



TUGAS AKHIR – TL 141584

STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN *HOLDING TIME SOLUTION ANNEALING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KETAHANAN KOROSI PADA SUPER DUPLEX SAF 2507

Dieski Nuntasi Wulanari
NRP 2712 100 003

Dosen Pembimbing
Sutarsis, ST., M.Sc.
Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 141584

***STUDY THE EFFECTS OF SOLUTION ANNEALING
TEMPERATURE AND HOLDING TIME OF MICRO
STRUCTURE AND CORROSION RESISTANCE IN SUPER
DUPLEX SAF 2507***

Dieski Nuntasi Wulanari
NRP 2712 100 003

ADVISOR
Sutarsis, ST., M.Sc.
Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN *HOLDING TIME*
SOLUTION ANNEALING TERHADAP STRUKTUR
MIKRO DAN KETAHANAN KOROSI PADA SUPER
DUPLEX SAF 2507**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Material dan Metalurgi

pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknik Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DIESKI NUNTASI WULANARI

NRP. 2712 100 003

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Sutarsis, ST., M.Sc.

Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc.



(Pembimbing I)

(Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Segala puji bagi Allah SWT atas karunia, nikmat, dan kemudahan yang diberikan yang diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

“STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN *HOLDING TIME SOLUTION ANNEALING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KETAHANAN KOROSI PADA SUPER DUPLEX SAF 2507”

Tugas akhir ini disusun untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi – Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Orang tua dan adik penulis, yang selalu mencurahkan kasih sayang, doa, semangat dan harapan kepada penulis.
3. Bapak Sutarsis, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir dan dosen wali yang telah memberikan ilmu, bimbingan, serta wawasan kepada penulis.
4. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir yang memberikan bimbingan dan ilmu kepada penulis.
5. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. yang telah memberikan bimbingan dan wawasan kepada penulis.
6. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng. sebagai Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, yang

- telah memberikan bimbingan dan arahan selama kuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS
7. Bapak Dr. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng. selaku Kepala Prodi S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
 8. Dosen penguji dalam sidang tugas akhir yang telah memberi banyak saran dan arahan.
 9. Bapak Tari dan Bapak Chanan selaku pranata laboratorium pada Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
 10. Seluruh dosen dan karyawan yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan perkuliahan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
 11. Gafriansyah Rabbani dan Kukuh Adriansani yang telah membantu dari berbagai aspek sebagai *partner* penulis dalam mengerjakan dan menyusun laporan Tugas Akhir
 12. Seluruh teman-teman Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur yang telah banyak membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir.
 13. Novihana Noor Pradita yang selalu memberi semangat dan dukungan.
 14. Seluruh pihak yang tidak mampu penulis sebutkan satu per satu yang telah banyak membantu kelancaran Tugas Akhir.

Terima Kasih atas segala dukungannya. Semoga Allah SWT membalas dengan balasan terbaik.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini. Namun penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan. Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN *HOLDING TIME SOLUTION ANNEALING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KETAHANAN KOROSI PADA SUPER DUPLEX SAF 2507

Nama Mahasiswa : Dieski Nuntasi Wulanari
NRP : 2712100003
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Doesen Pembimbing : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Co-Pembimbing : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

Abstrak

Super duplex stainless steel merupakan material dengan ketahanan korosi yang tinggi. Tetapi adanya presipitasi fasa sigma mengakibatkan turunnya ketahanan korosi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur dan holding time solution annealing terhadap struktur mikro dan ketahanan korosi super duplex SAF 2507. Solution annealing tersebut dilakukan untuk melarutkan presipitasi fasa sigma. Variasi temperatur pada proses solution annealing ialah 1000 °C, 1065 °C dan 1125 °C dengan waktu tahan selama 15 dan 30 menit untuk masing-masing temperatur. Pengaruh dari proses solution annealing dianalisis dengan XRD, Mikroskop Optik, SEM dan Uji Weight Loss. Dari hasil pengujian yang dilakukan, presipitasi fasa sigma masih ditemukan pada hasil variasi temperatur 1000°C, tetapi sudah benar-benari larut pada hasil variasi 1065 °C dan 1125 °C. Pada pengujian weight loss, kehadiran fasa sigma pada hasil variasi temperatur 1000°C menurunkan ketahanan korosi yang mengakibatkan banyaknya massa yang hilang dibandingkan dengan hasil variasi temperatur 1065°C dan 1125°C.

Kata kunci : super duplex stainless steel, SAF 2507, fasa sigma, solution annealing, ketahanan korosi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

***STUDY THE EFFECTS OF SOLUTION ANNEALING
TEMPERATURE AND HOLDING TIME OF MICRO
STRUCTURE AND CORROSION RESISTANCE IN SUPER
DUPLEX SAF 2507***

Name : Dieski Nuntasi Wulanari
NRP : 2712100003
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Supervisor : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Co-Supervisor : Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc.

Abstract

Super duplex stainless steel is material that has excellent corrosion resistance but the it can decreased by precipitation of sigma phase. The aims of this research is to study the effect of temperature and holding time of solution annealing on microstructure and corrosion resistance of super duplex SAF 2507. Solution annealing process was done to dissolve precipitation of sigma phase. Variation of solution annealing temperatures were 1000°C, 1065°C and 1125°C with holding time 15 and 30 minutes for each temperature. Effect of solution annealing process was characterized by XRD, SEM, Optical Microscopy and Weight Loss Test. The result showed precipitation of sigma phase had not dissolved by solution annealing at 1000°C but completely dissolved by solution annealing at 1065°C and 1125°C. This precipitation of sigma phase at 1000°C affected its corrosion resistance causing excessive amount of weight loss compared to the result of 1065°C and 1125°C.

Keywords : *super duplex, SAF 2507, sigma phase, solution annealing, corrosion resistance.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	v
Abstrak	vii
Abstract	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi	xiii
Daftar Gambar	xv
Daftar Tabel	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baja Tahan Karat	5
2.1.1 Baja Tahan Karat Duplex	6
2.1.2 Super Duplex Sandvik SAF 2507	11
2.2 Perlakuan Panas	17
2.2.1 <i>Annealing</i>	18
2.3 Fasa Intermetalik pada Stainless Steel	20
2.3.1 Fasa Sigma	21
2.4 Korosi Sumuran	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	34
3.2.1 Bahan-Bahan Penelitian	34
3.2.2 Alat-Alat Penelitian	34
3.3 Prosedur Penelitian	35
3.3.1 Persiapan Spesimen	35
3.3.2 Perlakuan Panas	37
3.3.3 Preparasi Larutan	38
3.3.4 Pengujian-Pengujian	39

3.3.5 Analisis	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Hasil Uji Komposisi	43
4.2 Hasil Pengujian XRD	43
4.3 Hasil Pengujian Metalografi.....	48
4.4 Hasil Pengujian SEM	51
4.5 Hasil Pengujian <i>Weight Loss</i>	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	
BIODATA	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Duplex <i>Stainless Steel</i>	8
Tabel 2.2 Persyaratan Uji Mekanik Duplex <i>Stainless Steel</i>	10
Tabel 2.3 Sifat Fisik Duplex <i>Stainless Steel</i>	10
Tabel 2.4 Komposisi Kimia SAF 2507	12
Tabel 2.5 Sifat Mekanik SAF 2507	13
Tabel 2.6 Informasi Kristal dan Senyawa Pembentuk Sigma....	22
Tabel 3.1 Komposisi Kimia SAF 2507	34
Tabel 3.2 Pembagian Jumlah Spesimen.....	36
Tabel 3.3 Perhitungan Difusivitas Panas	38
Tabel 4.1 Perbandingan Komposisi Kimia Hasil Uji Spektrometer dan Komposisi Kimia Standar Sandvik SAF 2507	43
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Persen Fasa.....	55
Tabel 4.3 Hasil Uji <i>Weight Loss</i>	55
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Laju Korosi	57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Aplikasi Baja Tahan Karat	5
Gambar 2.2	Diagram Schaeffler DeLong	7
Gambar 2.3	Laju Korosi Duplex <i>Stainless Steel</i> pada 50% Asam Asetat	9
Gambar 2.4	Perbandingan CPT dan CCT Duplex pada <i>Stainless Steel</i>	9
Gambar 2.5	Struktur Mikro SAF 2507	12
Gambar 2.6	Laju Korosi Berbagai Paduan <i>Stainless Steel</i> pada 80% Asam Asetat	13
Gambar 2.7	Diagram Isokorosi pada Asam Sulfur	14
Gambar 2.8	Diagram Isokorosi pada Hidroklorida.....	14
Gambar 2.9	CPT dan CCT SAF 2507.....	16
Gambar 2.10	Ketahanan SCC Super Duplex SAF 2507 pada Larutan Klorida.....	16
Gambar 2.11	Struktur Mikro Duplex dengan Presipitasi Fasa Intermetalik.....	19
Gambar 2.12	Mekanisme Presipitasi Fasa Sigma	21
Gambar 2.13	Skema Pembentukan Fasa Sigma.....	24
Gambar 2.14	Diagram Terneri Fe-Cr-Ni	25
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 4.1	Grafik Hasil XRD SAF 2507 yang Terkorosi.....	44
Gambar 4.2	Grafik Hasil XRD <i>Solution Annealed</i> SAF 2507 dengan Waktu Tahan 15 Menit	45
Gambar 4.3	Grafik Hasil XRD <i>Solution Annealed</i> SAF 2507 dengan Waktu Tahan 30 Menit	47
Gambar 4.4	Struktur Mikro SAF 2507 yang Terkorosi	49
Gambar 4.5	Struktur Mikro <i>Solution Annealed</i> SAF 2507 dengan Waktu Tahan 15 Menit	49
Gambar 4.6	Struktur Mikro <i>Solution Annealed</i> SAF 2507 dengan Waktu Tahan 30 Menit	50
Gambar 4.7	Hasil Uji SEM SAF 2507 yang Terkorosi	52
Gambar 4.8	Hasil Uji SEM <i>Solution Annealed</i> SAF 2507 dengan Waktu Tahan 15 Menit	53
Gambar 4.9	Hasil Uji SEM <i>Solution Annealed</i> SAF 2507 dengan Waktu Tahan 30 Menit	54

Gambar 4.10	Grafik Hasil Uji <i>Weight Loss</i>	56
Gambar 4.11	Grafik Perhitungan Laju Korosi.....	57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Duplex *stainless steel* telah ada sejak lebih dari 80 tahun yang lalu. Material ini pertama kali diproduksi di Swedia pada tahun 1930 (Outokumpu 2014). Dewasa ini duplex *stainless steel* semakin banyak digunakan pada berbagai bidang seperti perminyakan, perindustrian kimia, struktural, perkapalan dan industri nuklir. Hal ini dikarenakan duplex *stainless steel* memiliki sifat mekanik yang baik dan ketahanan korosi tinggi yang didapat dari kesetimbangan mikrostrukturnya, yaitu fasa austenit dan fasa ferit (Davanageri dkk. 2015; Guo dkk. 2012). Super duplex *stainless steel* merupakan salah satu jenis dari duplex *stainless steel*. Super duplex *stainless steel* didefinisikan sebagai salah satu jenis duplex *stainless steel* yang memiliki nilai *pitting resistance equivalent* (PRE_N) lebih dari 40. Tetapi, fasa yang tidak diinginkan seperti karbida, nitrida dan senyawa intermetalik dapat muncul pada fasa ferit dan pada batas antara fasa ferit dan austenit (Fargas, 2013). Senyawa intermetalik rentan terbentuk ketika duplex (austenitik-feritik) *stainless steel* terpapar panas pada temperatur sekitar 600 – 1750°F (320 – 955°C). Keberadaan fasa tersebut merusak ketangguhan dan ketahanan korosi (ASTM A923).

Seamless Tube Sandvik SAF 2507 merupakan salah satu jenis material super duplex dengan ketahanan korosi yang tinggi pada asam organik. Pada duplex *stainless steel* ketahanan terhadap korosi sumuran bergantung pada nilai PRE_N kedua fasa, dimana fasa dengan nilai PRE_N terendah akan mengurangi ketahanan korosi sumuran (Sandvik SAF 2507 *tube and pipe, seamless datasheet*. 2015). Di Pertamina Dumai, material ini diaplikasikan pada *heat exchanger* dengan temperatur operasi 34°C. Setelah tiga bulan pemakaian ditemukan adanya korosi sumuran. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, penyebab terjadinya korosi sumuran ini ialah adanya presipitasi fasa sigma pada batas butir antara fasa austenit dan ferit. Fasa sigma ini muncul akibat dari proses *hot forming* guna membengkokkan *tube*. Proses *hot forming* dilakukan pada temperatur pembentukan fasa sigma dan tidak diikuti dengan *solution annealing* dan



quenching. Fasa sigma dapat dieliminasi dengan *heat treatment* yang tepat serta pendinginan cepat (ASTM A923).

Pada penelitian ini dilakukan *recovery* terhadap *seamless tube* super duplex SAF 2507 tersebut dengan menghilangkan fasa sigma. Hal ini dilakukan dengan memanaskan baja pada temperatur *solution annealing* dan menahannya selama beberapa waktu kemudian didinginkan dengan pendinginan *water quench* (International Molybdenum Association 2014). Pengaruh dari variasi temperatur *solution annealing* dan *holding time* serta pendinginan dengan *water quench* terhadap ketahanan korosi dianalisis lebih lanjut dengan berbagai pengujian.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh temperatur pemanasan *solution annealing* dan *holding time* dengan pendinginan *water quench* terhadap struktur mikro super duplex SAF 2507?
2. Bagaimana pengaruh temperatur pemanasan *solution annealing* dan *holding time* dengan pendinginan *water quench* terhadap *recovery* sifat ketahanan korosi pada super duplex SAF 2507?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil sesuai dengan yang diinginkan dan tidak menyimpang dari tujuan penelitian, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut

1. Diasumsikan pengaruh lingkungan di sekitar proses *solution annealing* diabaikan
2. Temperatur ruangan ketika spesimen dimasukkan dan dikeluarkan dari furnace dianggap konstan
3. Penyebaran fasa sigma pada super duplex SAF 2507 dianggap homogen



1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah

1. Menganalisis pengaruh temperatur pemanasan *solution annealing* dan *holding time* dengan pendinginan *water quench* terhadap struktur mikro super duplex SAF 2507
2. Menganalisis pengaruh temperatur pemanasan *solution annealing* dan *holding time* dengan pendinginan *water quench* terhadap *recovery* sifat ketahanan korosi pada super duplex SAF 2507

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi tentang pengaruh dari variasi temperatur *solution annealing* dan *holding time* dengan pendinginan *water quench* terhadap struktur mikro dan ketahanan korosi pada material *seamless tube* super duplex SAF 2507.

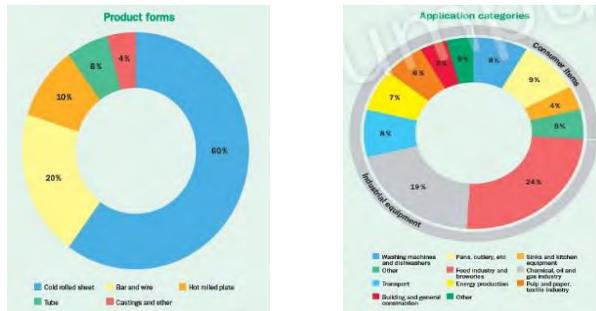


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Tahan Karat

Besi, paduan besi dan baja memiliki ketahanan korosi yang kurang baik karena material tersebut berkarat ketika bersentuhan dengan udara, terkorosi ketika terpapar asam dan membentuk *scale* pada atmosfer *furnace* dengan temperatur tinggi. Karena permasalahan tersebut, dibuatlah kelompok material baja tahan karat (*stainless steel*) yang tidak berkarat ketika diaplikasikan pada air laut, memiliki ketahanan korosi tinggi pada lingkungan asam dan tidak membentuk *scale* pada temperatur hingga 1100°C. Baja tahan karat merupakan material paduan berbasis besi dan *chromium* dengan tambahan nikel. Tidak hanya ketahanan korosinya yang tinggi tetapi juga sifat mekaniknya yang baik, membuat baja tahan karat banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang.



Gambar 2.1 (a) Penggunaan baja tahan karat pada dunia industri berdasarkan bentuk produknya (b) Penggunaan baja tahan karat pada dunia industri berdasarkan kategori penggunaannya
(Sumber : Outokumpu 2013)

Bentuk dari produk baja tahan karat yang paling dominan adalah *cold rolled sheet*. Bentuk produk yang lain hanya sepertiga atau kurang dari sepertiga total jumlah *cold rolled sheet*, gambar 2.1 (a). Sedangkan untuk penggunaannya, baja tahan karat banyak



Seiring berjalannya waktu baja tahan karat terus dikembangkan dan menghasilkan berbagai jenis material baru dengan variasi komposisi yang luas. Karena mikro struktur memiliki peranan penting terhadap sifat dari suatu material, maka pengklasifikasian baja tahan karat didasarkan pada struktur mikronya pada temperatur kamar. Baja tahan karat dapat diklasifikasikan menjadi 4 kategori utama, yaitu baja tahan karat feritik, baja tahan karat martensitik dan presipitasi *hardening*, baja tahan karat duplex (feritik-austenitik) dan baja tahan karat austenitik. Pada penelitian ini, jenis baja tahan karat yang digunakan adalah baja tahan karat duplex (Outokumpu 2013).

