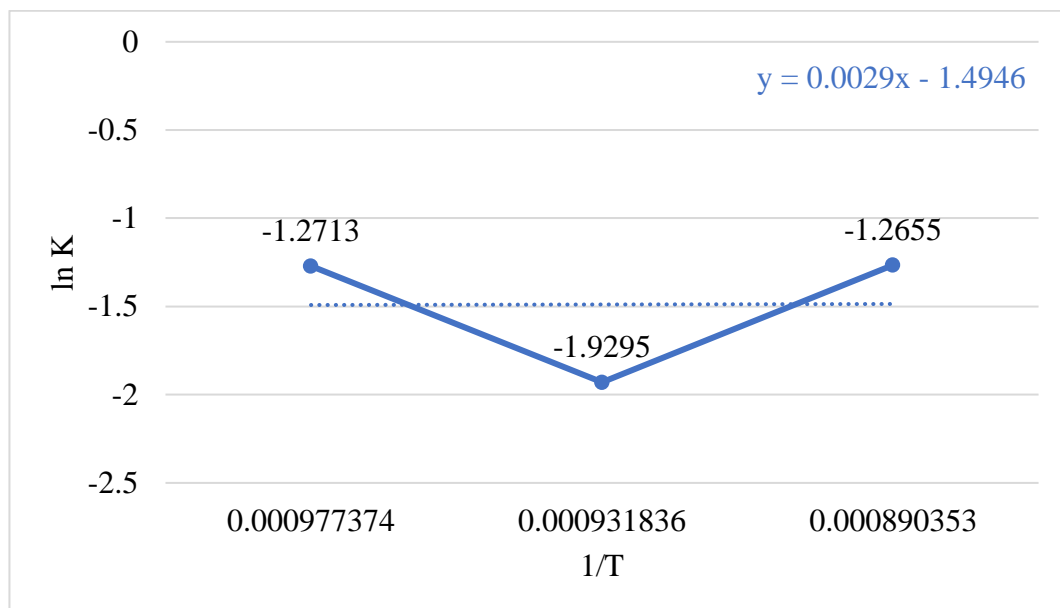
Dari data konstanta kecepatan pertumbuhan butir (K) dapat dicari besarnya energi aktivasi melalui persamaan Arrhenius, seperti pada persamaan 2.9. Dimana A merupakan konstanta yang berhubungan dengan sistem, Q merupakan energi aktivasi, R merupakan konstanta gas dan bernilai konstan sedangkan T adalah temperatur pemanasan *intercritical annealing* (dalam Kelvin). Secara logaritma persamaan Arrhenius dapat diubah menjadi persamaan 2.10 (Etesami, S. A., & Enayati, M. H. 2016).

Melalui persamaan Arrhenius maka dapat dicari nilai energi aktivasi (Q) dan konstanta (A) yang didapat dari slope dan *intercept* yang dihasilkan dari persamaan linier hubungan antara $\ln K$ dengan $1/T$. Berikut ini hubungan antara $\ln K$ dengan $1/T$ berbagai temperatur (Alfirano *et al.*, 2014).

Tabel 4. 6 Hubungan antara ln K dengan 1/T.

$\ln K = \ln A - \left(\frac{Q}{RT}\right)$			
Sumbu X		Sumbu Y	
T (Kelvin)	1/T	K	ln K
1023,15	0,0010	0,2805	-1,2713
1073,15	0,0009	0,1452	-1,9295
1123,15	0,0009	0,2821	-1,2655

Berikut ini hubungan antara ln K dengan 1/T jika dijadikan sebuah grafik maka akan didapat garis linier sebagai berikut:



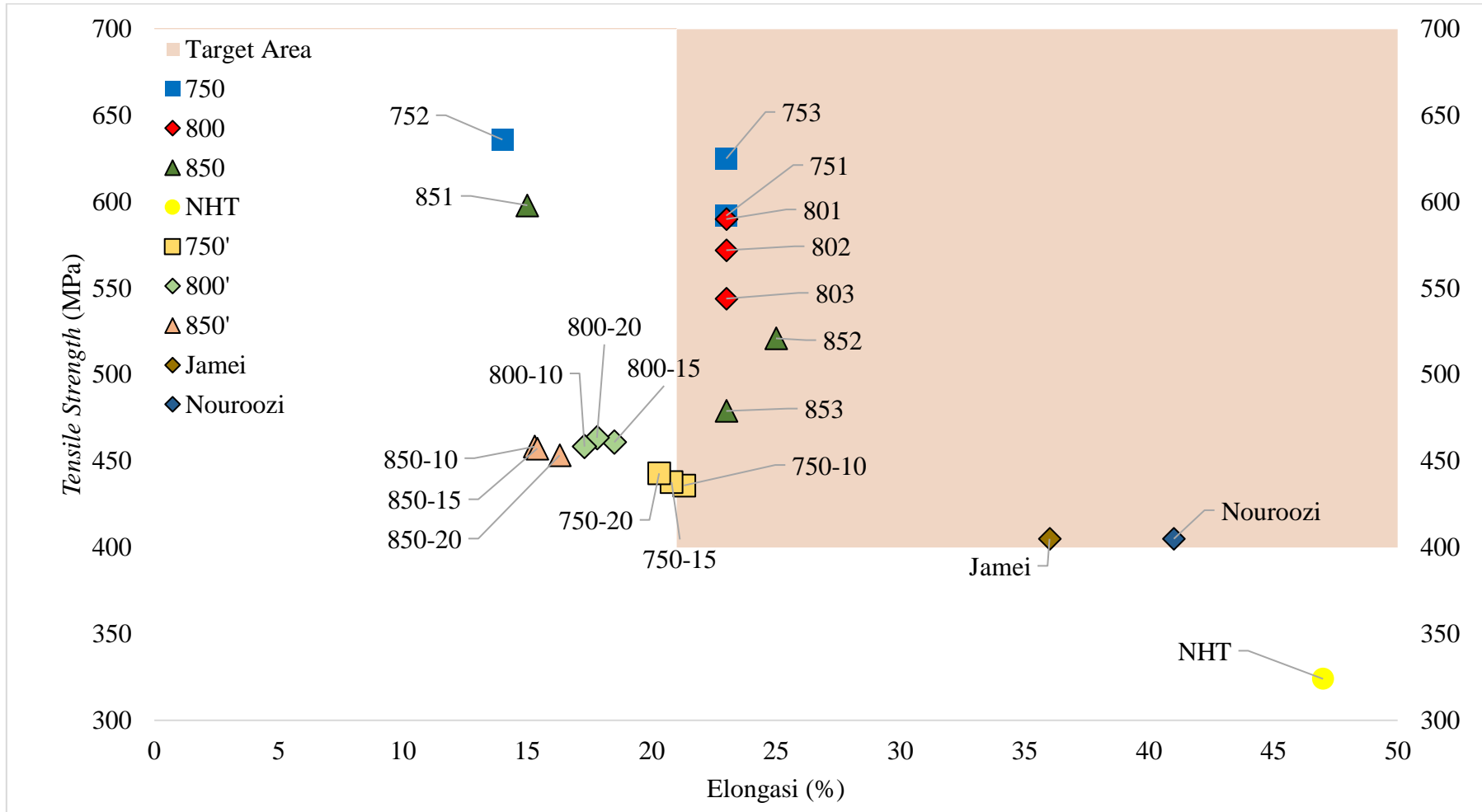
Gambar 4. 14 Grafik hubungan ln K dengan 1/T.

Melalui Gambar 4.14 grafik hubungan ln K dengan 1/T dapat dicari nilai energi aktivasi (Q) dan konstanta (A). Dari hasil regresi yang berupa garis linier, nilai intercept merupakan ln A dan slope merupakan nilai $-Q/R$. Pada persamaan didapat persamaan regresi linier sebagai berikut (Etesami *et al.*, 2017):

Dari perhitungan persamaan di atas didapat nilai energi aktivasi (Q) yang didapat sebesar 12,4269 J/mol dan konstanta (A) sebesar 1,0029. Dari hasil berikut dibandingkan dengan literatur pada tinjauan pustaka menunjukkan bahwasanya jumlah energi yang harus diatasi pada proses *intercritical annealing* pada penelitian ini sebesar 12,4269 J/mol, serta pertumbuhan jumlah situs nukleasi sebesar 1,0029. Dari nilai eksponen Avrami yang kita dapat mengatur perubahan fasa yang terjadi selama proses austenisasi pada proses *intercritical annealing*.

4.2.4 Perbandingan Hasil sifat mekanik Proses *Intercritical Annealing* dengan penelitian sebelumnya

Hasil sifat mekanik yang dihasilkan pada penelitian ini didapat 7 dari 9 sampel *intercritical annealing* telah mencapai standar JIS G 3101 SS400 dengan minimal nilai *tensile strength* 400 MPa serta elongasi minimal 21%. Pada penelitian sebelumnya (Saefudin, 2008) baja SPHC dengan nilai karakterisasi kadar karbon (C) 0,075% dan mangan (Mn) 0,28% mencapai hasil proses *intercritical annealing* hanya 1 sampel yang sifat mekaniknya masuk pada standar SS400. Pada penelitian (Nouroozi *et al.*, 2018) dan (Jamei *et al.*, 2019) didapatkan nilai pada hasil *intercritical annealing* tanpa proses lanjutan dengan nilai *tensile strength* yang sama yaitu 405 MPa serta elongasi masing-masing 41% dan 36%. Hasil tersebut dirangkum dengan grafik pada Gambar 4.15. Grafik tersebut dapat dilihat nilai area yang dicapai dari hasil penelitian ini.



