



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA KEANDALAN ANTARA METODE ITERASI DAN
KONVENSIONAL DALAM EVALUASI SISA UMUR PAKAI
TUBING BOILER BERBASIS MATERIAL SA213-T22**

TESIS

BAMBANG WIJONARKO

1006786562

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA KEANDALAN ANTARA METODE ITERASI DAN
KONVENSIONAL DALAM EVALUASI SISA UMUR PAKAI
TUBING BOILER BERBASIS MATERIAL SA213-T22**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister dalam bidang Ilmu Material**

BAMBANG WIJONARKO

1006786562

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JANUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : BAMBANG WIJONARKO

NPM : 1006786562

Tanda Tangan :



Tanggal : 10 Januari 2012



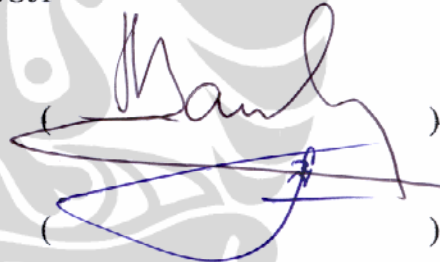
HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Bambang Wijonarko
NPM : 1006786562
Program Studi : Ilmu Material
Judul Tesis : Analisa Keandalan antara Metode Iterasi dan Konvensional dalam Evaluasi Sisa Umur Pakai Tubing Boiler Berbasis Material SA213-T22

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang/ : Dr. Bambang Soegijono, MSi
Pembimbing 1

()

Pembimbing 2: Dr. Ir. M. Yudi M. Solihin, MSi

()

Penguji 1 : Dr. Muhammad Hikam, MSc

()

Penguji 2 : Dr. Azwar Manaf, M.Met

()

Penguji 3 : Dr. Budhy Kurniawan, MSi

()

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 10 Januari 2012

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Science Jurusan Ilmu Material pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Bambang Soegiono Msi dan Dr. Ir. M. Yudi M.Solihin Msi, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (3) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Jakarta, 20 Desember 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bambang Wijonarko
NPM : 1006786562
Program Studi : Ilmu Material
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Analisa Keandalan antara Metode Iterasi dan Konvensional dalam Evaluasi Sisa Umur Pakai Tubing Boiler Berbasis Material SA213-T22

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 10 Januari 2012

Yang menyatakan



(BAMBANG WIJONARKO)

ABSTRAK

Nama : Bambang Wijonarko
Program Studi : Ilmu Material
Judul : Analisa Keandalan antara Metode Iterasi dan Konvensional dalam Evaluasi Sisa Umur Pakai Tubing Boiler Berbasis Material SA213-T22

Fokus dari penelitian ini adalah membuat metode iterasi dan melakukan evaluasi sisa umur pakai tubing boiler dengan metode tersebut. Metode iterasi ditentukan dengan perhitungan *cumulative rupture time* sebagai fungsi dari pertumbuhan *oxide scale*, penipisan *tubing*, perubahan *metal temperature* dan *hoop stresses*. Hasil spesifik dan akurat diperoleh dengan menggunakan data operasi pada *secondary siperheater boiler* dan *rupture test* pada material SA213-T22. Analisis mikrostruktur diperoleh dengan mengevaluasi pertumbuhan *cavities*. Sehingga analisis mikrostruktur tersebut dapat digunakan dalam verifikasi metode iterasi, metode *stress rupture* dan metode berbasis ketebalan tubing. Pada verifikasi dihitung standar deviasi dari metode iterasi dan metode lainnya dengan analisis mikrostruktur. Metode iterasi memiliki standar deviasi terkecil yaitu 0,13 – 0,26 dari *cumulative rupture time*. Hasil perhitungan dari tubing yang lurus memiliki koefisien of determination yang terbaik yaitu $R^2=0,9985$. Sehingga metode iterasi menjadi metode yang akurat untuk diaplikasikan pada posisi tubing yang lurus dalam perencanaan pemeliharaan boiler.

Kata kunci:

Sisa umur pakai, komulatif *rupture time*, pengujian *rupture*, perencanaan pemeliharaan.

ABSTRACT

Name : Bambang Wijonarko
Study Program : Materials Science
Title : Reliability Analysis between Iteration and Conventional Method in Boiler Tube Remaining Life Evaluation Based Materials SA213-T22

The focus of this work is to create iteration method and to evaluate the remaining life of boiler tube by its method. Iteration method was determined through calculating of cumulative rupture time as a function of oxide scale growth, tubing thickness, tube metal temperature and hoop stress. The specific and accurate result was obtained by using the operational data on secondary super heater boiler and rupture test on SA213-T22 material. Microstructure analysis was obtained by evaluating actual cavities growth. So it can be used to verify the iteration method, stress rupture method and thickness based method. The verifications was calculating the deviation standard of iteration method and others by microstructure analysis. Iteration method has a less deviation standard 0,13 – 0,26 of cumulative rupture time. Calculation result of straight tube have the best coefficient of determination $R^2 = 0,9985$. Then this method became an accurate method to be applied on straight tube in boiler maintenance strategy.

Key words:

Remaining life, cumulative rupture time, rupture test, maintenance strategy.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMAKASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR	
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Hipotesa	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Batasan Penelitian	3
2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Konstruksi dan Material Boiler	4
2.2 Mekanisme <i>Failure</i> pada <i>Tubing</i> Boiler	4
2.3 Evaluasi Sisa Umur Pakai	6
2.3.1 Sisa Umur Pakai Berdasarkan Ketebalan <i>Tubing</i>	6
2.3.2 Sisa Umur Pakai Berdasarkan <i>Stress Rupture</i>	7
2.3.3 Sisa Umur Pakai Berdasarkan Struktur Mikro	7
2.3.4 Sisa Umur Pakai Berdasarkan Metode Iterasi	8
3 METODE PENELITIAN	12
3.1 Diagram Alir Penelitian	12
3.2 Diagram Alir Metode Iterasi	17
4 ANALISA DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Analisa Sisa Umur Pakai Berdasarkan Ketebalan <i>Tubing</i>	19
4.2 Analisa Sisa Umur Pakai Berdasarkan Struktur Mikro	22
4.2.1 Pengaruh Komposisi Material terhadap <i>Creep Strength</i>	22
4.2.2 Pengaruh Perubahan Struktur Mikro terhadap <i>Creep</i> <i>Strength</i>	23
4.2.3 Hubungan Struktur Mikro terhadap Prediksi Sisa Umur Pakai	28
4.3 Analisa Sisa Umur Pakai Berdasarkan <i>Strees Rupture</i>	31
4.4 Analisa Sisa Umur Pakai dengan Metode Iterasi	35
4.4.1 Analisa <i>Oxide Scale</i>	35
4.4.2 Prosedur Metode Iterasi	37

4.4.3	Analisa Temperatur Rata-rata dan Heat Flow	38
4.4.4	Analisa <i>Hoop Stress</i> dan Ketebalan <i>Tubing</i>	39
4.4.5	Analisa Fraksi <i>Rupture Life</i>	41
4.5	Perbandingan Metode Penentuan Sisa Umur Pakai	42
5	KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1	Kesimpulan	46
5.2	Saran	46
	DAFTAR REFERENSI	47
	LAMPIRAN	49



DAFTAR GAMBAR

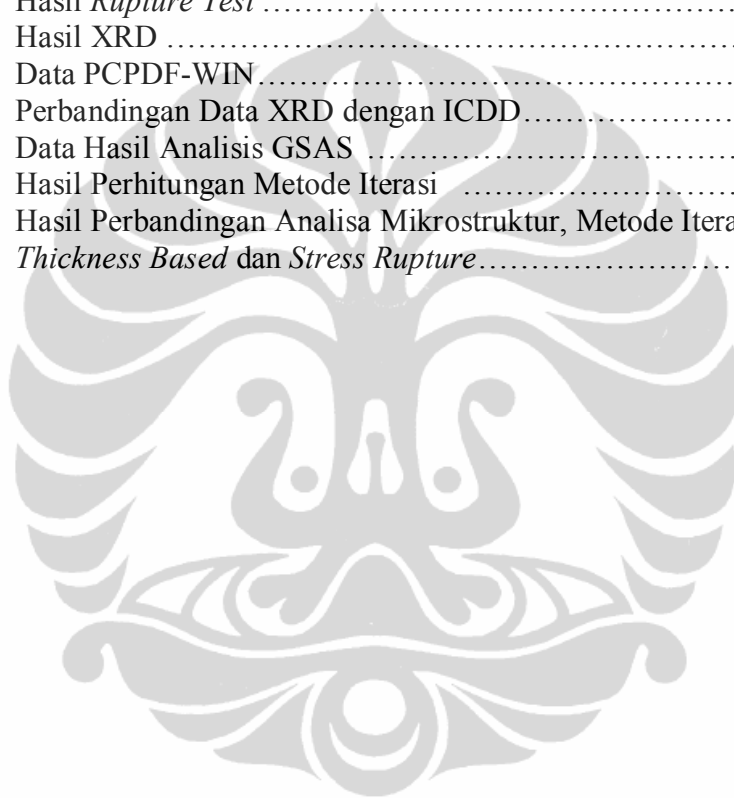
Gambar 2.1	Struktur Mikro Material 2.25 Cr-1Mo.....	5
Gambar 2.2	Perpindahan Panas pada <i>Tubing</i> : a).Tanpa <i>Scale</i> ; b). Dengan <i>Scale</i>	9
Gambar 2.3	Penampang <i>Tubing Elbow</i>	11
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	12
Gambar 3.2	Alat Uji Ketebalan- <i>Ultrasonic Thickness Meter</i>	13
Gambar 3.3	Alat Uji Komposisi- <i>Spectrometer</i>	14
Gambar 3.4	Alat Uji <i>Insitu Metalography</i>	14
Gambar 3.5	Alat Uji <i>Stress Rupture</i>	15
Gambar 3.6	Spesimen Uji <i>Stress Rupture</i>	16
Gambar 3.7	Diagram Alir Metode Iterasi Sisa Umur Pakai.....	17
Gambar 4.1	Posisi Pengukuran Dimensi <i>Tubing</i> Belum Beroperasi	19
Gambar 4.2	Prediksi Sisa Umur Pakai Berdasarkan Ketebalan <i>Tubing</i>	21
Gambar 4.3	Mikrostruktur: a). <i>Tubing</i> yang Belum Beroperasi dan; b). <i>Tubing</i> yang Telah Beroperasi, <i>Service Live</i> 87.780 jam.....	23
Gambar 4.4	Tahapan Pembentukan <i>Spheroid</i>	24
Gambar 4.5	Sketsa Penampang <i>Tubing</i> dan Arah Tegangan	25
Gambar 4.6	<i>Cavity Sliding</i>	25
Gambar 4.7	<i>Cavity</i> Difusi	26
Gambar 4.8	Pertumbuhan <i>Cavity</i> pada <i>Grain Boundary</i>	27
Gambar 4.9	Persamaan Kurva Data Hasil Pengujian <i>Tubing</i> Posisi No. 7.....	29
Gambar 4.10	Perbandingan antara Data Pengujian <i>Tubing</i> Posisi No. 7 dan Referensi	29
Gambar 4.11	Perubahan Mikrostruktur terhadap <i>Service Life</i> pada <i>Tubing</i> Posisi No. 7	30
Gambar 4.12	Kurva Konstanta C pada Material A213-T22	31
Gambar 4.13	Hubungan Tegangan dengan PLM pada Material A213-T22	32
Gambar 4.14	Prediksi Sisa Umur Pakai Berdasarkan <i>Stress Rupture</i>	34
Gambar 4.15	<i>Outer Side Tubing</i> no.32 Posisi no. 7	35
Gambar 4.16	Perbandingan Korosi pada <i>Outer Side</i>	35
Gambar 4.17	<i>Inner Side Tubing</i> no.32 Posisi no. 7	36
Gambar 4.18	Temperature Rata-rata <i>Tubing</i>	38
Gambar 4.19	Estimasi <i>Heat Flow</i>	39
Gambar 4.20	Estimasi <i>Hoop Stress</i>	40
Gambar 4.21	Penurunan Ketebalan <i>Mode</i> 1 dan 3	40
Gambar 4.22	Penurunan Ketebalan <i>Mode</i> 2	41
Gambar 4.23	Fraksi <i>Rupture Life</i>	41
Gambar 4.24	Perbandingan Metode pada Posisi No. 7	43
Gambar 4.25	Perbandingan Metode pada Posisi No. 9	43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Jenis Pengujian pada Material <i>Tubing</i> dan <i>Oxide Scale</i>	13
Tabel 3.2	Ukuran Spesimen Uji <i>Stress Rupture</i>	16
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Dimensi <i>Tubing</i> Belum Beroperasi	19
Tabel 4.2	Ketebalan Minimum <i>Tubing</i> Boiler	20
Tabel 4.3	Sisa Umur Pakai Berdasarkan Sisa Ketebalan	20
Tabel 4.4	Komposisi Material	22
Tabel 4.5	Hasil Perhitungan Nilai A-Parameter	28
Tabel 4.6	Hasil Uji <i>Strees Rupture</i> untuk Konstanta C pada A213-T22.....	31
Tabel 4.7	Hasil Uji <i>Stress Rupture</i> untuk Menentukan PLM	32
Tabel 4.8	Nilai <i>Hoop Stress</i> dan PLM	33
Tabel 4.9	Estimasi <i>Metal Temperature</i>	33
Tabel 4.10	Prediksi Sisa Umur Pakai dengan Parameter Larson Miller	34
Tabel 4.11	<i>Mode Tubing</i> Boiler untuk Iterasi	38
Tabel 4.12	Fraksi <i>Rupture Life</i> terhadap Fungsi Linear	42
Tabel 4.13	Deviasi Standar Metode.....	44
Tabel 4.14	Perbedaan <i>Life Fraction</i> Mikrostruktur dengan Hasil Iterasi	44

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Desain Boiler	49
Lampiran 2	Posisi Pengukuran Ketebalan Tubing <i>Secondary Superheater</i>	50
Lampiran 3	<i>Steam Properties</i> dan <i>Flue Gas Properties</i>	51
Lampiran 4	<i>Material Properties</i> dan <i>Material Maksimum Temperature</i>	52
Lampiran 5	Klasifikasi Stadium Kerusakan Struktur Mikro.....	53
Lampiran 6	Hasil Uji <i>Metalography</i> dengan Metode <i>Replica</i>	54
Lampiran 7	Perubahan Mikrostruktur terhadap <i>Service Life</i>	59
Lampiran 8	Hasil <i>Rupture Test</i>	63
Lampiran 9	Hasil XRD	64
Lampiran 10	Data PCPDF-WIN.....	66
Lampiran 11	Perbandingan Data XRD dengan ICDD.....	67
Lampiran 12	Data Hasil Analisis GSAS	68
Lampiran 13	Hasil Perhitungan Metode Iterasi	70
Lampiran 14	Hasil Perbandingan Analisa Mikrostruktur, Metode Iterasi, <i>Thickness Based</i> dan <i>Stress Rupture</i>	73



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Boiler digunakan sebagai penukar panas, yang bertujuan untuk mengubah air menjadi uap, kemudian digunakan untuk memutar sudu turbin. Salah satu *failure* yang terjadi pada *tubing* boiler adalah bocornya *tubing* yang diakibatkan oleh *overheating* (Viswanathan, R., 1993). Bagian boiler yang memiliki risiko besar terjadinya *failure* akibat *overheating* adalah *superheater* dan *reheater*. Bagian tersebut berada pada temperatur *flue gas* dan *steam* yang lebih tinggi, sehingga memiliki temperatur rata-rata yang lebih tinggi dari bagian yang lain (Purbolaksono, J., 2009). Mekanisme kerusakan yang terjadi pada *superheater* dan *reheater* adalah *creep* dan *corrosion* (Viswanathan, R., 1993). Selama operasi, pada permukaan *tubing* terjadi korosi yang diakibatkan oleh *steam* dan *flue gas*.

Pada boiler dengan bahan bakar gas atau minyak, mekanisme kegagalan utamanya adalah disebabkan oleh *creep*, sedangkan korosi akibat *flue gas* (*fireside corrosion*) bukan termasuk mekanisme kegagalan (Viswanathan, R., 1993). Sedangkan korosi akibat *steam* mengakibatkan berkurangnya ketebalan dari dinding *tubing* (*tube wall thickness*) serta menghasilkan produk korosi berupa *oxide scale*. *Scale* tersebut memiliki *thermal conductivity* yang lebih rendah, sehingga proses perpindahan panas menjadi terganggu (Viswanathan, R., 1993). *Scale* pada *steam side* selain mengurangi efisiensi juga mengakibatkan peningkatan temperatur pada dinding *tubing*. Pada temperatur di atas 900 °F, *creep damage* menjadi faktor dominan karena *allowable stress* akan menurun drastis. Sehingga kegagalan berupa bocornya *tubing* dapat terjadi bila tegangan operasi melebihi dari *allowable stress* yang diijinkan (Viswanathan, R., 1993).

Tubing yang bocor secara umum berdampak kecil pada *human safety*. Namun karena frekuensi operasi yang cukup tinggi maka memiliki dampak ekonomi cukup besar. Perbaikan kebocoran *tubing* akan menimbulkan biaya *lost*

opportunity untuk dilakukannya *force outage* beberapa hari (Viswanathan, R., 1993). *Assesment* dan pemeliharaan boiler sangat penting. Interval waktu pemeliharaan rutin dari boiler dan turbin uap lebih lama, sehingga jika ada kebocoran pada saat operasi mengakibatkan pengurangan daya (*derating*) atau kegagalan yang bersifat *catastropic*. *Remaining Life Assesment* (RLA) merupakan evaluasi dari sisa umur pakai (*remaining life*) dengan mengidentifikasi komponen kritis, mendefinisikan faktor yang mempengaruhi, serta merekomendasikan inspeksi dan strategi pemeliharaan.

Metode yang dilakukan dalam RLA adalah observasi periodik dengan pengujian *metalography* dan *thickness*. Untuk mendapatkan analisa *remaining life* yang akurat dibutuhkan *trend data*. *Trend data* tersebut sulit diperoleh karena data hanya didapat pada saat inspeksi (*boiler shutdown*). Pada *assesment* RLA terjadi pengurangan ketebalan akibat *polishing* permukaan untuk *mikrography*.

Metode prediksi sisa umur pakai yang selama ini digunakan adalah metode pengukuran *thickness* (API RP 530, 2003), metode analisa mikrostruktur (Cane, B.J. & Shamma, M.S., 1984), dan metode pengujian *stress rupture* (API RP 530, 2003). Parameter-parameter penentuan sisa umur pakai pada metode-metode tersebut digunakan dalam menyusun suatu metode penentuan sisa umur pakai. Pada metode tersebut dilakukan iterasi terhadap parameter temperatur dan tegangan karena kedua parameter tersebut mengalami perubahan selama operasi (Purbolaksono, J., 2009).

Metode iterasi ini menggunakan perhitungan parameter Larson Miller yang diperoleh dari pengujian *rupture test*, sehingga diperoleh kondisi aktual pada benda uji. Simulasi ini digunakan sebagai analisa tambahan dalam RLA dengan mengeliminasi kekurangan observasi periodik dalam keterbatasan memperoleh *trend data*. Untuk menyatakan bahwa metode iterasi tersebut dapat digunakan dalam *assesment tubing* boiler maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap sisa umur pakai material yang spesifik yaitu SA213-T22. Sehingga pada penelitian ini disusun metode iterasi dan membandingkannya dengan metode pengukuran *thickness*, analisa mikrostruktur dan pengujian *stress rupture*.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini dilakukan pengujian untuk menentukan parameter Larson Miller pada material SA213-T22. Kemudian dilakukan iterasi sisa umur pakai berdasarkan parameter tersebut.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah membuat dan menerapkan metode iterasi sisa umur pakai dengan simulasi perhitungan faktor perubahan *hoop stress*, *strees rupture* aktual, dan iterasi parameter spesifik data pada boiler. Kemudian membandingkan metode iterasi tersebut dengan metode penentuan sisa umur pakai berdasarkan ketebalan *tubing*, analisa mikrostruktur, dan *stress rupture* yang konstan.

1.4 Hipotesa

Metode iterasi memiliki deviasi standar yang lebih kecil dibandingkan metode lainnya terhadap metode analisa mikrostruktur. Bila ini terbukti maka metode iterasi dapat diusulkan menjadi salah satu metode dalam menentukan sisa umur pakai *tubing* boiler.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat menjadi suatu metode dalam menentukan sisa umur pakai yang digunakan dalam strategi pemeliharaan. Sehingga akan menghindari terjadinya pengeluaran biaya penggantian *tubing* yang tidak efisien, karena penggantian dilakukan sebelum umur *tubing* habis serta menghindari kegagalan boiler, seperti pengurangan daya (*derating*), karena penggantian tidak dilakukan pada masa inspeksi, dimana sisa umur pakai habis sebelum inspeksi selanjutnya.

1.6 Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penyusunan tesis ini adalah penggunaan bagian boiler *secondary superheater* dengan material SA213-T22 sebagai spesimen yang diteliti.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konstruksi dan Material Boiler

Boiler berfungsi mengubah air menjadi uap *superheated*, yang kemudian dialirkan pada turbin uap dan menjadi energi penggerak turbin. Bagian-bagian utama boiler terdapat pada Lampiran 1. Air dan uap mengalir dan mengalami perpindahan panas pada bagian-bagian tersebut. *Secondary superheater* adalah *tubing* dengan temperatur *steam* yang paling tinggi yaitu 540 °C (Chubu Electric Power, 2008). Posisi pengukuran ketebalan *tubing* yang digunakan pada penelitian ini adalah seperti Lampiran 2, sedangkan *steam properties* dan *flue gas properties* seperti pada Lampiran 3. Standar untuk material dan temperatur maksimum material menggunakan ASTM A213 (1999), seperti pada Lampiran 4.

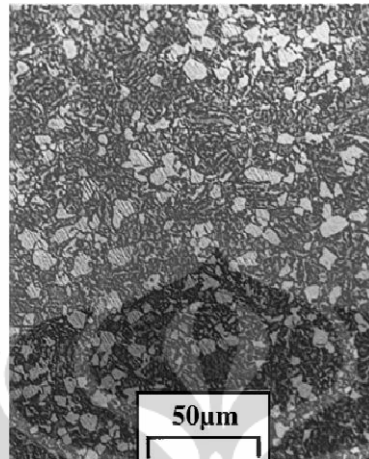
2.2 Mekanisme *Failure* pada *Tubing* Boiler

Baja paduan rendah feritik yang banyak digunakan sebagai komponen *tubing* boiler, berdasarkan standar ASTM, dimasukkan kedalam kelompok A 213, yang terdiri dari kelas T2 sampai T22, sesuai dengan besar unsur paduan utama Cr dan Mo (Viswanathan, R., 1993). *Creep strength* dari Cr-Mo dihasilkan dari proses *solid solution strengthening* matriks *ferrite* dengan carbon, molybdenum, dan chromium. Semakin besar alloy Cr-Mo akan meningkatkan *creep strength* (Viswanathan, R., 1993). Sehingga untuk mendapatkan data yang spesifik diperlukan pengujian komposisi pada spesimen benda yang diuji.

Namun demikian, dalam satu material 2.25Cr-1Mo dengan komposisi yang sama, dapat terjadi perbedaan *creep resistant* yang tergantung pada mikrostruktur awal yang ditentukan dari *heat treatment* (Chadhuri, S. & Ghosh, R.N., 2008). Sehingga untuk mendapatkan data yang akurat, maka perlu dilakukan *creep test* secara spesifik pada material yang memiliki mikrostruktur yang sama.

Boiler *tubing* pada umumnya adalah *annealed*. Sehingga dengan *cooling rate* pada *heat treatment* tersebut, mikrostruktur pada 2.25Cr-1Mo terdiri dari

campuran *bainite* dan *ferrite*. Struktur mikro material 2.25Cr-1Mo (A213-T22) adalah seperti Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2.1 Struktur Mikro Material 2.25 Cr-1Mo (Chadhuri, S. & Ghosh, R.N., 2008)

Semakin tinggi temperatur uap menyebabkan temperatur rata-rata pada *tubing* semakin tinggi (Purbolaksono, 2009). Sehingga bagian boiler yang memiliki risiko *failure* terbesar adalah *superheater* dimana temperatur operasi berada pada temperatur *creep range*. Mekanisme *failure* yang terjadi adalah *creep*, korosi (*water/fire side*) dan erosi (French, N., 1992). Pada tube boiler, *strength* harus sesuai dengan besarnya tekanan yang dipengaruhi oleh temperatur, dan dimensi *tubing*. Berkurangnya ketebalan *tubing* yang diakibatkan oleh korosi menyebabkan meningkatnya *circumferencial hoop stress*.

Water side corrosion terbentuk dari reaksi antara uap dengan permukaan logam, biasanya dalam bentuk *iron oxide*. *Oxide layer* ini juga menjadi proteksi terhadap logam. Laju pertumbuhan *iron oxide* terhadap waktu adalah dalam fungsi parabolik, sehingga semakin besar waktu operasi maka perubahan laju pertumbuhan *iron oxide* menjadi semakin kecil. *Iron oxide* memiliki *thermal conductivity* yang lebih rendah daripada logam *tubing*. Dampak adanya *oxide layer* adalah menghalangi perpindahan panas antara *tubing* dan uap yang menyebabkan *overheating* dan mengurangi umur *tubing* (French, N., 1992). Pada boiler dengan bahan bakar gas atau minyak, mekanisme kegagalan utamanya

adalah disebabkan oleh *creep*, sedangkan korosi akibat *flue gas (fireside corrosion)* bukan termasuk mekanisme kegagalan (Viswanathan, R., 1993).

Degradasi mikrostruktur yang terjadi pada 2.25 Cr-1Mo adalah *spheroidization* karbida, dan terbentuknya *cavity* yang mempengaruhi *creep strength* (Furtado, H.C. & May, I.L., 2004). Sehingga degradasi mikrostruktur tersebut yang digunakan dalam verifikasi metode prediksi umur sisa.

Mekanisme *damage* yang diamati pada penelitian ini adalah *creep*, dimana pada material yang mengalami *creep* terdapat bukti berupa *cavities* (Kassner, M.E., & Prado, M.T.P., 2004). Untuk menjelaskan bukti adanya *cavities* maka perlu didasari oleh data-data parameter operasi pada *tubing* boiler. *Creep* dipengaruhi oleh parameter temperatur dan tegangan. Dieter, G.E. (1992) telah menjelaskan beberapa mekanisme *creep* pada temperatur dan tegangan yang berbeda. Diantaranya adalah Coble *creep (grain boundary diffusion)*, Nabarro-Herring *creep (vacancy diffusion)*, dan *creep* karena dislokasi.

2.3 Evaluasi Sisa Umur Pakai

2.3.1. Sisa Umur Pakai Berdasarkan Ketebalan *Tubing*

Pengurangan ketebalan terjadi karena proses korosi metal *tubing* menjadi *oxide scale* (French, N., 1992). Perubahan ketebalan tersebut yang menjadi dasar salah satu metode dalam menentukan memprediksi sisa umur pakai (API RP530, 2003). Masduky, Yudi (2002) telah menentukan prediksi sisa umur pakai berdasarkan penipisan ketebalan menggunakan perhitungan ketebalan aktual inspeksi terakhir terhadap ketebalan minimum yang diijinkan seperti Persamaan 2.1 berikut:

$$\text{Sisa Umur Pakai} = \frac{t_2 - t_{\min}}{\text{CR}} \quad (2.1)$$

Dimana t_{\min} adalah ketebalan minimum yang dipersyaratkan (mm), dan CR adalah *corrosion rate*.

Corrosion rate pada *tubing* identik dengan *oxide scale growth* yang dipengaruhi oleh faktor perubahan temperatur (Viswanathan, R., 1993). Dimana kenaikan temperatur *tubing* selama operasi adalah tidak linear (Purbolaksono, 2009). Sehingga pada penelitian ini dilakukan evaluasi pada metode penentuan sisa umur

pakai berdasarkan ketebalan *tubing*, karena secara aktual perubahan *corrosion rate* adalah tidak konstan.

2.3.2. Sisa Umur Pakai Berdasarkan *Stress Rupture*

Viswanathan, R. (1993) telah menggunakan persamaan Arrhenius untuk menjelaskan hubungan antara laju *creep*, energi aktivasi dan temperatur. Penurunan persamaan tersebut dalam bentuk parameter Larson Miller telah menjadi salah satu metode dalam penentuan prediksi sisa umur pakai pada beberapa jenis *tubing* boiler (API RP 530, 2003). Penentuan umur sisa berdasarkan metode ini dilakukan dengan menentukan parameter Larson Miller berdasarkan tegangan yang konstan.

Pada penelitian ini, untuk mendapatkan data *stress rupture* yang akurat, maka dilakukan pengujian pada material dengan komposisi kimia dan mikrostruktur yang spesifik. Evaluasi metode *stress rupture* dilakukan karena metode ini hanya berdasarkan kegagalan yang disebabkan oleh *creep*. Sedangkan yang aktual terjadi pada *tubing* adalah kegagalan yang diakibatkan oleh *creep* dan korosi. Sehingga terjadi perubahan dimensi *tubing* yang mengakibatkan perubahan *hoop stress* selama operasi (French, N., 1992).

2.3.3. Sisa Umur Pakai Berdasarkan Struktur Mikro

Furtado, H.C. & May, I.L. (1996) telah menggunakan metode *replica* pada *metalography* untuk mengetahui mikrostruktur peralatan yang mengalami *failure*. Metode *replica* dilakukan dengan cara mengambil *replica* mikrostruktur permukaan material yang ingin dievaluasi dilakukan secara berkala untuk mengamati perubahan mikrostruktur material. Teknik *replica* dapat digunakan dalam klasifikasi mikrostruktural *damage* yang berhubungan dengan fraksi waktu (Joas, H.D., 2006). Pada penelitian ini, digunakan prosedur *replica* yang telah dilakukan oleh Marder, A.R. (1989). Prosedur tersebut telah dilakukan perbandingan mikrostruktur terhadap kondisi aktual. Sehingga hasil *replica* dengan prosedur tersebut adalah akurat.

Teknik *replica* juga telah digunakan dalam menentukan sisa umur pakai berdasarkan klasifikasi mikrostruktur (ECCC Recommendation, 2005). Cane, B.J. & Shamma, M.S. (1984) telah melakukan klasifikasi perubahan mikrostruktur sehingga dapat dijadikan sebagai referensi dalam menentukan sisa umur pakai. Klasifikasi tersebut seperti Lampiran 5. Klasifikasi tersebut masih bersifat kualitatif, sehingga penentuan klasifikasi suatu hasil mikrostruktur tidak dapat dilakukan dengan tepat.

Penelitian ini menguraikan klasifikasi tersebut dengan menggunakan hubungan antara perubahan degradasi mikrostruktur berupa pertumbuhan *cavities* terhadap sisa umur pakai. Bhadeshia, H.K.D.H. (1998) telah menjelaskan hubungan antara parameter perubahan *cavities* (A), waktu operasi (t) dan waktu terjadinya *failure* (t_f). Hubungan tersebut seperti Persamaan 2.2 berikut:

$$A = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)^{0.2} \quad (2.2)$$

Prosedur penentuan parameter perubahan *cavities* (A) dilakukan dengan menghitung perbandingan jumlah *grain boundary* yang terdapat *cavity* (N_C) terhadap jumlah *grain boundary* secara keseluruhan (N_T) (Ankit, Kumar, 2008), seperti Persamaan 2.3 berikut:

$$A = \frac{N_C}{N_T} \quad (2.3)$$

Hasil mikrostruktur pada penelitian ini digunakan dalam verifikasi metode iterasi setelah nilai perhitungan A parameter dibandingkan dan sama dengan data referensi untuk material SA213 T22 (Bhadeshia, H.K.D.H., 1998).

2.3.4. Sisa Umur Pakai Berdasarkan Metode Iterasi

Metode iterasi merupakan metode yang menghubungkan parameter pada metode pengukuran ketebalan, *stress rupture* dan mikrostruktur. Metode iterasi ini menggunakan rumus empiris untuk memperkirakan *scale thickness* yang terbentuk (X) pada *ferritic steel* 1-3% chromium dalam periode waktu tertentu yang direpresentasikan dengan parameter laron miller (French, N., 1992), seperti Persamaan 2.4 berikut,

$$\log X = 0,00022 P - 7,25 \quad (2.4)$$

Parameter *steam* dan *flue gas* perlu ditentukan untuk menghitung koefisien konveksi *steam* dan *flue gas* (API RP 530, 2003). Sesuai API RP 530 (2003), koefisien konveksi yang terjadi pada *steam side* (h_s), dipengaruhi oleh faktor *steam thermal conductivity* (k_s), diameter dalam (d_i), Reynold number *steam* (Re_s), dan Prandtl number *steam* (Pr_g), seperti Persamaan 2.5 berikut,

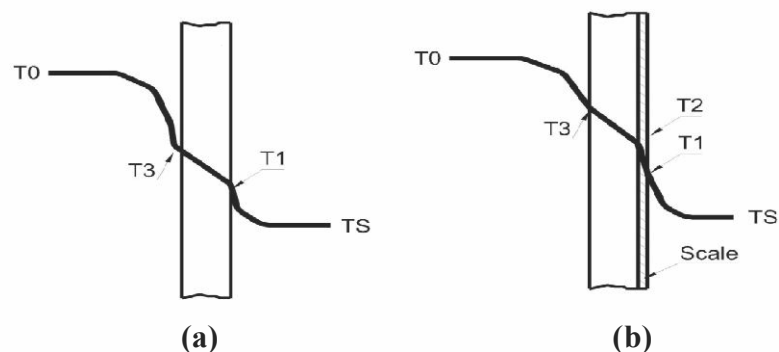
$$h_s = 0.023 \frac{k_s}{d_i} (Re_s)^{0.8} (Pr_g)^{0.4} \quad (2.5)$$

Sedangkan koefisien konveksi yang terjadi pada *fire side* (h_g), dipengaruhi oleh faktor *flue gas thermal conductivity* (k_g), diameter luar (d_o), Reynold number *flue gas* (Re_g), dan Prandtl number *flue gas* (Pr_g), seperti Persamaan 2.6 berikut,

$$h_g = 0.33 \frac{12 k_g}{d_o} (Re_g)^{0.6} (Pr_g)^{0.33} \quad (2.6)$$

Thermal conductivity diperlukan dalam metode iterasi ini untuk perhitungan perpindahan panas. *Thermal conductivity* untuk material SA 213-T22 adalah 34,606 W/m °C (Purbolaksono, J., 2009). Sedangkan konduktifitas *thermal oxide scale* ditentukan dari komposisinya (French, N., 1992). Sehingga perlu dilakukan penentuan jenis *oxide scale* yang terbentuk. Metode yang digunakan adalah dengan *x-ray diffraction* dan analisa GSAS (Hikam, M., 2005).

Pada saat *superheater* beroperasi, terjadi perpindahan panas dari *hot flue gas* melalui *steel tube* ke *cooler steam*. Selama operasi, *oxide scale* terbentuk pada sisi dalam *tubing*. Sehingga terdapat lapisan dengan konduktifitas *thermal* yang berbeda antara uap dengan *tubing*. Gambar 2.2 berikut adalah perbandingan antara tube tanpa *oxide scale* dan tube dengan *oxide scale*.



**Gambar 2.2. Perpindahan Panas pada Tubing : a).Tanpa Scale ;
b). Dengan Scale (Holman, J.P., 1986)**

Temperatur *flue gas* dan *steam* adalah konstan. Sehingga pada model sederhana yang terdiri dari konveksi dan konduksi, maka digunakan persamaan yang dirumuskan oleh Holman, J.P. (1986). Perhitungan *heat flow* (Q) tanpa adanya *oxide scale* seperti Persamaan 2.7 dan *heat flow* setelah *oxide scale* terbentuk seperti Persamaan 2.8 berikut:

$$\frac{Q}{A_o} = \frac{T_0 - T_s}{\frac{r_3}{r_1 h_i} + \frac{[r_3 \ln(r_3/r_2)]}{K_T} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.7)$$

$$\frac{Q}{A_o} = \frac{T_0 - T_s}{\frac{r_3}{r_1 h_i} + \frac{[r_3 \ln(r_2/r_1)]}{k_D} + \frac{[r_3 \ln(r_3/r_2)]}{K_T} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.8)$$

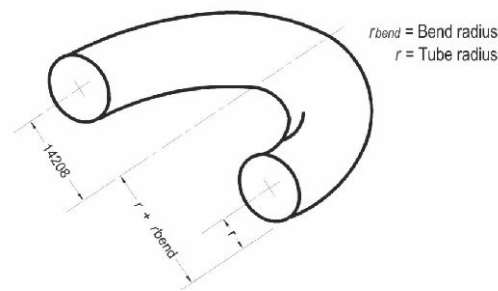
dimana:

- A_o = Luas permukaan *tubing* sisi luar (m)
- T_0 = Temperatur *flue gas* ($^{\circ}\text{C}$)
- T_s = Temperatur *steam* ($^{\circ}\text{C}$)
- r_1 = Jari-jari *tubing* bagian dalam (m)
- r_2 = Jari-jari *tube metal* bagian dalam (m)
- r_3 = Jari-jari *tubing* bagian luar (m)
- h_o = koefisien konveksi sisi luar *tubing* ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- h_i = koefisien konveksi sisi dalam *tubing* ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- k_D = *thermal conductivity* pada *oxide scale* ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- k_T = *thermal conductivity* pada *tube metal* ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

Perubahan ketebalan *tubing* juga akan berpengaruh pada tegangan yang bekerja pada dinding *tubing* (*hoop stress*). Pada metode iterasi ini dilakukan dengan model *tubing* lurus maupun *elbow*, sehingga *hoop stress* (σ), dipengaruhi oleh faktor *internal stress* (P), diameter luar (D), ketebalan *tubing* (W) dan dapat dihitung dengan Persamaan 2.9 untuk *tubing* lurus dan Persamaan 2.10 untuk *tubing elbow* (French, N., 1992). Persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P \times (D - W)}{2 W} \quad (2.9)$$

$$\sigma = \frac{P r}{2 W} \left[\frac{2 r_{\text{bend}} + r}{r_{\text{bend}} + r} \right] \quad (2.10)$$



Gambar 2.3 Penampang *Tubing Elbow*

Pada Gambar 2.3, *hoop stress* terbesar adalah pada sisi dalam *bending*, namun dalam fabrikasi, sisi dalam *elbow* didesain lebih tebal daripada sisi luar. Pada saat operasi pengurangan ketebalan yang terbesar adalah pada sisi luar *elbow*, sehingga digunakan Persamaan 2.10 untuk menghitung *hoop stress* pada *tubing elbow*.

Iterasi pada parameter diatas dilakukan hingga terpenuhi kondisi terjadinya *rupture*. Pendekatan yang digunakan dalam menentukan kondisi *rupture* adalah dengan menghitung komulatif *creep damage* (Viswanathan, R., 1993), seperti pada Persamaan 2.11 berikut:

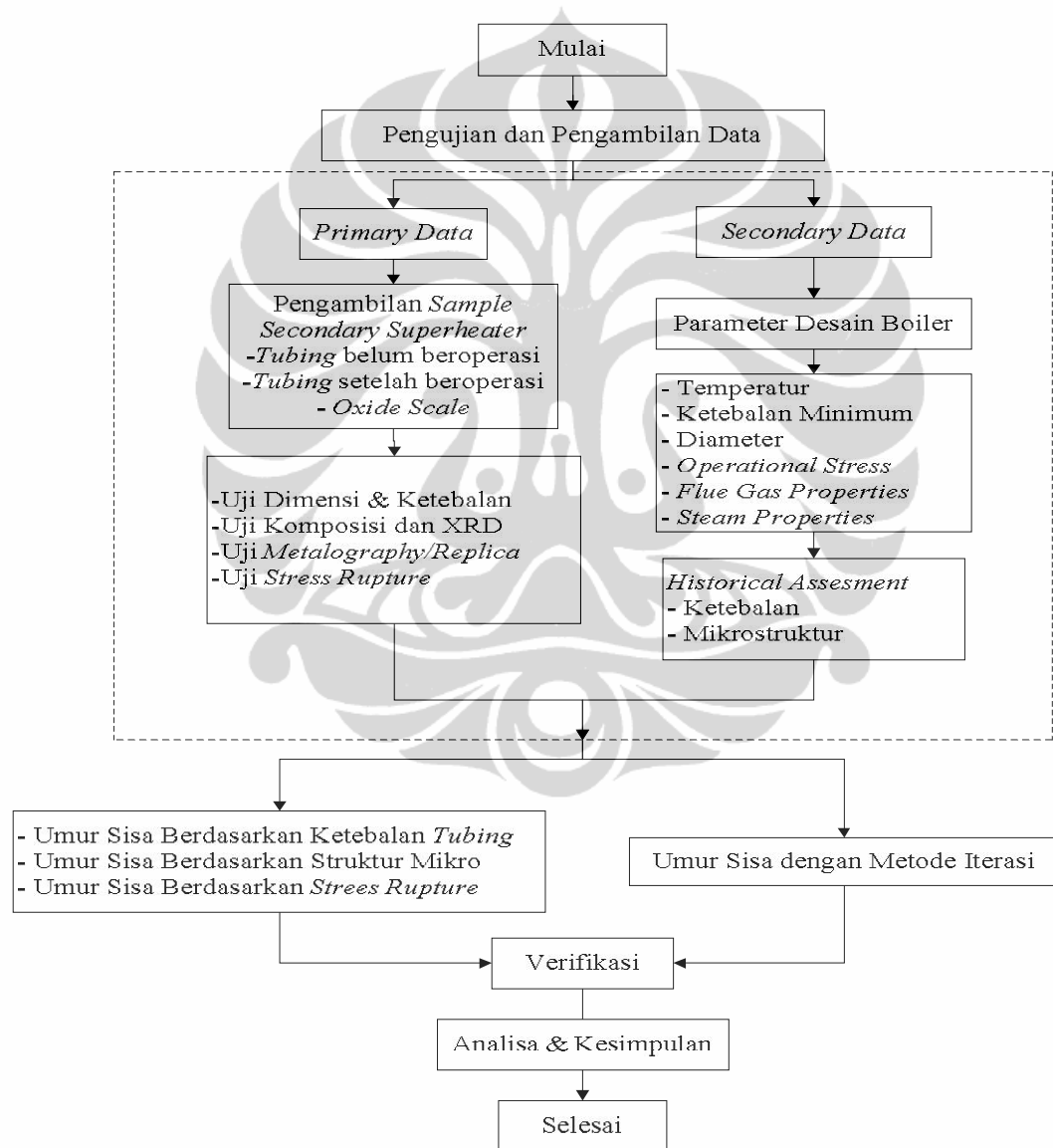
$$\sum \frac{t_i}{t_{ri}} = 1 \quad (2.11)$$

Dimana t_i adalah lamanya waktu operasi dan t_{ri} adalah waktu sampai terjadinya *rupture* (*rupture life*) dan t_i adalah waktu operasi *tubing*.

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan-tahapan dalam melakukan penelitian ini adalah seperti Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

Karakterisasi dilakukan terhadap *tubing* baru dan bekas pakai, untuk melihat struktur mikro serta mengidentifikasi fasa awal material baru dan perubahannya setelah pengoperasian. Karakterisasi yang dilakukan adalah seperti Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Jenis Pengujian pada Material *Tubing* dan *Oxide Scale*

Pengujian	<i>Tubing</i> Belum Beroperasi	<i>Tubing</i> Setelah Beroperasi	<i>Oxide Scale</i>
Dimensi dan ketebalan	X	X	
Uji Komposisi	X	X	
<i>Metalography</i>	X	X	
<i>Stress Rupture Test</i>	X		
XRD			X

Pengujian dimensi dilakukan untuk mendapatkan diameter luar dari *tubing* yang belum beroperasi. Alat yang digunakan adalah jangka sorong. Sedangkan pengukuran ketebalan *tubing* yang belum dan *tubing* setelah beroperasi dilakukan menggunakan alat *ultrasonic thickness meter*. Alat uji ketebalan tersebut adalah seperti pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Alat Uji Ketebalan-Ultrasonic Thickness Meter

Pengujian komposisi dilakukan untuk menentukan komposisi material *tubing* yang belum dan sudah beroperasi kemudian membandingkannya dengan standar komposisi untuk A213-T22. Uji komposisi menggunakan alat *spectrometer*. Alat uji komposisi tersebut seperti Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Alat Uji Komposisi-Spectrometer

Insitu *metalography* dilakukan pada *tubing* tanpa memotongnya. Tujuannya adalah untuk melihat apakah terjadi perubahan mikrostruktur pada *tubing* setelah beroperasi. Alat uji *insitu metalography* tersebut adalah seperti Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4. Alat Uji Insitu Metalography

Prosedur uji *metalography* dengan metode *replica* adalah sebagai berikut:

- *Grinding*
Tujuannya adalah untuk menghilangkan lapisan kerak, meratakan, dan menghaluskan permukaan *tubing*, dengan menggunakan *abrasive paper* dengan urutan 60, 120, 240, 500. Untuk mencegah terjadinya *overheating* maka perlu diberi *cooling* yang menggunakan (DP-Lubricant Green).
- *Polishing*
Tujuannya adalah untuk menghilangkan *scratch* pada permukaan *tubing*. *Polishing* menggunakan kain *polish* dengan urutan DP – Dur diberikan *diamond paste* ukuran 6 mikron, DP – Mol diberikan *diamond paste* 3 mikron, DP – Nap diberikan *diamond paste* 1 mikron.

- *Etching*

Tujuan pengetsaan adalah pemberian cairan kimiawi keatas permukaan sebuah permukaan mikrostruktur untuk membersihkan kotoran yang menempel pada sampel dan juga memberikan efek pewarnaan pada sampel agar lebih baik dan jelas terlihat.

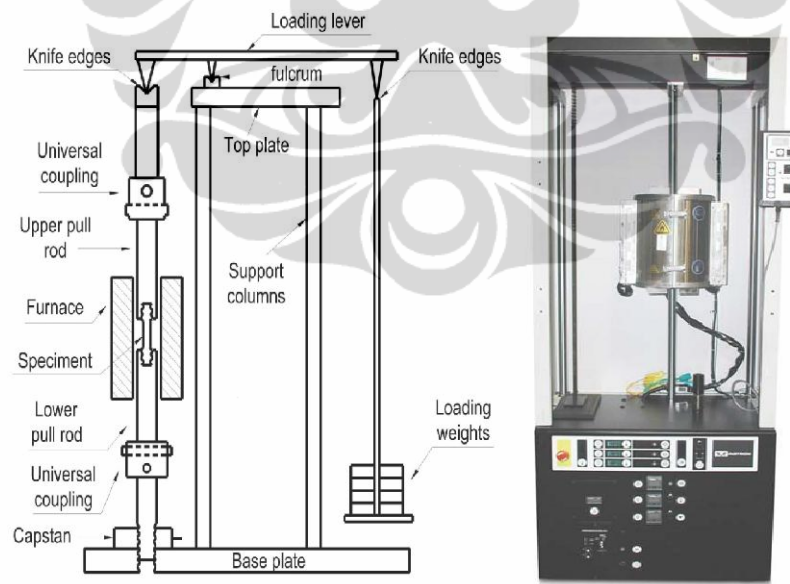
Bahan Etsa : Nital 5% (5 ml HNO₃ + 100 ml ethanol – 95%)

- *Replicating*

Tujuannya adalah untuk pengambilan data *metalography* setelah proses *etching* material. Proses ini meliputi persiapan *replica foil* dan *transcopy liquid*, pemasangan *replica* dan penyimpanan *replica*.

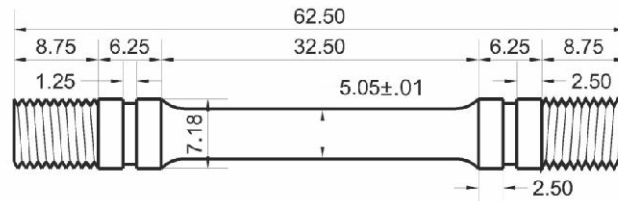
- Dokumentasi dilakukan dengan skala perbesaran 100, 50 dan 20 mikron.

Pengujian *stress rupture* dilakukan untuk mendapatkan data *creep* pada material tubing boiler. Hal penting yang harus diperhatikan adalah pemilihan temperatur uji *stress rupture*. Pada Gambar 3.5 dapat dilihat bentuk dari alat uji *stress rupture* pada Laboratorium B2TKS-BPPT Puspitek Serpong.



Gambar 3.5 Alat Uji *Stress Rupture*

Standar yang digunakan pada pengujian ini adalah mengacu pada ASTM E139-96 (1997). Spesimen dibentuk sesuai dengan ukuran seperti Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Spesimen Uji *Stress Rupture*

Detail ukuran adalah dalam satuan mm, seperti pada Tabel 3.2 berikut.

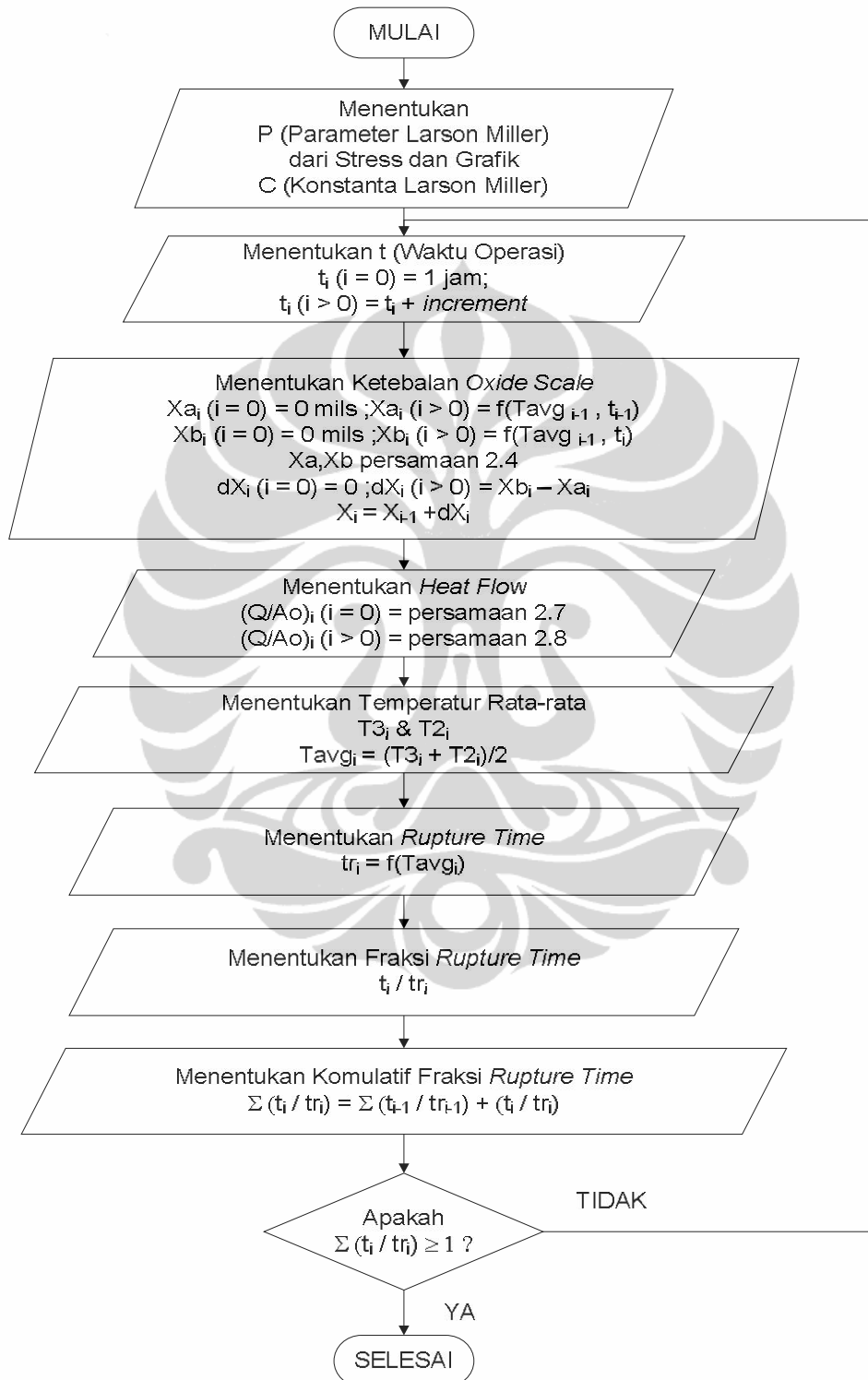
Tabel 3.2 Ukuran Spesimen Uji *Stress Rupture*

Sampel	Luas (mm ²)	Beban Uji (kgf)	Temp. (°C)
1	24.62	25	570
2	25.50	23	570
3	25.50	23	600
4	25.50	23	620
5	26.41	21	640
6	25.50	23	590
7	20.42	16	640
8	19.63	13	640
9	19.63	10	640
10	19.63	6	640

Pada penelitian ini XRD digunakan untuk mengetahui difraksi *oxide scale*. Selanjutnya dianalisa dengan *software* GSAS, sehingga dapat ditentukan komposisi senyawa *oxide scale*. Sehingga dari analisa *oxide scale* tersebut dapat digunakan untuk menentukan konduktifitas *thermal* berdasarkan referensi (French, N., 1992).

3.2 Diagram Alir Metode Iterasi

Iterasi dilakukan dengan langkah-langkah seperti Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7. Diagram Alir Metode Iterasi Sisa Umur Pakai

Parameter *flue gas* dan *steam* yang digunakan mengacu pada Lampiran 3. Iterasi menggunakan *step* yang menyatakan langkah iterasi. Pada masing-masing *step* ditentukan penambahan *service time* yang akan dihitung. Sesuai dengan prosedur pada Gambar 3.2, maka:

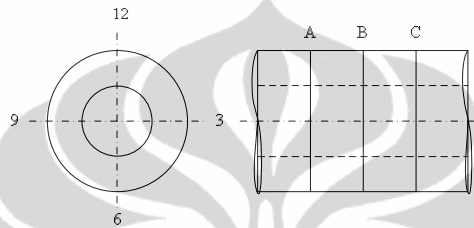
- Langkah pertama adalah menentukan *hoop stress* dengan Persamaan 2.9 untuk bentuk *tubing* lurus atau Persamaan 2.10 untuk bentuk *tubing elbow*.
- Kemudian menghitung parameter laron miller berdasarkan *hoop stress* dengan persamaan hasil uji *rupture test*.
- Menentukan ketebalan *oxide scale* berdasarkan waktu operasi dan parameter laron miller dengan Persamaan 2.4. Sehingga didapatkan ketebalan *tubing* setelah dikurangi ketebalan *oxide scale*.
- Menentukan *heat flow* dengan Persamaan 2.7 dan 2.8. Sebelumnya perlu diperhitungkan koefisien konveksi *flue gas* dan *steam* menggunakan parameter pada Lampiran 3 dengan Persamaan 2.5 dan 2.6. *Heat flow* digunakan untuk menghitung temperatur pada masing-masing *layer*.
- Menentukan temperatur masing-masing *layer*. Sehingga diketahui temperature rata-rata *tubing*. Temperatur masing-masing *layer* juga dipengaruhi oleh jarak perpindahan panas. Sehingga perbedaan jari-jari *tubing* akan menghasilkan temperatur yang berbeda.
- Temperatur rata-rata tersebut digunakan untuk menentukan *rupture time*.
- Kemudian menentukan fraksi *rupture time* yaitu perbandingan antara *service time* dengan *rupture time*.
- Verifikasi dilakukan pada total fraksi *rupture time*. Jika total fraksi ≥ 1 , maka iterasi selesai dan belum tercapai, maka iterasi dilanjutkan pada langkah berikutnya.

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Sisa Umur Pakai Berdasarkan Ketebalan *Tubing*

Pengambilan data ketebalan *tubing* sebelum beroperasi, menggunakan sampel *tubing* yang merupakan *sparepart* dari *Secondary Superheater* SA213-T22 dengan posisi pengukuran seperti Gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1 Posisi Pengukuran Dimensi *Tubing* Belum Beroperasi

Sampel yang diukur terdiri dari 2 (dua) *tubing* dengan ketebalan nominal yang berbeda, seperti Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Dimensi *Tubing* Belum Beroperasi

<i>Tubing</i>	Posisi	Diameter Luar (mm)			Ketebalan (mm)		
		A	B	C	A	B	C
<i>Secondary SH</i> SA 213-T22 ϕ 50,8 – 10,6 mm <i>Required</i> = 9,83 mm	3	51,3	51,3	51,3	10,9	10,9	10,9
	6	51,3	51,3	51,3	10,9	10,9	10,9
	9	51,3	51,3	51,3	10,9	10,9	10,9
	12	51,4	51,4	51,3	10,9	11,0	11,0
	Minimal	51,3	51,3	51,3	10,9	10,9	10,9
<i>Secondary SH</i> SA 213-T22 ϕ 50,8 – 9,1 mm <i>Required</i> = 8,49 mm	3	51,3	51,3	51,3	9,3	9,3	9,3
	6	51,4	51,3	51,3	9,3	9,3	9,3
	9	51,3	51,3	51,3	9,3	9,4	9,3
	12	51,3	51,3	51,3	9,3	9,3	9,3
	Minimal	51,3	51,3	51,3	9,3	9,3	9,3

Data ketebalan *tubing* yang telah beroperasi diperoleh dari beberapa periode inspeksi (*field assesment*). Lokasi pengambilan ketebalan *tubing* adalah seperti pada Lampiran 2. Hasil pengukuran ketebalan minimum tiap elemen *tubing* pada beberapa periode inspeksi adalah seperti Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Ketebalan Minimum *Tubing* Boiler

Posisi	<i>Tube</i>	Ukuran Nominal			Ketebalan Minimum (mm)	
		Diameter Luar (mm)	Ketebalan (mm)	<i>Required Thickness</i> (mm)	Sebelum Beroperasi	Inspeksi Terakhir
7	60	50.8	10.6	9.83	10.9	10.50
8	50	50.8	9.3	8.49	9.3	8.90
9	48	50.8	10.6	9.83	10.9	10.60
10	12	50.8	10.6	9.83	10.9	10.60
11	12	50.8	10.6	9.83	10.9	10.60
12	4	50.8	10.6	9.83	10.9	10.60

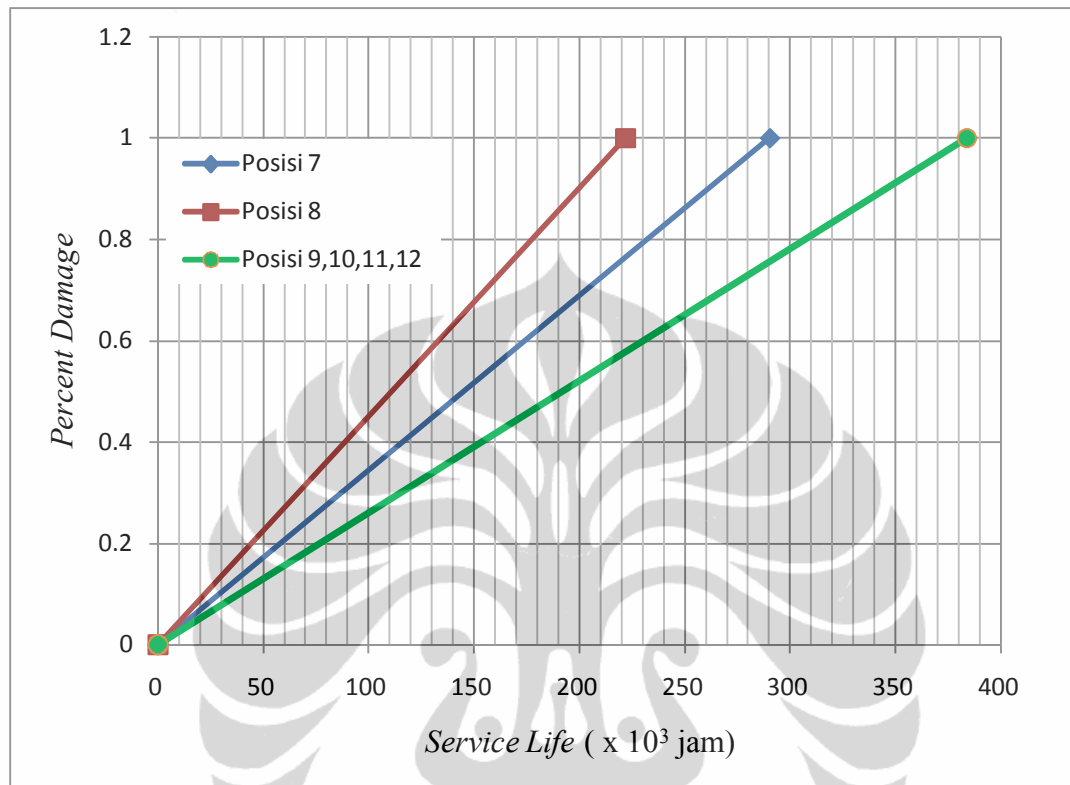
Berkurangnya ketebalan *tubing* mengindikasikan adanya korosi maupun erosi. Sisa umur pakai yang biasa dilakukan adalah berdasarkan evaluasi sisa ketebalan (*remaining thickness*). Sisa ketebalan dihitung berdasarkan *corrosion rate* dan ketebalan minimum yang dibutuhkan (*required thickness*). Untuk menentukan laju penipisan *tubing* (*corrosion rate*) pada Tabel 4.3, digunakan data ketebalan minimum *tubing*, karena memiliki risiko yang terbesar. *Corrosion rate* dihitung berdasarkan pengurangan ketebalan dalam suatu periode. Sehingga sisa umur pakai ditentukan berdasarkan Persamaan 2.1 seperti Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3. Sisa Umur Pakai Berdasarkan Sisa Ketebalan

Posisi	<i>Tube</i>	Tebal Minimum (mm)		<i>Corrosion Rate</i> ($\times 10^{-6}$ mm/jam)	<i>Required Thickness</i> (mm)	Sisa Umur Pakai (jam)	<i>Total Service Life</i> (jam)
		Sebelum Beroperasi	Inspeksi Terakhir				
7	60	10,9	10,5	3,81	9,83	176.076	290.226
8	50	9,3	8,9	3,81	8,49	107.748	221.898
9	48	10,9	10,6	2,85	9,83	269.808	383.958
10	12	10,9	10,6	2,85	9,83	269.808	383.958
11	12	10,9	10,6	2,85	9,83	269.808	383.958
12	4	10,9	10,6	2,85	9,83	269.808	383.958

Untuk menentukan prediksi sisa umur pakai, maka sisa umur pakai yang ada pada Tabel 4.3 dijumlahkan dengan lamanya *tubing* telah beroperasi. Dengan asumsi

tubing telah beroperasi selama 12 tahun (114.150 jam) dan *corrosion rate* yang linear maka dapat diperoleh prediksi sisa umur pakai seperti Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2. Prediksi Sisa Umur Pakai Berdasarkan Ketebalan *Tubing*

Dari grafik pada Gambar 4.2 di atas, tampak bahwa posisi no 7 dan 8 memiliki sisa umur pakai yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena posisi tersebut berada pada bagian *elbow* sehingga erosi *fluida steam* lebih dominan dalam pengurangan ketebalan daripada korosi. Erosi pada *elbow* terjadi karena terjadi perubahan kecepatan yang mengakibatkan perubahan gesekan terhadap dinding *tubing* (*friction factor*), sehingga menjadi lebih cepat mengalami penipisan.

Nilai prediksi sisa umur pakai menunjukkan nilai yang lebih besar dari umur desain boiler itu sendiri. Jika dibandingkan dengan data pemeliharaan, bahwa telah terjadi penggantian beberapa *tubing* setelah beroperasi 9 tahun (87.780 jam), maka hasil prediksi sisa umur *tubing* setelah beroperasi 12 tahun tersebut masih belum akurat.

4.2 Analisa Sisa Umur Pakai Berdasarkan Struktur Mikro

4.2.1. Pengaruh Komposisi Material terhadap *Creep Strength*

Perbandingan hasil pengujian komposisi *tubing* yang belum beroperasi dan *tubing* setelah beroperasi terhadap komposisi standar ASTM A213 (1999) adalah seperti Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Komposisi Material

Sampel	Data	Persentase Berat (% wt)							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
-	ASTM (A213 T22)	0,05 – 0,15	Max. 0,5	0,3 – 0,6	Max. 0,025	Max. 0,025	1,9 – 2,6	0,87 – 1,13	94,97 – 96,88
-	Belum Beroperasi	0,076	0,214	0,447	0,029	0,004	2,05	0,917	96,21
7 - #60	Setelah Beroperasi	0,075	0,230	0,513	0,015	0,006	2,07	0,890	96,18

Berdasarkan hasil pengujian komposisi diatas dan hasil pengujian uji tarik pada Lampiran 4, dinyatakan bahwa material *tubing* yang belum beroperasi maupun *tubing* yang telah beroperasi sesuai dengan standar ASTM A213 dengan grade T22. Nilai Cr dan Mo pada *tubing* yang belum dan setelah beroperasi lebih kecil dibandingkan standar, sehingga menurut referensi (Viswanathan, R., 1993), bahwa kandungan Cr dan Mo akan mempengaruhi *creep strength*. Sehingga perlu dilakukan eksperimen dalam menentukan parameter aktual dalam *creep*.

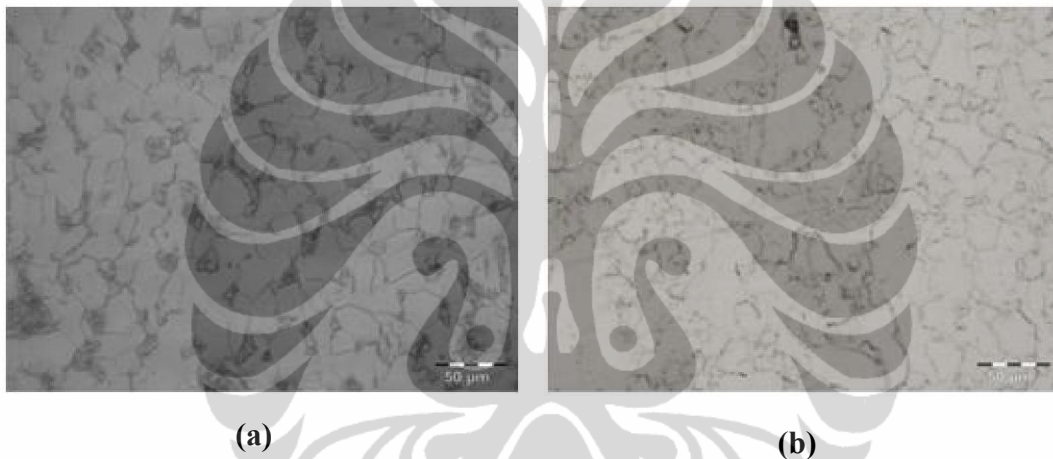
Atom Fe, Cr dan Mo mempunyai ukuran yang hampir sama. *Solid solution* atom Cr dengan Fe akan menempati *lattice* Fe secara substitusi. Chromium akan membentuk *protective oxide* yang akan mencegah oksigen berdifusi pada lapisan dibawahnya. Sehingga Cr juga berperan sebagai *corrosion resistant*. Atom Mo juga dapat menempati *lattice* Fe. Molybdenum meningkatkan kekerasan material, sehingga dapat mencegah terjadinya dislokasi pada struktur kristal.

Bainite dibentuk dengan dengan pendinginan secara cepat fasa *austenite* sampai pada posisi diatas temperature pembentukan *martensite*, kemudian menahan temperatur hingga terjadi fasa *ferrite* + *carbide* untuk *bainite*. Proses pembentukan *pearlite* adalah nukleasi *cementit* dan *ferrite* pada batas butir *austenite*, kemudian karbon akan berdifusi pada *ferrite* membentuk *carbide*.

Proses pembentukan *bainite* adalah kombinasi antara *shear* dan *difusi* yaitu dengan pembentukan *ledge* akibat dislokasi *ferrite* dan *austenite*, kemudian karbon akan berdifusi membentuk nukleasi *carbide* pada *ledge* yang akan menghambat dislokasi pada *ferrite bainite*. Sehingga *bainite* akan memberikan *creep strength* lebih besar dari pada *pearlite*.

4.2.2. Pengaruh Perubahan Struktur Mikro terhadap *Creep Strength*

Hasil *metalography* struktur mikro *tubing* yang belum beroperasi dan *tubing* yang telah beroperasi dengan perbesaran 200x dan nital 5%, seperti pada Gambar 4.3 berikut.

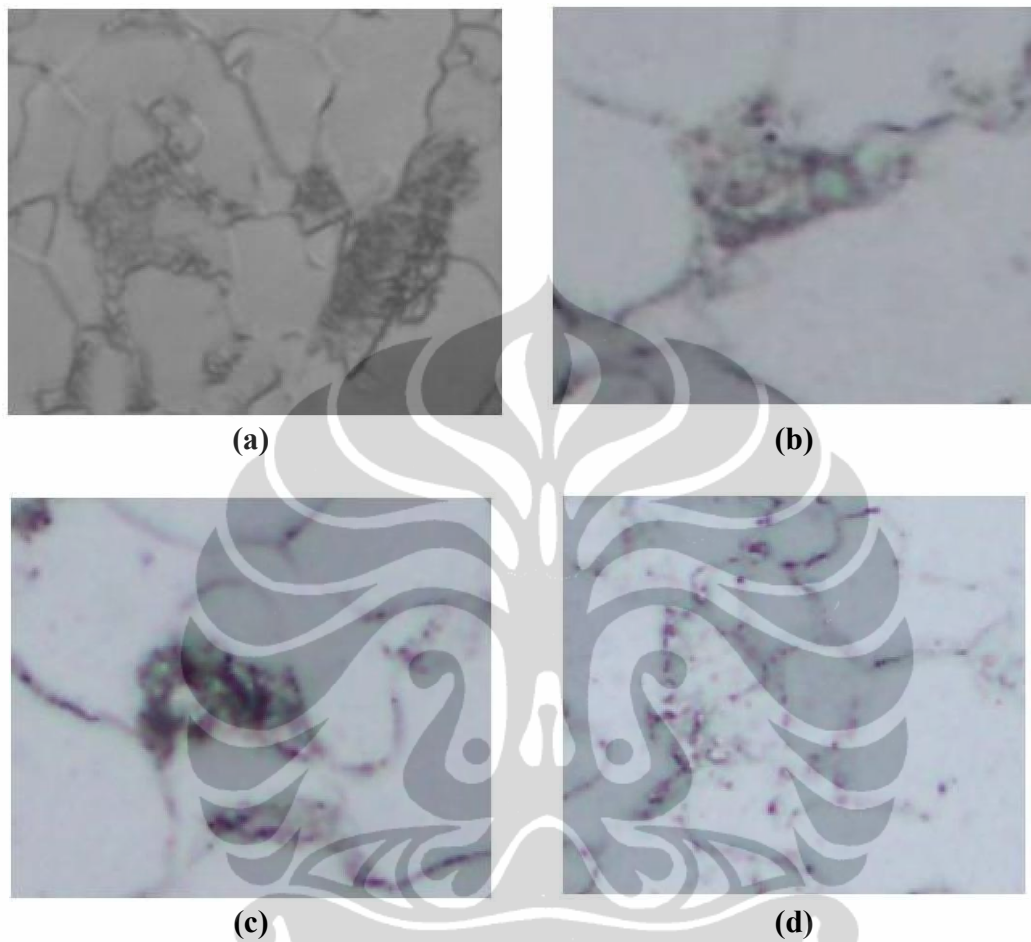


Gambar 4.3. Mikrostruktur: a). *Tubing* yang Belum Beroperasi dan; b). *Tubing* yang Telah Beroperasi, *Service Live* 87.780 jam.

Struktur mikro *tubing* yang belum beroperasi adalah *ferrite* (terang) dengan endapan karbida (hitam) terdispersi didalam *ferrite*. Setelah *tubing* dioperasikan sekitar 9 tahun (87.780 jam), secara visual terlihat dengan jelas endapan karbida telah berdifusi dan mengendap pada batas butir. Hal ini yang menyebabkan terjadinya penurunan sifat mekanis *tubing* bekas pakai.

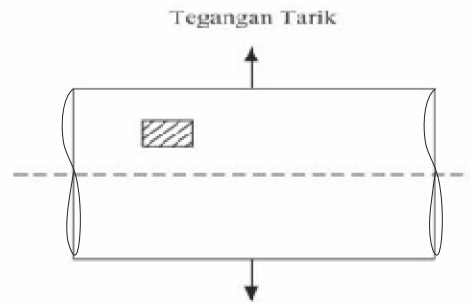
Pada *bainite* terdapat kecenderungan terbentuknya partikel *spheroid* dari *cementite*. *Spheroid* merupakan mikrostruktur yang paling stabil pada *steel*. Pada temperatur mendekati *eutectoid* (diatas 540 °C) terjadi difusi karbon membentuk *spheroid*. Kecepatan pembentukan *spheroid* pada *bainite* lebih besar daripada pada *pearlite*. *Spheroid* mempunyai kekuatan struktur yang rendah daripada struktur awal yang

di-*annealing*. Proses terbentuknya *spheroid* pada *tubing* posisi 7 perbesaran 200x dan nital 5%, adalah seperti Gambar 4.4 berikut :



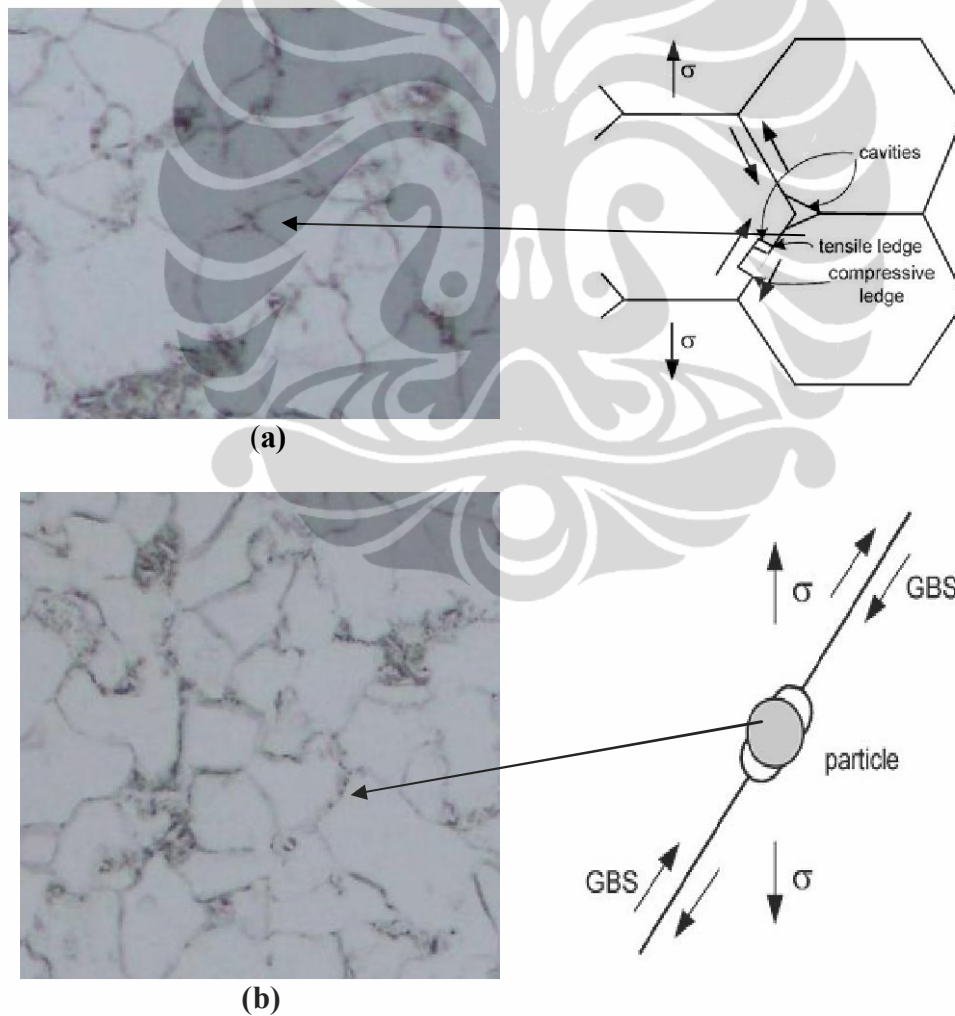
Gambar 4.4. Tahapan Pembentukan *Spheroid*: a). Struktur awal *bainite*; b). Karbida pada *bainite* mulai membentuk *spheroid* (35.160 jam); c). Karbida mengumpul berbentuk *spheroid* (87.780 jam) ; d). *Spheroid* terbentuk menjadi bulat-bulatan gelap (114.150 jam).

Pada mikrostruktur *tubing* yang *failure* juga terdapat *cavity*. *Cavity* yang terjadi pada *grain boundary* dengan arah *transversal* terhadap tegangan tarik (*tensile strength*). Sketsa penampang pada pengambilan sampel *replica* adalah seperti Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5 Sketsa Penampang *Tubing* dan Arah Tegangan.

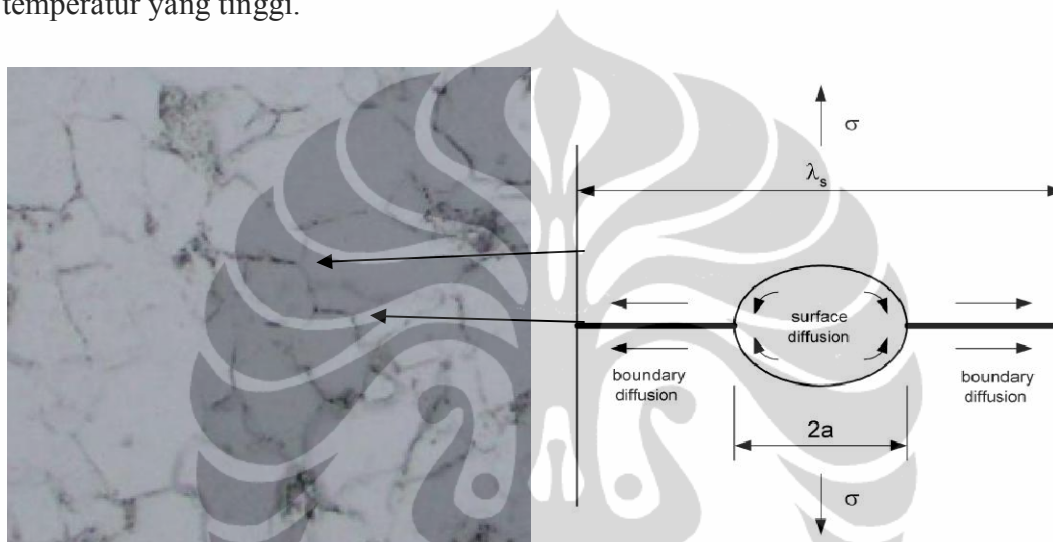
Pembentukan *cavity* terjadi karena *grain boundary sliding* dan *grain boundary diffusion*. Gambar 4.6 menunjukkan terjadinya *cavity* akibat *sliding* dengan perbesaran 200x dan nital 5%.



Gambar 4.6. Cavity Sliding: a). Pada *triple point tubing* posisi no.7 (87.780 jam) dan; b). Pada *grain boundary tubing* posisi no. 9 (87.780 jam)

Pada *triple point* akan menyebabkan konsentrasi tegangan yang akan menyebabkan terbentuknya *ledge*. Begitu juga akibat adanya partikel keras pada *grain boundary* akan menyebabkan terbentuknya *ledge*.

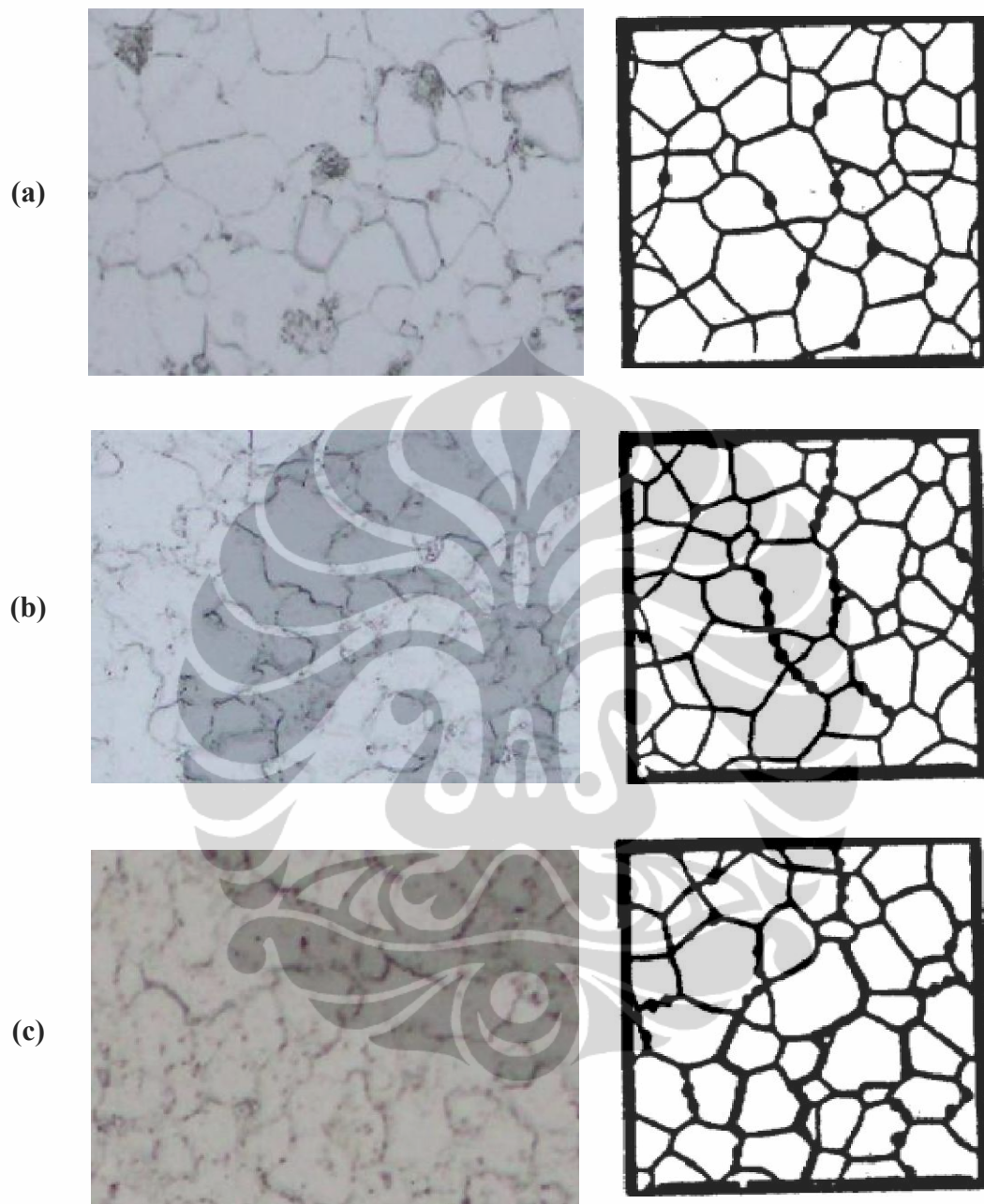
Pada bagian *grain boundary* yang tegak lurus terhadap *tensile strength*, mekanisme *sliding* tidak menjadi dominan, sehingga terbentuknya *cavity* lebih disebabkan oleh mekanisme difusi. Pertumbuhan *cavity* ini dipengaruhi oleh temperatur yang tinggi.



Gambar 4.7. Cavity Difusi pada Grain Boundary Tubing Posisi No. 9 (87.780 jam), Perbesaran 200x, Nital 5%.

Tubing posisi no. 9 pada Gambar 4.7 tampak adanya *cavity* yang tegak lurus terhadap tegangan tarik. Difusi terjadi akibat *surface* difusi pada *cavity* sehingga menyebabkan terjadinya *vacancy*, kemudian difusi terjadi melalui *grain boundary*. Sehingga pertumbuhan *cavity* dipengaruhi oleh, temperatur, koefisien difusi, tegangan, diameter *cavity*, jarak antara *cavity*, dan lebarnya *grain boundary* yang dilalui oleh difusi.

Berdasarkan data *metalography* perbesaran 200x, nital 5%, pada tubing no.7 dengan *service life* yang berbeda, pertumbuhan *cavity* terdapat beberapa tahap, mulai dari *isolated cavities*, *oriented cavities*, dan *micro crack*, seperti pada Gambar 4.8 berikut:



Gambar 4.8. Pertumbuhan *Cavity* pada *Grain Boundary*: a). *Isolated Cavities* (87.780 jam); b). *Oriented Cavities* (114.150 jam); c). *Micro Crack (Failure)*,

Sehingga terjadinya *cavity* akan mengurangi *creep strength* dan menyebabkan terjadinya *rupture*. Uji *metalography* pada inspeksi terakhir dilakukan pada *tubing* yang telah beroperasi 12 tahun (114.150 jam) dengan metode insitu (*replica*). Hasil mikrostruktur pengujian tersebut terdapat pada Lampiran 6. Dengan

menggunakan referensi (Cane, B.J. & Shamma, M.S., 1984), hasil insitu *metalography* untuk *tubing* posisi no.7 sampai 12 adalah class E dengan rekomendasi inspeksi ulang pada saat 10.000 jam kemudian.

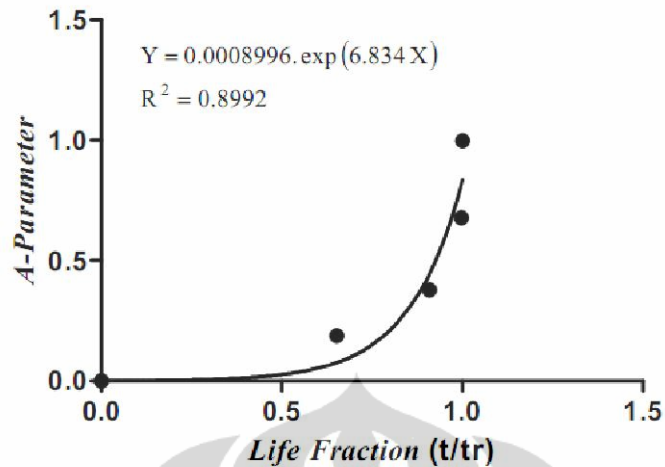
4.2.3. Hubungan Struktur Mikro terhadap Prediksi Sisa Umur Pakai

Karakterisasi *cavity* dilakukan dengan menentukan fraksi antara *grain boundary* yang terdapat *cavity* terhadap *grain boundary* keseluruhan. Nilai fraksi tersebut merupakan A-parameter yang memiliki hubungan dengan *rupture life*. Untuk menentukan Nilai A, maka hasil mikrostruktur dibagi menjadi 50 bagian, sejajar dengan arah tegangan. Kemudian dihitung nilai A-parameter dan fraksi *service life* terhadap *rupture life* (t/t_r) sesuai dengan Persamaan 2.3. Hasilnya adalah seperti Tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.5. Hasil Perhitungan Nilai A-Parameter

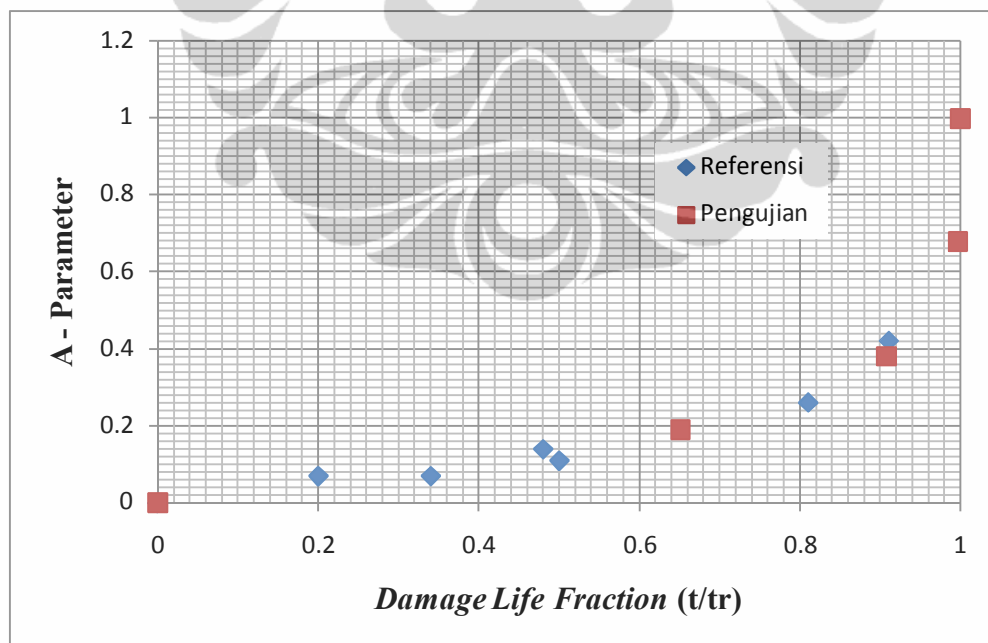
Posisi	Waktu Operasi; t (jam)	N_C	N_T	A	Damage (t/t_r)
7	0	0	630	0.000	0.000
	35.160	42	221	0.190	0.651
	87.780	278	717	0.380	0.908
	114.150	413	609	0.678	0.997
7 (failure)	87.780	827	829	0.998	1.000

Selanjutnya penentuan persamaan kurva dari data hasil pengujian adalah seperti pada Gambar 4.9, untuk tube posisi no.7, persamaan hubungan A-parameter dengan *life fraction* memiliki $R^2 = 0.8992$. Selanjutnya untuk memperoleh hubungan antara *service life* dengan *damage life fraction*, maka ditentukan persamaan $Y = 0,001426 (1,0156 (1 - \exp(-2,85 \cdot 10^{-5} \cdot X)))$ dengan $R^2 = 0,9983$.



Gambar 4.9. Persamaan Kurva Data Hasil Pengujian *Tubing* Posisi No. 7

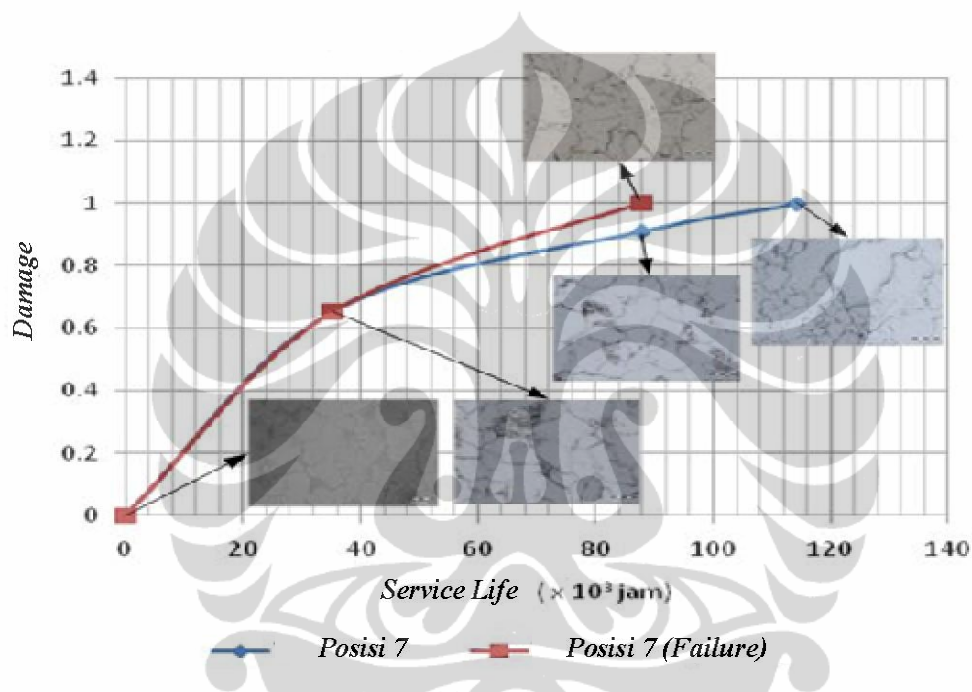
Untuk verifikasi hasil perhitungan A-parameter pada Tabel 4.5 dan persamaan kurva pada Gambar 4.9, maka digunakan data *life fraction* pada referensi (Bhadeshia,H.K.D.H., 1998). Perbandingan tersebut adalah seperti Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10. Perbandingan antara Data Pengujian *Tubing* Posisi No. 7 dan Referensi (Bhadeshia,H.K.D.H., 1998)

Data pengujian dan data referensi tersebut memiliki nilai distribusi $t = 0,15$, yang lebih besar dari pada nilai signifikansi $0,05$. Sehingga data pengujian dianggap sama dengan data referensi dengan deviasi standar $0,17$.

Data pada Gambar 4.10 diplot dalam grafik *service life* dan *damage life fraction*. Sehingga diperoleh persamaan $Y = 0,001426 + (1,0156 \times (1 - \exp(-2,85 \cdot 10^{-5} X)))$ dengan $R^2 = 0,9983$. Persamaan tersebut akan digunakan untuk verifikasi metode iterasi. Pada Gambar 4.11 tampak perubahan mikrostruktur terhadap *service life*.



Gambar 4.11. Perubahan Mikrostruktur terhadap *Service Life* pada *Tubing* Posisi No. 7

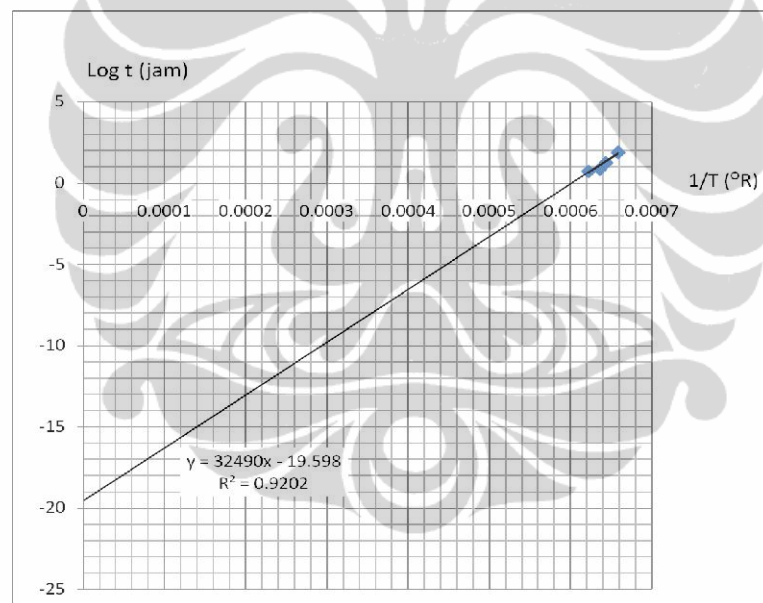
Penentuan sisa umur pakai berdasarkan mikrostruktur dilakukan dengan ekstrapolasi kurva pada Gambar 4.11 hingga mencapai fraksi life sama dengan 1 (satu). Pada posisi no. 7, terdapat dua data grafik, yaitu *tubing* no. 32 yang telah *failure* setelah beroperasi 9 tahun (87780 jam) dan *tubing* no.60 yang masih beroperasi selama 12 tahun. Menyatakan bahwa *failure* sudah mulai terjadi pada saat beroperasi 9 tahun. Untuk prediksi sisa umur pakai pada *tubing* posisi no. 8 hingga 12 menggunakan kurva pada Lampiran 7.

4.3 Analisa Sisa Umur Pakai Berdasarkan *Strees Rupture*

Berdasarkan hasil pengujian *rupture test* pada Lampiran 7. Hasil uji *stress rupture* untuk menentukan konstanta C Parameter Larson Miller dapat dilihat Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6. Hasil Uji *Stress Rupture* untuk Konstanta C pada A213-T22

No Sampel	Tegangan (N/mm ²)	Temp (°C)	Temp (°R)	1/°R	Waktu patah, t (jam)	Log t (jam)
2	132,56	570	1518	0.000659	79.9	1.9025
3	132,56	600	1572	0.000636	7.6	0.8808
4	132,56	620	1608	0.000622	5.5	0.7404
6	132,56	590	1554	0.000644	18.5	1.2672



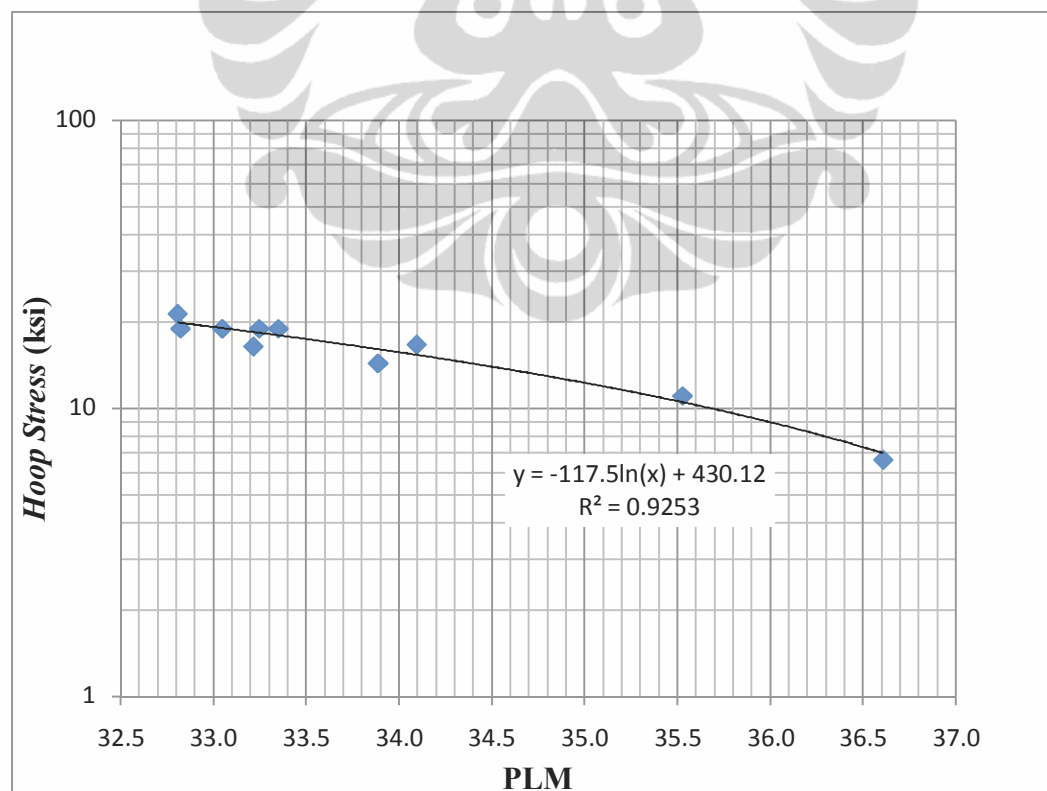
Gambar 4.12 Kurva Konstanta C pada Material A213-T22

Hubungan antara log t dan 1/T digunakan untuk menentukan konstanta C. Kurva pada Gambar 4.12 diatas mempunyai persamaan garis $Y = 32490 X - 19,598$. Nilai C adalah titik potong garis pada sumbu Y ($C = -\log t$), sehingga didapat konstanta parameter laron miller untuk material A213-T22 yang digunakan adalah $C = 19,598$. Berdasarkan hasil pengujian *rupture test* pada Lampiran 8. Hasil uji *stress rupture* untuk menentukan nilai Parameter Larson Miller (PLM) pada material A213-T22 yang digunakan adalah seperti Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7. Hasil Uji *Stress Rupture* untuk Menentukan PLM

No Sampel	Tegangan (N/mm ²)	Tegangan (ksi)	Temp (°R)	Waktu patah, t (jam)	PLM
1	149.28	21.33	1518	41.1	32.81
2	132.56	18.94	1536	79.9	33.25
3	132.56	18.94	1572	7.6	32.82
4	132.56	18.94	1608	5.5	33.35
5	116.90	16.70	1644	5.5	34.10
6	132.56	18.94	1554	18.5	33.05
7	115.19	16.46	1644	1.6	33.22
8	100.62	14.37	1644	4.1	33.89
9	77.40	11.06	1644	40.7	35.53
10	46.44	6.63	1644	184.9	36.61

Dari data Tabel 4.6 kemudian dibuat hubungan antara tegangan terhadap nilai parameter larson miller (PLM). Hasil korelasi tegangan dan parameter larson miller seperti tertera pada Gambar 4.13 berikut

**Gambar 4.13. Hubungan Tegangan dengan PLM pada Material A213-T22**

Sisa umur pakai ditentukan dengan menggunakan parameter laron miller (PLM) hasil pengujian sesuai grafik pada Gambar 4.12 dan 4.13. Nilai PLM tergantung dari *hoop stress* yang bekerja pada *tubing*. *Hoop stress* dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.9 dan 2.10.

Dengan data *hoop stress* tersebut, maka dapat diketahui nilai PLM untuk *tubing secondary SH*. Perhitungan *hoop stress* dan nilai PLM pada masing-masing posisi boiler *secondary superheater* adalah seperti Tabel 4.8 berikut:

Tabel 4.8. Nilai *Hoop Stress* dan PLM

Posisi No.	Tube No.	Dimensi		Steam Pressure; P (Kg/mm ²)	Hoop Stress; σ (ksi)	PLM
		Diameter Luar (mm)	Ketebalan (mm)			
7	60	50.8	10.5	1.385	4.50	37.42
8	50	50.8	8.9	1.385	5.31	37.17
9	48	50.8	10.6	1.385	3.74	37.67
10	12	50.8	10.6	1.385	3.74	37.67
11	12	50.8	10.6	1.385	3.74	37.67
12	4	50.8	10.6	1.385	3.74	37.67

Temperatur pada *tubing* boiler dihitung hingga diperoleh temperatur rata-rata seperti Tabel 4.9 berikut:

Tabel. 4.9. Estimasi Metal Temperature

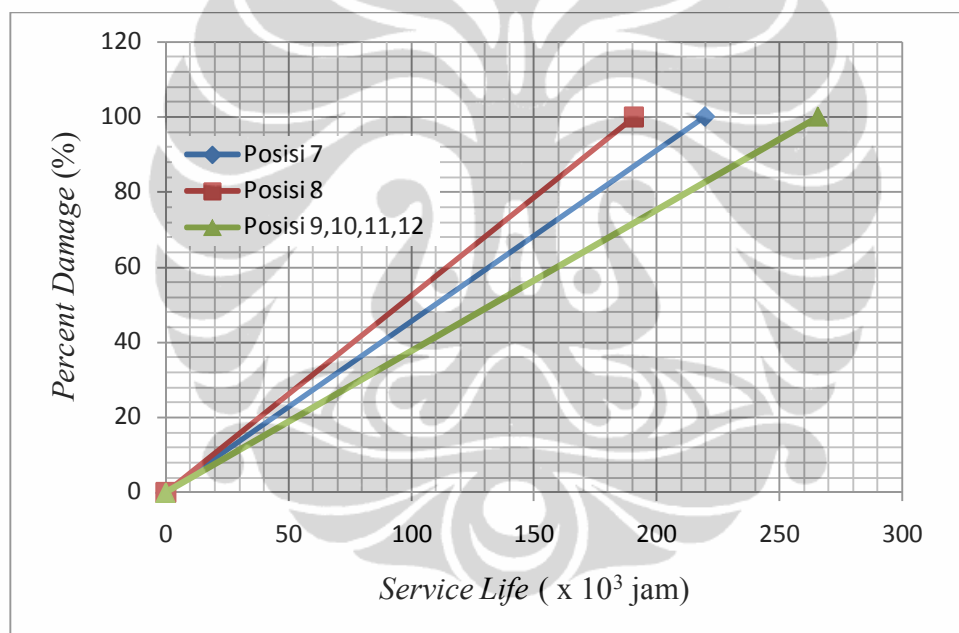
Posisi No.	Q ; Heat Flow (W)	T _{gas} (°C)	T ₃ (°C)	T ₁ (°C)	T _s (°C)	Temp. Rata-rata (°C)
7	23839	800	579,2	563.0	540	571,1
8	23983	800	577,9	562.3	540	570,1
9	23830	800	579,3	563.1	540	571,2
10	23830	800	579,3	563.1	540	571,2
11	23830	800	579,3	563.1	540	571,2
12	23830	800	579,3	563.1	540	571,2

Sisa umur pakai dihitung menggunakan persamaan laron miller dan data temperatur yang telah ditentukan. Hasil perhitungan tersebut seperti yang terdapat pada Tabel 4.10 berikut:

Tabel 4.10. Prediksi Sisa Umur Pakai dengan Parameter Larson Miller

Posisi No.	PLM	<i>Rupture Time</i> (jam)	<i>Rupture Time</i> (tahun)
7	37.4	105.411	12,03
8	37.2	76.597	8,74
9	37.7	151.701	17,32
10	37.7	151.701	17,32
11	37.7	151.701	17,32
12	37.7	151.701	17,32

Tubing telah beroperasi selama 12 tahun (114.150 jam), dengan temperatur dan *hoop stress tubing* yang konstan, maka diperoleh prediksi sisa umur pakai seperti Gambar 4.14 berikut.



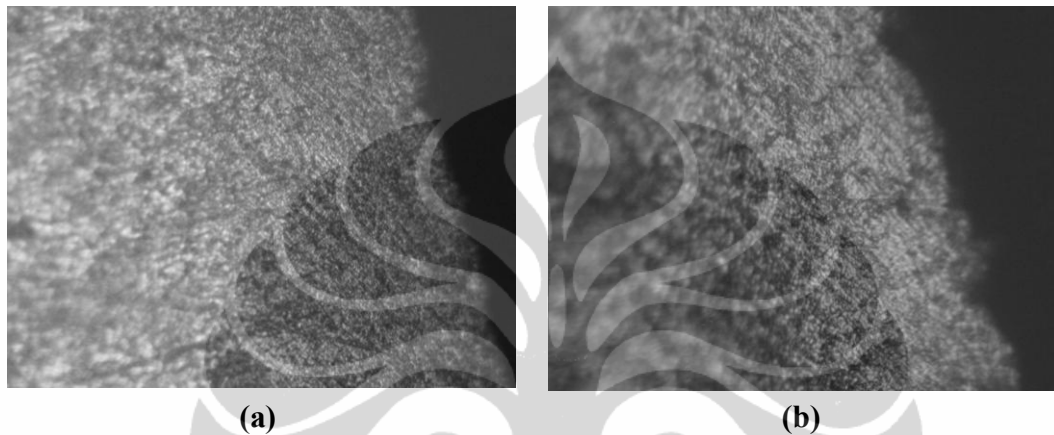
Gambar 4.14. Prediksi Sisa Umur Pakai Berdasarkan *Stress Rupture*

Dari grafik pada Gambar 4.14 di atas, tampak bahwa posisi no. 7 dan 8 memiliki sisa umur pakai yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena posisi tersebut berada pada bagian *elbow* sehingga memiliki *hoop stress* yang lebih besar dan nilai PLM yang lebih kecil. Prediksi sisa umur *tubing* tersebut belum mempertimbangkan perubahan temperatur akibat penambahan *oxide scale*, dan perubahan *hoop stress* akibat pengurangan ketebalan *tubing*. Sehingga perlu perhitungan sisa umur *tubing* lain yang lebih akurat.

4.4 Analisa Sisa Umur Pakai dengan Metode Iterasi

4.4.1 Analisa *Oxide Scale*

Investigasi pada bagian *tubing* yang telah beroperasi, dilakukan dengan uji *metalography* pada bagian *outer side* maupun *inner side*. Pada *outer side* dengan *service life* 9 tahun, terdapat korosi pasif, seperti tampak pada Gambar 4.15 berikut.



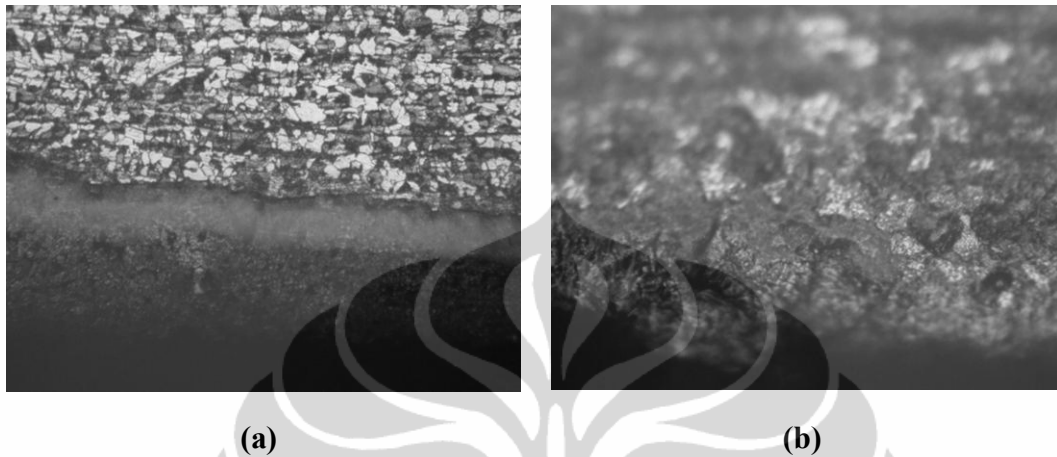
Gambar 4.15. *Outer Side Tubing* no.32 Posisi no. 7 :
a). Perbesaran 50x Nital 5% ; b). Perbesaran 100x Nital 5%.

Pada inspeksi terakhir, secara visual juga tampak korosi pasif yang terjadi pada *outer side secondary superheater*. Perbandingan antara *outer side* dengan seperti pada Gambar 4.16 berikut.



Gambar 4.16 Perbandingan Korosi pada *Outer Side* : a). *Secondary Superheater* ; b). *Economiser*

Pada Gambar 4.17, tampak adanya korosi *inner side* yang lebih reaktif pada batas butir. Sehingga pada analisa lebih lanjut, simulasi yang akan dilakukan perhitungan penambahan *oxide scale* pada *inner side*.

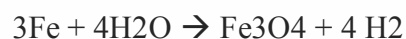


Gambar 4.17 Inner Side Tubing no.32 Posisi no. 7 :

a). Perbesaran 50x Nital 5% ; b). Perbesaran 100x Nital 5%.

Untuk meminimalkan korosi pada temperatur tinggi tergantung dari pembentukan *protective oxide scale*. *Oxide* yang biasa digunakan untuk *protective layer* adalah Cr_2O_3 . *Protective layer* tersebut dapat tidak berfungsi apabila terjadi hilangnya *oxide* akibat erosi maupun *impact* dari tekanan *fluida* secara tiba tiba seperti Gambar 4.17 diatas.

Pembentukan *scale* karena proses difusi. Dengan terbentuknya *scale* akan menyebabkan lapisan dibawahnya tidak langsung terkena oksigen. Atom Fe akan keluar dan atom oksigen akan masuk melalui *oxide scale*. Atom berdifusi dalam bentuk ion. Pada *inner scale* yang diuji terdapat 2 fasa *oxide* yaitu *magnetite* dan *hematite*. Sehingga reaksi *iron oxide* adalah sebagai berikut:



Iron oxide dapat menjadi *protective layer*, walaupun tidak menghambat namun dapat mengurangi laju pertumbuhan oksidasi berikutnya. Kekurangannya adalah dapat mengurangi perpindahan panas, sehingga berpotensi terjadi kenaikan temperatur pada *tubing*.

Oksigen dengan diameter atom yang kecil, mempunyai *diffusion rate* yang lebih besar pada *magnetite* daripada *iron* (Fe). Oksigen difusi ke Fe_3O_4 mengubah *outer layer* Fe_3O_4 menjadi Fe_2O_3 . Konsentrasi oksigen yang sampai pada FeO dan Fe adalah kecil. Sehingga pembentukan FeO menjadi Fe_3O_4 menjadi berkurang atau lebih lambat atau Fe menjadi FeO akan menjadi lebih lambat.

Pengujian XRD dilakukan pada *oxide scale* untuk menentukan komposisinya. Data *peak* dan grafik hasil XRD tersebut adalah seperti Lampiran 8. Berdasarkan pengamatan data kesesuaian antara *d-spacing* hasil analisa XRD yang diolah menggunakan program APD dengan *d-spacing* dari program PCPDF Win-ICDD, dapat dilihat adanya kesesuaian *d-spacing* antara kedua data tersebut. Dugaan sementara bahwa kandungan sampel, terdiri dari 2 fasa yaitu : Fe_2O_3 (Hematite) dan Fe_3O_4 (Magnetite). Sehingga langkah selanjutnya adalah mencatat parameter kisi dan *space group* yang akan digunakan dalam GSAS, seperti Lampiran 12.

Data lengkap PCPDF-WIN terdapat pada Lampiran 9. Adapun data hasil perbandingan *oxide*. UDF dengan *database* yang ada pada program PCPDF Win-ICDD adalah seperti Lampiran 10. Hasil penghalusan data dengan GSAS dilakukan sebanyak 6325 *cycle* dengan nilai $\chi^2 = 1,693$ dan $wRp = 5,45 \%$. Perbandingan grafik *error probability* dan *normalized plot* terdapat pada Lampiran 11. Sehingga dari hasil penghalusan data dengan GSAS diketahui bahwa fasa yang ada adalah *iron oxide* (Fe_2O_3 dan Fe_3O_4) dengan fraksi berat oxide tersebut untuk fasa $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 60,669 \%$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4 = 39,331 \%$.

Sehingga konduktifitas *thermal* untuk *iron oxide* sesuai referensi (French, N., 1992) adalah 0,342 Btu/hr.ft. $^{\circ}\text{F}$ atau 0,592 W/m. $^{\circ}\text{C}$. Data tersebut lebih lanjut akan digunakan dalam perhitungan iterasi perpindahan panas pada *tubing boiler*.

4.4.2. Prosedur Metode Iterasi

Penentuan sisa umur pakai dengan metode iterasi dilakukan pada beberapa *tubing boiler*. Berdasarkan bentuk dan dimensi, *tubing* tersebut dibagi menjadi tiga *mode* seperti Tabel 4.11 berikut.

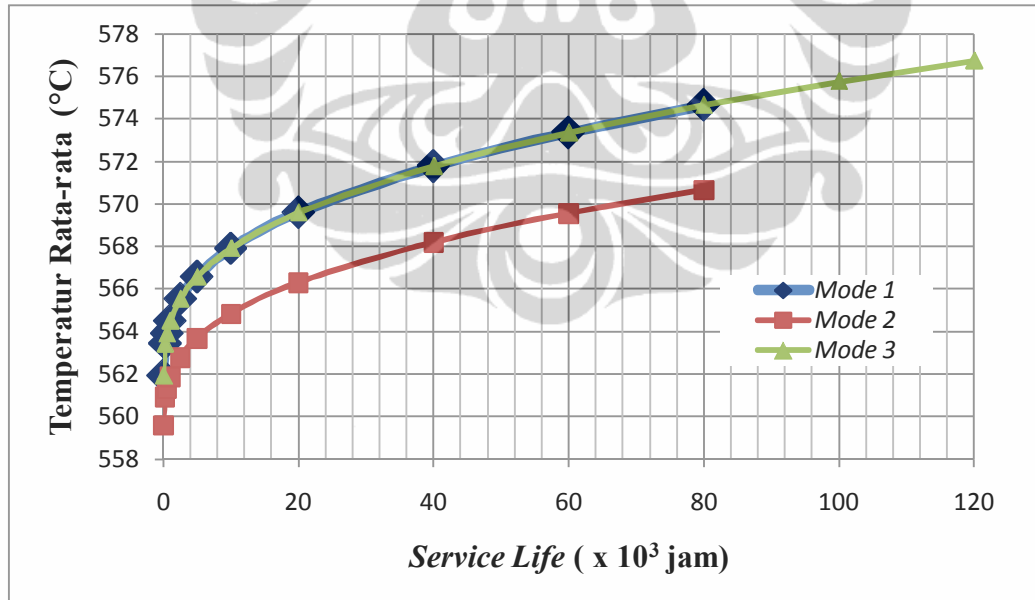
Tabel 4.11. *Mode Tubing Boiler* untuk Iterasi

<i>Mode</i>	Desain	Posisi	Diameter Luar (mm)	Ketebalan (mm)
<i>Mode 1</i>	Elbow	7	51,30	10,9
<i>Mode 2</i>	Elbow	8	51,30	9,3
<i>Mode 3</i>	Lurus	9,10,11,12	51,30	10,9

Hasil perhitungan iterasi terdapat pada Lampiran 13.

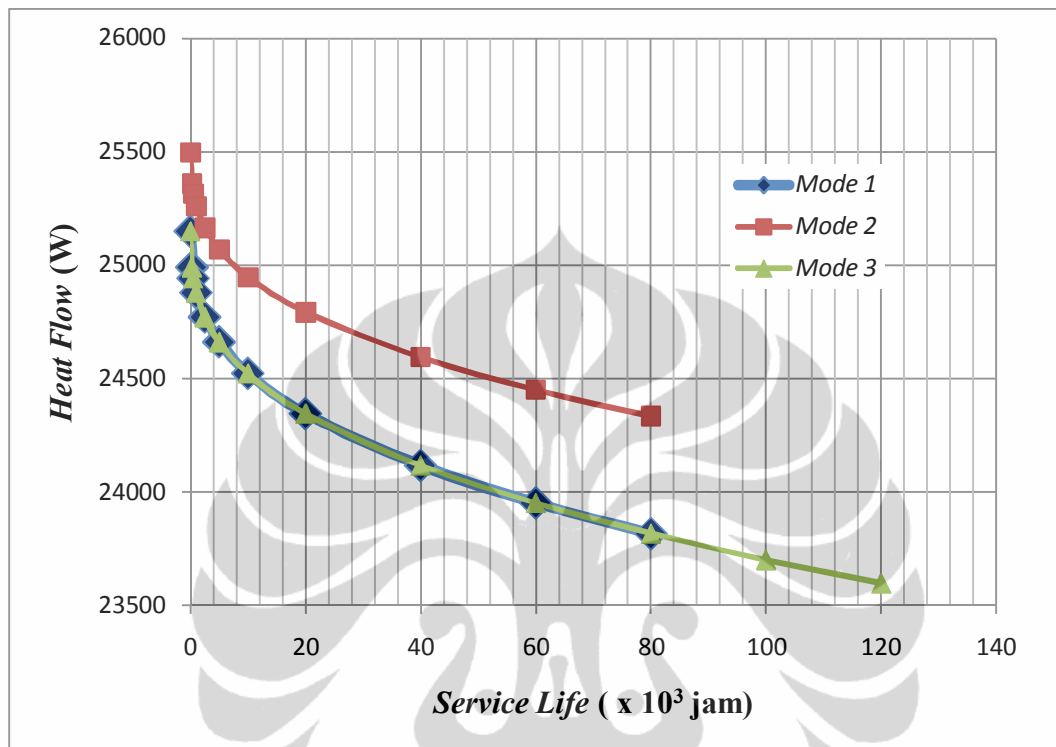
4.4.3 Analisa Temperatur Rata-rata dan *Heat Flow*

Pada Gambar 4.18 tampak bahwa temperatur rata-rata *mode 1* (satu) dan 3 (tiga) lebih besar daripada *mode 2* (dua). Sehingga semakin besar ketebalan *Tubing* akan menyebabkan meningkatnya temperatur rata-rata. Pada kurva tersebut juga tampak bahwa faktor bentuk desain *tubing* lurus maupun *elbow* tidak berpengaruh pada temperature rata-rata. Namun *tubing* berbentuk lurus memiliki estimasi sisa umur pakai yang lebih lama daripada bentuk *elbow*.

Gambar 4.18. Temperatur Rata-rata *Tubing*

Dengan bertambahnya temperatur rata-rata, maka *heat flow* akan semakin menurun. Penurunan terbesar adalah pada *mode 1* (satu) dan 3 (tiga). Sehingga semakin besar ketebalan *tubing* yang digunakan akan menyebabkan penurunan

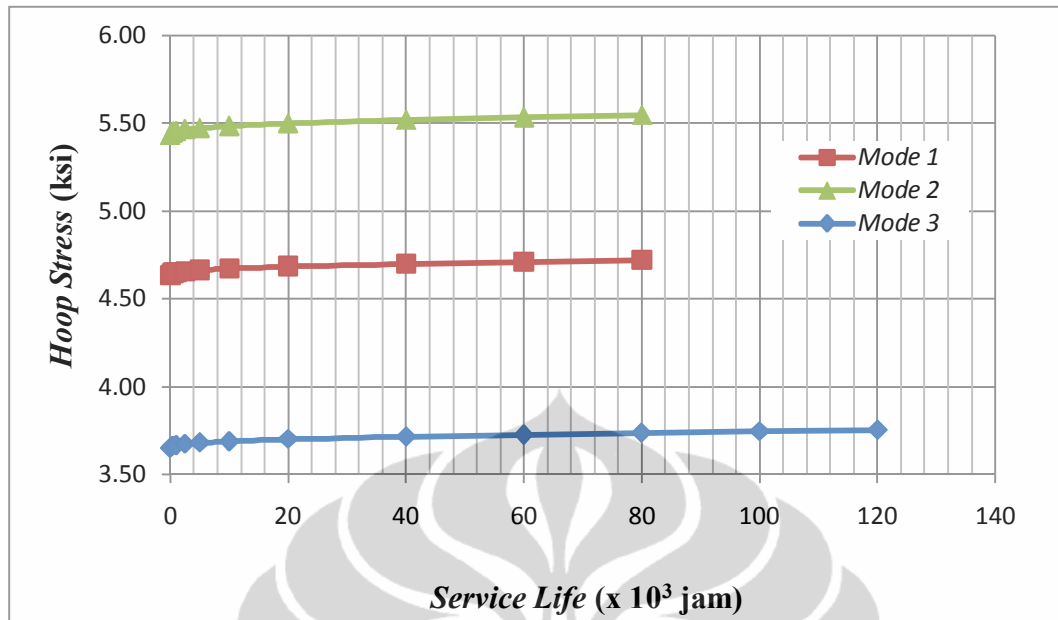
heat flow yang lebih besar. Gambar 4.19 berikut merupakan hasil iterasi untuk estimasi *heat flow* pada *tubing*.



Gambar 4.19. Estimasi *Heat Flow*

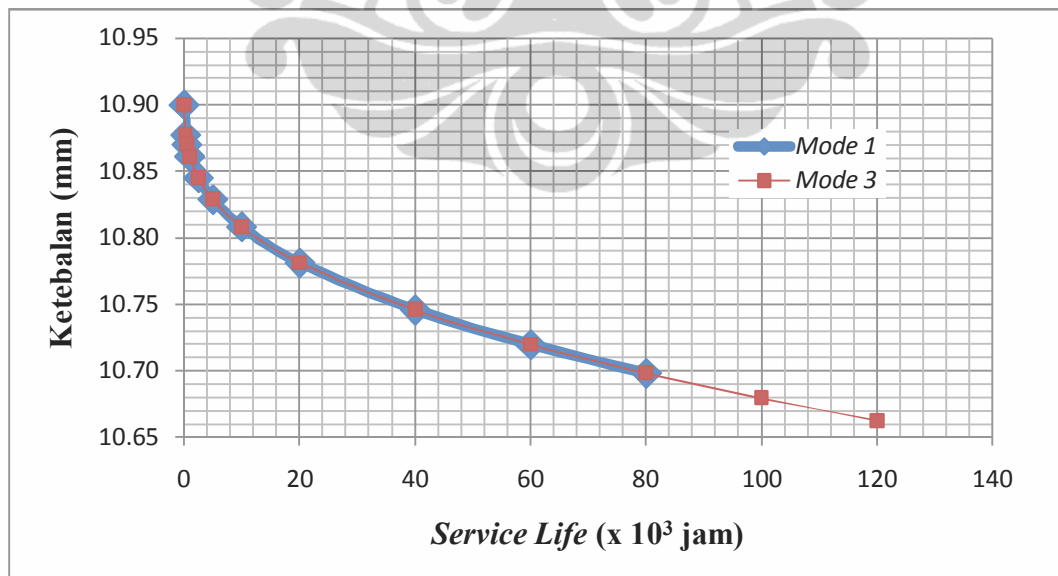
4.4.4 Analisa *Hoop Stress* dan Ketebalan *Tubing*

Pada Gambar 4.20 tampak bahwa ketiga *mode* memiliki *hoop stress* yang berbeda. *Hoop stress mode 2* (dua) lebih besar daripada *mode 1* (satu). Sehingga semakin kecil ketebalan *tubing* akan menyebabkan *hoop stress* yang lebih besar. Sedangkan *hoop stress mode 1* (satu) lebih besar daripada *mode 3* (tiga). Sehingga *tubing* bentuk lurus memiliki *hoop stress* yang lebih kecil daripada bentuk *elbow*.



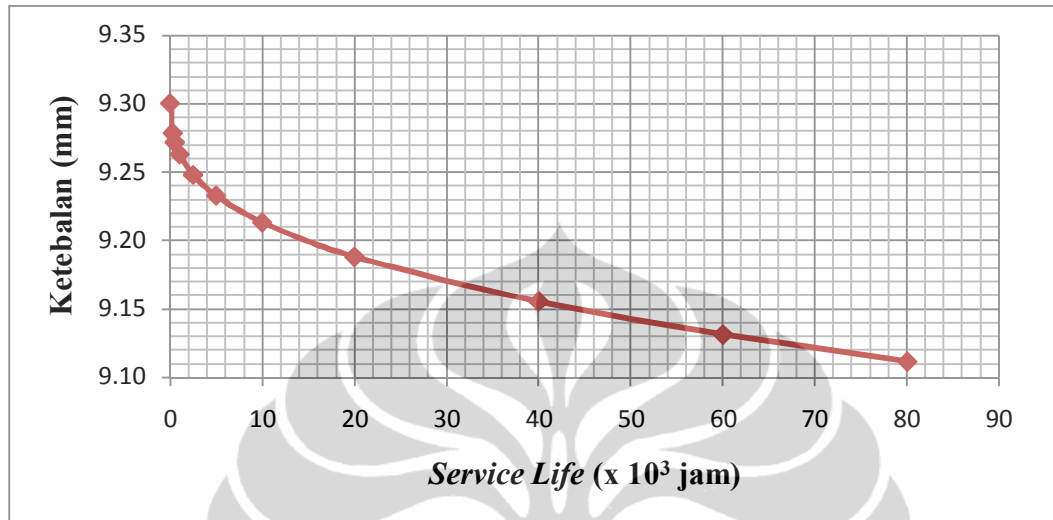
Gambar 4.20. Estimasi Hoop Stress

Penurunan ketebalan *tubing* adalah akibat dari pertumbuhan *oxide scale*. Ketiga *mode* menunjukkan bahwa laju penurunan ketebalan *tubing* semakin mengecil. Hal ini adalah pengaruh dari *oxide scale* yang juga berfungsi sebagai *protective layer*. Gambar 4.21 berikut merupakan hasil iterasi untuk estimasi ketebalan *tubing* *mode* 1 (satu) dan 3 (tiga).



Gambar 4.21 Penurunan Ketebalan Mode 1 dan 3

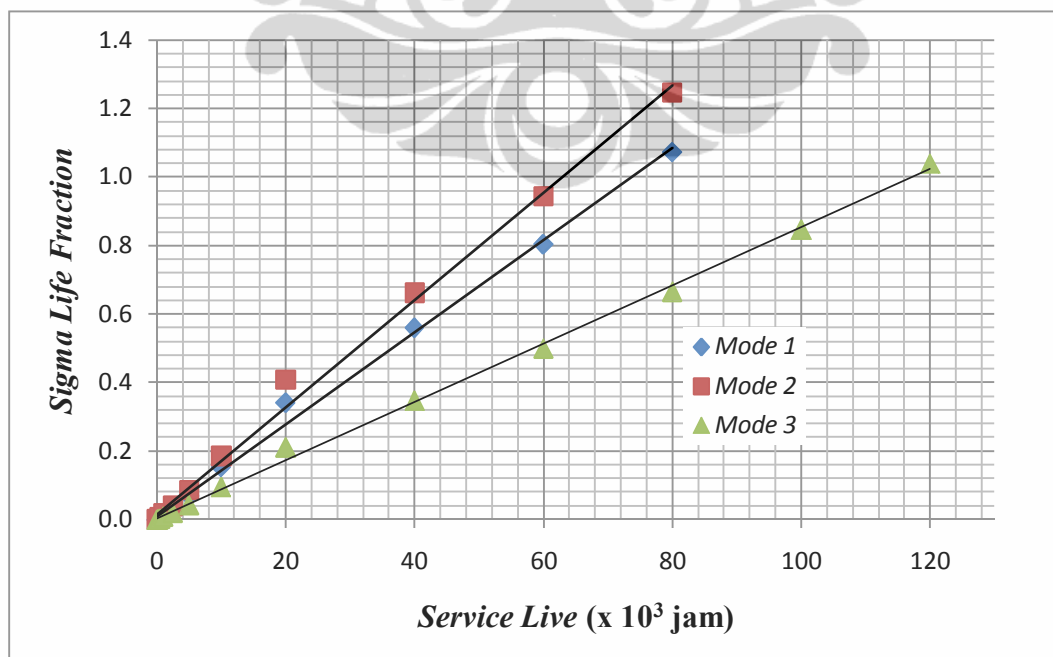
Kurva penurunan ketebalan *mode* 1 (satu) dan 3 (tiga) adalah identik sama. Sedangkan *mode* 2 (dua) pada Gambar 4.22 memiliki penurunan ketebalan yang lebih rendah dikarenakan ketebalan awal mula-mula yang lebih rendah.



Gambar 4.22 Penurunan Ketebalan Mode 2

4.4.5. Analisa Fraksi Rupture Life

Gambar 4.23 berikut adalah hasil perhitungan fraksi *rupture life*. Sehingga dapat diketahui bahwa *mode* 3 (tiga) memiliki estimasi sisa umur pakai yang paling lama, kemudian *mode* 2 (dua) dan *mode* 1 (satu).



Gambar 4.23. Fraksi Rupture Life

Dengan mengacu pada referensi (Viswanathan, R., 1993), bahwa sigma fraksi *rupture life* adalah merupakan fungsi linear. Sehingga Tabel 4.12 berikut adalah verifikasi fraksi *rupture life* terhadap fungsi linear tersebut.

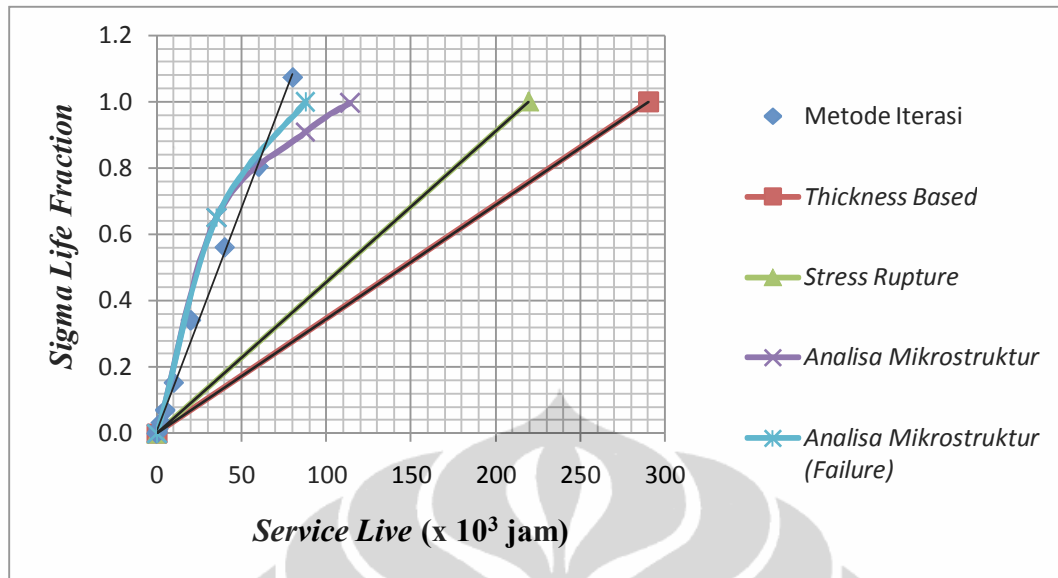
Tabel 4.12. Fraksi *Rupture Life* terhadap Fungsi Linear

<i>Mode</i>	Persamaan	R^2	<i>Rupture Life</i> (jam)	Sisa Umur Pakai (jam)
1	$Y = 1 \times 10^{-05}X + 0,0095$	0,9964	99.050	-15.100
2	$Y = 2 \times 10^{-05}X + 0,0142$	0,9955	49.290	-64.860
3	$Y = 8 \times 10^{-06}X + 0,0039$	0,9985	124.513	10.363

Nilai *coefisien determination* (R^2) deviasi pada Tabel 4.12 tidak sama dengan 1(satu), hal ini dikarenakan adanya faktor lain selain X yang berpengaruh. Grafik dalam fungsi linear $Y = a.X + b$, maka yang menjadi variabel a adalah faktor *creep* yang meliputi *hoop stress*, temperatur *flue gas* dan *steam*, serta dimensi ketebalan awal. *mode 3* (tiga) memiliki *coefisien of determination* yang lebih mendekati 1 (satu) yaitu $R^2 = 0,9985$. Artinya 99,85% *sigma life fraction* ditentukan oleh variabel X yang merupakan fungsi dari waktu operasi, laju korosi dan erosi . Sedangkan 0,15% sebagai percepatan pada variabel *slope a*. *Mode 3* (tiga) memiliki sisa umur pakai selama 10.363 jam.

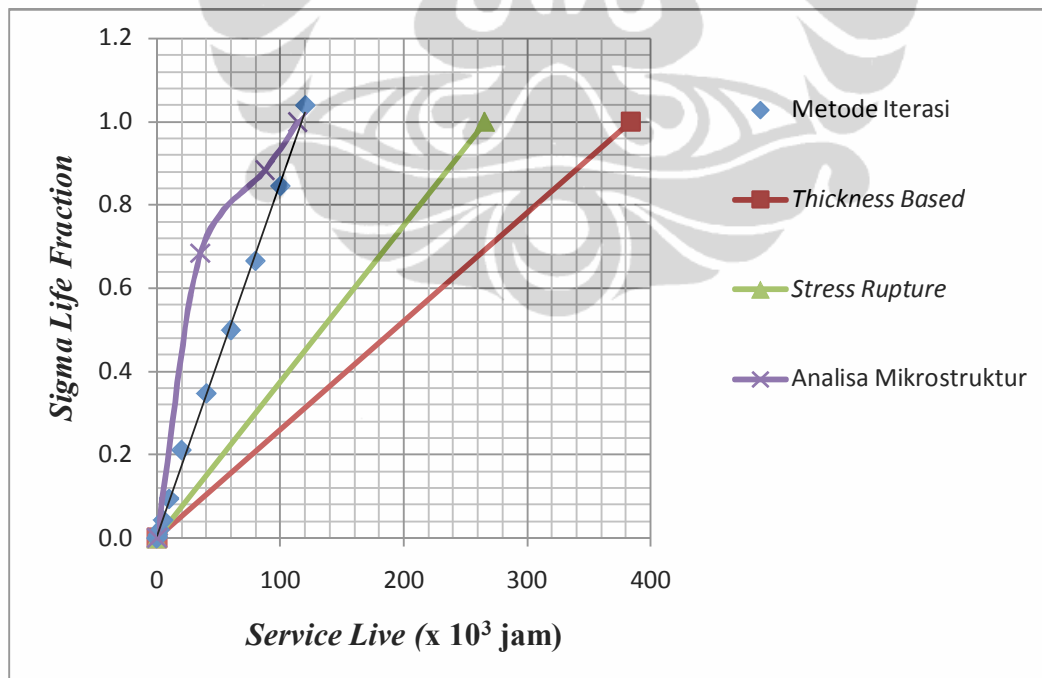
4.5 Perbandingan Metode Penentuan Sisa Umur Pakai

Pada Lampiran 13, *tubing* posisi 7 dan 8 memiliki tren yang sama. Sedangkan *tubing* posisi 9 memiliki tren yang sama dengan posisi 10, 11 dan 12. Sehingga analisa dilakukan pada *tubing* posisi 7 (Gambar 4.24) dan 9 (Gambar (4.25)).



Gambar 4.24. Perbandingan Metode pada Tubing Posisi No. 7

Pada *tubing* bagian *elbow* (posisi 7 dan 8) estimasi *tubing* lebih pendek yaitu pada bagian *life* fraksi diatas 80 %. Hal ini disebabkan pada bagian *elbow* faktor erosi lebih dominan. Sehingga untuk posisi *elbow*, metode iterasi kurang akurat.



Gambar 4.25. Perbandingan Metode pada Tubing Posisi No. 9

Pada *tubing* yang lurus (posisi 9,10,11 dan12) tampak bahwa analisa mikro struktur memiliki kurva estimasi sisa umur pakai yang lebih cepat. Namun pada

saat *fraksi life* mendekati 100%, kurva mikro struktur mendekati kurva *life* fraksi hasil estimasi.

Perhitungan deviasi standar pada metode iterasi, metode *stress rupture* dan metode pengurangan ketebalan terhadap analisa struktur mikro adalah seperti Tabel 4.13 berikut.

Tabel 4.13. Deviasi Standar Metode

Posisi <i>Tubing</i>	Deviasi Standar Metode Iterasi - Struktur Mikro	Deviasi Standar <i>Stress Rupture</i> - Struktur Mikro	Deviasi Standar Metode Ketebalan – Struktur Mikro
7	0.08	0.22	0.27
8	0.11	0.25	0.25
9	0.15	0.26	0.30
10	0.26	0.34	0.38
11	0.13	0.25	0.30
12	0.16	0.28	0.32

Kurva *strees rupture* dengan parameter tegangan dan temperatur konstan serta kurva analisa perhitungan sisa umur pakai berdasarkan pengurangan ketebalan, memiliki deviasi standar yang lebih besar, hal ini disebabkan estimasi tersebut berdasarkan parameter operasi yang konstan dan hanya memperhitungkan erosi dengan *corrosion rate*. Metode iterasi memiliki deviasi standar yang terkecil dibandingkan metode lainnya.

Dengan membandingkan Gambar 4.25 dan 4.26, maka perbedaan hasil mikro struktur dengan hasil iterasi pada saat *life fraction* iterasi mendekati $t/tr = 1$, adalah seperti Tabel 4.14 berikut.

Tebal 4.14. Perbedaan *Life Fraction* Mikrostruktur dengan Hasil Iterasi

Posisi <i>Tubing</i>	Perbedaan
7	-0.187
8	-0.232
9	-0.053
10	-0.003
11	-0.027
12	-0.020

Pada Tabel 4.14 diatas, tampak bahwa posisi *tubing* yang lurus (posisi no.9 – 12) memiliki nilai perbedaan yang lebih kecil. Dari data tabel 4.12, posisi *tubing* lurus juga memiliki R^2 yang lebih mendekati 1(satu). Sehingga metode iterasi lebih akurat pada posisi *tubing* yang lurus. Dengan demikian metode iterasi pada posisi *tubing* yang lurus dapat digunakan sebagai estimasi sisa umur pakai *tubing* boiler.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Metode iterasi umur sisa dengan simulasi perhitungan faktor perubahan *hoop stress*, *strees rupture* aktual, dan iterasi parameter spesifik data pada boiler PLTU telah berhasil dilakukan. Metode iterasi tersebut telah dibandingkan dengan metode penentuan sisa umur pakai berdasarkan ketebalan *tubing*, analisa struktur mikro, dan *stress rupture* yang konstan. Nilai deviasi standar metode iterasi terhadap analisa struktur mikro adalah lebih kecil dibandingkan metode lainnya, yaitu 0,13 – 0,26. Metode iterasi ini lebih akurat untuk *tubing* dengan bentuk lurus, dimana faktor erosi bukan penyebab kegagalan dominan. Persamaan *sigma life fraction* untuk *tubing* berbentuk lurus direpresentasikan dengan persamaan *mode 3* (tiga), $Y = 8.10^{-6} X + 0,0039$ dengan nilai $R^2 = 0,9985$. Sehingga metode iterasi merupakan metode yang lebih akurat dibandingkan metode *stress rupture* dan pengukuran pengurangan ketebalan. Selain lebih akurat, metode ini juga lebih mudah dan lebih efisien dalam memprediksi sisa umur pakai *tubing*. Dengan demikian metode iterasi dapat digunakan dalam *assessment* umur sisa *tubing* boiler *secondary superheater* pada posisi *tubing* yang lurus.

1.2 Saran

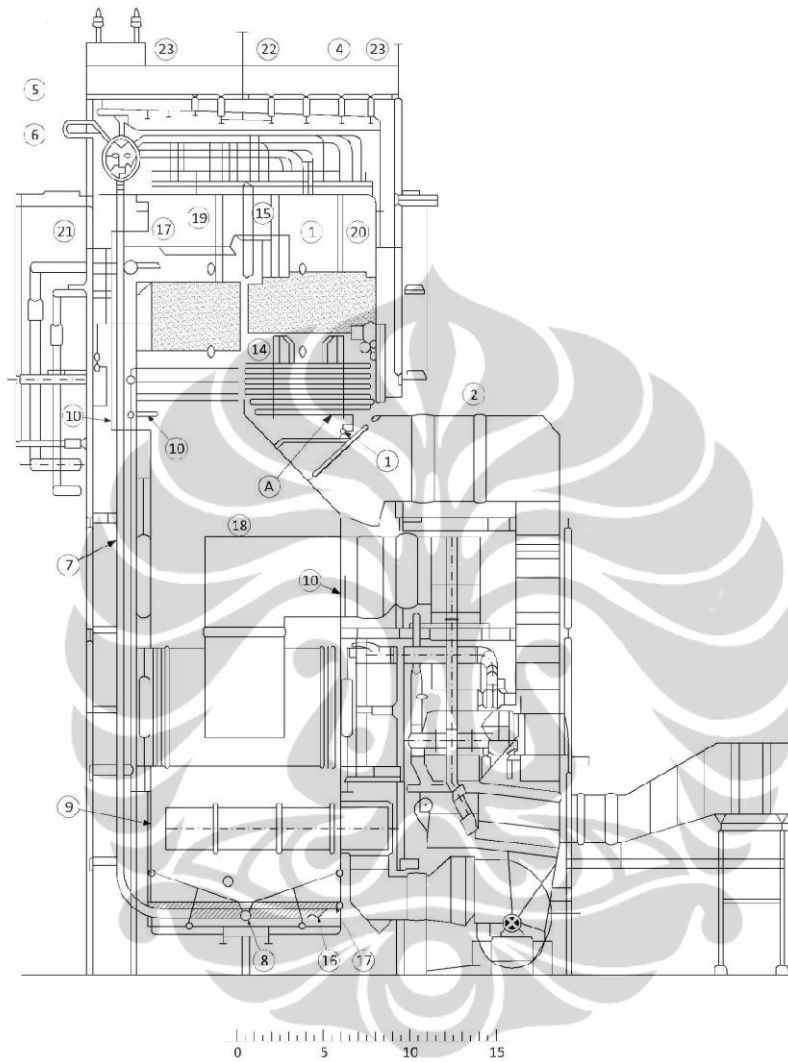
1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh erosi dan korosi pada sisi luar *tubing*.
2. Perlu dilakukan analisa lanjut mengenai *creep* dan pembentukan kavitasasi pada beberapa mikrostruktur awal dan komposisi kimia yang berbeda pada material A213-T22.
3. Perlu penelitian lanjut untuk bagian *tubing* boiler yang lain dimana mekanisme *creep* bukan menjadi mekanisme kerusakan yang dominan.
4. Perlu membandingkan deviasi metode iterasi dengan berbagai jenis material dan kasus.

DAFTAR REFERENSI

- Ankit, Kumar (2008). Remaining creep life assesment techniques based on creep cavitation modeling. *Journal of Nondestructive Testing*. India.
- API RP 530 (2003). *Calculation of heater tube thickness in petroleum refineries*, 3rd ed. Washington, D.C. : American Petroleum Institute.
- ASTM E139-96 (1997). *Standard test methods for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials*. USA: ASTM Committee.
- ASTM A213. (1999). *Standard specification for seamless ferritic and austenitic alloy-steel boiler, superheater, and heat-exchanger tubes*. USA: ASTM Committee.
- Bhadeshia, H.K.D.H. (1998). *Ferritic power plant steels: Remanent life assesment and the approach to equilibrium*. London : National Power & ALSTOM Energy.
- Cane, B.J. & Shamma, M.S. (1984). *A Method for remanent life estimation by quantitative assesment of creep cavitation on plant*. United Kingdom : Report TPRD/L/2645/N84, Central Electricity Generating Board of U.K.
- Chadhuri, S. & Ghosh, R.N. (2008). Creep behavior of 2.25Cr-1Mo steel-effects of thermal ageing and pre-strain. *Journal of Materials Science and Engineering*, A510-511, 136-141.
- Chubu Electric Power (2008). *Thermal efficiency improvement of existing thermal power plants in foreign countries*. Nopember 10, 2011. www.resourcesaver.com
- Dieter, G.E. (1992). *Metallurgy mekanik*, 3rd Edition (Sriati Djaprie, Penerjemah). Jakarta: Erlangga.
- ECCC Recommendation (2005). *Residual life assesment and microstructure*. Italy : European Creep Collaborative Committee .

- French, N. (1992). *Metallurgical failures in fossil fired boiler*. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Furtado, H.C. & May, I.L. (2004) High temperature degradation in power plants and refineries. *Journal of Materials Research*, Vol.7,No.1,1 103-110.
- Furtado, H.C. & May, I.L. (1996). *Metallography in life assesment of power plants*. Elsevier Science.
- Hikam, M. (2005). *Training singkat menjalankan EXPGUI – GSAS* . Program Studi Material Science FMIPA-UI.
- Holman, J.P. (1986). *Heat Transfer 6th edition*. Singapore: Mc Graw Hill.
- Joas, H.D. (2006). *Metallographic replicas and creep-strain-measurement for lifetime-assessment at high-temperature components*. Germany : TUV Industrie Service.
- Kassner, M.E., & Prado, M.T.P. (2004). *Fundamental of creep in metal and alloy*. Netherland : Elsevier
- Marder, A.R. (1989). *Replication microscopy techniques for NDT*. ASM Handbook Volume 17.
- Masduky, Yudi. (2002). *Risk management book series I: Analisa umur pakai sisten pemipaan produksi minyak dan gas*. Jakarta.
- Purbolaksono, J. (2009). Iterative technique and finite element simulation for supplemental condition monitoring of water-tube boiler. *Journal of Simulation ModellingPractice and Theory*,17, 897-910.
- Viswanathan, R. (1993). *Damage mechanisme and life assesment of high temperature components*. Ohio: ASM International.

Lampiran 1: Desain Boiler

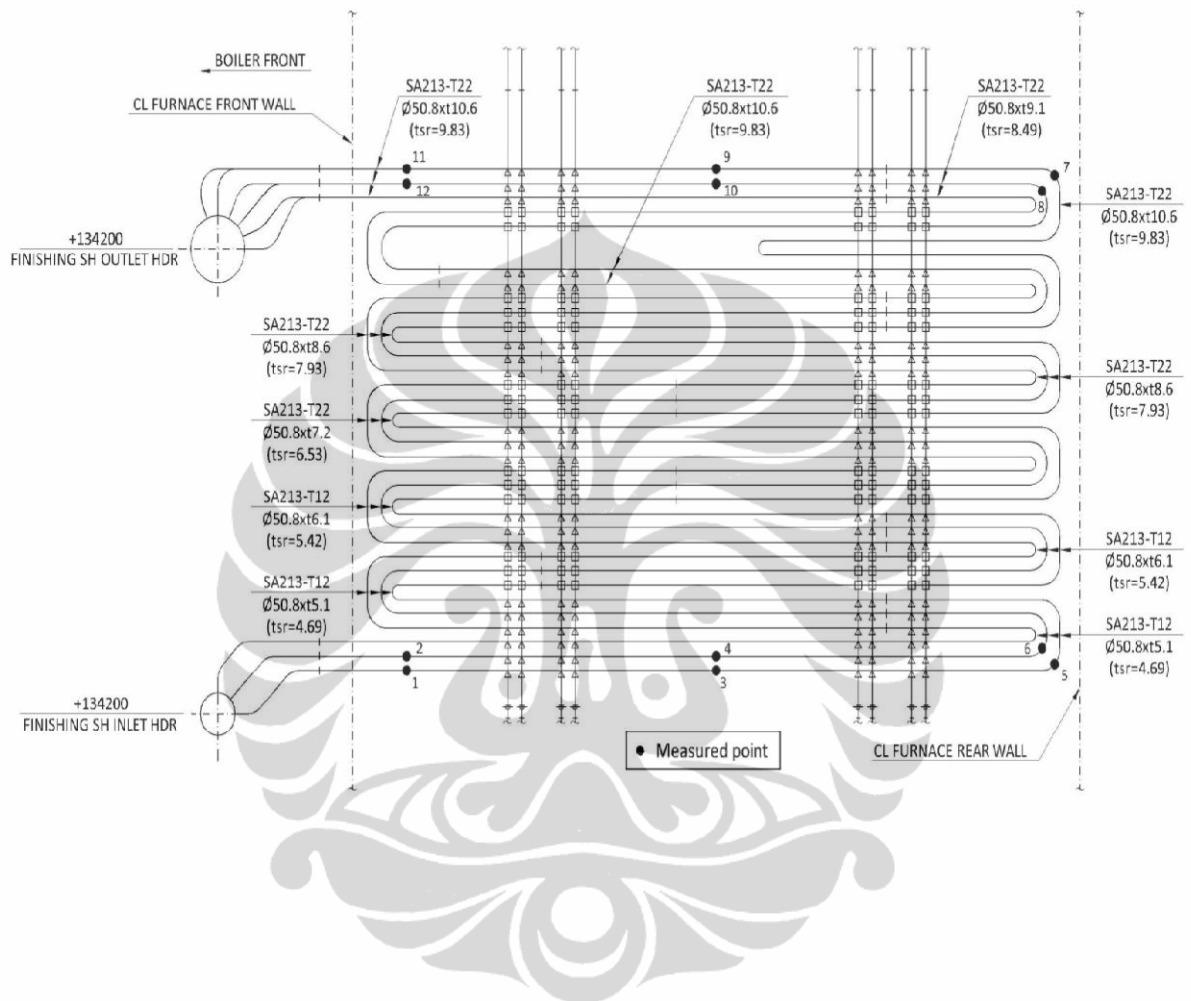


Desain Boiler

Bagian-bagian Utama Boiler

No	Description
1	Economiser Inlet Header
2	Spirally Finned Economiser
3	Economiser Hanger
4	Economiser Outlet Header
5	Drum Inlet Feed Water Connection
6	Steam Drum
7	Down Corner
8	Furnace Front & Rear Wall Lower Header
9	Furnace Front Wall Tube
10	Hanger Part of Furnace Front Wall Tube

Lampiran 2: Posisi Pengukuran Ketebalan Tubing *Secondary Superheater*



Lampiran 3 : *Steam Properties dan Flue Gas Properties*

Element	dc; outer dia. (m)	Thickness (m)	μ_g flue gas viscosity (Kg/m s)	W_g Gas flow (kg/jam)	N_w Number of tube wide	S_t Transverse pitch (m)	L Tube length (m)	G Gas mass velocity (kg/m ² .jam)	Reynold Number (flue gas)	cg; specific heat (J/kg.C)	kg; thermal conductivity of flue gas (W/m.C)	Prandtl Number (flue gas)
Secondary SH	0.0508	0.0106	0.0418	805000	54	0.153	10	147688.4	4.154793	3153	0.041	3219.62
Secondary SH	0.0508	0.0051	0.0418	805000	54	0.153	10	147688.4	4.154793	3153	0.041	3219.62
Finishing R-	0.0381	0.0025	0.0418	805000	54	0.153	10	131364.2	2.771674	3153	0.041	3219.62

Element	U_s Steam Volume Flowrate ton/jam	di; inner diameter tube (m)	μ_s steam viscosity (Kg/m s)	Re; Reynold Number (steam)	cg; specific heat (J/kg.C)	kg; thermal conductivity of steam (W/m.C)	Pr; Prandtl Number (steam)	hg; flue Convection Coef (W/m ² .C)	hs; Steam Convection Coef (W/m ² .C)
Secondary SH	635000	0.0296	2.834	2680332589	2161	0.0504	101395.3	107.5744	2508.738
Secondary SH	635000	0.0326	2.834	2433730694	2161	0.0504	101395.3	107.5744	2152.655
Finishing RH	545000	0.0311	2.834	2190106618	2161	0.0504	101395.3	112.921	2112.436




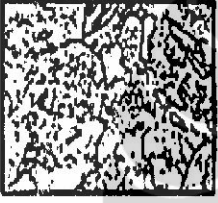


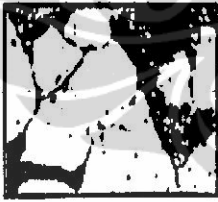
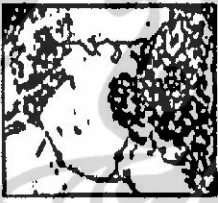
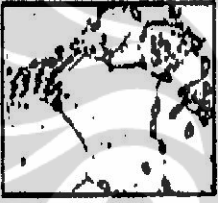

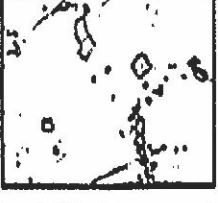

Lampiran 4 : Material Properties dan Material Maksimum Temperature

Alloy	ASME	Min tensile strength, ksi	Min yield strength, ksi	Composition (%)							
				C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
Ferritic Steel	SA 213 T22	60	30	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025 Max.	0.025 Max.	0.5 Max.	-	1.90-2.60	0.87-1.13

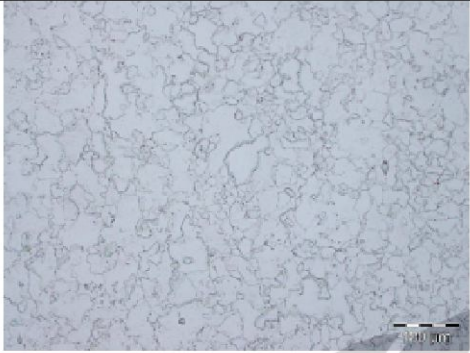
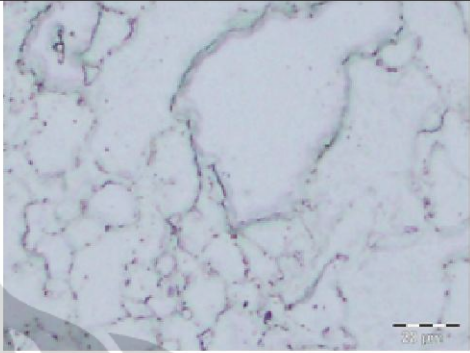

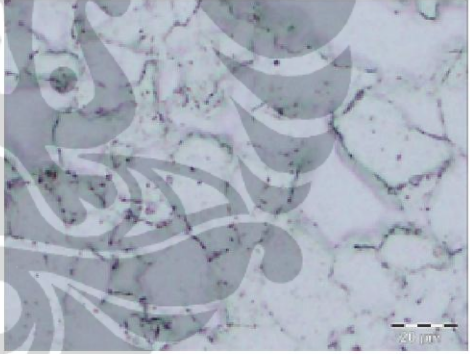
Tube Type	Tensile Strength, ksi [Mpa]	Yield Strength, ksi [Mpa]	Elongation, %
ASME SA 213 T22	60 [415]	30 [205]	Min. 30
Belum Beroperasi	475	337	33,7

Tube Type	ASME	Maks Temp (°C)
Cr – Mo	SA 213 T22	649

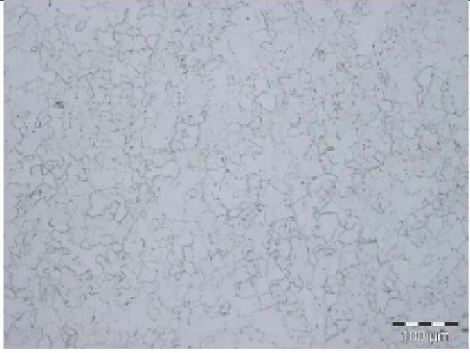
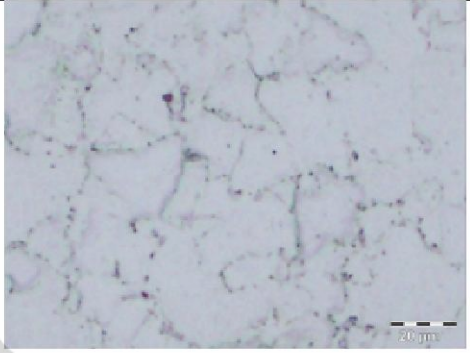
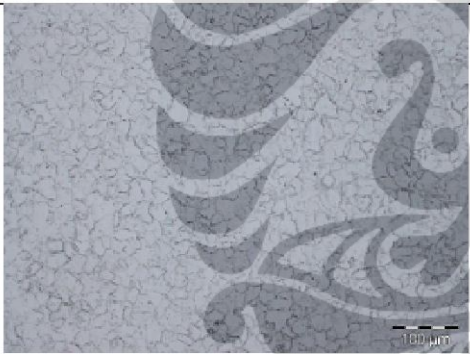
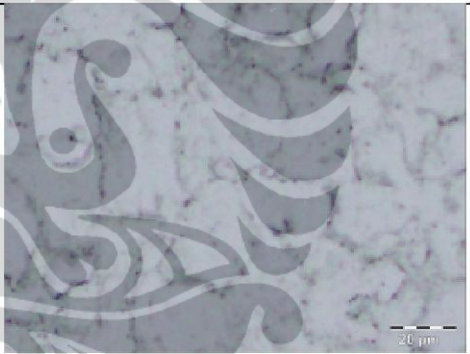
Lampiran 5 : Klasifikasi Stadium Kerusakan Struktur Mikro

		A		B		C		D		E		F	
Ferrite/ Bainite		0 %		20 %		40 %		60 %		80 %		End Of Life	None
		100 %		80 %		60 %		40 %		20 %		None	
Ferrite/ Pearlite		No Creep Defect, Ferrite and distinct transformation product	Incipient Spheroidisation and isolated carbide precipitation, notably at grain boundaries	Reinspection after Approx. 100,000 service hours	Evident Spheroidisation of transformation product. Ferrite and transformation product easily distinguishable	Reinspection after Approx. 50,000 service hours	Full Spheroidisation of transformation product. No significant carbide precipitation within ferrite grains	Reinspection after Approx. 35,000 service hours	Full Spheroidisation. Carbides evenly dispersed throughout grains and at grain boundaries	Reinspection after Approx. 10,000 service hours	Full Spheroidisation. Significant coalescence between carbides	Management must be informed immediately grinding to determine crack depth	
		None											
Class/Stadium		A	B	C	D	E	F						
Approx. Damage		0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	End Of Life						
Approx. Life Remaining		100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	None						
Nature		No Creep Defect, Ferrite and distinct transformation product	Incipient Spheroidisation and isolated carbide precipitation, notably at grain boundaries	Evident Spheroidisation of transformation product. Ferrite and transformation product easily distinguishable	Full Spheroidisation of transformation product. No significant carbide precipitation within ferrite grains	Full Spheroidisation. Carbides evenly dispersed throughout grains and at grain boundaries	Full Spheroidisation. Significant coalescence between carbides						
Action		None	Reinspection after Approx. 100,000 service hours	Reinspection after Approx. 50,000 service hours	Reinspection after Approx. 35,000 service hours	Reinspection after Approx. 10,000 service hours	Management must be informed immediately grinding to determine crack depth						

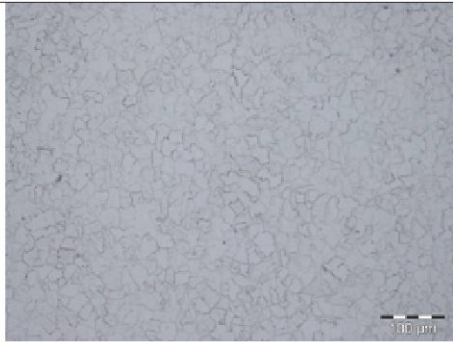
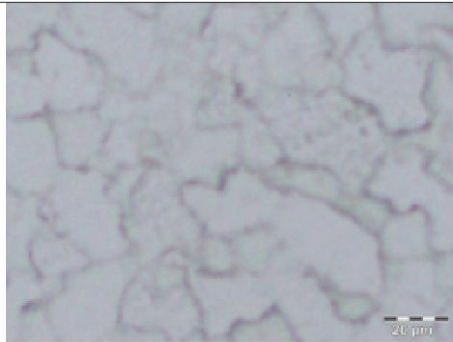
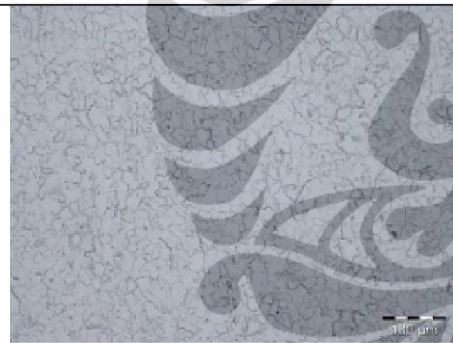
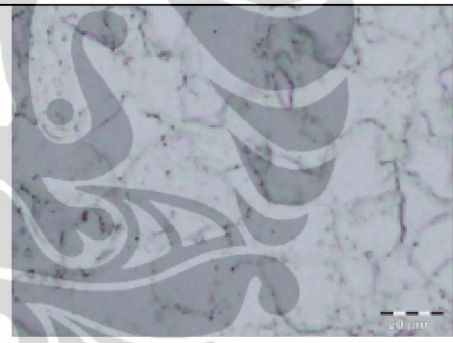
Lampiran 6 : Hasil Uji *Metalography* dengan Metode *Replica*

	
<p>Posisi No.7; <i>Tube No. 60</i></p> <p>Pemeriksaan In-situ metalografi <i>Tube Finishing Superheater, Downhand</i> ; Mikrostruktur terdiri dari <i>Feritte</i> dan <i>bainite</i> sudah tidak jelas; sferoidisasi merata pada <i>grain</i>; Tampak <i>carbide precipitation</i> pada <i>grain boundary</i> dan pada <i>grain</i>; Tampak adanya <i>oriented microcavities</i>.kondisinya stadium E. Nilai kekerasan 130 HV, etsa: Nital 5%</p>	
	
<p>Posisi No.8; <i>Tube No. 32</i></p> <p>Pemeriksaan In-situ metalografi <i>Tube Finishing Superheater, Downhand, No 32</i>; Mikrostruktur terdiri dari <i>Feritte</i> dan <i>bainite</i> sudah tidak jelas; sferoidisasi pada <i>grain</i>; Tampak <i>carbide precipitation</i> pada <i>grain boundary</i> dan pada <i>grain</i>; Tampak adanya <i>oriented microcavities</i>, kondisinya stadium E. Nilai kekerasan 123 HV, etsa: Nital 5%</p>	

(lanjutan)

	
<p>Posisi No.9; <i>Tube No. 60</i></p> <p>Pemeriksaan In-situ metalografi <i>Tube Finishing Superheater, Downhand, No 60</i>, Mikrostruktur terdiri dari <i>Feritte</i> dan <i>bainite</i> sudah tidak jelas; spheroidisasi merata pada <i>grain</i>; Tampak <i>carbide precipitation</i> pada <i>grain boundary</i> dan pada <i>grain</i>; Tampak adanya <i>oriented microcavities</i>, kondisinya stadium E. Nilai kekerasan 121 HV, etsa: Nital 5%</p>	
	
<p>Posisi No.10; <i>Tube No. 60</i></p> <p>Pemeriksaan In-situ metalografi <i>Tube Finishing SH, Downhand</i>, Mikrostruktur terdiri dari <i>Feritte</i> dan <i>bainite</i> sudah tidak jelas; spheroidisasi merata pada <i>grain</i>; Tampak <i>carbide precipitation</i> pada <i>grain boundary</i> dan pada <i>grain</i>; Tampak adanya <i>oriented microcavities</i>, kondisinya stadium E. Nilai kekerasan 111 HV, etsa: Nital 5%</p>	

(lanjutan)

	
<p>Posisi No.11; <i>Tube No. 32</i></p> <p>Pemeriksaan In-situ metalografi <i>Tube Finishing Superheater, Downhand</i>, Mikrostruktur terdiri dari <i>Feritte</i> dan <i>bainite</i> sebagian tidak jelas; sferoidisasi merata pada <i>grain</i>; Tampak <i>carbide precipitation</i> pada <i>grain boundary</i> dan sebagian kecil pada <i>grain</i>; Tampak adanya <i>oriented microcavities</i>, kondisinya stadium E. Nilai kekerasan 112 HV. etsa: Nital 8%</p>	
	
<p>Posisi No.12; <i>Tube No. 4</i></p> <p>Pemeriksaan In-situ metalografi <i>Tube Finishing Superheater, Downhand</i>, Mikrostruktur terdiri dari <i>Feritte</i> dan <i>bainite</i> sudah tidak jelas; sferoidisasi merata pada <i>grain</i>; Tampak <i>carbide precipitation</i> pada <i>grain boundary</i> dan pada <i>grain</i>; Tampak adanya <i>oriented microcavities</i>, kondisinya stadium E. Nilai kekerasan 108 HV, etsa: Nital 5%</p>	

(lanjutan)

	Posisi <i>Tube</i> No.7
	Posisi <i>Tube</i> No.9
	Posisi <i>Tube</i> No.10

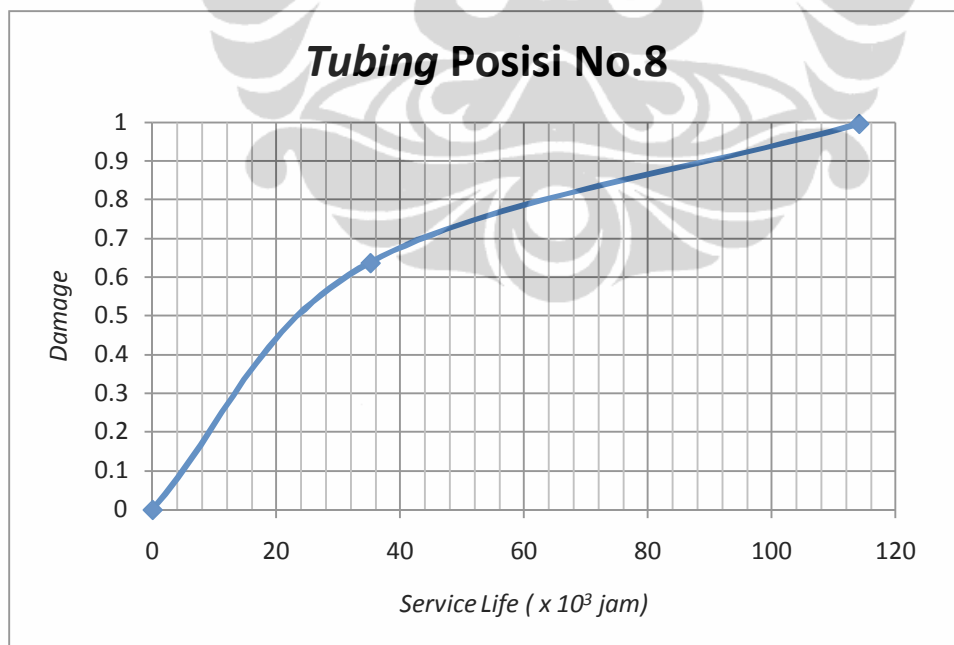
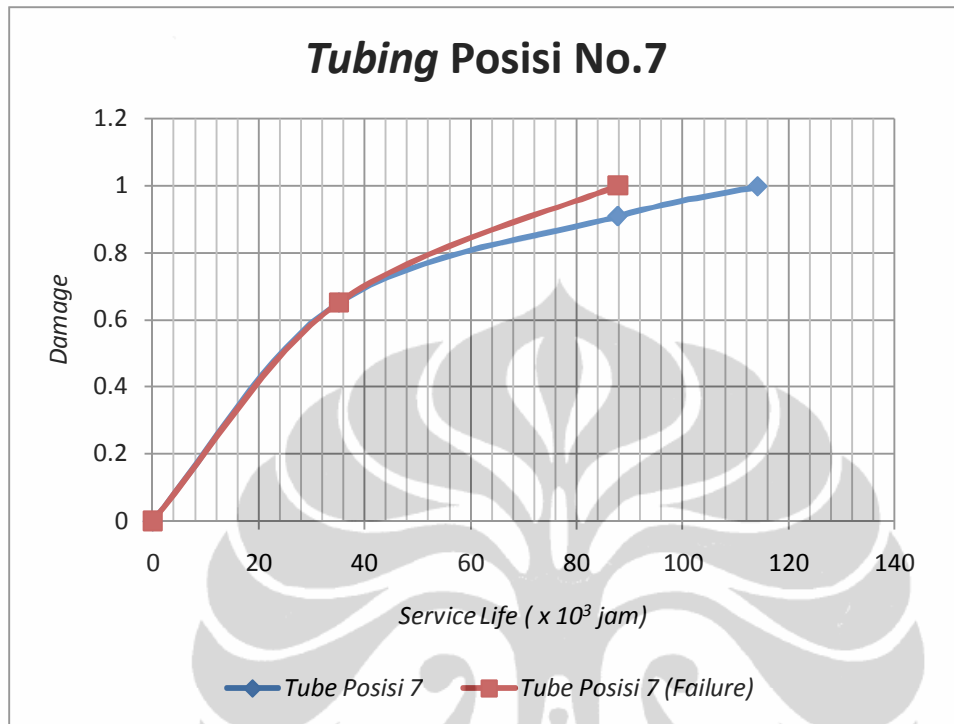
(lanjutan)

	Posisi <i>Tube</i> No.11
	Posisi <i>Tube</i> No.12

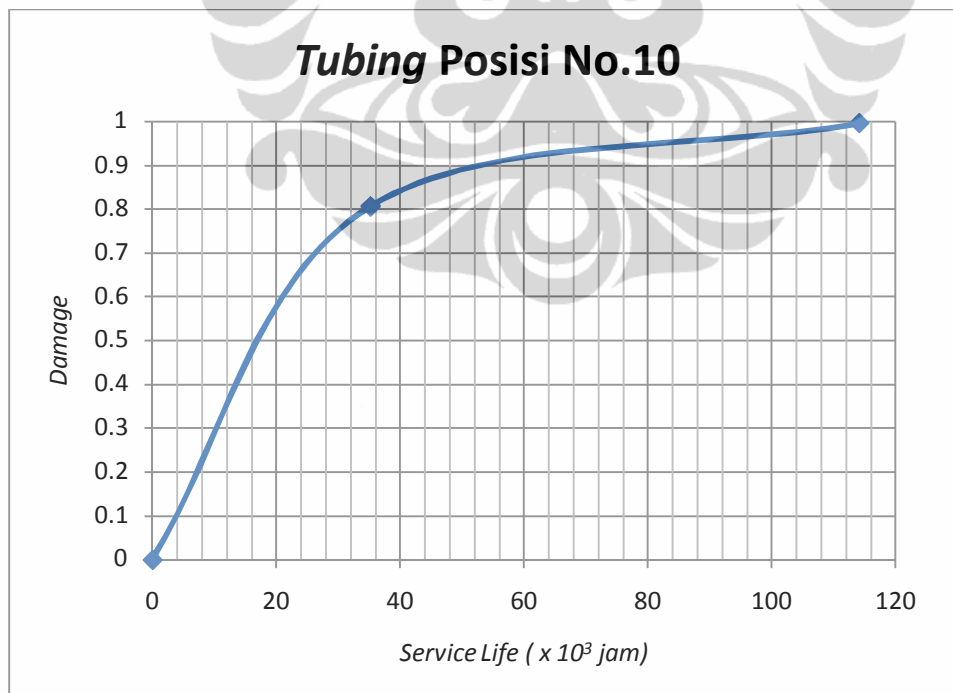
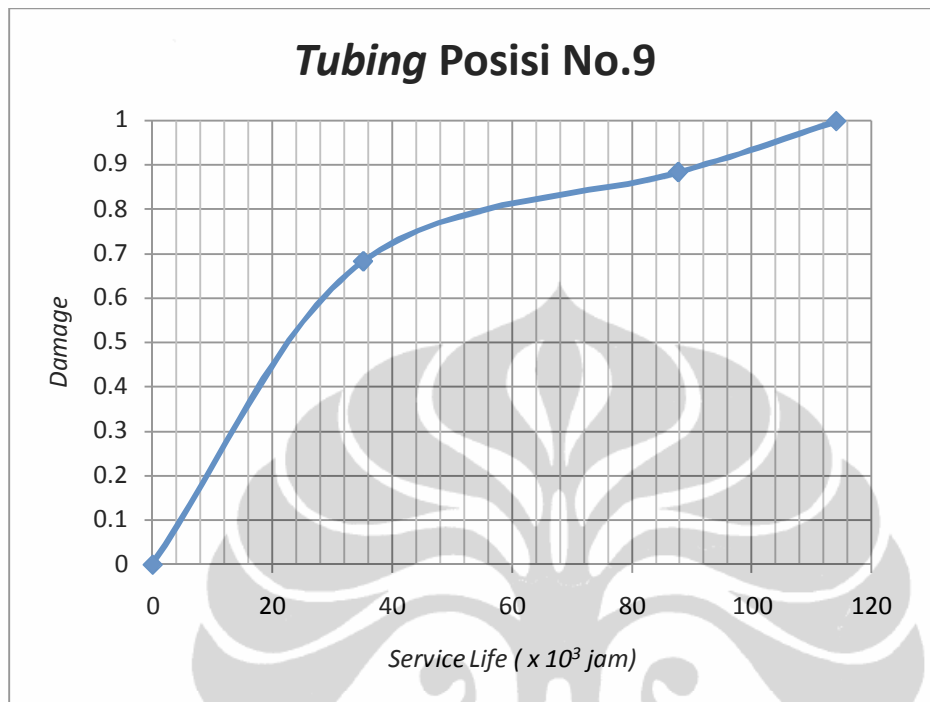
Lampiran 7. Perubahan Mikrostruktur terhadap *Service Life*

Posisi	t (jam)	NC	NT	A	t/tr
7	0	0	630	0.000	0.000
	35160	42	221	0.190	0.651
	87780	278	717	0.380	0.908
	114150	413	609	0.678	0.997
<i>7 failure</i>	87780	827	829	0.998	1.000
8	0	0	679	0.000	0.000
	35160	41	223	0.184	0.638
	114150	493	679	0.678	0.997
9	0	0	721	0.000	0.000
	35160	52	253	0.206	0.683
	87780	200	565	0.350	0.884
	114150	464	639	0.726	0.998
10	0	0	669	0.000	0.000
	35160	45	227	0.280	0.807
	114150	448	674	0.665	0.996
11	0	0	683	0.000	0.000
	35160	34	229	0.148	0.552
	87780	247	716	0.345	0.879
	114150	467	684	0.500	0.969
12	0	0	693	0.000	0.000
	35160	42	232	0.181	0.632
	87780	256	713	0.359	0.892
	114150	467	684	0.683	0.997

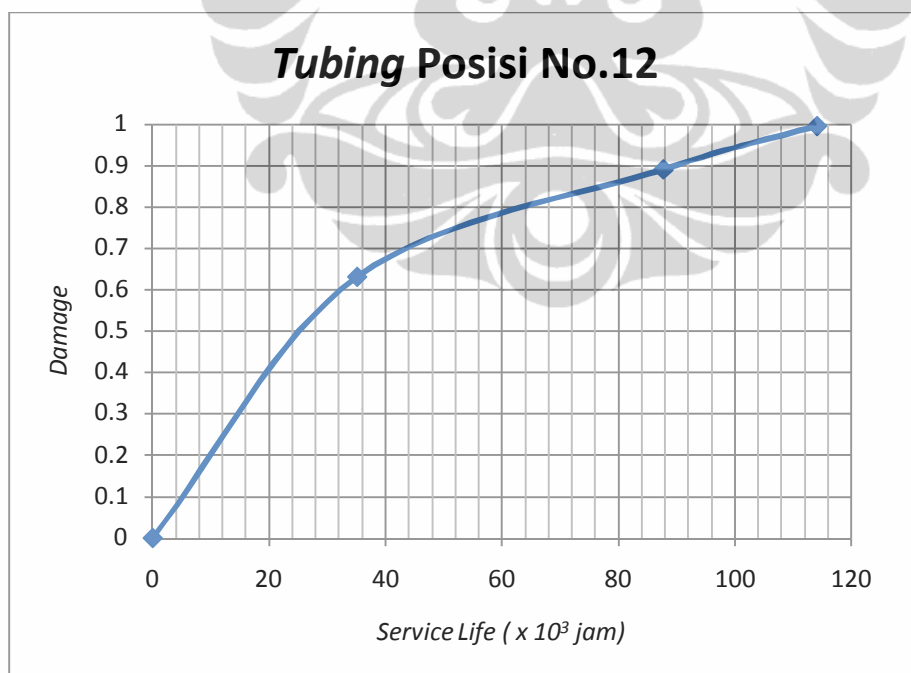
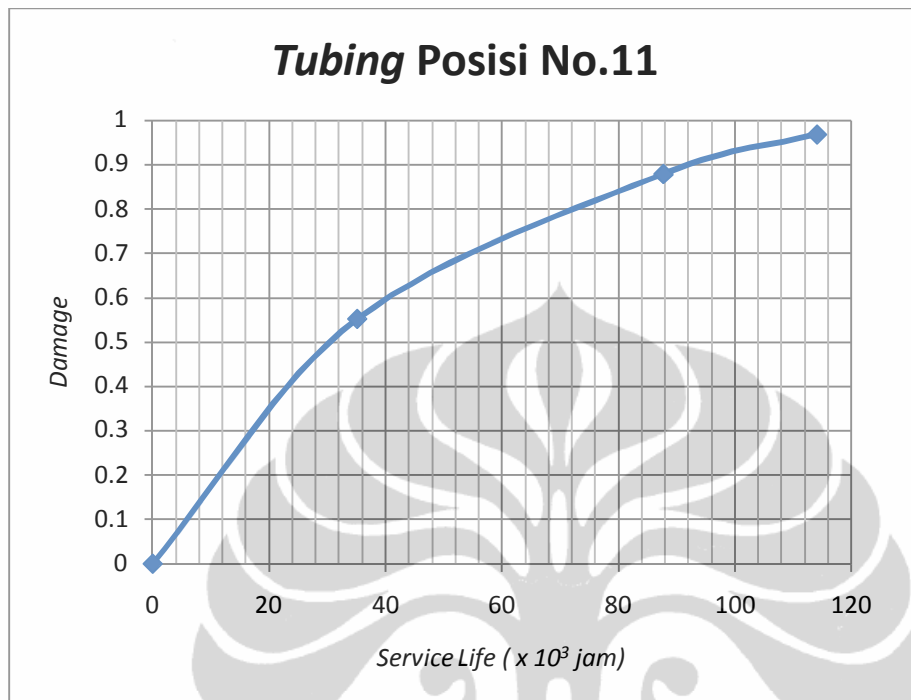
(lanjutan)



(lanjutan)



(lanjutan)



Lampiran 8. Hasil *Rupture Test*

No Sampel	Luas (mm ²)	Beban Uji (kgf)	Beban Aktual (N)	Tegangan (N/mm ²)	Temp. °C	Waktu patah (jam)
1	24.62	25	3675	149.28	570	41.1
2	25.50	23	3381	132.56	570	79.9
3	25.50	23	3381	132.56	600	7.6
4	25.50	23	3381	132.56	620	5.5
5	26.41	21	3087	116.90	640	5.5
6	25.50	23	3381	132.56	590	18.5
7	20.42	16	2352	115.19	640	1.6
8	19.63	13	1975	100.62	640	4.1
9	19.63	10	1519	77.40	640	40.7
10	19.63	6	911	46.44	640	184.9

Lampiran 9 : Hasil XRD

File: MAGNETIT.DI

20-oct-2011

13:35

=====
Materials Science
software

PC-APD, Diffraction

Sample identification: magnetit
Data measured at: 20-oct-2011 12:09:00

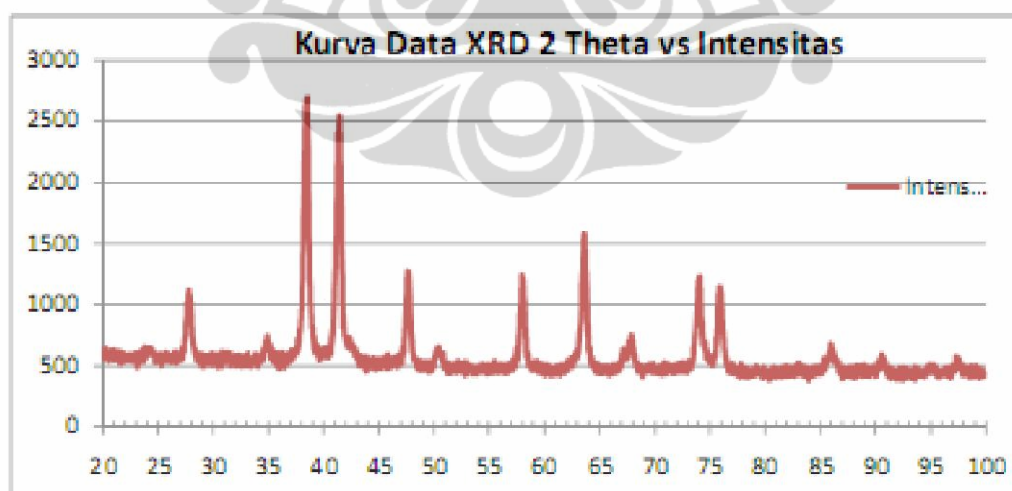
Diffraction type: PW3710 BASED
Tube anode: Co
Generator tension [kV]: 40
Generator current [mA]: 30
Wavelength Alpha1 [\AA]: 1.78896
Wavelength Alpha2 [\AA]: 1.79285
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: 1/4 ϕ
Receiving slit: 0.2
Monochromator used: NO

Start angle [2θ]: 20.010
End angle [2θ]: 99.970
Step size [2θ]: 0.020
Maximum intensity: 2116.000
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS

Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 19

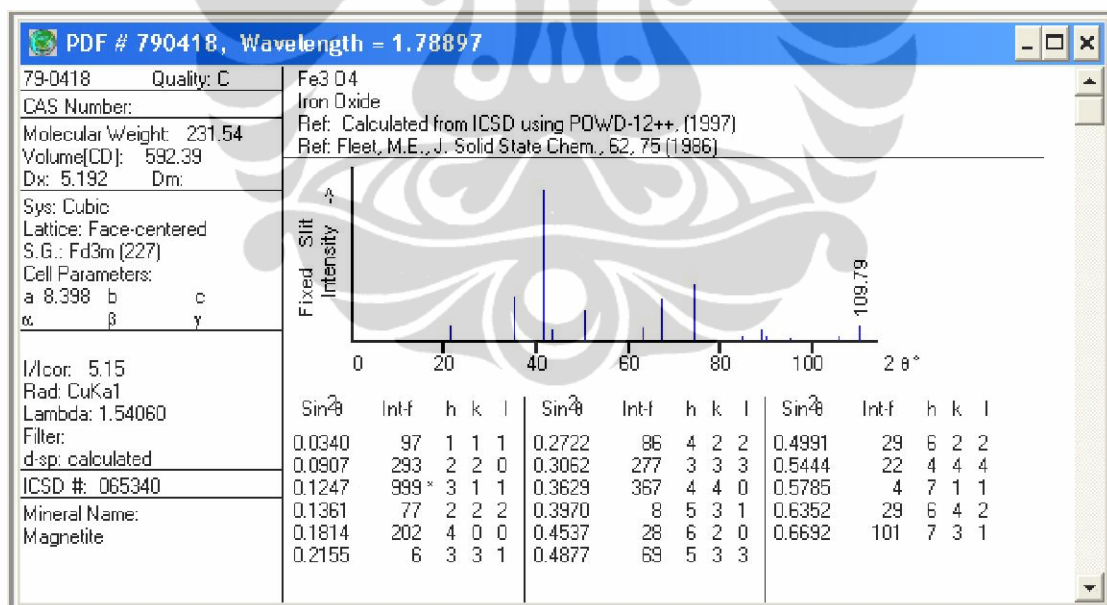
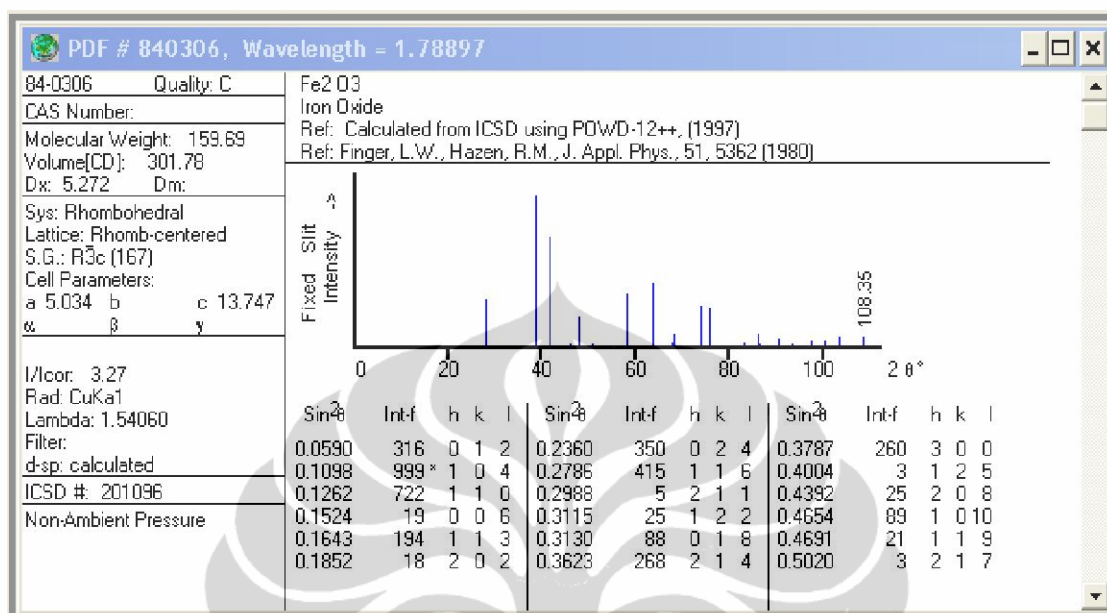
(lanjutan)

Angle [2θ]	d-value λ_1 []	d-value λ_2 []	Peak width [2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
24.450	4.2242	4.2334	0.480	56	562	2.7	1.78
27.830	3.7195	3.7276	0.440	515	557	24.4	14.97
34.885	2.9841	2.9906	0.400	159	543	7.5	2.69
38.490	2.7138	2.7197	0.100	2116	576	100.0	1.26
41.260	2.5387	2.5443	0.100	1608	586	76.0	0.88
47.595	2.2168	2.2216	0.160	751	511	35.5	2.50
50.295	2.1049	2.1095	0.480	130	488	6.1	3.38
57.995	1.8452	1.8492	0.100	740	480	35.0	1.02
63.630	1.6967	1.7004	0.100	1102	484	52.1	1.10
67.190	1.6166	1.6201	0.200	156	462	7.4	0.92
67.905	1.6016	1.6050	0.400	213	462	10.1	4.15
69.500	1.5693	1.5727	0.640	21	462	1.0	0.83
74.045	1.4855	1.4888	0.320	697	480	32.9	9.49
75.825	1.4557	1.4589	0.360	595	467	28.1	11.84
83.025	1.3496	1.3525	0.480	42	445	2.0	1.24
85.940	1.3123	1.3151	0.120	216	445	10.2	0.94
90.620	1.2582	1.2609	0.560	96	445	4.5	3.77
95.050	1.2127	1.2154	0.640	37	437	1.8	1.25
97.420	1.1905	1.1930	0.640	67	437	3.2	2.11



Kurva 2 Theta vs Intensitas (sumbu x = 2 theta, sumbu y = Intensitas)

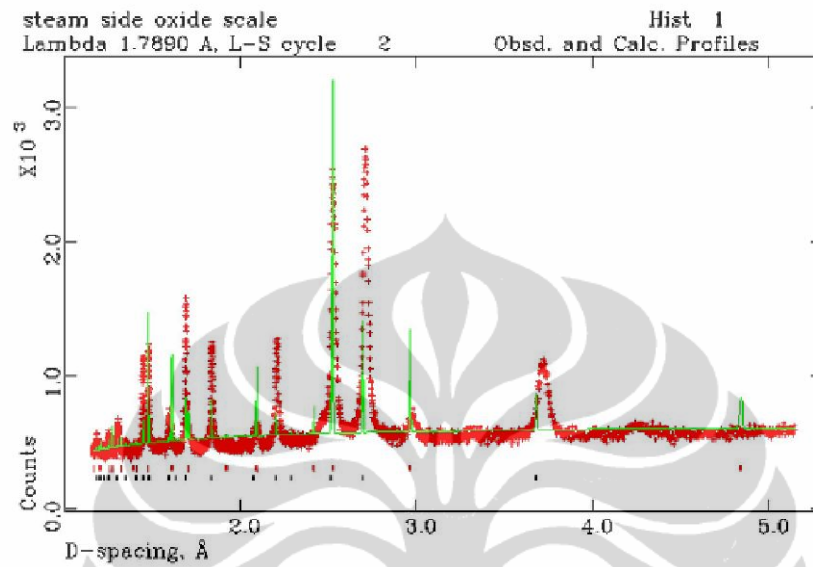
Lampiran 10 : Data PCPDF-WIN



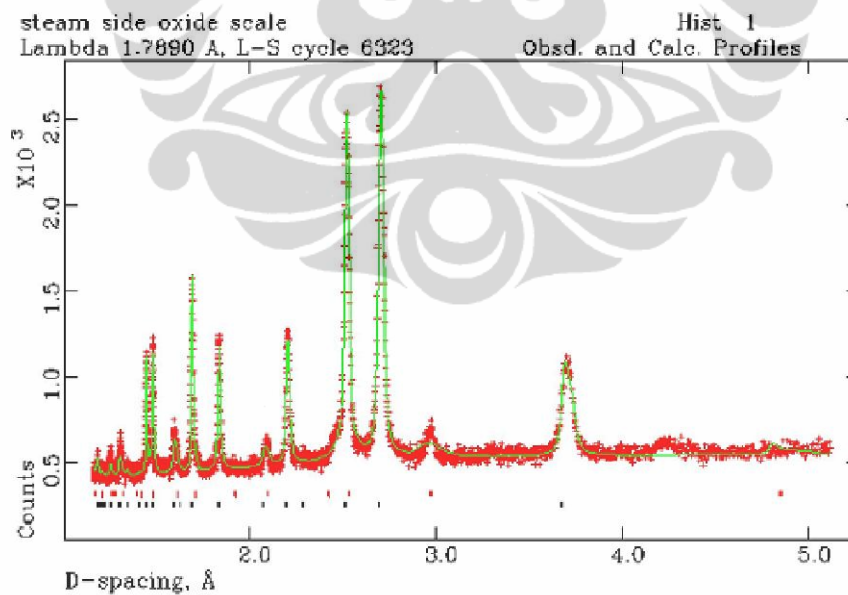
Lampiran 11: Perbandingan Data XRD dengan ICDD

DATA XRD										DATA ICDD					
No	Angle [2θ]	d-obs		d-obs a_2 [\AA]	Peak width [2θ]	Peak int [counts]	Signif.	d-ref [\AA]	Fasa	No Kartu	h	k	l	Diff (d-ref - d-obs)	
		a_1 [\AA]	a_2 [\AA]												
1	24.45	4.2242	4.2334	0.48	56	1.78								4.22	
2	27.83	3.7195	3.7276	0.44	515	14.97								3.72	
3	34.885	2.9841	2.9906	0.4	159	2.69	2.97009	Fe ₂ O ₃	790418	2	2	0		0.01	
4	38.49	2.7138	2.7197	0.1	2116	1.26	2.69943	Fe ₃ O ₄	840306	1	0	4		0.01	
5	41.25	2.5387	2.5443	0.1	1608	0.88	2.53303	Fe ₂ O ₃	790418	3	1	1		0.01	
6	47.595	2.2168	2.2216	0.16	751	2.5								2.22	
7	50.295	2.1049	2.1095	0.48	130	3.38	2.10017	Fe ₂ O ₃	790418	4	0	0		0.00	
8	57.995	1.8452	1.8492	0.1	740	1.02	1.84127	Fe ₃ O ₄	840306	0	2	4		0.00	
9	63.63	1.6967	1.7004	0.1	1102	1.1	1.69466	Fe ₃ O ₄	840306	1	1	5		0.00	
10	67.19	1.6165	1.6201	0.2	156	0.92	1.61648	Fe ₂ O ₃	790418	3	3	3		0.00	
11	67.905	1.6015	1.605	0.4	213	4.15	1.60267	Fe ₃ O ₄	840306	1	2	2		0.00	
12	69.5	1.5693	1.5727	0.64	21	0.83								1.57	
13	74.045	1.4855	1.4888	0.32	697	9.49	1.48607	Fe ₃ O ₄	840306	2	1	4		0.00	
14	75.825	1.4557	1.4589	0.36	595	11.84	1.45353	Fe ₃ O ₄	840306	3	0	0		0.00	
15	83.025	1.3495	1.3525	0.48	42	1.24								1.35	
16	85.94	1.3123	1.3151	0.12	216	0.94	1.31117	Fe ₃ O ₄	840306	1	0	10		0.00	
17	90.62	1.2582	1.2609	0.56	96	3.77	1.26247	Fe ₃ O ₄	840306	2	1	7		0.00	
18	95.05	1.2127	1.2154	0.64	37	1.25	1.21231	Fe ₂ O ₃	790418	4	4	4		0.00	
19	97.42	1.1905	1.193	0.64	67	2.11								1.19	

Lampiran 12 : Data Hasil Analisis GSAS

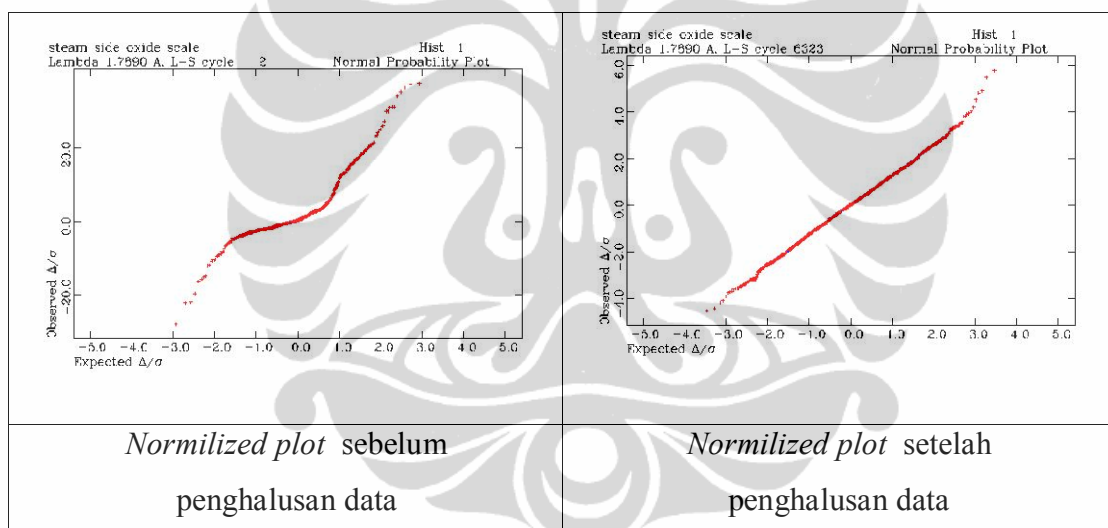
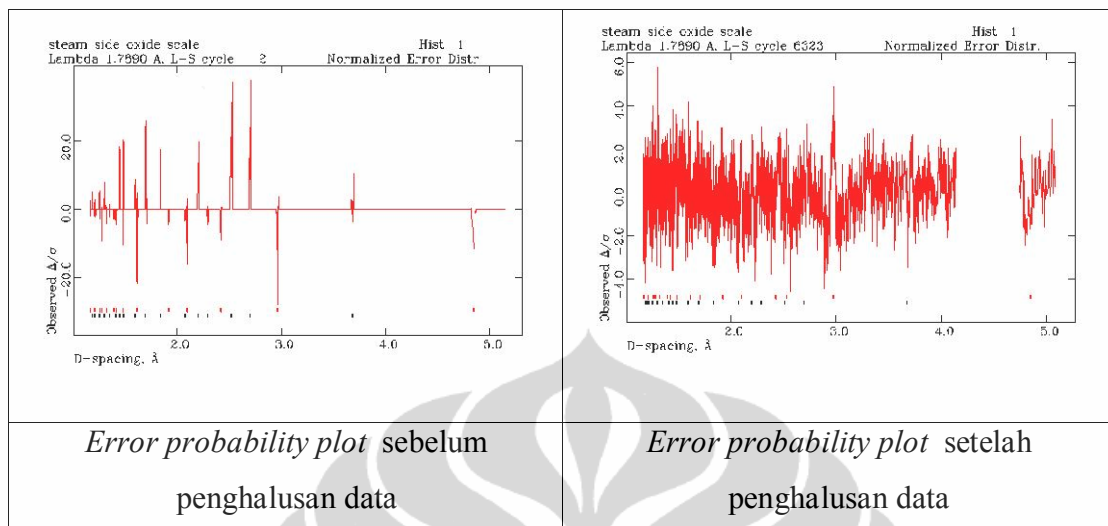


Grafik Awal Sebelum Penghalusan Data



Grafik Akhir Setelah Penghalusan Data

(lanjutan)



Parameter Kisi dan Space Group dari ICDD

ID	Chemical Name	Chemical Formula	Sys	Space Group	A	B	C	α	β	γ
840306	Hematite	Fe_2O_3	R	R 3- c (167)	5.034	5.034	13.747	90	90	120
790418	Magnetite	Fe_3O_4	C	F d3 m (227)	8.398	8.398	8.398	90	90	90

Lampiran 13 : Hasil Perhitungan Metode Iterasi

Mode 1

Iteration Step	Total Service Life (jam)	Total Service Life (tahun)	t_i ; Increment Life (jam)	t_r ; Rupture Time (jam)	t_r ; Rupture Time (tahun)	Sigma Fraksi	Thickness (mm)	σ ; Hoop Stress (ksi)	LMP (A213T22)
Initial Step	1	0.00	249	184045	21.01	0.0000	10.90	4.64	37.38
1	250	0.03	250	165252	18.86	0.0015	10.88	4.64	37.38
2	500	0.06	500	159762	18.24	0.0046	10.87	4.65	37.38
3	1000	0.11	1500	153086	17.48	0.0144	10.86	4.65	37.38
4	2500	0.29	2500	142152	16.23	0.0320	10.85	4.66	37.37
5	5000	0.57	5000	132022	15.07	0.0699	10.83	4.67	37.37
6	10000	1.14	10000	120177	13.72	0.1531	10.81	4.67	37.37
7	20000	2.28	20000	106594	12.17	0.3407	10.78	4.69	37.36
8	40000	4.57	20000	91409	10.43	0.5595	10.75	4.70	37.36
9	60000	6.85	20000	81803	9.34	0.8040	10.72	4.71	37.36
10	80000	9.13	20000	74742	8.53	1.0716	10.70	4.72	37.35

Iteration Step	Q ; Heat Flow (W)	T_{gas} ; Gas Temp. (deg C)	T_3 ; Outer Temp. (deg C)	T_2 ; Inter Temp. (deg C)	T_1 ; Inner Temp. (deg C)	T_s ; Steam Temp. (deg C)	T_{avg} ; Average Temp. (deg C)
Initial Step	25150	800	567.08	556.76	556.76	540	561.92
1	24992	800	568.54	558.32	556.66	540	563.43
2	24942	800	569.00	558.80	556.63	540	563.90
3	24880	800	569.58	559.42	556.58	540	564.50
4	24771	800	570.58	560.49	556.51	540	565.54
5	24662	800	571.59	561.57	556.44	540	566.58
6	24523	800	572.88	562.93	556.35	540	567.90
7	24346	800	574.52	564.68	556.23	540	569.60
8	24118	800	576.63	566.93	556.08	540	571.78
9	23953	800	578.16	568.56	555.97	540	573.36
10	23818	800	579.41	569.88	555.88	540	574.65

(lanjutan)

Mode 2

Iteration Step	Total Service Life (jam)	Total Service Life (tahun)	t_i ; Increment Life (jam)	t_r ; Rupture Time (jam)	t_r ; Rupture Time (tahun)	Sigma Fraksi	Thickness (mm)	σ ; Hoop Stress (ksi)	LMP (A213T22)
Initial Step	1	0.00	249	146519	16.73	0.0000	9.30	5.4328	37.13
1	250	0.03	250	132999	15.18	0.0019	9.28	5.4455	37.12
2	500	0.06	500	129037	14.73	0.0058	9.27	5.4494	37.12
3	1000	0.11	1500	124205	14.18	0.0178	9.26	5.4545	37.12
4	2500	0.29	2500	116251	13.27	0.0393	9.25	5.4634	37.12
5	5000	0.57	5000	108836	12.42	0.0853	9.23	5.4724	37.12
6	10000	1.14	10000	100100	11.43	0.1852	9.21	5.4839	37.11
7	20000	2.28	20000	89983	10.27	0.4074	9.19	5.4989	37.11
8	40000	4.57	20000	78523	8.96	0.6622	9.16	5.5186	37.10
9	60000	6.85	20000	71190	8.13	0.9431	9.13	5.5330	37.10
10	80000	9.13	20000	65751	7.51	1.2473	9.11	5.5450	37.09

Iteration Step	Q; Heat Flow (W)	T _{gas} ; Gas Temp. (deg C)	T ₃ ; Outer Temp. (deg C)	T ₂ ; Inter Temp. (deg C)	T ₁ ; Inner Temp. (deg C)	T _s ; Steam Temp. (deg C)	T _{avg} ; Average Temp. (deg C)
Initial Step	25499	800	563.84	555.33	555.33	540	559.59
1	25359	800	565.14	556.70	555.25	540	560.92
2	25316	800	565.54	557.12	555.22	540	561.33
3	25261	800	566.05	557.66	555.19	540	561.86
4	25165	800	566.94	558.60	555.13	540	562.77
5	25070	800	567.82	559.53	555.08	540	563.67
6	24948	800	568.94	560.71	555.00	540	564.83
7	24794	800	570.38	562.22	554.91	540	566.30
8	24595	800	572.21	564.16	554.79	540	568.19
9	24452	800	573.54	565.56	554.70	540	569.55
10	24336	800	574.61	566.70	554.63	540	570.65

(lanjutan)

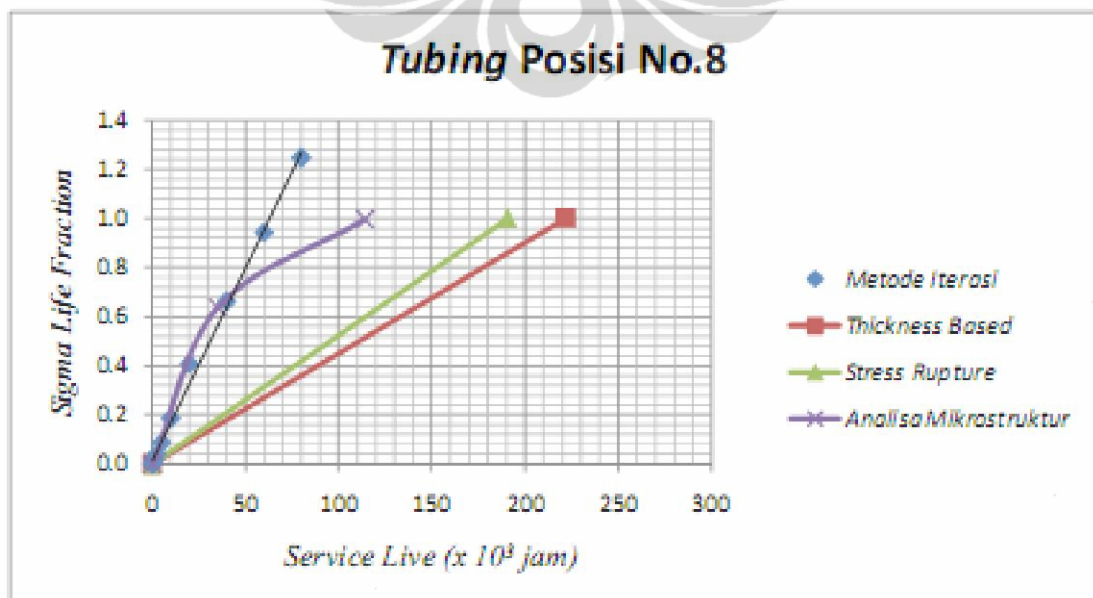
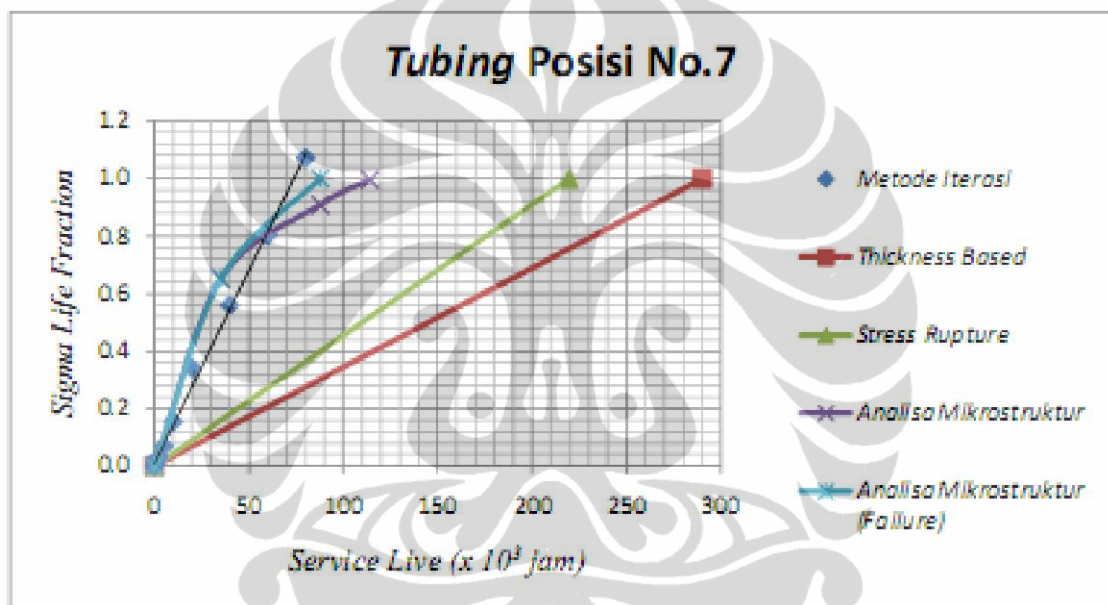
Mode 3

Iteration Step	Total Service Life (jam)	Total Service Life (tahun)	t_i ; Increment Life (jam)	t_r ; Rupture Time (jam)	t_r ; Rupture Time (tahun)	Sigma Fraksi	Thickness (mm)	σ ; Hoop Stress (ksi)	LMP (A213T22)
Initial Step	1	0.00	249	297958	34.01	0.0000	10.90	3.65	37.69
1	250	0.03	250	267291	30.51	0.0009	10.88	3.66	37.69
2	500	0.06	500	258337	29.49	0.0029	10.87	3.66	37.69
3	1000	0.11	1500	247452	28.25	0.0089	10.86	3.67	37.69
4	2500	0.29	2500	229636	26.21	0.0198	10.85	3.67	37.69
5	5000	0.57	5000	213139	24.33	0.0433	10.83	3.68	37.69
6	10000	1.14	10000	193862	22.13	0.0949	10.81	3.69	37.68
7	20000	2.28	20000	171777	19.61	0.2113	10.78	3.70	37.68
8	40000	4.57	20000	147116	16.79	0.3472	10.75	3.72	37.67
9	60000	6.85	20000	131532	15.02	0.4993	10.72	3.73	37.67
10	80000	9.13	20000	120088	13.71	0.6658	10.70	3.74	37.67
11	100000	11.42	20000	111058	12.68	0.8459	10.68	3.75	37.66
12	120000	13.70	20000	103618	11.83	1.0389	10.66	3.75	37.66

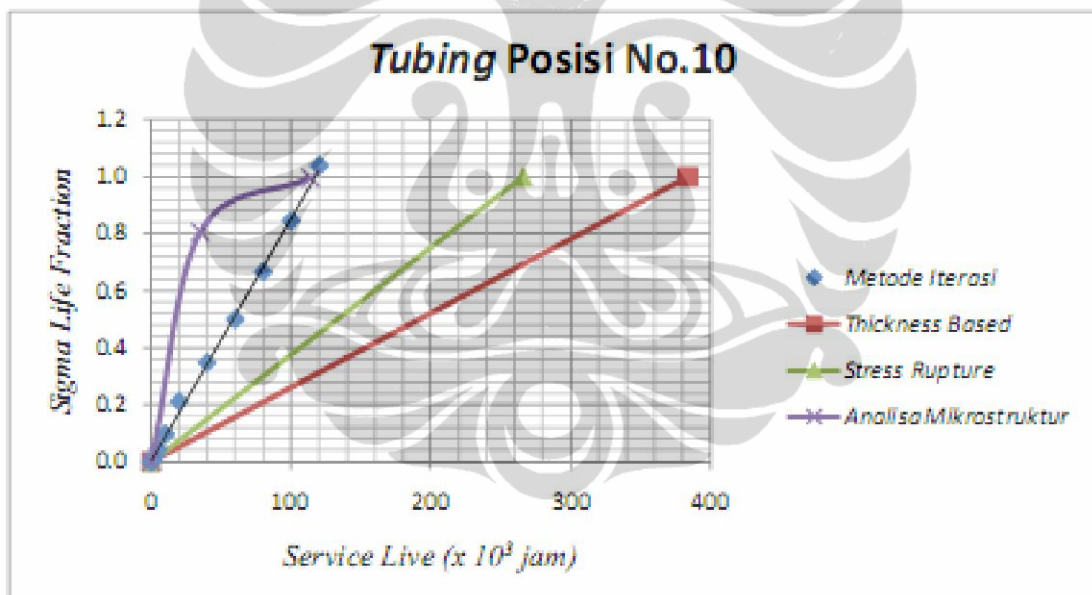
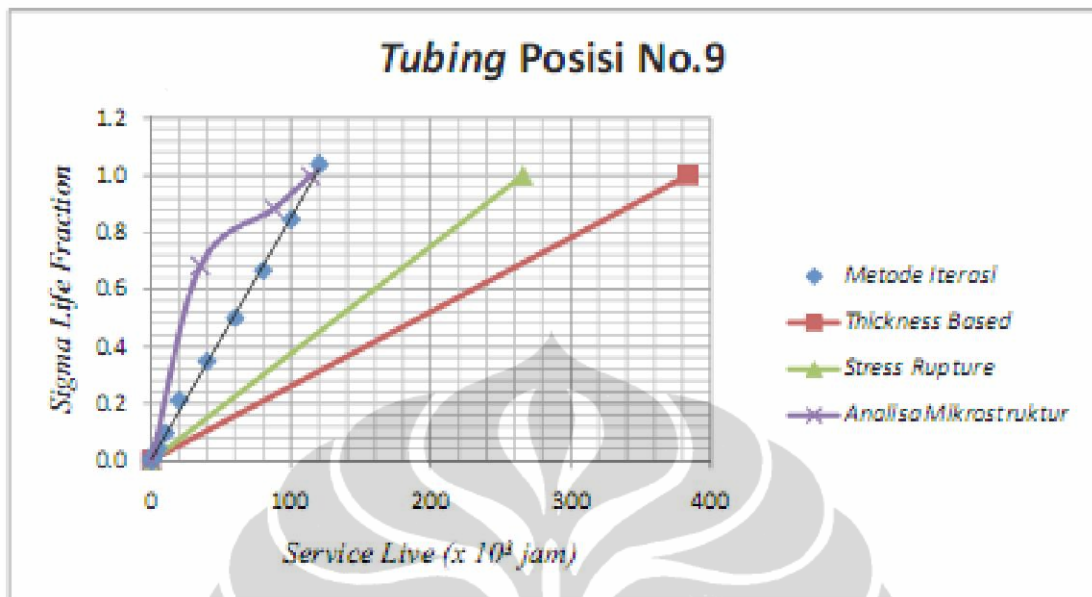
Iteration Step	Q ; Heat Flow (W)	T_{gas} ; Gas Temp. (deg C)	T_3 ; Outer Temp. (deg C)	T_2 ; Inter Temp. (deg C)	T_1 ; Inner Temp. (deg C)	T_s ; Steam Temp. (deg C)	T_{avg} ; Average Temp. (deg C)
Initial Step	25150	800	567.08	556.76	556.76	540	561.92
1	24992	800	568.54	558.32	556.66	540	563.43
2	24942	800	569.00	558.80	556.63	540	563.90
3	24880	800	569.58	559.42	556.58	540	564.50
4	24771	800	570.58	560.49	556.51	540	565.54
5	24662	800	571.59	561.57	556.44	540	566.58
6	24523	800	572.88	562.93	556.35	540	567.90
7	24346	800	574.52	564.68	556.23	540	569.60
8	24118	800	576.63	566.93	556.08	540	571.78
9	23953	800	578.16	568.56	555.97	540	573.36
10	23818	800	579.41	569.88	555.88	540	574.65
11	23702	800	580.49	571.03	555.80	540	575.76
12	23599	800	581.44	572.04	555.73	540	576.74

Lampiran 14 : Hasil Perbandingan Analisa Mikrostruktur, Metode Iterasi,
Thickness Based dan *Stress Rupture*

Service Life (jam)	Tube Posisi 7	Tube Posisi 7 (Failure)	Tube Posisi 8	Tube Posisi 9	Tube Posisi 10	Tube Posisi 11	Tube Posisi 12
0	0	0	0	0	0	0	0
35160	0.651	0.651	0.638	0.683	0.807	0.552	0.632
87780	0.908	1.000		0.884		0.879	0.892
114150	0.997		0.997	0.998	0.996	0.969	0.997



(lanjutan)



(lanjutan)