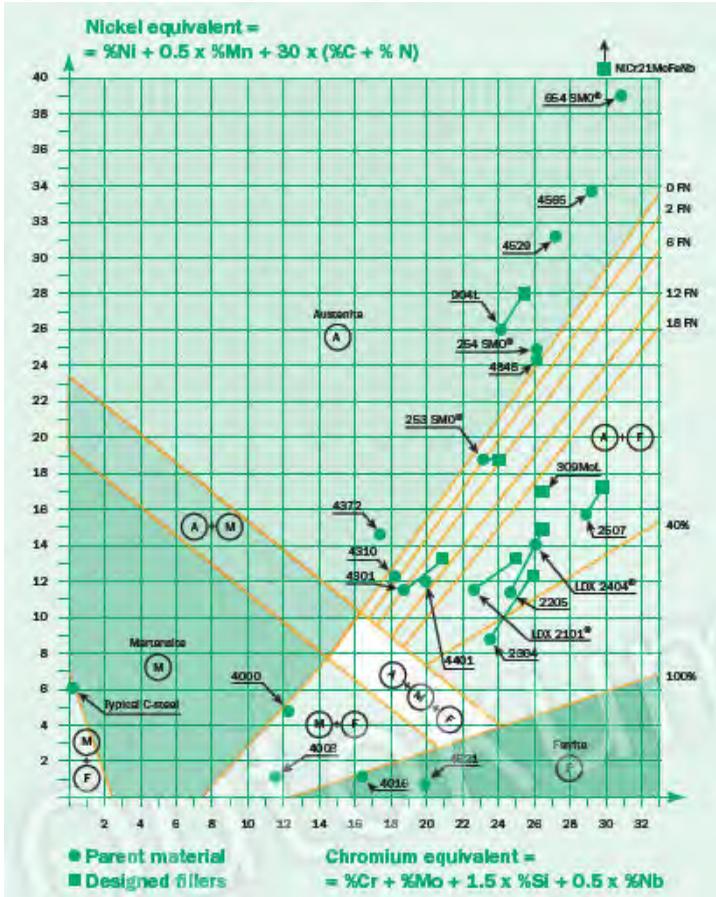
2.1.1 Baja Tahan Karat Duplex

Baja tahan karat duplex merupakan baja tahan karat yang memiliki struktur mikro ferit-austenit dengan kesetimbangan fasa 50% ferit – 50% austenit. Hal ini dapat dilihat dari diagram Schaeffler DeLong pada gambar 2.2. Karakteristik dari baja tahan karat duplex ialah kadar kromiumnya yang tinggi (20.1% – 25.4%) tetapi memiliki kadar nikel yang rendah (1.4% – 7%) dibandingkan dengan baja tahan karat austenitik. *Molybdenum* dan nitrogen juga ditambahkan untuk menyeimbangkan struktur mikro dan meningkatkan ketahanan korosi. Disamping itu penambahan nitrogen juga meningkatkan kekuatan material. Pada jenis duplex tertentu, mangan ditambahkan sebagai pengganti nikel dan juga untuk meningkatkan kelarutan nitrogen pada material.

Baja tahan karat duplex terdiri dari berbagai jenis. Diantaranya adalah baja tahan karat duplex LDX 2102 dan 2304 yang biasa disebut *lean duplex grades*. Sedangkan baja tahan karat duplex 2205 biasa disebut duplex 22Cr serta baja tahan karat duplex 2507 dan 4501 yang biasa disebut super duplex 25Cr. Baru – baru ini ditemukan baja tahan karat duplex jenis baru dengan sifat mampu bentuk (*formability*) yang lebih baik,



FDX-Grades. Berbagai jenis baja tahan karat duplex beserta komposisi kimianya dapat dilihat pada tabel 2.1.



Gambar 2.2 Diagram Schaeffler DeLong yang telah dimodifikasi untuk menunjukan perbedaan struktur mikro pada lasan
 (Sumber : Outokumpu 2013)



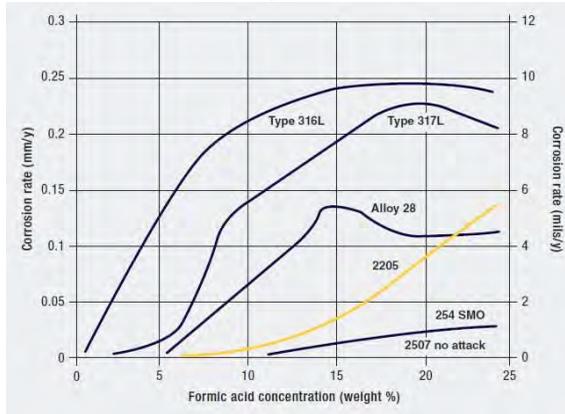
Tabel 2.1 Tabel Komposisi Kimia Jenis Baja Tahan Karat Duplex
(Sumber : ASTM A240. 2001)

UNS	Type	Chemical Composition					
		C	N	Cr	Ni	Mo	Others
S31200	...	0.030	0.14-0.20	24.0-26.0	5.5-6.5	1.20-2.00	Mn, P, S, Si
S31260	...	0.03	0.10-0.30	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	Mn, P, S, Si, Cu, W
S31803	...	0.030	0.08-0.20	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	Mn, P, S, Si
S32001	...	0.030	0.05-0.17	19.5-21.5	1.0-3.0	0.60	Mn, P, S, Si, Cu
S32205	2205	0.030	0.14-0.20	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	Mn, P, S, Si
S32304	2304	0.030	0.05-0.20	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.60	Mn, P, S, Si, Cu
S32520	...	0.030	0.20-0.35	24.0-26.0	5.5-8.0	3.0-4.0	Mn, P, S, Si, Cu
S32550	255	0.04	0.10-0.25	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	Mn, P, S, Si, Cu
S32750	2507	0.030	0.24-0.32	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	Mn, P, S, Si, Cu
S32760	...	0.030	0.20-0.30	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	Mn, P, S, Si, Cu, W
S32900	329	0.08	...	23.0-28.0	2.0-5.0	1.00-2.00	Mn, P, S, Si
S32950	...	0.030	0.15-0.35	26.0-29.0	3.5-5.2	1.00-2.50	Mn, P, S, Si

Adanya fasa austenit dan ferit baja tahan karat duplex memiliki banyak kelebihan yang dimiliki baja tahan karat austenitik dan feritik, seperti kekuatan material yang baik dan ketahanan korosi yang tinggi (Outokumpu 2013). Material ini menunjukkan ketahanan korosi yang tinggi pada banyak lingkungan dimana biasanya baja tahan karat austenitik digunakan. Hal ini dikarenakan baja tahan karat duplex memiliki kadar kromium yang tinggi. *Molybdenum* dan nikel yang cukup juga berpengaruh terhadap ketahanan korosi duplex pada lingkungan asam serta ketahanan yang tinggi pada klorida sebagai

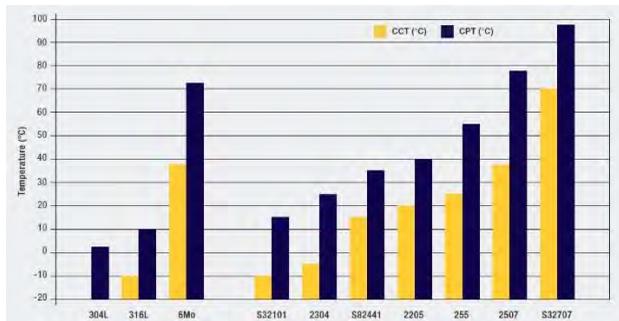


penyebab korosi sumuran dan korosi celah (International Molybdenum Association 2014).



Gambar 2.3 Laju korosi baja tahan karat duplex dan baja tahan karat austenitik pada campuran mendidih 50% asam asetat dan variasi jumlah asam formiat

(Sumber : International Molybdenum Association 2014)



Gambar 2.4 Temperatur kritis korosi celah dan sumuran untuk baja tahan karat austenitik tanpa las (bagian kiri) dan baja tahan karat duplex (bagian kanan) pada kondisi *solution annealed* (dievaluasi pada 6% FeCl_3 berdasarkan ASTM G48)

(Sumber : International Molybdenum Association. 2014)

Hal ini dapat dilihat dari rendahnya laju korosi baja tahan karat duplex pada campuran mendidih 50% asam asetat dan variasi



jumlah asam formiat serta tingginya *Critical Crevice Temperature* (CCT) dan *Critical Pitting Temperature* (CPT) baja tahan karat duplex dibanding baja tahan karat austenitik tanpa lasan pada larutan 6% FeCl_3 seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.3 dan 2.4. Disamping ketahanan korosinya yang tinggi, baja tahan karat duplex juga memiliki sifat mekanik yang baik. Baja tahan karat duplex memiliki kekuatan yang tinggi, tetapi keuletan dan ketangguhannya pun juga tinggi. Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 2.2 dan 2.3.

Tabel 2.2 Persyaratan Uji Mekanik
(Sumber : ASTM A240. 2001)

UNS	Type	Tensile Strength, min		Yield Strength, min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	Hardness, max	
		ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell	Rockwell B
S31200	...	100	690	65	450	25	293	31
S31260	...	100	690	70	485	20	290	...
S31803	...	90	620	65	450	25	293	31
S32001	...	90	620	65	450	25	...	25
S32205	2205	90	620	65	450	25	293	31
S32304	2304	87	600	58	400	25	290	32
S32520	...	112	770	80	550	25	310	...
S32550	255	110	760	80	550	15	302	32
S32750	2507	116	795	80	550	15	310	32
S32760	...	108	750	80	550	25	270	...
S32900	329	90	620	70	485	15	269	28
S32950	...	100	690	70	485	15	293	32

Tabel 2.3 Tabel Sifat Fisik Beberapa Jenis Baja Tahan Karat Pada Temperatur Kamar

(Sumber : International Molybdenum Association 2014)

Grade	UNS No.	Density		Specific Heat		Electrical Resistivity		Young's Modulus	
		g/cm ³	lb./in ³	J/kg.K	Btu/lb./°F	Micro Ω m	Micro Ω in	GPa	X10 ⁶ psi
2304	S32304	7.75	0.280	482	0.115	0.80	31.5	200	29.0



	S31803	7.80	0.281	500	0.119	0.80	31.5	200	29.0
2205	S32205	7.80	0.281	500	0.119	0.80	31.5	200	29.0
	S31260	7.80	0.281	502	0.120			200	29.0
255	S32550	7.82	0.282	488	0.116	0.84	33.1	210	30.5
	S39274	7.80	0.281	502	0.120			200	29.0
	S32520	7.75	0.280	450	0.108	0.85	33.5	205	29.7
2507	S32750	7.75	0.280	485	0.115	0.80	31.5	200	29.0
	S32760	7.80	0.281			0.85	33.5	190	27.6
	S32707	7.80	0.281	470	0.112	0.75	29.5	197	28.5

Karena keunggulan-keunggulan tersebut, baja tahan karat duplex banyak digunakan pada berbagai bidang, seperti arsitektur, industri minyak dan gas, industri makanan dan minuman, desalinasi serta industri kertas (International Molybdenum Association 2014). Pada penelitian ini baja tahan karat duplex yang digunakan adalah *seamless tube super duplex* Sandvik SAF 2507 yang diaplikasikan pada *heat exchanger* dengan temperatur operasi 34°C.

2.1.2 Super Duplex Sandvik SAF 2507

Sandvik SAF 2507 merupakan baja tahan karat duplex dengan struktur mikro austenit-ferit (gambar 2.5) yang memiliki kandungan 25% Cr dan 7%Ni (tabel 2.4) dan dapat digunakan pada kondisi temperatur tinggi. Material ini dihasilkan dari proses *heat treatment* berupa *solution annealing* pada temperatur 1050°C–1125°C yang dilanjutkan dengan pendinginan cepat pada air atau udara. Karakter dari material ini adalah

- Ketahanan *stress corrosion cracking* yang tinggi pada lingkungan klorida
- Ketahanan korosi sumuran dan korosi celah yang tinggi
- Ketahanan korosi yang tinggi untuk korosi secara umum

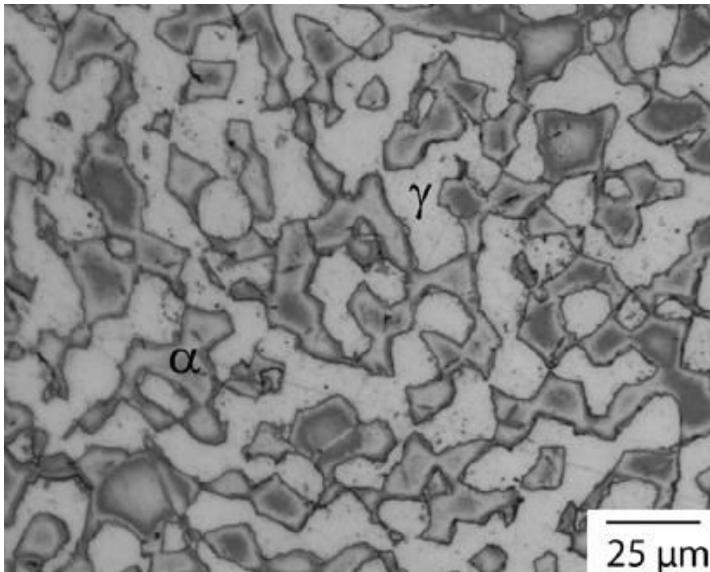


- Kekuatan mekanik yang sangat tinggi
- Sifat fisik yang dapat memberikan keunggulan desain
- Ketahanan korosi erosi dan *fatigue corrosion* yang tinggi
- Sifat mampu las yang baik

Tabel 2.4 Tabel Komposisi Kimia *Seamless Tube and Pipe Super Duplex*
Sandvik SAF 2507
(Sumber : Sandvik 2015)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Others
≤0.030	≤0.8	≤1.2	≤0.025	≤0.015	25	7	4	N=0.3

Sandvik SAF 2507 juga memiliki kekuatan impak yang baik. Temperatur transisi ulet-getas material ini lebih rendah dari -50°C (-58°F). Tabel sifat mekanik super duplex SAF 2507 dapat dilihat pada tabel 2.5.



Gambar 2.5 Struktur Mikro SAF 2507



(Sumber :Fargas, Mestra dan Mateo 2013)

Tabel 2.5 Tabel Sifat Mekanik *Tube and Pipe* Super Duplex Sandvik SAF 2507 dengan ketebalan dinding maksimal 20 mm pada temperatur 20°C
(Sumber : Sandvik 2015)

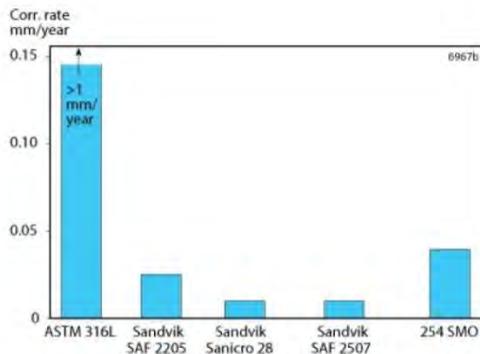
<i>Proof Strength, Mpa</i>		<i>Kekuatan Tarik, Mpa</i>	<i>Elongation, %</i>		<i>Kekerasan, HRc</i>
<i>Rp0.2^{a)}</i>	<i>Rp1.0^{a)}</i>	<i>Rm</i>	<i>A^{b)}</i>	<i>A2</i>	
≥550	≥640	800-100	≥25	≥15	≤32

1 MPa = 1 N/mm

a) *Rp0.2^{a)}* dan *Rp1.0^{a)}* merupakan 0.2% *offset* dan 1.0% *offset yield strength*

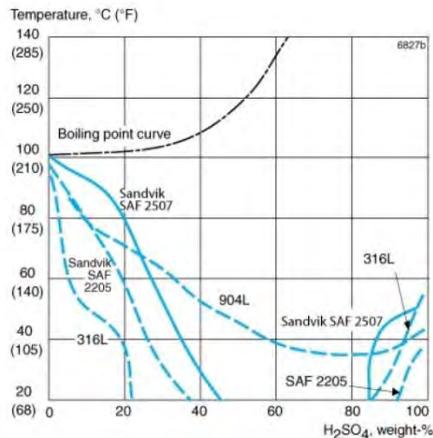
b) Berdasarkan $L = 5.65 \sqrt{S}$ dimana L adalah *original gauge length* dan S adalah daerah *original cross-section*

Dalam hal ketahanan korosi secara umum, baja tahan karat duplex memiliki ketahanan korosi yang tinggi terhadap asam organik, contohnya adalah pada 10% asam formiat dan 50% asam asetat, laju korosi Sandvik SAF 2507 kurang dari 0.05 mm/tahun sedangkan baja tahan karat ASTM 316L laju korosinya mencapai 0.2 mm/tahun. Sedangkan untuk ketahanan korosi pada asam non-organik pun juga baik, bahkan lebih baik baja tahan karat austenitik paduan tinggi pada konsentrasi tertentu. Gambar 2.6; 2.7 dan 2.8 menunjukkan tingginya ketahanan korosi super duplex SAF 2507 dibandingkan dengan produk baja Sandvik yang lain serta baja karbon pada berbagai larutan.