Gambar 4. 15 Grafik perbandingan Hasil proses *Intercritical Annealing*.

Bab V

Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan penelitian peningkatan sifat mekanik baja *plat join* G 3131 SPHC melalui simulasi proses *intercritical annealing* di industri konstruksi baja yang telah dilakukan sebagai berikut:

1. Proses perlakuan panas *intercritical annealing* dengan cara pemanasan pada temperatur kritis dan pendinginan dengan media pendingin air dapat meningkatkan sifat mekanik baja *plat join* G 3131 SPHC sehingga menjadi baja *dual phase* dengan kekuatan sifat mekanik setara dengan standar JIS G 3101 SS400 yang banyak dibutuhkan secara komersial. Temperatur anil dan waktu tahan optimal pada proses yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pada temperatur 750°C dengan waktu tahan selama 15 menit yang menghasilkan nilai kuat tarik 625 MPa dengan elongasi 23% dan kombinasi kuat luluh mencapai 434 MPa karena secara standar telah masuk pada JIS G 3101 SS400 dengan kenaikan kuat tarik mencapai 92,90% serta kenaikan kuat luluh mencapai 74,29%.
2. Proses *intercritical annealing* akan menghasilkan baja fasa ganda. Fasa yang terbentuk pada baja fasa ganda ini yaitu ferit dan martensit. Semakin lama temperatur anil dan waktu tahan anil dapat memperbanyak struktur mikro martensit serta memperbesar butir

austenit dan ferit yang terbentuk. Pada temperatur anil 750°C semakin lama waktu tahan anil akan menyebabkan peningkatan kuat tarik dan kuat luluh, tetapi pada waktu tahan anil 15 menit nilai kuat tarik mengalami penurunan disebabkan terdapatnya pertumbuhan ferit lebih dominan dibandingkan dengan martensit. Hal ini dikarenakan kadar karbon yang sangat rendah. Demikian pula pada temperatur 850°C dengan waktu tahan anil semakin lama menyebabkan penurunan kuat tarik pada sampel yang disebabkan oleh pertumbuhan ferit yang lebih dominan dibandingkan dengan martensit yang terbentuk. Pada nilai optimal didapatkan nilai K dan n masing-masing 0,280466778 dan 0,6905 dengan energi aktivasi (Q) sebesar 12,4268517 J/mol dengan nilai A senilai 1,002904209.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut:

1. Melakukan proses lain selain *intercritical annealing* yang lebih efisien dan menghasilkan nilai optimal dalam upaya meningkatkan sifat mekanik baja SPHC menjadi SS400.
2. Menggunakan media pendingin *quenching* yang dapat menurunkan temperatur baja dengan kandungan karbon sangat rendah dengan cepat setelah proses *intercritical annealing* agar memenuhi nilai optimal dari proses tersebut dan mengubah seluruh fasa austenit pada temperatur kritis kesetimbangan menjadi martensit.

DAFTAR PUSTAKA

Alfirano, Samdan, W., & Maulud, H. (2014). Effect of intercritical annealing temperature and holding time on microstructure and mechanical properties of dual phase low carbon steel. *Applied Mechanics and Materials*, 493, 721–726. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.493.721>

Avner, S. H. (1974). Introduction to Physical Metallurgy: Second Edition. In *McGraw Hill Book Company*.

Cai, Z., Zhao, J., & Ding, H. (2017). Transformation-induced plasticity steel and their hot rolling technologies. *Rolling of Advanced High Strength Steels: Theory, Simulation and Practice*, 289–322. <https://doi.org/10.1201/9781315120577>

Etesami, S. A., & Enayati, M. H. (2016). Microstructural evolution and recrystallization kinetics of a cold-rolled, ferrite-martensite structure during intercritical annealing. *Metallurgical and Materials Transactions A.pdf*. (n.d.).

Etesami, S. A., Enayati, M. H., & Kalashami, A. G. (2017). Austenite formation and mechanical properties of a cold rolled ferrite-martensite structure during intercritical annealing. *Materials Science and Engineering A*, 682, 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.112>

Gillespie, L. K. (2008). Heat treating. *Cutting Tool Engineering*, 60(4), 24–25. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1695.9764>

Gunadi, R., Moeljono, M., Igustiany, F., & Hasan, N. (2020). Bolt connection performance post fire in steel bridges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 830(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/830/2/022052>

Informasi Statistik Infrastruktur PUPR 2021. (n.d.).

Jahanzeb, N., Shin, J. H., Singh, J., Heo, Y. U., & Choi, S. H. (2017). Effect of microstructure on the hardness heterogeneity of dissimilar metal joints between 316L stainless steel and SS400 steel. *Materials Science and Engineering A*, 700, 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.002>

Jamei, F., Mirzadeh, H., & Zamani, M. (2019). Synergistic effects of holding time at intercritical annealing temperature and initial microstructure on the mechanical

properties of dual phase steel. *Materials Science and Engineering A*, 750(February), 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.052>

JIS. (2015). *Jis G 3101*.

JIS-G-3131.pdf. (n.d.).

Maleki, M., Mirzadeh, H., & Zamani, M. (2018). Effect of Intercritical Annealing on Mechanical Properties and Work-Hardening Response of High Formability Dual Phase Steel. In *Steel Research International* (Vol. 89, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/srin.201700412>

Miki, C., Homma, K., & Tominaga, T. (2002). High strength and high performances steels and their use in bridge structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(1), 3–20. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00028-1)

Najafkhani, F., Mirzadeh, H., & Zamani, M. (2019). Effect of Intercritical Annealing Conditions on Grain Growth Kinetics of Dual Phase Steel. *Metals and Materials International*, 25(4), 1039–1046. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00241-2>

Nakada, N., Arakawa, Y., Park, K. S., Tsuchiyama, T., & Takaki, S. (2012). Dual phase structure formed by partial reversion of cold-deformed martensite. *Materials Science and Engineering A*, 553, 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.001>

Nikkhah, S., Mirzadeh, H., & Zamani, M. (2019). Fine tuning the mechanical properties of dual phase steel via thermomechanical processing of cold rolling and intercritical annealing. *Materials Chemistry and Physics*, 230(December 2018), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.03.053>

Nouroozi, M., Mirzadeh, H., & Zamani, M. (2018). Effect of microstructural refinement and intercritical annealing time on mechanical properties of high-formability dual phase steel. *Materials Science and Engineering A*, 736, 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.088>

Oh, C. S., Han, H. N., Lee, C. G., Lee, T. H., & Kim, S. J. (2004). Dilatometric analysis on phase transformations of intercritical annealing of Fe-Mn-Si and Fe-Mn-Si-Cu low carbon TRIP steels. In *Metals and Materials International* (Vol. 10, Issue 5, pp. 399–406). <https://doi.org/10.1007/BF03027339>

Saefudin. 2008. *Analisis Sifat Mekanik Baja Fasa Ganda pada Proses Intercritical Annealing dengan Quenching untuk Baja Karbon Rendah*. Pusat Penelitian Metalurgi (P2M)-LIPI.pdf. (n.d.).

S.H. Avner. (2015). *Introduction to Physical Metallurgy* (Vol. 1).

Taweejun, N., & Kanchanomai, C. (2015). Effects of Carbon and Nitrogen on the Microstructure and Mechanical Properties of Carbonitrided Low-Carbon Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(12), 4853–4862. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1757-x>

Thomas, G. (1985). Physical Metallurgy and Alloy Design of Dual Phase Steels. *Materials Science Monographs*, 26, 89–123.

Wardoyo, J. T. (2005). Metode Peningkatan Tegangan Tarik dan Kekerasan pada Baja Karbon Rendah Melalui Baja Fasa Ganda. *Teknoin*, 10(3), 237–248. <https://doi.org/10.20885/teknoin.vol10.iss3.art6>

Lampiran A
Contoh Perhitungan

Lampiran A. Contoh perhitungan

1. Perhitungan Temperatur A_1 dan A_3 .

Diketahui:

Komposisi kimia dari bahan:

Perhitungan:

Tabel A. 1 Komposisi Kimia Sampel.

