

Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) Terhadap Sifat Mekanik, Komposisi Kimia Dan Struktur Mikro Pada Pipa Baja Karbon SA-106 B Dengan Kombinasi Pengelasan SMAW-GTAW

AMAL ALL GAZALI

D022181002



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) Terhadap Sifat Mekanik, Komposisi Kimia Dan Struktur Mikro Pada Pipa Baja Karbon SA-106 B Dengan Kombinasi Pengelasan SMAW-GTAW

AMAL ALL GAZALI

D022181002



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

JUDUL

Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (Pwht) Terhadap Sifat Mekanik, Komposisi Kimia Dan Struktur Mikro Pada Pipa Baja Karbon Sa-106 B Dengan Kombinasi Pengelasan Smaw-Gtaw

AMAL ALL GAZALI

D022181002



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

PENGAJUAN TESIS

Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) Terhadap Sifat Mekanik, Komposisi Kimia Dan Struktur Mikro Pada Pipa Baja Karbon SA-106 B Dengan Kombinasi Pengelasan SMAW-GTAW

Tesis

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

AMAL ALL GAZALI

D022181002

Kepada

**PROGRAM PASCA SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

LEMBAR PENGESAHAN

**Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) Terhadap Sifat Mekanik,
Komposisi Kimia Dan Struktur Mikro Pada Pipa Baja Karbon SA-106 B
Dengan Kombinasi Pengelasan SMAW-GTAW**

Disusun dan diajukan oleh

AMAL ALL GAZALI

D022181002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 16 Agustus 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT
NIP. 195207061978121001

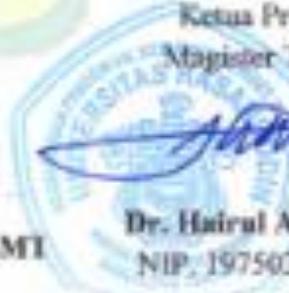
Dr. Muhammad Syahid, ST., MT
NIP. 197707072005111001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT
NIP. 197309262000121002



Dr. Hairul Arsyad, ST., MT
NIP. 197503222002121001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "Pengaruh *post weld heat treatment* (PWHT) terhadap sifat mekanik, komposisi kimia dan struktur mikro pada pipa baja karbon SA-106 B dengan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, ST., MT sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Muhammad Syahid, ST., MT sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal (Amal Ali Gazali, Volume 5, Halaman 1-6, dan DOI ISSN 2615-5109) sebagai artikel dengan judul "Pengaruh *post weld heat treatment* (PWHT) terhadap sifat mekanik, komposisi kimia dan struktur mikro pada pipa baja karbon SA-106 B dengan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 16 Agustus 2022



Amal Ali Gazali
D022181002

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, penulis panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wata'ala atas berkah dan rahmat-Nya sehingga penyusun laporan penelitian ini dapat terselesaikan. Adapun tesis ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Pasca Sarjana Fakultas Teknik Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin (UNHAS).

Pada kesempatan ini tidak lupa diucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, ST., MT. selaku pembimbing I, dan Bapak Dr. Muhammad Syahid, ST., MT. selaku pembimbing II yang telah banyak meluangkan waktu dan pikiran untuk membimbing dan mengarahkan dalam menyelesaikan tesis ini.
2. Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, ST., MT. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.
3. Bapak Dr. Eng Ir. Jalaluddin, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
4. Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. selaku ketua program Studi (KPS) Teknik Mesin Universitas Hasanuddin Makassar.
5. Kepala Laboratorium Metalurgy Fisik Bapak Dr. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT yang telah memberikan ijin penggunaan fasilitas laboratorium sebagai tempat penelitian.
6. Segenap dosen dan pegawai Pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan bantuannya selama perkuliahan sampai penyelesaian tesis ini.
7. Sifitas kampus POLITEKNIK ATI Makassar, khususnya ketua Jurusan Teknik Manufaktur Industri Agro Bapak Dr. Jufri ST., MT dan Bapak Dr. Muhammad Setiawan Sukardi, ST., MT selaku kepala Laboratorium Material.
8. Kepada kedua Orang Tua, Bahri (bapak), Juhra (mama/almarhum) dan Putri Amalia, S.ST (adek) atas jerih payah dan tak henti-hentinya memberikan doa restu dan dukungan baik moril maupun materi sehingga tesis ini dapat terselesaikan.

9. Keluarga baru penulis, Uwais Amal Alghazali (anak I laki-laki), Izzah Amal Alghazali (anak II perempuan) dan Mustika Sari A.Md (istri), yang selalu mengingatkan dan memberi dukungannya dalam menyelesaikan pendidikan.
10. Keluarga besar Mabe' Parenreng yang telah mendukung dan memberi motivasi untuk melanjutkan studi Pascasarjana, terkhusus dukungan dan motivasi dari yang biasa kami sapa Jendral atau Dr. Syarifuddin Mabe' Parenreng, ST., MT.
11. Kepada rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin Pasca Sarjana angkatan 2018 Universitas Hasanuddin Makassar terkhusus kepada Pengawas Spesialis Pesawat Uap Bejana Tekanan Ir. Miswar, ST., MT yang telah membantu dalam penelitian dan penulisan tesis.
12. Kepada teman-teman instruktur di POLITEKNIK ATI Makassar yang telah membantu reparasi spesimen penelitian ini. Terkhusus kepada Fahri, ST dan Muhammad Addar, ST., MT.
13. Kepada PT. WASA MITRA ENGINEERING yang telah memberikan dukungan penelitian, terkhusus kepada bapak Pison, ST selaku WI.

Penulis menyadari bahwa naskah tesis ini, masih mempunyai banyak kekurangan olehnya itu segala kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan demi perbaikan isi tesis ini. Akhir kata semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua:

Gowa, 16 Agustus 2022

Penulis
Amal All Gazali

ABSTRAK

AMAL ALL GAZALI. **Pengaruh *post weld heat treatment* (PWHT) terhadap sifat mekanik, komposisi kimia dan struktur mikro pada pipa baja karbon SA-106 B dengan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW** (dibimbing oleh Onny Sutresman dan Muhammad Syahid).

Pengelasan merupakan salah satu faktor keberhasilan perusahaan dalam penyambungan pipa bertekanan tinggi pada proyek PLTU (pembangkit listrik tenaga uap) dengan menggunakan salah satu metode kombinasi pengelasan SMAW-GTAW karena dapat dilakukan berbagai posisi dan lokasi. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan variable temperatur PWHT terhadap sifat mekanik, struktur mikro, dan komposisi kimia. Material yang digunakan adalah pipa baja karbon SA-106 B dengan posisi pengelasan 6G yang dilakukan pada kombinasi pengelasan SMAW dengan elektroda E9016-G dan pengelasan GTAW dengan elektroda ER90S. PWHT dilakukan pada temperatur 650 °C dan 850 °C dengan waktu penahanan selama 60 menit. Tingginya temperatur PWHT akan mempengaruhi kekuatan tarik, impak, kekerasan, komposisi kimia dan struktur mikro. Dalam penelitian ini didapatkan bahwa semakin tinggi temperatur PWHT maka akan menurunnya kekuatan tarik, kekerasan, komposisi kimia pada kadar karbon dan struktur mikro fasa *pearlite* (etsa gelap). Tingginya temperatur PWHT akan menaikkan energi impak, regangan, dan fasa ferrite akan mengalami pertumbuhan struktur butir *ferrite* (etsa terang). Keseragaman butir pada pengamatan struktur mikro didapatkan di daerah HAZ pada PWHT temperatur 850 °C. Dalam penelitian ini, PWHT yang direkomendasikan pada PWHT temperatur 850 °C dengan waktu penahanan selama 60 menit.

Kata kunci: komposisi kimia, sifat mekanik, struktur mikro, PWHT

ABSTRAK

AMAL ALL GAZALI. **Effect of post weld heat treatment (PWHT) on mechanical characteristics, chemical composition, and microstructure on carbon steel pipe SA-106 B with smaw-gtaw welding combination** (dibimbing oleh Onny Sutresman dan Muhammad Syahid).

Welding is one of the company's success factors in connecting high-pressure pipes in the PLTU (steam power plant) project using one of the SMAW-GTAW welding combination methods because it can be carried out in various positions and locations. This research uses an experimental method with PWHT temperature variable on mechanical properties, microstructure, and chemical composition. The material used is SA-106 B carbon steel pipe with a 6G welding position which is carried out in a combination of SMAW welding with E9016-G electrodes and GTAW welding with ER90S electrodes. PWHT was carried out at 650 °C and 850 °C with a holding time of 60 minutes. The high temperature of PWHT will affect the tensile strength, impact, hardness, chemical composition, and microstructure. This study found that the higher the PWHT temperature, the lower the tensile strength, hardness, chemical composition of the carbon content, and the microstructure of the pearlite phase (dark etching). The high temperature of PWHT will increase the impact energy and strain, and the ferrite phase will experience the growth of ferrite grain structure (bright etching). Grain uniformity in observing the microstructure was obtained in the HAZ region at a PWHT temperature of 850 °C. In this study, the recommended PWHT was at a temperature of 850 °C with a holding time of 60 minutes.

Keyword: chemical composition, mechanical properties, microstructure, PWHT

DAFTAR ISI

JUDUL.....	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRAK.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan masalah	2
1.3 Tujuan penelitian.....	3
1.4 Batasan masalah	3
1.4.1 Variabel bebas	3
1.4.2 Variabel kontrol	3
1.4.3 Variabel terikat	4
1.5 Manfaat penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Kombinasi pengelasan.....	6
2.1.1 Pengelasan SMAW	6
2.1.2 Pengelasan GTAW	14
2.2 Material.....	17
2.2.1 Pipa baja karbon SA-106 B.....	17
2.2.2 Elektroda E9016-G.....	18
2.2.3 Elektroda ER90S.....	18
2.3 Post weld heat treatment	19
2.3.1 Annealing	20
2.3.2 Proses annealing dan stress relief	21
2.3.3 Normalizing	21
2.3.4 Spheroidisasi.....	22
2.3.5 Hardening.....	22
2.4 Sifat mekanik.....	24
2.4.1 Kekuatan tarik	24
2.4.2 Kekerasan	27

2.4.3 Impak.....	29
2.5 Struktur mikro	32
2.5.1 Diagram fasa Fe-Fe ₃ C.....	33
2.5.2 Konstituen mikro dalam baja.....	41
2.6 Pengaruh PWHT terhadap sifat mekanik.....	53
BAB III METODE PENELITIAN	67
3.1 Diagram alir penelitian	67
3.2 Alat dan bahan	60
3.2.1 Alat	60
3.2.2 Bahan	60
3.3 Tempat penelitian.....	60
3.4 Proses pengelasan	61
3.5 Post weld heat treatment (PWHT)	62
3.6 Sifat mekanik.....	62
3.6.1 Pengujian tarik	63
3.6.2 Pengujian dampak.....	63
3.6.3 Pengujian kekerasan.....	64
3.7 Struktur Mikro	64
3.8 Komposisi kimia	65
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	75
4.1 Data pipa baja karbon SA-106 B	75
4.2 Pengaruh PWHT terhadap kekuatan tarik	67
4.3 Pengaruh PWHT terhadap kekerasan (HV).....	70
4.4 Pengaruh PWHT terhadap energi dampak.....	72
4.5 Pengaruh PWHT terhadap komposisi kimia	73
4.6 Hasil pengamatan struktur mikro	75
4.6.1 Pengaruh PWHT terhadap struktur mikro <i>Base Metal</i>	79
4.6.2 Pengaruh PWHT terhadap struktur mikro HAZ SMAW dan GTAW	81
4.6.3 Pengaruh PWHT terhadap struktur mikro WM SMAW dan GTAW	81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	84
5.1 Kesimpulan	84
5.2 Saran.....	84
BAB VI DAFTAR PUSTAKA	96
DAFTAR LAMPIRAN	88
Lampiran I Surat Permohonan Ijin Penelitian	88
Lampiran II WPS & PQR (Welding Procedure Specification and Procedure Qualifikation Record).....	89
Lampiran III Proses pengelasan pipa baja karbon SA-106 B	90
Lampiran IV Proses pemotongan pipa baja karbon SA-106 B	91

Lampiran V Spesimen struktur mikro.....	92
Lampiran VI Spesimen dan hasil pengujian komposisi kimia	93
Lampiran VII Hasil pengujian impak	95
Lampiran VIII Spesimen hasil pengujian tarik.....	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis Elektroda tertutup (Jenney & O'Brien, 1991).....	7
Gambar 2. 2 Skema Pengelasan SMAW (Jenney & O'Brien, 1991).....	10
Gambar 2. 3 Skema Pengelasan Busur Logam Terlindung (Jenney & O'Brien, 1991)....	13
Gambar 2. 4 Skema pengelasa GTAW (Jenney & O'Brien, 1991).....	16
Gambar 2. 5 Pengaruh laju pendinginan terhadap struktur mikro (Campbell, 2008)	20
Gambar 2. 6 Rentang perlakuan panas baja (Campbell, 2008)	23
Gambar 2. 7 Kurva tegangan regangan (Campbell, 2008).....	26
Gambar 2. 8 Hardness test (Campbell, 2008)	28
Gambar 2. 9 Struktur Mikro baja AISI 1080, (a) Full pearlite (b) Full bainite (c) Full martensite (d) Pearlite, bainite dan martensite. (Bramfitt & Benschoter, 2003)	33
Gambar 2. 10 Diagram fase besi-karbon. Garis padat menunjukkan Fe-Fe ₃	35
Gambar 2. 11 Diagram Fasa Eutektoid Fe-Fe ₃ C % karbon. (Bramfitt & Benschoter, 2003)	36
Gambar 2. 12 Fasa FCC dan BCC (Bramfitt & Benschoter, 2003)	39
Gambar 2. 13 (a) Baja AISI/SAE 1040 hypoeutektoid menunjukkan ferit dan perlit (b) Paduan biner hipereutektoid Fe-1,4% C. (Bramfitt & Benschoter, 2003)	40
Gambar 2. 14 Struktur mikro ferit dalam baja 0,02% C. (Bramfitt & Benschoter, 2003)	41
Gambar 2. 15 (a) Ferrite Widmanstätten baja AISI/SAE 1025 berbutir kasar, (b) Ferrite proeutektoid pada batas butir austenit baja AISI/SAE 1060 yang didinginkan oli, (c) Acicular ferrite berinti pada batas butir austenite baja AISI/SAE 1060. Matriks adalah martensit 3 2%. (d) Sementit (panah) pada batas butir ferit dalam baja lembaran 0.04% C anil batch. (Bramfitt & Benschoter, 2003)	43
Gambar 2. 16 (a) Sementite proeutektoid (fase etsa putih) pada austenit sebelumnya batas butir dalam paduan biner Fe-1,4% C. Matriks adalah Pearlite (b) Pearlite kasar dalam baja eutektoid AISI/SAE 1080 (c) Scanning electron microscope (SEM) micrograph of pearlite. (Bramfitt & Benschoter, 2003).....	44
Gambar 2. 17 (a) Paerlite halus dalam baja AISI/SAE 1080. (b) Pearlite dalam water-quenched Baja AISI/SAE 1060. Matriks adalah martensit. (c) Perlit (gelap) berasosiasi dengan ferit (terang) dalam pendingin udara Baja AISI/SAE 1040. (Bramfitt & Benschoter, 2003).....	45
Gambar 2. 18 (a) Lath martensit dalam paduan biner Fe-0,2% C. (b) Martensit dalam baja ASTM A 514 (0,13% C, 0,62% Mn, 0,29% Si, 0,5% Mo, 0,054% Al, (c) Pelat martensit dalam baja AISI/SAE 1095 (0,97% C, 1,05% Mn, 0,25% Si, dan 0,20% Cr). (Bramfitt & Benschoter, 2003).....	47
Gambar 2. 19 (a) Plate martensit menunjukkan morfologi pelepah yang khas (panah) (b) Struktur kristal tetragonal yang berpusat pada tubuh dari martensit dalam paduan besi karbon (Bramfitt & Benschoter, 2003).....	48
Gambar 2. 20 (a) Martensit dalam baja tahan karat SAE 410. (b) Martensit yang ditempa penuh dalam 0,2% C, 5% Ni, dan 1% Mn baja. (Bramfitt & Benschoter, 2003)	49
Gambar 2. 21 (a) Struktur mikro bainitik dalam baja 0,3% C, 0,8% Mn, 0,26% Si, 1,05% Cr, 1,07% Mo, dan 0,25% V. (b) Bainitic microstructure in a low-carbon alloy steel (0.3% C, 0.62% Mn, 0.2% Si, 2.73% Ni, 0.23% Cr, and 0.5% Mo). (Bramfitt & Benschoter, 2003).....	49
Gambar 2. 22 (a) Upper bainite, (b) Lower bainite, (c) Granular bainite. (Bramfitt & Benschoter, 2003).....	52
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian Selesai	59
Gambar 3. 2 V-groove kombinasi pengelasan SMAW-GTAW. (Smaw & Gr, n.d.)	61
Gambar 3. 3 Proses kombinasi pengelasan posisi 6G	62
Gambar 3. 4 Spesimen pengujian tarik (ASTM Standard E8/E8M-13a, 2013)	63
Gambar 3. 5 Spesimen pengujian impak (ASTM E 23-12c, 2012).....	64
Gambar 4. 1 V-groove kombinasi pengelasan SMAW-GTAW	75
Gambar 4. 2 Pengaruh PWHT pada kekuatan tarik kombinasi pengelasan SMAW-GTAW	69
Gambar 4. 3 Pengaruh PWHT pada regangan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW ...	69

Gambar 4. 4 Pengaruh PWHT pada kekerasan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW..	71
Gambar 4. 5 Pengaruh PWHT pada energi impact kombinasi pengelasan SMAW-GTAW	73
Gambar 4. 6 Pengaruh PWHT terhadap komposisi kimia BM.....	74
Gambar 4. 7 Pengaruh PWHT terhadap komposisi kimia WM SMAW	74
Gambar 4. 8 Pengaruh PWHT terhadap komposisi kimia WM GTAW.....	75
Gambar 4. 9 Struktur mikro tanpa PWHT (a) BM, (b) HAZ SMAW, (c) HAZ GTAW, (d) WM SMAW dan (e) WM GTAW	76
Gambar 4. 10 Struktur mikro PWHT temperatur 650 °C (a) BM, (b) HAZ SMAW, (c) HAZ GTAW, (d) WM SMAW dan (e) WM GTAW.....	77
Gambar 4. 11 Struktur mikro PWHT temperatur 850 °C (a) BM, (b) HAZ SMAW, (c) HAZ GTAW, (d) WM SMAW, (e) WM GTAW.....	78
Gambar 4. 12 Pengaruh PWHT terhadap mikrostruktur BM (a) BM tanpa PWHT (b) BM PWHT 650 °C dan (c) BM PWHT 850 °C	79
Gambar 4. 13 Pengaruh PWHT terhadap struktur mikro HAZ SMAW (a) tanpa PWHT, (b) PWHT 650 °C dan (c) PWHT 850 °C.....	79
Gambar 4. 14 Pengaruh PWHT terhadap struktur mikro HAZ GTAW (a) tanpa PWHT (b) PWHT 650 °C dan (c) PWHT 850 °C.....	80
Gambar 4. 15 Pengaruh PWHT terhadap mikrostruktur WM SMAW (a) tanpa PWHT, (b) PWHT 650 °C dan (c) PWHT 850 °C.....	80
Gambar 4. 16 Pengaruh PWHT terhadap mikrostruktur WM GTAW (a) tanpa PWHT, (b) PWHT 650 °C dan (c) PWHT 850 °C.....	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia (%) SA-106 B (ASME BPVC SECTION II, 2015).....	18
Tabel 2. 2 Kekuatan Tarik SA-106 B (ASME BPVC SECTION II, 2015).....	18
Tabel 2. 3 Komposisi Kimia (%) Weld Metal E9016-G (AWS, 2005).....	18
Tabel 2. 4 Kekuatan Tarik Weld Metal E9016-G (AWS, 2005).....	18
Tabel 2. 5 Komposisi Kimia (%) Weld Metal ER90S (AWS, 2005).....	19
Tabel 2. 6 Kekuatan Tarik Weld Metal ER90S (AWS, 2005).....	19
Tabel 4. 1 Sifat Mekanik SA-106 B (Smaw & Gr, n.d.)	75
Tabel 4. 2 Komposisi kimia SA-106 B (Smaw & Gr, n.d.).....	67
Tabel 4. 3 Hasil pengujian tarik kombinasi pengelasan SMAW-GTAW	68
Tabel 4. 4 Pengaruh PWHT terhadap kekerasan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW	71
Tabel 4. 5 Pengaruh PWHT terhadap energi impak kombinasi pengelasan SMAW-GTAW	72
Tabel 4. 6 Pengaruh PWHT terhadap komposisi kimia	73

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Pengelasan merupakan salah satu faktor keberhasilan perusahaan dalam penyambungan, khususnya pipa baja karbon bertekanan tinggi dalam proyek implementasi teknologi pengelasan. Seluruh proyek konstruksi PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) melaksanakan proses pengelasan dalam setiap kegiatan pembuatan konstruksi yang melibatkan ahli pengelasan dan berbagai disiplin ilmu lainnya. Pengelasan yang dilakukan pada proyek konstruksi PLTU biasanya menggunakan tipe pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) dan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) karena dapat diterapkan pada lokasi dengan berbagai posisi pengelasan.

Pengelasan SMAW dan GTAW atau gabungan dari pengelasan SMAW-GTAW telah diteliti dengan berbagai variasi penelitian. Haryadi meneliti pengaruh *post weld heat treatment* (PWHT) terhadap pengelasan SMAW, semakin tinggi temperatur PWHT maka semakin tinggi nilai ketangguhan dan semakin menurun nilai kekerasannya. Dan struktur mikro daerah logam las PWHT mengakibatkan terjadinya peningkatan jumlah struktur *acicular ferrite* dan penurunan jumlah struktur *widmanstatten ferrite* (Haryadi et al., 2017). Sadeghi juga meneliti pengaruh PWHT pada pengelasan GTAW dengan hasil penelitian bahwa kekuatan tarik dan kekerasan menurun setelah dilakukan PWHT dan struktur mikro tidak berpengaruh secara signifikan daerah sambungan yang berbeda (Sadeghi et al., 2018). Purba telah meneliti pengaruh variasi temperatur PWHT terhadap sifat kekerasan baja a106 B pada proses pengelasan SMAW. Bahwa dengan naiknya temperatur PWHT maka nilai kekerasan juga akan ikut menurun (Femi Imanudin Purba & Fathier, 2020). Arivazhagan juga meneliti tentang PWHT dengan hasil bahwa semakin tinggi temperatur PWHT maka akan meningkatkan ketangguhannya (Arivazhagan & Vasudevan, 2014).

Dalam pengelasan SMAW dan GTAW, beberapa faktor perlu diperhatikan untuk menghindari cacat pengelasan mulai dari manusia, mesin, posisi pengelasan, logam pengisi, jenis sambungan, laju pengelasan, dan berbagai alasan lainnya. Cacat pengelasan baja karbon umumnya dibagi menjadi enam jenis: porositas (PO), retak (CR), terak (SL), fusi tidak lengkap (IF), penetrasi tidak lengkap (IP), dan tidak ada cacat (ND). Sementara itu Sugiarto meneliti cacat las kombinasi las SMAW-GTAW pada pipa ASTM A106 B dengan posisi 1G dan variasi arus pengelasan. Bahwa tidak ditemukan cacat las, sehingga kombinasi pengelasan dapat direkomendasikan (Sugiarto & Awali, 2012).

Pipa baja karbon SA-106 B dengan komposisi berat dalam (%) Karbon 0,30, mangan 0,29, fosfor 0,035, belerang 0,035, silikon 0,10, krom 0,40, tembaga 0,40, molibdenum 0,15, nikel 0,40, vanadium 0,08. Kandungan material pipa baja karbon tidak boleh kurang dari 0,18%. SA-106 adalah baja karbon mangan yang ditujukan untuk berbagai aplikasi layanan suhu tinggi. Perlakuan panas lebih disukai pada 1200 °F (650 °C) atau lebih tinggi. Sedangkan kuat tarik sebesar 415 MPa dan kuat luluh sebesar 240 MPa (ASME BPVC SECTION II, 2015).

Post weld heat treatment (PWHT) pada temperatur 650 °C dan 850 °C diterapkan pada sambungan NiTi/Ni/SS bebas cacat untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Saat suhu PWHT meningkat, lebih banyak Ni₃Ti yang diamati pada logam las. Deposisi ini memperkuat logam las, sehingga kekerasan rata-rata logam las meningkat dari 375 HV menjadi 493 HV. Karena homogenisasi mikro sambungan setelah PWHT, kekuatan tarik sambungan ditingkatkan. Kekuatan rata-rata tertinggi sambungan mencapai 643 MPa pada temperatur 850 °C dengan perlakuan PWHT, yaitu sekitar 2,12 kali lebih tinggi dari sambungan las. PWHT secara signifikan mempengaruhi struktur mikro dan sifat kekuatan sambungan NiTi (Chen et al., 2020). Dari latar belakang di atas, kami mengambil judul; **“pengaruh post weld heat treatment (PWHT) terhadap sifat mekanik, komposisi kimia dan struktur mikro pada pipa baja karbon SA-106 B dengan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW”**

1.2 Rumusan masalah

Permasalahan yang akan dikaji berdasarkan latar belakang adalah:

- a. Bagaimana pengaruh variasi temperatur PWHT terhadap sifat mekanik (kekuatan tarik, kekerasan, dan impak) pada pengelasan kombinasi SMAW-

GTAW menggunakan material pipa baja karbon SA-106 B?