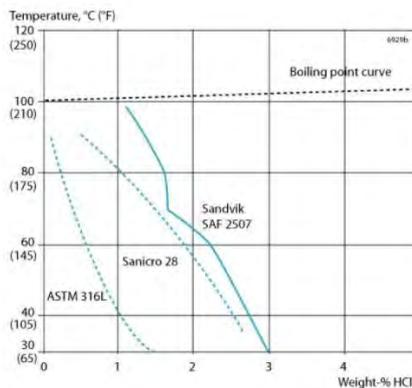




Gambar 2.6 Laju Korosi berbagai paduan pada 80% asam asetat dengan kandungan 2000 ppm ion klorida dengan temperatur 90°C
(Sumber : Sandvik 2015)



Gambar 2.7 Diagram isokorosi pada asam sulfat yang teraerasi secara alami. Kurva-kurva tersebut mewakili laju korosi 0.1 mm/tahun (4 mpy) pada larutan uji stagnan
(Sumber : Sandvik 2015)



Gambar 2.8 Diagram isokorosi pada asam hidroklorida yang teraerasi secara alami. Kurva-kurva tersebut mewakili laju korosi 0.1 mm/tahun (4 mpy) pada larutan uji stagnan
(Sumber : Sandvik 2015)



Ketahanan baja tahan karat terhadap korosi sumuran dan korosi celah terutama ditentukan oleh kandungan kromium, molybdenum dan nitrogennya. Proses manufaktur dan fabrikasi, seperti lasan, juga memegang peranan penting dalam ketahanan korosi ketika material digunakan. Parameter yang digunakan untuk membandingkan ketahanan korosi sumuran suatu material pada lingkungan klorida adalah nilai PRE (*pitting resistance equivalent*).

$$\text{PRE (\% berat)} = \% \text{Cr} + 3.3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N}$$

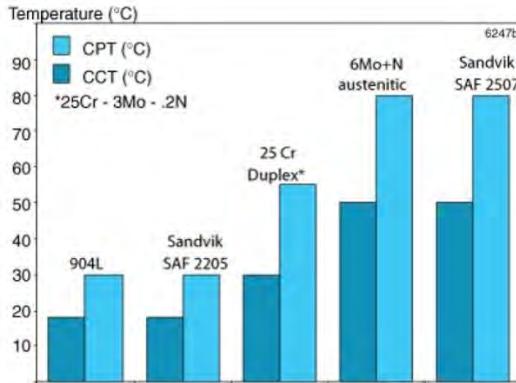
Pada baja tahan karat, ketahanan korosi sumuran bergantung pada nilai PRE pada fasa ferit dan austenit. Fasa dengan nilai PRE yang rendah akan mengurangi ketahanan korosi sumuran. Nilai PRE minimal untuk *seamless tube* Sandvik SAF 2507 adalah 42.5. Nilai ini cukup tinggi dibandingkan dengan baja tahan karat duplex lain. Contohnya ialah UNS S31260 dengan kandungan 25%Cr 3%Mo dan 0.2%N memiliki nilai PRE minimal 33.

Salah satu pengujian korosi celah dan korosi sumuran yang paling merusak baja tahan karat ialah pengujian pada ASTM G48, material dipaparkan pada larutan 6% FeCl_3 dengan atau tanpa korosi celah (metode A dan B). Pada versi modifikasi pengujian dari ASTM G48A, *sample* dipaparkan pada larutan 6% FeCl_3 selama 24 jam. Ketika korosi sumuran terdeteksi seiringan dengan berkurangnya massa material sebanyak >5 mg, pengujian dihentikan. Tetapi jika tidak, maka temperatur dinaikkan sebanyak 5°C dan pengujian terus dilanjutkan dengan *sample* yang sama. Gambar 2.9 menunjukkan temperatur kritis korosi sumuran dan korosi celah (CPT dan CCT) hasil pengujian.

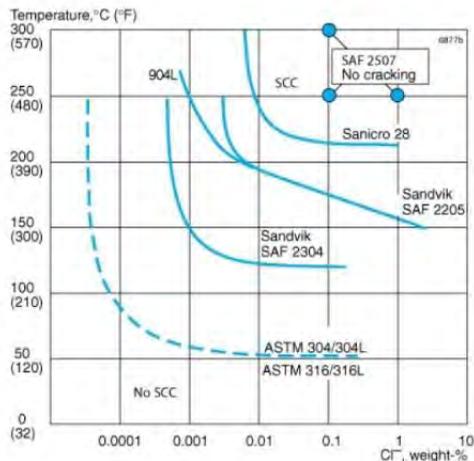
Sandvik SAF 2507 juga memiliki ketahanan *Stress Corrosion Cracking* (SCC) yang tinggi pada lingkungan klorida. Ketahanan korosi SCC Sandvik SAF 2507 pada larutan klorida



dengan temperatur tinggi dapat dilihat pada gambar 2.10. Dari gambar ini dapat dilihat tidak ada tanda-tanda munculnya SCC bahkan hingga konsentrasi 1000 ppm Cl⁻/300°C dan 10000 ppm Cl⁻/250°C.



Gambar 2.9 Temperatur kritis korosi sumuran dan korosi celah pada larutan 6% FeCl₃ selama 24 jam (sesuai dengan ASTM G48) (Sumber : Sandvik 2015)





Gambar 2.10 Ketahanan SCC pada larutan klorida dengan waktu pengujian 1000 jam
(Sumber : Sandvik 2015)

Sandvik SAF 2507 merupakan bagian dari baja tahan karat modern yang komposisi kimianya disetimbangkan agar mempercepat reformasi fasa austenit pada *heat affected zone* bertemperatur tinggi ketika proses lasan. Hal ini menghasilkan mikrostruktur yang memiliki ketahanan korosi intergranular yang baik. Sifat mekanik yang dikombinasikan dengan ketahanan korosi yang baik pada Sandvik SAF 2507 membuat material ini juga memiliki ketahanan korosi erosi dan korosi karena kelelahan yang baik.

Sandvik SAF 2507 banyak diaplikasikan pada lingkungan yang mengandung klorida yang kuat, Tipikal aplikasi dari Sandvik SAF 2507 ialah pada eksplorasi dan produksi minyak dan gas, pendinginan air laut, penguapan garam, desalinasi pabrik, sumur geothermal, pemurnian minyak dan petrokimia dan pengolahan gas, produksi bubur kertas dan kertas, pengolahan kimia, komponen mekanik dengan kebutuhan kekuatan yang tinggi serta desulfurisasi unit (Sandvik 2015).

2.2 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas dapat diartikan sebagai suatu operasi atau kombinasi dari operasi yang terdiri dari proses pemanasan (*heating*) dan pendinginan (*cooling*) dari *solid metal* atau paduan yang bertujuan untuk mendapatkan suatu kondisi atau sifat (*properties*) yang diinginkan. Proses laku panas ini terdiri dari berbagai macam, diantaranya *annealing*, *normalizing*, *hardening*, *tempering* dan lain sebagainya. Pada seluruh jenis perlakuan panas proses yang dilakukan adalah mengenakan logam pada siklus waktu-temperatur. Siklus ini terdiri dari tiga bagian, yaitu pemanasan (*heating*), penahanan pada suatu temperatur dan pendinginan (*cooling*). Pada setiap kasus, siklus ini berbeda-beda tergantung dari kebutuhan dan jenis material (Thomas G. Digges dkk. 2012).



2.2.1 Annealing

Annealing merupakan salah satu jenis *heat treatment* dimana material dipanaskan pada temperatur yang tinggi, ditahan pada dengan periode waktu tertentu kemudian didinginkan secara lambat. *Annealing* biasanya dilakukan untuk menghilangkan tegangan, menurunkan kekerasan, meningkatkan keuletan, keuletan dan ketangguhan serta untuk menghasilkan struktur mikro tertentu. Berbagai jenis *annealing* pada *heat treatment* dapat dilakukan. Hal ini bergantung pada karakterisasi dari perubahan yang diinginkan, dimana perubahan tersebut bergantung pada struktur mikro. Jenis-jenis *annealing* diantaranya adalah *full annealing*, *stress-relief annealing*, *isothermal annealing*, *quench annealing*, *homogenizing annealing* dan lain sebagainya.

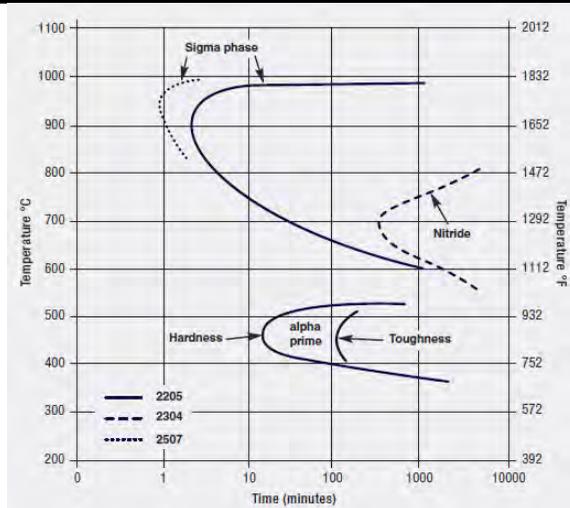
Proses *annealing* terdiri dari tiga tahapan apapun jenis *annealing*-nya, (1) pemanasan hingga temperatur yang diinginkan (2) penahanan selama beberapa waktu pada temperatur tersebut dan (3) pendinginan yang biasanya hingga temperatur kamar. Waktu merupakan hal yang penting dari prosedur ini. Ketika tahap pemanasan dan pendinginan terdapat perbedaan gradient temperatur antara bagian luar dan bagian dalam material yang besar nilainya bergantung pada ukuran dan geometri material tersebut. Jika nilai laju perubahan temperatur terlalu besar, gradien temperatur dan tegangan dalam dapat terjadi yang dapat menyebabkan induksi *crack*. Kemudian, waktu tahan temperatur juga harus cukup lama agar transformasi yang dibutuhkan dapat terjadi. Selain waktu temperatur *annealing* juga merupakan hal yang penting, karena proses *annealing* dapat dipercepat dengan meningkatkan temperatur yang disebabkan oleh proses diffusional



yang biasanya terjadi (Callister dan Rethwisch 2009; Thelning 2010). Pada baja tahan karat duplex meskipun terdapat kandungan nitrogen yang ideal, ketika material terpapar temperatur kritis

tetap merusak ketahanan korosi dan ketangguhan. Maka dari itu, setelah *hot-forming*, dibutuhkan *solution annealed* yang diikuti dengan pendinginan cepat untuk mengembalikan ketahanan korosi dan sifat mekanik. Material harus dipanaskan hingga temperatur di atas *minimum solution annealing temperature* dan ditahan dalam waktu yang cukup untuk melarutkan presipitasi intermetalik. Lamanya waktu *holding time* yang baik ialah sebanding dengan lamanya material tersebut terpapar temperatur kritis pembentukan fasa intermetalik. Setelah itu material didinginkan secara cepat dengan media air. Ketika dipindahkan dari lokasi *annealing* ke lokasi *quenching*, temperatur material tidak boleh berada diantara

700°C–1000°C (1300°F–1830°F). Menurut ASTM A480, *minimum solution annealing temperature* untuk baja tahan karat super duplex 2507 ialah 1025°C–1125°C (1880°F–2060°F).



Gambar 2.11 Diagram presipitasi isothermal pada baja tahan karat duplex tipe 2205, 2304 dan 2507

(Sumber: International Molybdenum Association 2014)

Gambar 2.11 merupakan diagram presipitasi isothermal. Dari diagram tersebut dapat diketahui bahwa pada baja tahan karat super duplex 2507, hanya dalam waktu kurang lebih 1 menit presipitasi fasa sigma sudah dapat terjadi. Presipitasi fasa sigma tersebut terjadi pada *range* temperatur antara 800°C – 1000°C. Sedangkan pada temperatur di atas temperatur tersebut, tidak terjadi pembentukan fasa sigma (International Molybdenum Association 2014).

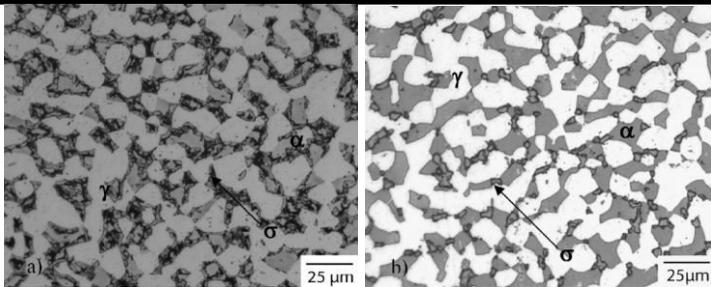
2.3 Fasa Intermetalik pada *Stainless Steel*

Pada baja tahan karat, antara temperatur 600°C hingga 1000°C dapat terbentuk fasa intermetalik seperti fasa sigma dan fasa chi. Fasa-fasa tersebut biasanya secara kolektif disebut dengan fasa sigma dan semuanya memiliki karakteristik yang sama, yaitu mengandung kadar kromium yang tinggi dan bersifat



getas. Hal ini berarti, presipitasi fasa intermetalik dalam jumlah besar dapat mengakibatkan turunnya ketangguhan dan ketahanan korosi. Pengaruh kerusakan sifat material yang disebabkan oleh fasa intermetalik ini bergantung pada jenis fasa intermetalik yang muncul (Outokumpu 2013). Pada baja tahan karat duplex pembentukan fasa intermetalik terjadi pada temperatur antara 600°F hingga 1750°F (320°C hingga 955°C). Pada proses *heat treatment* fasa intermetalik akan terbentuk pada daerah yang mengalami pendinginan paling lambat (ASTM A923) karena dengan lamanya waktu pendinginan maka material akan melewati kembali temperatur pembentukan fasa sigma dan memberi waktu untuk sigma terbentuk. Berikut ini merupakan salah satu contoh presipitasi fasa sigma pada super duplex stainless steel AISI 2507.

Pada baja tahan karat feritik dan baja tahan karat duplex presipitasi fasa intermetalik terjadi secara cepat, tetapi relatif mudah untuk dihilangkan dengan *annealing*. Baja tahan karat austenitik memiliki kadar kromium yang rendah dan tidak mengandung molibdenum sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama dan temperatur yang lebih tinggi untuk fasa intermetalik terbentuk. Maka dari itu, baja tahan karat austenitik tidak begitu sensitif terhadap presipitasi fasa ini. Secara umum pada seluruh jenis baja tahan karat, fasa intermetalik dapat dihilangkan dengan *annealing*. Pada baja tahan karat martensitik dapat dilakukan dengan *re-tempering*. Sedangkan untuk baja tahan karat feritik, austenitik dan duplex dapat dilakukan dengan *annealing* yang diikuti dengan *quenching* (Outokumpu 2013).



Gambar 2.12 Struktur mikro presipitasi fasa intermetalik pada super duplex stainless steel AISI 2507 setelah melalui proses aging selama 20 menit pada temperatur 875°C (a) dan 975°C (b)
(Sumber :Fargas, Mestra dan Mateo 2013)

2.3.1 Fasa Sigma

Fasa sigma (σ) merupakan fasa intermetalik dengan struktur kristal berbentuk tetragonal yang terbentuk setelah material ditahan selama waktu tertentu pada temperatur pembentukannya (320°C hingga 955°C). Informasi mengenai kristal dan senyawa pembentuk fasa sigma, dapat dilihat pada tabel 2.6.

Presipitasi fasa sigma dapat digambarkan dengan reaksi eutektoid ($\alpha \rightarrow \sigma + \gamma_2$) dimana fasa ferit bertransformasi menjadi fasa sigma dan austenit sekunder. Presipitasi fasa sigma dapat terjadi pada daerah di fasa ferit yang kaya akan Cr, pada batas butir antara fasa austenit-ferit dan di austenit pada baja tahan karat yang tidak memiliki fasa ferit. Fasa sigma berpresipitasi pada daerah yang kaya Cr karena senyawa pembentuk fasa sigma merupakan senyawa pembentuk dan penstabil ferit, yaitu Cr dan Mo. Pengintian fasa sigma umumnya dimulai pada batas butir antara fasa ferit-austenit dan berkembang mengarah ke daerah fasa ferit hingga transformasinya selesai. Setelah fasa sigma berpresipitasi, kandungan krom dan molibdenum yang ada pada fasa ferit berkurang dan kandungan Ni meningkat. Hal tersebut menyebabkan terbentuknya austenit



sekunder melalui fasa ferit. Pada baja tahan karat duplex, fasa sigma dan austenit sekunder terbentuk pada daerah ferit. Sehingga semakin banyak fasa sigma dan austenit sekunder terbentuk, daerah ferit akan terkonsumsi.