C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,04541	0,01109	0,19954	0,0263	0,0147	0,0174	0,0011	0,0017

a. Hougardy

$$A_1 = 739 - 22C - 7Mn + 2Si + 14Cr + 13Mo - 13Ni$$

$$A_1 = 739 - 22(0,04541) - 7(0,19954) + 2(0,01109) + 14(0,0174) + 13(0,0011) - 13(0,0147)$$

$$A_1 = 739 - 0,99902 - 1,39678 + 0,02218 + 0,2436 + 0,0143 - 0,1911$$

$$A_1 = 736,69318^\circ\text{C}$$

$$A_3 = 902 - 255C - 11Mn + 19Si - 5Cr + 13Mo - 20Ni + 55V$$

$$A_3 = 902 - 255(0,04541) - 11(0,19954) + 19(0,01109) - 5(0,0174) + 13(0,0011) - 20(0,0147) + 55(0,0017)$$

$$A_3 = 902 - 10,21725 - 2,19494 + 0,21071 - 0,087 + 0,0143 - 0,294 + 0,0935$$

$$A_3 = 889,52532^\circ\text{C}$$

b. Trzaska

$$A_1 = 739 - 22,8C - 6,8Mn + 18,2Si + 11,7Cr - 15Ni - 6,4Mo - 5V - 28Cu$$

$$A_1 = 739 - 22,8(0,04541) - 6,8(0,19954) + 18,2(0,01109) + 11,7(0,0174) - 15(0,0147) - 6,4(0,0011) - 5(0,0017) - 28(0,0263)$$

$$A_1 = 739 - 1,035348 - 1,356872 + 0,201838 + 0,20358 - 0,2205 - 0,00704 - 0,0085 - 0,7364$$

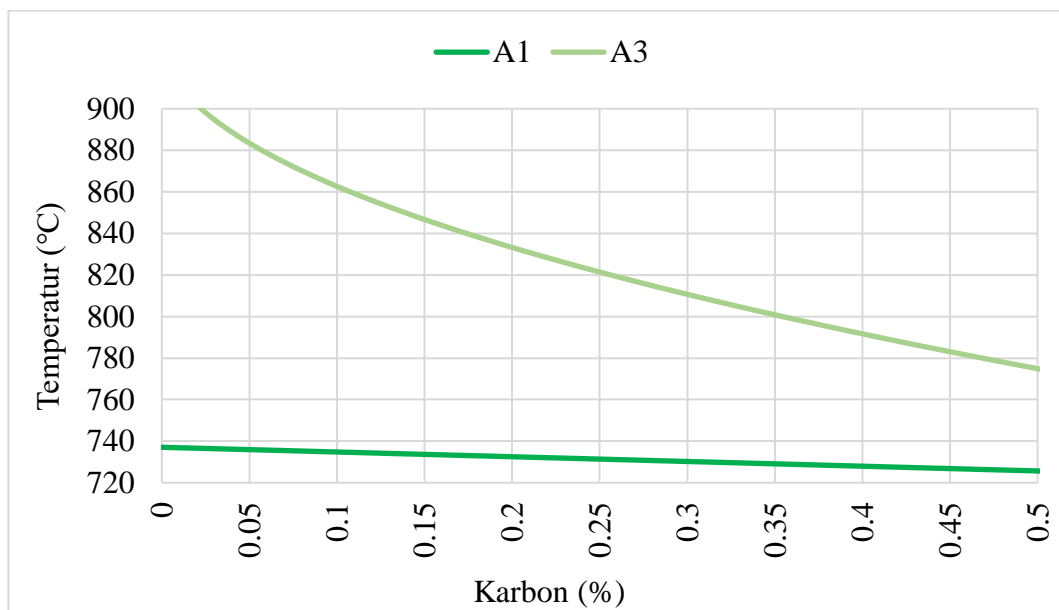
$$A_1 = 736,040758^\circ\text{C}$$

$$A_3 = 937,3 - 224,5\sqrt{C} - 17\text{Mn} + 34\text{Si} - 14\text{Ni} + 21,6\text{Mo} + 41,8\text{V} - 20\text{Cu}$$

$$A_3 = 937,3 - 224,5\sqrt{(0,04541)} - 17(0,19954) + 34(0,01109) - 14(0,0147) + 21,6(0,0011) + 41,8(0,0017) - 20(0,0263)$$

$$A_3 = 937,3 - 47,84010193 - 3,39218 + 0,37706 - 0,2058 + 0,02376 + 0,07106 - 0,526$$

$$A_3 = 885,8077981^\circ\text{C}$$



Gambar A. 1 Garis A₁ dan A₃ pada Diagram Fasa.

2. Perhitungan Ukuran Butir Rata-rata Menggunakan Metode Heyn

Intercept (ASTM E 112)

Persamaan perhitungan ukuran butir rata-rata :

$$AVG = \frac{\text{Nilai Known Distance}}{\text{Jumlah Butir dalam 1 garis}}$$

Kemudian data ditampilkan pada bentuk tabel pada Tabel A.2

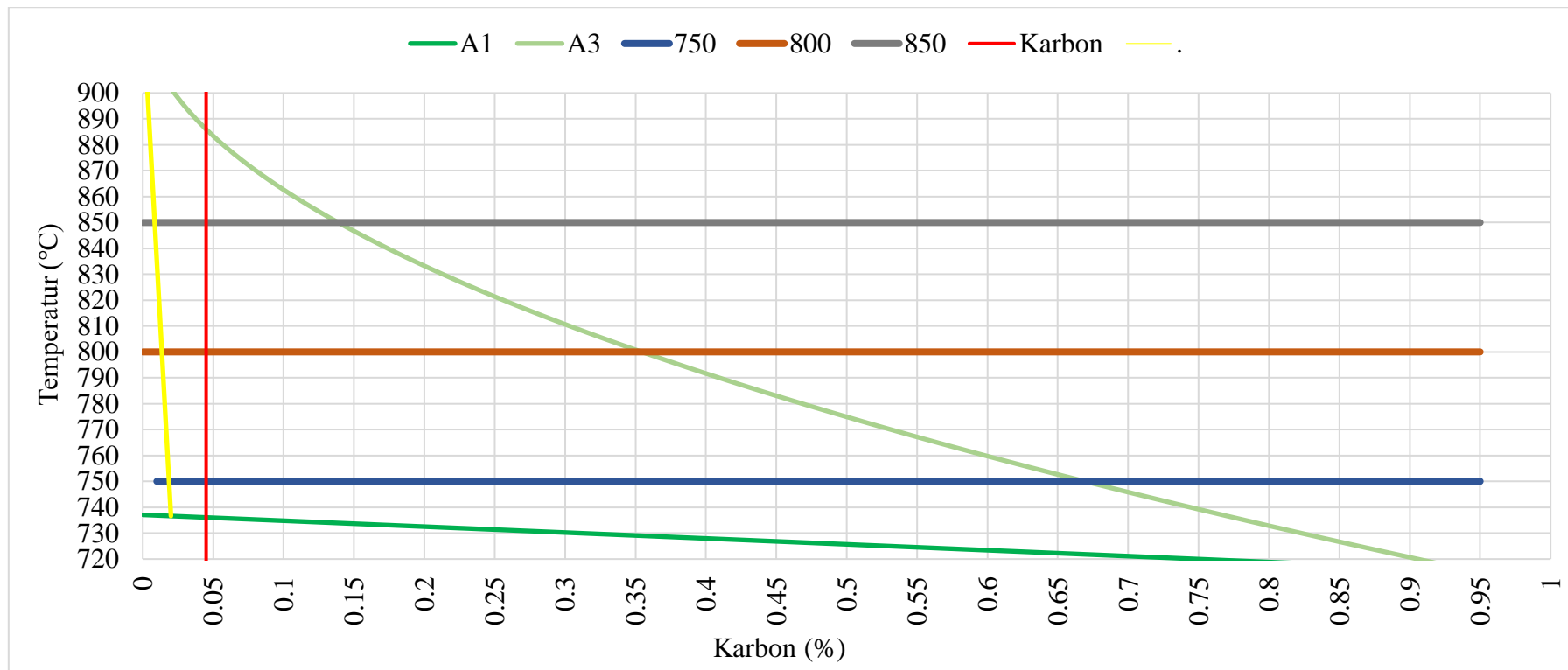
Tabel A. 2 Perhitungan Ukuran Butir

Kode Sampel	Garis 1	Jml Butir 1	Garis 2	Jml butir 2	Garis 3	Jml Butir 3	Garis 4	Jml Butir 4	Garis 5	Jml Butir 5	Ukuran Butir (μm)
NHT	164.73	12	181.72	10	212.01	9	181.48	11	201.42	11	18.0531
	Avg 1	13.73	Avg 2	18.17	Avg 3	23.56	Avg 4	16.50	Avg 5	18.31	
751	156.39	23	158.11	21	167.46	24	226.72	18	192.3	15	9.3443
	Avg 1	6.80	Avg 2	7.53	Avg 3	6.98	Avg 4	12.60	Avg 5	12.82	
752	160	21	169.41	34	172.47	21	188.47	20	193.41	22	7.8059
	Avg 1	7.62	Avg 2	4.98	Avg 3	8.21	Avg 4	9.42	Avg 5	8.79	
753	160	17	171.53	30	193.88	20	214.12	24	201.41	26	8.2983
	Avg 1	9.41	Avg 2	5.72	Avg 3	9.69	Avg 4	8.92	Avg 5	7.75	
801	193.22	11	210.86	18	224.08	18	230.69	15	221.39	14	14.5843
	Avg 1	17.57	Avg 2	11.71	Avg 3	12.45	Avg 4	15.38	Avg 5	15.81	
802	174.86	23	205.96	16	189.55	22	213.55	17	205.47	19	10.4934
	Avg 1	7.60	Avg 2	12.87	Avg 3	8.62	Avg 4	12.56	Avg 5	10.81	
803	167.02	23	192.24	23	203.27	26	211.84	20	214.78	19	9.0669
	Avg 1	7.26	Avg 2	8.36	Avg 3	7.82	Avg 4	10.59	Avg 5	11.30	
851	186.61	21	212.08	25	205.96	26	210.37	25	197.14	28	8.1493
	Avg 1	8.89	Avg 2	8.48	Avg 3	7.92	Avg 4	8.41	Avg 5	7.04	
852	158.94	18	197.63	19	221.88	19	206.45	22	218.45	21	10.1392
	Avg 1	8.83	Avg 2	10.40	Avg 3	11.68	Avg 4	9.38	Avg 5	10.40	
853	208.9	10	218.69	15	220.9	15	221.63	14	220.41	14	16.3541
	Avg 1	20.89	Avg 2	14.58	Avg 3	14.73	Avg 4	15.83	Avg 5	15.74	

3. Perhitungan Fasa Austenit Kestimbangan

Diketahui:

Kadar Karbon dari sampel = 0,045%



Gambar A. 2 Diagram Fe₃C.