- b. Apa pengaruh variasi temperatur PWHT terhadap komposisi kimia dengan kombinasi las SMAW-GTAW pada material pipa baja karbon SA-106 B?
- c. Bagaimana pengaruh variasi temperatur PWHT terhadap mikrostruktur pada daerah HAZ, base metal, dan logam las dengan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW pada material pipa baja karbon SA-106 B?

1.3 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini dengan variasi temperatur PWHT terhadap kombinasi pengelasan SMAW-GTAW pada pipa baja karbon SA-106 B adalah:

- a. Menganalisa perubahan sifat mekanik (kekuatan tarik, kekerasan dan impak) pipa baja karbon SA-106 B terhadap variasi temperatur PWHT pada kombinasi pengelasan SMAW-GTAW.
- b. Menganalisa perubahan komposisi kimia terhadap variasi temperatur PWHT pada kombinasi pengelasan SMAW-GTAW.
- c. Pengamatan struktur mikro pipa baja karbon SA-106 B terhadap variasi temperatur PWHT pada kombinasi pengelasan SMAW-GTAW.

1.4 Batasan masalah

Agar penelitian ini tidak terlalu luas, dilakukan pembahasan tentang latar belakang, rumusan masalah, dan tujuan penelitian agar proses yang dilakukan dapat berjalan sesuai dengan tujuan penelitian. Sehingga perlu dilakukan pembatasan masalah penelitian dengan variabel bebas, variabel kontrol, dan variabel terikat:

1.4.1 Variabel bebas

- a. Pipa baja karbon SA-106 B.
- b. Pengelasan SMAW dan pengelasan GTAW.
- c. *Filler metal* E9016-G (SMAW) dan ER90S (GTAW).
- d. Jenis kampuh V-groove dan posisi pengelasan 6G.

1.4.2 Variabel kontrol

- a. Temperatur pada saat PWHT temperatur 650 °C dan 850 °C.
- b. Waktu penahanan pada saat PWHT dengan durasi waktu 60 menit.

- c. Arus las 90 amp.
- d. Kecepatan las 70 mm/menit.

1.4.3 Variabel terikat

- a. Sifat mekanik yaitu kekuatan tarik, ketangguhan dan kekerasan.
- b. Struktur mikro didaerah BM, HAZ dan WM.
- c. Komposisi kimia pada daerah BM dan WM.
- d. Tegangan sisa tidak dibahas pada penelitian ini.

1.5 Manfaat penelitian

Pada penelitian ini didapatkan manfaat bagi peneliti secara pribadi dan bagi institusi dan perusahaan secara umum yaitu:

- a. Menambah pengetahuan tentang PWHT, SMAW, GTAW, BM, HAZ, WM, sifat mekanik, mikrostruktur, komposisi kimia, dan pipa baja karbon SA-106 B.
- b. Mengetahui perbedaan sifat mekanik pipa baja karbon SA-106 B terhadap variasi temperatur PWHT dengan kombinasi pengelasan SMAW-GTAW.
- c. Dapat mengetahui perubahan komposisi kimia pipa baja karbon SA-106 B pada kombinasi pengelasan SMAW-GTAW terhadap variasi temperatur PWHT.
- d. Pengamatan dan analisis struktur mikro pada logam dasar, HAZ, dan logam pengisi pada pipa baja karbon SA-106 B pada variasi temperatur PWHT dengan kombinasi las SMAW-GTAW.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kombinasi pengelasan

Proses pengelasan busur memiliki sejarah yang panjang dan kaya. Sejarah pengelasan busur komersial lebih dari ratusan tahun, beberapa proses dan variasi telah dikembangkan. Pabrik telah mengembangkan dan memodifikasi sumber daya sebagai perubahan serta peningkatan dalam proses pengelasan.

Pengelasan adalah suatu ikatan metalurgi pada sambungan-sambungan logam atau paduan logam yang dikerjakan secara lebur atau cair. Dengan kata lain, pengelasan adalah penyambungan lokal beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas, dengan atau tanpa tekanan, atau hanya dengan tekanan, dengan atau tanpa logam pengisi. Salah satu teknik pengelasan yang dikenal untuk penyambungan baja adalah proses pengelasan busur (Arc Welding), diantaranya SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) dan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) yang digunakan dalam penelitian ini.

2.1.1 Pengelasan SMAW

Las busur logam terlindung (SMAW) adalah proses pengelasan yang menggunakan busur antara elektroda tertutup dan logam dasar yang akan dilas. Proses pengelasan ini dilakukan tanpa tekanan dan logam pengisi dari elektroda tertutup. Ketika tukang las melakukan proses pengelasan dengan memasukkan elektroda secara terus menerus ke dalam logam dasar yang dilindungi oleh dekomposisi penutup, menghasilkan gas.

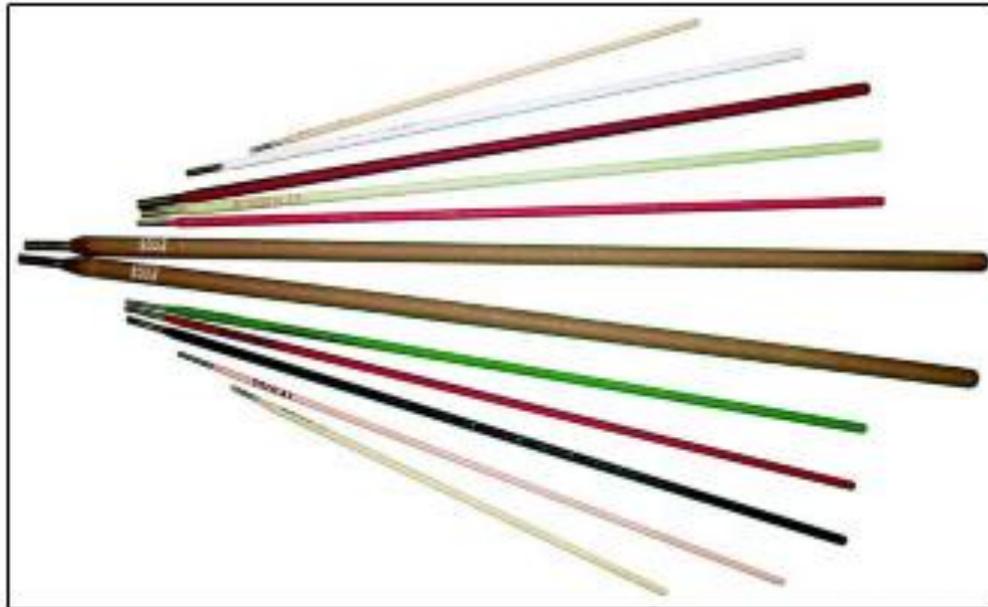
Mengingat banyaknya kemungkinan variasi dalam komposisi penutup elektroda dan berbagai pilihan kimia kawat inti, proses ini dapat menghasilkan berbagai macam endapan logam las dengan sifat mekanik dan fisik yang diinginkan sambil memberikan busur halus, transfer logam yang seragam.

Fitur-fitur ini membuat pengelasan busur logam terlindung menjadi proses favorit banyak tukang las dan perakit. Proses pengelasan ini adalah yang paling sederhana dan banyak digunakan saat ini. Kesederhanaan proses meluas ke jumlah dan sifat komponen sirkuit yang diperlukan, sumber daya dengan peringkat arus dan siklus kerja yang memadai, elektroda SMAW yang kompatibel dengan output sumber daya, kabel las berukuran tepat, pemegang elektroda, dan kabel benda kerja (Jenney & O'Brien, 1991).

2.1.1.1 Dasar proses

Pengelasan busur logam terlindung mengacu pada menggabungkan dua potong logam atau menambahkan logam ke permukaan logam yang ada. Pengelasan terlindung mengacu pada kemampuannya untuk menggantikan udara di sekitar lasan untuk menghindari efek berbahaya dari gas di udara, logam menunjukkan inti elektroda, yang merupakan batang konduktor yang menyumbang sebagian besar logam cair ke kolam las. Busur mengacu pada pelepasan plasma yang mengubah energi listrik menjadi panas. Istilah pengelasan, dalam hal ini, menunjukkan bahwa logam bergabung dengan fusi. Atribut ini membedakan proses ini dari proses pengelasan lainnya. Namun, ciri khas dari pengelasan busur logam terlindung adalah keberadaan fisik penutup yang mengelilingi kawat inti dari elektroda habis pakai. Batang tertutup disebut elektroda karena berfungsi sebagai terminal dari mana arus listrik berubah dari konduktor padat menjadi konduktor las busur plasma. (Jenney & O'Brien, 1991)

Elektroda untuk aplikasi apa pun harus memenuhi tiga kriteria. Itu harus melindungi busur dan logam las, menambahkan logam ke dalamnya, dan memelihara busur las. Konstituen capping mencapai fungsi ini pada inti logam elektroda. Meleleh dan membentuk penutup terak pelindung pada manik las saat pendinginan. Penutup elektroda juga dapat mengandung serbuk logam yang meningkatkan kontribusi logam elektroda ke kolam las. Biasanya, penutupnya non-konduktif. Oleh karena itu, untuk memfasilitasi rangkaian listrik, penutup dilepas dari satu ujung (ujung pegangan) elektroda dan diasah di ujung lainnya (ujung serang). Karena banyaknya penutup elektroda dan kombinasi kawat inti, banyak elektroda SMAW tersedia untuk menggabungkan logam besi dan non-ferro. Beberapa elektroda SMAW pada Gambar 2.1.



Photograph courtesy of ESAB Welding and Cutting Products

Gambar 2. 1 Jenis Elektroda tertutup (Jenney & O'Brien, 1991)

2.1.1.2 Prinsip-prinsip operasi

Pengelasan busur logam terlindung menggunakan listrik yang mendukung busur pengelasan untuk mengubah daya saluran listrik atau bahan bakar menjadi panas. Panas dari busur las sangat ekstrim dan sangat terkonsentrasi yang segera melelehkan sebagian benda kerja dan ujung elektroda. Tukang las mempertahankan panjang busur dengan mempertahankan ruang atau "celah" yang konsisten antara elektroda dan kolam las yang terbentuk pada benda kerja. Cairan meleleh ketika busur dihilangkan, dan lelehan itu membeku menjadi logam yang kontinu (Jenney & O'Brien, 1991).

Seperti yang ditunjukkan pada skema proses pada Gambar 2.2, sumber daya dihubungkan ke rangkaian dengan elektroda dan benda kerja secara seri. Kabel las yang digunakan di jalur pengelasan,udukan elektroda, dan sambungan antara kawat dan benda kerja juga merupakan elemen penting. Sumber daya memiliki dua terminal keluaran yang berbeda. Sambungan dibuat ke benda kerja; sambungan dibuat ke elektroda dari terminal lain. Saat menggunakan arus searah (dc), terminal yang tepat untuk sambungan elektroda ditentukan oleh polaritas yang diperlukan untuk jenis elektroda tersebut. Saat menggunakan arus bolak-balik (ac), elektroda dapat dihubungkan ke salah satu terminal terbuka antara

benda kerja dan elektroda. Voltmeter dapat mengukur penurunan tegangan antara kedudukan elektroda dan benda kerja untuk kondisi rangkaian terbuka.

Arus dalam busur dibawa oleh plasma, yang merupakan keadaan terionisasi dari gas. Dalam terminologi listrik, arus mengalir keluar dari terminal positif busur (anoda) dan ke terminal negatif (katoda), Sedangkan elektron mengalir dalam arah yang berlawanan. Jika rangkaian mesin las diatur ke arus searah elektroda positif (DCEP), katoda berada di benda kerja, dan anoda berada di ujung elektroda SMAW. Jumlah energi yang diubah menjadi panas oleh busur adalah fungsi dari kemudahan gas dapat terionisasi dan jumlah arus yang ditransmisikan. Distribusi suhu adalah fungsi dari panas yang dihasilkan, panas yang hilang dan dimensi busur. Untuk proses pengelasan busur logam terlindung, penutup elektroda mengandung sejumlah besar stabilisator seperti garam natrium dan kalium, yang menghasilkan busur yang relatif dingin yang tetap sangat efektif untuk menyambung logam.

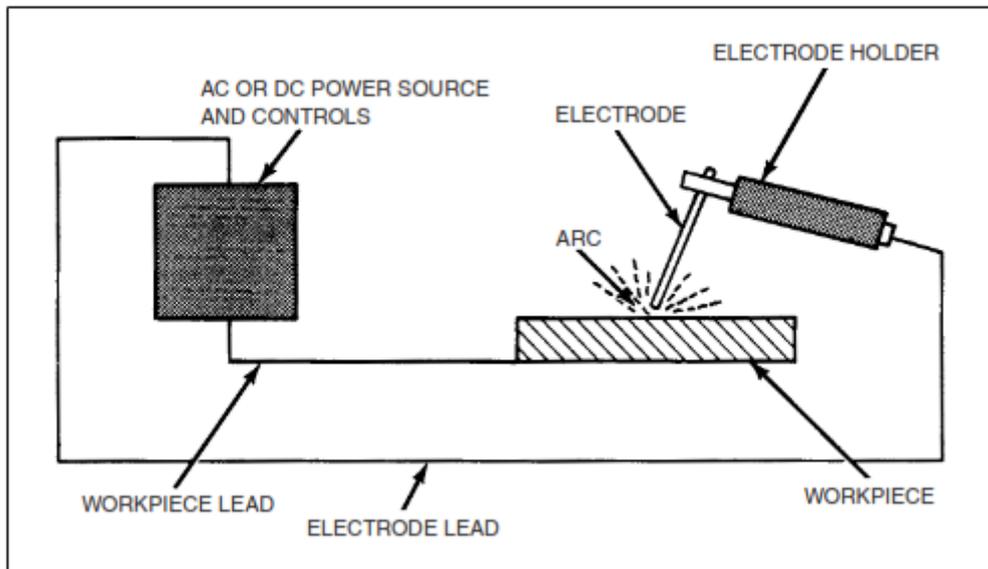
Panas yang intens dari busur langsung melelehkan kawat inti dekat dan penutup konsentris. Beberapa bahan menutupi dan terurai, menghasilkan sejumlah besar gas. Beberapa bahan dapat bertahan dan mulai membentuk kerucut pelindung ke dalam kawat inti, bahan lain meleleh dan bergabung dengan kawat inti dalam bentuk tetesan yang mengamati diseluruh busur. Bersamaan dengan itu, endapan logam mulai terbentuk dipermukaan benda kerja didekat busur. Keadaan quasi-steady segera dibuat, dimana kolam las yang berbeda menjadi terlihat, dan tukang las siap untuk memanipulasi elektroda. Pada awal pembuatan, lasan paling rentan terhadap porositas karena perisai belum sepenuhnya terbentuk, dan udara di lokasi akhir belum sepenuhnya dikeluarkan.

Ketika busur terbentuk dan kolam las ditentukan, tukang las mulai memasukkan elektroda ke dalam busur dan memanipulasinya didalam sambungan las sambil mempertahankan panjang busur konstan antara ujung elektroda dan kolam las. Elektroda dikonsumsi ke dalam busur, konstituen logam dari elektroda meleleh dan transfer ke kolam las dalam tetesan. Dalam beberapa kasus, tetesan agregat menjadi massa globular besar yang secara berkala bergerak melintasi busur tanpa mengganggu aliran arus. Dalam beberapa kasus, tetesan dilepaskan secara paksa terlepas dari arahnya, misalnya, saat menggunakan ukuran elektroda besar dari jenis E6010. Dalam kasus lain, transfer sepenuhnya tersembunyi dan dibatasi di dalam kerucut dari tepi luar penutup ke kawat inti. Sifat yang tepat dari gaya yang bekerja pada tetesan belum dipelajari

dan diukur secara ekstensif, namun efek gravitasi, tekanan eksplosif dari pembentukan dan ekspansi gas, elektromagnetisme, dan tegangan permukaan adalah pengaruh penting. Saat busur maju, efek pendinginan benda kerja menjangkar beberapa atom dalam lelehan ke benda kerja dan mulai menumbuhkan dendrit ke dalam cairan kolam las. Dari fusi dengan benda kerja, pemadatan berlangsung normal (tegak lurus) ke gradien suhu di kolam las dan menuju pusat geometrisnya. Berbagai faktor, seperti kecepatan las bergerak, kecuraman gradien suhu, derajat *undercooling*, dan komposisi serta bentuk kolam las digabungkan untuk menentukan apakah struktur yang dipadatkan akan menjadi planar, columnar, atau equiaxed. Struktur dan komposisi las akan menentukan sifat mekaniknya. Aliran panas melalui benda kerja dapat menyebabkan perubahan struktur di dalamnya. Daerah perubahan, daerah yang tidak meleleh, disebut zona yang terkena panas (lihat Gambar 2.3), akan memiliki sifat mekanik yang berbeda dari kesetimbangan benda kerja.

Lasan manik-dalam-pelat biasanya menghadirkan rasio permukaan-ke-las yang paling baik dan tantangan paling signifikan untuk diselesaikan. Gaya magnet dapat mengaduk bagian tengah kolam las, dan beberapa produk oksidasi, terak yang mengeras, atau keduanya dapat terlihat mengambang ke arah tepi luar kolam las. Di tepi trailing kolam las, terak terlihat bergerak maju dengan pergerakan elektroda. Terak terdiri dari senyawa fluks yang dipadatkan, logam teroksidasi, produk dekomposisi, dan oksida dengan titik leleh tinggi. Bahan-bahan ini membeku lebih cepat daripada pengerasan logam las, dan mereka memiliki kepadatan yang lebih rendah, akan membuat tutup di bagian atas dan menutupi manik las. Jumlah terak yang diinginkan adalah tingkat minimum yang konstan untuk manik las.

Terak melindungi permukaan bersuhu tinggi dari atmosfer. Terak juga bertindak sebagai penghalang panas yang mengurangi laju pendinginan logam las. Penghapusan dini atau retak terak dapat menyebabkan perubahan warna pada las atau, terkadang, multi-warna (yaitu, las baja tahan karat). Untuk sebagian besar, penghilangan terak dengan pengelasan busur logam terlindung itu mudah, berkontribusi pada efisiensi. Namun, pelepasan ini menjadi lebih kompleks pada alur las yang dalam dan sempit.



Gambar 2. 2 Skema Pengelasan SMAW (Jenney & O'Brien, 1991)

Seorang tukang las yang terampil menggunakan logam pengisi yang berbeda untuk mencapai sambungan las yang baik bebas dari porositas, retak, dll. Tukang las harus peka terhadap perubahan yang disebabkan oleh pukulan busur (defleksi busur dari jalur standarnya karena magnet) dan bereaksi dengan mengarahkan elektroda ketika tukang las selesai menarik elektroda, dan busur memudar dan padam. Namun, hanya menarik elektroda di beberapa sambungan dapat meninggalkan rongga atau retakan yang tidak dapat diterima di kawah (penurunan permukaan las di ujung manik las). Dalam kasus seperti itu, tukang las mengisi ulang dengan kembali melalui pusat kolam las dan kemudian menarik elektroda (Jenney & O'Brien, 1991).

2.1.1.3 Elektroda tertutup

Semua elektroda SMAW ditutupi dengan konstituen yang memfasilitasi proses pengelasan dan menambahkan elemen paduan yang memberikan sifat berharga pada lasan. Tanpa penutup, busur akan sulit dirawat, deposit las akan rapuh dengan oksigen terlarut dan nitrogen, manik las akan kusam dan bentuknya tidak beraturan, dan benda kerja akan dipotong.

Pabrikan menerapkan penutup ke elektroda busur logam terlindung baik dengan proses ekstrusi atau perendaman. Proses pencelupan digunakan terutama untuk elektroda SMAW yang digunakan untuk mengelas besi tuang dan beberapa elektroda khusus dengan kabel inti yang kompleks.

Penutup elektroda berisi sebagian besar bahan penstabil, pelindung, fluks, deoksidasi, dan pembentuk terak yang penting untuk proses tersebut. Selain mempertahankan busur dan memasok logam pengisi untuk deposit las, dekomposisi penutup elektroda memasukkan bahan penting lainnya ke dalam atau di sekitar busur. Tergantung pada jenis elektroda yang digunakan, penutup elektroda menyediakan hal-hal berikut:

- a. Gas untuk melindungi busur dan mencegah kontaminasi atmosfer yang berlebihan dari logam cair.
- b. Pengoksidasi bereaksi dengan menguras tingkat elemen gas terlarut yang dapat menyebabkan porositas.
- c. Agen fluks untuk mempercepat reaksi kimia dan membersihkan kolam las.
- d. Selimut terak untuk melindungi logam las panas dari udara dan untuk meningkatkan sifat mekanik, bentuk manik, dan kebersihan permukaan logam las.
- e. Elemen paduan untuk mencapai struktur mikro yang diinginkan.
- f. Unsur dan senyawa untuk mengendalikan pertumbuhan butir.
- g. Bahan paduan untuk meningkatkan sifat mekanik logam las.
- h. Elemen yang mempengaruhi bentuk kolam las.
- i. Elemen yang mempengaruhi pembasahan benda kerja dan viskositas logam las cair.
- j. Stabilisator untuk membantu menetapkan karakteristik listrik yang diinginkan dari elektroda dan meminimalkan percikan.

Senyawa kimia di penutup, dikombinasikan dengan komposisi kawat inti, menciptakan sifat mekanik yang unik dalam las dan meningkatkan karakteristik pengelasan seperti stabilitas busur, jenis transfer logam, dan terak. Elektroda yang berbeda diformulasikan untuk mengelas logam yang berbeda, mengoptimalkan karakteristik khusus dari proses, dan mendapatkan keuntungan di area aplikasi tertentu. Misalnya, tukang las transformator AC ekonomis sangat populer; akibatnya, penutup elektroda yang dirancang untuk pengelasan dengan arus bolak-balik akan sesuai dengan lembaran logam non-industri dan pelat besi. Dengan arus AC, busur padam dan terbentuk kembali setiap kali arus berbalik arah. Perlu ada gas di celah antara elektroda dan kolam las untuk stabilitas busur yang baik yang akan tetap terionisasi selama setiap pembalikan arus. Gas terionisasi ini memungkinkan penyalaan ulang busur yang mulus. Gas yang dapat terionisasi dihasilkan oleh berbagai senyawa, termasuk yang mengandung kalium.

Senyawa ini ke dalam penutup memungkinkan elektroda untuk beroperasi pada arus bolak-balik.

Untuk pengelasan posisi datar dan horizontal komersial, kecepatan penyelesaian sambungan merupakan pertimbangan penting. Oleh karena itu, lebih disukai elektroda dengan laju pengendapan dan efisiensi proses yang sangat tinggi, misalnya, elektroda SMAW debu besi dengan serbuk besi yang disertakan dalam penutup seperti E7018, E7024, dan E7028. Serbuk besi menyediakan sumber logam lain untuk pengendapan, melengkapi yang diperoleh dari inti elektroda. Adanya serbuk besi pada cover juga membuat energi busur lebih hemat. Serbuk logam selain besi sering ditambahkan ke penutup elektroda. Meskipun mereka meningkatkan laju deposisi, tujuan utamanya adalah untuk mengubah sifat mekanik logam las atau untuk mengoksidasi kolam las (Jenney & O'Brien, 1991).