Tabel 2.6 Tabel informasi kristal dan senyawa pembentuk fasa sigma
(Sumber : Hsieh dan Wu 2012)

Alloy	Lattice parameter (Å)	Composition of phase (wt%)				Formula
		Fe	Cr	Ni	Mo	
Fe-Cr	$a_0 = 8.799, c_0 = 4.544$					Fe-Cr
Fe-Mo	$a_0 = 9.188, c_0 = 4.812$					Fe-Mo
17Cr-11Ni-2Mo-0.4Ti	—		30	4.3	9	0.8
17Cr-11Ni-0.9Mo-0.5Ti	—		33	4.5	5.4	0.7
Type 316	$a_0 = 8.28 \sim 8.38, c_0 = 4.597 \sim 4.599$	55	29	5	11	—
Type 316L	$a_0 = 9.21, c_0 = 4.78$					(FeNi) ₂ (CrMo) ₃
20Cr-25-34Ni-6.5-8Mo	$a_0 = 8.87, c_0 = 4.61$	35/37	17/26	15/21	21/28	—
25Cr-20Ni	—	40	46	9.4	—	3

Pada baja tahan karat, klasifikasi morfologi fasa sigma dapat dibagi menjadi 4 tipe:

- *δ/γ Grain Boundary Precipitation*

Fasa sigma mudah berpresipitasi pada batas fasa antara austenit-ferit dimana daerah tersebut merupakan daerah yang kaya kandungan Cr. Ketika daerah yang kaya kandungan Cr terbentuk, pada waktu yang bersamaan terbentuk pula daerah yang miskin kandungan Cr. Daerah yang kekurangan kandungan Cr dapat menurunkan ketahanan korosi. Karena Cr merupakan unsur pembentuk Kromium Oksida yang akan membentuk lapisan pasif untuk melindungi material agar tidak

mudah terkorosi. Daerah batas fasa austenit-ferit merupakan daerah yang kaya akan energi sehingga menguntungkan sebagai tempat pengintian fasa sigma.

- *Triple Point Precipitation*

Presipitasi fasa sigma pada tiga titik di batas fasa ferit biasa disebut *triple point sigma phase*. Pembentukan fasa sigma tipe ini diperoleh ketika temperatur *aging* dibawah 600°C dan dengan waktu tahan selama 10000 hingga 15000 jam. Selain



itu, *triple point sigma phase* juga dapat terbentuk pada *incoherent twin boundaries* dan *intergranular inclusions*.

- *Corner Precipitation*

Corner Precipitation berarti fasa sigma terbentuk langsung pada bagian sudut atau pojok dari partikel ferit, yang dikarenakan bagian sudut tersebut kaya akan kandungan Cr dan fasa sigma memilih untuk mengintip dan berpresipitasi pada daerah tersebut. Ketika fasa sigma berpresipitasi pada bagian sudut dari ferit, ia mengonsumsi kandungan Cr yang berada pada partikel ferit.

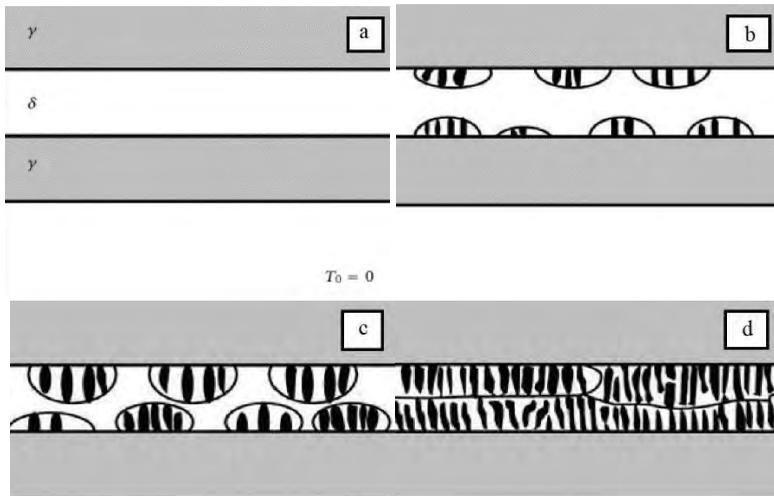
- *Cellular Precipitation*

Cellular Precipitation berarti fasa sigma dan austenit sekunder berpresipitasi sebagai presipitasi laminasi pada partikel ferit. Reaksi ini disebut dekomposisi eutektoid dari ferit menjadi fasa sigma dan austenit sekunder ($\alpha \rightarrow \sigma + \gamma_2$). Ketika reaksi dekomposisi eutektoid ini selesai, fasa sigma mengonsumsi kandungan Cr, Mo dan Si pada partikel ferit.

Mekanisme presipitasi fasa sigma pada duplex *stainless steel* dapat dilihat pada gambar 2.13. Material yang digunakan merupakan duplex *stainless steel* UNS S31803. Pada gambar (a) merupakan fasa austenit dan ferit sebelum proses pemanasan (T_0). Gambar (b) menunjukkan hasil mikrostruktur duplex *stainless steel* setelah melalui proses *aging* temperatur satu (T_1). Dari gambar tersebut dapat terlihat struktur laminasi seluler (sigma dan austenit sekunder) yang terbentuk pada batas fasa austenit-ferit. Gambar (c) menunjukkan hasil mikrostruktur duplex *stainless steel* setelah melalui proses *aging* temperatur dua ($T_1 < T_2$). Seiring naiknya temperatur *aging*, struktur laminasi seluler semakin berkembang dan bertambah banyak. Dan pada gambar (d) saat temperatur *aging* tiga ($T_2 < T_3$), daerah yang



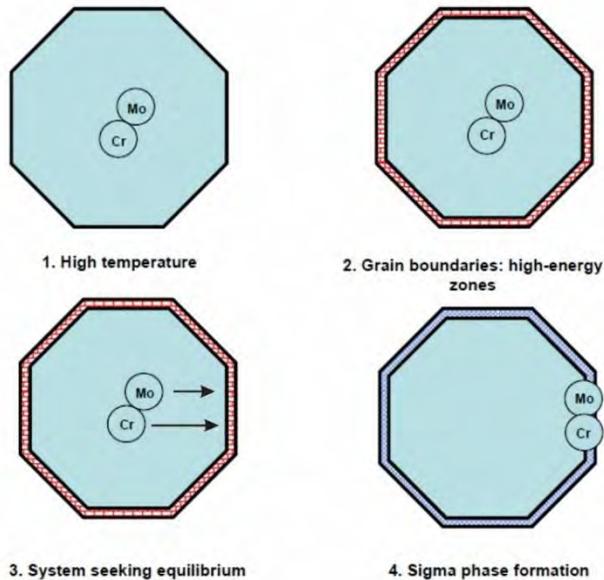
tadinya merupakan fasa ferit sudah sepenuhnya tergantikan oleh fasa sigma dan austenite sekunder.



Gambar 2.13 Gambar Mekanisme Presipitasi fasa sigma pada duplex *stainless steel* UNS S3180

(Sumber : Hsieh dan Wu 2012)

Gambar 2.14 menjelaskan kaitan antara pembentukan fasa sigma dan energi yang ada pada batas butir. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Villalobos (2009), ketika material dipanaskan pada temperatur 800°C-900°C internal energi pada super duplex stainless steel meningkat karena temperatur yang tinggi.



Gambar 2.14 Skema pembentukan fasa sigma
(Sumber: Villalobos 2009)

Pemanasan tersebut meningkatkan energi yang digunakan oleh atom untuk pembentukan fasa pada *alloy*. Energi tersebut mengakibatkan atom-atom bergerak dari satu sisi ke sisi yang lain. Unsur-unsur pembentuk ferit akan berusaha untuk membentuk ferit dan unsur-unsur pembentuk austenit akan berusaha untuk membentuk austenit. Karena unsur-unsur tersebut juga merupakan penstabil fasa, maka unsur-unsur tersebut memilih untuk bergerak dan terpusat pada pusat butir (*grain centers*), sehingga batas butir menjadi tidak terisi dan menyimpan energi yang tinggi. Ketika sistem mencari kesetimbangan untuk menghilangkan daerah yang tinggi energi, unsur-unsur pembentuk ferit tertarik ke daerah batas butir dan terjadi pembentukan fasa sigma yang menyebabkan daerah fasa ferit



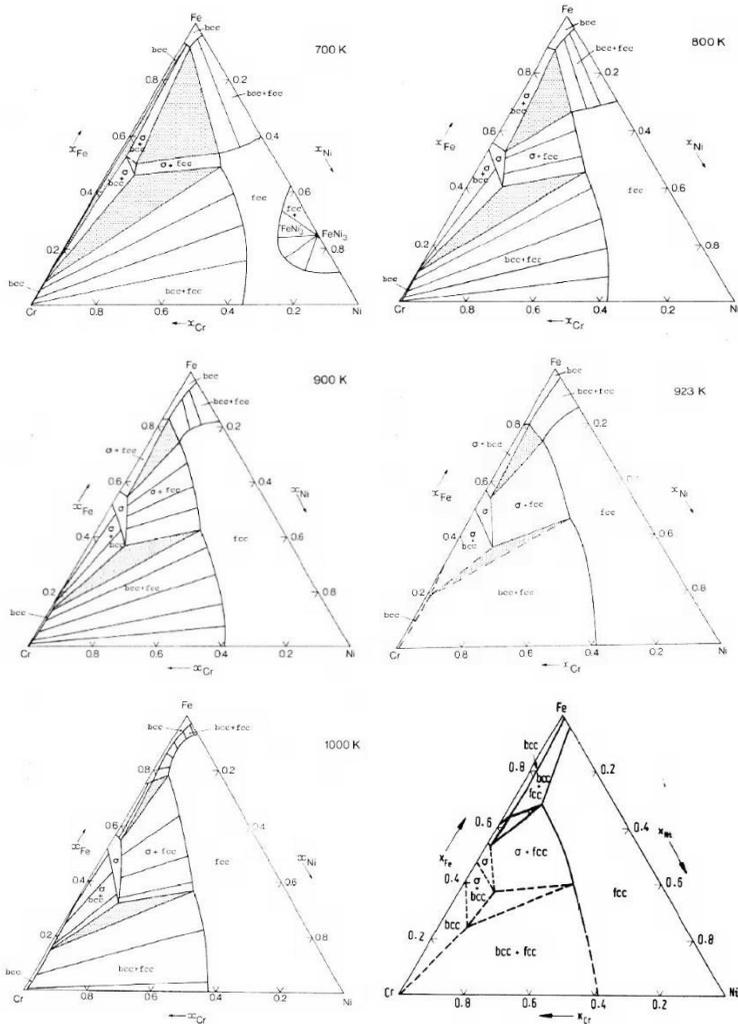
menjadi sempit. Dikarenakan kemampuan berdifusi unsur-unsur pembentuk ferit lebih tinggi dari austenit, maka unsur-unsur tersebut lah yang tertarik ke batas butir. Ketika daerah yang tinggi energi menghilang, sistem dalam keadaan stabil.

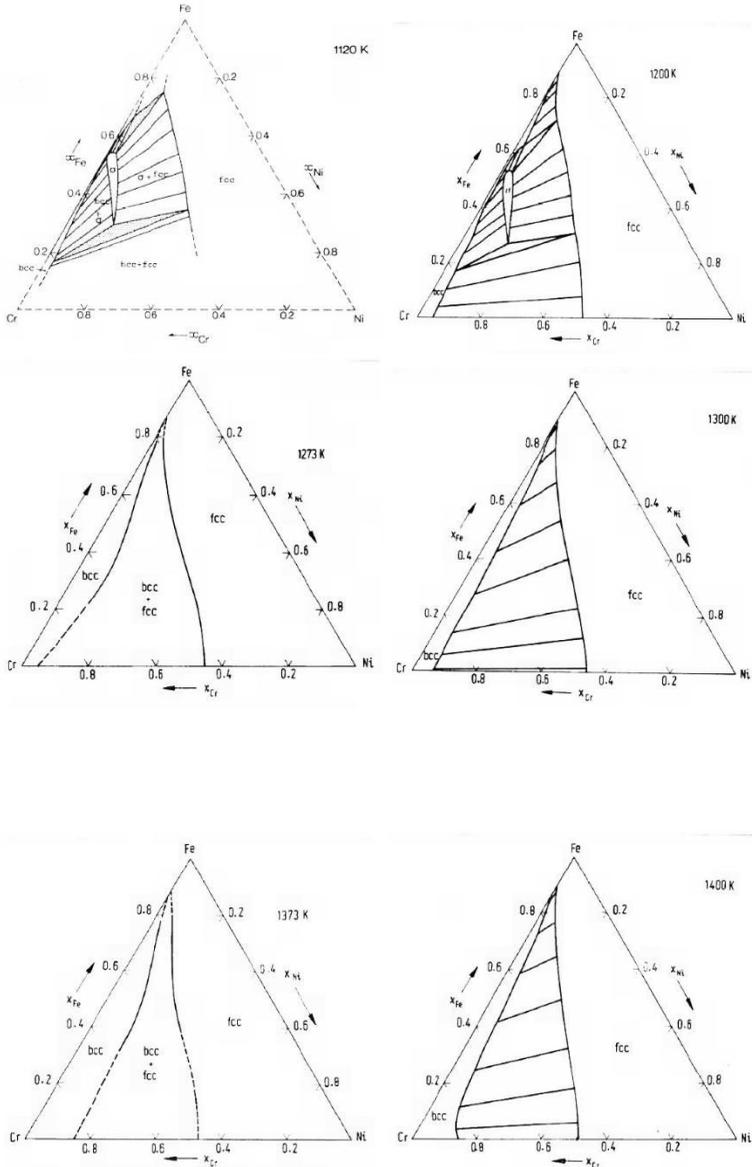
Adanya fasa sigma pada baja tahan karat mempengaruhi sifat dari baja tahan karat tersebut. Salah satu pengaruhnya ialah terbentuknya daerah yang kekurangan Cr (*Cr Depleted Region*) dan turunnya ketahanan korosi. Presipitasi fasa sigma menurunkan ketahanan korosi baja tahan karat terhadap korosi intergranular, korosi sumuran (*pitting corrosion*) dan korosi celah (*crevice corrosion*). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, ketahanan korosi suatu material terhadap korosi sumuran memiliki hubungan yang penting dengan kandungan Cr pada material tersebut. Korosi sumuran selalu terjadi pada daerah dengan kandungan Cr yang rendah. Umumnya, batas fasa austenit merupakan tempat banyaknya korosi sumuran terjadi karena austenit pada daerah tersebut memiliki kandungan Cr yang rendah. Tetapi daerah yang kekurangan Cr tersebut akan menghilang secara perlahan bersamaan dengan difusi Cr, dimana permasalahan ini hanya terjadi pada austenit bukan ferit. Fasa sigma hampir selalu terbentuk pada batas penghubung antara fasa austenit-ferit dan menyebabkan terbentuknya daerah yang kekurangan Cr. Adanya fasa sigma dan austenit menstimulasi efek galvanik, dimana daerah austenit lah yang terkorosi. Hal tersebut menyebabkan turunnya ketahanan korosi material.

Salah satu cara untuk menghilangkan fasa sigma adalah dengan melakukan *solution treatment*. Ketika baja tahan karat dipanaskan pada temperatur di atas 1050°C , fasa sigma akan berdifusi dan larut ke dalam austenit. Proses larutnya sigma ke dalam austenit disebut *sigma to austenit phase transformation*. Temperatur *solution annealing* guna menghilangkan fasa sigma pada super duplex SAF 2507 ialah sebesar 1025°C – 1125°C



(Ansara dkk. 1985; ASTM A923. 2003; Bettini dkk. 2014; Hong dkk. 2013; Hsieh dan Wu 2012; Villalobos 2009). Proses larutnya sigma pada material ini dapat dilihat dari diagram fasa Fe-Cr-Ni pada gambar 2.15.





Gambar 2.15 Gambar diagram fasa terneri Fe-Cr-Ni



(Sumber: Ansara dkk. 1985)

Pada diagram terneri Fe-Cr-Ni tersebut dapat terlihat bahwa semakin tinggi temperatur, fasa sigma semakin larut dan menghilang. Pada temperatur 1273K (1000°C) fasa sigma sudah sepenuhnya larut (Ansara dkk. 2008).

2.4 Korosi Sumuran

Korosi sumuran merupakan salah satu bentuk korosi lokal pada permukaan. Korosi ini hanya menyerang sebagian kecil daerah logam tetapi mengarah pada pembentukan rongga dan lubang. Logam yang memiliki kemampuan untuk membentuk lapisan film pasif, seperti aluminium dan baja, lebih rentan terserang korosi sumuran. Jenis korosi ini merupakan korosi yang paling tersembunyi dan membahayakan karena hanya dengan hilangnya massa dalam jumlah kecil, sudah dapat menyebabkan kegagalan pada seluruh struktur.

Secara umum, lingkungan yang paling kondusif untuk korosi ini adalah lingkungan laut. Ion-ion seperti Cl^- , Br^- dan I^- pada konsentrasi yang cukup besar cenderung menjadi penyebab korosi sumuran pada baja. Reaksi oksidasi ion logam dengan klorida, seperti *cupric*, *ferric* dan *mercuric*, menyebabkan korosi sumuran yang parah. Kondisi yang paling penting yang menyebabkan korosi sumuran terjadi ialah logam harus pada keadaan pasif. Keadaan pasif maksudnya ialah adanya lapisan film protektif pada permukaan logam. Baja dan aluminium memiliki kecenderungan untuk berada pada keadaan pasif. Logam-logam yang memiliki lapisan pasif protektif memiliki ketahanan korosi seragam (*uniform corrosion*) yang tinggi. Proses terbentuknya korosi sumuran ini merusak lapisan protektif logam yang menyebabkan hilangnya pasifitas dan menginisiasi terbentuknya lubang pada permukaan logam. Daerah yang cenderung untuk terjadi korosi sumuran ialah batas butir. Baja



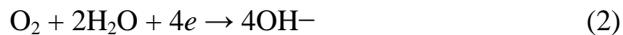
dengan ukuran butir yang kecil cenderung lebih mudah terjadi korosi sumuran dibanding baja dengan ukuran butir yang besar.