Perhitungan:

a. Temperatur 750°C

$$C \text{ kiri} \Rightarrow \frac{\text{Panjang kiri 750}}{\text{Panjang kiri garis}} = \frac{C \text{ kiri 750}}{C \text{ kiri garis}}$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow \frac{8}{7,5} = \frac{x}{0,025}$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow x = \frac{8}{7,5} \times 0,025$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow x = 0,026666667$$

$$C \text{ kiri} = 0,045 - 0,026666667$$

$$C \text{ kiri} = 0,01833$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow \frac{\text{Panjang kanan 750}}{\text{Panjang kanan garis}} = \frac{C \text{ kanan 750}}{C \text{ kanan garis}}$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow \frac{172}{250} = \frac{x}{0,9}$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow x = \frac{172}{250} \times 0,9$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow x = 0,6192$$

$$C \text{ kanan} = 0,045 + 0,6192$$

$$C \text{ kanan} = 0,6642$$

$$\% \gamma = \frac{(\text{Kadar karbon} - C \text{ kiri})}{(C \text{ kanan} - C \text{ kiri})} \times 100\%$$

$$\% \gamma = \frac{(0,045 - 0,01833)}{(0,6642 - 0,01833)} \times 100\%$$

$$\% \gamma = 4,128819158\%$$

b. Temperatur 800°C

$$C \text{ kiri} \Rightarrow \frac{\text{Panjang kiri 800}}{\text{Panjang kiri garis}} = \frac{C \text{ kiri 800}}{C \text{ kiri garis}}$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow \frac{9,5}{7,5} = \frac{x}{0,025}$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow x = \frac{9,5}{7,5} \times 0,025$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow x = 0,031666667$$

$$C \text{ kiri} = 0,045 - 0,031666667$$

$$C \text{ kiri} = 0,01333$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow \frac{\text{Panjang kanan 800}}{\text{Panjang kanan garis}} = \frac{C \text{ kanan 800}}{C \text{ kanan garis}}$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow \frac{86}{250} = \frac{x}{0,9}$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow x = \frac{86}{250} \times 0,9$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow x = 0,3096$$

$$C \text{ kanan} = 0,045 + 0,3096$$

$$C \text{ kanan} = 0,3546$$

$$\% \gamma = \frac{(\text{Kadar karbon} - C \text{ kiri})}{(C \text{ kanan} - C \text{ kiri})} \times 100\%$$

$$\% \gamma = \frac{(0,045 - 0,01333)}{(0,3546 - 0,1333)} \times 100\%$$

$$\% \gamma = 9,279156085\%$$

c. Temperatur 850°C

$$C \text{ kiri} \Rightarrow \frac{\text{Panjang kiri 850}}{\text{Panjang kiri garis}} = \frac{C \text{ kiri 850}}{C \text{ kiri garis}}$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow \frac{11}{7,5} = \frac{x}{0,025}$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow x = \frac{11}{7,5} \times 0,025$$

$$C \text{ kiri} \Rightarrow x = 0,036666667$$

$$C \text{ kiri} = 0,045 - 0,036666667$$

$$C \text{ kiri} = 0,00833$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow \frac{\text{Panjang kanan 850}}{\text{Panjang kanan garis}} = \frac{C \text{ kanan 850}}{C \text{ kanan garis}}$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow \frac{26,5}{250} = \frac{x}{0,9}$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow x = \frac{26,5}{250} \times 0,9$$

$$C \text{ kanan} \Rightarrow x = 0,0954$$

$$C \text{ kanan} = 0,045 + 0,0956$$

$$C \text{ kanan} = 0,1404$$

$$\% \gamma = \frac{(\text{Kadar karbon-C kiri})}{(C \text{ kanan}-C \text{ kiri})} \times 100\%$$

$$\% \gamma = \frac{(0,045-0,00833)}{(0,1404-0,00833)} \times 100\%$$

$$\% \gamma = 27,76375568\%$$

4. Perhitungan Persamaan Eksponen Avrami

Persamaan JMAK:

$$\frac{f_{\gamma}}{f_e} = 1 - \exp(-Kt^n)$$

$$1 - \frac{f_{\gamma}}{f_e} = \exp(-Kt^n)$$

$$-\left(\frac{f_e - f_{\gamma}}{f_e}\right) = \exp(Kt^n)$$

$$\ln \frac{f_e}{f_e - f_{\gamma}} = Kt^n$$

$$\ln \ln \frac{f_e}{f_e - f_{\gamma}} = n \ln t + \ln K$$

$$\ln \left[\ln \left(1 / 1 - \frac{f_{\gamma}}{f_e} \right) \right] = n \ln t + \ln K$$

Dengan f_γ volume austenit dimana nilainya dapat dianggap sebanding dengan volume martensit yang terbentuk. f_ε merupakan volume austenit pada saat kesetimbangan, nilai tersebut dapat dicari dengan menggunakan *level rule* pada diagram Fe_3C . T merupakan waktu tahan pada pemanasan pada titik *intercritical annealing*. K merupakan konstanta kecepatan pertumbuhan austenit, n merupakan eksponen avrami. Melalui persamaan JMA yang telah dimodifikasi maka dapat dicari nilai konstanta kecepatan pertumbuhan butir (K) dan nilai eksponen avrami (n) yang dapat dari slope dan *intercept* yang dihasilkan dari persamaan linier hubungan antara $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{(1-f_\gamma/f_\varepsilon)} \right) \right]$ dengan $\ln t$. Setelah mendapat nilai $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{(1-f_\gamma/f_\varepsilon)} \right) \right]$ pada tiap temperatur dapat dicari nilai konstanta kecepatan pertumbuhan butir (K) dan nilai eksponen avrami (n). Dari grafik pada Gambar 4.13 didapat nilai regresi sumbu X dan Y seperti pada Tabel A.3 di bawah ini.

Tabel A. 3 Hubungan antara $\ln t$ dan $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{(1-f_\gamma/f_\varepsilon)} \right) \right]$ pada Temperatur 750°C.

Sumbu X		Sumbu Y	
t	$\ln t$	f_γ/f_ε	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{(1-f_\gamma/f_\varepsilon)} \right) \right]$
60 s	4,0943	$0,0265 / 0,0413 = 0,6414$	0,0251
300 s	5,7038	$0,0117 / 0,0413 = 0,2827$	-1,1021
900 s	6,8024	$0,0406 / 0,0413 = 0,9831$	1,4061

Tabel A. 4 Hubungan antara $\ln t$ dan $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$ pada Temperatur 800°C.

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right] = n \ln t + \ln K$$

Sumbu X		Sumbu Y	
t	$\ln t$	f_γ/f_e	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$
60 s	4,0943	0,0472 / 0,0928 = 0,5086	-0,3419
300 s	5,7038	0,0382 / 0,0928 = 0,4114	-0,6350
900 s	6,8024	0,0848 / 0,0928 = 0,9139	0,8969

Tabel A. 5 Hubungan antara $\ln t$ dan $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$ pada Temperatur 850°C.

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right] = n \ln t + \ln K$$

Sumbu X		Sumbu Y	
t	$\ln t$	f_γ/f_e	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-f_\gamma/f_e} \right) \right]$
60 s	4,0943	0,0843 / 0,2776 = 0,3035	-1,0170
300 s	5,7038	0,0428 / 0,2776 = 0,1540	-1,7885
900 s	6,8024	0,1720 / 0,2776 = 0,6196	-0,0340

Dari hasil regresi yang berupa garis linier, nilai *intercept* merupakan $\ln K$ dan *slope* merupakan nilai n . Dari data konstanta kecepatan pertumbuhan butir (K) dapat dicari besarnya energi aktivasi melalui persamaan Arrhenius:

$$K = A \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right)$$

Dimana A merupakan konstanta yang berhubungan dengan sistem, Q merupakan energi aktivasi, R merupakan konstanta gas dan bernilai konstan

sedangkan T adalah temperatur pemanasan *intercritical annealing* (dalam Kelvin). Secara logaritma persamaan arhenius dapat diubah menjadi:

$$\ln K = \ln A - \left(\frac{Q}{RT} \right)$$

Melalui persamaan arhenius maka dapat dicari nilai energi aktivasi (Q) dan konstanta (A) yang didapat dari slope dan *intercept* yang dihasilkan dari persamaan linier hubungan antara ln K dengan 1/T. Berikut ini hubungan antara ln K dengan 1/T berbagai temperatur. Dari hasil regresi yang berupa garis linier, nilai *intercept* merupakan ln A dan *slope* merupakan nilai $-Q/R$. Pada persamaan didapat persamaan regresi linier sebagai berikut:

$$Y = 0,0029x - 1,4946$$

$$\ln A = 0,0029 \text{ maka nilai } A = 1,002904209$$

$$-Q/R = -1,4946$$

$$Q/R = 1,4946, \text{ jika nilai } R = 8,3145 \text{ J/molK}$$

$$Q = 12,4268517 \text{ J/mol}$$

Dari perhitungan persamaan diatas didapat nilai energi aktivasi (Q) yang didapat sebesar 12,4268517 J/mol dan konstanta (A) sebesar 1,002904209