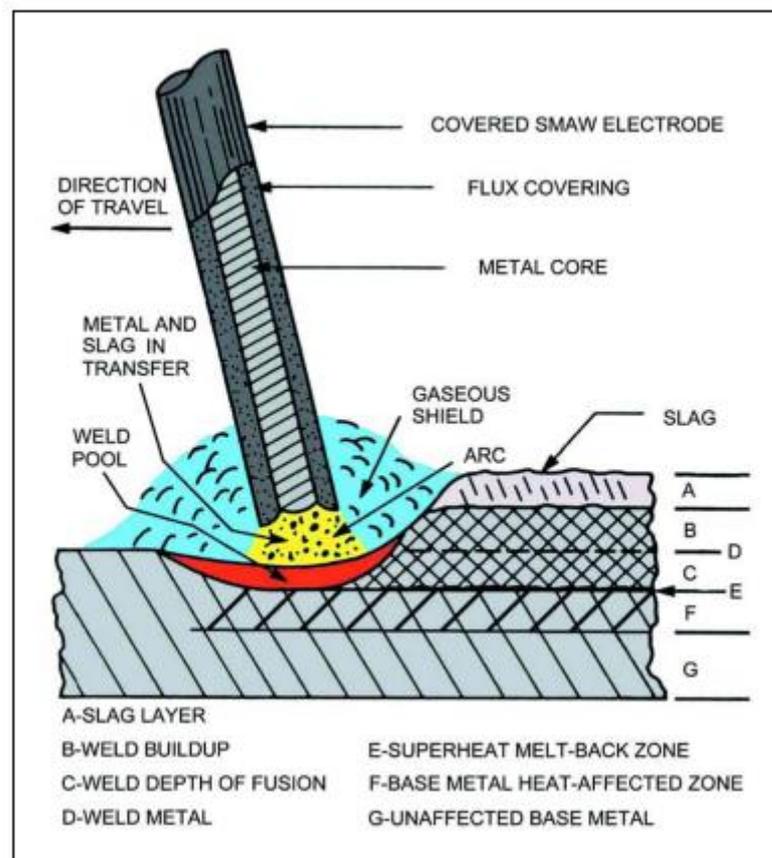
2.1.1.4 Busur logam terlindung

Tindakan protektif dari proses pengelasan busur logam terlindung yang diilustrasikan pada Gambar 2.3 pada dasarnya sama untuk semua elektroda SMAW. Namun, metode perlindungan khusus dan volume terak bervariasi dari satu jenis elektroda ke yang lain. Seperti yang digambarkan pada Gambar 2.3, dua mekanisme sedang bekerja untuk mencegah efek merusak kolam las yang disebabkan oleh gas di udara. Yang pertama adalah perpindahan paksa udara oleh gas yang dihasilkan oleh pembakaran dan dekomposisi penutup elektroda. Yang kedua adalah tindakan pembungkus fluks atau terak, yang mencegah difusi konstituen udara ke dalam logam cair. Penutup elektroda bervariasi tergantung pada dua mekanisme ini untuk memberikan tindakan perlindungan yang paling menguntungkan untuk lasan tertentu.

Ketika elektroda yang mengandalkan perpindahan udara digunakan, sebagian besar penutup diubah menjadi gas oleh panas busur, dan hanya sedikit terak yang dihasilkan. Jenis elektroda ini sangat bergantung pada gas pelindung untuk mencegah kontaminasi atmosfer. Manik-manik las yang diproduksi dengan elektroda ini biasanya memiliki lapisan terak yang sangat tipis yang mungkin tidak sepenuhnya menutupi permukaan.

Ketika elektroda yang mengandalkan aksi selimut digunakan, sebagian besar penutup diubah menjadi terak oleh panas busur, dan hanya sejumlah kecil gas pelindung yang dihasilkan. Seperti butiran kecil logam yang bergerak melintasi busur, mereka seluruhnya dilapisi dengan lapisan terak cair yang tipis. Terak ini

mengapung ke permukaan kolam las karena memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan logam cair kolam las. Saat suhu kolam las turun, terak mengeras dan terus melindungi kolam las dan selanjutnya melindungi logam las padat panas dari oksidasi. Lasan yang dibuat dengan elektroda ini dapat diidentifikasi dengan deposit terak berat yang menutupi manik las. Berbagai jenis elektroda menggunakan kombinasi yang berbeda dari kedua mekanisme ini, masing-masing dengan kombinasi gas pelindung dan terak yang berbeda.



Source: Adapted from Linnert, G. E., 1994. *Welding Metallurgy*, 4th ed., Miami: American Welding Society

Gambar 2. 3 Skema Pengelasan Busur Logam Terlindung (Jenney & O'Brien, 1991)

Variasi jumlah terak dan pelindung gas juga mempengaruhi karakteristik pengelasan elektroda tertutup. Elektroda yang menghasilkan terak berat dapat membawa arus listrik tinggi dan memberikan tingkat deposisi yang tinggi, menjadikannya ideal untuk pengelasan berat pada posisi datar. Elektroda yang menghasilkan lapisan terak ringan digunakan dengan arus listrik yang lebih rendah dan memberikan tingkat deposisi yang lebih rendah. Elektroda ini menghasilkan kolam las yang lebih kecil dan cocok untuk membuat las di semua posisi. Ketika

perbedaan karakteristik pengelasan dibandingkan, satu jenis elektroda tertutup biasanya muncul sebagai pilihan terbaik untuk aplikasi tertentu (Jenney & O'Brien, 1991).

2.1.1.5 Keuntungan proses

Lasan pendek sambungan untuk produksi komponen atau produk jadi, pemeliharaan, pekerjaan perbaikan, dan konstruksi lapangan adalah area aplikasi penting untuk proses pengelasan busur logam terlindung. Keuntungan berharga dari pengelasan busur logam terlindung adalah berbagai macam logam dan paduan yang mampu dilas oleh proses tersebut. Prosedur dan elektroda tersedia untuk pengelasan karbon dan baja paduan rendah, baja paduan tinggi, baja berlapis, baja perkakas dan baja mati, baja tahan karat dan panas, besi tuang, paduan tembaga dan tembaga, paduan nikel dan kobalt. Gambar 2.2 dan 2.3 mengilustrasikan dua aplikasi tipikal: pengelasan pipa dan pengelasan baja struktural. Proses ini juga dapat digunakan untuk beberapa aplikasi aluminium.

Berikut adalah keuntungan lain dari proses:

- a. Peralatannya relatif sederhana, murah, dan portable.
- b. Elektroda SMAW menyediakan pelindung dan logam pengisi untuk menghasilkan lasan yang baik.
- c. Pelindung gas tambahan atau fluks granular tidak diperlukan.
- d. Prosesnya kurang sensitif terhadap angin dan angin daripada proses pengelasan busur berpelindung gas.
- e. Dimensi elektroda SMAW ideal untuk menjangkau area dengan akses terbatas (elektroda dapat ditebuk, dan dengan bantuan cermin, diterapkan pada titik buta).
- f. Proses ini cocok untuk sebagian besar logam dan paduan yang umum digunakan.

2.1.2 Pengelasan GTAW

Las busur tungsten gas (GTAW) adalah proses pengelasan busur yang menggunakan busur antara elektroda tungsten yang tidak habis pakai dan benda kerja untuk membentuk kolam las. Proses ini digunakan dengan gas pelindung dan tanpa memberikan tekanan dan dapat digunakan dengan atau tanpa penambahan logam pengisi. Karena kualitas lasan yang lebih tinggi daripada yang dapat dihasilkan oleh pengelasan busur tungsten gas, proses ini telah menjadi alat

yang sangat diperlukan bagi banyak produsen, termasuk industri pembangkit tenaga listrik, nuklir, kelautan, petrokimia, dan semikonduktor.

Kemungkinan penggunaan helium untuk melindungi busur las dan kolam las pertama kali diselidiki pada tahun 1920-an. Namun, tidak ada insentif untuk pengembangan lebih lanjut atau penggunaan proses ini sampai dimulainya Perang Dunia II, ketika kebutuhan besar muncul di industri pesawat terbang untuk menggantikan riveting sebagai metode untuk menggabungkan bahan reaktif, seperti aluminium dan magnesium. Industri pengelasan telah merespons dengan menghasilkan sumber panas yang stabil dan efisien yang dengannya pengelasan yang sangat baik dapat dibuat menggunakan elektroda tungsten dan busur arus searah dengan elektroda negatif. Helium dipilih untuk menyediakan pelindung yang diperlukan karena itu adalah satu-satunya gas inert yang tersedia. Sebuah obor gas inert elektroda tungsten khas periode itu ditunjukkan pada Gambar 2.3.

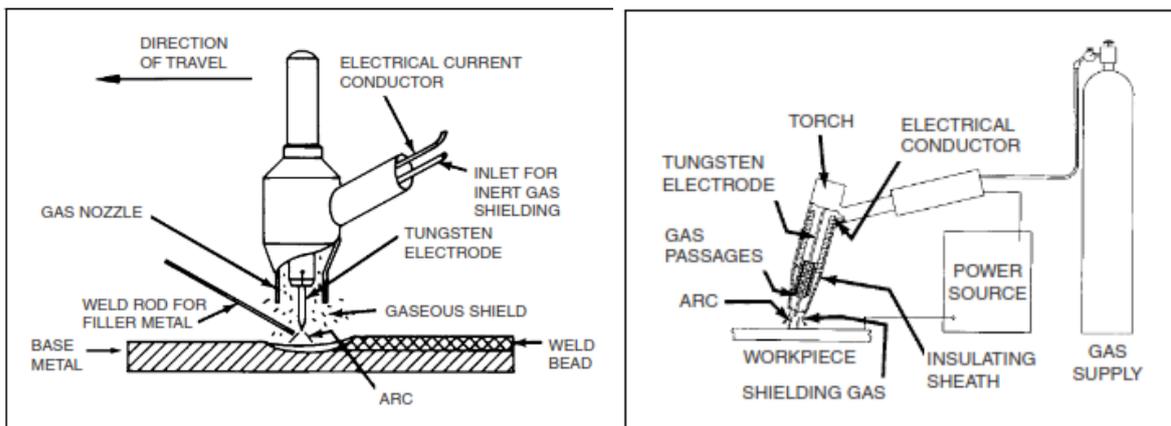
Proses ini disebut pengelasan elektroda tidak habis pakai dan sering disebut sebagai pengelasan TIG (tungsten inert gas). Namun, karena campuran gas pelindung inert dapat digunakan untuk aplikasi tertentu, American Welding Society (AWS) mengadopsi GTAW sebagai terminologi standar untuk proses tersebut.

Banyak perbaikan telah dilakukan untuk proses dan peralatan sejak hari-hari awal penemuan. Sumber daya pengelasan telah dikembangkan untuk proses tersebut, beberapa menyediakan arus searah dan bolak-balik dengan polaritas variabel. Obor berpendingin air dan berpendingin gas dikembangkan. Campuran gas pelindung diidentifikasi untuk meningkatkan kinerja pengelasan. Elektroda tungsten dicampur dengan sejumlah kecil elemen aktif untuk meningkatkan emisivitas, sehingga meningkatkan awal busur, stabilitas busur, dan umur elektroda. Para peneliti terus mengejar peningkatan dalam kontrol otomatis, sensor penglihatan dan penetrasi, dan kontrol panjang busur (Jenney & O'Brien, 1991).

2.1.2.1 Dasar GTAW

GTAW diumpankan melalui obor untuk memberikan atmosfer inert yang melindungi elektroda dan kolam las saat logam las mengeras. Busur listrik, yang dihasilkan dengan melewatkan arus melalui gas pelindung terionisasi konduktif, dibuat antara ujung elektroda dan benda kerja. Pengelasan dimulai ketika panas yang dihasilkan oleh busur melelehkan logam dasar dan membentuk kolam las.

Obor dipindahkan di sepanjang benda kerja, dan busur secara bertahap melelehkan permukaan sambungan. Jika ditentukan, logam pengisi, biasanya dalam bentuk kawat, ditambahkan ke tepi depan kolam las untuk mengisi sambungan. Proses pengelasan busur tungsten gas diilustrasikan pada Gambar 2.4. Empat komponen penting yang umum untuk semua pengaturan GTAW adalah obor, elektroda, sumber daya las, dan gas pelindung. Pengaturan tipikal ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Skema pengelasan GTAW (Jenney & O'Brien, 1991)

2.1.2.2 Keunggulan GTAW

Pengelasan busur tungsten gas menawarkan keuntungan untuk berbagai aplikasi, mulai dari lasan berkualitas tinggi yang diperlukan dalam industri pembangkit tenaga listrik, nuklir dan las autogenous kecepatan tinggi yang diperlukan dalam pembuatan tabung dan lembaran logam hingga las yang biasa digunakan di bengkel fabrikasi dan reparasi, di mana kemudahan pengoperasian dan fleksibilitas prosesnya.

Prosesnya dapat diotomatisasi dan siap diprogram untuk memberikan kontrol variabel pengelasan yang presisi dengan kemampuan kontrol pengelasan jarak jauh. Fleksibilitas diperoleh saat menggunakan las busur tungsten gas karena prosesnya memungkinkan sumber panas dan penambahan logam pengisi dikontrol secara independen. Kontrol penetrasi yang sangat baik dari las root pass dapat dipertahankan.

Pengelasan dapat dilakukan di posisi apa pun, dan aplikasinya hampir tidak terbatas. Proses ini dapat menghasilkan lasan autogenous yang konsisten dengan kualitas unggul pada kecepatan tinggi, bebas percikan, dan umumnya

dengan sedikit cacat. Hampir semua logam, termasuk logam yang berbeda, dapat dilas dengan proses GTAW. Proses ini dapat digunakan dengan atau tanpa logam pengisi, sesuai kebutuhan aplikasi tertentu. Keuntungan lebih lanjut adalah bahwa sumber daya yang relatif murah dapat digunakan (Jenney & O'Brien, 1991).

2.1.2.3 Keterbatasan

Batasan proses GTAW berikut ini harus dipertimbangkan saat memilih proses untuk aplikasi:

- a. Laju pengendapan umumnya lebih rendah dari laju yang dimungkinkan dengan proses pengelasan busur elektroda habis pakai.
- b. Sedikit lebih banyak ketangkasan dan koordinasi diperlukan dari tukang las yang menggunakan GTAW dibandingkan dengan pengelasan busur logam gas (GMAW) atau pengelasan busur logam terlindung (SMAW).
- c. Ada toleransi yang rendah terhadap kontaminan pada bahan pengisi atau logam dasar.
- d. Untuk ketebalan las di bawah 10 milimeter (mm) (3/8 inci [in.]), proses GTAW menghasilkan kualitas las yang sebanding atau lebih baik daripada proses las busur habis pakai, tetapi lebih mahal.
- e. Medan magnet yang menyebabkan ledakan busur atau defleksi busur, seperti proses busur lainnya, dapat membuat pengelasan busur tungsten gas sulit dikendalikan.
- f. Jika pengelasan dilakukan di lingkungan berangin akan sulit untuk melindungi zona las dengan benar.

2.2 Material

Material yang digunakan pada pengelasan kombinasi SMAW-GTAW adalah SA-106 B sebagai logam dasar dan E9016-G dan ER90S sebagai logam las. Materi ini akan menjelaskan masing-masing sifat mekanik dan komposisi kimia dari material tersebut.

2.2.1 Pipa baja karbon SA-106 B

Pipa baja karbon SA-106 B adalah pipa baja karbon rendah dimana baja karbon kurang dari 0,3% C; komposisi kimianya dapat dilihat pada tabel 2.1 menurut standar Material ASME Sec II. Menurut standar Bahan ASME Sec II, kekuatan tarik minimum 415 MPa dan kekuatan luluh minimum 240 MPa. Pipa

baja karbon SA-106 B ditujukan untuk berbagai aplikasi servis suhu tinggi. Perlakuan panas lebih disukai pada 1200 °F (650 °C) atau lebih tinggi (ASME BPVC SECTION II, 2015).

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia (%) SA-106 B (ASME BPVC SECTION II, 2015)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.3	0.29-1.06	0.16	0.035	0.035	0.4	0.4	0.15	0.4

Tabel 2. 2 Kekuatan Tarik SA-106 B (ASME BPVC SECTION II, 2015)

Tensile Strength (MPa)	Yielding Strength (MPa)	Elongation (%)
415	240	-

2.2.2 Elektroda E9016-G

Elektroda pada pengelasan SMAW dibungkus oleh fluks yang ikut terbakar dan melindungi benda kerja dari kontaminasi udara luar saat proses pengelasan berlangsung. Pemilihan elektroda untuk pipa baja karbon SA-106 B direkomendasikan menggunakan elektroda E9016 karena memiliki *hydrogen* yang rendah (AWS, 2005).

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia (%) Weld Metal E9016-G (AWS, 2005)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
0.05-0.12	0.9	0.6	0.03	0.03	2.00-2.50	0.90-1.20

Tabel 2. 4 Kekuatan Tarik Weld Metal E9016-G (AWS, 2005)

Tensile Strength (MPa)	Yielding Strength (MPa)	Elongation (%)
620	530	17

2.2.3 Elektroda ER90S

Elektroda untuk proses pengelasan GTAW adalah elektroda logam non-isi yang terbuat dari tungsten murni atau paduan tungsten yang tidak meleleh. Seperti

yang ditunjukkan pada tabel berikut, beberapa jenis elektroda tungsten digunakan dalam pengelasan.

Tabel 2. 5 Komposisi Kimia (%) Weld Metal ER90S (AWS, 2005)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.07- 0.12	0.40- 0.70	0.40- 0.70	0.025	0.025	0.2	2.30- 2.70	0.90- 1.20	0.35

Tabel 2. 6 Kekuatan Tarik Weld Metal ER90S (AWS, 2005)

Tensile Strenght (MPa)	Yielding Strenght (MPa)	Elongation (%)
620	540	17

2.3 Post weld heat treatment

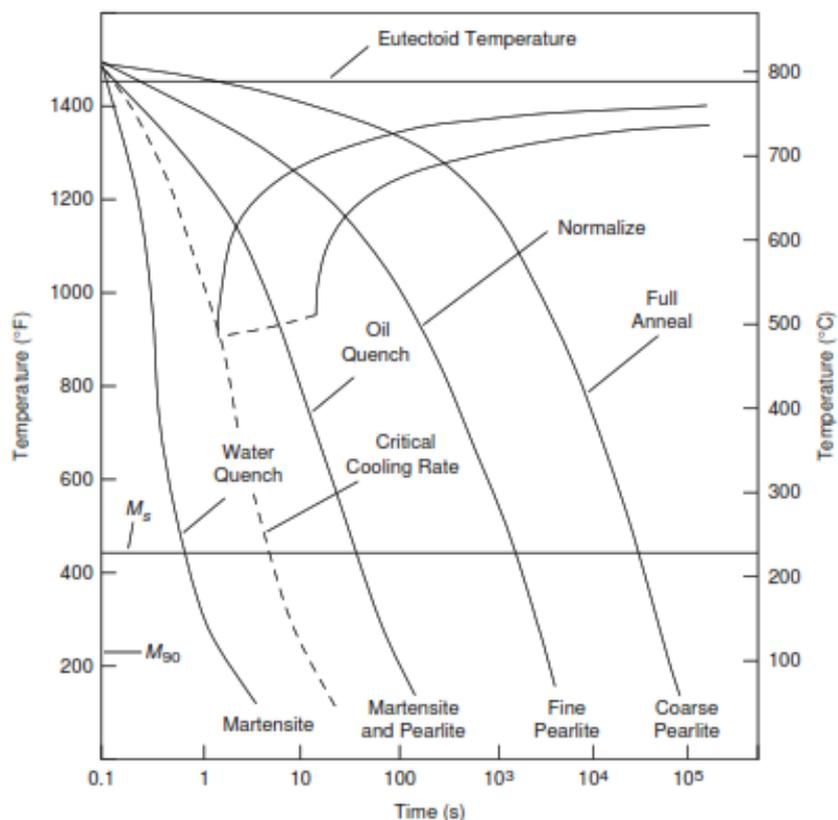
Salah satu keunggulan utama baja adalah kemampuannya untuk mencapai kekuatan tinggi melalui perlakuan panas sambil tetap mempertahankan beberapa tingkat keuletan. Kemampuan baja untuk diperkuat ini merupakan konsekuensi langsung dari jumlah karbon yang ada. Ketika kandungan karbon meningkat, tingkat kekuatan yang lebih tinggi dapat diperoleh. Meskipun daktilitas menurun dengan meningkatnya kekuatan, itu masih cukup tinggi untuk memenuhi sebagian besar aplikasi teknik. Jenis perlakuan panas yang digunakan juga mempengaruhi sifat. Baja yang dikeraskan dengan pemanasan ke dalam medan austenit, diikuti dengan pendinginan dan kemudian temper, memiliki kekuatan yang jauh lebih tinggi daripada yang dikenai perlakuan panas normalisasi atau sferoidisasi. Perlakuan panas dapat digunakan tidak hanya untuk mengeraskan baja tetapi juga untuk memberikan kombinasi sifat yang berguna lainnya, seperti keuletan, kemampuan bentuk, dan kemampuan mesin (Campbell, 2008).

Baja dipanaskan cukup lambat ke suhu tertentu dan kemudian didinginkan dalam semua proses ini. Suhu dan laju pendinginanlah yang menentukan struktur baja yang dihasilkan dan sifat mekaniknya, seperti yang diilustrasikan dalam diagram transformasi waktu-suhu (TTT) pada Gambar 2.5. Struktur akhir tidak bergantung pada laju pemanasan, asalkan cukup lambat bagi baja untuk mencapai kesetimbangan struktural pada suhu maksimum. Namun, laju pendinginan berikutnya, yang menentukan sifat-sifat struktur akhir, sangat penting

dan dapat bervariasi dari pendinginan tungku lambat hingga pendinginan cepat dengan pendinginan dalam air.

2.3.1 Annealing

Istilah anil adalah perlakuan panas dimana logam atau paduan dipanaskan sampai suhu yang diinginkan dan ditahan untuk jangka waktu tertentu, diikuti dengan pendinginan lambat. Dalam baja, anil biasanya berarti perlakuan panas dengan pendinginan tungku dari kisaran austenisasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Annealing mengurangi kekerasan, memperoleh struktur mikro yang relatif stabil, menghaluskan ukuran butir, meningkatkan kemampuan mesin, dan memfasilitasi pengerjaan dingin. Untuk baja hypoeutectoid, full annealing terdiri dari pemanasan sampai 10 sampai 40 °F) di atas suhu A3. Untuk baja hipereutektoid, (50 hingga 100 °C pemanasan di atas suhu A1 dan diikuti, dalam kedua kasus, dengan laju pendinginan yang lama). pendinginan lambat, struktur



Gambar 2. 5 Pengaruh laju pendinginan terhadap struktur mikro (Campbell, 2008)

mikro terdiri dari ferit kasar atau ferit kasar ditambah perlit, tergantung pada kandungan karbon dan paduan baja. Anil isothermal seringkali lebih efisien untuk bagian-bagian kecil karena bagian-bagian tersebut dapat dipindahkan antara suhu konstan garam cair panas daripada pendinginan tungku. Baja juga dilindungi dari oksidasi oleh panas cair. Garam-garam ini adalah berbagai campuran senyawa seperti hidroksida logam alkali dan nitrat yang dipilih untuk kisaran suhu tertentu. Biasa digunakan sebelum kekhawatiran tentang bahaya timbal terhadap kesehatan manusia dan lingkungan menyebar luas (Campbell, 2008).

2.3.2 Proses annealing dan stress relief

Ketika kekerasan baja meningkat selama pengerjaan dingin, daktilitas menurun, dan reduksi dingin tambahan menjadi sangat sulit sehingga material harus dianil untuk mengembalikan keuletan. Anil seperti itu di antara langkah-langkah pemrosesan disebut sebagai anil dalam atau sederhana. Ini mungkin terdiri dari perawatan yang tepat; namun, dalam banyak kasus, perawatan subkritis memadai dan paling murah. Tanpa kualifikasi lebih lanjut, istilah proses anil biasanya mengacu pada proses anil subkritis. Proses anil biasanya terdiri dari pemanasan baja ke suhu tepat di bawah suhu eutektoid A1 untuk waktu yang singkat. Ini memberikan penghilang stres, membuat baja lebih lunak, dan diterapkan pada baja lembaran canai dingin karbon rendah untuk mengembalikan keuletan. Suhu yang digunakan berkisar antara 550 hingga 650 °C (1020 hingga 1200 °F). Pendinginan lambat tidak penting untuk proses annealing karena setiap laju pendinginan dari suhu di bawah A1 tidak akan mempengaruhi struktur mikro atau kekerasan. Meskipun rekristalisasi dapat terjadi karena energi yang tersimpan dari pengerjaan dingin, tidak ada perubahan fasa, dan konstituen ferit dan sementit tetap sama selama proses berlangsung. Proses annealing umumnya dilakukan dalam tungku tipe batch atau tungku kontinu (Campbell, 2008).

2.3.3 Normalizing

Baja dinormalisasi dengan memanaskan 30 hingga 45 °C (90 hingga 110 °F) ke dalam bidang fase austenit di atas suhu A3, sedikit lebih tinggi dari yang digunakan oleh anil, diikuti dengan pendinginan pada tingkat sedang. Untuk baja karbon dan baja paduan rendah, normalisasi berarti pendinginan udara. Banyak lembaran baja dinormalisasi untuk membentuk struktur mikro ferit plus perlit yang seragam bersama dengan ukuran butir yang seragam. Selama normalisasi, laju

pendinginan yang lebih cepat menghasilkan struktur perlit yang jauh lebih halus, yang lebih kompleks dan kokoh daripada perlit kasar yang dihasilkan oleh anil penuh. Baja dinormalisasi untuk menghaluskan ukuran butir, membuat strukturnya lebih seragam, membuatnya lebih responsif terhadap pengerasan, dan meningkatkan kemampuan mesin. Ketika baja dipanaskan hingga suhu tinggi, karbon dapat dengan cepat berdifusi, menghasilkan komposisi yang cukup seragam dari satu area ke area berikutnya. Baja lebih homogen dan akan merespon perlakuan panas lebih seragam. Sifat baja yang dinormalisasi bergantung pada komposisi kimia dan laju pendinginannya, dengan laju pendinginan sebagai fungsi dari ukuran bagian. Meskipun mungkin ada variasi yang cukup besar dalam kekerasan dan kekuatan baja yang dinormalisasi, strukturnya biasanya mengandung perlit halus (Campbell, 2008).