Proses terbentuknya lubang pada korosi sumuran ialah sebagai berikut :

1. Proses dimulai dengan pembentukan anoda karena rusaknya lapisan film protektif pada permukaan, yang kemudian terjadi reaksi oksidasi pada anoda tersebut sebagai inisiasi terjadinya *pitting*. Reaksinya ialah sebagai berikut :



Sedangkan terjadi reaksi katodik pada oksigen. Sebenarnya seluruh permukaan bersentuhan langsung dengan elektrolit yang mengandung oksigen, maka dari itu reaksi ini terjadi.



2. Karena reaksi oksidasi terus terjadi, kelebihan ion positif M^+ terkumpul di anoda. Untuk menjaga kenetralan, ion negatif seperti klorida (Cl^-) bermigrasi dari elektrolit (contohnya ialah air laut).



Ion OH^- juga ikut bermigrasi untuk menjaga kenetralan. Reaksi M^+Cl^- dengan H_2O menghasilkan MOH , H^+ , dan Cl^-

3. Kehadiran ion-ion H^+ dan klorida menghalangi repasivasi
4. Meningkatnya laju reaksi oksidasi pada anoda juga meningkatkan laju migrasi ion klorida. Reaksi ini menjadi bergantung pada waktu dan berjalan saecara terus



menerus, sehingga semakin banyak jumlah M^+Cl^- dan H^+ serta Cl^- yang terbentuk.

5. Proses berlanjut hingga logam berlubang. Proses ini autokatalitik dan meningkat seiring berjalannya waktu.
6. Akhirnya setelah logam berlubang, reaksi berhenti.

Dari proses-proses tersebut dapat disimpulkan bahwa proses terbentuknya lubang pada korosi sumuran terdiri dari tiga tahapan, yaitu *pitting initiation*, *pitting propagation* dan *pitting termination*. Tahap pertama menjelaskan *pitting initiation*. Tahap kedua hingga kelima menjelaskan *pitting propagation* dan tahap keenam menjelaskan *pitting termination* (Ahmad 2010).

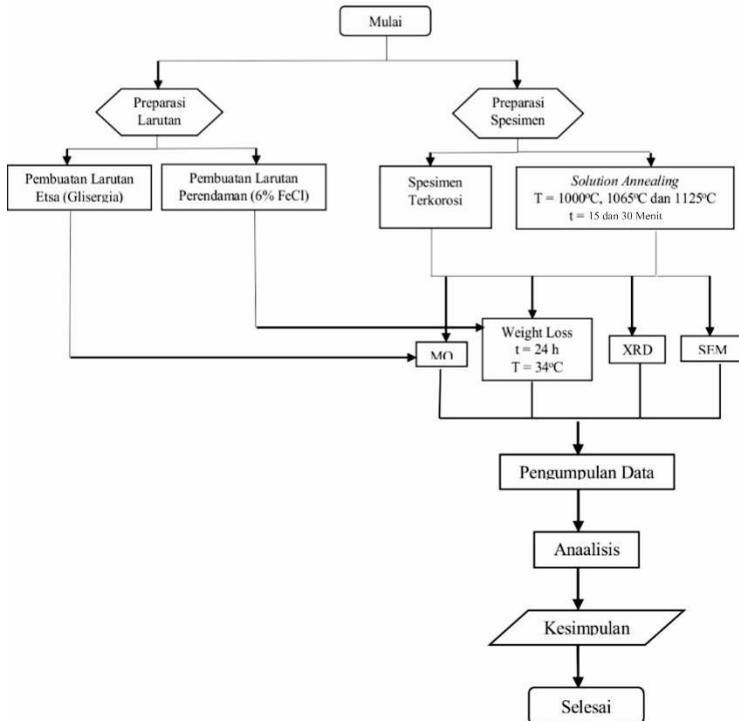
Pada baja tahan karat super duplex SAF 2507 dilakukan pengujian dengan merendam sampel pada larutan 6% $FeCl_3$. Pengujian ini merupakan modifikasi dari ASTM G48-A. Pada pengujian yang dilakukan, sampel direndam selama 24 jam. Ketika sudah terdeteksi adanya *pit* seiringan dengan berkurangnya massa sampel (>5 mg) maka pengujian dihentikan. Ketika *pit* belum terdeteksi maka temperatur dinaikkan sebanyak 5°C dan pengujian dilanjutkan hingga terbentuk *pit* (Sandvik 2015).



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Gambar Diagram Alir Penelitian



3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Bahan-Bahan Penelitian

1. Spesimen Uji
Spesimen uji merupakan *seamless tube* super duplex SAF 2507 dengan komposisi kimia sebagai berikut :

Tabel 3.1 Tabel komposisi kimia Super Duplex SAF 2507

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Others
≤0.03	≤0.8	≤1.2	≤0.0 25	≤0.0 15	25	7	4	N=0.3

(Sumber : Sandvik 2015)

2. Resin dan Katalis
Digunakan untuk mencetak spesimen metalografi
3. Autosol atau Alumina
Dioleskan di atas permukaan spesimen ketika proses *polishing*
4. Larutan Etsa
Larutan etsa yang digunakan merupakan Glisergia
5. Larutan Perendaman
Larutan perendaman yang digunakan adalah 6% FeCl₃
6. Aquades
Digunakan untuk pembuatan larutan dan pembersihan spesimen setelah perendaman

3.2.2 Alat-alat Penelitian

1. *Cutting Tool*
Digunakan untuk memotong spesimen yang awalnya berbentuk *tube* menjadi *coupon*
2. *Drilling Tool*
Digunakan untuk melubangi bagian tengah sisi atas kupon yang akan berfungsi untuk menggantung spesimen ketika proses perendaman
3. *Furnace*
Digunakan untuk melakukan proses *annealing* pada spesimen SAF 2507
4. *Abrasive Paper Grade 80 - 2000*
Digunakan untuk membersihkan permukaan spesimen



5. Pipa PVC
Digunakan untuk mencetak spesimen *sample* uji metallografi
6. *Polishing Machine*
Digunakan untuk proses *polishing* pada preparasi metallografi
7. *Metal Tongs*
Digunakan ketika mengeluarkan spesimen dari *furnace* saat proses *annealing*
8. Jangka Sorong
Digunakan untuk mengukur spesimen
9. Gelas Ukur 10 ml
Digunakan untuk membuat larutan etsa
10. Gelas kimia 250 ml
Digunakan sebagai tempat larutan perendaman
11. Timbangan Digital
Digunakan untuk menimbang spesimen sebelum dan sesudah proses perendaman
12. *Hot Plate*
Digunakan untuk memanaskan larutan selama proses perendaman
13. Benang
Digunakan untuk menggantung spesimen pada kayu ketika proses perendaman
14. Batang Kayu
Digunakan untuk menggantung spesimen agar tidak menyentuh permukaan gelas kimia ketika proses perendaman

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Spesimen

Spesimen *seamless tube* super duplex SAF 2507 terbagi menjadi 2, yaitu spesimen kontrol yang memiliki fasa sigma dan spesimen hasil perlakuan panas. Perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini adalah *solution annealing* dengan pendinginan



water quench. Langkah-langkah preparasi yang dilakukan ialah sebagai berikut :

1. Pemotongan Spesimen

Seamless tube super duplex SAF 2507 yang digunakan pada penelitian ini awalnya berbentuk *tube* kemudian dibentuk *plate* dan dipotong dengan ukuran 20 mm x 10 mm x 2.3 mm sebanyak 28 buah. Ukuran spesimen dipotong berdasarkan standard ASTM G31-72 dan disesuaikan dengan volume larutan rendam. Berikut adalah rumusan ukuran dan rincian pembagian spesimen :

$$\text{Volume larutan} = (0.2 \text{ s/d } 0.4) \times \text{luas permukaan} \quad (3.1)$$

$$\text{Luas Permukaan} = (2 \times p \times l) + (2 \times p \times t) + (2 \times l \times t) \quad (3.2)$$

Dengan panjang spesimen 10 mm, lebar spesimen 2.3 mm dan tinggi spesimen 20 mm didapatkan luas permukaan *sample* sebesar 538 mm² dan volume larutan rendam minimal sebesar 215.2 ml.

Tabel 3.2 Tabel Pembagian Jumlah Spesimen

Pengujian	Material Aging	Material dengan Perlakuan
SEM, XRD, MO	1	6
Weight Loss	1	18

2. Pengeboran Spesimen

Untuk pengujian ketahanan korosi, pada spesimen yang telah dipotong dan berbentuk kupon, dilakukan pengeboran spesimen pada bagian sisi tengah atas yang berfungsi sebagai tempat untuk menggantung spesimen.

3. Pengamplasan Spesimen

Pengamplasan spesimen dilakukan dengan menggunakan kertas amplas grade 80 hingga 2000. Tujuan dari langkah



ini adalah untuk membersihkan permukaan spesimen dan untuk menghilangkan lapisan oksida pada spesimen.

4. *Mounting*

Mounting dilakukan dengan mencampurkan resin dan katalis kemudian menuangkannya ke dalam pipa pvc yang didalamnya sudah diletakkan spesimen uji kemudian mendiampkannya selama beberapa saat hingga mengeras. Proses ini bertujuan untuk memudahkan proses *grinding* dan *polishing*.

5. Penimbangan Massa Awal Spesimen

Spesimen yang akan diuji *weight loss* dilakukan penimbangan dengan timbangan digital terlebih dahulu untuk mengetahui massa awalnya

3.3.2 Perlakuan Panas

Perlakuan Panas yang dilakukan pada sampel super duplex SAF 2507 *solution annealing*. Berdasarkan ASTM A923, fasa intermetalik terbentuk ketika material terpapar panas pada temperatur 320 °C – 955°C. Sehingga untuk mereduksi atau menghilangkan fasa sigma, *sample* dipanaskan pada temperatur *solution annealing*, ditahan selama beberapa waktu kemudian dilakukan *water quenching*. Setiap variasi temperatur dan *holding time* dilakukan repetisi sebanyak 3 kali.

Variasi temperatur dan metode pendinginan yang digunakan berdasar pada diagram terneri Fe-Cr-Ni dan ASTM A480. Pada diagram terneri Fe-Cr-Ni ketidakhadiran fasa sigma dimulai dari temperatur 1000°C. Sedangkan menurut ASTM A480, persyaratan *heat treatment* untuk duplex *stainless steel* dengan tipe S32750 ialah dilakukan *solution annealing* dengan *range* temperatur 1025 °C hingga 1125 °C yang diikuti dengan *water quenched*. Penentuan *holding time* dilakukan berdasarkan perhitungan difusivitas panas sebagai berikut :



$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.3)$$

Tabel 3.3 Tabel perhitungan difusivitas panas dan homogenisasi temperatur

Temperatur (°C)		1000	1065	1125
ρ (kg/m ³)		7805	7805	7805
A (mm ²)		538	538	538
k (J/s.m.°C)		1512.3	1609.8	1699.8
Cp (J/Kg.°C)		23959.5	25487	26897
α	(m ² /s)	8.086 x 10 ⁻⁶	8.092 x 10 ⁻⁶	8.096 x 10 ⁻⁶
	(mm ² /s)	8.1	8.1	8.1
t (s)		66.42	66.42	66.42

Hal ini berarti untuk menghomogenkan temperatur pada sampel dengan panjang 10 mm, lebar 2.3 mm dan tinggi 20 mm dibutuhkan waktu yang sama, yaitu sebesar 66.42 detik pada temperatur 1000°C, 1065 °C dan 1125 °C. Karena untuk melarutkan fasa sigma dibutuhkan waktu yang lebih lama, maka waktu tersebut hanya digunakan sebagai waktu minimal untuk *sample* memiliki temperatur yang homogen. Maka dari itu variasi temperatur yang digunakan ialah 1000°C, 1065 °C dan 1125 °C. Sedangkan variasi *holding time* yang digunakan untuk setiap temperatur ialah 15 menit dan 30 menit. Variasi ini digunakan karena dibutuhkan waktu untuk fasa sigma guna bertransformasi setelah temperatur material homogen.

3.3.3 Preparasi Larutan

Larutan yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas larutan etsa dan larutan perendaman.

Preparasinya ialah sebagai berikut :

1. Larutan Etsa

Berdasarkan ASTM E407 larutan etsa yang digunakan merupakan gliseria.



2. Larutan perendaman

Berdasarkan ASTM G48 larutan etsa yang digunakan ialah 6% FeCl₃. Untuk setiap *sample* dibutuhkan volume larutan rendam minimal sebanyak 215.2 ml.

3.3.4 Pengujian – Pengujian

Untuk menganalisis perubahan struktur mikro dan ketahanan korosi dari *seamless tube* super duplex SAF 2507, maka dilakukan empat jenis pengujian. Pengujian – pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian XRD bertujuan untuk melihat fasa. Dari pengujian ini dapat diketahui pengaruh *solution annealing* terhadap senyawa dan fasa yang ada pada *sample*. Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.

2. Mikroskop Optik (MO)

Pengujian MO bertujuan untuk melihat struktur mikro sebagai identifikasi awal larutnya fasa sigma. Dari pengujian ini dapat diketahui pengaruh *solution annealing* terhadap struktur mikro *sample*. Pengujian MO dilakukan di Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS.

3. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian SEM dilakukana guna mendukung hasil pengujian mikroskop optik. Pengujian SEM bertujuan untuk melihat morfologi. Dari pengujian ini dapat diketahui pengaruh *solution annealing* terhadap morfologi *sample*. Pengujian SEM dilakukan dengan SEM jenis BSE di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

4. *Weight Loss Method Corrosion Testing*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengurangan massa sampel saat keadaan temperatur



ketika *seamless tube* super duplex SAF 2507 digunakan pada *heat exchanger*. Dua jenis *sample*, yaitu *sample* yang telah memiliki fasa sigma dan yang telah dilakukan *solution annealing*, ditimbang massa awalnya. Kemudian sampel-sampel tersebut direndam di dalam larutan 6%FeCl₃ pada temperatur 34°C selama 24 jam. Kemudian setelah direndam *sample* dibersihkan kemudian ditimbang kembali.

3.3.5 Analisis

1. Analisis Struktur Mikro

Hasil uji metalografi yang berupa struktur mikro dari *sample* yang memiliki fasa sigma dan yang telah melalui proses *solution annealing* dibandingkan untuk melihat pengaruh dari proses *aging* dan *solution annealing* terhadap struktur mikro pada super duplex SAF 2507.

2. Analisis Morfologi

Dari hasil uji SEM *sample* yang memiliki fasa sigma dan yang telah melalui proses *solution annealing*, dapat dibandingkan adanya tidaknya presipitasi fasa sigma..

3. Analisis Fasa

Dari pengujian XRD dapat diketahui dan dibandingkan senyawa-senyawa pembentuk fasa yang ada pada *sample*. Selain itu, dapat juga diketahui pengaruh dari *solution annealing* terhadap keberadaan fasa sigma.

4. Analisis Ketahanan Korosi dengan Metode *Weight Loss*

Dari pengujian yang dilakukan didapatkan massa awal, massa akhir dan selisih massa. Sehingga dari data yang ada dapat dilakukan perbandingan hilangnya massa sampel dari *sample* yang memiliki fasa sigma dan yang telah melalui proses *solution annealing*. Selain itu dapat pula dilakukan perhitungan laju korosi sesuai dengan yang tercantum pada ASTM G31



$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W)/(A \times T \times D)$$

Keterangan :

K = konstanta laju korosi (8.76×10^4)

W = massa yang hilang (g)

A = luas permukaan (cm^2)

D = densitas spesimen (g/cm^3)

T = waktu perendaman (jam)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Komposisi

Tabel 4.1 Tabel Perbandingan Komposisi SAF 2507

Unsur	Hasil Pengujian (%)	Standard SAF 2507 (%)
C	0.0378	0.030 max.
Cr	27.5	25
Ni	6.47	7
Mo	3.77	4
Si	0.397	0.8 max.
Mn	0.432	1.2 max.
N	0.23	0.3
Lain-Lain	0.363	0.3

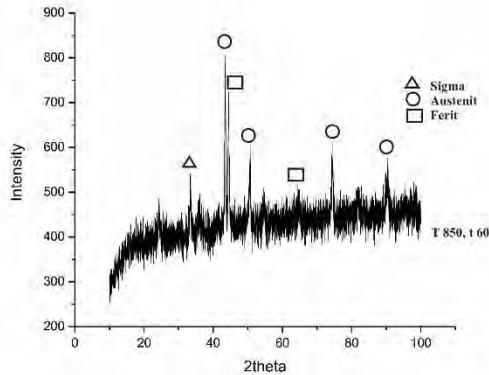
Tabel 4.1 merupakan tabel hasil pengujian komposisi sampel SAF 2507 dan perbandingannya dengan komposisi pada *datasheet* Sandvik SAF 2507. Data hasil pengujian sampel menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda, kecuali pada unsur krom yang sedikit lebih tinggi dari seharusnya. Dari data hasil pengujian didapatkan *chrom equivalent* sebesar 31.89% dan *nickel equivalent* sebesar 7.82% dimana pada Diagram Schaeffler DeLong, daerah dengan nilai tersebut merupakan daerah baja tahan karat duplex.