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

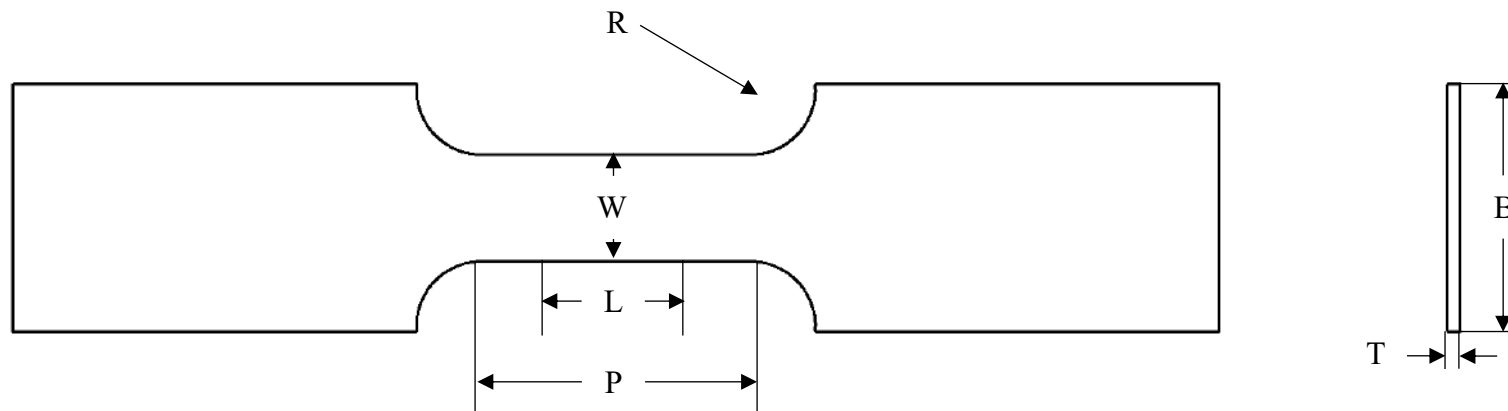
Lampiran B. Data Penelitian

1. Hasil Uji Komposisi Sampel

Tabel B. 1 Komposisi Kmia Baja SPHC.

Kode Sampel	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	B	Ti
851	0.0373	0.008	0.205	0.0146	0.0096	0.035	0.003	0.007	0.004	0.008	0	0.001	0	0.002	0	0.001
852	0.0388	0.005	0.193	0.0123	0.0083	0.037	0.003	0.006	0.003	0.005	0	0	0	0.002	0	0.001
853	0.05	0.01	0.26	0.009	0.009	0.056	0.004	0	0	0	0.006	0	0.002	0	0	0
801	0.05	0.02	0.23	0.007	0.007	0.034	0.005	0	0	0	0.007	0	0.001	0	0	0
802	0.042	0.011	0.184	0.012	0.011	0.04	0.006	0.047	0.027	0.035	0.002	0	0.001	0	0	0
803	0.06	0.013	0.175	0.005	0.005	0.061	0.003	0.014	0.014	0.011	0.002	0.005	0.003	0.001	0	0.001
751	0.06	0.0109	0.1954	0.0148	0.0052	0.064	0.002	0.015	0.012	0.004	0.003	0.005	0.003	0	0	0.001
752	0.042	0.011	0.185	0.013	0.0056	0.042	0.006	0.063	0.028	0.041	0.002	0	0.003	0	0	0
753	0.032	0.012	0.182	0.012	0.0097	0.04	0.008	0.056	0.032	0.039	0.004	0	0.002	0	0	0
NHT	0.042	0.01	0.186	0.01	0.015	0.044	0.006	0.055	0.027	0.031	0.003	0	0.002	0	0	0

2. Bentuk Spesimen Uji Tarik sesuai Standar JIS Z 2201 No. 5



Gambar B. 1 Skema Spesimen uji Tarik Standar JIS Z 2201 No. 5.

Keterangan:

W : Width (25 mm)

P : Pararel length (60 mm)

R : Radius of fillet (15 min)

T : Thickness (3 mm)

W : Width of gripped (30 mm)

L : Gauge length (50 mm)



KRAKATAU STEEL

**LABORATORIUM UJI KIMIA & MEKANIK
PT KRAKATAU STEEL (PERSERO) Tbk.**

Jl. Coil Kompleks PT Krakatau Steel (Persero) Tbk.
Cilegon – Banten 42435
Telp. (0254) 371274, 372775, 372686

CERTIFICATE OF MECHANICAL TEST


NO.: 027/LAB-HSM/XII/2022

3. Hasil Pengujian Tarik

Nomor Order	: 027/LAB/XII/2022	Tanggal Laporan	: 05 – 12 – 2022
Bentuk/Wujud	: PLAT	Nama Mesin/Alat	: Schenck Trebel (LM1-UBM-602)
Nama Pelanggan	: Imam Nur Fathoni		: Caliper Digimatic (LM1-ZCV-2201)
Alamat Pelanggan	: Fakultas Teknik Untirta, Kota Cilegon - Banten		: Micrometer Digimatic (LM1-ZMM-1501)
Tanggal Penerimaan	: 01 – 12 – 2022	Metode	: JIS Z 2241 : 2011
Tanggal Pengujian	: 02 – 12 – 2022	Halaman	: 01/01

TEST NO	SHAPE OF TEST PIECE	HEAT NO	DIMENSION					TENSILE TEST			DIR
			T	W	So	Lo	L1	YS	TS	EL	
750-1	PLATE	-	3.08	25.23	78	50	61.53	450	592	23	-
750-5	PLATE	-	3.05	25.25	77	50	57.23	467	636	14	-
750-15	PLATE	-	3.12	25.13	78	50	61.49	434	625	23	-
800-1	PLATE	-	3.04	25.10	76	50	61.39	432	590	23	-
800-5	PLATE	-	3.12	25.31	79	50	61.27	418	572	23	-
800-15	PLATE	-	3.06	25.15	77	50	61.40	416	544	23	-
850-1	PLATE	-	3.03	25.29	77	50	57.27	417	548	15	-
850-5	PLATE	-	3.16	24.91	79	50	62.35	394	521	25	-
850-15	PLATE	-	3.16	25.12	79	50	61.58	365	479	23	-
NHT	PLATE	-	3.21	25.02	80	50	73.51	219	324	47	-

Laboratorium Uji Mekanik HSM



Endang Supriyadi
PLT. Engineer

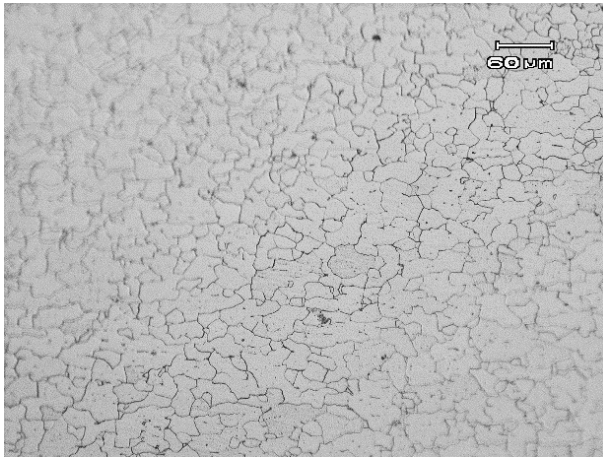
Note :

- T : Average thickness of test piece (mm)
- W : Average Width of test piece (mm)
- So : Initial Cross Section of Area (mm²)
- Lo : Gauge Length (mm)
- L₁ : Final Length of the specimen (mm)
- YS : Yield Strength (N/mm²)
- TS : Tensile Strength (N/mm²)
- EL : Percentage of Elongation (%)
- Dir (direction) : Tr (Transversal), L (Longitudinal), D (Diagonal)

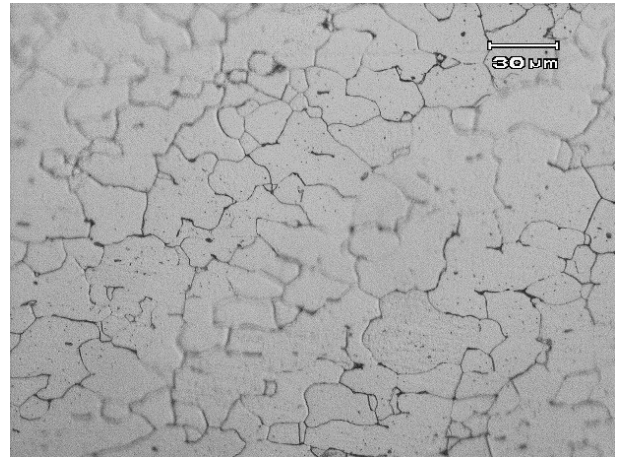
Peringatan : - Laporan hasil pengujian/analisa Ini tidak boleh digandakan tanpa seizin Laboratorium
- Hasil pengujian/analisa ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji

RS/QA00/039, Issue No.: 1, Issue Date : 04/03/2021

4. Hasil Pengamatan Metalografi Sampel Sebelum Proses

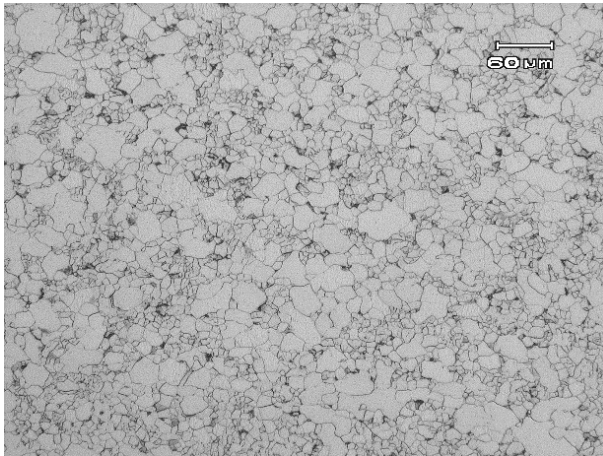


Gambar B. 2 Sampel NHT 200×.

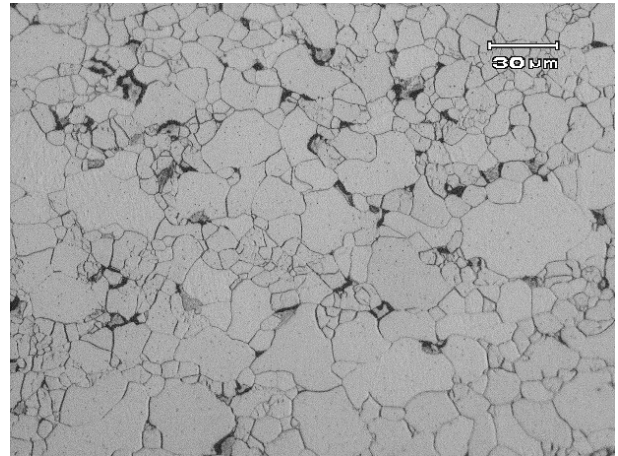


Gambar B. 3 Sampel NHT 500×.

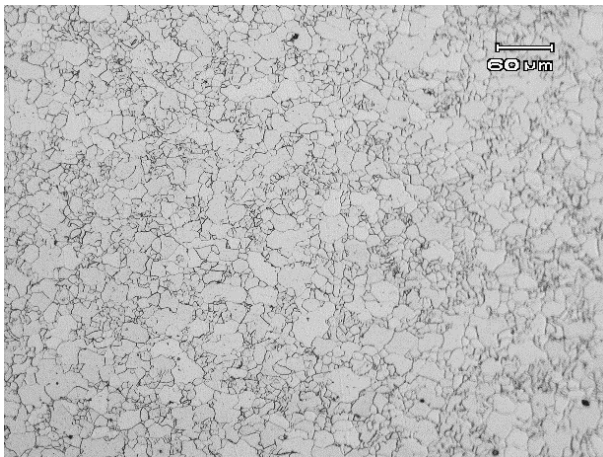
5. Hasil Pengamatan Metalografi Sampel Setelah Proses



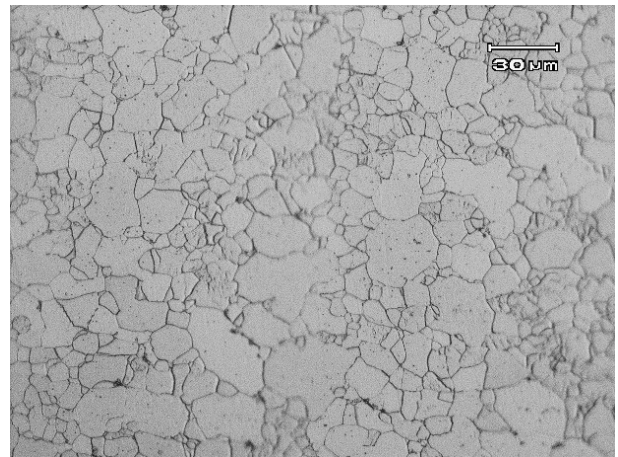
Gambar B. 4 Sampel 751 200×.



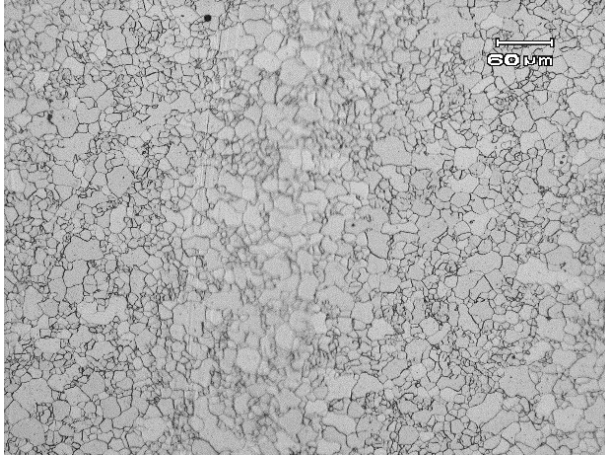
Gambar B. 5 Sampel 751 500×.



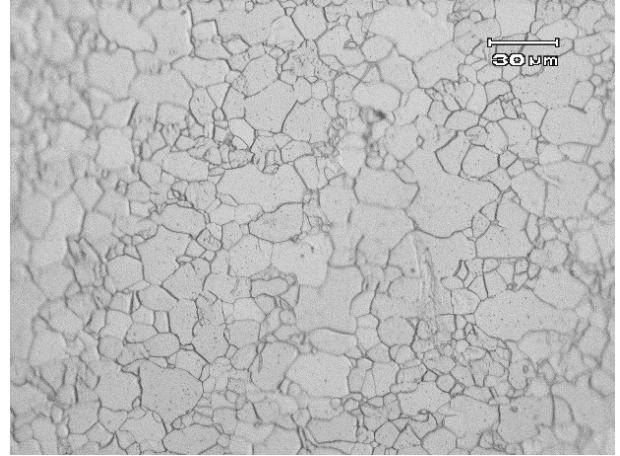
Gambar B. 6 Sampel 752 200×.



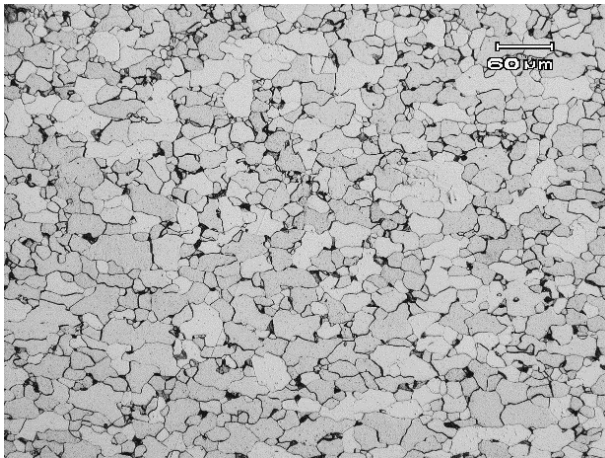
Gambar B. 7 Sampel 752 500×.



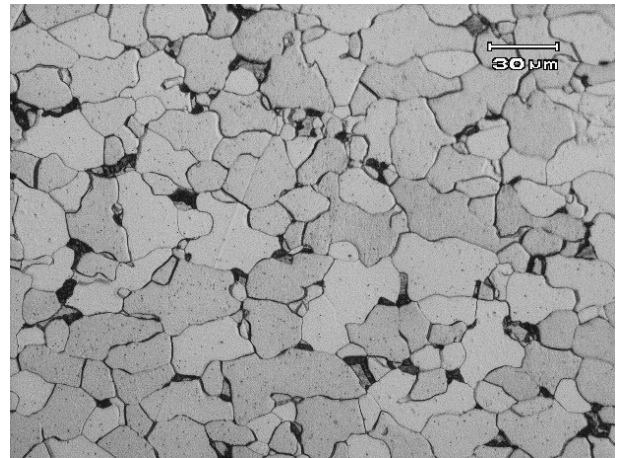
Gambar B. 8 Sampel 753 200×.



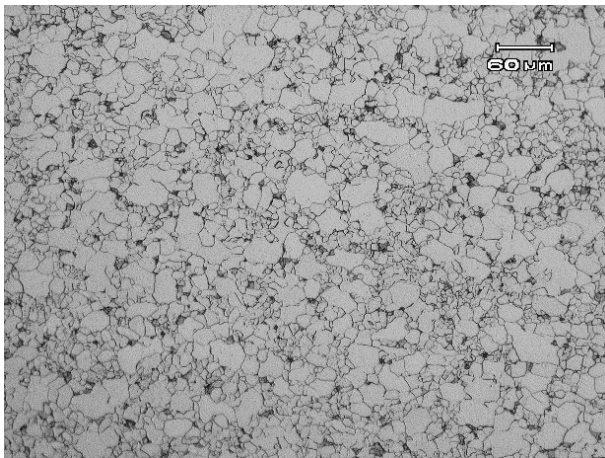
Gambar B. 9 Sampel 753 500×.



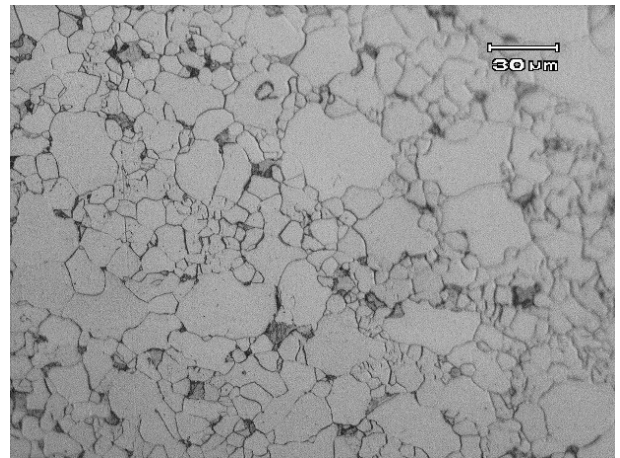
Gambar B. 10 Sampel 801 200×.



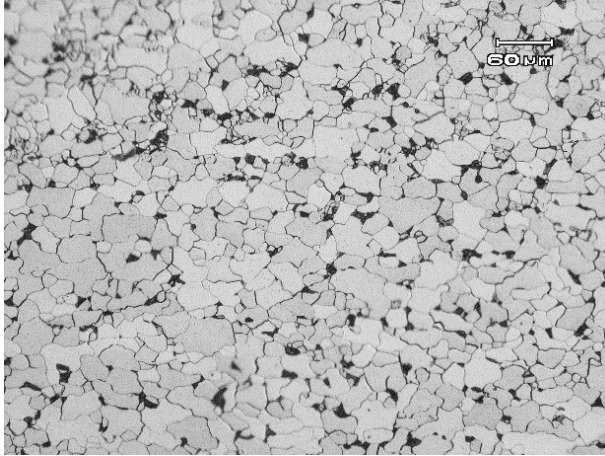
Gambar B. 11 Sampel 801 500×.



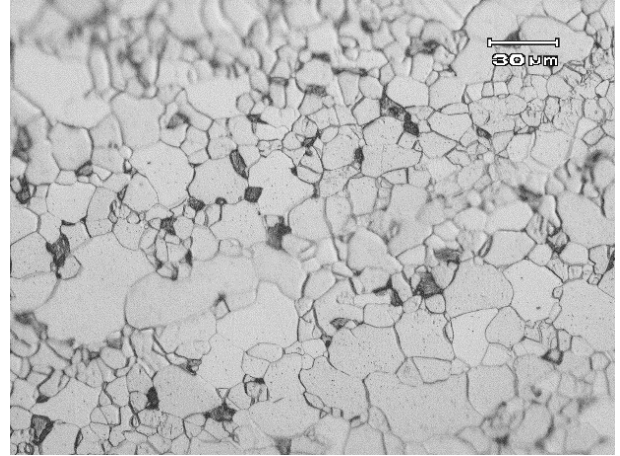
Gambar B. 12 Sampel 802 200×.



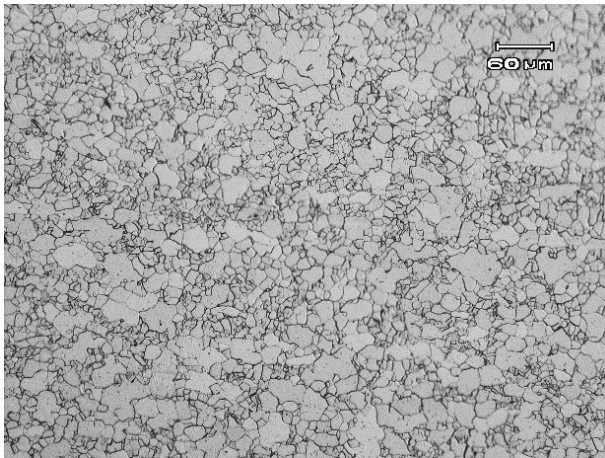
Gambar B. 13 Sampel 802 500×.



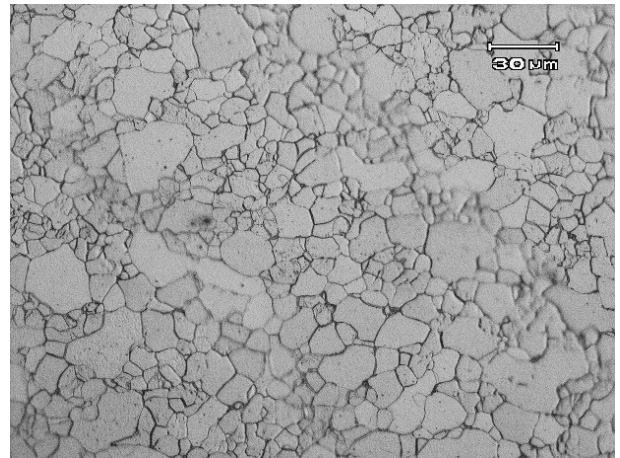
Gambar B. 14 Sampel 803 200×.



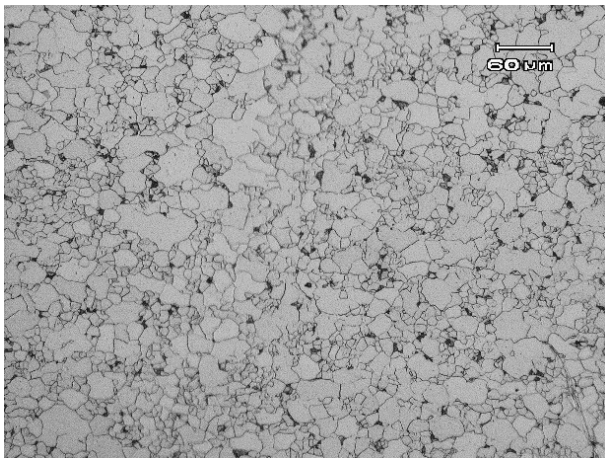
Gambar B. 15 Sampel 803 500×.



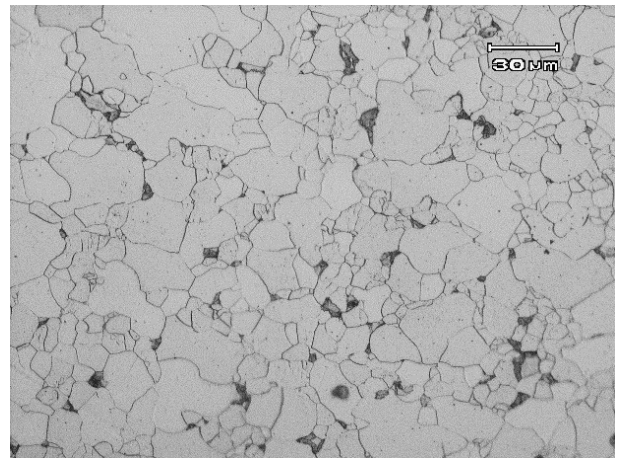
Gambar B. 16 Sampel 851 200×.



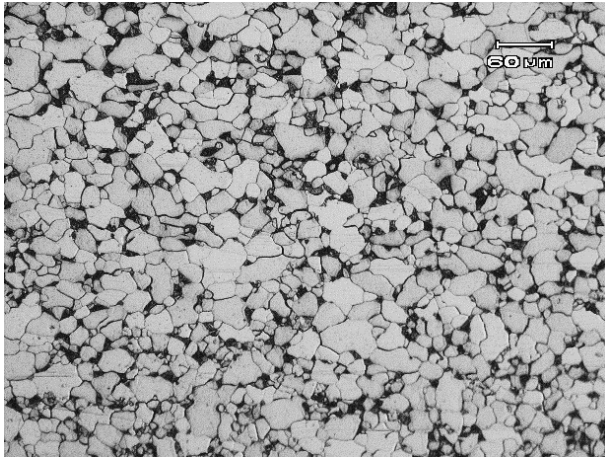
Gambar B. 17 Sampel 851 500×.



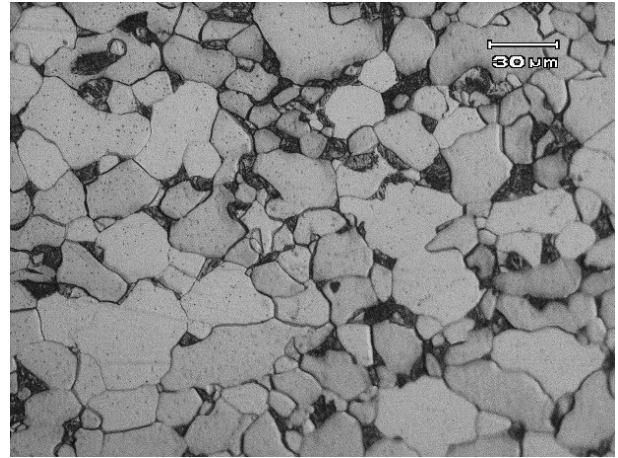
Gambar B. 18 Sampel 852 200×.



Gambar B. 19 Sampel 852 500×.

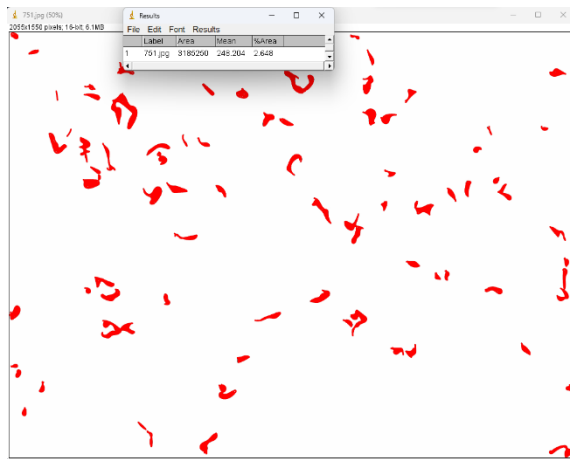


Gambar B. 20 Sampel 853 200×.

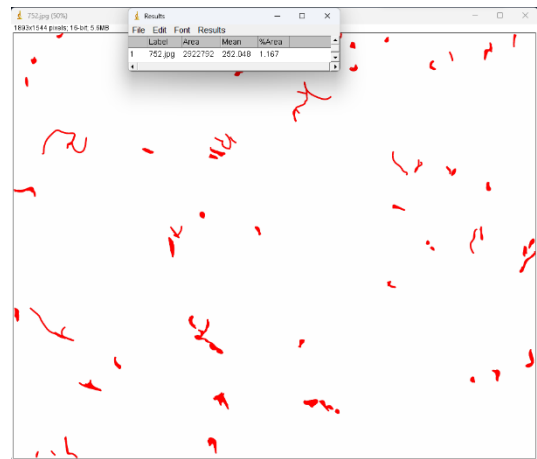


Gambar B. 21 Sampel 853 500×.

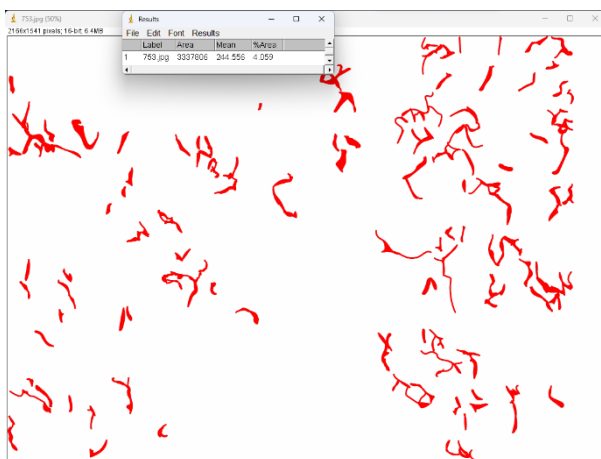
6. Hasil Perhitungan Otomatis Menggunakan *ImageJ*



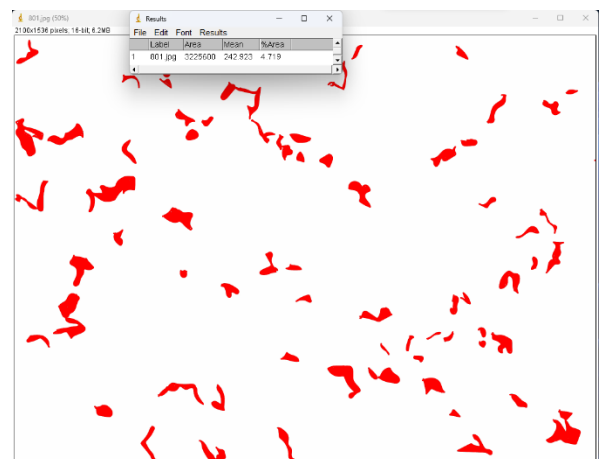
Gambar B. 22 Fraksi Martensit 751.



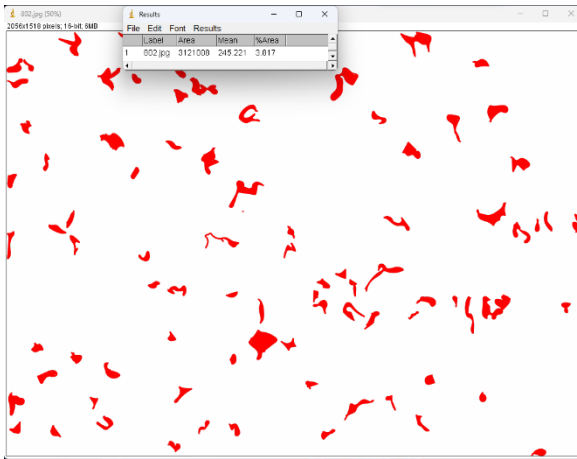
Gambar B. 23 Fraksi Martensit 752.



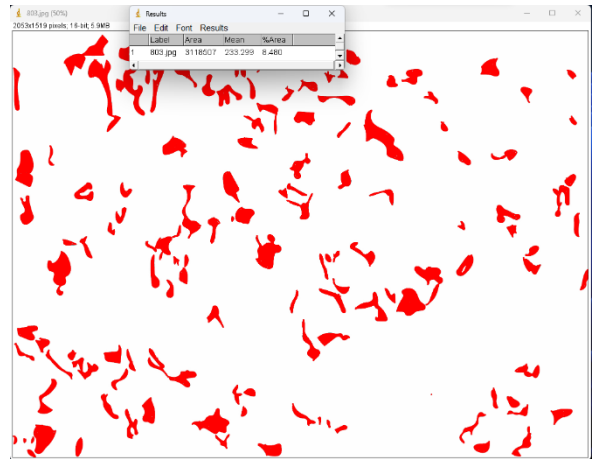
Gambar B. 24 Fraksi Martensit 753.



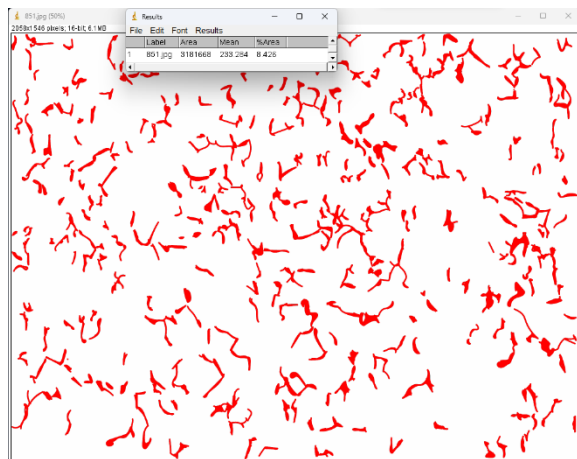
Gambar B. 25 Fraksi Martensit 801.



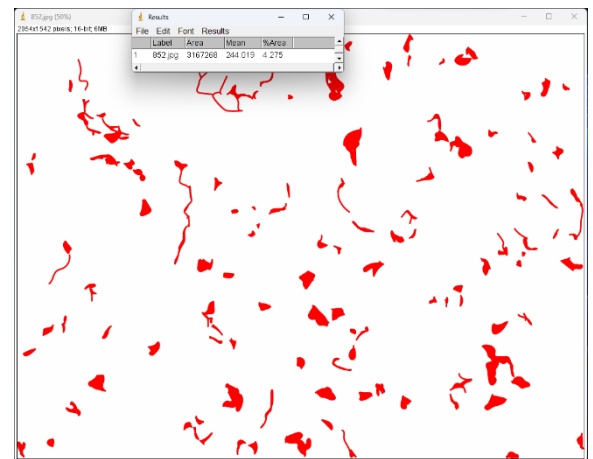
Gambar B. 26 Fraksi Martensit 802.



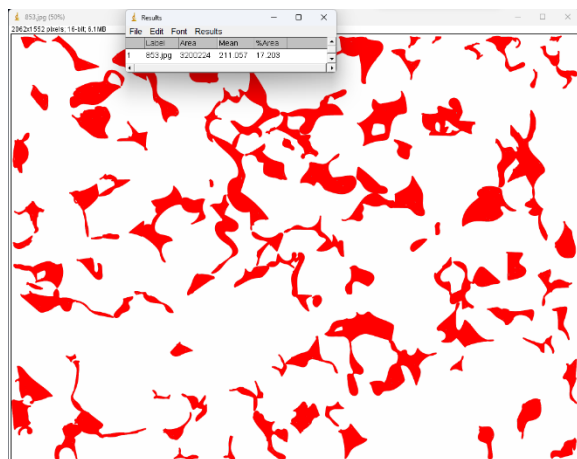
Gambar B. 27 Fraksi Martensit 803.



Gambar B. 28 Fraksi Martensit 851.



Gambar B. 29 Fraksi Martensit 852.



Gambar B. 30 Fraksi Martensit 853.

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

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 Grinding Polishing.



Gambar C. 7 Mesin Potong.



Gambar C. 8 Mikrometer Skrup.



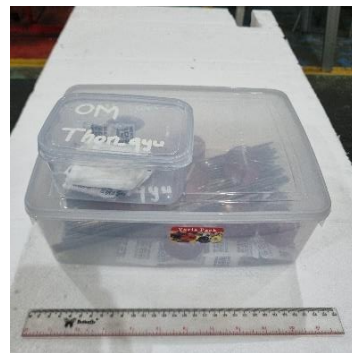
Gambar C. 9 Mikroskop Optik.



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.



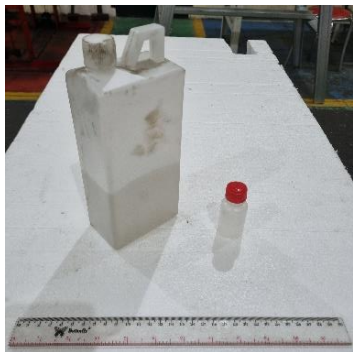
Gambar C. 16 Baja SPHC.



Gambar C. 17 Cleanser.



Gambar C. 18 Bahan Nital.



Gambar C. 19 Resin dan Hardener.