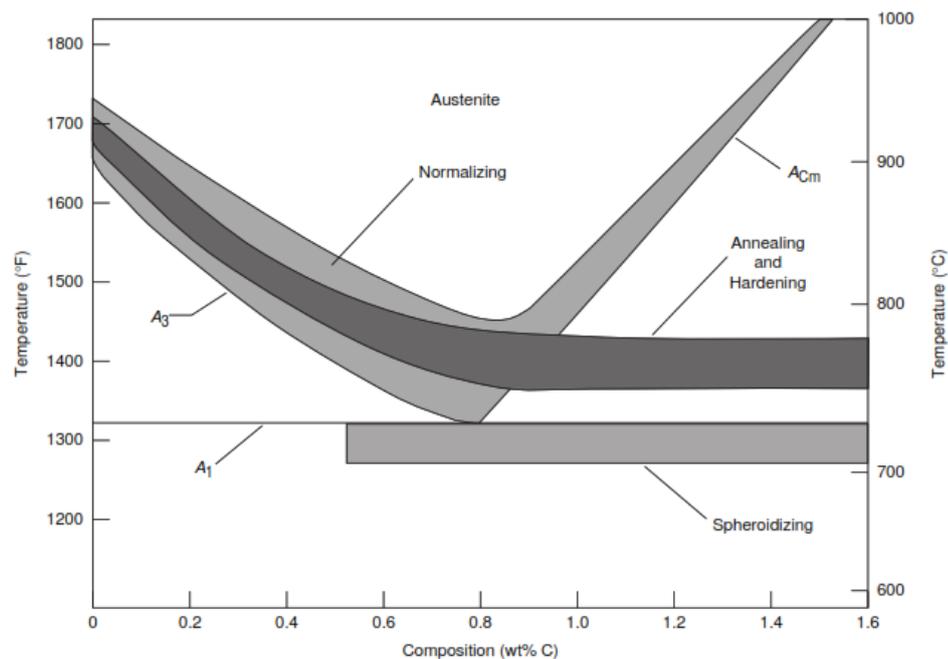
2.3.4 Spheroidisasi

Untuk menghasilkan baja dalam kondisi selembut mungkin dengan kekerasan minimum dan keuletan maksimum, baja dapat dibulatkan dengan memanaskan tepat di atas atau tepat di bawah suhu eutektoid A1 dan kemudian menahannya pada suhu tersebut untuk waktu yang lama. Spheroidizing juga dapat dilakukan dengan pemrosesan siklik, di mana suhu baja disikluskan di atas dan di bawah garis A1. Proses ini memecah perlit datar menjadi potongan-potongan dan membentuk sferoid sementit kecil melalui difusi dalam matriks ferit kontinu. Tegangan permukaan menyebabkan partikel karbida mengembangkan bentuk bola. Karena ukuran halus dari karbida awal mempercepat spheroidization, baja sering dinormalisasi sebelum spheroidizing. Pilihan lain adalah memulai dengan struktur martensit yang menghasilkan dispersi yang sangat seragam dari sferoid sementit karena karbon lebih merata di martensit daripada di perlit pipih. Semen lamellar harus terlebih dahulu melarutkan dan kemudian mendistribusikan kembali karbon sebagai sferoid, sedangkan sferoid sementit dapat langsung membentuk martensit (Campbell, 2008).

2.3.5 Hardening

Baja dikeraskan dengan austenitizing, quenching, dan kemudian tempering sampai kekerasan akhirnya. Karena komposisi baja cukup bervariasi, penting untuk: (1) memahami ketebalan penampang maksimum yang dapat dikeraskan dalam media pendinginan tertentu (misalnya, air atau minyak), dan (2) menyadari

variasi besar dalam kekuatan dan keuletan yang dapat diperoleh dengan temper pada suhu yang berbeda. Perlu dicatat bahwa tempering tidak digunakan untuk mengeraskan baja. Baja dikeraskan dengan austenitizing dan quenching. Tempering dilakukan untuk mengembalikan sebagian keuletan yang hilang selama pengerasan, dan seringkali, pelunakan yang cukup besar dihasilkan oleh temper.



Gambar 2. 6 Rentang perlakuan panas baja (Campbell, 2008)

Kandungan karbon sangat penting untuk kekerasan baja. Karena keuletan menurun dengan meningkatnya kandungan karbon, kandungan karbon dipertahankan sekitar 0,45% berat dibanyak lembaran baja rekayasa. Namun, ketika ketahanan aus diperlukan, misalnya, pada baja perkakas dan baja dies, itu dapat ditingkatkan hingga lebih dari 1,0% berat. Penambahan elemen paduan menggeser hidung diagram TTT ke kanan, memungkinkan bagian yang lebih tebal mengeras atau pendinginan yang kurang drastis. Beberapa baja paduan yang lebih tinggi memiliki diagram TTT yang digeser begitu jauh ke kanan sehingga mereka akan membentuk struktur martensit penuh di bagian yang cukup tebal dengan pendinginan udara hingga suhu kamar. Oleh karena itu, sementara beberapa elemen paduan mungkin tidak secara langsung meningkatkan kekerasan martensit secara signifikan, mereka meningkatkan hardenability, yang merupakan kedalaman struktur mikro permukaan martensit yang dapat diproduksi

dalam baja dengan kandungan karbon tertentu selama pendinginan (Campbell, 2008).

2.4 Sifat mekanik

2.4.1 Kekuatan tarik

Kekuatan tarik adalah pengujian sifat mekanik yang paling umum digunakan. Penggunaan utamanya adalah untuk menentukan sifat-sifat yang terkait dengan desain elastis struktur. Selain itu, uji tarik memberikan informasi tentang plastisitas dan fraktur suatu material. Keuntungan utama dari uji tarik adalah bahwa keadaan tegangan didefinisikan dengan baik, pengujian distandarisasi dengan hati-hati, dan pengujian tersebut relatif mudah dan murah untuk dilakukan. Sifat tarik penting termasuk kekuatan luluh, kekuatan tarik akhir, keuletan, ketahanan, dan ketangguhan.

Sifat tarik material ditentukan dengan menerapkan beban tarik ke spesimen dan mengukur perpanjangan atau ekstensi dalam bingkai beban, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Beban dapat diubah menjadi tegangan teknik (σ) dengan membagi beban dengan luas penampang asli benda uji:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ kg/mm}^2 \quad (2.1)$$

di mana P adalah beban dalam Newton (N) atau pound (lb) dan A_0 adalah luas penampang asli dalam m^2 atau inch^2

Regangan teknik (e) dapat dihitung atau di. dengan membagi perubahan panjang pengukur dengan panjang pengukur asli:

$$e = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

di mana l adalah panjang benda saat setelah pengujian, dan l_0 adalah panjang awal benda uji. Karena regangan memiliki satuan panjang/panjang, maka regangan tidak berdimensi.

Bentuk dan besarnya kurva tegangan-regangan logam tergantung pada komposisinya, perlakuan panas, riwayat deformasi plastis sebelumnya, dan laju regangan, suhu, dan keadaan tegangan yang diberikan selama pengujian. Kurva tegangan-regangan khas untuk logam ditunjukkan pada Gambar 2.7. Parameter yang digunakan untuk menggambarkan kurva tegangan-regangan logam adalah

kekuatan tarik, kekuatan luluh atau titik luluh, persen perpanjangan, dan pengurangan luas. Dua yang pertama adalah parameter kekuatan, dan dua yang terakhir adalah indikasi daktilitas.

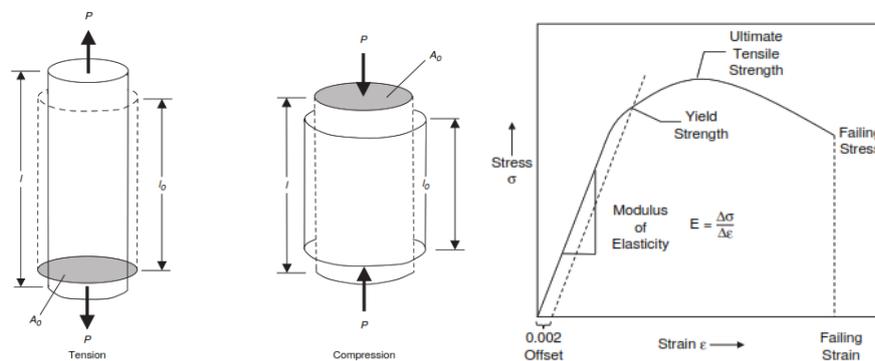
Tegangan untuk menghasilkan deformasi plastis lebih lanjut meningkat dengan meningkatnya regangan saat regangan logam atau kerja mengeras. Selama spesimen dibebani di dalam daerah elastis, regangan dapat dipulihkan sepenuhnya; benda uji akan kembali ke panjang semula ketika beban dihilangkan. Namun, ketika beban melebihi nilai yang sesuai dengan tegangan luluh, spesimen mengalami deformasi plastis dan deformasi permanen saat beban dihilangkan. Volume tetap konstan pada pendekatan teknik yang sangat baik selama deformasi plastis ($A_l = A_o l_o$). Volume berkurang secara seragam di seluruh luas penampang sepanjang panjang pengukurnya saat spesimen memanjang. Awalnya, pengerasan regangan mengkompensasi penurunan luas ini, dan tegangan rekayasa terus meningkat dengan meningkatnya regangan. Akhirnya, bagaimanapun, suatu titik tercapai di mana penurunan luas lebih signifikan daripada peningkatan beban deformasi dari pengerasan regangan. Kondisi ini akan tercapai terlebih dahulu di beberapa titik dalam spesimen, sedikit lebih lemah dari yang lain. Semua deformasi plastis lebih lanjut kemudian terkonsentrasi di wilayah ini, dan spesimen mulai menekuk atau menipis secara lokal. Karena luas penampang sekarang berkurang jauh lebih cepat daripada beban deformasi yang meningkat oleh pengerasan regangan, tegangan rekayasa berkurang sampai terjadi fraktur.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, kekuatan tarik ultimit adalah tegangan maksimum selama pengujian. Meskipun kekuatan tarik adalah nilai yang paling sering dicantumkan dari hasil uji tarik, umumnya bukan nilai yang digunakan dalam desain. Desain logam ulet biasanya didasarkan pada kekuatan luluh, karena sebagian besar desain tidak mendukung deformasi plastis. Namun, kekuatan tarik adalah kriteria desain yang valid untuk logam rapuh yang tidak menunjukkan deformasi plastis yang cukup besar (Campbell, 2008).

Dengan sebagian besar logam, ada transisi bertahap dari perilaku elastis ke plastis, dan titik di mana deformasi plastis dimulai sulit untuk ditentukan dengan presisi. Ketika spesimen dimuat ke dalam bentang plastik dan diturunkan, regangan elastis segera menghilang. Seiring waktu, regangan elastis pulih. Strain yang tersisa adalah strain plastis. Dalam pembebanan uniaksial, tiga kriteria untuk

inisiasi luluh telah digunakan: batas elastis, batas proporsional, dan kekuatan luluh.

Dengan sebagian besar logam, ada transisi bertahap dari perilaku elastis ke plastis, dan titik di mana deformasi plastis dimulai sulit untuk ditentukan dengan presisi. Ketika spesimen dimuat ke dalam bentang plastik dan diturunkan, regangan elastis segera menghilang. Seiring waktu, regangan elastis pulih. Strain yang tersisa adalah strain plastis. Dalam pembebanan uniaksial, tiga kriteria untuk inisiasi luluh telah digunakan: batas elastis, batas proporsional, dan kekuatan luluh.



Gambar 2. 7 Kurva tegangan regangan (Campbell, 2008)

Untuk beberapa bahan, misalnya, tembaga lunak dan besi tuang kelabu, pada dasarnya tidak ada bagian linier dalam kurva tegangan-regangan. Untuk bahan-bahan ini, metode offset tidak dapat digunakan, dan praktik yang biasa dilakukan adalah mendefinisikan kekuatan luluh sebagai tegangan untuk menghasilkan regangan total tertentu, misalnya, $e = 0,005$. Di sisi lain, beberapa logam, terutama baja karbon rendah anil, menunjukkan transisi heterogen lokal dari deformasi elastis ke plastis, menghasilkan titik leleh yang pasti dalam kurva tegangan-regangan. Alih-alih kekuatan luluh diskrit (titik hasil), kekuatan luluh berkisar dari titik luluh bawah ke titik luluh atas. Logam dengan leleh yang terputus-putus memiliki kurva tegangan-regangan dengan transisi bertahap dari perilaku elastis ke plastis dan menghasilkan diagram pemanjangan beban. Beban meningkat terus dengan regangan elastis, turun tiba-tiba, berfluktuasi di sekitar nilai beban yang kira-kira konstan, dan kemudian naik dengan regangan lebih lanjut.

Ukuran daktilitas yang diperoleh dari uji tarik adalah regangan teknik pada saat patah (ϵ_f) dan pengurangan luas saat patah (q). Keduanya biasanya

dinyatakan sebagai persentase, dengan regangan teknik pada kegagalan sering dilaporkan sebagai persen perpanjangan. Kedua sifat ini diperoleh setelah patah dengan menyambung kembali benda uji dan mengukur panjang akhir, l_f , dan penampang akhir benda uji pada patahan, A_f . Persen perpanjangan dapat ditentukan dengan:

$$\% \text{ elongation} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (2.3)$$

di mana l_o adalah panjang pengukur awal, dan l_f adalah panjang akhir bagian pengukur.

Demikian juga, pengurangan luas dapat ditentukan dengan:

$$\% \text{ reduction in area (q)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \quad (2.4)$$

di mana A_o adalah luas awal penampang pengukur, dan A_f adalah luas akhir penampang pengukur pada saat patah.

Karena persen perpanjangan sensitif terhadap panjang pengukur, penting untuk mencatat panjang pengukur yang digunakan saat melaporkan persen perpanjangan. Karena sebagian besar deformasi terkonsentrasi di daerah leher spesimen, nilai e_f akan tergantung pada panjang pengukur, l_o , di mana pengukuran dilakukan. Semakin kecil panjang spesimen gauge, semakin signifikan kontribusi dari neck, dan semakin tinggi nilai e_f (Campbell, 2008).

2.4.2 Kekerasan

Kekerasan adalah ketahanan terhadap penetrasi, dan sebagian besar pengujian kekerasan memaksa bola kecil, piramida, atau kerucut ke dalam spesimen melalui beban yang diberikan. Sebuah angka diperoleh, dan kekerasan seringkali dapat dikorelasikan dengan kekuatan tarik logam. Misalnya, kekuatan tarik baja dalam pound per inci persegi kira-kira 500 kali angka kekerasan Brinell. Hubungan antara kekuatan tarik dan kekerasan untuk baja, kuningan, dan besi cor nodular. Uji kekerasan mudah dilakukan dan memberikan informasi tentang kekuatan luluh suatu material. Singkatnya, bahan keras (indentor) ditempatkan di atas permukaan sampel. Sebuah beban kemudian ditempatkan pada indentor, yang kemudian menembus permukaan spesimen. Ukuran lekukan yang dihasilkan, ukuran deformasi permanen yang dialami material selama pengujian, terkait dengan

kekerasan material; Lekukan kecil menunjukkan kekerasan yang tinggi dan sebaliknya. Angka kekerasan, H, ditentukan ketika beban dibagi dengan area lekukan (kadang-kadang area lekukan yang diproyeksikan). Kekerasan memiliki satuan tegangan, dan karena berhubungan dengan deformasi permanen, H berkorelasi dengan σ_y . Akan tetapi, kondisi tegangan yang timbul selama uji kekerasan berbeda dengan yang terjadi pada uji tarik. Hal ini menyebabkan H lebih besar dari σ_y . Untuk pendekatan yang baik, $H \sim (2,5 \text{ hingga } 3,0) \sigma_y$; pendekatan $H = 3 \sigma_y$ sering digunakan (Campbell, 2008).

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number	
		Side View	Top View			
Brinell	10 mm sphere of Steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$	
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$	
Knoop Microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$	
Rockwell						
A } B } C }	Diamond Cone			60 kg	$R_A =$	100-500 t
B } F }				150 kg	$R_C =$	
G }				100 kg	$R_D =$	
B } F }	1/16 in. diameter steel sphere			100 kg	$R_B =$	130-500 t
F }				60 kg	$R_F =$	
G }				150 kg	$R_G =$	
E	1/8 in. diameter steel sphere			100 kg	$R_E =$	

Gambar 2. 8 Hardness test (Campbell, 2008)

Sejumlah uji kekerasan penting dirangkum dalam Gambar 2.8 Salah satu yang paling banyak digunakan adalah alat uji kekerasan Rockwell. Sebuah beban kecil awalnya diterapkan untuk menentukan kekerasan Rockwell, diikuti oleh beban yang lebih besar. Penetrator didorong ke permukaan, dan ketika beban dilepaskan, dial indicator menunjukkan kekerasan, yang merupakan fungsi dari kedalaman yang dicapai oleh penetrator. Penguji kekerasan Brinell adalah

pengujian lain yang banyak digunakan untuk bagian baja besar, seperti poros engkol, di mana kedalaman penetrasi minimum diperlukan. Uji kekerasan mikro (Vickers dan Knoop) dapat dilakukan pada setiap konstituen struktur mikro, dan dimungkinkan untuk menentukan kekerasan partikel sekecil 0,2 mm (0,007 in.).

2.4.3 Impak

Patah getas dapat didefinisikan sebagai patahan yang terjadi pada tegangan di bawah kekuatan luluh penampang netto, dengan deformasi plastis yang sangat kecil dan penyerapan energi yang minimal. Fraktur rapuh sangat berbahaya karena terjadi secara tiba-tiba, dengan sedikit atau tanpa peringatan. Sejak patah getas dapat mengakibatkan kerugian ekonomi yang serius dan hilangnya nyawa, banyak usaha telah dikeluarkan dalam mengembangkan metodologi untuk menghindari patah getas.

Sifat destruktif dari patah getas secara dramatis dicontohkan oleh kegagalan kapal Liberty selama Perang Dunia II di mana USS Schenectady pecah menjadi dua saat duduk di dermaga. Sebuah konstruksi semua-las digunakan untuk lambung daripada desain terpaku tradisional untuk memproduksi kapal untuk upaya perang dengan cepat. Dari 2.700 kapal Liberty yang dibangun, sekitar 400 mengalami patah tulang, 90 di antaranya dianggap parah. Dalam 20 di antaranya, lambungnya retak menjadi dua. Kegagalan tersebut disebabkan oleh tiga faktor: (1) cacat las yang mengandung cacat seperti retak, (2) konsentrasi tegangan pada penutup palka persegi (di mana sebagian besar awal retakan berada), dan (3) baja yang digunakan dalam konstruksinya relatif rapuh saat ini. Retak berkurang secara signifikan ketika penutup palka dipasang kembali dengan tulangan bulat dan struktur dengan paku keling menggantikan beberapa struktur yang dilas. Bahkan jika retakan dimulai pada las yang salah, retakan itu akan tersangkut di lubang paku keling sebelum mencapai dimensi bencana.

Setelah perang, G.R. Irwin dan stafnya di Laboratorium Riset Angkatan Laut meletakkan dasar untuk apa yang sekarang dikenal sebagai mekanika rekahan. Meskipun patah getas tidak terjadi hari ini dengan frekuensi dulu; itu masih bisa menjadi masalah jika desain dan praktik manufaktur yang tepat tidak digunakan. Kapal Liberty hanyalah salah satu contoh patahan rapuh yang hebat. Ini juga merupakan masalah yang berulang di pesawat, jembatan, roda kereta api, dan alat berat lainnya.

Dalam skenario tipikal untuk patah getas, cacat kecil terjadi selama fabrikasi atau ketika bagian ditempatkan dalam pelayanan. Sayangnya, ukuran cacat awal sangat kecil sehingga sering tidak terdeteksi. Selama layanan, cacat awalnya menyebar secara stabil di bawah beban statis atau berulang, sering dibantu oleh korosi. Ketika aliran mencapai ukuran kritis, patahan terakhir terjadi secara tiba-tiba, bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan suara.

➤ Fraktur rapuh umumnya datar, dengan sedikit atau tanpa bukti leher terlokalisasi. Ketika retak pada suhu kamar, kaca kristal dan keramik retak dengan cara yang rapuh, tanpa bukti deformasi plastik yang cukup besar. Patah getas juga dapat terjadi pada logam kubus berpusat badan (bcc) dan heksagonal rapat (hcp) tetapi tidak pada logam kubus berpusat muka (fcc) kecuali penggetasan batas butir telah terjadi. Namun, bahkan logam yang paling rapuh pun akan menunjukkan sedikit bukti deformasi plastis. Inisiasi retak biasanya terjadi pada cacat kecil, seperti cacat, takik, atau diskontinuitas, yang bertindak sebagai konsentrasi tegangan, dan dengan cepat menyebar melalui logam. Karena permesinan, pendinginan, penggetasan hidrogen, atau korosi tegangan, retak dapat menyebabkan kegagalan getas. Bahkan logam ulet dapat gagal dengan cara yang rapuh pada suhu rendah, di bagian tebal, pada tingkat regangan tinggi seperti pembebanan benturan, atau ketika ada cacat yang sudah ada sebelumnya. Kegagalan rapuh biasanya dimulai karena pembelahan yang terjadi dengan putusannya ikatan atom. Keruntuhan getas dicirikan oleh perambatan retak yang cepat, dengan pengeluaran energi yang lebih sedikit daripada patahan ulet. Faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan getas adalah:

- Kekuatan hasil tinggi yang memungkinkan penyimpanan tingkat energi elastis tinggi.
- Temperatur rendah yang menyebabkan transisi ulet menjadi rapuh pada logam bcc.
- Ukuran butir besar yang menimbulkan stres dari tumpukan dislokasi.
- Tingkat regangan tinggi yang tidak memungkinkan waktu untuk redistribusi tegangan.
- Karbida kasar atau inklusi lain yang rentan terhadap retak.
- Takik dalam yang menciptakan kendala di ujung retak.
- Bagian tebal yang menyebabkan pembebanan regangan bidang.

Fraktur belahan adalah mode patah getas. Fraktur belahan dicirikan oleh rekahan planar yang mengubah bidang dengan membentuk langkah-langkah diskrit. Sebuah pola sungai terbentuk pada batas butir, dimana bidang pembelahan satu butir tidak sejajar dengan bidang butir yang berdekatan, perbedaan tersebut diakomodasi oleh serangkaian langkah. Pola sungai akhirnya berkurang saat retakan menyebar dan mengadopsi bidang pembelahan butir baru sebelum terbentuk kembali pada batas butir berikutnya.

Berbeda dengan patah getas, kegagalan ulet dikaitkan dengan deformasi plastis yang besar. Sebagai akibat dari deformasi plastis, sering terjadi necking atau distorsi yang terlokalisir. Kegagalan ulet terjadi dengan merobek logam dengan pengeluaran energi yang sangat baik. Fraktur ulet dapat mengambil beberapa bentuk. Dalam logam polikristalin yang sangat ulet, seperti emas atau timah, mereka dapat diregangkan ke titik sebelum kegagalan, biasanya disebut sebagai fraktur ulet. Pada sebagian besar logam lunak, kegagalan terjadi oleh nukleasi dan pertumbuhan microvoids. Microvoids terbentuk pada konsentrasi tegangan dan paling sering dimulai oleh partikel fase kedua, diikuti oleh pembentukan rongga dan pertumbuhan di sekitar partikel atau oleh retakan partikel. Microvoids kemudian bergabung dan tumbuh untuk menghasilkan void yang lebih besar sampai area yang tersisa menjadi terlalu kecil untuk menopang beban, dan kegagalan akhir terjadi. Ligamen antara rongga-rongga tersebut gagal dalam geser pada bidang tegangan geser tertinggi pada 45 terhadap sumbu tarik. Karena mekanisme slip, shear lip sering terjadi pada sudut mendekati 45 terhadap tegangan tarik yang diterapkan untuk membentuk tampilan fraktur cup-and-cone yang terkenal.

Fraktur ulet hanya terjadi selama material mengalami regangan; ketika deformasi berhenti, retakan berhenti merambat. Ada deformasi plastis rendah untuk mengumpulkan retakan. Di sisi lain, ketika retak getas dimulai, ia merambat melalui material dengan kecepatan mendekati kecepatan suara, tanpa kemungkinan untuk menahannya. Hal ini membuat patah getas sangat berbahaya; biasanya tidak ada peringatan fraktur yang akan datang.

Beberapa logam bcc dan hcp, khususnya baja, menunjukkan transisi ulet ke getas ketika dibebani di bawah tumbukan. Pada suhu tinggi, energi impak tinggi, dan mode kegagalan bersifat ulet, sedangkan pada suhu rendah, energi impak yang diserap rendah, dan mode kegagalan berubah menjadi patah getas. Suhu transisi sensitif terhadap komposisi paduan dan struktur mikro. Misalnya,

mengurangi ukuran butir baja menurunkan suhu transisi. Tidak semua logam menunjukkan transisi ulet ke getas. Mereka dengan struktur fcc, seperti aluminium, tetap ulet bahkan untuk suhu kriogenik.