4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD dilakukan pada Super Duplex SAF 2507 yang masih baru, hasil *aging* dan telah melalui proses *solution annealing*. Pengukuran difraksi sinar-X dilakukan dengan rentang sudut 10-90° dan dengan menggunakan panjang gelombang Cu-K α 1.54060. Dari hasil XRD diperoleh *peak-peak* dengan intensitas tertentu. *Peak-peak* yang memiliki intensitas tertinggi dicocokkan menggunakan kartu PDF untuk mengetahui fasa atau senyawa yang terkandung pada sampel.



a. Hasil Pengujian XRD Super Duplex SAF 2507 Sampel yang Telah Terkorosi



Gambar 4.1 Grafik Hasil XRD SDSS SAF 2507 Sampel Terkorosi

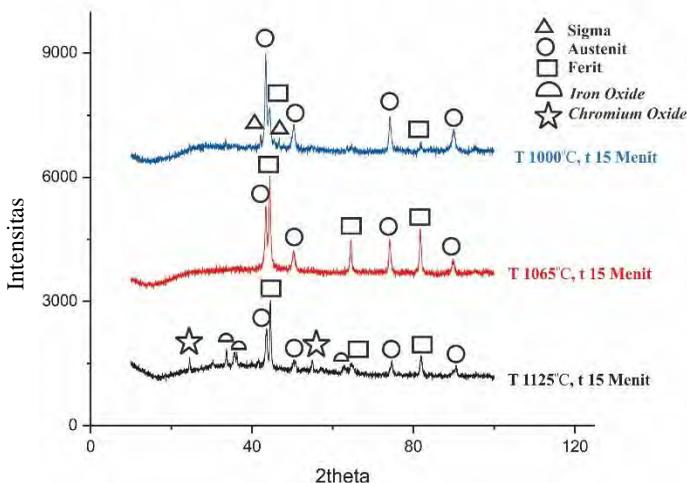
Gambar 4.1 menunjukkan grafik hasil XRD Super Duplex *Stainless Steel* SAF 2507 pada sampel yang telah terkorosi. Dari hasil analisis menunjukkan adanya kecocokan antara kartu PDF 47-1417 yang menunjukkan fasa γ -austenit, kartu PDF 03-065-9117 yang menunjukkan fasa σ -sigma dan kartu 85-1410 yang menunjukkan fasa α -ferit. Selain itu, mengacu pada diagram fasa terneri Fe-Cr-Ni (Gambar 2.15) bahwa pada temperatur 1120K, ditemukan adanya fasa sigma pada baja tahan karat dengan kandungan 25% Cr dan 7%Ni.

Fasa γ -austenit terletak pada 2theta 43,4620; 50,6975; 74,3579 dan 90,5031 dimana pada 2theta 43,4620 merupakan *peak* tertinggi pertama dengan 2theta 349,83 cts. Fasa α -ferit terletak pada 2theta 44,5252 dan 64,5466 dimana 2theta 44,5252 memiliki *peak height* 256,65 cts. Sedangkan fasa σ -sigma terletak pada 2theta 35,9779 dengan *peak height* 52,12 cts.



b. Hasil Pengujian XRD Super Duplex SAF 2507 Sampel *Solution Annealing*

Hasil XRD dari sampel *solution annealing* dengan *holding time* selama 15 menit dapat dilihat pada gambar 4.2 dan *holding time* selama 30 menit dapat dilihat pada gambar 4.3. Setelah dilakukan analisa dengan menggunakan kartu PDF, fasa-fasa yang terbentuk pada pemanasan temperatur 1000°C ialah γ -austenit, α -ferit dan σ -sigma. Pada pemanasan temperatur 1065°C fasa yang terbentuk ialah fasa γ -austenit dan α -ferit. Sedangkan pada pemanasan temperatur 1125°C fasa yang terbentuk ialah γ -austenit dan α -ferit serta *iron oxide* dan *chromium oxide*. Analisa puncak-puncak pada fasa ferit sesuai dengan kartu PDF 85-1410, fasa γ -austenit sesuai dengan kartu PDF 023-0298, fasa sigma sesuai dengan kartu PDF 03-065-9117, *iron oxide* sesuai dengan kartu PDF 00-019-0629 dan *chromium oxide* sesuai dengan kartu PDF 00-006-0504.



Gambar 4.2 Grafik Hasil XRD *solution annealed*-SAF 2507 dengan waktu tahan selama 15 menit

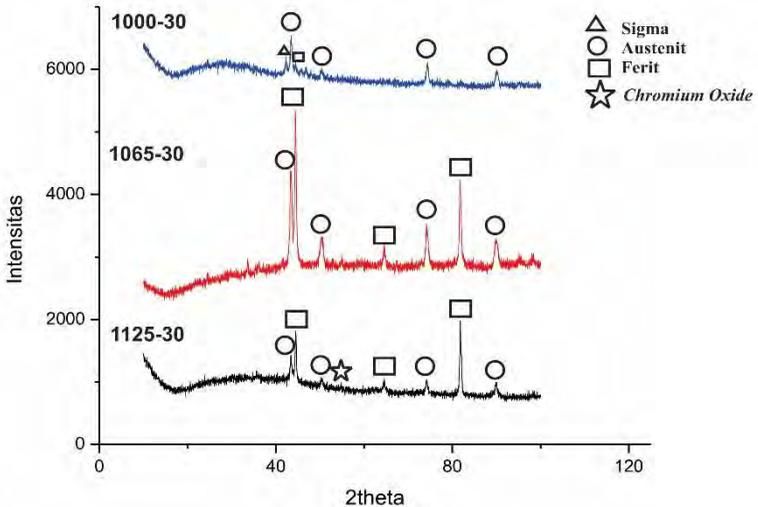


Untuk *holding time* selama 15 menit, pada temperatur 1000°C fasa γ -austenit dapat ditemukan pada *peak* dengan 2θ 43,3603; 50,4758; 74,1943 dan 89,9874 dimana 2θ 43,3603 merupakan *peak* tertinggi pertama dengan *peak height* sebesar 2138,36 cts. Fasa α -ferit dapat ditemukan pada 2θ 44,3534 dan 81,7198 dimana 2θ 44,3534 merupakan *peak* tertinggi kedua dengan *peak height* 961,08 cts. Sedangkan fasa σ -sigma dapat ditemukan pada 2θ 42,1229 dan 46,7144. Dengan *peak height* sebesar 306,66 cts pada 2θ 42,1229.

Pada temperatur 1065°C, fasa γ -austenit dapat ditemukan pada *peak* dengan 2θ 43,3110; 50,3102; 89,7431 dan 74,0526 dimana 2θ 43,3110 merupakan *peak* tertinggi kedua dengan *peak height* 1357,57 cts. Fasa α -ferit dapat ditemukan pada 2θ 44,4177, 81,6927 dan 64,4625 dimana 2θ 44,4177 merupakan puncak tertinggi dengan *peak height* 2207,17 cts.

Pada temperatur 1125°C, fasa γ -austenit dapat ditemukan pada *peak* dengan 2θ 43,6478; 50,8247; 74,6102 dan 90,5330 dimana 2θ 43,647 merupakan *peak* tertinggi kedua dengan *peak height* 925,84 cts. Fasa α -ferit dapat ditemukan pada *peak* dengan 2θ 44,5101; 64,5600 dan 81, 8113 dimana 2θ 44,5101 merupakan *peak* tertinggi pertama dengan *peak height* sebesar 1591,91 cts. Kromium Oksida terletak pada 2θ 24,5451; 36,3044 dan 54,9148 dimana 2θ 24,5451 memiliki *peak height* 309,35. Iron Oxide terletak pada 2θ 30,2233, 35,6042 dan 62,7857 dimana pada 2θ 35,6042 memiliki *peak height* 314,13 cts.

Untuk *holding time* selama 30 menit, pada temperatur 1000°C fasa γ -austenit dapat ditemukan pada *peak* dengan 2θ 43,4693; 50,3434; 74,3528 dan 90,0524 dimana 2θ 43,4693 merupakan *peak* tertinggi dengan *peak height* 547,09 cts. Fasa α -ferit dapat ditemukan pada 2θ 44,5356 dengan *peak height* 179,01 cts. Sedangkan fasa σ -sigma dapat ditemukan pada 2θ 42,2990 dan 46,8315 dimana 2θ 42,2990 merupakan *peak* tertinggi ketiga dengan *peak height* 271,43 cts.



Gambar 4.3 Grafik Hasil XRD *solution annealed*-SAF 2507 dengan waktu tahan selama 30 menit

Pada temperatur 1065°C, fasa γ -austenit dapat ditemukan pada *peak* dengan 2theta 43,5719; 50,7742; 74,1543 dan 89,9287 dimana 2theta 43,5719 memiliki *peak height* 1501,77 cts. Fasa α -ferit dapat ditemukan pada 2theta 44,4350; 64,5782 dan 81,7205 dimana 2theta 44,4350 merupakan *peak* tertinggi pertama dengan *peak height* 2412,22 cts.

Pada temperatur 1125°C, fasa γ -austenit dapat ditemukan pada 2theta 43.4197, 50,7742; 74,1822 dan 90,0403 dimana pada 2theta 43.4197 memiliki *peak height* 376.03 cts. Fasa α -ferit dapat ditemukan pada 2theta 44,4729; 64,5665 dan 81,8022 dimana 2theta 81,8022 merupakan *peak* tertinggi dengan *peak height* 1156,01 cts. Kromium oksida ditemukan pada 2theta 54,8810 dengan *peak height* 43,09 cts.

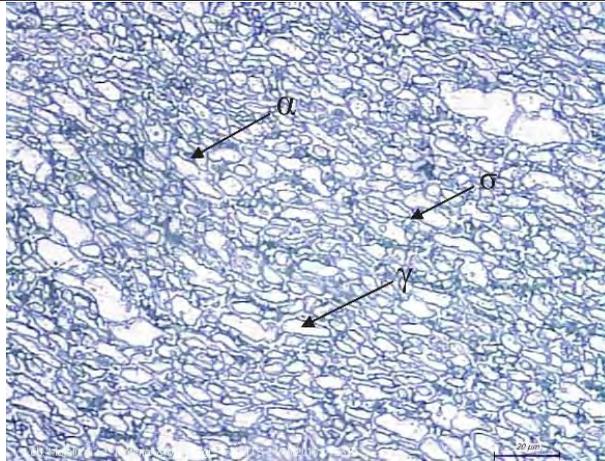


Pada hasil *solution annealing* dengan pemanasan pada temperatur 1000°C fasa yang terbentuk ialah fasa γ -austenit, fasa α -ferit dan fasa σ -sigma. Adanya fasa σ -sigma pada yang tersisa pada hasil *solution annealing* dengan pemanasan pada temperatur 1000°C dikarenakan fasa sigma belum seutuhnya bertransformasi dan larut. Berdasarkan *datasheet* Sandvik untuk *seamless tube* dan ASTM A480 temperatur yang digunakan untuk proses *solution annealing* ialah antara 1025°C hingga 1125°C. Selain itu ditinjau dari diagram *Time-Temperature-Transformation* (TTT), untuk super duplex *stainless steel* tipe 2507 pada temperatur 1000°C masih ditemukan adanya fasa sigma.

Pada hasil *solution annealing* dengan temperatur pemanasan 1065°C dan 1125°C fasa yang terbentuk adalah fasa γ -austenit dan fasa α -ferit serta sudah tidak lagi ditemukan fasa σ -sigma karena fasa σ -sigma sudah larut seutuhnya. Hal tersebut sesuai dengan diagram terneri Fe-Cr-Ni dimana pada temperatur antara 1300K-1400K (1027°C-1127°C) sudah tidak lagi ditemukan adanya fasa σ -sigma. Ini juga didukung oleh diagram *Time-Temperature-Transformation* (TTT) dimana untuk material super duplex *stainless steel* tipe 2507 pada temperatur diatas 1000°C fasa yang terbentuk ialah fasa γ -austenit dan α -ferit. Selain itu berdasarkan ASTM A923 temperatur 1065°C dan 1125°C bukan merupakan pembentukan fasa σ -sigma. Sehingga pada temperatur ini fasa σ -sigma tidak lagi ditemukan. Penurunan dan hilangnya fasa σ -sigma didukung oleh hasil pengujian metalografi, SEM, perhitungan persen fasa menggunakan Image-J dan uji *weight loss*.

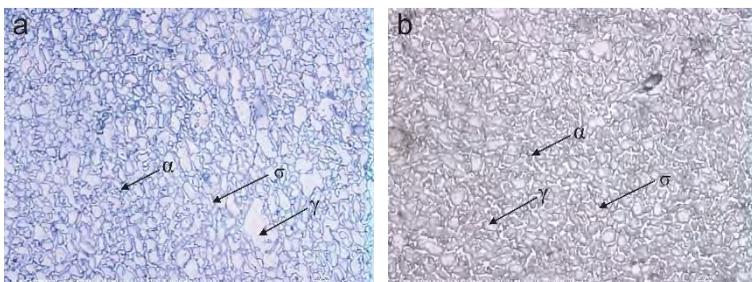
4.3 Hasil Uji Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari temperatur dan *holding time solution annealing* terhadap keberadaan fasa sigma pada Super Duplex SAF 2507 yang telah terkorosi. Etsa yang digunakan adalah glisergia. Gambar 4.5 menunjukkan hasil uji metalografi dari Super Duplex SAF 2507 tanpa perlakuan.

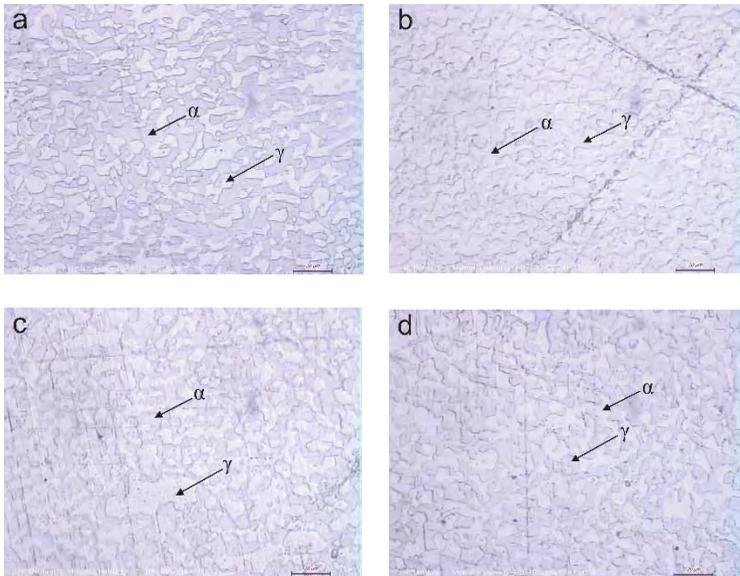


Gambar 4.4 Gambar hasil struktur mikro SAF 2507 sampel terkorosi perbesaran 500x

Hasil uji metalografi dari Super Duplex SAF 2507 yang telah terkorosi ditunjukkan oleh gambar 4.4. Fasa yang terbentuk pada gambar tersebut ialah γ -austenit α -ferit, dan σ -sigma. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Fargas (2013), fasa γ -austenit berbentuk seperti pulau, fasa α -ferit merupakan yang berwarna hitam dan fasa σ -sigma merupakan daerah terang yang mengelilingi γ -austenit.



Gambar 4.5 Hasil struktur mikro perbesaran 500x SAF 2507 hasil *solution annealing* dengan temperatur pemanasan 1000°C selama (a) 15 menit (b) 30 menit



Gambar 4.6 Gambar hasil struktur mikro perbesaran 500x SAF 2507 hasil *solution annealing* pada temperatur 1065°C dengan waktu tahan (a) 15 menit dan (b) 30 menit serta pada temperatur 1125°C dengan waktu tahan (c) 15 menit dan (d) 30 menit

Gambar 4.5 menunjukkan gambar hasil *solution annealing* sampel pada temperatur 1000°C dengan waktu tahan (a) 15 menit dan (b) 30 menit. Pada temperatur pemanasan ini fasa yang ditemukan ialah γ -austenit α -ferit, dan σ -sigma. Adanya fasa σ -sigma tersisa pada pemanasan temperatur 1000°C dikarenakan fasa σ -sigma belum larut seutuhnya. Menurut ASTM A-480 temperatur batas bawah untuk *solution annealing* ialah 1025°C. Gambar 4.6 menunjukkan gambar hasil *solution annealing* sampel pada temperatur 1065°C dengan waktu tahan (a) 15 menit dan (b) 30 menit serta hasil *solution annealing* sampel pada temperatur 1125°C dengan waktu tahan (a) 15 menit dan (b) 30 menit. Pada temperatur 1065°C dan 1125°C sudah tidak lagi ditemukan



adanya fasa σ -sigma, ini sesuai dengan diagram terneri Fe-Cr-Ni dimana pada temperatur tersebut fasa yang ada ialah γ -ausenit dan α -ferit. Fasa γ -ausenit ditunjukkan berbentuk seperti pulau dan pada background merupakan matriks α -ferit, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fargas (2013).

Hasil metalografi menunjukkan bahwa seiring dengan larutnya fasa sigma, maka luasan daerah α -ferit semakin besar. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Chun-Hsieh (2012). Menyempitnya daerah α -ferit dikarenakan fasa σ -sigma mengonsumsi Cr dan Mo yang ada pada α -ferit. Selain penstabil dan pembentuk α -ferit, Cr dan Mo merupakan pembentuk fasa σ -sigma. Maka dari itu fasa sigma berpresipitasi pada daerah yang memiliki kandungan Cr dan Mo yang tinggi. Hasil pengujian struktur mikro dengan mikroskop optik ini diperjelas dengan hasil pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

4.4 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

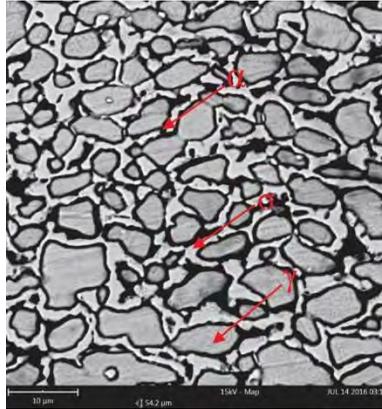
Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengetahui pengaruh *aging* dan *solution annealing* terhadap morfologi sampel. Pengujian SEM dilakukan dengan menggunakan alat SEM jenis Back Scattered Electron (BSE).

a. Hasil Pengujian Super Duplex SAF 2507 pada sampel hasil *aging*

Gambar 4.7 merupakan gambar hasil pengujian SEM pada sampel SAF 2507 hasil *aging*. Gambar hasil pengujian ini menunjukkan bahwa fasa yang terdapat pada sampel ini ialah fasa γ -ausenit, α -ferit dan σ -sigma. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Fargas (2013), fasa γ -ausenit berbentuk seperti pulau, fasa α -ferit merupakan yang berwarna hitam dan fasa σ -sigma merupakan daerah yang berwarna abu-abu cerah. Daerah α -



ferit mengalami penyempitan akibat adanya presipitasi σ -sigma yang mengonsumsi Cr dan Mo pada fasa α -ferit.



Gambar 4.7 Gambar hasil pengujian SEM dengan perbesaran 5000x pada sampel SAF 2507 yang telah terkorosi

b. Hasil Pengujian Super Duplex SAF 2507 pada sampel hasil *solution annealing*

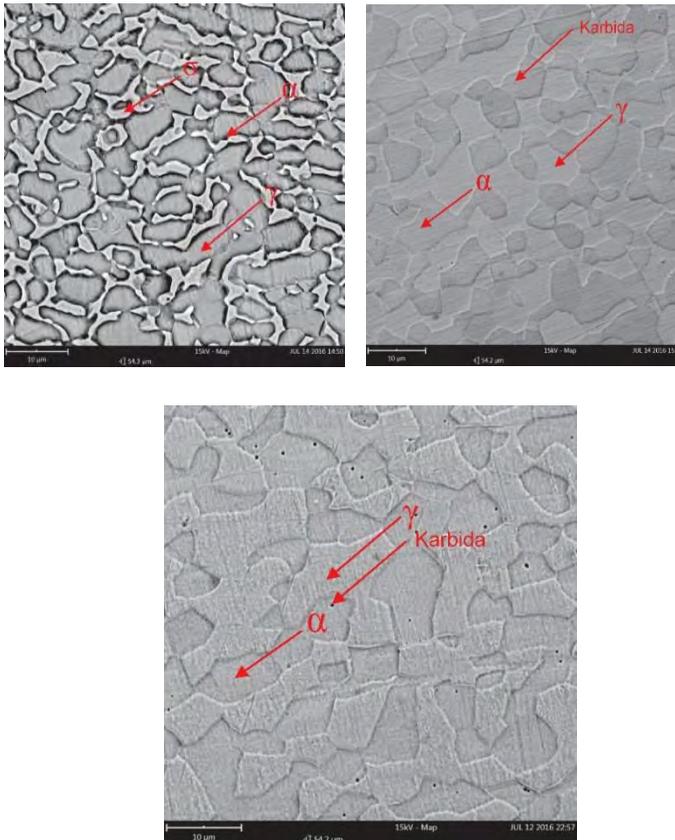
Gambar 4.8 merupakan gambar hasil pengujian SEM pada perbesaran 5000x sampel hasil *solution annealing* dengan waktu tahan selama 15 menit pada temperatur 1000°C, 1065°C dan 1125°C. Sedangkan gambar 4.9 merupakan gambar hasil pengujian SEM pada perbesaran 5000x sampel hasil *solution annealing* dengan waktu tahan selama 30 menit pada temperatur 1000°C, 1065°C dan 1125°C. Pada hasil pengujian SEM pada temperatur 1000°C masih ditemukan adanya fasa σ -sigma karena fasa σ -sigma belum sepenuhnya larut. Maka dari itu presipitasi fasa σ -sigma masih ada.

Pada temperatur 1065°C dan 1125°C sudah tidak ditemukan adanya fasa σ -sigma. Fasa yang terbentuk merupakan γ -austenit dan α -ferit serta ditemukan adanya karbida pada sampel. Berdasarkan hasil uji SEM karbida pada sampel temperatur 1125°C lebih banyak dibanding dengan pada sampel 1065°C. Hal

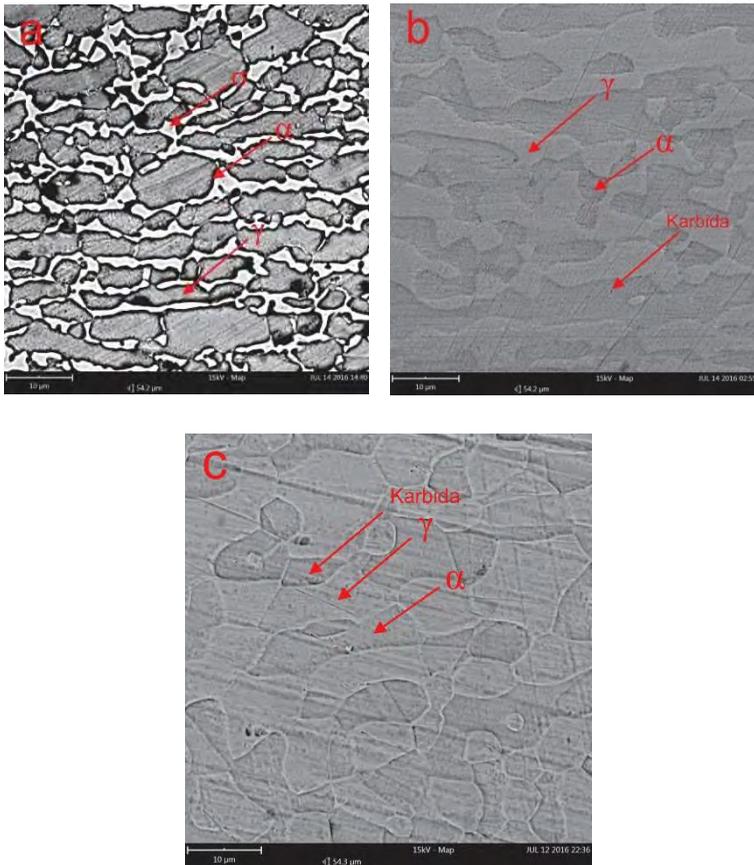


tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kashiwar (2013). Menurut Kashiwar, karbida krom berpresipitasi pada temperatur tinggi di daerah ferrit yang dikarenakan unsur-unsur pembentuk

ferrit memiliki kemampuan untuk berdifusi yang lebih tinggi dibandingkan austenit. Karbida ini terbentuk akibat setelah sampel selesai proses *holding time solution annealing*, ada jeda waktu selama beberapa detik hingga proses *quench*.



Gambar 4.8 Gambar Hasil Pengujian SEM dengan perbesaran 5000x pada sampel *solution annealing* dengan waktu tahan 15 menit pada temperatur (a) 1000°C (b) 1065 °C (c) 1125 °C



Gambar 4.9 Gambar Hasil Pengujian SEM dengan perbesaran 5000x pada sampel *solution annealing* dengan waktu tahan 30 menit pada temperatur (a) 1000°C (b) 1065 °C (c) 1125 °C

Tabel 4.2 merupakan tabel hasil perhitungan persen keberadaan fasa σ -sigma pada sampel pengujian SEM dengan menggunakan *software* Image-J. Pada sampel SAF 2507 yang terkorosi, jumlah fasa σ -sigma ialah sebanyak 34,364%. Pada



sampel hasil *solution annealing* dengan temperatur 1000°C jumlah fasa σ -sigma sebanyak 26,937% dan 26,937%. Dari hasil perhitungan fasa pada gambar hasil pengujian SEM, keberadaan fasa σ -sigma menurun dan hilang setelah sampel melalui proses *solution annealing*. Selain itu pada temperatur 1000°C, jumlah fasa σ -sigma menurun ketika terjadi kenaikan waktu tahan.

Tabel 4.2 Tabel Hasil Perhitungan Persen Fasa

Sampel	Austenit (%) + Ferit (%)	Sigma (%)
Terkorosi	65,636	34,364
SA 1000 - 15	73,063	26,937
SA 1000 - 30	73,923	26,077
SA 1065 - 15	100	-
SA 1065 - 30		-
SA 1125 - 15		-
SA 1125 - 30		-

4.5 Hasil Pengujian *Weight Loss*

Pengujian *weight loss* digunakan untuk mengetahui pengaruh dari proses *solution annealing* sampel SAF 2507 terhadap ketahanan korosinya pada lingkungan korosif. Tabel 4.3 dan gambar 4.10 menunjukkan grafik pengurangan massa pada sampel material super duplex *stainless steel* SAF 2507.

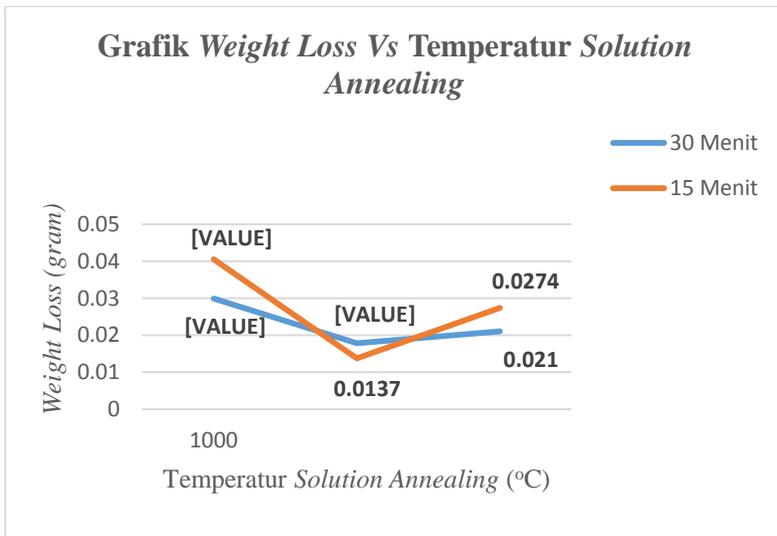
Tabel 4.3 Tabel Hasil Pengujian *Weight Loss*

Sampel	Temperatur (°C)	Waktu (h)	Massa Awal (gr)	Massa Akhir (gr)	Selisih Massa (gr)
Terkorosi	34	24	3.0535	2.8370	0.2165
SA 1000-15			3.4349	3.3944	0.0405
SA 1000-30			2.8558	2.8259	0.0299
SA 1065-15			3.2564	3.2427	0.0137
SA 1065-30			3.27847	3.26067	0.0178
SA 1125-15			3.42753	3.40016	0.0274
SA 1125-30			3.37643	3.35540	0.0210



Tabel 4.3 dan gambar 4.10 menunjukkan grafik pengurangan massa pada sampel material super duplex *stainless steel* SAF 2507. Pada material yang telah terkorosi, terjadi pengurangan massa

sebanyak 0.2165 gram. Hal ini dikarenakan adanya presipitasi fasa σ -sigma pada sampel. Fasa σ -sigma merupakan senyawa yang kaya akan kandungan Cr dan Mo yang merupakan unsur-unsur penstabil ferit pada material duplex stainless steel. Adanya presipitasi fasa σ -sigma menyebabkan terkikisnya Cr dan Mo pada daerah sekitar ferit dan austenit dan menyebabkan turunnya ketahanan korosi. Ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Paulray (2015).



Gambar 4.10 Gambar Grafik Hasil *Weight Loss* SAF 2507

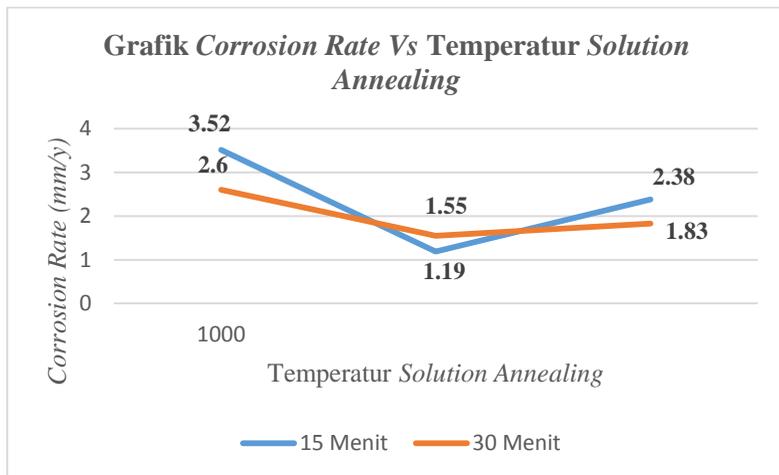
Pada material hasil *solution annealing* menunjukkan adanya perbedaan selisih massa yang signifikan dengan sampel hasil aging. Untuk waktu tahan selama 15 menit pada temperatur 1000°C terjadi pengurangan massa sebanyak 0.0405 gram, pada temperatur 1065°C terjadi pengurangan massa sebanyak 0.0137



gram dan pada temperatur 1125°C terjadi pengurangan massa sebanyak 0.0274 gram. Untuk waktu tahan selama 30 menit pada temperatur 1000°C terjadi pengurangan massa sebanyak 0.0299 gram, pada temperatur 1065°C terjadi pengurangan massa sebanyak 0.0178 gram dan pada temperatur 1125°C terjadi pengurangan massa sebanyak 0.02103 gram.

Tabel 4.4 Tabel Hasil Perhitungan *Corrosion Rate*

Sampel	Konstanta (mm/y)	Luas Perm. (cm ²)	Waktu Rendam (h)	Densitas (g/cm ³)	Selisih Massa (gr)	CR (mm/y)
Terkorosi	8.76x10 ⁴	5.38	24	7.8	0.2165	18.83
SA 1000-15					0.0405	3.52
SA 1000-30					0.0299	2.60
SA 1065-15					0.0137	1.19
SA 1065-30					0.0178	1.55
SA 1125-15					0.0274	2.38
SA 1125-30					0.0210	1.83



Gambar 4.11 Gambar Grafik Hasil Perhitungan *Corrosion Rate* SAF 2507

Dari hasil pengujian tersebut terjadi penurunan selisih massa yang signifikan antara sampel yang telah terkorosi dan sampel hasil *solution annealing*. Hal ini dikarenakan menurunnya jumlah



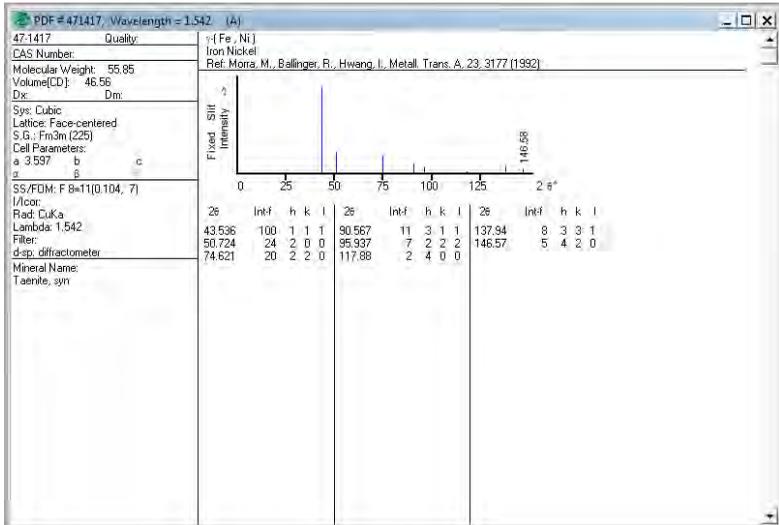
fasa σ -sigma pada sampel sehingga ketahanan korosi meningkat. Sedangkan terjadi kenaikan jumlah massa yang hilang antara temperatur 1065°C dan 1125°C. Banyaknya jumlah massa yang hilang juga mempengaruhi nilai *Corrosion Rate*. Gambar 4.11 menunjukkan grafik nilai *corrosion rate* pada sampel material super duplex *stainless steel* SAF 2507. Pada material yang telah terkorosi, nilai *corrosion rate* ialah 18.83 mm/y. Untuk sampel hasil *solution annealing* selama 15 menit, pada temperatur 1000°C nilai *corrosion rate* adalah 3.52 mm/y, pada temperatur 1065°C sebesar 1.19 mm/y dan pada temperatur 1125°C ialah sebesar 2.38 mm/y. Sedangkan untuk sampel hasil *solution annealing* selama 30 menit, pada temperatur 1000°C nilai *corrosion rate* adalah 2.60 mm/y, pada temperatur 1065°C sebesar 1.55 mm/y dan pada temperatur 1125°C ialah sebesar 1.83 mm/y.

Terjadinya kenaikan jumlah massa yang hilang dan *corrosion rate* antara temperatur 1065°C dan 1125°C diakibatkan karena adanya karbida pada sample tersebut. Keberadaan karbida menyebabkan penurunan ketahanan korosi pada material duplex *stainless steel*. Analisis ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Badji (2008). Banyaknya jumlah karbida pada sample 1125°C dibandingkan pada sampel 1065°C membuat ketahanan korosi sampel 1125°C lebih rendah dibandingkan sampel 1065°C dan membuat jumlah massa yang hilang dari temperatur 1065°C ke 1125°C meningkat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa temperatur yang paling sesuai untuk melarutkan fasa sigma dan meningkatkan ketahanan korosi ialah 1065°C.

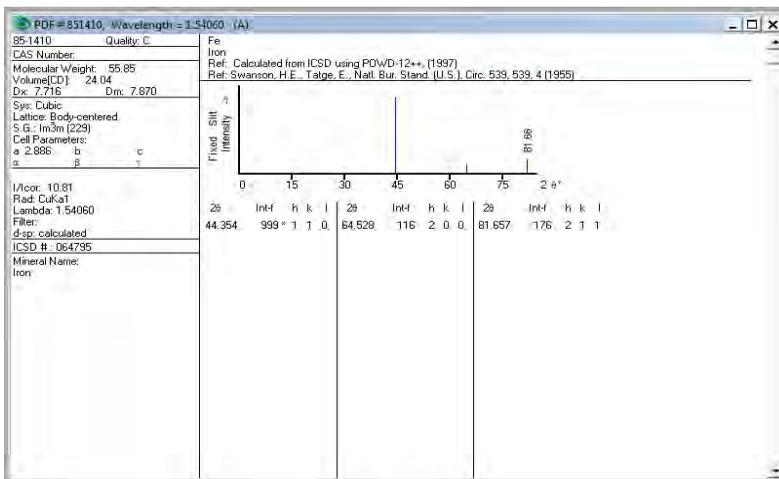
LAMPIRAN

Kartu PDF Analisa XRD

- Austenit



- Ferit



- Sigma

Name and formula

Reference code:	03-065-9117
Compound name:	Iron Molybdenum
Common name:	σ -Fe Mo
Empirical formula:	FeMo
Chemical formula:	FeMo

Crystallographic parameters

Crystal system:	Tetragonal					
Space group:	P42/mnm					
Space group number:	136					
17	4	1	0	2.23570	40.308	100.0
18	3	3	0	2.17270	41.530	48.1
19	2	0	2	2.13320	42.336	44.9
20	2	1	2	2.07830	43.510	77.8
21	4	1	1	2.02760	44.656	98.6
22	3	3	1	1.98030	45.782	42.8
23	2	2	2	1.93590	46.894	10.6

- *Iron oxide*

Name and formula

Reference code:	00-019-0629
Mineral name:	Magnetite, syn
Compound name:	Iron Oxide
Empirical formula:	Fe ₃ O ₄
Chemical formula:	Fe ₊₂ Fe ₊₃ O ₄

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fd-3m
Space group number:	227

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	4.85200	18.270	8.0
2	2	2	0	2.96700	30.095	30.0
3	3	1	1	2.53200	35.423	100.0
4	2	2	2	2.42430	37.053	8.0
5	4	0	0	2.09930	43.053	20.0
6	4	2	2	1.71460	53.392	10.0
7	5	1	1	1.61580	56.944	30.0
8	4	4	0	1.48450	62.516	40.0
9	5	3	1	1.41920	65.745	2.0
10	6	2	0	1.32770	70.926	4.0
11	5	3	3	1.28070	73.950	10.0
12	6	2	2	1.26590	74.962	4.0
13	4	4	4	1.21190	78.931	2.0
14	6	4	2	1.12210	86.704	4.0
15	7	3	1	1.09300	89.620	12.0
16	8	0	0	1.04960	94.428	6.0
17	6	6	0	0.98960	102.228	2.0
18	7	5	1	0.96950	105.222	6.0
19	6	6	2	0.96320	106.209	4.0
20	8	4	0	0.93880	110.273	4.0
21	6	6	4	0.89520	118.741	2.0
22	9	3	1	0.88020	122.124	6.0
23	8	4	4	0.85690	128.038	8.0
24	10	2	0	0.82330	138.659	4.0
25	9	5	1	0.81170	143.244	6.0
26	10	2	2	0.80800	144.857	4.0

- *Chrome oxide*

Name and formula

Reference code:	00-006-0504
Mineral name:	Eskolaite, syn
Compound name:	Chromium Oxide
Common name:	chrome green, green cinnabar
Empirical formula:	Cr ₂ O ₃
Chemical formula:	Cr ₂ O ₃

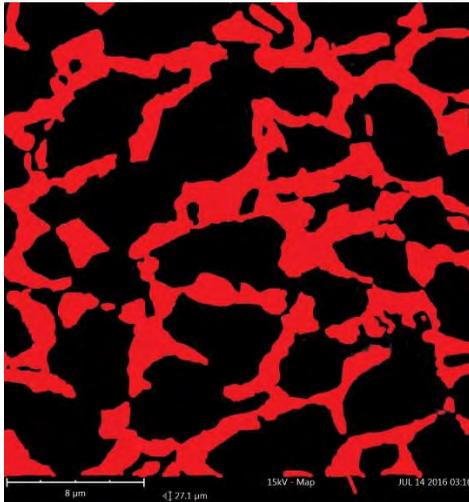
Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3c
Space group number:	167

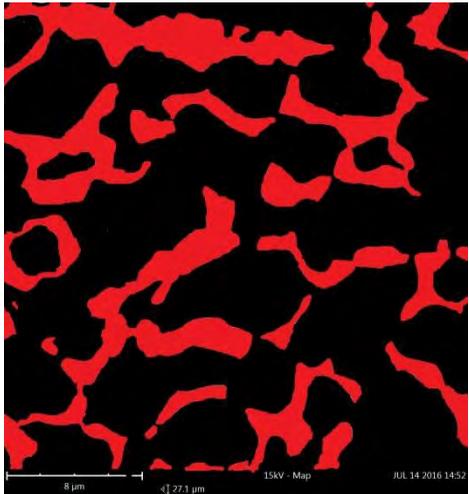
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3.63300	24.483	75.0
2	1	0	4	2.66600	33.588	100.0
3	1	1	0	2.48000	36.191	95.0
4	0	0	6	2.26400	39.783	12.0
5	1	1	3	2.17600	41.464	40.0
6	2	0	2	2.04800	44.187	10.0
7	0	2	4	1.81600	50.197	40.0
8	1	1	6	1.67200	54.865	90.0
9	1	2	2	1.57900	58.397	14.0
10	2	1	4	1.46500	63.445	25.0
11	3	0	0	1.43140	65.115	40.0
12	1	0	10	1.29610	72.929	20.0
13	2	2	0	1.23980	76.824	18.0
14	3	0	6	1.21010	79.071	8.0
15	3	1	2	1.17310	82.088	14.0
16	0	2	10	1.14880	84.215	10.0
17	1	3	4	1.12390	86.531	10.0
18	2	2	6	1.08740	90.208	18.0
19	2	1	10	1.04220	95.311	16.0
20	3	2	4	0.94620	108.997	14.0
21	4	1	0	0.93700	110.589	12.0
22	1	3	10	0.89570	118.633	14.0
23	3	0	12	0.88830	120.261	8.0
24	4	1	6	0.86580	125.670	25.0
25	4	0	10	0.84250	132.214	8.0
26	1	2	14	0.83310	135.222	12.0
27	3	3	0	0.82630	137.570	10.0
28	3	2	10	0.79770	149.879	16.0

Gambar Analisa Imgae-J

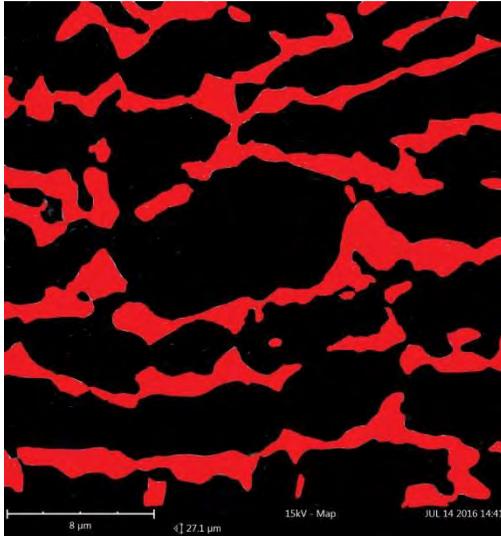
- **Analisa Sigma Pada Material terkorosi**



- **Analisa Sigma Pada Material *Solution Annealing 1000°C* dengan waktu tahan 15 Menit**



- **Analisa Sigma Pada Material *Solution Annealing 1000°C* dengan waktu tahan 30 Menit**



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa data dan pembahasan pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa

1. Struktur mikro yang terbentuk :
 - Pada material super duplex SAF 2507 hasil *solution annealing* pada temperatur 1000°C dengan waktu tahan 15 dan 30 menit, struktur mikro yang terbentuk ialah austenit, ferit dan sigma
 - Pada material super duplex SAF 2507 hasil *solution annealing* pada temperatur 1065°C dan 1125°C dengan waktu tahan 15 dan 30 menit, struktur mikro yang terbentuk ialah austenit dan ferit serta ditemukan adanya karbida

2. Sifat ketahanan korosi super duplex SAF 2507 meningkat setelah melalui proses *solution annealing*. Ini dibuktikan dengan nilai *corrosion rate* berikut :
 - Pada sampel hasil *solution annealing* dengan temperatur 1000°C dan waktu tahan 15 menit, nilai *corrosion rate* sebesar 3.52 mm/y
 - Pada sampel hasil *solution annealing* dengan temperatur 1000°C dan waktu tahan 30 menit, nilai *corrosion rate* sebesar 2.6 mm/y
 - Pada sampel hasil *solution annealing* dengan temperatur 1065°C dan waktu tahan 15 menit, nilai *corrosion rate* sebesar 1.19 mm/y
 - Pada sampel hasil *solution annealing* dengan temperatur 1065°C dan waktu tahan 30 menit, nilai *corrosion rate* sebesar 1.55 mm/y
 - Pada sampel hasil *solution annealing* dengan temperatur 1125°C dan waktu tahan 15 menit, nilai *corrosion rate* sebesar 2.38 mm/y



-
- Pada sampel hasil *solution annealing* dengan temperatur 1125°C dan waktu tahan 30 menit, nilai *corrosion rate* sebesar 1,83 mm/y

Adanya peningkatan *corrosion rate* pada temperatur 1125°C diakibatkan karena adanya karbida. Sehingga temperatur yang paling sesuai untuk meningkatkan ketahanan korosi ialah pada 1065°C.

5.2 Saran

1. Pengontrolan waktu ketika material keluar dari *furnace* dan akan dilakukan *water quench*, agar tidak terbentuk karbida
2. Adanya penelitian lebih lanjut mengenai mekanisme larutnya fasa sigma akibat proses *solution annealing* pada super duplex SAF 2507
3. Adanya penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh *solution annealing* terhadap larutnya fasa sigma pada sifat mekanik super duplex SAF 2507

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Zaki. 2006. *Principle of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. USA: Elsevier Ltd.
- Ansara, T. G. Chart, P. Y. Chevalier, K. Hack, G. McHugh, M. H. Rand dan P. J. Spencer. 1985. *Phase Diagram for Fe-Cr-Ni Based Alloys*. Luxembourg: Directorate for Science, Research and Development.
- ASM Metal Handbook Vol. 4. *Heat Treating*. USA: ASM International.
- ASTM A 240/A 240 M. 2001. “*Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steels Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels*”.
- ASTM A 923. 2003. “*Standard Test Method for Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels*”.
- ASTM G 31. 1972. “*Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*”.
- ASTM G 48. 2000. “*Standard Test Method for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution*”.
- Badji, R. dkk. 2008. *Effect of Solution Treatment temperature on precipitation kinetic of sigma phase in 2205 duplex stainless steel welds*. Juni 008.
- Bettini, Eleonora, Ulf Kiviasakk, Christofer Leygraf dan Jinshan Pan. 2014. *Study of Corrosion Behavior of a 2507 Super Duplex Stainless Steel: Influenced of Quenched-in and Isothermal Nitrides*. International Journal Electrochemical Science. Vol. 9, November 2013.

- Callister, William D., dan David G. Rethwisch. 2009. *Materials Science and Engineering an Introduction Eight Edition*. USA: WorldColor USA/Versailles.
- Davanageri, Mahesh B., Narendranath S. dan Ravikiran Kadoli. 2015. *Influence of Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Wear Behaviour of Super Duplex Stainless Steel AISI 2507*. American Journal of Materials Science 2015 ISSN: 2162-8424.
- Digges, Thomas G., Samuel J. Rosenberg dan Glenn W. Geil. 2012. *Heat Treatment and Properties of Iron and Steel*. Washington D. C. : National Bureau of Standards Monograph 88.
- Fargas, G., A. Maestra dan A. Mateo. 2013. *Effect of Sigma Phase on the Wear Behaviour of Super Duplex Stainless Steel*. Wear. Vol. 303, Juni 2013.
- Guo, L. Q., X. M. Zhao, M. Li, W. J. Zhang, Y. Bai dan L. J. Qiao. 2012. *Annealing Effects on the Microstructure and Magnetic Domain Structures of Duplex Stainless Steel Studied by In Situ Technique*. Applied Surface Science. Vol. 259, Oktober 2012.
- Hong, Jufeng, Dong Han, Hua Tan, Jin Li dan Yiming Jiang. 2013. *Evaluation of Aged Duplex Stainless Steel UNS S32750 Susceptibility to Intergranular Corrosion by Optimized Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Method*. Corrosion Science. Vol. 68, November 2012.
- Hsieh, Chih-Chun dan Weite Wu. 2012. *Overview of Intermetallic Sigma Phase Precipitation in Stainless Steel*. ISRN Metallurgy. January 2012.
- IMO. 2014. *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel*. London, UK : International Molybdenum Association.

- Kashiwar, A. dkk. 2012. *Effect of Solution Annealing Temperature on Precipitation in 2205 Duplex Stainless Steel*. Vol. 74, September 2012.
- Outokumpu. 2013. *Handbook of Stainless Steel*. Finlandia: Outokumpu Oyj.
- Paulraj, Prabhu dan Rajnish Garg. 2015. *Effect of Intermetallic Phase on Corrosion Behaviour and Mechanical Properties of Duplex Stainless Steel and Super Duplex Stainless Steel*. Vol.9, September 2015.
- Roberge, Pierre R. 2008. *Corrosion Engineering Principles and Practice*. USA: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Sandvik. 2015. *SANDVIK SAF 2507 Tube and Pipe Seamless Datasheet*. Sandvik.
- Sidiq, Fajar. 2013. *Analisa Korosi dan Pengendaliannya*. Jurnal Foundry. Vol. 3 No. 1, April 2013 ISSN: 2087-2259.
- Thehning, Karl Erik. 2010. *Steel and Its Heat Treatment Second Edition*. Swedia: Butterworth-Heinemann.
- Villalobos, D., Albiter dan Maldonado C. *Microstructural Change in SAF 2507 superduplex stainless steel produced by thermal cycle*. Vol. 14, Nopember 2009.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Dieski Nuntasi Wulanari. Lahir di Jakarta pada tanggal 12 Januari 1994. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Drs. Bangkit Susianto dan Gandes Mariatun. Penulis telah menempuh jenjang pendidikan di SD Mutiara 17 Agustus, SMPN 1 Bekasi, SMA 1 Bekasi, dan hingga sekarang menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.

Selama masa perkuliahan penulis aktif berorganisasi. Pada tahun 2013/2014 penulis menjadi panitia pada *Project Based on Exchange-Summer Projects* di AIESEC Surabaya. Pada tahun 2014/2015 penulis menjadi staff *Talent Management Department* dan *Organizing Committee President of AIESEC Fair 2014* di AIESEC Surabaya.

Penulis melakukan kerja praktik di PT Hanil Jaya Steel dengan penelitian mengenai pengaruh kadar mangan terhadap sifat mekanik baja betonizer. Kemudian penulis meneliti super duplex *stainless steel* di bidang metalurgi dan manufaktur sebagai bahan tugas akhir. Email yang dapat dihubungi yaitu dieskiwulanari@gmail.com.