Perambatan retak adalah transgranular (yaitu, melalui butir) atau intergranular (yaitu, sepanjang butir). Pada suhu kamar, batas butir biasanya lebih kuat daripada butir itu sendiri, sehingga perpatahan biasanya terjadi transgranular. Kegagalan intergranular pada suhu kamar sering menyiratkan beberapa perilaku embritting, seperti pembentukan film batas butir rapuh atau pemisahan pengotor atau inklusi pada batas butir. Namun, pada suhu yang cukup tinggi untuk merayap untuk mendominasi, batas butir menjadi lebih lemah dari butir itu sendiri, dan mode kegagalan intergranular adalah standar (Campbell, 2008).

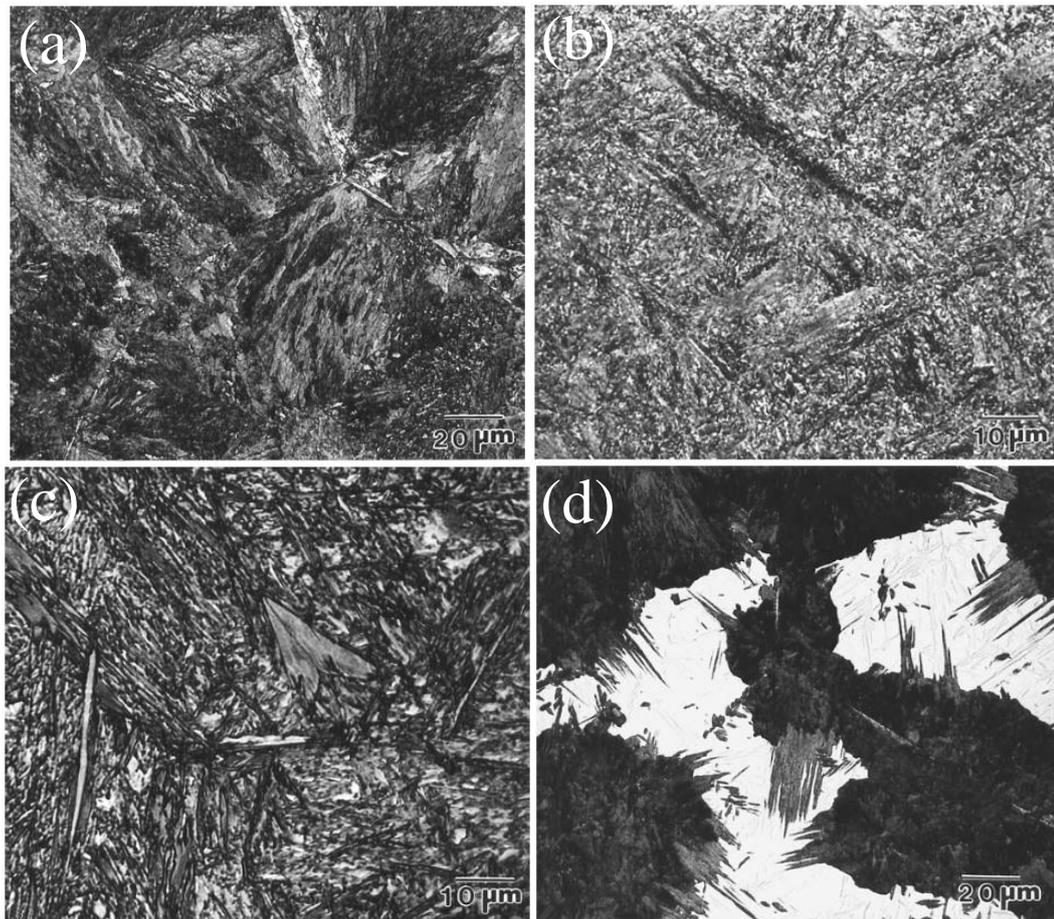
2.5 Struktur mikro

Setiap ahli metalografi harus mengetahui dan memahami berbagai struktur mikro dalam baja dan besi cor turunan. Bagian penting dari pekerjaan seorang ahli metalografi adalah menafsirkan apa yang mereka lihat di bawah mikroskop dan membuat penilaian dan rekomendasi yang tepat berdasarkan pengamatan ini. Seorang metalografi bukan hanya "penggosok besi", seperti yang dirasakan banyak orang di luar profesi. Seorang ahli metalografi yang efektif perlu memiliki pemahaman dasar tentang fondasi fisik metalurgi besi. Prinsip dasar metalurgi fisik besi adalah bahwa sifat baja dan besi tuang dikendalikan oleh struktur mikro dan komposisi kimianya. Tugas ahli metalografi adalah mendefinisikan dan mengkarakterisasi struktur mikro, dan tugas ahli kimia adalah menentukan komposisi (Bramfitt & Benscoter, 2003).

Sebagai contoh keseragaman mikrostruktur, Gambar 2.9 menunjukkan empat mikrostruktur yang berbeda, semuanya berasal dari baja yang sama dengan meningkatkan laju pendinginan, di American Iron and Steel Institute/Society of Automotive Engineers (AISI/SAE) baja 1080 (a) baja yang mengandung 0,79% C, 0,90% Mn, dan 0,25% Si).

Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (a) adalah *pearlite* (konstituen yang terdiri dari dua fase, *ferrite* dan *sementite*). Konstituen adalah fasa atau kombinasi fasa yang terjadi dalam konfigurasi karakteristik dalam struktur mikro. Fasa adalah homogen dan bagian yang berbeda dari sistem material. Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (b) adalah bainit (konstituen juga terdiri dari dua fasa, ferrite dan sementite, tetapi dengan morfologi

yang sama sekali berbeda). Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (c) adalah martensite (konstituen yang terdiri dari ferrite jenuh dengan karbon). Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (d) adalah campuran pearlite, bainite, dan martensite (Bramfitt & Benscoter, 2003).



Gambar 2. 9 Struktur Mikro baja AISI 1080, (a) Full pearlite (b) Full bainite (c) Full martensite (d) Pearlite, bainite dan martensite. (Bramfitt & Benscoter, 2003)

2.5.1 Diagram fasa Fe-Fe₃C

Konstituen adalah fase atau kombinasi fase yang terjadi dalam konfigurasi khas dalam struktur mikro. Fase adalah bagian yang homogen dan berbeda dari sistem material. Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9(a) adalah perlit (konstituen yang terdiri dari dua fase, ferit, dan sementit). Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9(b) adalah bainit (konstituennya juga terdiri dari dua fase, ferit, dan sementit, tetapi dengan morfologi yang sama sekali berbeda). Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9(c) adalah martensit (konstituen

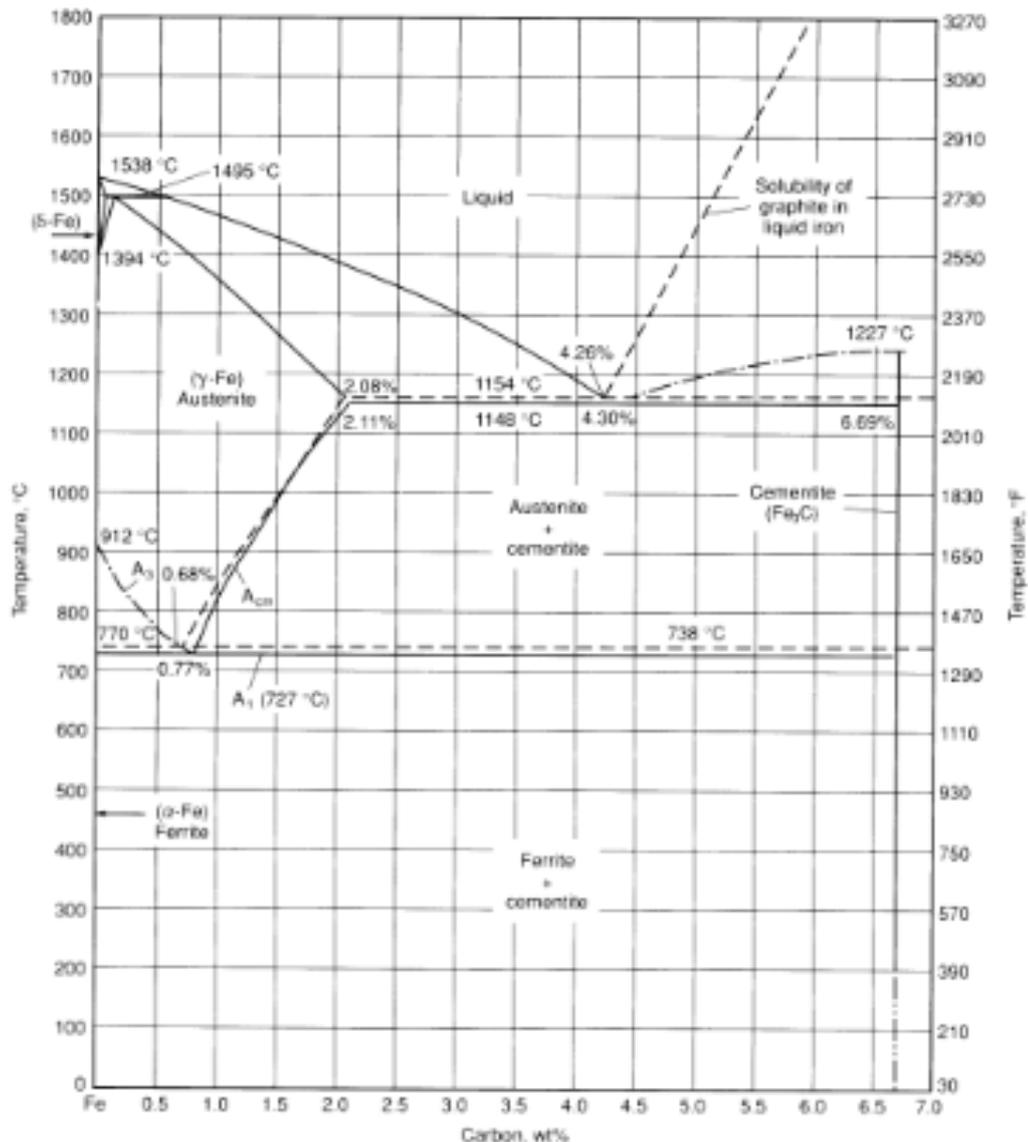
yang terdiri dari ferit jenuh dengan karbon). Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.9(d) merupakan campuran dari perlit, bainit, dan martensit (Bramfitt & Benschoter, 2003).

Sebelum membahas diagram, kita harus terlebih dahulu memahami apa yang terdiri dari mikrostruktur baja. Istilah "struktur mikro" berhubungan dengan struktur keseluruhan, seperti yang biasanya diamati dalam mikroskop, yang umumnya terdiri dari satu atau lebih fase diskrit. Fase-fase ini adalah blok bangunan dari berbagai konstituen yang membentuk struktur mikro, dan setiap fase, secara tunggal atau dalam kombinasi dengan fase lain, memberikan sifat khusus pada baja, misalnya, kekerasan, kekuatan, ketangguhan, dan keuletan, atau karakteristik khusus, seperti machinability dan formability. Contoh struktur mikro diberikan pada Gambar 2.9.

Hanya ada tiga fase yang biasanya ada dalam baja: ferit, austenit, dan sementit (grafit juga merupakan fase yang ditemukan pada besi tuang). Sebuah fase, dalam hal ini, hanya bisa eksis menurut diagram fase besi-karbon. Beberapa fitur penting dari diagram fase besi-karbon dibahas di sini. Pertama, ada dua set batas fase yang ditumpangkan pada Gambar 2.10. Satu set mewakili diagram fase besi-sementit (Fe_3C) (garis padat), dan set lainnya mewakili diagram fase besi-grafit (garis putus-putus). Adanya dua set batas fase adalah bahwa fase stabil (keseimbangan) untuk karbon dalam sistem besi-karbon adalah grafit, sedangkan sementit adalah fase metastabil. Jika diberikan waktu yang cukup, fase metastabil dapat berubah menjadi fase stabil. Sebagai contoh, sementit (Fe_3C) dapat terurai dari waktu ke waktu (umumnya, dalam waktu yang sangat lama) menjadi besi dan grafit (karbon). Namun, sementit tetap menjadi fase "stabil" dalam baja untuk semua tujuan praktis.

Diagram fase besi karbida (sementit) berkisar dari 0 hingga 6,7% C, kandungan karbon besi-sementit. Diagram fase besi-grafit berkisar dari 0 hingga 100% C (diagram pada Gambar 2.10 tidak meluas hingga 100% C karena tidak ada fase penting selain grafit untuk dipertimbangkan di luar 6,7% C). Saat membahas baja, diagram fase besi-sementit dapat diterapkan, dan untuk besi tuang, kedua diagram dapat diterapkan. Umumnya, baja mengandung kurang dari sekitar 2% C, dan besi tuang mengandung lebih dari 2% C. Meskipun baja dan besi tuang mengalami pemadatan pada beberapa tahap sejarahnya, pembahasan tentang efek pemadatan pada struktur mikro dicadangkan sampai akhir Bab ini. Sebagian besar produk baja dikerjakan lebih lanjut dengan pengerjaan panas dan

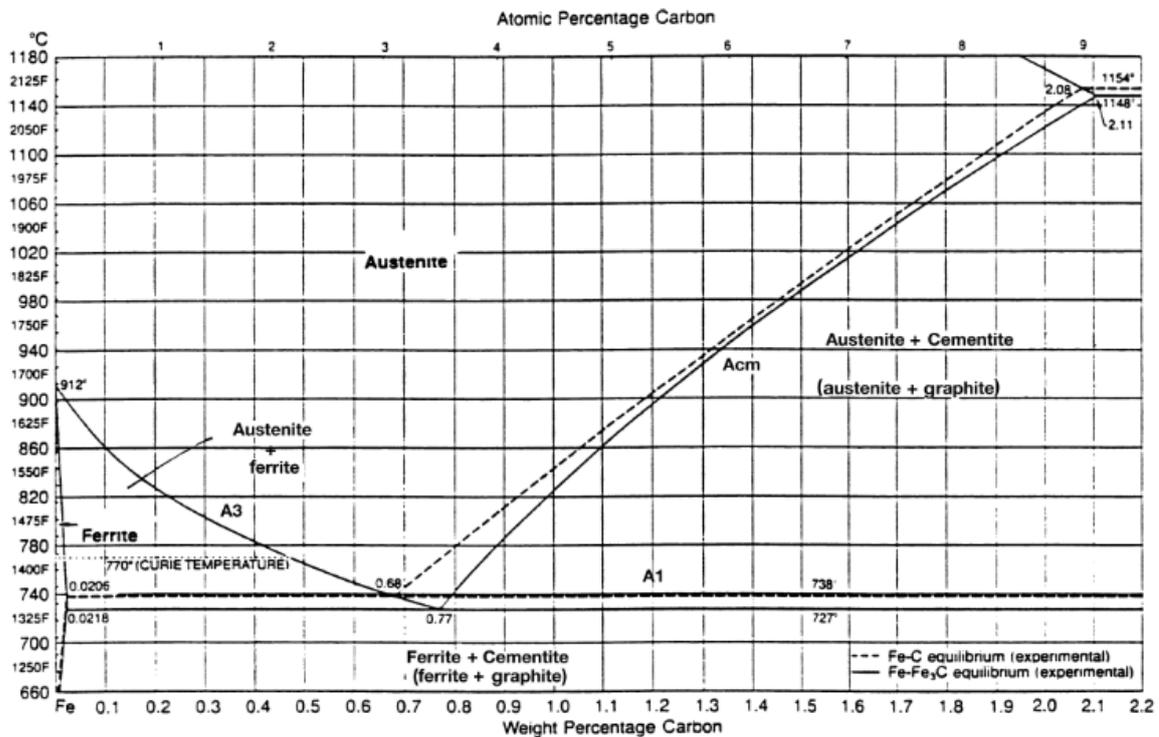
perlakuan panas untuk mengubah mikrostruktur cor dan meningkatkan sifat baja. Di sisi lain, besi cor paling sering digunakan secara komersial dalam keadaan as-cast.



Gambar 2. 10 Diagram fase besi-karbon. Garis padat menunjukkan Fe-Fe₃ diagram C; garis putus-putus menunjukkan diagram besi-grafit. (Bramfitt & Benscoter, 2003)

Berbagai daerah atau bidang di mana fase stabil ditunjukkan pada Gambar 2.10. Misalnya, medan untuk tiga fase dasar dalam baja, austenit, sementit, dan ferit, dapat ditempatkan pada diagram fase besi-sementit. Austenit ada di atas medan fase besar yang membentang hingga tepat di atas 2% C dan dalam kisaran suhu di atas 727 °C (1340 °F) dan di bawah 1495 °C (2713 °F). Sementit ada

sebagai komposisi tunggal pada 6,7% C. Sementit ada hingga 1227 °C (2240 °F), yang merupakan suhu lelehnya. Istilah "ferit" muncul dua kali pada diagram sementit besi: sebagai ferit delta pada suhu tinggi 1394 hingga 1538 °C (2340 °F) hingga 2800 °F) dan sebagai alfa ferit pada suhu di bawah 912 °C (1675 °F). Struktur mikro ferit dalam baja mengacu pada suhu yang lebih rendah dan ferit delta pada suhu yang lebih tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, pada dasarnya besi murni mengandung unsur ferit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, ferit dapat mengandung hingga sekitar 0,02% C. Dengan demikian, ferit hanya dapat mengandung sejumlah kecil karbon berbeda dengan austenit, yang dapat mengandung hingga 2,1% C (yaitu, hingga 100 kali lebih banyak karbon daripada ferit).



Gambar 2. 11 Diagram Fasa Eutectoid Fe-Fe₃C % karbon. (Bramfitt & Benschoter, 2003)

Secara historis, beberapa batas fase yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 diberi label sebagai A1, A3, dan Acm ("A" dari kata Prancis arret, yang berarti penangkapan). Jika seseorang mendinginkan baja, batas-batasnya menjadi Ar1, Ar3, dan Arcm ("r" dari kata Prancis refroidissement, yang berarti pendinginan), dan jika seseorang memanaskan, batas-batasnya menjadi Ac1, Ac3, dan Accm ("c" dari kata Prancis chauffage, yang berarti pemanasan). Seringkali, "e" digunakan untuk mewakili keseimbangan, seperti Ae1, Ae3, dan Aecm. Juga, pada Gambar

2.11 ada titik yang sangat penting pada diagram pada 0,77% C dan 727 °C (1340 °F). Titik ini disebut titik eutektoid. (Titik eutektoid adalah komposisi fase padat yang mengalami transformasi menjadi dua atau lebih fase padat lainnya setelah pendinginan). Ada titik lain pada 4,3% C dan 1148 °C (2100 °F) pada diagram besi-karbon (lihat Gambar 2.10). Titik terakhir ini merupakan titik eutektik. (Titik eutektik adalah komposisi fase cair yang mengalami transformasi menjadi dua atau lebih fase padat setelah pendinginan.) Transformasi ini penting dalam baja dan besi tuang dan dijelaskan secara rinci nanti dalam bab ini. Pada Gambar. 2.11, baja dengan kandungan karbon kurang dari 0,77% disebut baja hypoeutectoid, dan di atas 0,77% C, baja hypereutectoid (awalan hypo berarti di bawah, dan awalan hyper berarti di atas).

Diagram fasa besi-karbon pada Gambar 2.11 hanya mewakili paduan besi-karbon biner. Ini tidak berlaku untuk paduan besi-karbon yang mengandung unsur-unsur lain, seperti mangan, silikon, nikel, kromium, molibdenum, vanadium, dan sebagainya. Ketika ditambahkan ke paduan besi-karbon, salah satu elemen ini akan memperluas atau menyusutkan medan fase yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Dengan demikian, diagram fase terner atau kuartener diperlukan untuk sistem paduan dengan tiga atau empat elemen paduan. Namun, untuk semua tujuan praktis, diagram besi-sementit dapat digunakan sebagai panduan penting untuk asal usul struktur mikro dalam baja. Namun, skala waktu tidak terkait dengan diagram fase karena data yang digunakan untuk membuat diagram dibuat dalam kondisi yang mendekati kesetimbangan (laju pemanasan/pendinginan yang berkepanjangan). Berangkat dari kondisi mendekati kesetimbangan, misalnya, memanaskan sepotong baja hingga 1000 °C (1832 °F) dan mendinginkannya dalam air, memerlukan pemahaman tentang kinetika transformasi, yang akan dibahas pada bagian selanjutnya tentang menjelaskan konsep TI. Tapi pertamanya, kita harus memahami diagram fase penting yang berlaku untuk perlakuan panas baja (Bramfitt & Benschoter, 2003).

Untuk besi murni, seseorang harus mengikuti sisi paling kiri dari diagram pada Gambar 2.11. Pada suhu di atas 912 °C (1675 °F), fase stabil besi adalah besi gamma, suatu bentuk besi kubik berpusat muka (FCC). Di bawah 912 °C (1675 °F), besi alfa adalah fase stabil dengan struktur kristal body center cubic (BCC). Dalam transformasi dari besi gamma ke alfa atau sebaliknya, besi telah mengalami perubahan alotropik, yaitu perubahan struktur kristal. Perubahan alotropik ini penting karena merupakan bagian integral dari fondasi untuk

transformasi fasa pada baja. Sifat besi gamma dan besi alfa sangat berbeda. Struktur kristal yang berpusat pada permukaan memberikan sifat yang berbeda dari struktur kristal yang berpusat pada tubuh. Sebuah sketsa sederhana dari sel unit FCC primer ditunjukkan pada Gambar. 2.12. Orang dapat menganggapnya sebagai kubus dengan atom besi di setiap sudut dan satu di tengah setiap permukaan kubus. Di sini, atom besi juga berada di sudut kubus, seperti pada struktur FCC, tetapi atom besi menempati posisi di pusat kubus dalam struktur pusat tubuh. Tentu saja, kristal besi terdiri dari jutaan sel yang tersusun dalam susunan yang teratur dalam tiga dimensi. Kristal ini adalah butiran yang diamati di mikroskop.

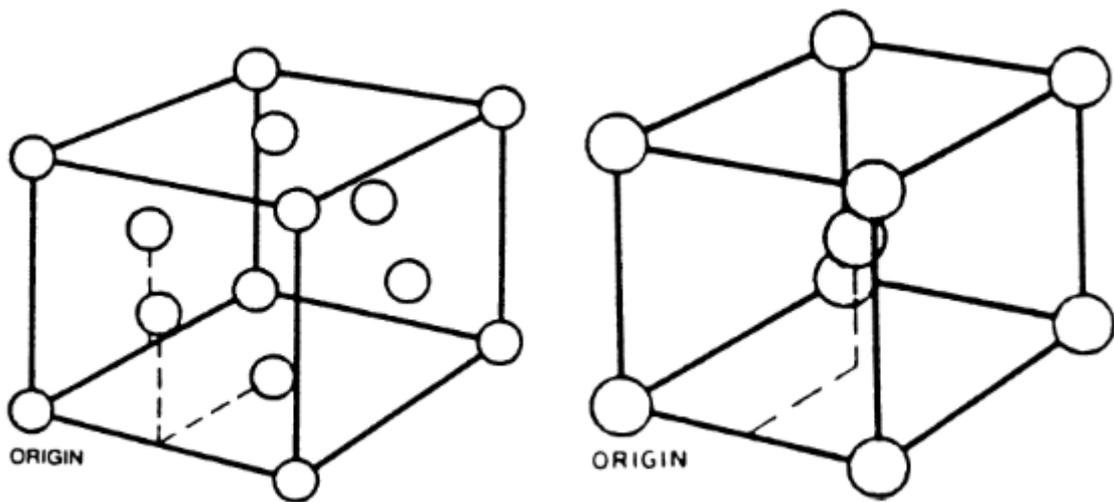
Aspek penting dari perubahan alotropik besi adalah perubahan volume yang menyertainya. Instrumen sensitif dapat mendeteksi perubahan volume ini. Dilatometer, instrumen yang ditemukan di sebagian besar laboratorium penelitian terkait baja, didasarkan pada pengukuran perubahan volume selama transformasi fase. Misalnya pada transformasi dari besi gamma ke besi alfa, pada pendinginan terjadi pemuaihan, dan pada transformasi balik (pemanasan) terjadi kontraksi.

Jika kita sekarang melihat paduan besi-karbon, kita menemukan bahwa situasinya berbeda dari besi murni. Fase FCC disebut austenit dalam paduan besi-karbon, dan fase BCC disebut ferit (alfa ferit). Istilah "austenit" dinamai Sir William Chandler Roberts-Austen, seorang ahli metalurgi Inggris awal, dan istilah "ferit" berasal dari kata Latin Ferrum, untuk besi.

Situs interstisial adalah ruang antara atom besi dalam kisi BCC dan FCC. Atom karbon memiliki diameter atom yang jauh lebih kecil daripada besi dan dapat masuk ke beberapa tempat. Dengan demikian, karbon adalah elemen interstisial (elemen penting lainnya adalah nitrogen). Bila suatu unsur menempati suatu tempat dalam kisi besi, hasilnya disebut larutan padat. Dengan elemen interstisial, paduan adalah larutan padat interstisial. Larutan padat substitusi terbentuk ketika sebuah atom menggantikan atom besi dalam kisi FCC atau BCC. Unsur-unsur pengganti seperti nikel, kromium, dan mangan memiliki diameter atom yang mirip dengan besi. Solusi padat interstisial dan tersubstitusi membentuk dasar untuk desain baja dengan sifat dan karakteristik tertentu. Austenite \leftrightarrow Ferrite + Cementite

Perlit adalah nama yang diberikan untuk konstituen dua fase ferit dan sementit yang dihasilkan selama pendinginan lambat reaksi ini. Banyak lembaran baja dan besi tuang mengandung perlit dalam struktur mikronya. Paduan besi-

karbon yang mengandung 0,77% C adalah paduan eutektoid murni; itu berubah menjadi 100% perlit. Contoh struktur mikro yang terdiri dari 100% perlit ditunjukkan pada Gambar 2.9(a). Struktur mikro ini dihasilkan oleh pendinginan baja eutektoid yang berkepanjangan. Di bawah kondisi pemanasan/pendinginan yang lama, diagram fasa besi-karbon dapat digunakan untuk menentukan mikrostruktur yang dihasilkan. Struktur perlit yang lengkap terkadang diinginkan pada baja komersial, seperti pada baja rel dan kawat piano, karena kekerasan, ketahanan aus (rel), dan kekuatan tinggi (kawat piano). Baja dengan kandungan karbon di bawah 0,77%, diproses pada kondisi mendekati kesetimbangan (pendinginan lambat, dll.), akan memiliki mikrostruktur ferit dan perlit.



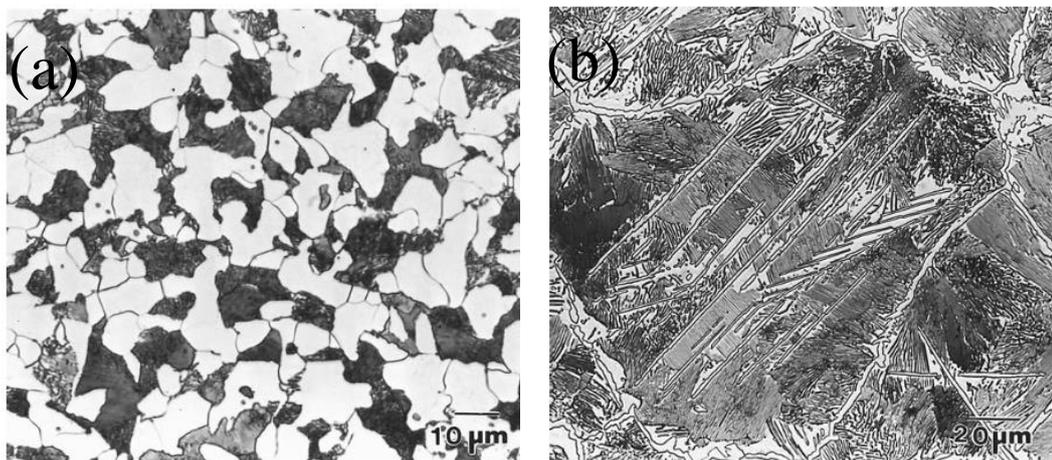
Gambar 2. 12 Fasa FCC dan BCC (Bramfitt & Benscoter, 2003)

Dalam baja 0,4% C (baja AISI/SAE 1040) yang dijelaskan sebelumnya, hanya austenit yang tersisa pada 727 °C (1340 °F) yang berubah menjadi perlit. Ferit pro eutektoid yang terbentuk di atas 727 °C (1340 °F) pada dasarnya tetap tidak berubah melalui transformasi eutektoid ini. Seperti disebutkan sebelumnya, baja di sebelah kiri titik eutektoid (kandungan karbon kurang dari 0,77%) disebut baja hipoeutektoid, dan baja di atas 0,77% C disebut baja hipereutektoid. Baja hypoeutektoid yang dijelaskan sebelumnya akan memiliki struktur mikro yang mirip dengan yang ditunjukkan pada Gambar 2.13(a). Baja ini memiliki struktur mikro yang terdiri dari sekitar 50% ferit (konstituen yang tampak putih) dan 50% perlit (konstituen yang tampak gelap).

Selanjutnya, transformasi pendinginan baja hypereutectoid dari medan fase austenitik pada 1000 °C (1832 °F) ke suhu kamar dibahas. Misalnya, paduan besi-karbon biner hypereutectoid yang representatif adalah besi Fe-1,4% C. Dari

gambar 2.11, pada pendinginan dari 1000 hingga 960 °C (1832 hingga 1760 °F), struktur mikronya tetap 100% austenit. Pada 960 °C (1760 °F), Arcm, sementit pro-eutektoid, mulai terbentuk. Pada suhu eutektoid 727 °C (1340 °F), austenit yang tersisa diubah menjadi perlit melalui reaksi eutektoid. Struktur mikro untuk paduan hypereutektoid ini ditunjukkan pada Gambar 2.13(b). Matriks perlit terlihat gelap, dan sementit pro-eutektoid tampak terang pada batas butir austenit. Ada juga beberapa pelat sementit yang tumbuh di dalam butir austenit selama transformasi. Ini adalah struktur yang tidak diinginkan karena fase sementit yang menantang pada batas butir memberikan kerapuhan baja. Namun, beberapa baja paduan rendah hypereutektoid sangat berguna. Seperti yang ditunjukkan pada bab berikutnya, seseorang dapat mencapai sifat yang diinginkan pada baja hipereutektoid. Fase karbida diubah menjadi partikel bola kecil ketika struktur bola dikembangkan (Bramfitt & Benscoter, 2003).

Mereka didistribusikan secara merata dalam matriks ferit lunak terus menerus. Bab berikutnya mengilustrasikan bahwa manipulasi struktur mikro seperti itu penting untuk mengembangkan baja dan besi tuang yang sehat secara komersial. Ahli metalografi tidak hanya harus memahami asal usul struktur mikro tetapi juga harus memahami bagaimana struktur mikro dapat diubah menjadi bentuk yang lebih diinginkan dengan perlakuan panas. Spheroidization berarti bentuk itu.

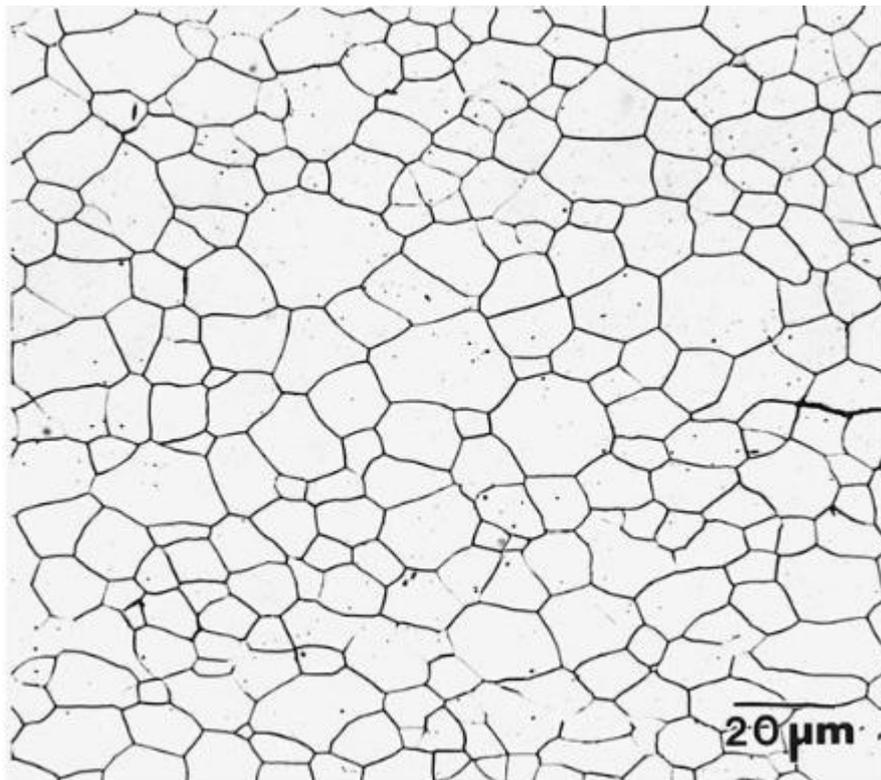


Gambar 2. 13 (a) Baja AISI/SAE 1040 hypoeutektoid menunjukkan ferit dan perlit (b) Paduan biner hipereutektoid Fe-1,4% C. (Bramfitt & Benscoter, 2003)

2.5.2 Konstituen mikro dalam baja

Bagian sebelumnya berfokus pada bagaimana suatu konstituen dapat terbentuk tetapi tidak menggambarkan karakteristik morfologisnya (Bramfitt & Benscoter, 2003).

Ferit. Baja umumnya mengandung fase ferit. Sebuah mikrograf baja karbon rendah dengan struktur mikro feritik penuh ditunjukkan pada Gambar 2.14. Struktur dalam mikrograf ini terdiri dari ratusan butir ferit individu yang dipisahkan oleh batas butir, ditunjukkan sebagai batas gelap setiap butir. Masing-masing butir ini adalah kristal tunggal ferit. Batas butir memisahkan butir ferit dari satu orientasi kisi kristal dari butir ferit dengan orientasi lain. Butir atau kristal ferit memiliki struktur kristal BCC. Struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 adalah tipikal baja karbon sangat rendah.



Gambar 2. 14 Struktur mikro ferit dalam baja 0,02% C. (Bramfitt & Benscoter, 2003)

Dalam baja, ferit biasanya terbentuk pada batas butir austenit sebelumnya selama pendinginan medan fase austenit. Bentuk batas butir ferit disebut ferit proeutektoid dan terjadi pada baja hipoeutektoid. Gambar 2.15(b) menunjukkan ferit

proeutektoid (fase jaringan tergores putih) dalam baja karbon polos AISI/SAE 1060. Matriks tergores gelap adalah perlit.

Ada morfologi yang berbeda dari batas butir ferit. Dua yang paling umum adalah bentuk kotak-kotak, agak equiaxed, dan acicular, atau bentuk seperti jarum, mirip dengan ferit Widmanstätten. Bentuk balok ditunjukkan sebelumnya pada Gambar 2.15(b), dan bentuk batas butir acicular ditunjukkan pada Gambar 2.15(c). Fase etsa putih seperti jarum adalah ferit dalam struktur mikro ini, dan matriks etsa abu-abu adalah martensit. Ferit acicular (ditunjukkan oleh panah) telah tumbuh dari batas butir austenit sebelumnya.

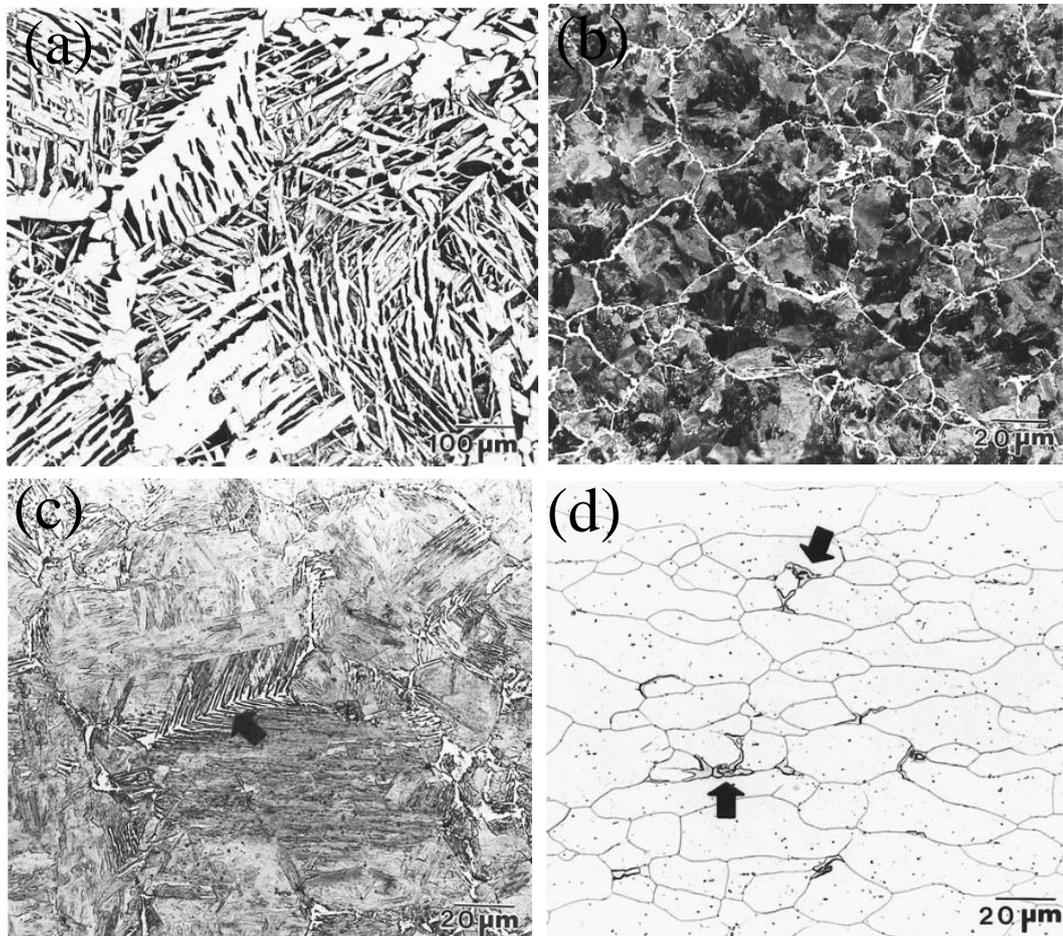
Sementit adalah besi karbida, senyawa besi dan karbon, Fe_3C . Nama sementit berasal dari sementasi baja, proses awal yang digunakan untuk menghasilkan baja karbon tinggi dengan cara karburasi. Karbon diserap ke dalam baja dengan mengemasnya dalam arang dan memanaskannya hingga suhu tinggi. Dalam baja, sementit tidak pernah hadir sebagai 100% dari struktur mikro. Ini dapat hadir sebagai residu dalam ferit; sebagai konstituen batas butir pada sambungan butir ferit pada baja karbon rendah; sebagai fase batas butir kontinu (sementit pro eutektoid) pada baja karbon tinggi, baja hipereutektoid; sebagai partikel bulat dalam baja spheroidized; atau berasosiasi dengan ferit sebagai penyusun perlit, bainit, dan martensit temper. Gambar 2.15(d) menunjukkan mikroskop sementit sebagai fase batas butir pada baja karbon rendah. Sementit umumnya terbentuk di persimpangan butir ferit. Matriksnya adalah ferit.

Sementit itu tergores sebagai fase abu-abu terang pada contoh sebelumnya (menggunakan picral sebagai etsa). Gambar 2.16(a) menunjukkan sementit pro eutektoid atau sementit batas butir (fase batas butir tampak abu-abu muda) pada baja hipereutektoid. Matriksnya adalah perlit.

Sementit adalah senyawa kompleks dan rapuh. Beberapa baja dan besi tuang mengandalkan keberadaan sementit untuk memberikan ketahanan aus, misalnya, pada baja untuk rel kereta api dan bantalan bola dan pada besi cor paduan untuk kumparan. Beberapa baja dirancang untuk mengandung sementit dalam jumlah minimal, misalnya baja lembaran otomotif yang sangat rendah karbon. Baja yang terakhir membutuhkan keuletan dan kemampuan bentuk, dan keberadaan sementit cenderung menurunkan sifat-sifat ini.

Perlit merupakan konstituen yang mengandung ferit dan sementit. Menurut diagram keseimbangan besi-karbon, kandungan karbon perlit adalah 0,77%. Perlit dibentuk oleh reaksi eutektoid, seperti yang dijelaskan sebelumnya. Gambar

2.16(b) menunjukkan mikrograf perlit. Setelah etsa dengan pikrat 4%, sementit muncul sebagai fase abu-abu muda, dan ferit berwarna putih. Hal ini disebabkan oleh relief permukaan yang dikembangkan oleh proses etsa kimia (Bramfitt & Benschoter, 2003).

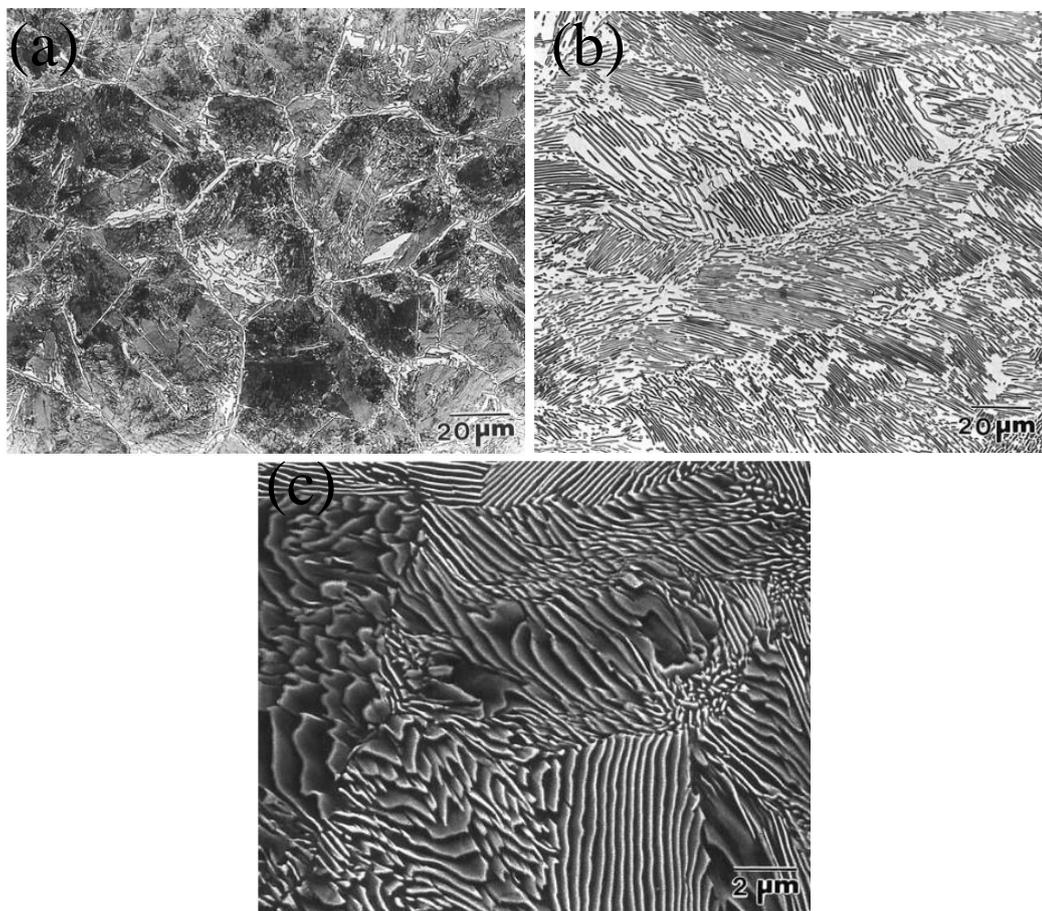


Gambar 2. 15 (a) Ferrite Widmanstätten baja AISI/SAE 1025 berbutir kasar, (b) Ferrite proeutektoid pada batas butir austenit baja AISI/SAE 1060 yang didinginkan oli, (c) Acicular ferrite berinti pada batas butir austenite baja AISI/SAE 1060. Matriks adalah martensit 2%. (d) Sementit (panah) pada batas butir ferit dalam baja lembaran 0.04% C anil batch. (Bramfitt & Benschoter, 2003)

Perlit umumnya memiliki ciri morfologi pipih atau berselang-seling. Pelat sementit dan ferit yang berselang-seling ditunjukkan lebih jelas pada perbesaran yang lebih tinggi pada Gambar 2.16(c) (foto ini diambil dengan mikroskop elektron pemindaian). Berdasarkan volume, perlit terdiri dari sekitar 13% sementit dan 87% ferit. Struktur pipih perlit muncul dari pertumbuhan berdampingan (atau pertumbuhan berpasangan) dari dua fase selama transformasi austenit. Transformasi perlit tergantung pada difusi karbon dalam austenit (atau pergerakan

karbon dalam kisi besi) selama reaksi eutektoid. Dengan demikian, perlit terbentuk melalui proses difusi.

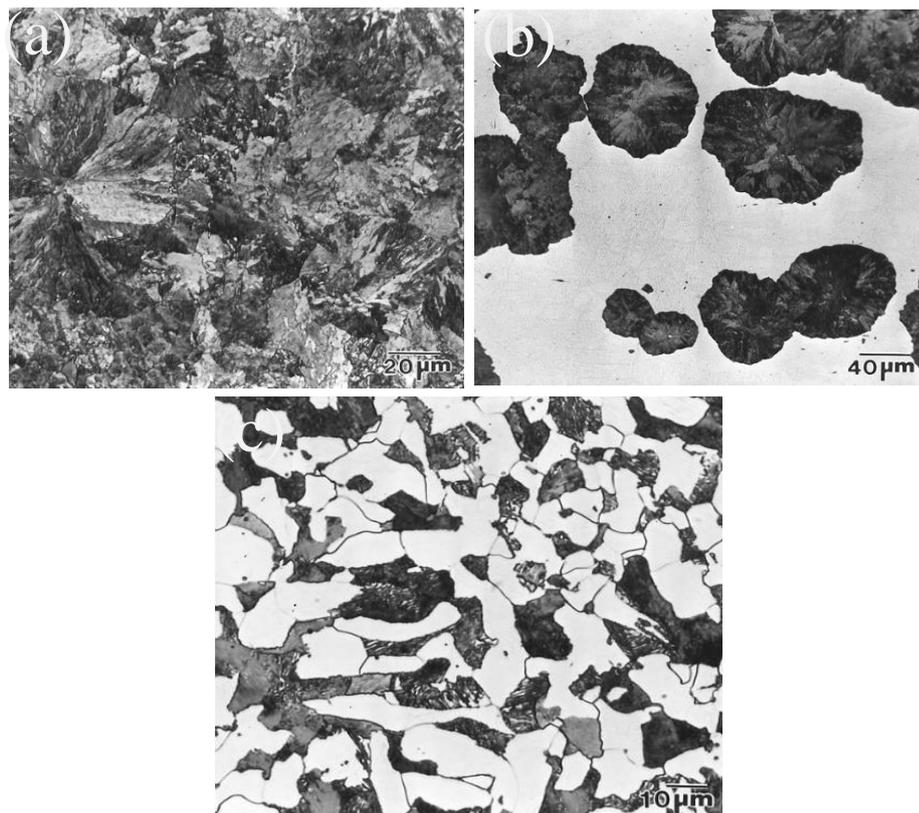
Daerah perlit dengan orientasi pertumbuhan tunggal (yaitu, dengan semua lamela sejajar dalam arah umum yang sama) disebut koloni perlit. Banyak koloni perlit dapat dilihat pada Gambar 2.16(b), yang menggambarkan struktur mikro yang terdiri dari perlit kasar. Lebih banyak koloni muncul pada Gambar 2.17(a), yang menggambarkan struktur mikro yang terdiri dari perlit yang sangat halus. "Halus" dan "kasar" biasanya mengacu pada jarak antara lamela. Jarak ini disebut jarak interlamelar.



Gambar 2. 16 (a) Sementite proeutektoid (fase etsa putih) pada austenit sebelumnya batas butir dalam paduan biner Fe-1,4% C. Matriks adalah Pearlite (b) Pearlite kasar dalam baja eutektoid AISI/SAE 1080 (c) Scanning electron microscope (SEM) micrograph of pearlite. (Bramfitt & Benscoter, 2003)

Banyak koloni berinti dan tumbuh dalam satu butir austenit sebelumnya selama transformasi. Karena setiap koloni memiliki orientasi kristalografi yang berbeda, mereka memantulkan cahaya pada sudut yang berbeda di mikroskop, sehingga menimbulkan variasi tampilan yang ditunjukkan pada Gambar 2.17(a).

Biasanya perlit berinti dan tumbuh sebagai bintil (bentuk bulat) yang berasal dari batas butir austenit sebelumnya atau titik pertemuan batas butir austenit sebelumnya. Nodul perlit mengandung banyak koloni perlit. Sebuah melihat lebih dekat pada Gambar. 2.17 (a) menunjukkan beberapa nodul perlit. Pola nodular dapat dilihat lebih mudah pada Gambar 2.17(b), dimana nodul masih terisolasi satu sama lain. Mikrograf ini diperoleh dari baja AISI/SAE 1060 yang mengalami gangguan pada proses pendinginan ketika berubah menjadi perlit pada pendinginan cepat hingga suhu kamar. Ini berarti bahwa pada awalnya, pada laju pendinginan yang relatif lambat, austenit berubah menjadi perlit, sebagaimana dibuktikan oleh nodul perlit. Setelah pendinginan, austenit yang tersisa berubah menjadi martensit (matriks etsa ringan), meninggalkan nodul pada titik pertumbuhannya yang terganggu. Sulit untuk membedakan nodul individu dalam baja yang memiliki mikrostruktur perlit lengkap (Gambar 2.17(a)).



Gambar 2. 17 (a) Paerlite halus dalam baja AISI/SAE 1080. (b) Pearlite dalam water-quenched Baja AISI/SAE 1060. Matriks adalah martensit. (c) Perlit (gelap) berasosiasi dengan ferit (terang) dalam pendingin udara Baja AISI/SAE 1040. (Bramfitt & Benscoter, 2003)

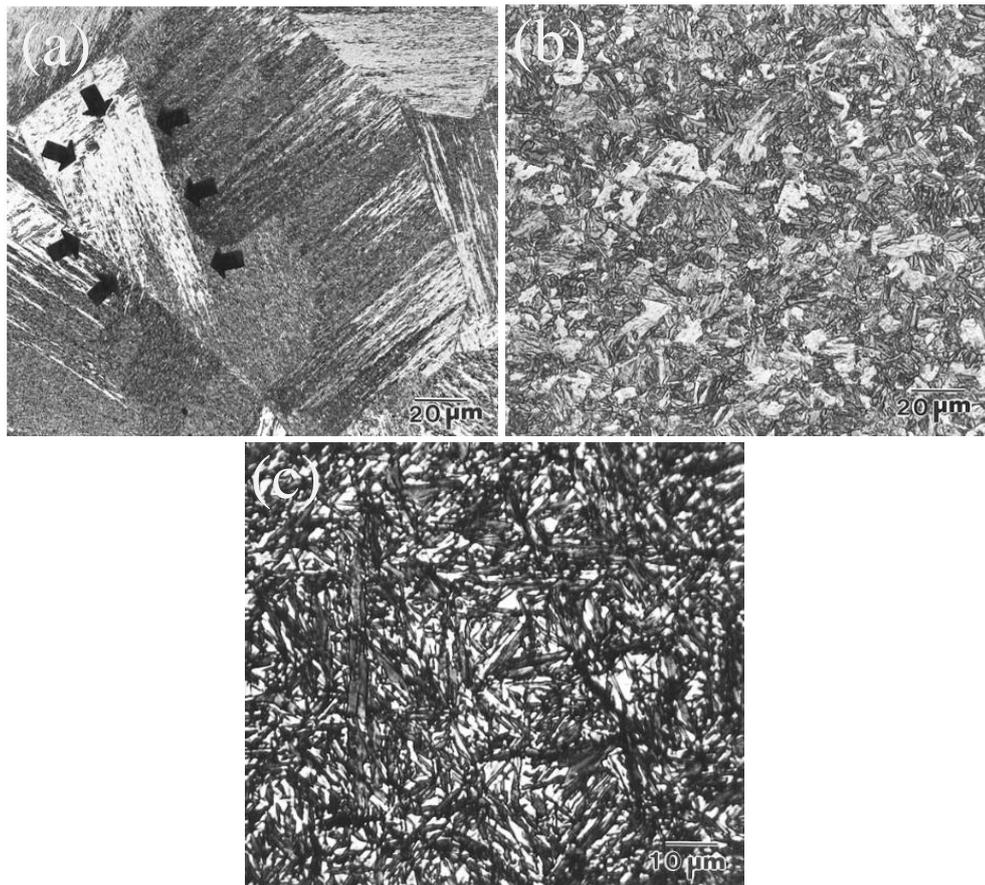
Perlit paling sering terlihat pada baja karbon biasa sebagai konstituen yang terkait dengan ferit, seperti yang terlihat pada baja hipoeutektoid AISI/SAE 1040

pada Gambar 2.17(c), yang menunjukkan struktur mikro khas ferit (area tergores terang) dan perlit (tergores gelap) (Bramfitt & Benscoter, 2003).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17(a), Baja dengan struktur mikro perlit lengkap digunakan untuk aplikasi ketahanan aus. Baja AISI/SAE 1080 seluruhnya perlit (Baja eutektoid), memanfaatkan kekuatan dan kekerasan perlit. Namun, baja perlit tidak memiliki ketangguhan dan sifat mampu bentuk. Perlit, karena struktur datarnya yang terdiri dari ferit lunak dan sementit keras, menghasilkan kekuatan tarik yang sangat tinggi ketika ditarik ke dalam kawat halus. Kawat musik juga terbuat dari baja mutiara penuh. Kawat musik adalah logam paling kuat yang biasa tersedia. Meskipun struktur perlit dapat membantu dalam jumlah aplikasi yang terbatas, banyak lembaran Baja modern dirancang untuk meminimalkan jumlah perlit dalam struktur mikro, karena cenderung mengurangi ketangguhan.

Martensit adalah konstituen yang terbentuk selama pendinginan cepat baja. Atom karbon interstisial dalam larutan padat dalam austenit induk sebelum transformasi "terperangkap" dalam kisi martensit. Hal ini berbeda dari transformasi perlitik di mana transformasi martensit tidak tergantung pada difusi karbon dalam austenit dan dengan demikian merupakan transformasi tanpa difusi. Baja karbon dengan struktur martensit penuh umumnya kompleks dan memiliki sedikit fleksibilitas dalam kondisi pendinginan.

Dalam mikroskop cahaya, biasanya sulit untuk menyelesaikan detail halus dari struktur mikro martensit. Karena struktur mikronya yang halus, martensit dipelajari menggunakan mikroskop elektron. Ada dua jenis martensit dalam baja karbon: martensit lath dan martensit pelat. Martensit lath dalam paduan Fe-0,2% C ditunjukkan pada Gambar 2.18(a). Perhatikan bahwa bilah telah tumbuh dalam orientasi yang berbeda dalam mikrograf reng martensit. Setiap orientasi memiliki respon etsa yang berbeda dan memantulkan cahaya pada sudut yang berbeda pada mikroskop, memberikan warna abu-abu yang berbeda. Semua batang dengan satu orientasi terdiri dari apa yang disebut "paket". Gambar 2.18(a) menunjukkan bahwa ukuran paket sangat kasar (panah menggambarkan sebuah paket). Batten akan menjadi salah satu subunit dalam paket. Contoh batten martensit dalam baja paduan komersial yang didinginkan ditunjukkan pada Gambar 2.18(b). Struktur mikro ini mewakili ukuran paket halus yang lebih khas.



Gambar 2. 18 (a) Lath martensit dalam paduan biner Fe-0,2% C. (b) Martensit dalam baja ASTM A 514 (0,13% C, 0,62% Mn, 0,29% Si, 0,5% Mo, 0,054% Al, (c) Pelat martensit dalam baja AISI/SAE 1095 (0,97% C, 1,05% Mn, 0,25% Si, dan 0,20% Cr). (Bramfitt & Benscoter, 2003)

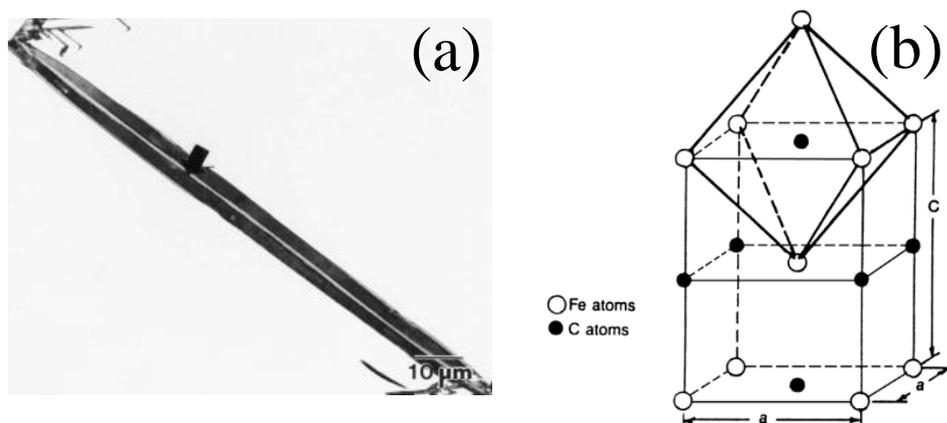
Contoh pelat martensit ditunjukkan pada Gambar 2.18(c). Struktur mikro ini mewakili baja AISI/SAE 1095 berpendingin air komersial dan memiliki ukuran pelat martensit yang kecil. Reng Martensit terbentuk pada baja karbon rendah (di bawah 0,6% C), dan pelat martensit membentuk baja karbon tinggi (di atas 1,0% C). Campuran reng dan pelat martensit dapat terbentuk antara 0,6% dan 1,0% C. Selain morfologi reng dan pelat, martensit pelat berbeda dari martensit lath dengan selubung unik di dalam setiap pelat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19(a).

Tidak semua baja martensit mengandung karbon. Baja tahan karat martensit SAE 410 yang ditunjukkan pada Gambar 2.19(b) hampir bebas karbon. Banyak martensit bebas karbon memiliki tingkat keuletan tertentu dibandingkan dengan martensit yang mengandung karbon.

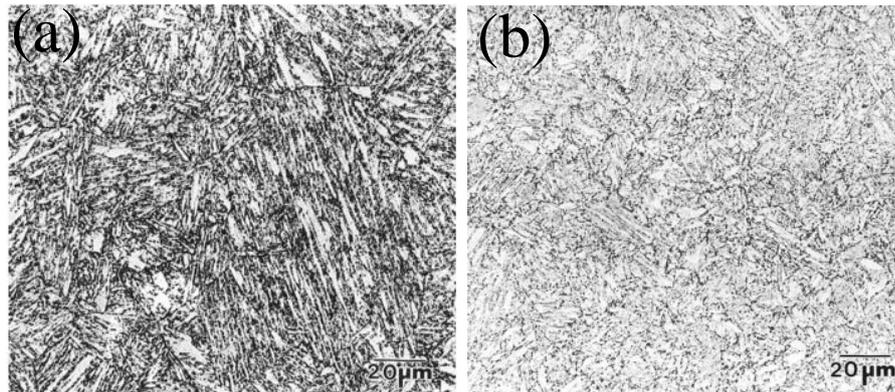
Dalam paduan besi-karbon, struktur kristal martensit adalah pusat tubuh tetragonal (BCT), dengan sel satuan, dikonfigurasi seperti yang ditunjukkan pada

Gambar. 2.19(c). Sel satuan adalah sel BCC yang terdistorsi. Pada baja yang mengandung karbon, distorsi kisi disebabkan oleh atom karbon yang menempati posisi tertentu (di celah antara atom besi yang lebih besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19(c). Karena lokasinya, mereka meregangkan sel dalam satu arah. Karbon terperangkap selama transformasi dalam besi-karbon martensit, meninggalkan kisi jenuh dengan karbon. Hal ini berbeda dengan baja yang didinginkan secara perlahan, seperti dalam kasus di mana ferit terbentuk. Ferit, memiliki kisi BCC biasa, tidak dapat mengandung banyak karbon di larutan padat (kurang dari 0,002 % C pada suhu kamar), ini berarti karbon berdifusi ke sisa austenit selama pendinginan lambat, akhirnya membentuk besi karbida (sementit) dan ferit. Jika martensit dipanaskan atau ditempa, karbon yang terperangkap akan mengendap dan membentuk karbida besi Struktur mikro baja dengan struktur martensit yang ditempa penuh ditunjukkan pada Gambar 2.20(a).

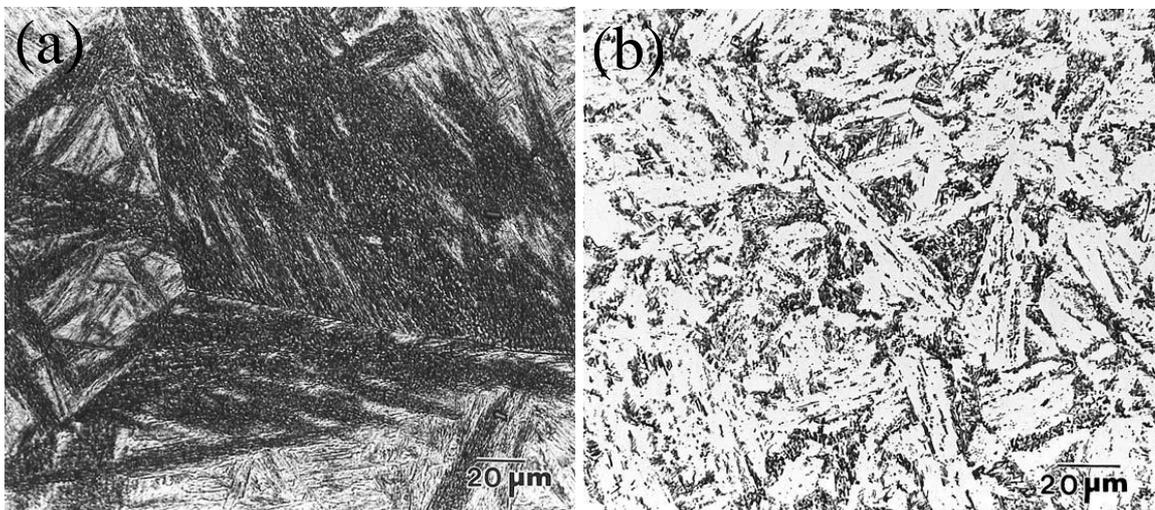
Struktur kristal BCC selama temper karena atom karbon dikeluarkan dari kisi, sehingga menghilangkan distorsi. Proses tempering mengembalikan keuletan pada baja martensit tetapi dengan mengorbankan kekuatan. Karena martensit yang dipadamkan memiliki keuletan yang sangat kecil, ia ditemukan hampir secara eksklusif secara komersial dalam keadaan temper. Salah satu aplikasi baja martensit tidak tempa adalah pada pisau silet. Dalam hal ini, martensit memberikan kekuatan dan kekerasan tinggi, yang memungkinkan mata pisau mempertahankan ujung tombak yang tajam. (Bramfitt & Benscoter, 2003)



Gambar 2. 19 (a) Plate martensit menunjukkan morfologi pelat yang khas (panas) (b) Struktur kristal tetragonal yang berpusat pada tubuh dari martensit dalam paduan besi karbon (Bramfitt & Benscoter, 2003)



Gambar 2. 20 (a) Martensit dalam baja tahan karat SAE 410. (b) Martensit yang ditempa penuh dalam 0,2% C, 5% Ni, dan 1% Mn baja. (Bramfitt & Benscoter, 2003)



Gambar 2. 21 (a) Struktur mikro bainitik dalam baja 0,3% C, 0,8% Mn, 0,26% Si, 1,05% Cr, 1,07% Mo, dan 0,25% V. (b) Bainitic microstructure in a low-carbon alloy steel (0.3% C, 0.62% Mn, 0.2% Si, 2.73% Ni, 0.23% Cr, and 0.5% Mo). (Bramfitt & Benscoter, 2003)

Dalam martensit temper yang ditunjukkan sebelumnya, penampilan acicular dari martensit masih terlihat. Partikel hitam kecil dalam struktur mikro adalah sementit.

Bainit. Ketika beberapa baja didinginkan hingga tingkat pendinginan menengah, seperti pendinginan air dan pendinginan udara, konstituen yang dikenal sebagai bainit dapat terbentuk. Selama pengetsaan dalam pikral 4%, bainit muncul dalam mikroskop cahaya sebagai pengetsaan gelap, konstituen acicular, seperti terlihat pada Gambar 2.21(a). Ini adalah etsa gelap karena mengandung dispersi partikel karbida kecil yang memberikan bantuan permukaan dari serangan preferensial dengan etsa ketika diamati di bawah mikroskop.

Ada juga beberapa martensit yang tidak ditempa dalam mikrograf pada Gambar 2.21(b). Dalam sampel ini, martensit yang tidak ditempa tergores jauh lebih ringan daripada bainit karena tidak mengandung karbida dan memiliki respons goresan yang berbeda. Pembentukan bainit, seperti perlit, melibatkan difusi karbon dalam austenit selama transformasi. Struktur mikro bainitik lain yang mewakili baja yang berbeda dari baja pada mikrograf sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 2.20(b). Perhatikan bahwa struktur mikro agak mirip dengan martensit (lihat Gambar 2.18) karena keduanya memiliki morfologi acicular. Namun, jika seseorang dapat menyelesaikan struktur dalam mikroskop cahaya (mikroskop elektron biasanya diperlukan), perbedaan substansial akan ditemukan. Laju pendinginan yang lebih lambat selama transformasi bainit memungkinkan pengendapan karbida, yang bertentangan dengan tidak ada difusi selama transformasi martensit, di mana atom karbon tetap terlarut dalam kisi. Dengan demikian, bainit memiliki kisi BCC reguler dari ferit. Bainite juga berbeda dari perlit karena tidak membentuk morfologi lamellar yang khas dari perlit. Namun, salah satu bentuk bainit (bainit bawah) memiliki struktur mikro yang sangat mirip dengan martensit temper. Faktanya, dalam mikroskop cahaya, bainit dasar tidak dapat dibedakan dari martensit temper. Namun, perbedaan umumnya dapat dibuat pada perbesaran yang lebih tinggi dalam mikroskop elektron transmisi (TEM) karena karbida dalam martensit temper biasanya mengendap dalam pola mirip Widmansttten multivariat. Dalam bainit, karbida umumnya tidak memiliki pola dan bentuk ini di lokasi diskrit pada varians tunggal atau sudut tertentu (antara 55° dan 65°) terhadap sumbu utama ferit asikular. Morfologi diskrit karbida juga membedakan antara apa yang disebut bainit atas dan bawah.

Istilah bainit atas dan bawah pertama kali diterapkan pada struktur mikro yang dikembangkan selama TI. Istilah ini juga diterapkan pada bainit yang berubah selama pendinginan standar terus menerus. Bainit atas adalah istilah yang terkait dengan bainit yang terbentuk antara 400 dan 550 °C (752 dan 1022 °F) dan mengandung karbida yang disejajarkan di sepanjang batas reng ferit. Gambar 2.22. (a) menunjukkan bainit teratas yang diproduksi oleh IT dari baja paduan rendah AISI/SAE 8720 komersial pada 425 °C (797 °F) (Bramfitt & Benscoter, 2003).

Bainit bawah, di sisi lain, terbentuk antara 250 dan 400 °C (482 dan 752 °F) dan mengandung karbida di dalam bilah ferit acicular (atau pelat) dan bukan

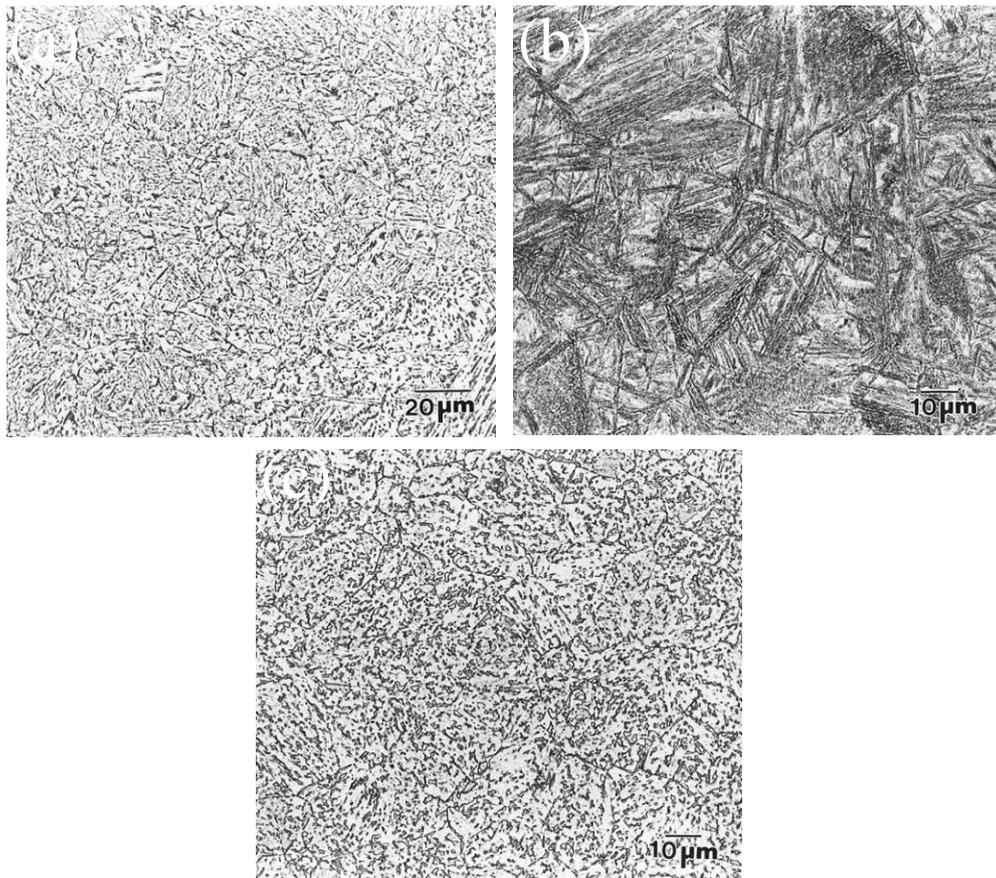
pada batasnya. Gambar 2.20(a) menunjukkan bainit rendah dalam baja AISI/SAE 8720, yang ditransformasikan secara isothermal pada 325 °C (617 °F).

Dalam sebagian besar proses dunia nyata, baja biasanya tidak berubah secara isothermal tetapi berubah pada rentang suhu (yaitu, pendinginan oli, pendinginan udara, dll.). Namun, morfologi dasar yang dijelaskan sebelumnya masih ditemukan karena pendinginan terus menerus. Sayangnya, struktur yang berkembang selama pendinginan terus menerus tidak mudah diklasifikasikan seperti yang terbentuk selama TI. Struktur mikro yang berkembang selama pendinginan terus menerus sering terdiri dari campuran bainit atas dan bawah. Seringkali, austenit yang tertahan ditemukan sebagai pengganti karbida pada batas ferit acicular.

Bentuk lain dari bainit disebut bainit "granular", yang terdiri dari ferit acicular dan pulau-pulau terpisah atau wilayah austenit dan martensit yang tertahan (kadang-kadang disebut konstituen M-A). Istilah ini berasal dari deskripsi penampakan granularnya dalam mikroskop cahaya. Contoh bentuk bainit ini ditunjukkan pada Gambar 2.22(c). Umumnya, bentuk bainit ini ditemukan pada baja paduan (misalnya, baja Ni-Cr-Mo) yang telah didinginkan pada laju pendinginan lambat hingga sedang. Karena kandungan paduan yang lebih tinggi dalam baja ini, kolam austenit dapat stabil pada suhu kamar atau sebagian stabil dengan beberapa austenit diubah menjadi martensit.

Bain karena struktur mikro bainitik campuran dan agak rumit yang berkembang selama pendinginan terus menerus. Pekerjaan saat ini sedang dilakukan untuk memilah mikrostruktur bainit dalam baja yang didinginkan secara terus menerus.

Baja bainitic sangat penting untuk kekuatan tinggi dan keseimbangan ketangguhan yang baik. Secara komersial, baja bainitik digunakan untuk komponen reaktor nuklir, bejana tekan, rotor turbin uap berukuran besar, dan banyak aplikasi lainnya. Austenit. Meskipun tidak umum terlihat pada baja karbon biasa pada suhu kamar (seperti yang dibuktikan dalam diagram fase besi-karbon), austenit adalah fase induk dari ferit, sementit, perlit, bainit, dan martensit. Austenit memiliki struktur kristal FCC, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. (Bramfitt & Benscoter, 2003)



Gambar 2. 22 (a) Upper bainite, (b) Lower bainite, (c) Granular bainite. (Bramfitt & Benscoter, 2003)

Austenit. Meskipun tidak umum terlihat pada baja karbon biasa pada suhu kamar (seperti yang dibuktikan dalam diagram fase besi-karbon), austenit adalah fase induk dari ferit, sementit, perlit, bainit, dan martensit. Austenit memiliki struktur kristal FCC, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.

Pada kebanyakan baja, austenit adalah fase suhu tinggi dan umumnya hanya ada di atas 700 °C (sekitar 1300 °F). Namun, beberapa baja, seperti baja tahan karat austenitik (misalnya, lembaran baja tahan karat AISI 304 dan AISI 316), adalah 100% austenitik pada suhu kamar.

Dalam beberapa baja karbon standar dan banyak lembaran baja paduan, beberapa austenit dapat dipertahankan pada suhu kamar jika baja didinginkan (biasanya dalam air atau es air asin) dari medan fase austenitik. Baja paduan dan besi tuang, jika kandungan karbon dan paduan dalam austenit cukup, stabil pada suhu kamar. Ketika diperiksa di bawah mikroskop, austenit sisa biasanya muncul sebagai konstituen etsa putih, karena memiliki respons etsa yang berbeda dari

kebanyakan konstituen lainnya. Dalam banyak kasus, austenit yang tertahan tidak diinginkan dalam baja. Ini berarti bahwa baja harus diberi perlakuan panas (tempered) lebih lanjut atau didinginkan sampai temperatur yang dangkal untuk mengubah austenit yang tertahan. Pada beberapa baja, austenit yang tertahan diinginkan, karena dapat memberikan tingkat daktilitas tambahan pada baja. Mikrograf berikut menunjukkan austenit yang tertahan dalam berbagai baja. Pada Gambar 2.22, austenit sisa (putih) terlihat di antara pelat martensit (konstituen seperti jarum gelap) pada baja karbon tinggi dan baja paduan rendah (Bramfitt & Benscoter, 2003).

2.6 Pengaruh PWHT terhadap sifat mekanik

Uji retak untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas pasca las (PWHT) terhadap ketangguhan patah suhu rendah logam las C-Mn. Pengamatan struktur mikro, uji indentasi instrumen nano, dan simulasi elemen hingga berbasis mikro dilakukan untuk menganalisis mekanisme pengerasan. Penelitian ini menemukan bahwa nilai CTOD meningkat secara signifikan dari 0,241 mm menjadi 1,754 mm setelah PWHT. Kekerasan dan kekuatan antara acicular ferrite (AF) dan proeutektoid ferrite (PF) semakin dekat, meningkatkan derajat heterogenitas struktur mikro. Simulasi menunjukkan bahwa distribusi regangan dan tegangan di AF dan PF dihomogenisasi dengan peningkatan koordinasi struktur mikro setelah PWHT, menghasilkan penurunan derajat lokalisasi regangan plastis di PF dan pengurangan konsentrasi tegangan pada antarmuka AF dan PF. Akibatnya, ketahanan terhadap inisiasi dan propagasi retak meningkat, dan ketangguhan patah dari patah suhu rendah meningkat. Selain itu, densitas dislokasi pada AF dan PF keduanya menurun. Morfologi dislokasi berevolusi dari dislokasi kusut menjadi garis dislokasi bergerak. Banyaknya karbida halus yang terdeposit dan membulat berkontribusi pada pengerasan struktur mikro (Liu et al., 2020).

T-joint paduan aluminium 6061 dilas dengan proses pengelasan MIG pulsa ganda. Kemudian dilakukan perlakuan panas pasca las pada sambungan T yang dilas. Mikrostruktur las di bawah suhu dan waktu penuaan yang berbeda diselidiki dengan mikroskop elektron transmisi dan mikroskop elektron pemindaian. Sifat mekanik diperiksa dengan uji kekerasan dan uji tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekerasan mikro sensitif terhadap suhu dan waktu perlakuan panas. Peningkatan suhu bermanfaat untuk mempersingkat waktu penuaan puncak. Ada banyak dislokasi dan beberapa deposit pada sambungan las. Dengan

meningkatnya suhu dan waktu perlakuan panas pasca las, densitas dislokasi menurun. Sedangkan fase penguatan diendapkan dan tumbuh secara bertahap. Fase Q' yang signifikan diamati ketika suhu perlakuan panas pasca-las dinaikkan hingga 200 °C, fase Q' yang besar diamati. Dan mereka bertanggung jawab atas nilai puncak kekerasan mikro pada sambungan las (YI et al., 2019).

Perangkat di Primary Reformer adalah perangkat yang dioperasikan pada suhu 600-800 °C dan tekanan 30-40 kg/cm². Primer reformer terbuat dari bahan baja karbon (flange) dan bahan stainless steel (tabung atas). Kedua material tersebut disambung menggunakan las GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) dengan logam pengisi Inconel 82. Namun, disbanding ditemukan antara bahan baja karbon dan sambungan logam las. Hasil uji struktur mikro diperoleh dari pelebaran effect size dark band dari variasi temperatur PWHT pada batas fusi baja karbon. Mereka mengelas sambungan logam dan butiran di wilayah HAZ dari baja karbon dengan struktur ferit yang lengkap. Nilai kekerasan di daerah pita hitam lebih tinggi dibandingkan di daerah lain, dan nilai kekerasan menurun di daerah HAZ baja karbon (Sudiarso & Nugroho, 2012).

Penambahan Ni sebagai pengisi secara efektif menahan retakan NiTi/stainless steel (SS). Sebaliknya, pembentukan Ni₃Ti pada antarmuka NiTi/Ni menghasilkan distribusi struktur mikro sambungan yang tidak merata, yang membatasi kekuatan tarik dari sendi. Dalam penelitian ini, perlakuan panas pasca las (PWHT) pada 650 °C dan 850 °C diterapkan pada sambungan NiTi/Ni/SS bebas cacat untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Saat suhu PWHT meningkat, lebih banyak Ni₃Ti yang diamati pada logam las. Pengendapan ini memperkuat logam las, sehingga kekerasan rata-rata logam las meningkat dari 375 HV_{0.2} menjadi 493 HV_{0.2}. Karena homogenisasi mikro sambungan setelah PWHT, kekuatan tarik sambungan ditingkatkan. Kekuatan rata-rata tertinggi sambungan mencapai 643 MPa pada 850 °C PWHT, yaitu sekitar 2,12 kali lebih tinggi dari sambungan las (Chen et al., 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kualitas dan sifat mekanik pipa baja karbon untuk proses produksi gas alam cair yang baik dan setelah sepuluh tahun digunakan sebagai acuan untuk perbaikan sementara pada pipa yang rusak. Langkahnya adalah membandingkan hasil pengujian sifat mekanik dan mikro kedua jenis pipa tersebut. Parameter yang digunakan adalah komposisi kimia, kekerasan, kekuatan tarik, dan struktur mikro dari kedua jenis pipa tersebut. Hasil pengujian pada pipa yang baik memiliki nilai kekerasan rata-rata 90 HV,

sedangkan pada pipa yang rusak nilai kekerasan rata-rata 85,9 HV menurun sebesar 4,1 HV. Uji tarik pada pipa baik nilai 60kg/mm² (588 MPa), pada tabung rusak dengan kekuatan tarik 56 kg/mm² (549 MPa), turun 4 kg/mm² (39 MPa). Hasil pengujian struktur mikro pipa yang baik terdiri dari struktur ferit dan perlit, sedangkan pipa yang rusak terdiri dari fasa perlit. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa pipa setelah digunakan selama sepuluh tahun mengalami penurunan sifat mekanik yaitu: kekerasan dan kekuatan tarik. Ini adalah hasil dari penipisan korosi ketebalan dinding pipa (Nofri & Fardiansyah, 2018).

Perpipaan telah digunakan sebagai salah satu metode transportasi minyak dan gas yang paling praktis dan murah. Proses pengelasan melakukan penyambungan pipa itu sendiri. Dalam pengelasan, efek pemanasan lokal pada suhu tinggi menyebabkan logam mengalami ekspansi termal dan penyusutan selama pendinginan. Setiap area konstruksi menyebabkan tegangan sisa, perubahan mikro, dan ketangguhan yang berbeda. Salah satu cara untuk mengatasinya adalah dengan perlakuan panas pasca las (PWHT). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh PWHT terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur pada pengelasan busur logam pelindung (SMAW). PWHT dilakukan dengan pemanasan induksi pada suhu 400 C, 500 C, 600 C, 700 C, dan 800 C dengan holding time 15 detik dan didinginkan di udara terbuka. Kemudian dilakukan uji impak, kekerasan, dan struktur mikro untuk mengetahui pengaruh PWHT. Hasil uji impak dan kekerasan menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu PWHT maka nilai ketangguhannya semakin tinggi dan nilai kekerasannya semakin rendah. Dan dari pengamatan struktur mikro daerah las logam PWHT terjadi peningkatan jumlah struktur ferit acicular dan penurunan jumlah struktur ferit widmanstatten (Haryadi et al., 2017).

Fitur penting dari tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengelasan patch untuk memperbaiki anggota baja struktural diperiksa melalui serangkaian percobaan dan simulasi numerik. Tegangan sisa pengelasan pada tambalan dan pelat dasar yang ditutupi oleh pelat tambalan terdiri dari tegangan dan tekan. Tren ini adalah perbedaan kenaikan suhu selama pengelasan karena perbedaan ukuran antara pelat tambalan dan pelat dasar. Tegangan sisa tarik tinggi yang dekat dengan tegangan luluh material dihasilkan di ujung las sepanjang arah melintasi garis las. Umur kelelahan sambungan tambalan ditingkatkan dengan pelepasan tegangan sisa dengan perlakuan panas pasca-las (PWHT) menggunakan perangkat pemanas induksi yang tersedia untuk memperbaiki

anggota struktur baja yang ada. Selanjutnya, metode simulasi untuk proses PWHT ini, yang diharapkan dapat membantu menyelidiki kondisi PWHT dari komponen struktur sebenarnya, diusulkan (Aung et al., 2019).

Baja martensit yang diperkuat dengan penambahan Boron dan Nitrogen (MarBN) dikembangkan untuk layanan suhu tinggi/tekanan tinggi di pembangkit listrik selama bertahun-tahun dan dianggap sebagai kandidat yang menjanjikan untuk menggantikan lembaran baja Kelas 91/92 yang lebih konvensional. Dalam studi ini, pengamatan mikrostruktur ekstensif dari simulasi fisik material MarBN (HAZ) yang disimulasikan panas dilakukan setelah simulasi dilatasi untuk menghubungkan variasi mikrostruktur dengan siklus termal las. Struktur mikro di HAZ MarBN telah diamati bervariasi dari morfologi ekuivalen halus hingga dupleks mikro yang terdiri dari butiran halus yang didistribusikan pada Boundary Austenite Grain Boundaries (PAGB) yang sudah ada sebelumnya karena suhu puncak siklus las termal menurun. Kisaran suhu yang sesuai dengan pembentukan struktur butiran dupleks bertepatan dengan rezim suhu untuk pembubaran karbida M₂₃C₆ yang sudah ada sebelumnya. Distribusi karbida M₂₃C₆ yang merata di substruktur martensit juga diamati setelah Perlakuan Panas Pasca Las (PWHT), yang bermanfaat untuk kinerja mulur dari las HAZ. Sedimen MX lebih tahan terhadap paparan termal dan tidak larut seluruhnya hingga suhu puncak mencapai 1573 K (1300 °C). Deposit MX kaya Nb adalah tipe dominan yang diamati setelah simulasi las dan PWHT. Kekerasan antara bahan yang mengalami siklus termal pada suhu puncak yang berbeda tidak berbeda secara signifikan setelah PWHT dilakukan dalam kondisi yang sesuai, yang kemungkinan akan mengurangi kondisi tegangan yang tidak menguntungkan di area lokal di dalam HAZ (Guo et al., 2019).

Proses pengelasan menghasilkan tegangan sisa, distorsi, retak, pembentukan HAZ, dll. Akibat pemanasan dan pendinginan yang tidak merata selama pengelasan. Berbagai teknik perlakuan panas tersedia untuk mengatasi masalah ini, yang harus diterapkan secara efektif. Makalah ini memberikan informasi tentang pengaruh berbagai perlakuan panas pasca pengelasan terhadap sifat-sifat baja bejana tekan. Berbagai masalah yang dihadapi selama dan setelah pengelasan dibahas, dan informasi tentang berbagai metodologi perlakuan panas untuk memecahkan masalah ini juga dijelaskan. Ini termasuk tinjauan literatur artikel penting sebelumnya tentang perlakuan panas setelah pengelasan baja bejana tekan. Efeknya pada sifat mekanik material juga diringkas. Pengamatan kritis, statistik, dan ringkasan keseluruhan dari berbagai bahan dan

metode perlakuan panas akan sangat membantu dalam komunitas penelitian (Kalyankar & Chudasama, 2018).

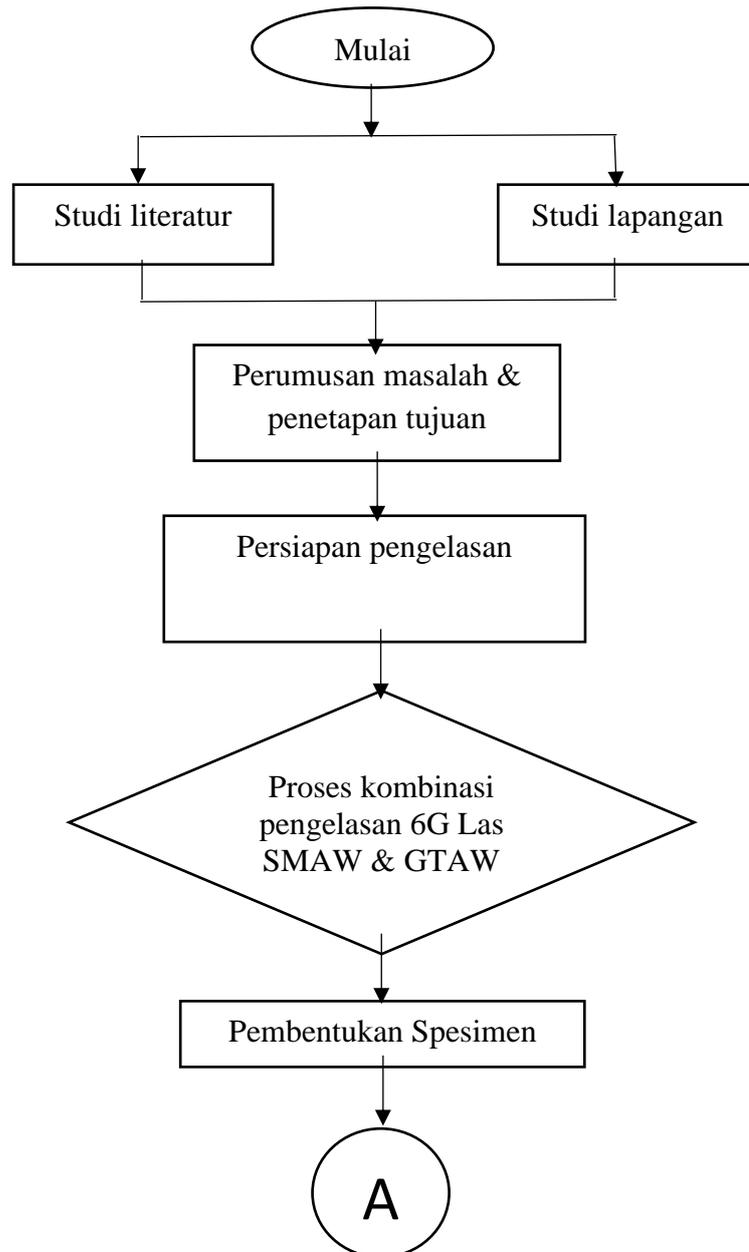
Proses pengelasan menghasilkan tegangan sisa, distorsi, retak, pembentukan HAZ, dll. Akibat pemanasan dan pendinginan yang tidak merata selama pengelasan. Berbagai teknik perlakuan panas tersedia untuk mengatasi masalah ini, yang perlu diterapkan secara efektif. Makalah ini memberikan informasi tentang pengaruh berbagai perlakuan panas pasca pengelasan terhadap sifat-sifat baja bejana tekan. Berbagai masalah yang dihadapi selama dan setelah pengelasan dibahas, dan informasi tentang berbagai metodologi perlakuan panas untuk memecahkan masalah ini juga dijelaskan. Ini juga mencakup tinjauan literatur dari artikel-artikel penting sebelumnya tentang perlakuan panas setelah pengelasan baja bejana tekan dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik material juga diringkas. Pengamatan kritis, statistik, dan ringkasan keseluruhan yang terkait dengan berbagai bahan dan metode perlakuan panas akan berguna bagi komunitas peneliti (Liu et al., 2020).

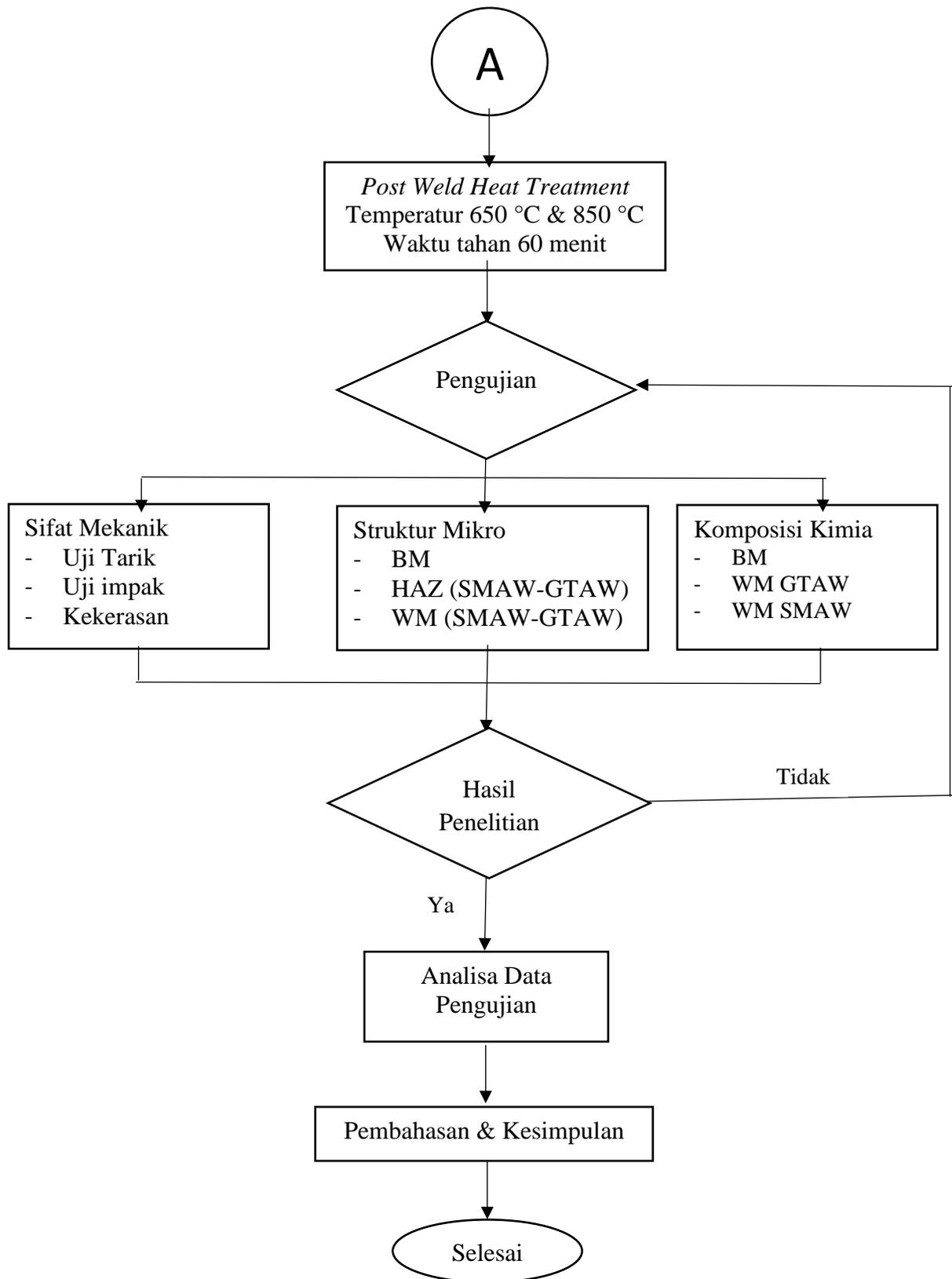
Penelitian ini untuk memprediksi umur kelelahan sambungan baja karbon rendah grade las AISI 1020 sebelum dan sesudah proses perlakuan panas pasca las (PWHT) dimana parameter pengelasan telah dioptimasi dengan Response Surface Methodology (RSM) sesuai dengan matriks desain ANOVA untuk mendapatkan kekuatan maksimum pada sambungan. Perbedaan ukuran butir ditemui karena variasi suhu, tekanan, dan pemadatan di berbagai zona sebelum dan sesudah perlakuan panas pasca-las dalam kondisi As-las dan pasca-las dianalisis menggunakan mikroskop optik. Fitur mikrostruktur dan permukaan patah dari sambungan baja kelas AISI 1020 yang dilas gesekan menggunakan parameter yang dioptimalkan dengan struktur mikro logam induk dianalisis (Selvamani et al., 2019).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram alir penelitian





Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini mulai proses pengelasan sampai pengujian adalah sebagai berikut:

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari :

- a. Mesin las Redbo 400 ampere GTAW dan SMAW
- b. Mesin uji tarik
- c. Mesin heat treatment
- d. Mesin uji kekerasan
- e. Mesin uji Impak
- f. Mesin polish
- g. Mesin Mounting
- h. Mesin Metalografi
- i. Mesin gerinda tangan
- j. Mistar geser
- k. Penggaris
- l. Sikat baja
- m. Tang ampere

3.2.2 Bahan

Bahan yang dipergunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

- a. Pipa baja karbon SA106.
- b. Elektroda E9016 pada las SMAW.
- c. Elektroda ER 90 pada las GTAW.
- d. Mata gerinda.
- e. Amplas.
- f. Alkohol.
- g. Asam HNO₃.

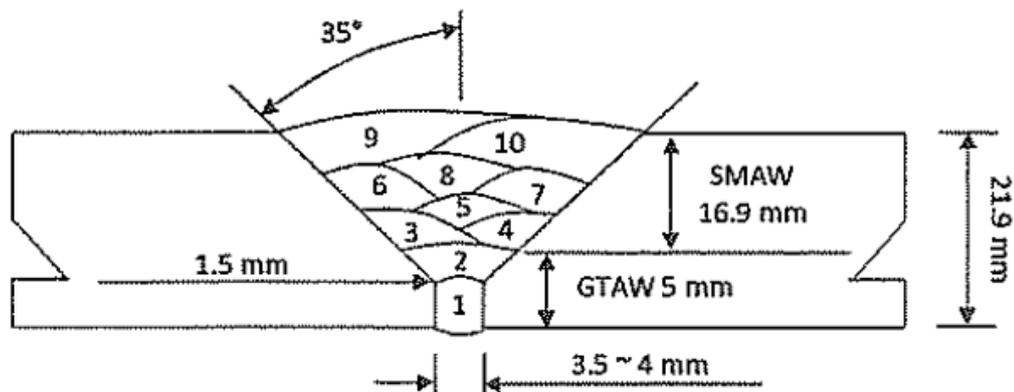
3.3 Tempat penelitian

- a. Proses pengelasan dikerjakan di lokasi pembangunan proyek PLTU Barru 2 oleh PT. Wasa Mitra Engineering.

- b. Proses pembuatan spesimen uji dikerjakan di kampus Politeknik ATI Makassar.
- c. Proses pengujian laboratorium dikerjakan di BLK (Balai Latihan Kerja) Makassar dan Laboratorium kampus Universitas Hasanuddin Fakultas Teknik Departemen Teknik Mesin Laboratorium pengecoran dan laboratorium material teknik.

3.4 Proses pengelasan

Proses pengelasan pipa baja karbon SA-106 B dengan posisi 6G dikerjakan oleh seorang welder adapun standar pengelasan mengikuti standar (Code, 2015).



Gambar 3. 2 V-groove kombinasi pengelasan SMAW-GTAW. (Smaw & Gr, n.d.)

- a. Persiapkan stang pengelasan posisi 6G.
- b. Pipa baja karbon SA-106 B.
- c. Bentuk material dengan kampuh V groove.
- d. Sikat permukaan yang akan dilas jika kotor.
- e. Ampere GTAW 80-160 dan SMAW 50-110.
- f. Polarity GTAW DC-SP dan SMAW DC-RP.
- g. Kecepatan GTAW 50-80 dan SMAW 50-100 mm/min.
- h. Preheat temperatur 20 °C.
- i. Interpass max temperatur 200 °C.
- j. Pengelasan GTAW menggunakan elektroda ER90 dengan diameter 2,4 mm pada *root pass* dan *hot pass* dengan ketebalan 5 mm.
- k. Pengelasan SMAW menggunakan elektroda E9016 dengan diameter 3,2 mm pada *filler* dan *caping* pada ketebalan 16,9 mm.



Gambar 3. 3 Proses kombinasi pengelasan posisi 6G

3.5 Post weld heat treatment (PWHT)

PWHT dilakukan pada specimen yang akan di uji dengan beberapa variabel temperatur dan waktu tahan selama proses heat treatment. Adapun proses PWHT dan variabelnya sebagai berikut:

- a. Masukkan spesimen kedalam tungku heat treatment.
- b. Nyalakan mesin atau tungku heat treatment.
- c. Atur ke temperatur 650 °C dengan waktu penahanan selama 60 menit.
- d. Tunggu sampai proses pemanasan selesai.
- e. Kemudian keluarkan spesimen untuk pendinginan dengan suhu ruang.
- f. Selanjutnya sama seperti langkah sebelumnya, yang membedakan hanya pada pengaturan temperatur 850 °C.

3.6 Sifat mekanik

Sifat mekanik pada material SA106 dilakukan pengujian tarik, pengujian dampak dan kekerasan. Adapun tahapan pengujian yang akan dilakukan sebagai berikut: