



INSTITUT TEKNOLOGI PLN

PROYEK SKRIPSI

**PAPER REVIEW PEMILIHAN MATERIAL
BERDASARKAN SIFAT CREEP DAN OKSIDASI UNTUK
TUBE BOILER ULTRA-SUPERCRITICAL**

DISUSUN OLEH :

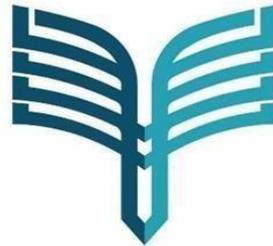
[PETER MARSELINUS BATUBARA]

NIM : [2016-12-002]

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI BISNIS DAN ENERGI
INSTITUT TEKNOLOGI PLN
JAKARTA 2021**

**PAPER REVIEW PEMILIHAN MATERIAL
BERDASARKAN SIFAT CREEP DAN OKSIDASI UNTUK
TUBE BOILER ULTRA-SUPERCRITICAL**

PROYEK SKRIPSI



INSTITUT TEKNOLOGI PLN

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Guna Memperoleh Gelar
Sarjana Strata Satu Teknik Mesin

Disusun Oleh :
[PETER MARSELINUS BATUBARA]
NIM : **[2016-12-002]**

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI BISNIS DAN ENERGI
INSTITUT TEKNOLOGI PLN
JAKARTA 2021**

PERNYATAAN KEASLIAN PROYEK SKRIPSI

Nama : Peter Marselinus Batubara
NIM : 2016 – 12 – 002
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas : Teknologi dan Bisnis Energi
Judul Proyek Skripsi : Paper Review Pemilihan Material Berdasarkan Sifat Creep dan Oksidasi Untuk Tube Boiler Ultra-Supercritical

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam proyek skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar Sarjana baik di lingkungan Institut Teknologi PLN maupun di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar Pustaka. Pernyataan ini dibuat dengan penuh kesadaran dan rasa tanggung jawab serta bersedia memikul segala resiko jika ternyata pernyataan ini tidak benar.

Jakarta, 29 Januari 2021



(Peter Marselinus Batubara)

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

PROYEK SKRIPSI

**PAPER REVIEW PEMILIHAN MATERIAL BERDASARKAN
SIFAT CREEP DAN OKSIDASI UNTUK TUBE BOILER ULTRA-
SUPERCRITICAL**

Disusun Oleh :

**[PETER MARSELINUS BATUBARA]
NIM : [2016-12-002]**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI BISNIS DAN ENERGI
INSTITUT TEKNOLOGI PLN
JAKARTA, 2021**

Mengetahui,

Kepala Program Studi

Roswati Nurhasanah S.T.,M.T

Dosen Pembimbing

Digitally
signed by
Martin Fatah
Date:
2021.03.06
17:21:19
+07'00'



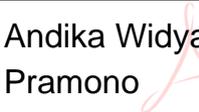
Martin Choirul Fatah S.T.,M.Sc.,PhD

LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI SKRIPSI

Nama : Peter Marselinus Batubara
 NIM : 2016-12-002
 Fakultas / Prodi : Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi / S1 Teknik Mesin
 Judul Skripsi : Paper Review Pemilihan Material Berdasarkan Sifat Creep dan Oksidasi Untuk Tube Boiler Ultra-Supercritical

Telah disidangkan dan dinyatakan Lulus Sidang Skripsi pada Program Sarjana Strata 1, Program Studi S1 Teknik Mesin Institut Teknik – PLN pada tanggal 27 Februari 2021

TIM PENGUJI

Nama Penguji	Jabatan	Tanda Tangan
Andika Widya Pramono, Prof. Dr. Ing	Ketua	 Digitally signed by Andika Widya Pramono Date: 2021.03.09 15:57:12 +07'00'
Prayudi, Drs, M.M, M.T	Sekretaris	 Prayudi C=D, OU=Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi, O=Institut Teknologi PLN, CN=Prayudi, E=prayudi@itpln.ac.id Jakarta 2021-03-14 06:02:34
Nofirman, S.T, M.Sc	Anggota	 Digitally signed by Nofirman DN: C=ID, O=ITPLN, CN=Nofirman, E=nofirman@itpln.ac.id Reason: I am approving this document Location: Jatibening Date: 2021-03-09 16:56:57 Foxit Reader Version: 10.0.1
Martin Choirul Fatah, S.T, M.Sc., Ph.D.	Pembimbing	 Digitally signed by Martin Fatah Date: 2021.03.09 14:04:49 +07'00'

Mengetahui
 Kepala Program Studi
 S1 Teknik Mesin

Roswati Nurhasanah, S.T., M.T.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan ini saya menyampaikan penghargaan dan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat :

**(Martin Choirul Fatah S.T.,M.Sc.,PhD) Selaku Dosen Pembimbing
Utama**

Yang telah memberikan petunjuk, saran-saran serta bimbingannya sehingga Proyek Skripsi ini dapat diselesaikan.

Jakarta, 29 Januari 2021

**Peter
Marselin
us
Batubara**

Digitally signed by Peter
Marselinus Batubara
DN: C=ID, CN=Peter
Marselinus Batubara,
E=petermarselinus8@gmail.
com
Reason: I am the author of
this document
Location: your signing
location here
Date: 2021.03.06 05:56:
31-05'00'
Foxit Reader Version: 10.1.1

Peter Marselinus Batubara

NIM : 2016-12-002

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI PROYEK SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Institut Teknologi – PLN, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Peter Marselinus Batubara
NIM : 2016-12-002
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas : Teknologi dan Bisnis Energi
Jenis Karya : **Proyek Skripsi**

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Institut Teknologi – PLN **Hak Bebas Royalti Non eksklusif (Non – exclusive Royalty Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

PAPER REVIEW PEMILIHAN MATERIAL BERDASARKAN SIFAT CREEP DAN OKSIDASI UNTUK TUBE BOILER ULTRA-SUPERCritical

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non eksklusif ini Institut Teknologi – PLN berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan **Proyek Skripsi** 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 : 29 Januari 2021

Yang menyatakan,

Peter Marselinus Batubara
Digitally signed by Peter Marselinus Batubara
DN: C=ID, CN=Peter Marselinus Batubara, E=petermarselinus8@gmail.com
Reason: I am the author of this document
Location: your signing location here
Date: 2021.03.06 05:56:03+05'00'
Foxit Reader Version: 10.1.1

(Peter Marselinus Batubara)

PAPER REVIEW PEMILIHAN MATERIAL BERDASARKAN SIFAT CREEP DAN OKSIDASI UNTUK TUBE BOILER ULTRA-SUPERCritical

[Peter Marselinus Batubara], [2016-12-002]

dibawah bimbingan [Martin Choirul Fatah S.T.,M.Sc.,PhD]

ABSTRAK

Karena banyaknya kebutuhan listrik saat ini sehingga pembangkit yang saat ini belum bisa mencukupi kebutuhan listrik oleh karena itu maka perlu dikembangkan sebuah pembangkit listrik *ultra-supercritical* yang memerlukan pengembangan juga pada material baja yang akan digunakan terutama pada tube boiler dari pembangkit *ultra-supercritical*. Skripsi ini membahas tentang pemilihan material yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* yang mampu beroperasi pada kondisi suhu tinggi diatas 700 °C. Material-material yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah baja dupleks dan austenite yang dilihat dari sifat creep dan oksidasi dari baja yang akan digunakan.. Data dan analisa yang penulis buat dalam skripsi ini didapatkan dengan melakukan analisa dari berbagai jurnal internasional dan sebagai kesimpulan, material baja dupleks dan austenite dapat diaplikasikan sebagai material tube boiler *ultra-supercritical*.

Kata kunci : (material, tube, boiler, *ultra-supercritical*)

PAPER REVIEW MATERIAL SELECTION FOR ULTRA-SUPERCRITICAL BOILER TUBES

[Peter Marselinus Batubara], [2016-12-002]

Under the Guidance of [Martin Choirul Fatah S.T.,M.Sc.,PhD]

ABSTRACT

Due to the large demand for electricity at this time so that the current generator cannot meet the electricity needs, it is necessary to the develop an Ultra-Supercritical power plant which also requires development of steel material which will be used especially in boiler tube from the Ultra-Supercritical plant. This project discusses the selection of materials to be used in an Ultra-Supercritical boiler tube that is capable of operating in high temperature condition above 700 °C. The materials that will be discussed in this thesis are duplex steel, austenite and ferrite which are seen from their forming properties and corrosion resistance of the steel to be used. The data and analysis that the author makes in this thesis are obtained by analyzing various international journals and as a conclusion, duplex steel and austenite can be applied as ultra-supercritical boiler tube materials.

Key word : (Material, tube, boiler, *ultra-supercritical*)

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN PROYEK SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
UCAPAN TERIMAKASIH	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI PROYEK SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	8
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
Latar Belakang	1
Permasalahan Penelitian	2
Identifikasi Masalah	2
Ruang Lingkup Masalah	2
Rumusan Masalah	2
Tujuan dan Manfaat Penelitian	2
Tujuan Penelitian	2
Manfaat Penelitian	3
Sistematika Penulisan	3
BAB II LANDASAN TEORI	5
Tinjauan Pustaka	5
Boiler Ultra-Supercritical	12
Baja	14
Baja Dupleks	15
Baja Austenit	16
Baja Ferrit	16
Karakteristik Material Baja	17
Perlakuan Panas pada Baja	19
Klasifikasi Baja	20
Baja Karbon Tinggi	20
Baja Karbon Rendah	20
Baja Karbon Medium	21

Baja Paduan	21
Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja	22
Proses Hardening pada Baja Karbon Tinggi	25
Struktur Mikro.....	28
Metalografi.....	28
Scanning Electron Microscopy / SEM.....	31
Mulur / Creep.....	32
Pemilihan Paduan.....	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
Perancangan Penelitian	35
Diagram Alir Penelitian	35
Jenis Penelitian.....	36
Teknik Pengumpulan Data.....	36
Teknik Analisa Data.....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	38
Pemilihan Material Tube Boiler Ultra-SuperCritical	38
Baja Dupleks	42
4.1.3 Baja Austenite	
Sifat Material Baja	36
Sifat Creep.....	36
Sifat Oksidasi	42
Ringkasan.....	54
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	66
5.1. Kesimpulan	66
2.2. Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Kandidat paduan	40
Tabel 4.2 Perbandingan komposisi nominal, standar dan sifat baja kekuatan tinggi	41
Tabel 4.3 Komposisi paduan HR6W dan Hayness 230	42
Tabel 4.4 Urutan kekuatan tahan creep di ekstrapolasi dalam 100.000 jam tekanan 100 MPa	50
Tabel 4.5 Perbandingan ketebalan scale dari beberapa material selama 3000 jam.....	61
Tabel 4.6 Ketebalan oksidasi sisi uap yang diukur dalam uji coba pabrik	62
Tabel 4.7 Perbandingan material baja dupleks dan austenite	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema PLTU supercritical	11
Gambar 2.2 Skema boiler ultra-supercritical	14
Gambar 2.3 Kekerasan baja BHN	16
Gambar 2.4 Skema efisiensi PLTU supercritical	17
Gambar 2.5 Tempering colors of steel	17
Gambar 2.6 Karakteristik material baja	19
Gambar 2.7 Skema perlakuan panas pada baja	20
Gambar 2.8 paduan pada baja	22
Gambar 2.9 Struktur paduan pada baja	25
Gambar 2.10 Diagram keseimbangan Fe-Fe ₃ C	26
Gambar 2.11 Kurva pada diagram TTT (Time Temperature Transformation).....	27
Gambar 2.12 Struktur mikro	28
Gambar 2.13 Struktur mikro paduan karbon rendah.....	31
Gambar 2.14 Alat scanning (SEM).....	32
Gambar 2.15 Grafik hasil percobaan mulur	33
Gambar 2.16 Unsur yang terdapat pada baja karbon	34
Gambar 4.1 kondisi uap pembangkit di jepang.....	39
Gambar 4.2 tegangan yang diijinkan untuk berbagai kelas paduan.....	44
Gambar 4.3 Umur pecah baja austenite dalam 100.000 jam (ekstrapolasi berdasarkan data hingga 20.000 jam).....	45
Gambar 4.4 Umur pecah pipa dan pelat bahan nikel dalam 100.000 jam (ekstrapolasi berdasarkan data hingga 23.000 jam).....	46
Gambar 4.5 Pegukuran regangan hoop pada HR6W dan Hayness 230.....	47
Gambar 4.6 Suhu permulaan rekristalisasi saat pekerjaan dingin HR6W dan Hayness 230	47
Gambar 4.7 Kurva waktu pecah dalam suhu 775 C pada HR6W dan Hayness 230.....	48
Gambar 4.8 Sifat retak creep SUPER 304H	49
Gambar 4.9 Ekstrapolasi kekuatan pecah 100.000 jam baja HR6W dan SUPER 304H..	50
Gambar 4.10 Kehilangan berat sampel setelah oksidasi sisi uap pada kondisi suhu 800 C	

dalam waktu 1000 jam	51
Gambar 4.11 hubungan berat korosi dan suhu.....	52
Gambar 4.12 Perilaku penambahan berat dalam kondisi suhu 600 dan 700	53
Gambar 4.13 Plot arrehnius Kp diukur pada tekanan 2 dan 10 MPa atau dibawah 2% .	54
Gambar 4.14 Laju pertumbuhan oksidasi uap Kp terhadap suhu	55
Gambar 4.15 Kp di plot sebagai tekanan dalam suhu 600 dan 700	56
Gambar 4.16 Hubungan penurunan berat korosi dan kandungan Cr	56
Gambar 4.17 Ketergantungan material konstanta laju oksidasi, Kp untuk kondisi suhu 600 dan 700	57
Gambar 4.18 Perkiraan ketebalan oksida dari berbagai paduan tabung yang dibuat dengan menggunakan literature dan koefisien paduan yang diturunkan dari lapangan	58
Gambar 4.19 Perbandingan ketebalan skala total untuk kandidat paduan boiler A pembangkit listrik ultra-supercritical	59
Gambar 4.20 Hasil uji oksidasi laboratorium dari baja tahan karat austenitik butiran halus dan butiran pucat pada kondisi suhu 750 C	60
Gambar 4.21 Kandungan laju oksidasi uap ntuk berbagai baja boiler.....	60

BAB I

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Saat ini banyak pembangkit yang sedang melakukan pengembangan terhadap produksi energi listrik yang besar untuk memenuhi kebutuhan populasi manusia yang terus bertambah banyak. Oleh sebab itu, pada saat ini sedang dilakukan pengembangan terhadap pembangkit listrik *ultra-supercritical* yang dapat memproduksi lebih banyak energi listrik. Pada pembangkit *ultra-supercritical* ini dibutuhkan material-material yang tahan terhadap suhu dan tekanan yang tinggi karena untuk memproduksi listrik yang besar maka suhu dan tekanan pembakaran nya juga harus lebih tinggi.

Di seluruh dunia banyak pembangkit yang beroperasi pada kondisi uap 593 °C 1100 °F dan pada tekanan 27 Mpa dan ini biasanya untuk jangka pendek. Saat ini sedang dilakukan pengembangan pembangkit yang dapat beroperasi pada kondisi uap mencapai 700 °C (1300 °F) agar dapat mendukung rencana produksi listrik yang lebih besar dan pada jangka waktu yang lama dan diharapkan material yang dikembangkan pada pembangkit *ultra-supercritical* ini dapat digunakan semaksimal mungkin dan diaplikasikan pada pembangkit yang sedang beroperasi saat ini untuk meningkatkan keandalannya.

Boiler dengan parameter steam *ultra-supercritical* yang beroperasi pada kondisi uap antara 550 – 760 °C memerlukan pergantian penggunaan material yang dapat beroperasi pada kondisi uap yang lebih tinggi karena operasi yang akan berjalan pada pembangkit ini akan digunakan dalam jangka 15 - 20 tahun. Perkembangan dunia pembangkit ini masih terus berjalan terutama pada material baja yang digunakan dan keadaan tersebut mendorong dunia perindustrian untuk melakukan riset terhadap pemilihan material apa yang lebih tahan dan kuat

Peningkatan mutu pada material yang akan digunakan bisa dilihat dari sifat creep dan oksidasinya. Analisis pada penelitian yang telah dilakukan para peneliti ini dilakukan pada sifat creep dan oksidasinya baja tahan karat dupleks dan austenite yang dilakukan dengan langkah studi literatur, dan penarikan kesimpulan dari setiap jurnal yang digunakan pada penelitian ini.

Permasalahan Penelitian

Identifikasi Masalah

Pembangkit Listrik Tenaga Uap *subcritical* yang biasa beroperasi pada kondisi uap 500 °C akan dikembangkan agar dapat bertahan pada kondisi uap mencapai 700 °C dan karena itu, penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti khususnya pada material baja dupleks dan austenit diharapkan dapat menjadi material tube boiler *ultra-supercritical* yang dapat bertahan beroperasi pada kondisi suhu 700 °C

Ruang Lingkup Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Cara pemilihan material yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical*.
2. Material baja austenite sebagai pembanding terhadap baja dupleks pada tube boiler *ultra-supercritical*.
3. Tidak membahas cost dalam pemilihan material tube boiler *ultra-supercritical*.

Rumusan Masalah

Agar material-material yang telah diteliti oleh para peneliti dapat beroperasi pada kondisi uap yang tinggi maka dirumuskan permasalahan yang dibahas adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana cara pemilihan material yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* dilihat dari sifat creep dan oksidasinya ?
2. Bagaimana perbedaan dan perbandingannya jika dilihat dari material properties baja dupleks dan austenite yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* ?

Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah adalah sebagai berikut .:

1. Mengetahui material yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* dengan cara menganalisa sifat creep dan oksidasinya dari material baja dupleks dan austenite.
2. Mengetahui perbedaan dan perbandingan antara material baja dupleks dan austenite dengan cara menganalisa material properties masing-masing baja.

Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Penelitian ini dapat menambah pengetahuan tentang material properties baja dupleks dan austenit yang digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical*
2. Penelitian ini dapat menambah pengetahuan tentang ketahanan baja dupleks dan austenit dilihat dari sifat creep dan oksidasi nya pada tube boiler *ultra-supercritical*
3. Penelitian ini dapat menambah wawasan tentang perbandingan antara baja dupleks dan austenit dalam pemilihan material yang cocok pada tube boiler *ultra- supercritical*

Sistematika Penulisan

Berikut mengenai sistematika penulisan proposal skripsi ini :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, permasalahan penelitian, tujuan dan manfaat penelitian serta sistematika penulisan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori dasar berisi materi tentang materi baja, karakteristik material baja, perlakuan panas terhadap baja, klasifikasi baja dan proses hardening pada baja karbon tinggi

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang diagram alir penelitian, jenis penelitian, teknik pengumpulan data dan teknik analisa data

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

BAB II

LANDASAN TEORI

Tinjauan Pustaka

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Supercritical

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit jenis ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin yang digerakkan tenaga kinetik dari uap panas/kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batubara dan minyak bakar serta MFO untuk startup awal.

Kondisi superkritikal adalah kondisi pada suhu dan tekanan diatas titik kritikal termodinamika. Zat ini memiliki kemampuan unik untuk berdifusi melalui benda padat seperti gas dan melarutkan benda seperti cairan. Dan dia juga dapat merubah kepadatannya bila mengubah sedikit suhu dan tekanannya. Sifat seperti ini membuatnya cocok sebagai pengganti pelarut organik dalam proses yang disebut ekstraksi fluid superkritikal. Karbondioksida dan air adalah fluida yang paling umum digunakan.

Ketika suhu dan tekanan dari uap aktif meningkat melebihi titik jenuh air, sifat dari uap akan berubah secara dramatis. Titik jenuh air berada pada 374 °C dan 221.2 bar (218 atm) dan didefinisikan sebagai titik dimana komponen gas tidak dapat dicairkan kembali melalui penambahan tekanan. Diatas titik jenuhnya air tidak mengalami fase perubahan menjadi uap air namun menjadi air superkritikal. Air superkritikal tidak berbentuk air ataupun gas namun berada pada dua fase tersebut. Air superkritikal memiliki daya pelarut seperti air namun sifat perpindahannya seperti gas.

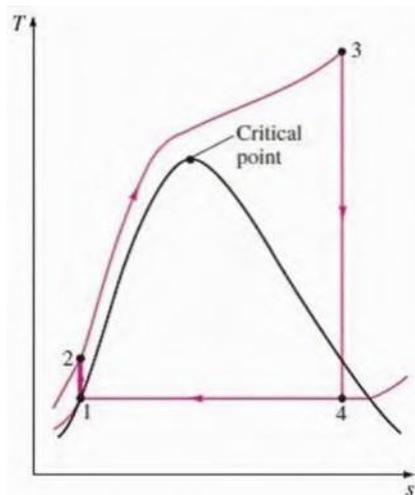
Teknologi superkritikal adalah teknologi baru yang memungkinkan emisi karbondioksida dari pembangkit menjadi lebih rendah. Teknologi ini dianggap salah satu cara yang paling praktis baik untuk mengurangi emisi maupun menggunakan batubara dengan lebih efisien. Fasilitas pembakar batubara yang beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan efisiensi hingga 20% untuk superkritikal steam plants dan sebanyak 45% untuk ultra-supercritical steam plants. Nilai ini menunjukkan peningkatan dari nilai kwh yang diproduksi per satu pon batubara yang dibakar dengan emisi yang lebih baik. Dengan penggunaan batubara yang lebih efisien tingkat emisi dapat

diturunkan dengan menggunakan teknologi control emisi berikut :

1. Emisi NO_x atau nitrogen oksida dapat diturunkan dengan menggunakan kombinasi NO_x burner dan catalytic reduction technology.
2. Emisi SO_x dan NO₂ dapat dikurangi dengan penangkapan partikel sulfur yaitu wet limestone-gypsum flue gas desuphurization. Emisi yang dihasilkan yaitu gypsum dapat digunakan untuk produk-produk rumah tangga.
3. Emisi partikel lain dapat dikurangi dengan menggunakan electrostatic precipitator.

Siklus Rankine Supercritical

Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas pada fluida bertekanan menjadi kerja. Panas disuplai secara eksternal pada aliran tertutup yang biasanya menggunakan air sebagai fluida yang bergerak. Siklus ini dinamai untuk mengenang ilmuwan Skotlandia William John Macquorn Rankine [1].



Gambar 1 Grafik T-s Pembangkit Supercritical

Siklus Rankine supercritical adalah siklus Rankine dimana fluida yang bekerja berada pada kondisi superkritis yaitu kondisi dimana kombinasi suhu dan tekanan berada di atas titik kritis/critical point pada kurva T-s. Kondisi ini menjadikan uap super panas yang dihasilkan boiler berada dalam keadaan uap kering sepenuhnya. Setiap fluida memiliki titik kritis yang berbeda. Untuk fluida air berada pada tekanan 22.1 MPa dan suhu 374 °C [1].

Pompa yang digunakan harus mampu menghasilkan tekanan melebihi tekanan kritis fluida pada saat memasuki boiler. Boiler juga harus mampu memanaskan fluida di atas temperature kritisnya. Dalam kondisi ini boiler tidak membutuhkan kerja dari separator dan circulate pump yang pada umumnya digunakan untuk memisahkan dan memanaskan ulang fluida kerja yang belum berubah menjadi uap. Separator dan circulate pump hanya digunakan pada proses start up dimana uap yang dihasilkan masih berupa uap basah.

Proses produksi uap pada boiler superkritis lebih dikenal dengan istilah once-trough steam generator. Dengan proses ini, efisiensi dari keseluruhan pembangkit akan bertambah 3-4%. Hal ini disebabkan karena uap yang dihasilkan boiler akan lebih banyak dibandingkan proses sirkulasi ulang oleh boiler dengan steam drum. Pembangkit supercritical membutuhkan bahan bakar yang lebih sedikit untuk menghasilkan beban keluaran sama. Beberapa komponen superkritis memerlukan biaya lebih untuk pembeliannya akan tetapi, dapat menurunkan biaya konsumsi bahan bakar [1] .

Komponen Utama Boiler dan Perbedaan Boiler Sub-critical dan Ultra-supercritical

Adapun komponen utama dari boiler supercritical adalah sebagai berikut :

1. Economizer yang berfungsi untuk memanaskan air berasal dari High Pressure Heater
2. Waterwal berfungsi menguapkan air
3. 1ry, 2ry dan 3ry superheater yang berfungsi untuk memanaskan uap air sehingga dihasilkan uap yang kering
4. 1ry dan 2ry reheater yang berfungsi untuk memanaskan kembali uap kering bertekanan tinggi yang telah keluar dari turbin high pressure
5. Separator berfungsi memisahkan fluida kerja yang masih dalam fase air sehingga dapat dipanaskan ulang
6. Circulate pump berfungsi memompa air yang dipisahkan oleh separator Kembali ke waterwall untuk dipanaskan lagi

Dilihat dari fasanya, boiler dibagi menjadi 3 bagian yaitu :

1. Subcritical Boiler

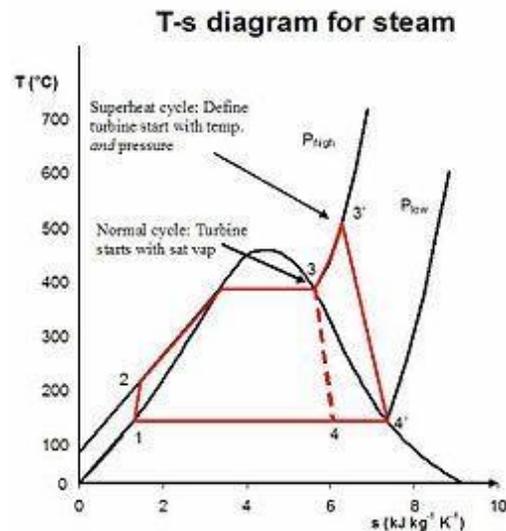
Subcritical artinya adalah fasa yang terbentuk di boiler tidak homogen (masih bisa dibedakan antara cair dan uap) sehingga tipe boiler ini *membutuhkan steam drum/boiler drum* untuk memisahkan kedua fasa untuk lanjut dipanaskan. Kembali menjadi superheated steam yang digunakan untuk memutar sudu turbin. Operasi subcritical boiler adalah pada $< 22.1 \text{ MPa}$ ($1 \text{ bar} = 0.98 \text{ kg/cm}^2 = 0.1 \text{ MPa}$) = 220 bar (Zhou and Turnbull, 2002) . Contoh operasi boiler $P=170 \text{ bar}$ dan $T=540 \text{ }^\circ\text{C}$ mempunyai efisiensi dengan kisaran 32-38%.

2. Supercritical Boiler

Supercritical artinya keadaan substansi dimana tidak bisa dibedakan antara fasa cair dan uap (kedua fasa homogen) dan tipe boiler *ini tidak membutuhkan steam drum* sehingga sering disebut once-through boiler (boiler satu kali lewat dimana air masuk langsung menjadi steam dan langsung bisa digunakan untuk memutar sudu turbin). Air mencapai keadaan kritis pada tekanan 22.1 MPa dan operasi supercritical boiler $> 22.1 \text{ MPa}$. Contoh operasi boiler ini adalah $P=250 \text{ bar}$ dan $T= 615 \text{ }^\circ\text{C}$ mempunyai efisiensi kisaran pada 37-42%. Terdapat pengendalian superketat terhadap parameter kualitas air pada boiler tipe ini salah satunya adalah pengendalian dissolved oxygen hanya menggunakan all-volatile treatment seperti ammonia hydrazine.

3. Ultra-supercritical Boiler

Boiler supercritical dan ultra-supercritical didesain dengan konstruksi metalurgi yang sangat baik karena tidak adanya steam drum sehingga konstruksi boiler dan turbin dijaga jangan sampai terdapat reaksi kerak dan korosi. Contoh operasi boiler ultra-supercritical adalah pada $P=300$ bar dan $T=630$ °C mempunyai efisiensi kisaran pada 43-45% . Penambahan tingkat efisiensi boiler berdampak menurunnya biaya operasional dan mengurangi emisi CO_2 .



Gambar 2 Siklus Rankine dengan Superheater

Keterangan :

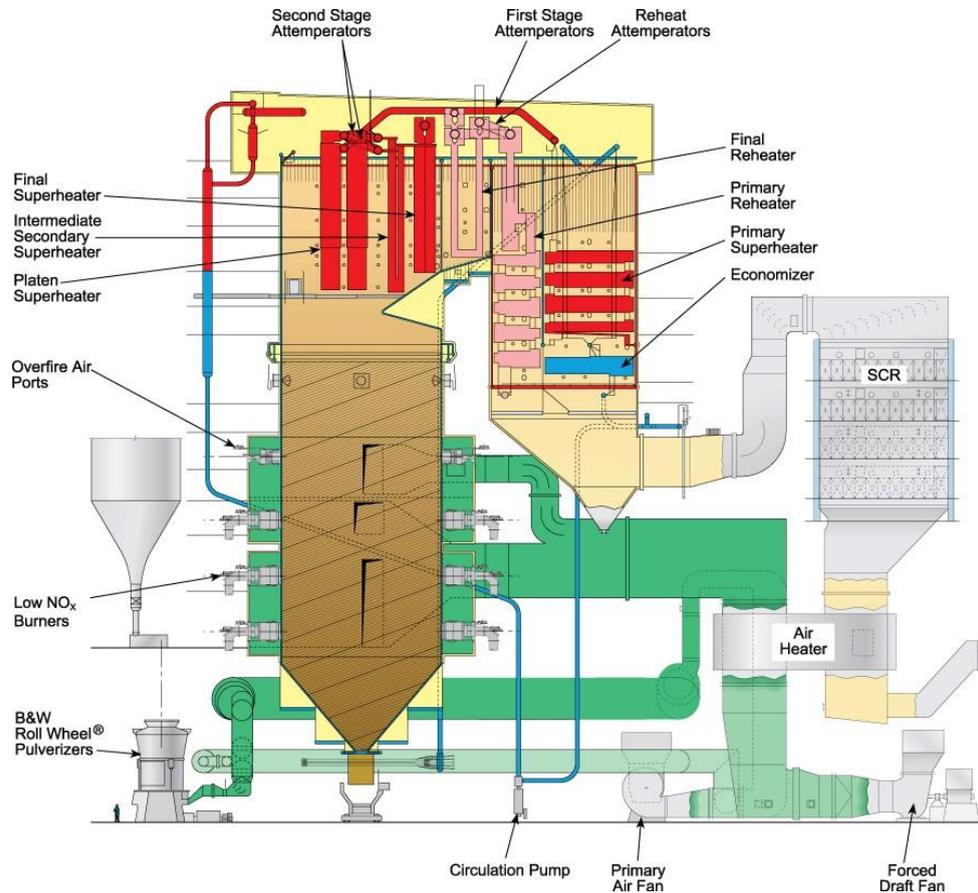
- 1 - 2 : siklus awal yaitu air dipompa dari tekanan rendah ke tekanan tinggi (menggunakan pompa BFP) yang kemudian dilewatkan ke pre-boiler (econoimizer) untuk dipanaskan awal sehingga temperature pelan-pelan naik.
- 2 – 3 : proses pemanasan di boiler pada tekanan tetap sehingga air berubah menjadi saturated steam dan entropi naik (energi per satuan, temperature yang tidak bisa digunakan untuk melakukan kerja)
- 3 – 3' : saturated steam yang terbentuk harus dipanaskan lagi sehingga temperaturnya naik yang berimbas juga pada tekanan naik dan berubah menjadi superheated steam. Kenaikan pressure inilah yang digunakan untuk memutar sudu turbine.
- 3' – 4' : superheated steam telah digunakan untuk memutar sudu turbin tekanan tinggi sehingga temperature dan tekanan pelan-pelan turun.
- 4 – 1 : setelah tekanan menjadi rendah low pressure steam diubah menjadi air di condenser.

Siklus terjadi terus menerus dalam keadaan tertutup (close cycle) dan proses inilah yang terjadi pada PLTU.

Perbedaan mendasar antara boiler subcritical dengan supercritical adalah pada boiler subcritical sebelum air sepenuhnya berubah fasa menjadi uap superheat, air akan melewati fasa saturasi. Oleh karena itu, pada boiler subcritical dibutuhkan komponen steam drum yang berfungsi sebagai pemisah antara air likuid dengan uap saturasi yang bisa dipanaskan lebih lanjut menjadi uap superheated. Sedangkan terbentuknya uap air pada boiler supercritical tidak melewati fasa uap saturasi, maka dapat dipastikan boiler supercritical tidak membutuhkan steam drum yang dimana hal ini menjadi salah satu kelebihan ekonomis dari boiler supercritical.

2.2 Baja

Baja yang digunakan pada PLTU *ultra-supercritical* pastinya mengandung bahan logam yang kuat agar bisa beroperasi pada kondisi uap yang sangat tinggi dan logam ini memiliki klasifikasi berdasarkan bahan nya yaitu logam ferro dan logam non-ferro yang dimana logam ferro adalah logam yang memiliki kandungan besi didalamnya sedangkan logam non-ferro adalah logam yang tidak memiliki kandungan besi didalamnya.



Gambar 32.1 Skema PLTU supercritical

Baja dengan bahan ferro biasanya digunakan untuk konstruksi- konstruksi besar dan kuat karena mengandung besi pada bahan penyusunnya sehingga sangat kuat dalam menahan beban sedangkan baja dengan bahan non-ferro biasanya digunakan untuk konstruksi-konstruksi kecil karena tidak memungkinkan untuk menahan beban tanpa ada kandungan besi didalam bahan penyusunnya. Jika dilihat dari bahan penyusun nya maka baja logam yang dapat digunakan pada konstruksi pltu *ultra-supercritical* adalah baja logam ferro karena kandungan besi yang terdapat didalamnya dapat menahan suhu panas walaupun pada suhu panas tertentu. Agar baja logam ferro ini dapat menahan suhu yang lebih tinggi maka harus ada kandungan lain yang terdapat didalam nya untuk mendukung

tingkat ketahanannya dalam operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU *ultra-supercritical*).

Boiler Ultra-Supercritical

Teknologi boiler *supercritical* dan *ultra-supercritical* telah digunakan pada beberapa dekade terakhir yang dimana teknologi ini memiliki beberapa keunggulan disbanding teknologi boiler lainnya atau boiler *subcritical*.

Keunggulannya antara lain :

1. *Plant efficiency* yang lebih tinggi sehingga mengurangi biaya operasi.
2. Emisi CO₂ yang lebih rendah dari boiler *subcritical*.

Berdasarkan tekanan dan temperature uap keluaran boiler, dibedakan menjadi :

1. Boiler konvensional *subcritical*, tekanan dan temperature 17MPa 547⁰C
2. Boiler *supercritical*, tekanan dan temperature 24MPa 560⁰C
3. Boiler *ultra-supercritical*, tekanan dan temperature 26MPa 700⁰C

Dasar dari pemilihan boiler *ultra-supercritical* adalah ketahanan akan creep yang tinggi, mampu las yang baik, tahan terhadap *embrittlement fracture toughness* dan lain-lain yang dimana beberapa jenis baja yang dipakai pada boiler *ultra-supercritical* adalah

1. *Ferritic steel* tahan sampai suhu 565⁰C
2. *Ferritic Martensitic steel* tahan sampai suhu 620⁰C
3. *Austenitic steel* tahan sampai suhu 665⁰C
4. *High Nickel Alloy* tahan sampai suhu 700⁰C

Yang dimaksud dari *supercritical* adalah air termasuk salah satu *supercritical* fluida yang apabila temperature dan tekanannya lebih besar dari *critical point* maka tidak ada perbedaan fasa antara fasa air dan uap.

Boiler *ultra-supercritical* biasanya dibangun dan didesain menggunakan konstruksi baja yang sangat tinggi (*High Grade Quality*) karena didalam boiler tidak terjadi lagi proses pemisahan fase untuk menjadi *superheated* yang digunakan untuk memutar sudu turbin. Boiler *ultra-supercritical* biasanya beroperasi pada kondisi P=300 bar dan T=630 ⁰C dan mempunyai efisiensi diantara 43-45%. Selain itu jika efisiensi dapat ditingkatkan maka akan sangat berpengaruh pada biaya operasional dan mengurangi emisi CO₂.

Kerusakan yang banyak terjadi pada komponen PLTU terutama pada bagian boiler adalah korosi yang dimana kebanyakan disebabkan oleh kualitas air yang buruk yang banyak mengandung O₂ dan CO₂ yang dapat menimbulkan kerak atau karat yang berproses pada dinding boiler dan menyebabkan oksida besi pada boiler. Kerusakan ini juga terjadi pada *High Pressure Heater* (HPH) yang dimana ketika proses pemanasan air pengisi *boiler feedwater* berlangsung disitu juga terjadi penyumbatan yang disebabkan karena korosi yang sudah menumpuk cukup banyak pada *High Pressure Heater* (HPH).

Beberapa korosi yang terjadi pada *High Pressure Heater* adalah korosi erosi, korosi intergranular dan korosi oksidasi.

Teknologi boiler supercritical dan ultra-supercritical telah digunakan pada dekade terakhir yang dimana teknologi ini memiliki beberapa keunggulan disbanding teknologi boiler lainnya atau boiler subcritical

Keunggulannya antara lain :

1. *Plant efficiency* yang lebih tinggi sehingga mengurangi biaya operasi
2. Emisi CO₂ yang lebih rendah dari boiler subcritical

Berdasarkan temperature dan tekanan uap keluaran boiler, boiler dibedakan menjadi :

1. Boiler konvensional subcritical, tekanan dan temperature 17MPa dan 547 °C
2. Boiler supercritical, tekanan dan temperature 24 MPa dan 560 °C
3. Boiler ultra-supercritical, tekanan dan temperature 26 MPa dan 700 °C

Dasar dari pemilihan boiler ultra-supercritical adalah ketahanan akan creep yang tinggi, mampu las yang baik, tahan terhadap embrittlement, fracture toughness, dan lain-lain yang dimana beberapa jenis baja yang dipakai pada boiler ultra-supercritical adalah

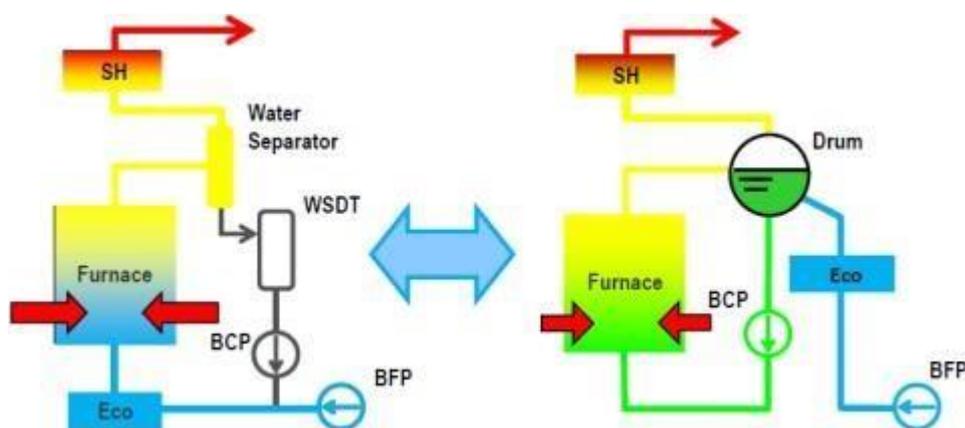
1. *Ferritic steel* tahan sampai suhu 565 °C
2. *Ferritic-Martensitic steel* tahan sampai 620 °C
3. *Austenit steel* tahan sampai 665 °C
4. *High nickel alloy* tahan sampai 700 °C

Yang dimaksud dari supercritical adalah air termasuk salah satu supercritical

fluida yang apabila temperature dan tekanannya lebih besar dari *critical point* maka tidak ada perbedaan fasa antara fasa air dan uap.

Boiler Ultra-Supercritical biasanya dibangun dan didesain menggunakan konstruksi baja yang sangat tinggi karena didalam boiler tidak terjadi lagi proses pemisahan fasa untuk menjadi superheated yang digunakan untuk memutar sudu turbin.

Boiler Ultra-Supercritical biasanya beroperasi pada kondisi P 300 bar dan T 630°C dan mempunyai efisiensi diantara 43-45 %. Selain itu jika efisiensi dapat ditingkatkan maka akan sangat berpengaruh pada biaya operasional dan mengurangi emisi CO₂. Kerusakan yang banyak terjadi pada komponen PLTU terutama pada bagian boiler adalah korosi yang dimana banyak disebabkan oleh kualitas air yang buruk yang banyak mengandung O₂ dan CO₂ yang dapat menimbulkan kerak atau karat yang berproses pada dinding boiler dan menyebabkan oksida besi pada boiler. Kerusakan ini juga terjadi pada *High Pressure Heater* (HPH) yang dimana ketika proses pemanasan air pengisi boiler *feed water* berlangsung disitu juga terjadi penyumbatan yang disebabkan karena korosi yang sudah menumpuk cukup banyak pada *High Pressure Heater* (HPH). Beberapa korosi yang terjadi pada *High Pressure Heater* adalah korosi erosi, korosi intergranular dan korosi oksidasi.



Gambar 2.2 Skema boiler ultra-supercritical

Baja

Baja merupakan campuran logam yang dimana besi adalah bahan dasar dari

pembuatannya dan dicampur dengan unsure lain agar baja tersebut lebih kuat. Adapun campuran yang digunakan pada baja selain besi adalah unsure karbon, mangan, fosfor, sulfur, silikon dan sedikit mengandung oksigen, nitrogen dan aluminium didalamnya. Kandungan unsure karbon yang terdapat pada baja adalah 0,2 - 2,1 % dari keseluruhan baja. Kandungan karbon didalam baja harus seimbang dengan kandungan besi agar tetap menjadi tembaga yang kuat. Ketika baja diberi elemen lain didalamnya maka baja tersebut menjadi baja paduan yang dimana elemen lain yang dimasukkan ini memberikan karakteristik tersendiri pada baja. Elemen penting yang dimasukkan kedalam baja ini diantaranya adalah mangan, nikel dan kroma.

Jika kandungan yang terdapat dalam baja hanya besi dan karbon maka ini disebut besi tuang yang dimana besi tuang ini tidak mudah dicairkan dengan panas tetapi mudah dibentuk saat dilelehkan karena titik lelehnya yang rendah. Seimbang dengan kandungan besi agar tetap menjadi tembaga yang kuat. Ketika baja diberi elemen lain didalamnya maka baja tersebut menjadi baja paduan yang dimana elemen lain yang dimasukkan ini memberikan karakteristik tersendiri pada baja. Elemen penting yang dimasukkan kedalam baja ini diantaranya adalah mangan, nikel dan kroma.

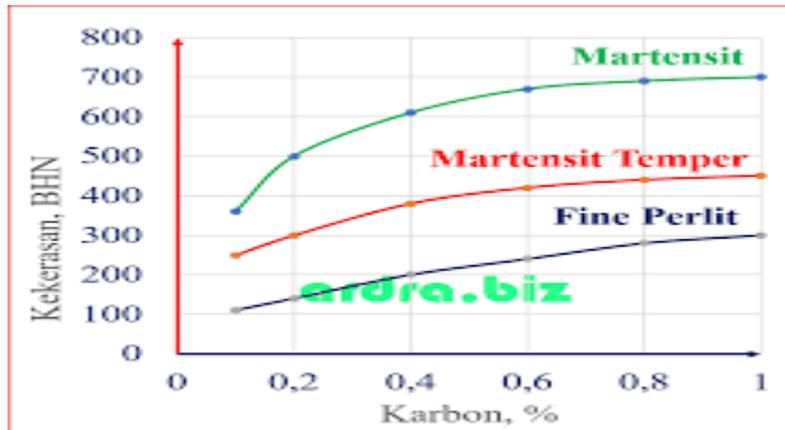
Jika kandungan yang terdapat dalam baja hanya besi dan karbon maka ini disebut besi tuang yang dimana besi tuang ini tidak mudah dicairkan dengan panas tetapi mudah dibentuk saat dilelehkan karena titik lelehnya yang rendah.

Baja Dupleks

Baja dupleks adalah baja yang tahan terhadap karat yang dimana baja dupleks ini tersusun dari sifat struktur austenit dan ferrit. Unsur yang membentuk baja dupleks ini adalah molibdenum, titanium, niobium, silikon dan aluminium yang merupakan kombinasi dari struktur penyusun baja austenit dan ferrit. Adapun unsur yang ditambahkan pada baja dupleks ini adalah kromium sebanyak 20% dan campuran austenit dan ferrit didapatkan pada saat dilakukan proses perlakuan panas terhadap baja dupleks. Temperatur yang digunakan pada saat melakukan proses perlakuan panas pada baja dupleks adalah pada suhu 1050-1150 °C. Baja dupleks ini juga tahan terhadap *solidification cracking* dan *transgranular stress corrosion* pada saat dilakukan proses pengelasan pada baja dupleks ini.

Baja Austenit

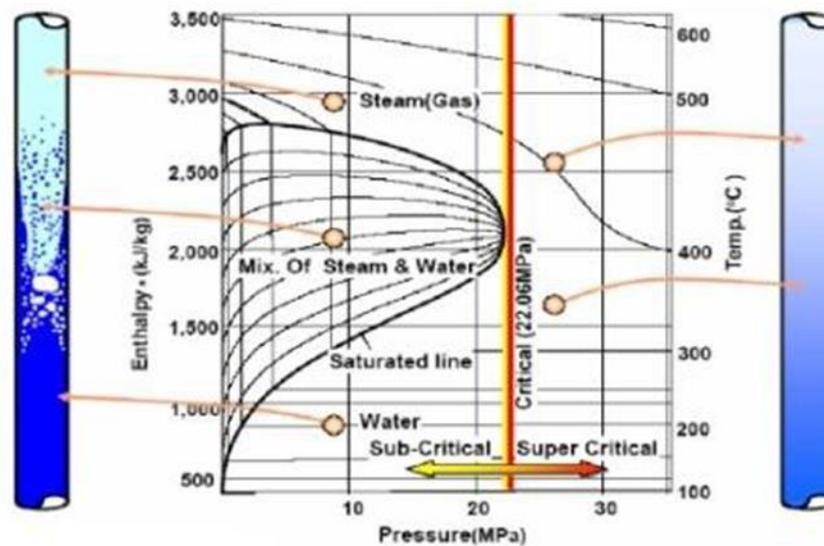
Kandungan karbon pada baja austenit adalah 1,8% pada temperatur 1130⁰C dan proses perlakuan panas non-magnetik tidak dapat dilakukan pada baja ini. Struktur kristal pada baja ini adalah *Face Centered Cubic* (FCC) yang dimana terdapat 4 atom dan tiap atomnya dikelilingi oleh 12 atom dan nilai dari penumpukan atomnya adalah 0,74 %.



Gambar 2.3 Kekerasan baja BHN

Baja Ferrit

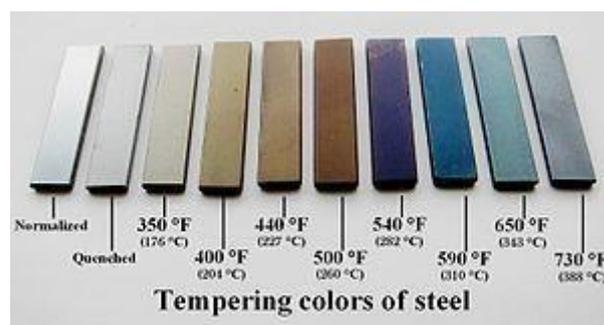
Baja ferrit ini termasuk baja karbon rendah karena baja ini merupakan kristal besi murni yang strukturnya lunak dan ulet. Struktur kristal pada baja ini adalah *Body Centered Cubic* (BCC) yang dimana terdapat 2 atom dan tiap atomnya dikelilingi 8 atom dan nilai dari atomnya adalah 67,98 %.



Gambar 2.4 Skema efisiensi PLTU supercritical

Karakteristik Material Baja

Berikut ini merupakan contoh gambar baja flatbar yang ditempa secara keseluruhan yang dimana dari gambar ini dapat kita lihat perbedaan karakteristik nya. Gambar paling kiri merupakan baja normal yang dimana pada baja tersebut tidak terjadi proses apa-apa didalam nya, yang kedua merupakan baja yang sudah dilakukan proses martensit tanpa ada dilakukan penempaan lain didalam nya, dan gambar lainnya sudah diberikan proses penempaan didalam nya yang dimana baja-baja tersebut dipanaskan berdasarkan suhu dan temperatur yang diinginkan pada masing-masing baja selama 1 jam.



Gambar 2.5 Tempering colors of steel

Didalam karakteristik baja ada sebuah proses yang disebut peleburan yang dimana

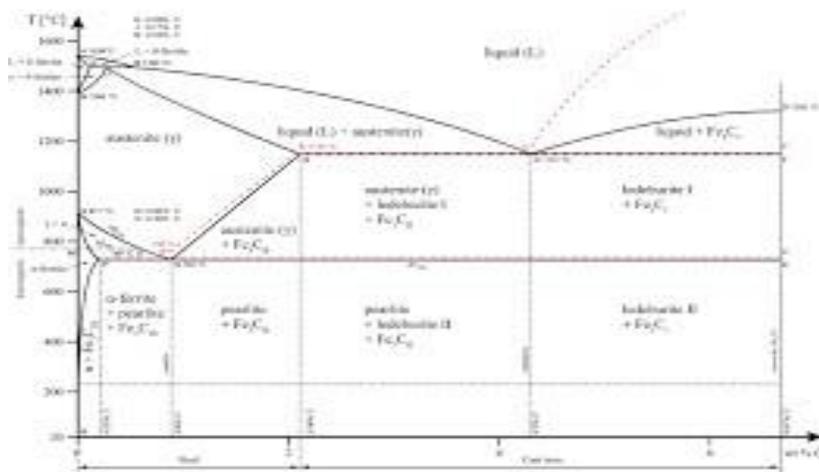
proses peleburan ini berguna untuk menghilangkan oksigen agar dapat disatukan kembali dengan karbon yang terdapat didalam baja. Untuk mendukung karakteristik suatu baja maka ditambahkan material pendukung seperti nikel dan mangan yang berguna sebagai penambah kekuatan dan krom yang berguna sebagai penambah kekerasan, serta vanadium yang berguna sebagai pengurang dari titik leleh logam dan sebagai penambah kekerasan juga.

Pemberian kromium pada baja juga diperlukan untuk mencegah karat dan korosi pada baja yang dimana penambahan kromium ini dapat membentuk oksida keras pada permukaan baja.

Adapun sifat-sifat didalam campuran besi karbon pada pembentukan baja sangatlah penting. Bentuk besi yang paling stabil adalah *Body Centered Cubic* (BCC) yang biasa disebut ferrit. Besi ini dapat melarutkan karbon pada 0,021 wt% pada suhu 723°C dan 0,005% pada suhu 0°C . Perubahan fase akan terjadi pada besi murni ketika dipanaskan pada suhu 910°C yang dimana perubahan fase ini menjadi struktur *Face Centered Cubic* (FCC) yang biasa disebut austenit dan fase ini dapat melarutkan karbon sampai 2,1%.

Fase austenitik (FCC) akan berubah menjadi fase ferrit (BCC) ketika baja dengan kandungan karbon dibawah 0,8% dipanaskan. Cara agar kandungan karbon dapat lepas dari austenit adalah menggunakan reaksi pengendapan dan menjadi sementit.

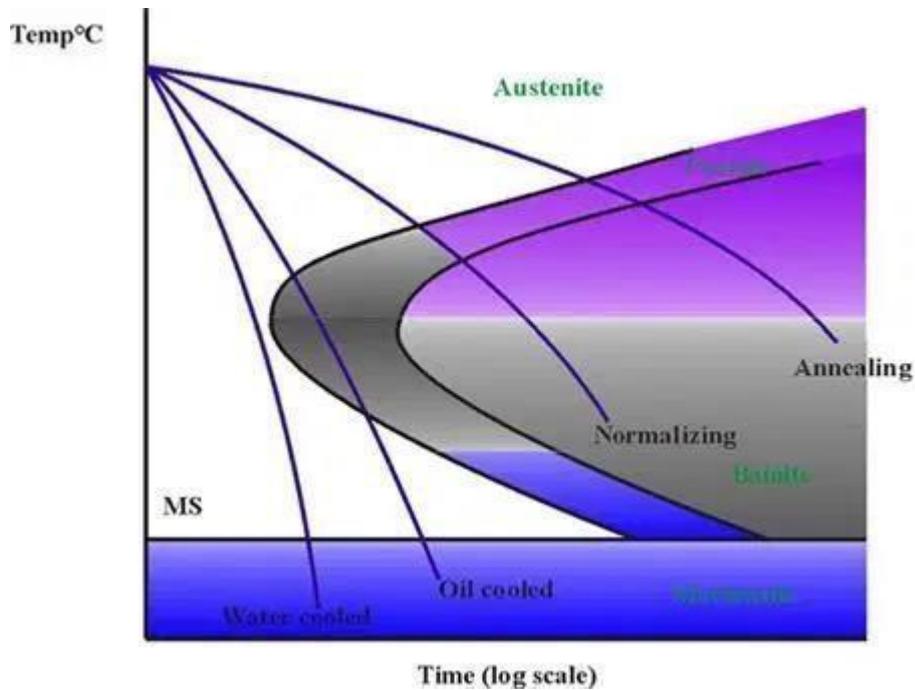
Adapun yang namanya baja martensit merupakan baja yang tingkat kepadatannya dibawah austenit dan itu disebabkan karena martensit mengalami pengembangan pada saat dilakukan proses pendinginan dan karena itulah perbedaan yang terjadi pada baja martensit adalah perubahan volume. Pengembangan yang terjadi pada baja martensit ini berwujud kompresi pada kristal martensit dan tekanan pada ferrit serta pergeseran yang terjadi terhadap keduanya.



Gambar 2.6 Karakteristik material baja

Perlakuan Panas pada Baja

Perlakuan panas yang biasa digunakan pada saat proses pemanasan baja adalah *annealing*, *quenching* dan *tempering* yang dimana proses *annealing* merupakan pemanasan baja sampai lunak pada suhu tertentu yang membuat proses ini dilakukan dengan 3 tahap yaitu pemulihan, rekristalisasi dan penumbuhan butir. Proses perlakuan panas *quenching* dan *tempering* merupakan pemanasan yang dilakukan untuk merubah fasa nya menjadi austenit dan setelah perubahan terjadi baru dilakukan pendinginan. Pada saat proses pemanasan *quenching* berlangsung biasanya akan terjadi penurunan suhu secara tiba-tiba yang menghasilkan struktur martensit menjadi keras dan getas dan setelah itu dilakukan proses *tempering* yang menyebabkan fase nya berubah lagi menjadi sementit yang bertujuan agar mengurangi tegangan dan cacat dalam baja yang membuat baja mejadi lebih ulet dan tahan terhadap keretakan yang akan terjadi.



Gambar 2.7 Skema perlakuan panas pada baja

Klasifikasi Baja

Baja diklasifikasikan menurut komposisi nya sebagai berikut :

Baja Karbon Tinggi

Kandungan karbon yang terdapat dalam baja karbon adalah kurang dari 2,14% dan berdasarkan kandungan karbon tersebut maka baja karbon diklasifikasikan menjadi 3 yaitu :

Baja Karbon Rendah

Yang dimana baja karbon ini memiliki kandungan penyusun nya dengan komposisi karbon $< 0,3\%$. karbon dengan komposisi dibawah 0,15% biasa disebut *dead mild steel*. Adapun karakter pada baja karbon rendah ini adalah ketika diberikan perlakuan panas baja karbon ini tidak akan responsif sehingga martensit tidak akan terbentuk, menggunakan metode penguat *cold working*, struktur mikro nya terdiri dari ferrit dan perlit, relatif lunak, ulet dan tangguh serta mampu mesin dan mampu las nya sangat baik,

Baja Karbon Medium

Yang dimana baja karbon ini memiliki kandungan penyusun nya dengan komposisi 0,3 – 0,8% . Pada saat diberikan perlakuan panas austenit, *quenching* dan *tempering* maka sifat mekanik nya akan naik dan struktur mikro yang terjadi pada baja karbon ini adalah martensit. Selain itu, baja karbon ini lebih kuat daripada baja karbon rendah. Baja Karbon Tinggi

Dimana baja karbon ini memiliki kandungan penyusun nya dengan komposisi 0,8 – 2% . Pada saat diberikan perlakuan panas austenit, *quenching* dan *tempering* maka sifat mekanik nya akan naik dan struktur mikro yang terjadi pada baja karbon ini adalah martensit. Selain itu, baja karbon ini merupakan yang paling kuat dan getas daripada baja karbon lainnya.

Baja Paduan

Kandungan karbon yang terdapat dalam baja paduan ini diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu :

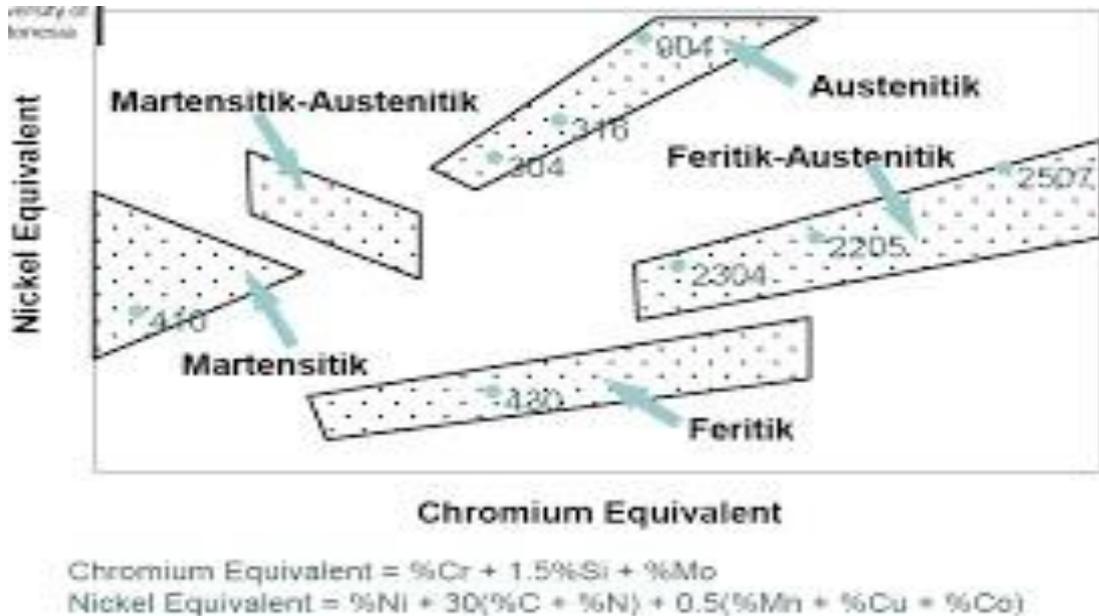
Low Alloy Steel, yang dimana elemen paduan yang dicampurkan adalah < 2,5%

Medium Alloy Steel, yang dimana elemen paduan yang dicampurkan adalah 2,5–10%

High Alloy Steel, yang dimana elemen paduan yang dicampurkan adalah > 10%

Baja paduan ini juga dikelompokkan menjadi 2 yaitu :

1. *Baja Paduan Khusus*, yang dimana didalam baja paduan khusus ini terkandung logam tambahan seperti nikel, kromium, mangan, molibdenum, tungsten dan vanadium yang membuat baja paduan ini menjadi lebih keras, kuat dan ulet karena sifat mekanik dan kimia nya yang sudah berubah.
2. *High Speed Steels*, yang dimana didalam baja high speed steels ini terkandung karbon dengan komposisi 0,70 – 1,50% .



Gambar 2.8 paduan pada baja

Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja

Untuk mendapatkan sifat baja yang kuat dan tahan beroperasi dalam keadaan suhu yang tinggi sebuah baja tidak cukup jika hanya mengandung karbon tetapi harus dimasukkan unsur lainnya kedalam baja untuk mendukung kualitas dari baja yang akan digunakan terlebih jika diaplikasikan pada tube boiler pembangkit listrik Ultra-Supercritical.

Adapun unsur-unsur lain yang dimasukkan kedalam baja untuk meningkatkan kualitas dari baja adalah sebagai berikut :

1. Silikon / Si

Unsur silicon ini sangat familiar digunakan pada campuran besi yang dimana pengaruhnya tidak begitu besar dan harus ditambahkan dalam jumlah yang besar agar memberikan pengaruh yang besar kedalam baja. Adapun kelebihan dan kekurangan dari unsur baja silicon ini adalah sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Meningkatkan kekuatan dan ketahanan dari benturan keras, kondisi suhu yang panas dan tahan korosi.
- b. Kelemahan : Memberikan efek penurunan seperti regangan pada saat dilakukan proses pengelasan.

2. Mangan / Mn

Unsur baja mangan ini juga sangat familiar digunakan sebagai unsur campuran pada baja sama seperti unsur silicon yang membutuhkan jumlah yang banyak agar dapat memberikan penambahan kualitas yang baik terhadap baja.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari baja ini adalah sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Meningkatkan kekuatan dan ketahanan akan aus pada saat diberikan perlakuan dingin.
- b. Kelemahan : Memberikan efek penurunan pada serpih.

3. Kromium / Cr

Unsur paduan kromium ini berbeda dengan unsur silicon dan mangan yang dimana unsur kromium ini sangat tahan terhadap karat dan asam.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari unsur paduan kromium ini adalah sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Memberikan efek peningkatan terhadap ketahanan akan asam, kerak, dan karat selain itu juga meningkatkan kemampuan tahan pada kondisi suhu panas, benturan keras dan aus.
- b. Kekurangan : Memberikan efek penurunan terhadap regangan walaupun kecil.

4. Nikel / Ni

Penambahan unsur paduan baja nikel ini dapat memberikan efek magnetisasi pada baja ketika dilas yang dapat membuang serpihan pada baja.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari unsur paduan nikel ini adalah sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Memberikan efek peningkatan pada kekuatan, karat dan keuletan baja, selain itu juga tahan terhadap listrik.
- b. Kekurangan : Memberikan efek penurunan terhadap proses pendinginan ketika diberikan perlakuan panas pada baja.

5. Molibdenum / Mo

Unsur lain yang biasa digabungkan pada unsur paduan molybdenum ini adalah unsur Cr, Ni dan V yang dimana unsur paduan molybdenum ini memiliki kelebihan dan

kekurangan sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Memberikan efek peningkatan terhadap ketahanan panas dan umur kelelahan, suhu yang sangat tinggi pada saat perlakuan panas dan kekuatan tarik.
- b. Kekurangan : Memberikan efek penurunan pada regangan dan proses pendinginan yang lama ketika diberikan perlakuan panas,

6. Vanadium / V

Unsur paduan vanadium ini sedikit mirip dengan unsur molybdenum yang dimana menjadi perbedaannya adalah efek regangan. Adapun kelebihan dan kekurangan dari unsur paduan vanadium ini adalah sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Memberikan efek peningkatan pada kekuatan, keuletan, batas rentang, suhu tinggi saat diberikan perlakuan panas dan umur Lelah.
- b. Kekurangan : Memberikan efek penurunan pada kepekaan saat diberikan perlakuan panas dengan suhu yang tinggi.

7. Wolfam / W

Unsur paduan wolfam ini biasa digunakan sebagai campuran pada baja yang dibentuk dengan olahan cepat dan keras karena unsur paduan wolfam ini memiliki titik lebur yang tinggi. Adapun kelebihan dan kekurangan dari unsur paduan wolfam ini adalah sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Memeberikan efek peningkatan pada batas rentang, kekuatan dan tahan panas pada saat diberikan perlakuan panas.
- b. Kekurangan : Memberikan efek penurunan pada regangan.

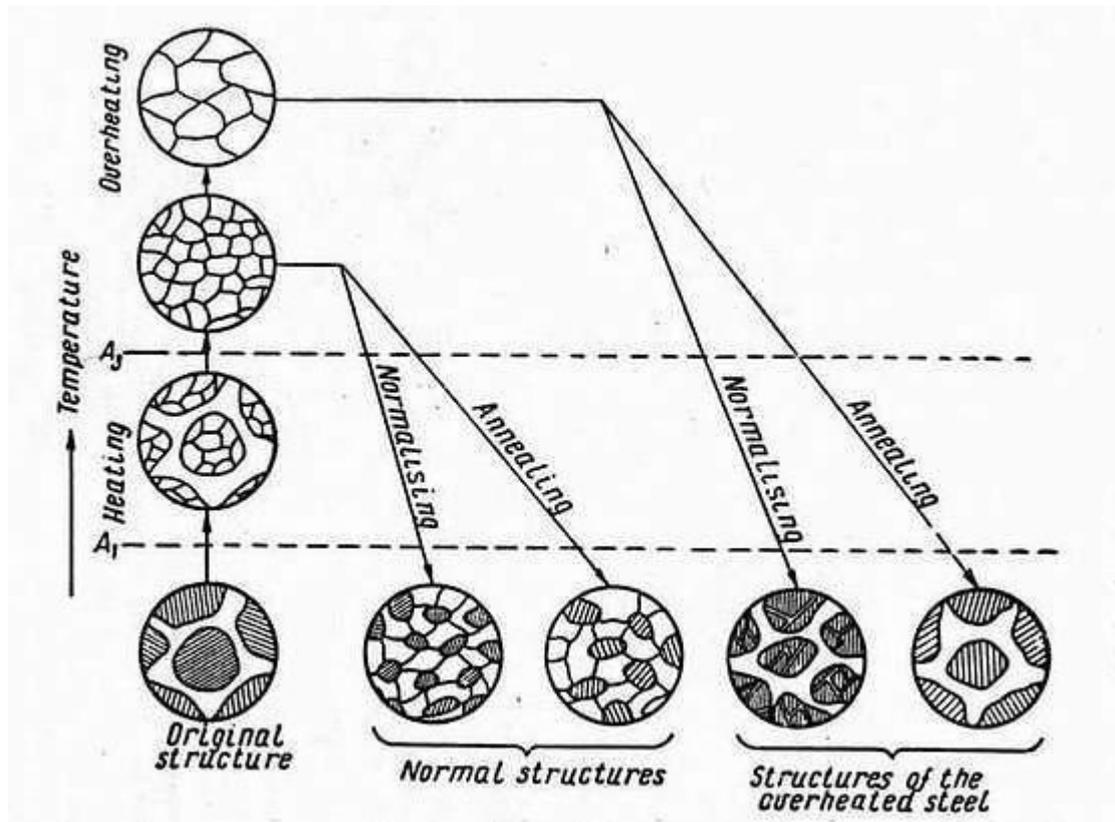
8. Kobalt / Co

Unsur paduan ini juga familiar digunakan sebagai unsur tambahan baja olah cepat yang dimana unsur paduan kobalt ini mengandung magnet permanen. Adapun kelebihan dari unsur paduan kobalt ini adalah sebagai berikut :

- a. Kelebihan : Memberikan efek peningkatan pada karat, aus, kekerasan dan juga ketahanan daya hantar listrik dan kejenuhan magnetisnya.

9. Titanium / Ti

Unsur paduan titanium ini memiliki tingkat kekerasan dan titik lebur yang sangat tinggi yang dimana itu sangat baik jika digunakan sebagai unsur penambah pada baja yang akan digunakan terutama jika diaplikasikan pada tube boiler pembangkit listrik Ultra-Supercritical.

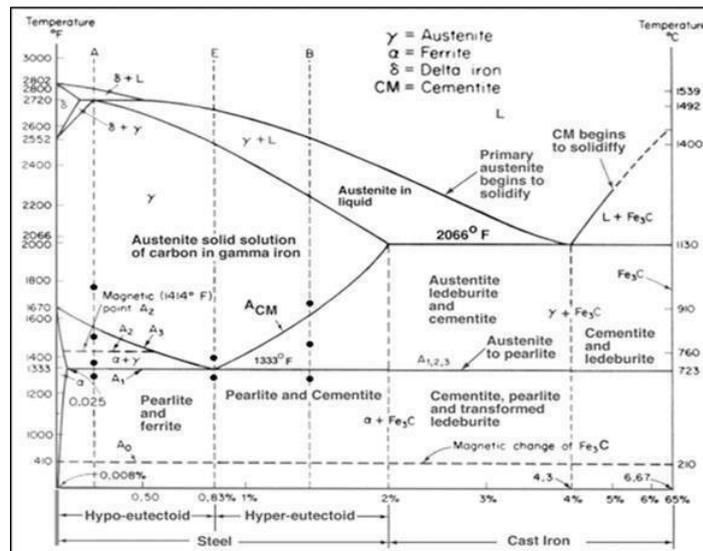


Gambar 2.9 Struktur paduan pada baja

Proses Hardening pada Baja Karbon Tinggi

Untuk mendapatkan baja yang bersifat tahan aus serta kekuatan *fatigue limit/strength* yang lebih baik maka perlu dilakukan proses hardening atau proses pengerasan pada baja. Kadar karbon dan suhu pada saat melakukan pemanasan baja juga sangat berpengaruh terhadap kekerasan yang ingin dicapai pada baja. Selain itu, *holding time* dan laju pendinginan serta tebal bagian penampang saat melakukan proses pengerasan juga sangat mempengaruhi tingkat kekerasan dari suatu baja. Adapun langkah-langkah proses hardening adalah sebagai berikut : *Heating*, yang dimana pemanasan pada karbon tinggi diatas AC-1 pada diagram Fe-Fe₃C pada suhu 850°C tujuannya agar memperoleh struktur austenit pada baja, dan yang salah dari sifat austenit

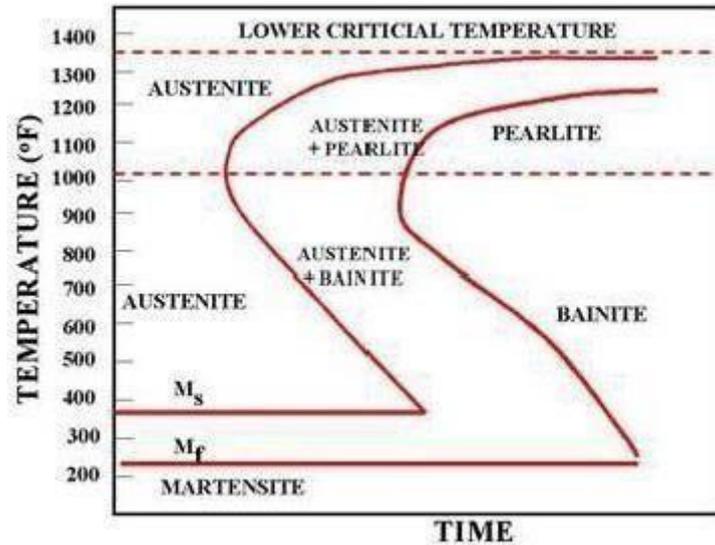
adalah baja tidak tahan pada suhu dibawah AC-1 sehingga dapat ditentukan struktur yang diinginkan.



Gambar 2.10 Diagram keseimbangan Fe-Fe₃C

Penahanan Suhu, yang dimana pada saat dilakukan pemanasan pada baja pada suhu tertentu dilakukan penahanan agar kekerasan maksimum dari baja stabil sehingga struktur austenit nya homogen.

Pendinginan, yang dimana setelah pada saat proses hardening dilakukan langsung diberikan pendinginan menggunakan air yang dimana ini bertujuan agar struktur martensitnya terjadi karena fase austenite yang didinginkan akan menghasilkan fase martensit.



Gambar 2.11 Kurva pada diagram TTT (Time Temperature Transformation)

Dari diagram diatas dapat dilihat bahwa pendinginan akan menghasilkan struktur martensit karena garis pendinginan lebih cepat dari laju pendinginan kritis yang nantinya tetap terbentuk fase austenit.

Meningkatnya kekerasan juga memberikan dampak terhadap kekuatan suatu baja. Adapun dampak yang terjadi pada kekuatan adalah sebagai berikut

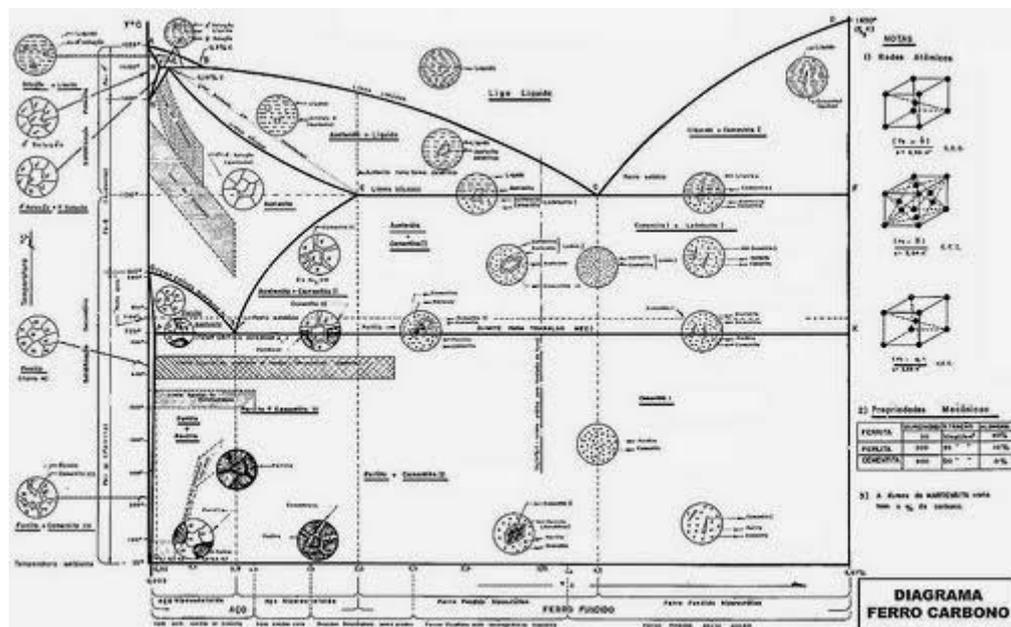
1. Kekuatan Impact, yang dimana kekuatan impact pada baja akan menurun yang disebabkan meingkatnya kekerasan suatu baja dan ini terjadi karena beban yang bekerja pada pengujian impak adalah beban geser dalam satu arah maka tegangan dalam akan mengurangi kekuatan impak baja tersebut.
2. Kekuatan tarik, yang dimana kekuatan tarik baja akan meningkat disebabkan beban yang bekerja pada pengujian tarik adalah aksial yang dimana arah nya berlawanan dengan arah dari tegangan dalam sehingga kekerasan yang naik akan meingkatkan kekuatan tarik dari baja tersebut.

Struktur Mikro

Ukuran perbedaan dari struktur makro dan struktur mikro adalah lebih dari 100 μm pada struktur makro dan dapat dilihat dengan mata telanjang dan 100 μm sampai 1 \AA pada struktur mikro. Yang sangat berpengaruh terhadap karakterisasi daripada struktur mikro sendiri adalah banyaknya jumlah fasa yang terkandung didalamnya sebagai paduan dan proses penyusunan dari fasa itu sendiri.

Adapun macam paduan yang ditambahkan kedalam struktur mikro tersebut adalah sebagai berikut :

1. Tingkat konsentrasi
2. Perlakuan Heat Treatment
3. Waktu pemanasan
4. Laju pendinginan



Gambar 2.12 Struktur mikro

Metalografi

Metode yang dimana dilakukan untuk mengetahui hubungan antara karakter, sifat dan struktur logam ataupun paduan dengan melakukan pengamatan, pemeriksaan dan observasi atau yang biasa disebut dengan metalografi.

Pengamatan yang dilakukan dengan metalografi umumnya menggunakan mikroskop optik atau mikroskop cahaya dengan pembesaran 500 sampai 1000 kali yang dimana berfungsi untuk memisahkan sekitar 0.2 mikron atau lebih struktur mikro. Adapun prosedur yang dilakukan dalam pengamatan metalografi adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan dan pengambilan bahan uji coba

Pemilihan dan pengambilan bahan berdasarkan sifatnya :

- a. Kendali mutu
- b. Keperluan penelitian
- c. Analisa kerusakan

2. Pemotongan bahan uji

Bahan uji harus dijaga bentuknya yang dimana tidak boleh rusak ketika dilakukan proses pemotongan dan yang biasanya menyebabkan kerusakan pada bahan uji adalah gesekan antara alat potong dengan benda uji yang menimbulkan panas disekitar bahan uji dan menimbulkan kerusakan pada bahan uji.

Untuk mengurangi kerusakan saat dilakukan pemotongan pada bahan uji ada 3 cara arah potongan yang dilakukan, yaitu :

- a. Sejajar
- b. Memanjang
- c. Menyilang

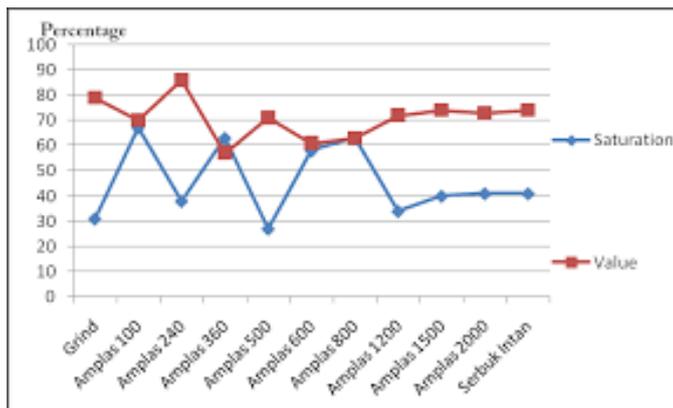


Gambar 4 Skema pemotongan benda uji

3. Pengamplasan / Grinding

Proses pengamplasan ini bertujuan untuk memberikan goresan yang searah, halus dan homogen pada permukaan dari bahan uji yang dimana pada saat dilakukan

pengamplasan permukaan bahan uji harus selalu dialiri dengan air yang bertujuan agar mengurangi efek panas yang ditimbulkan akibat gesekan dari amplas terhadap permukaan bahan uji. Selain itu saat dilakukan proses pengamplasan harus diperhatikan juga posisi dari bahan uji yang dimana harus tegak lurus dengan posisi amplas untuk mendapatkan hasil yang maksimal pada bahan uji.



Gambar 5 Skema grinding

4. Pemolesan / Polishing

Proses pemolesan ini dilakukan bertujuan agar memberikan hasil yang lebih halus lagi pada permukaan bahan uji setelah dilakukan pengamplasan yang dimana proses pengamplasan masih meninggalkan bekas goresan-goresan kecil pada permukaan bahan uji.

5. Pengetasan

Proses ini dilakukan agar bahan uji dapat diamati dengan baik dengan mengikis daerah batas butir dari bahan uji tersebut yang dimana memberikan efek perubahan pada struktur mikro dari bahan uji tersebut dan perubahan tersebut diakibatkan oleh sebagai berikut :

- a. Distribusi struktur mikro yang memberikan efek perbedaan warna
- b. Jenis kekerasan yang berbeda

6. Pencucian

Setelah dilakukannya beberapa proses diatas pastinya bahan uji akan kotor oleh karena itu dilakukan pencucian agar bahan uji Kembali bersih dengan menggunakan air ataupun alcohol yang dapat memberikan efek yang lebih bersih terhadap benda uji.

7. Analisa bahan uji

Untuk mendapatkan hasil pengamatan yang diinginkan dari bahan uji dilakukan pengamatan dengan menggunakan mikroskop yang dimana dilakukan identifikasi pada struktur mikro dari bahan uji tersebut.

Mikroskop yang biasa digunakan dalam pengamatan bahan uji adalah mikroskop cahaya yang dimana ada tiga bagian yang harus diperhatikan yaitu :

- a. Menggunakan lensa pemantul untuk memantulkan permukaan bahan yang diuji
- b. Menggunakan lensa objektif untuk memisahkan objek-objek bahan uji
- c. Menggunakan lensa mata untuk memperbesar objek yang diamati pada bahan uji



Gambar 2.13 Struktur mikro paduan karbon rendah

Scanning Electron Microscopy / SEM

Proses scanning electron microscopy dilakukan dengan mengamati pancaran electron dari bahan uji yang kemudian pancaran elektron ini direfleksikan ke layar televisi dengan tampilan rasio scanning dari alat scanning electron microscopy / SEM. Selain itu untuk menonaktifkan konduktivitas material dilakukan konduktif secara elektrik pada permukaan bahan uji sekitar 10 sampai 50.000 kali pada kedalaman yang cukup.



Gambar 2.14 Alat scanning (SEM)

Mulur / Creep

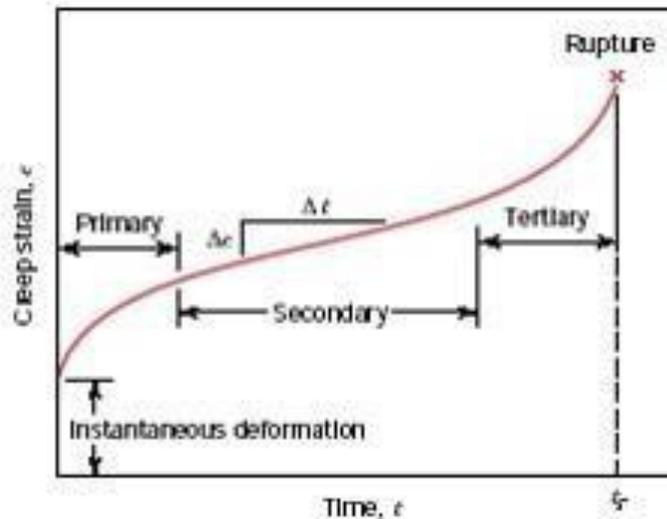
Mulur atau yang biasa disebut regangan biasanya terjadi pada logam atau baja disebabkan oleh beban yang terlalu berat dan beroperasi dalam kondisi suhu yang sangat tinggi selain itu mulur juga terjadi dikarenakan baban ataupun suhu pada saat beroperasi melebihi dari kapasitas logam atau baja pada saat dibuat pertama kali yang dapat berakibat putus pada material logam ataupun baja tersebut. Mulur ini biasa terjadi pada saat beroperasi dalam kondisi 0.4 sampai 0.6 dari titik lebur material logam ataupun baja. Untuk mengetahui sifat mulur dari logam ataupun baja dapat dilakukan 2 percobaan mulur sebagai berikut :

1. Percobaan mulur tidak sampai putus

Percobaan mulur tidak sampai putus ini dilakukan dan dilihat dari laju mulurnya untuk mengetahui bagaimana ketahanan logam terhadap beban yang berat dan kondisi yang sangat tinggi

2. Percobaan mulur sampai putus

Percobaan mulur sampai putus ini dilakukan dan dilihat dari sifat dan proses ketika logam tersebut putus yang berfungsi untuk mengetahui ketahanan mulur dari logam atau baja tersebut.



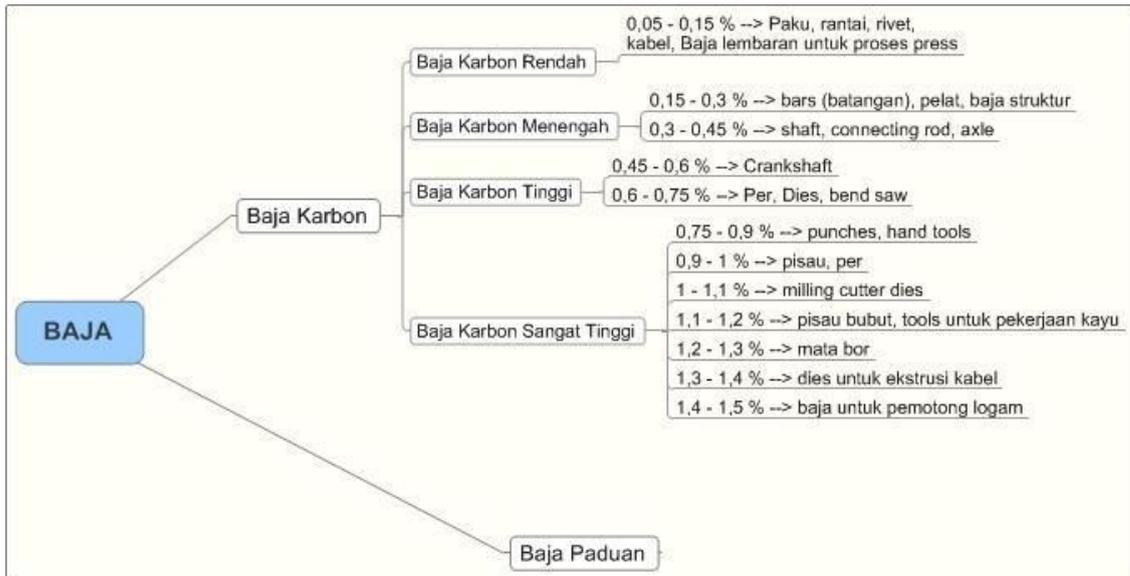
Gambar 2.15 Grafik hasil percobaan mulur

Pemilihan Paduan

Beberapa factor yang menjadi penyebab dilakukannya pemilihan paduan yang pas untuk meningkatkan kualitas baja adalah pabrikasi, kemampuan las, ketahanan pada korosi, ketahanan oksidasi dan kekuatan mulur dari baja yang akan digunakan. Penentuan dari seberapa lama baja tersebut dapat digunakan adalah dilihat dari ketahanan pecah dan ketahanan korosi dari baja terutama apabila akan diaplikasikan pada tube boiler Ultra-Supercritical.

Material baja yang akan digunakan biasanya dilihat dari hasil uji coba pada kondisi tekanan 100 MPa dan kurun waktu 100.000 jam apakah ada kegagalan yang terjadi atau tidak.

Perawatan pada permukaan baja juga tidak dapat diabaikan karena substantial dari shot peening membuat baja Cr meningkat sampai 25% dalam hal ketahanan oksidasi.

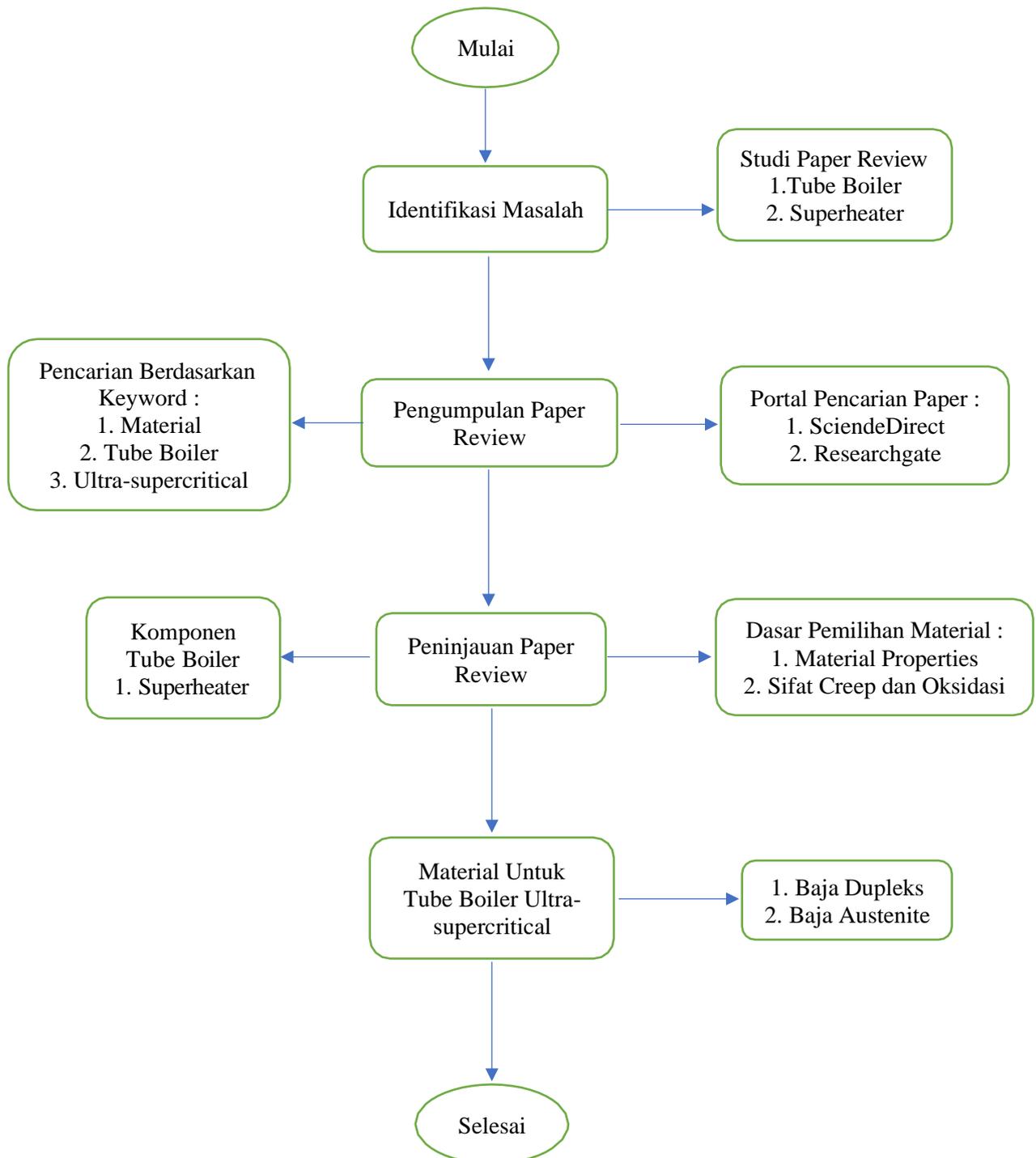


Gambar 2.16 Unsur yang terdapat pada baja karbon

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Perancangan Penelitian Diagram Alir Penelitian

Diagram penelitian ini merupakan tahap pelaksanaan penelitian yang akan dilakukan :



Jenis Penelitian

Dalam skripsi ini, jenis penelitian yang digunakan adalah studi literatur. Studi literatur pada penelitian ini dilakukan dengan cara pengumpulan jurnal-jurnal internasional dan nasional dan melakukan review pada jurnal-jurnal tersebut dengan dasar pemilihan material pada komponen superheater tube boiler bagian material properties, sifat creep dan sifat oksidasi. Data yang didapatkan dari jurnal-jurnal tersebut akan dihubungkan dan disimpulkan sebagai perbandingan baja dupleks dan baja austenit dalam pemilihan material yang cocok digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical*.

Teknik Pengumpulan Data

Data dan teori yang dikumpulkan penulis dalam penyusunan skripsi ini digunakan sebagai acuan utama dalam review dan pengambilan kesimpulan akhir. Beberapa hal yang penulis lakukan untuk mendapatkan data dan teori yang akurat adalah sebagai berikut :

1. Perkuliahan

Beberapa teori dan data yang diambil pada skripsi ini didapatkan dari materi perkuliahan yang sudah dijalani.

2. Bimbingan

Penambahan materi yang diperlukan dan pengolahan data serta perbaikan penulis dibantu oleh Dosen Pembimbing.

3. Referensi literatur

Teori yang penulis sertakan dalam skripsi ini diambil dari jurnal-jurnal yang telah dikumpulkan dan melalui internet sebagai teori pendukung.

4. Data berupa tabel dan gambar berupa kandidat paduan, sifat creep dan sifat oksidasi baja dupleks dan austenite.

Teknik Analisa Data

Dalam mengolah data dari berbagai macam jurnal tersebut, penulis mengambil benang merah dari setiap jurnal. yang dikumpulkan dan dijadikan satu sebagai hasil perbandingan dan pemilihan material yang cocok pada tube boiler

ultra-supercritical. Review dan identifikasi dari setiap jurnal-jurnal yang dikumpulkan dilakukan dengan peninjauan kembali dari latar belakang, tujuan serta metodologi yang didapat dari jurnal tersebut. Review dan identifikasi tersebut ditulis dalam bentuk poin- poin pada penyusunan proposal skripsi ini.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemilihan Material Tube Boiler dan Standar Material Boiler Berdasarkan Temperatur dan Tekanan

Komponen tube boiler dalam pemilihan material yang akan digunakan untuk tube boiler *ultra-supercritical* dalam paper review ini dilakukan pada *komponen tube boiler superheater* dengan dasar pemilihan material pada *material properties serta sifat creep dan sifat oksidasi nya* yang kemudian akan didapatkan *perbandingan material baja dupleks dan austenite yang ditarik sebagai kesimpulan dalam pemilihan material untuk tube boiler ultra-supercritical* [2] .

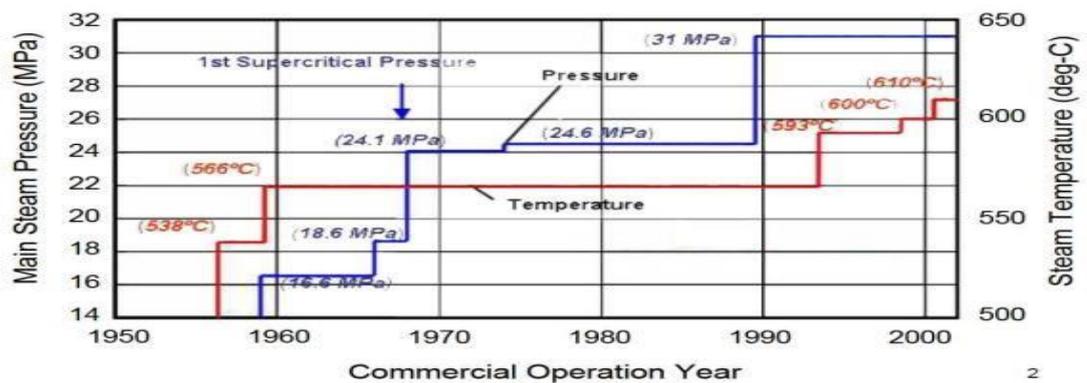
Saat ini sudah banyak pembangkit listrik tenaga uap yang dibangun untuk dapat bekerja pada kondisi suhu uap 600 °C yang dimana peningkatan pembangunan pembangkit ini harus terus ditingkatkan agar dapat beroperasi pada suhu yang ekstrim diatas 700 °C atau pembangkit listrik *ultra-supercritical* dengan mengembangkan kualitas baja yang digunakan adalah baja tahan karat dupleks dan austenit [2] .

Baja yang digunakan dalam pengembangan pembangkit ini adalah baja tahan karat yang dilihat dari ketahanannya terhadap korosi yang dimana itu dapat dilihat dari sifat penyusutan yang terdapat pada baja dupleks dan austenit. Selain itu juga dilihat dari sifat creep dan oksidasi baja-baja yang akan digunakan pada pembangkit listrik *ultra-supercritical* agar dapat beroperasi pada kondisi suhu uap diatas 700 °C [2] .

Ketahanan baja dupleks terhadap korosi sangat dipengaruhi oleh struktur mikro dari unsur campuran seperti Cr, Mo dan Ni yang terkandung didalamnya. Selain itu juga ketahanan dari baja dupleks ini dipengaruhi oleh jumlah austenit dan ferrit yang terkandung dalam baja dupleks tersebut. Fase ferrit pada baja dupleks diawali pada saat proses pengelasan dan perlakuan panas yang dimana pada saat pengelasan didapatkan proporsi fasa mendekati 1:1 dan pada panas yang diberikan dibatasi 1.5 – 2.0 kJ/mm sedangkan fase austenit terjadi pada saat proses pendinginan setelah dilakukan perlakuan panas pada suhu 1300 °C [2] .

Standar material boiler ultra-supercritical berdasarkan temperatur dan tekanan uap keluaran boiler, diketahui bahwa standar material yang digunakan pada tube boiler ultra-supercritical harus tahan terhadap kondisi suhu dan tekanan $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan 26 MPa serta tube superheater dan reheater harus memiliki properties ketahanan creep yang tinggi ($>100\text{MPa}$ atau 14.5 ksi untuk 100.000 jam) dan juga tahan terhadap steam-side-oxidation.

Jepang sudah mengembangkan teknologi boiler, turbin dan katup yang menggunakan teknologi material yang tahan terhadap suhu tinggi diatas $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ yaitu teknologi A-USC. Pengembangan ini dilakukan karena pembangkit di jepang sudah mengalami peningkatan kondisi uap seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut [3] :



Gambar 4.1 kondisi uap pembangkit di jepang

Dilihat dari suhu/tekanan yang ada pada pembangkit listrik khususnya pembangkit listrik *ultra-supercritical* pemilihan material yang sangat memungkinkan dapat dilihat dari ketahanan baja dari panas dan korosi serta sifat creep dan oksidasi nya yang akan digunakan pada pembangkit listrik *ultra-supercritical*. Baja yang paling diminati untuk digunakan adalah baja dupleks dan austenite.

Beberapa jurnal sudah ada yang membahas tentang material-material yang sangat cocok digunakan pada pembangkit listrik *ultra-supercritical* terutama baja yang akan digunakan pada bagian boiler. Material-material yang dibahas pada jurnal tersebut adalah pada baja dupleks material yang digunakan Haynes 230, Inconel 740 dan CCA 617, pada

baja austenite material yang dipilih adalah HR 6W dan Super 304.

Dibawah ini adalah aplikasi dan komposisi dari paduan [4] :

Tabel 4.1 Kandidat paduan

Paduan	Komposisi nominal	Pengembang	Aplikasi
Hayness 230	57Ni-22Cr-14W- 2Mo-La	Hayness	Tabung P, SH/RH
Inconel 740	50Ni-25Cr-20Co-2Ti- 2Nb-V-Al	Logam Khusus	Tabung P, SH/RH
CCA 617	55Ni-22Cr-3W-8Mo- 11Co-Al	VDM	Tabung P, SH/RH
HR6W	43Ni-23Cr-6W-Nb-Ti- B	Sumitomo	Tabung SH/RH
SUPER 304H	18Cr-8Ni-W-Nb-Ni	Sumitomo	Tabung SH/RH

Baja Dupleks

Cara pemilihan material baja dupleks yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* dilakukan dengan analisa dari jurnal-jurnal para peneliti yang telah melakukan pengembangan terhadap baja dupleks dilihat dari perbandingan komposisi nominal sifat baja tinggi, komposisi paduan, sifat creep, dan sifat oksidasi nya. Dari tabel 4.2 dan 4.3 para peneliti telah melakukan pengembangan pada SUPER 304H agar dapat tahan terhadap pecah creep yang diakibatkan korosi yang tinggi.

Haynes 230 merupakan solusi yang disetujui dari kode B&PVASME yang menjadi bertambah kuat karena diberikan paduan nikel. Paduan austenite yang terdapat pada HR6W adalah Ni-Fe-Cr yang dimana juga diberi tambahan Nb dan W yang menjadi efek kekuatan melalui proses presipitasi karbida.

Di bawah ini adalah perbandingan komposisi nominal, standar dan sifat baja kekuatan tinggi [5] :

Tabel 4.2 Perbandingan komposisi nominal, standar dan sifat baja kekuatan tinggi

	SUPER 304H	HR6W
Komposisi Nominal, wt-%	18Cr-9Ni-3Cu-0.5Nb	25Cr-20Ni-0.4Nb-N
Penunjukan ASME	CC2328	CC2115
Penunjukan METI Jepang	KA-SUS304J1HTB	KA-SUS310J1TB
Ukuran butir ASTM (khas)	8.5	5
Stres yang diijinkan, MPa (650/700)	78/47	71/40
Ketahanan Oksida (650/700)	19/25	2/2

Dari tabel dibawah ini terdapat komposisi paduan HR6W dan Hayness 230 [6]

Tabel 4.3 Komposisi paduan HR6W dan Hayness 230

Bahan	C	Si	Mn	Kr	Ni	W	Fe	Mo	Bersama	Lain
Tabung HR6w (Uji pabrik)	0.07	0.25	1.00	23.44	44.79	6	24.03			0.12Ti, 0.3 Nb
Tabung Hayness 230 (Nominal)	0.10	0.4	0.5	22	57	14	3*	2	5*	0.3Al, 0.02La, 0.015B*

* Nilai maksimum yang diijinkan

Baja Austenite

Cara pemilihan material baja austenite yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* dilakukan dengan analisa jurnal para peneliti yang telah melakukan pengembangan terhadap baja austenite SUPER 304H yang merupakan baja tahan karat austenitik yang dapat beroperasi pada suhu dan tekanan uap tinggi.

Baja Austenite SUPER 304H

Baja ini merupakan baja yang dimana untuk meningkatkan tahan creep didalamnya ditambahkan fase Cu, selain itu untuk meningkatkan ketahanannya terhadap kondisi suhu tinggi juga ditambahkan elemen Nb dan N kedalam komposit dari baja Super 304H ini. Dalam kondisi suhu 400 °C laju oksidasi dari baja Super 304H ini mendekati garis lurus dan ketika dalam kondisi suhu diatas 400 °C laju oksidasi dari baja ini mendekati parabola. Struktur oksidasi yang terdapat pada baja Super 304H ini adalah lapis ganda yang dimana partikel yang terdapat pada oksida luarnya longgar dan tebal sedangkan partikel oksida dalamnya berbentuk kecil dan rapat [7]

Ketahanan oksidasi dari baja Super 304H ini terhadap kondisi suhu tinggi didapat dari hasil penimbangan, yang dimana kurva kinetic oksidasi baja ini mengikuti hukum parabola. Dalam kondisi suhu 900 °C baja Super 304H ini mengalami kehilangan

oksidasi. Factor-faktor yang menyebabkan lepasnya lapisan oksida dipengaruhi oleh perubahan ketebalan oksida dan fluktuasi suhu terhadap spaling [7]

Ketika dilakukan pengujian terhadap creep terlihat ketahanan pecah dari baja Super 304H mengalami kestabilan selama jangka waktu pengujian lebih dari 50.000 jam dan dalam kondisi suhu dan tekanan 600 °C 177MPa didapat umur terpanjang dari ketahanan creep baja Super 304H ini adalah 85426.7 jam yang diklaim sangat bagus untuk kekuatan dari baja Super 304H ini [5] .

Baja Austenite TP347HFG

Baja TP347HFG ini mengandung kromium nikel yang sangat stabil yang dimana ketahanan oksidasi dan korosi pada baja ini sangat kuat karena memiliki kekuatan termal yang sangat tinggi [7]

Dalam kondisi suhu 800 °C kinetik oksidasi uap air pada baja TP347HFG ini mengikuti hukum parabola yang dimana pembentukan oksida Fe pada lapisan luar dipengaruhi oleh volatilisasi CrO_2 (OH)₂ yang menyebabkan proses oksidasi uap melambat dan ketebalan lapisan oksida tidak akan mengalami perubahan sampai keadaan oksidasi Kembali menjadi stabil dan pada waktu yang bersamaan penurunan ukuran butir menyebabkan peningkatan terhadap ketahanan oksidasi uap dari baja TP347HFG tersebut [7]

Saat dilakukan uji kekuatan mulur pada baja TP347HFG ini didapat hasil bahwa ketahanan pecah dari baja ini sangat stabil ketika proses pengujian dilakukan dalam kondisi suhu 800 °C dan dalam kurun waktu 50.000 jam lebih. Hasil dari pengujian ini maka didapat hasil umur terpanjang ketahanan baja TP347HFG ini adalah 55858.7 jam dalam kondisi suhu dan tekanan 700 °C 59 Mpa [5] .

Baja Austenite HR3C

Baja HR3C ini merupakan baja yang dimana didalamnya diberikan penambahan paduan Nb dan N yang memberikan kekuatan tahan terhadap kondisi suhu yang tinggi dan kinerja yang komprehensif.

Oksidasi HR3C pada suhu 750 °C menghasilkan hukum parabola sedikit demi sedikit yang dimana ketika uap air pecah dan mempercepat proses oksidasi paduan dan menyebabkan deviasi oksidasi kinetik HR3C dalam uap air murni diperoleh dari hukum

parabola, yang dimana matriks logam bereaksi langsung dengan udara bersuhu tinggi membentuk Fe_3HAl_4 . Hasil dari pengujian tersebut ditemukan bahwa lapisan oksida uap lateral HR3C dikembangkan menjadi empat lapisan struktur yang dimana lapisan oksida terbentuk dari Cr yang terdapat pada dasar lapisan oksida.

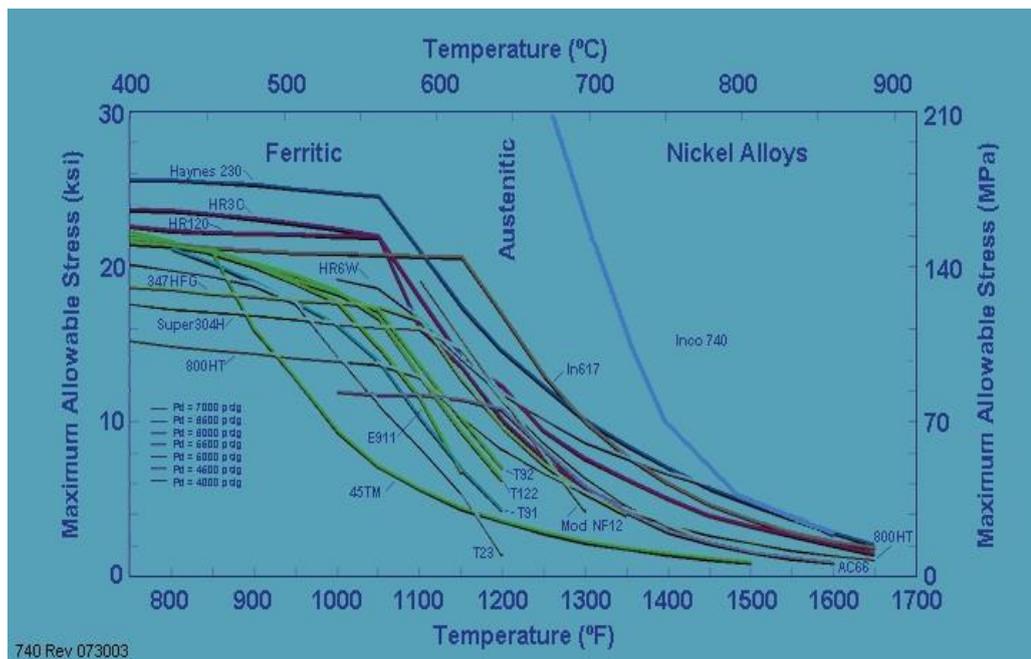
Saat dilakukan pengujian creep didapatkan hasil bahwa ketahanan terhadap pecah creep sangatlah stabil dalam pengujian di kurun waktu 50.000 jam lebih dan dapat disimpulkan bahwa Panjang umur dari baja HR3C ini terhadap pecah creep adalah 88362.7 jam dalam kondisi suhu dan tekanan $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 69 MPa [5] .

Sifat Material Baja

Pemilihan material yang akan digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* juga dilakukan dengan cara analisa dari jurnal para peneliti dilihat dari sifat material baja dupleks dan austenite yang berupa sifat creep dan sifat oksidasinya.

Sifat Creep

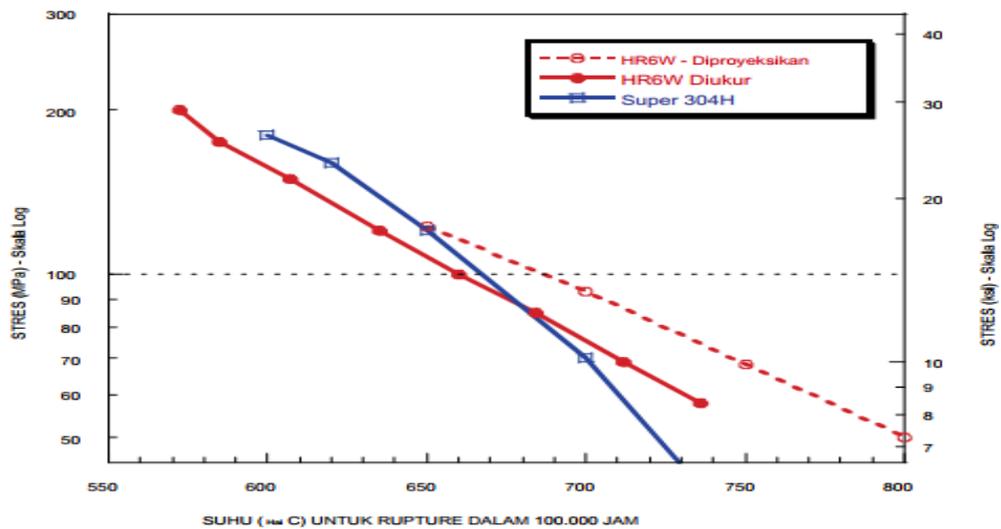
Pada gambar 4.2 diketahui bahwa paduan baja Inconel 740 dan Haynes 230 lebih tahan terhadap suhu yang tinggi jika dibandingkan dengan baja austenite.



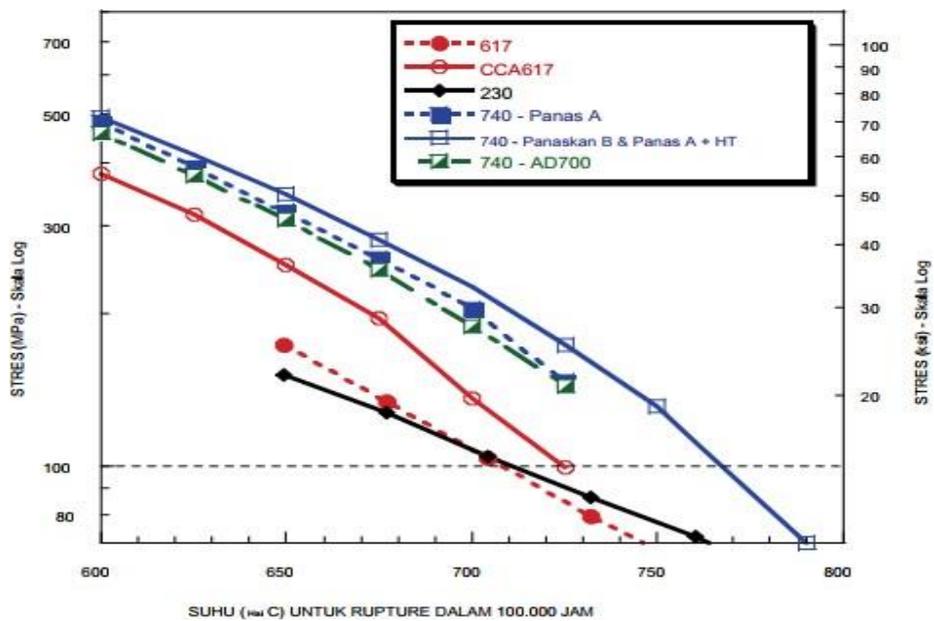
Gambar 4.2 tegangan yang diijinkan untuk berbagai kelas paduan

SUPER 304H , HR6W, Haynes 230 , CCA 617 dan Inconel 740 telah dilakukan pengujian creep selama 3000 jam lebih dan mengalami pecah pada creep seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 . Pada gambar 4.3 dapat dilihat perbandingan bahwa SUPER 304 mengalami peningkatan kekuatan pecah 100.000 jam pada suhu 675 °C sedangkan kekuatan creep HR6W lebih rendah pada suhu dibawah 675 °C. Perbandingan ini dilakukan untuk mengukur kekuatan pecah pada 100.000 jam dan diukur sebagai fungsi suhu untuk HR6W.

Gambar umur pecah baja austenite dalam 100.000 jam (ekstrapolasi berdasarkan data hingga 20.000 jam) [4] .



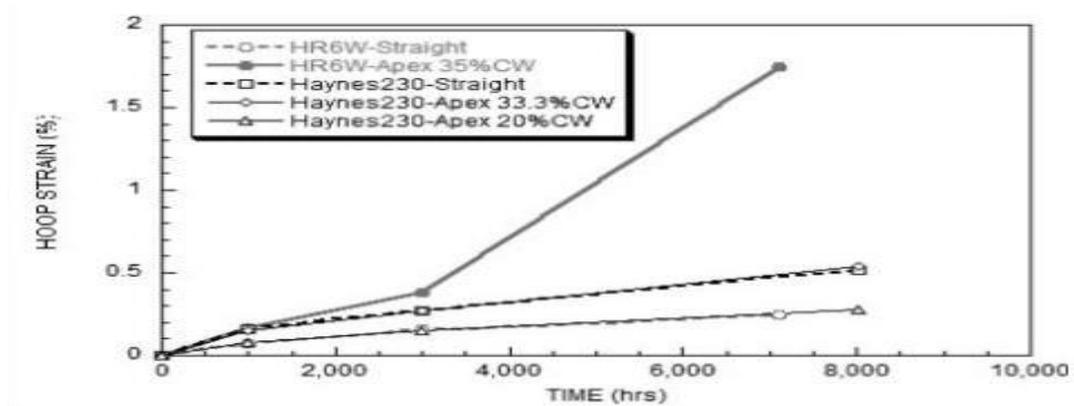
Gambar 4.3 Umur pecah baja austenite dalam 100.000 jam (ekstrapolasi berdasarkan data hingga 20.000 jam)



Gambar 4.4 Umur pecah pipa dan pelat bahan nikel dalam 100.000 jam (ekstrapolasi berdasarkan data hingga 23.000 jam)

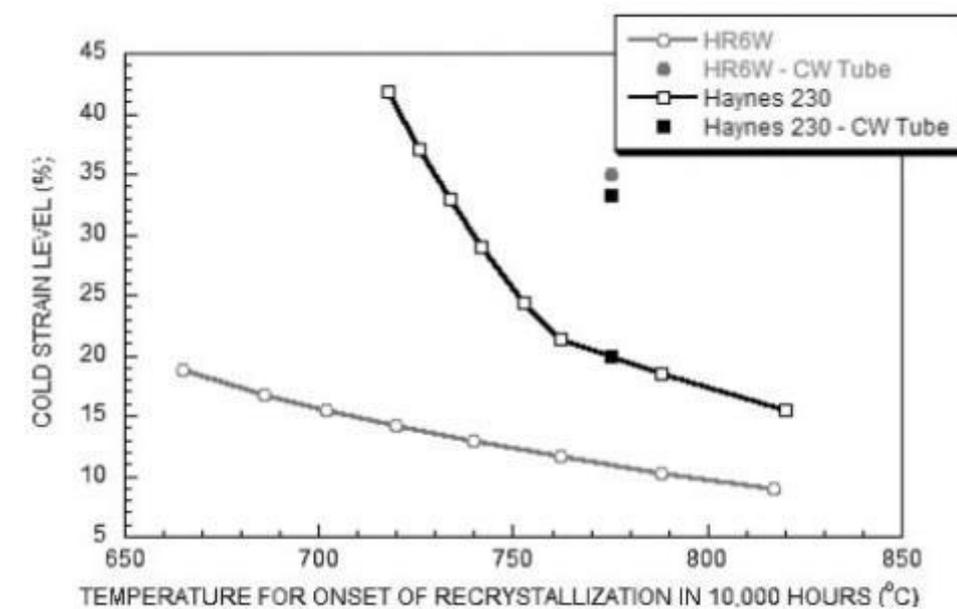
Gambar 4.4 menunjukkan kekuatan pecah yang diekstrapolasi dari 617 dan CCA617 dalam 100.000 jam. Pada kondisi suhu dan tekanan 725 °C dan 100 MPa terlihat bahwa kekuatan CCA617 lebih tinggi jika dibandingkan dengan 617. Pengujian creep yang dilakukan pada pipa dan pelat baja Inconel 740 menunjukkan variasi heat - to - heat dan heat – treatment. Dari semua data yang dilaporkan program AD 700 menunjukkan bahwa semua kekuatannya menjadi lebih baik.

Pada pengujian panas terhadap dua material dalam suhu 800 °C selama 16 jam didapat bahwa ketika heat A dijadikan sasaran perlakuan panas perilaku pecahnya mengikuti heat B walaupun heat A mengalami sedikit peningkatan daripada heat B yang dimana heat B memiliki umur pecah dalam kondisi suhu dan tekanan 760 °C 100 MPa dalam waktu 100.000 jam yang memenuhi persyaratan kekuatan agresif [4] .



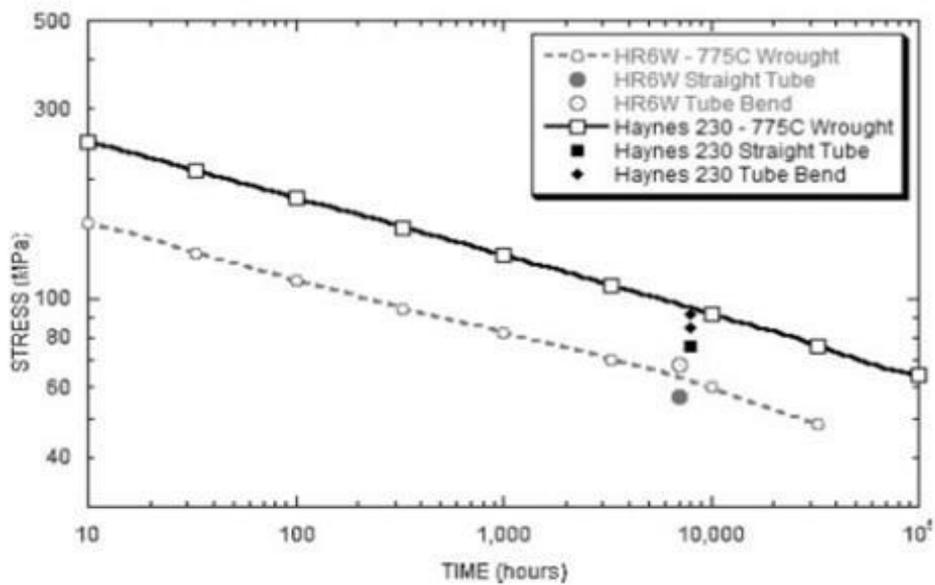
Gambar 4.5 Pengukuran regangan hoop pada HR6W dan Hayness 230

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa regangan pecah adalah 1.75% pada saat diberikan 35% kerja dingin dan hanya 0.25% jika dibandingkan dengan regangan lurus rata-rata. Pada Haynes 230 pada saat diberikan 20% kerja dingin regangan dihentikan sebelum pecah. Masing-masing tingkat creep pada HR6W dan Hayness 230 adalah 2.8×10^5 dan $5.1 \times 10^5 \text{ \% h}^{-1}$. Pada Haynes 230 tingkat creep minimumnya ketika diberikan perlakuan dingin 20% adalah 5.5×10^5 dan 2.8×10^5 [6].



Gambar 4.6 Suhu permulaan rekristalisasi saat pekerjaan dingin HR6W dan Hayness

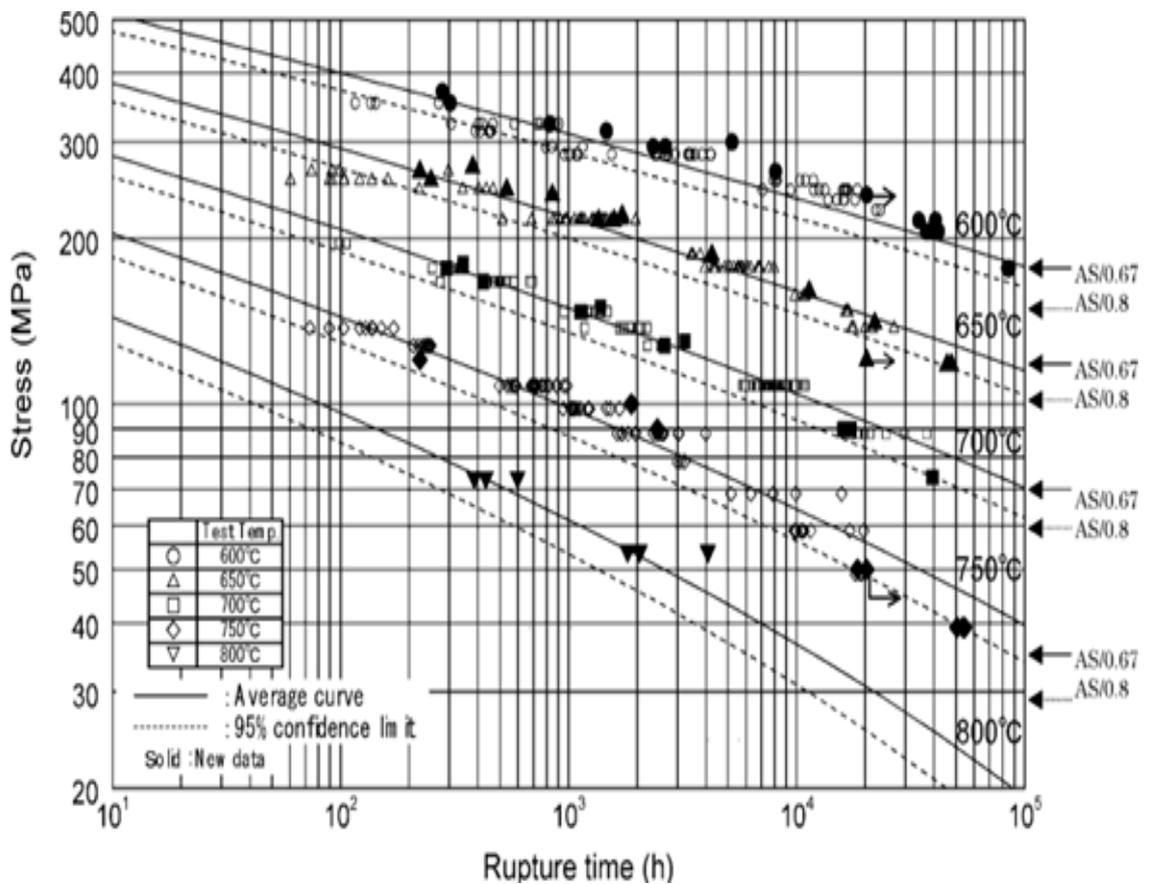
Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa tingkat regangan yang terjadi diluar permulaan rekristalisasi kedua material lebih tinggi 33.3 dan 35 % karena waktunya sudah mendekati waktu pecah dari HR6W dan Haynes 230. Pada Haynes 230 regangan tertinggi terjadi pada saat diberikan 20% kerja dingin yang dimana hal ini konsisten dengan pengamatan metalografi rekristalisasi pada kedua tabung kerja [6] .



Gambar 4.7 Kurva waktu pecah dalam suhu 775 C pada HR6W dan Haynes 230

Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa tegangan referensi yang disederhanakan untuk torus dinding tipis menunjukkan evaluasi kerusakan creep dalam tabung. Perbandingan dilakukan pada nilai-nilai yang dihasilkan dengan waktu yang dibutuhkan untuk memecah paduan pada suhu 775 °C . Hasil itu semua berdasarkan konsorsium ketel uap pembangkit *ultra-supercritical* dalam pemanasan yang lebih spesifik [6] .

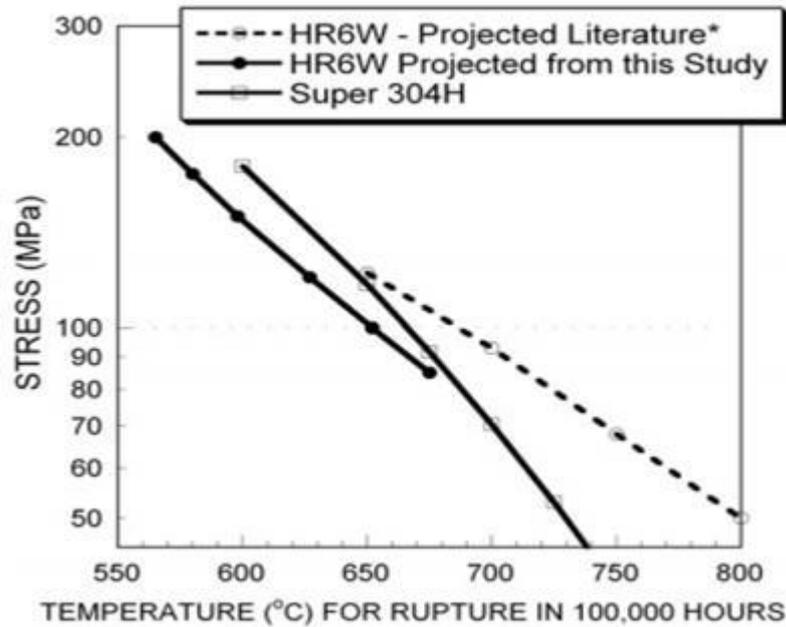
Baja SUPER 304H pada Gambar 4.8 dapat dilihat bagaimana retak mulurnya yang dihitung dengan metode parametrik Larson-Miller dalam kondisi suhu 600-800 °C pada kurva minimum 95% .kekuatan stabil baja SUPER 304H dapat dilihat dari kestabilannya dalam waktu 50.000 jam lebih yang dimana ketahanan pecah creep terlama terjadi dalam suhu dan tekanan 600 °C 177MPa adalah 85426.7 jam [5] .



Gambar 4.8 Sifat retak creep SUPER 304H

Untuk mendapatkan kekuatan tahan creep yang lebih telah dihitung dengan metode parametrik Larson-Miller dengan cara melakukan ekstrapolasi dari data retak creep 100.000 jam yang dapat dilihat pada Tabel 4.4 [5].

Gambar 4.9 dibawah dapat dilihat bahwa dalam kondisi suhu dan tekanan 675 °C 110 MPa yang terjadi adalah peningkatan suhu dan stress nya berkurang dan membuktikan bahwa keunggulan kekuatan tahan creep HR6W lebih unggul daripada Super 304H, tetapi pada saat kondisi tekanan 85MPa baja Super 304H lebih unggul daripada baja HR6W [8].



Gambar 4.9 Ekstrapolasi kekuatan pecah 100.000 jam baja HR6W dan SUPER 304H

Tabel 4.4 Urutan kekuatan tahan creep di ekstrapolasi dalam 100.000 jam tekanan 100 MPa

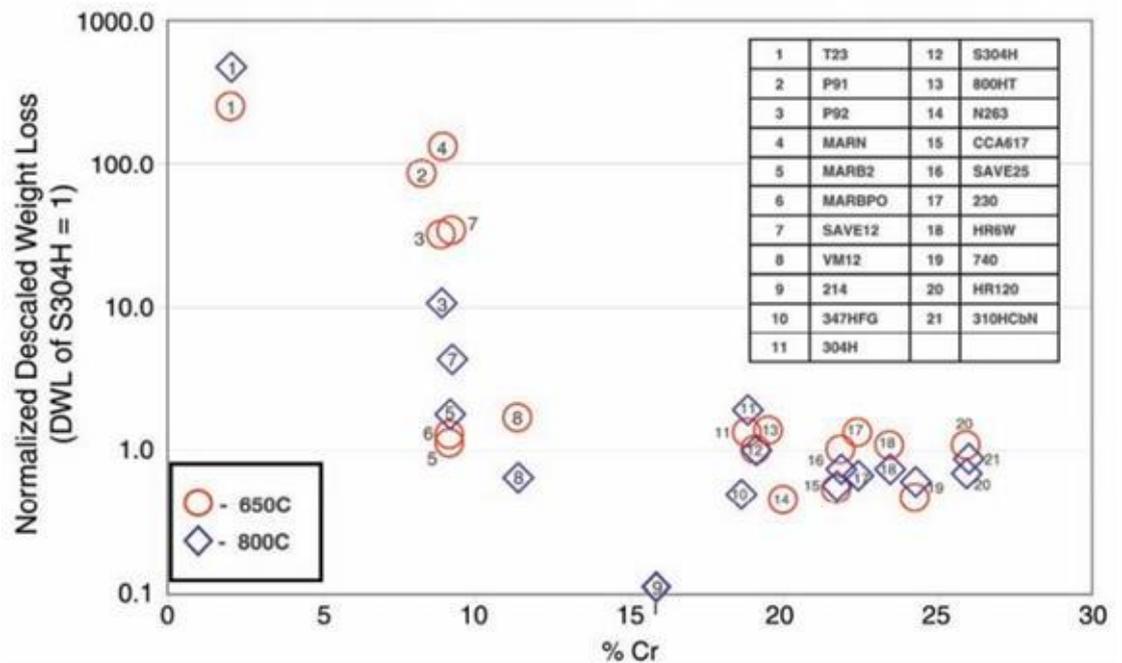
No	Paduan Material	Suhu (°C)
1	Inconel 740	775
2	CCA 617	725
3	SUPER 304H	665
4	HR6W	655

4.2.2. Sifat Oksidasi

Dalam mengatasi masalah oksidasi biasanya jenis baja yang lebih baik adalah baja ferrit dibandingkan baja austenite karena konduktivitas termal dan koefisien muai (CTE) dari baja ferrit lebih tinggi dibandingkan baja austenite. Cara lain yang biasa digunakan untuk mengatasi masalah oksidasi ini adalah dengan membuat desain boiler yang lebih canggih, pemilihan bahan boiler dan cara pengoperasian boiler yang harus lebih diperhatikan.

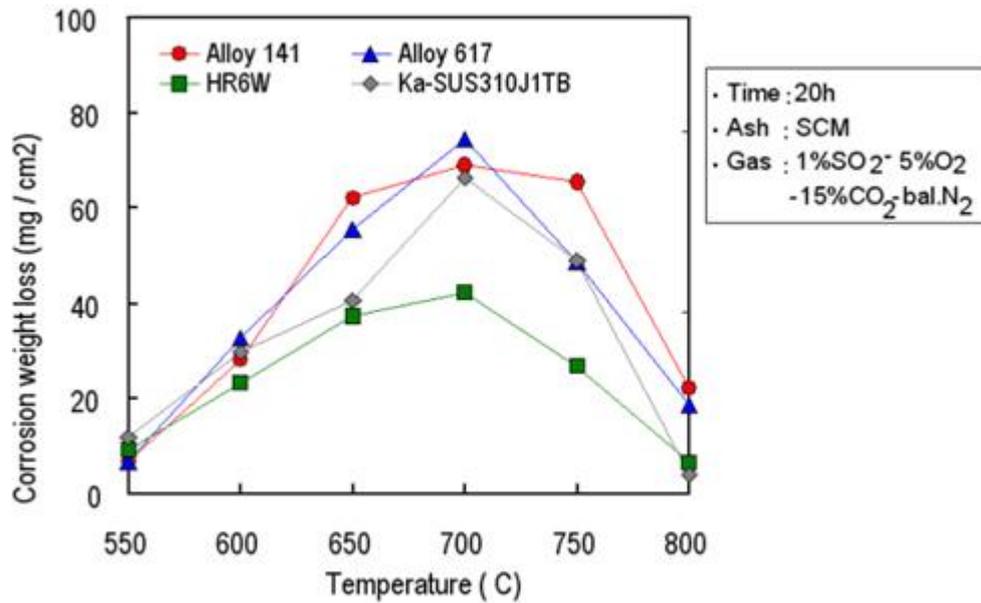
Gambar 4.10 dibawah dapat dilihat bahwa dalam pengujian 650 dalam kondisi suhu 650 °C dengan tekanan 1 atm setelah level ambang mencapai 10% maka level Cr

tidak berpengaruh terhadap kerentanan oksidasi [4] .



Gambar 4.10 Kehilangan berat sampel setelah oksidasi sisi uap pada kondisi suhu 800 C dalam waktu 1000 jam

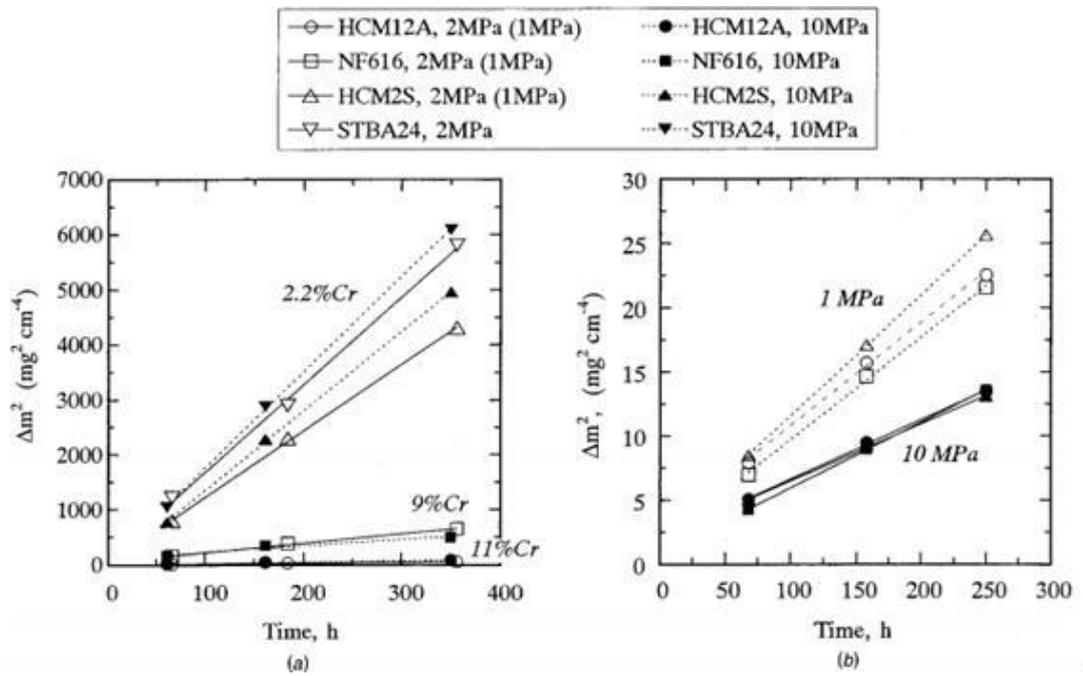
Pengujian oksidasi dilakukan dalam kondisi suhu 600 °C pada tekanan (1 dan 17 atm) ; 700 °C (17 atm) ; dan 800 °C (1 dan 17 atm). Dari pengujian yang dilakukan didapat bahwa terjadi kenaikan berat/kehilangan logam terendah pada dua baja ferrit yaitu MARB2 dan VM12 dan 2-9 % baja lainnya mengalami oksidasi yang cepat. Penurunan berat pada baja ferrit juga menyebabkan oksidanya menjadi spall.



Gambar 4.11 hubungan berat korosi dan suhu

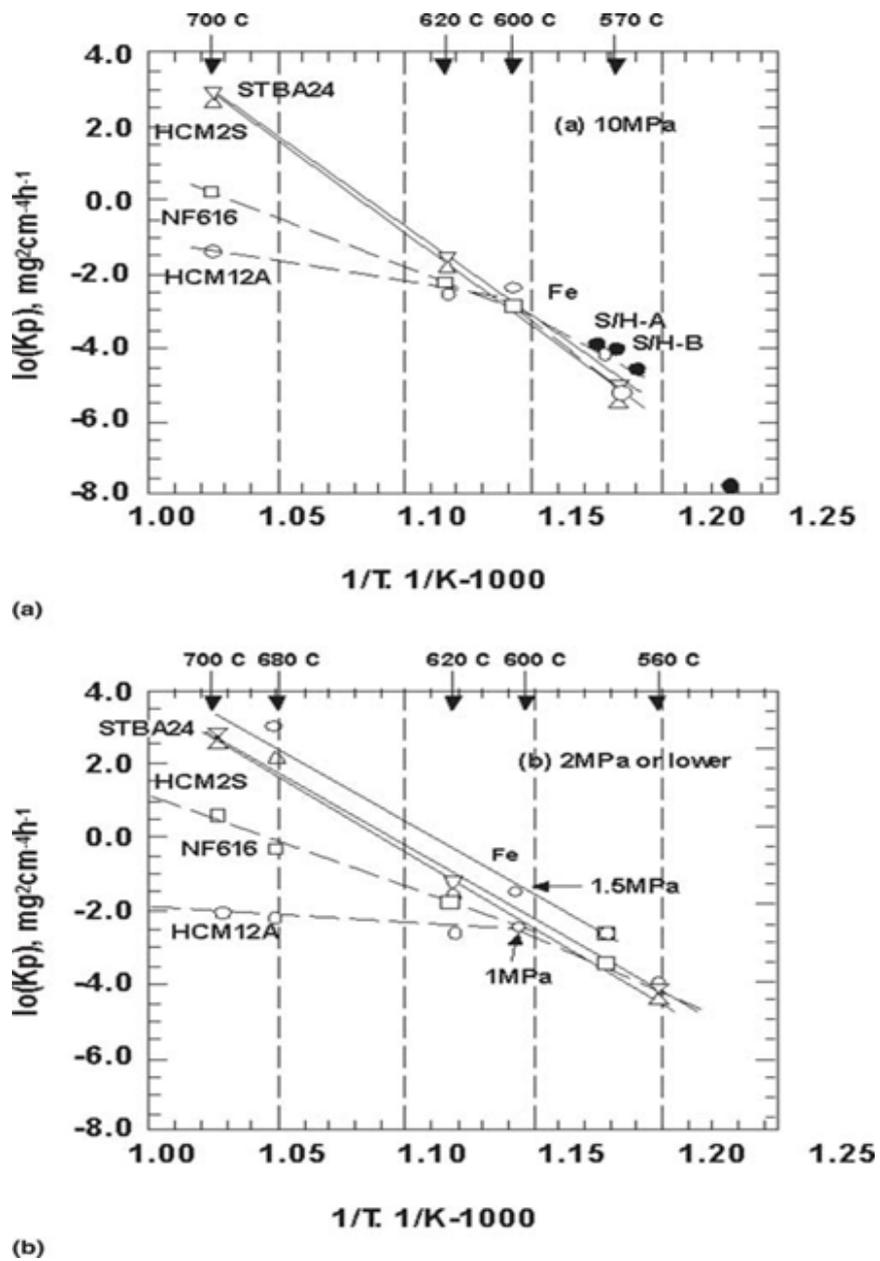
Pada boiler pembangkit listrik tenaga *ultra-supercritical* yang beroperasi pada suhu 700 °C terdapat hal yang dapat menyebabkan korosi, oleh sebab itu paduan baja seperti Fe – Ni dan Ni dijadikan bahan baja dalam uji korosi laboratorium di Jepang untuk digunakan sebagai bahan baja yang akan dipakai pada boiler pembangkit listrik Ultra-Supercritical.

Pada gambar 4.11 di atas dapat dilihat bahwa dalam kondisi suhu uap 600 dan 750 °C hubungan antara penurunan berat bahan dan suhu 3Fe(SO₄)₃ ada dalam keadaan cair. Dari gambar 4.13 dapat dilihat bahwa dalam kondisi suhu 700 °C pengaruh laju oksidasi sangat sedikit dan itu juga bergantung pada jenis baja. Begitu juga dengan sebaliknya dalam kondisi uap 600 °C pengaruh oksidasi bergantung pada tekanan uap dan material kecil. Efek laju oksidasi yang terjadi dipengaruhi oleh parameter seperti temperature, jenis baja, komposisi kimia dan tekanan [3].



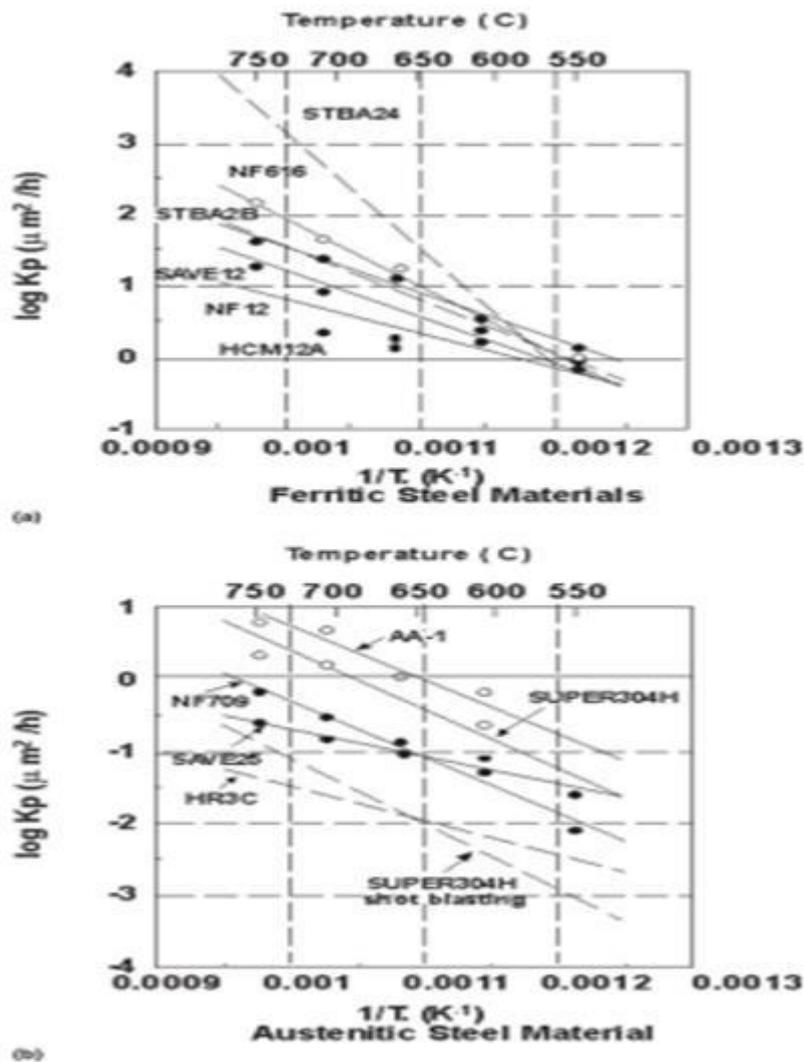
Gambar 4.12 Perilaku penambahan berat dalam kondisi suhu 600 dan 700

Gambar 4.12 diatas dapat dilihat bahwa dalam kondisi 600 dan 700 °C kuadrat pertambahan bobot bertambah secara linear sejalan dengan waktu yang berarti kinetika oksidasi sampel mengikuti hukum laju parabola [9] .



Gambar 4.13 Plot arrhenius K_p diukur pada tekanan 2 dan 10 MPa atau dibawah 2%

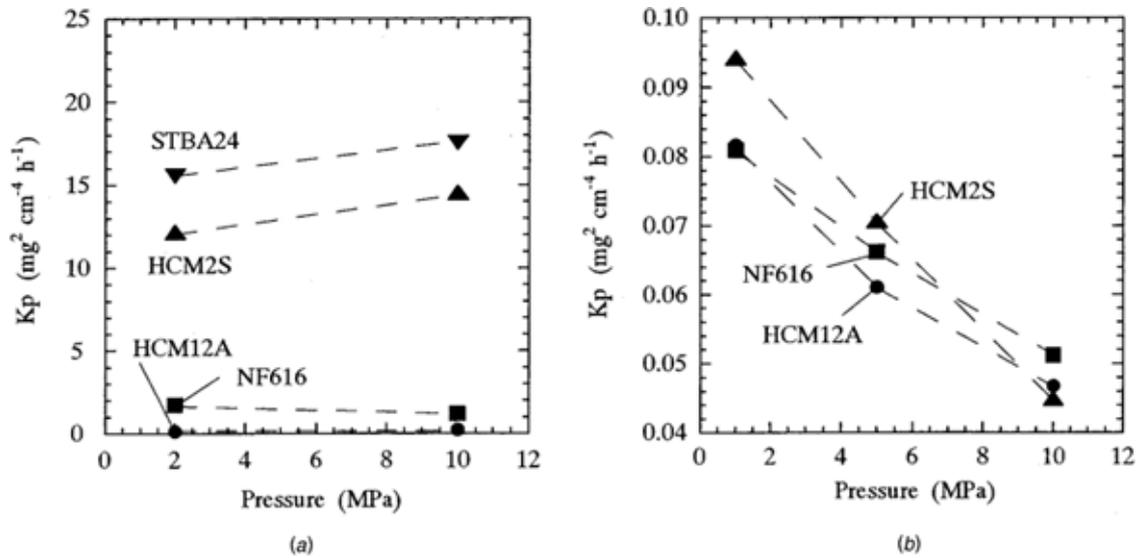
Gambar 4.13 diatas dapat dilihat bahwa hanya dalam kondisi suhu diatas 600 °C level Cr ditandai yang dimana efek tersebut relative marjinal terhadap tekanan uap [10].



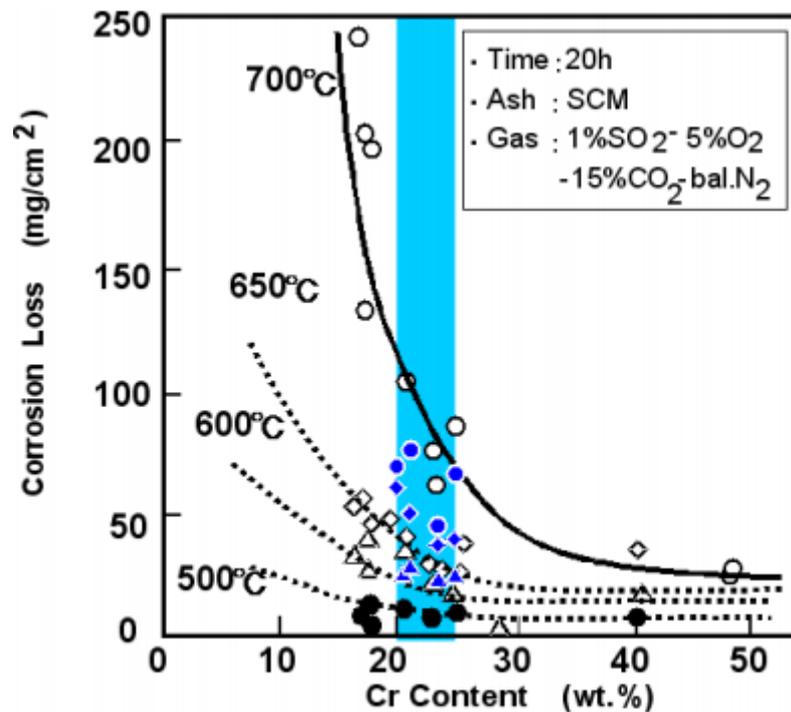
Gambar 4.14 Laju pertumbuhan oksidasi uap K_p terhadap suhu

Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa pengaruh tekanan pada laju oksidasi tidak sebesar pengaruh suhu dan jenis baja dan efek tekanannya sangat jelas terlihat. Sebaliknya dalam kondisi uap 620°C tidak ada ketergantungan pada tekanannya. Dalam kondisi suhu 600°C saat tekanan air dinaikkan menjadi 10MPa nilai K_p nya berkurang setengah dari semua baja yang diuji sedangkan dalam kondisi suhu 700°C tidak berpengaruh apa-apa pada tekanan efeknya. Dalam kondisi suhu 570°C tekanan yang terjadi sedikit lebih jelas daripada dalam kondisi suhu 600°C . percobaan yang dilakukan ini hanya mencakup sepertiga dari tekanan dari desain yang biasa digunakan pada pembangkit listrik Ultra-Supercritical yang dimana dilakukan pada tekanan 10MPa dan dapat ditarik kesimpulan dari seluruhnya bahwa efek tekanan yang terjadi kecil atau bahkan negatif. Tekanan uap

yang tinggi tidak mempengaruhi cepatnya oksidasi yang terjadi jika dilihat dari sudut pandang teknik [10].



Gambar 4.15 K_p di plot sebagai tekanan dalam suhu 600 dan 700

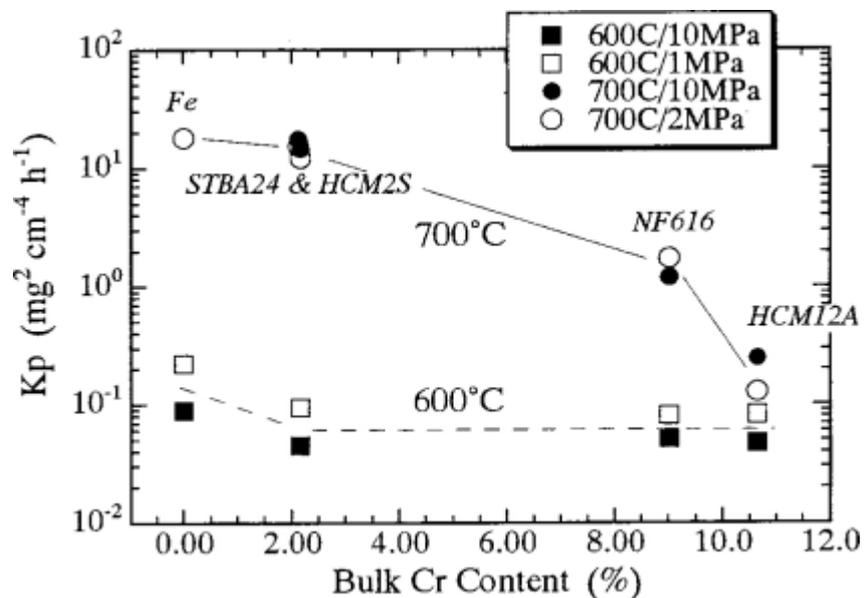


Gambar 4.16 Hubungan penurunan berat korosi dan kandungan Cr

Gambar 4.17 dan 4.18 dibawah dapat dilihat bahwa kadar krom tidak berpengaruh besar terhadap korosi dalam kondisi suhu rendah dan dalam kondisi suhu tinggi kadar

kromium tidak begitu signifikan. Dalam kondisi suhu 700 °C paduan Fe – Ni memiliki ketahanan korosi yang sama dengan paduan 25 Cr – 20 Ni yang telah digunakan dalam kondisi suhu 600 °C pada boiler pembangkit listrik tenaga *ultra-supercritical* [9] [3] .

Laju oksidasi terlihat lebih jelas pada keadaan suhu yang tinggi dengan dipengaruhi oleh ketergantungan material. Pada gambar 4.19 dapat dilihat bahwa dalam kondisi suhu 600 dan 700 °C konstanta laju parabola Kp berfungsi sebagai pemberi kontribusi terbesar kepada ketahanan baja terhadap oksidasi. Dalam kondisi suhu 600 °C dan selama rentang 2.2 – 11 % kandungan Cr dalam baja tidak berpengaruh terhadap konstanta parabola Kp. Berbeda dengan dalam kondisi suhu 600 °C , Kp mengalami penurunan dengan kandungan dari Cr yang meningkat dalam kondisi suhu 700 °C . Perbedaan yang signifikan terjadi pada nilai Kp yang ada pada baja HCM12A dan baja NF616. Yang memberikan ketahanan oksidasi pada baja juga adalah Si yang dimana kandungan Si yang terkandung pada kedua baja tersebut jumlahnya sama.. Ketahanan oksidasi yang lebih tinggi bisa terdapat pada baja HCM12A dengan penambahan 2% Cr dibandingkan baja NF616 [9] .



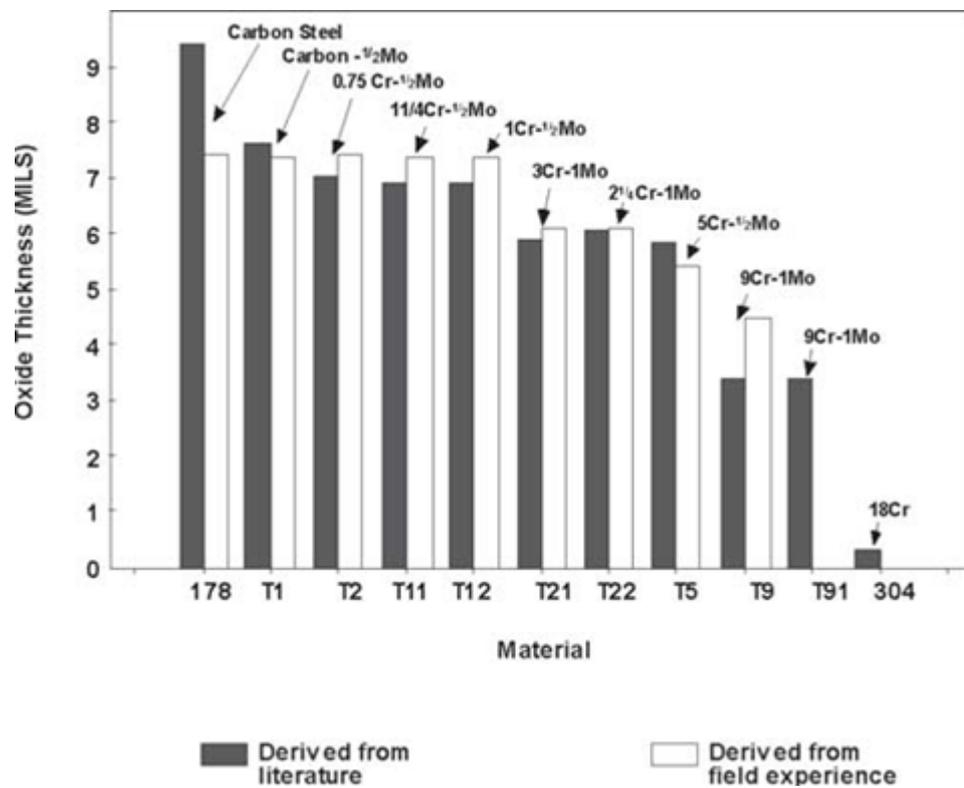
Gambar 4.17 Ketergantungan material konstanta laju oksidasi, Kp untuk kondisi suhu 600 dan 700

Dilakukan percobaan laboratorium terhadap baja CrMo dengan tabung boiler yang rusak. Dalam percobaan ini nilai skala pada baja CrMo diturunkan 2-1/4 Cr – 1Mo

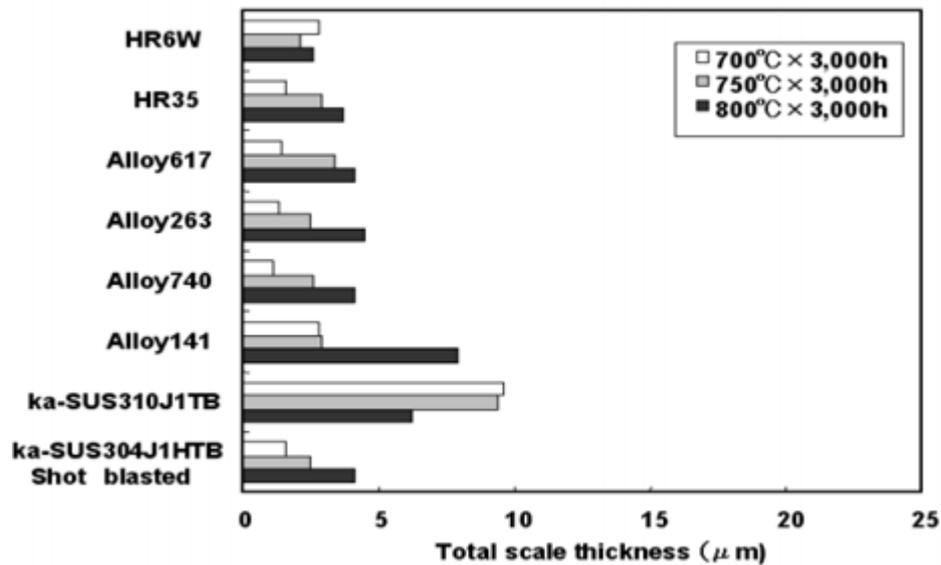
yang dimana indeks yang dimiliki adalah satu. 9% factor skala Cr yang didapat adalah 2.5 yang membuat efek Cr ini menjadi konsisten dengan hasil yang lainnya.

Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa yang menjadi tolak ukur penskalaan relative adalah 2-1/4 Cr – 1Mo [10] .

Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa ketebalan skala paduan Ni lebih kecil daripada skala 25 Cr yang dimana itu ditunjukkan sebagai perbandingan ketebalan skala oksida total dari kandidat paduan yang diuji dalam kondisi suhu mulai dari 700, 750 sampai 800 °C selama rentang waktu 3000 jam [3] .



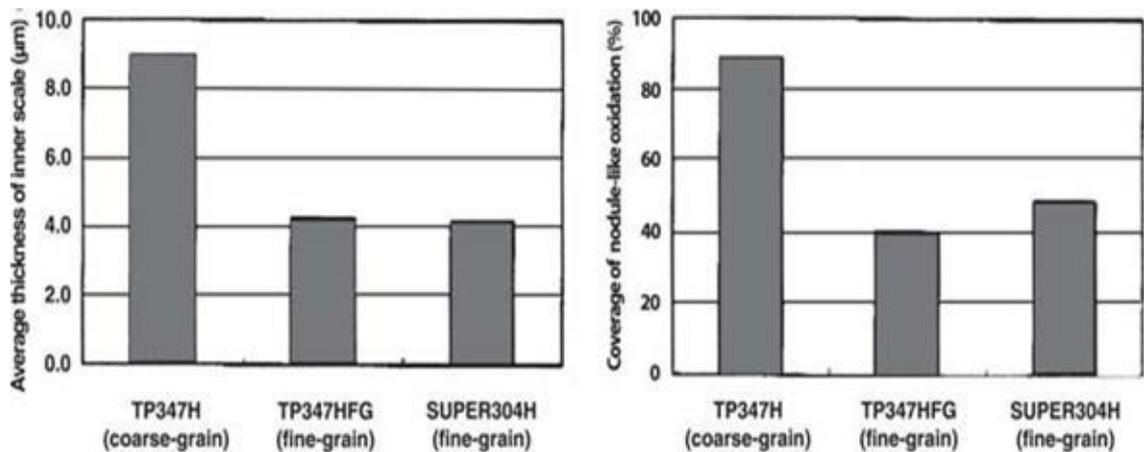
Gambar 4.18 Perkiraan ketebalan oksida dari berbagai paduan tabung yang dibuat dengan menggunakan literature dan koefisien paduan yang diturunkan dari lapangan



Gambar 4.19 Perbandingan ketebalan skala total untuk kandidat paduan boiler A pembangkit listrik ultra-supercritical

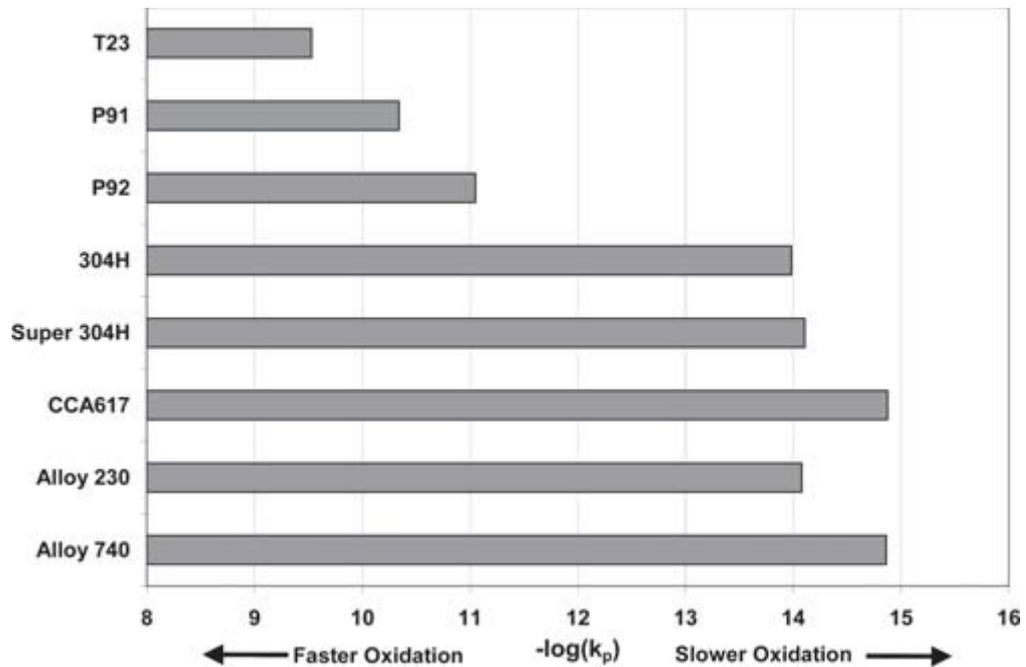
Di Jepang telah dilakukan teknik tembakan peledakan pada baja austenite dengan penambahan Cr sebanyak 18 sampai 20 % yang dimana teknik ini dapat menambah ketahanan baja terhadap oksidasi hingga dalam kondisi suhu 700 °C jika dibandingkan dengan ketahanan baja HR3C yang sudah terkandung 25 % Cr. Oleh sebab itu Jepang dapat mengklaim bahwa baja SUPER304H dapat digunakan dalam boiler pembangkit listrik *ultra-supercritical* dengan diberikan teknik ledakan tembakan pada baja yang akan digunakan untuk boiler pembangkit listrik *ultra-supercritical*. Klaim teknik ini dipastikan dengan telah dilakukannya teknik ini pada boiler USC yang telah dicoba selama 50.000 jam dan sudah dilakukan di beberapa pabrik [3] .

Untuk teknik penembakan peledakan ini agar dapat bertahan diatas kondisi suhu diatas 700 °C perlu dilakukan kombinasi dari ukuran butiran halus dan peledakan tembakan. Kombinasi dari penghalusan butiran dengan shot peening dilakukan dalam kondisi suhu diatas 700 °C dengan konstan agar mendapat hasil yang memuaskan dan dapat bertahan diatas suhu 700 °C saat boiler USC beroperasi, selain itu perawatan preoksidasi juga dapat menambah ketahanan baja terhadap oksidasi. Hasil ini dapat dilihat dari gambar 4.20 dibawah ini [10] :



Gambar 4.20 Hasil uji oksidasi laboratorium dari baja tahan karat austenitik butiran halus dan butiran pucat pada kondisi suhu 750 C

Pada dasarnya dengan dilakukannya uji coba laboratorium adalah untuk mendapatkan hasil terbaik dari peringkat paduan dan mengetahui pengaruhnya terhadap kinerjanya. Disebabkan oleh banyaknya perbedaan hasil dari banyaknya jurnal sehingga sangat sulit untuk mendapatkan hasil yang bisa dikolaborasi dari tiap-tiap studi literatur jurnal. Namun hasil dari semua itu bisa dilihat dari gambar 4.21 dibawah ini [10] :



Gambar 4.21 Kandungan laju oksidasi uap ntuk berbagai baja boiler

Dalam pengujian yang dilakukan terhadap oksidasi dengan suhu 650 °C dalam durasi waktu 4000 jam didapat hasil bahwa baja ferrit mengalami kehilangan massa yang relative rendah dan spall juga mengalami penurunan terendah, buktinya dapat diamati pada T23 T91 dan T92. Sedangkan diantara baja ferrit dan dua baja lainnya yaitu baja MARB2 dan VM12 mengalami perilaku oksidasi terbaik dan semua baja yang mengandung Cr 2-9 % mengalami oksidasi yang parah. Baja yang di krom kelihatannya memiliki kinerja yang lebih baik daripada baja ferrit yang tidak dilapisi tetapi tidak sebaik baja austenit [10] [9] .

Dari tabel 4.5 dibawah ini dapat dilihat urutan ketahanan oksidasi dari ketebalan scale material-material yang sudah diuji.

Tabel 4.5 Perbandingan ketebalan scale dari beberapa material selama 3000 jam

No.	Paduan Material	Suhu(°C)	Ketebalan scale(µm)
1	Inco 740	700	1
		750	3
		800	4
2	CCA 617	700	1
		750	4
		800	5
3	HR6W	700	4
		750	3
		800	4
4	SUPER 304H	700	10
		750	10
		800	6

Peringkat paduan baja adalah (HCM12 , 347HFG) , 321H dan 9Cr dan diketahui bahwa 347HFG setara dengan HCM 12 dan lebih unggul daripada baja 321H dan baja 9Cr.

Ketebalan oksida pada baja diukur dari suhu maupun logam yang sudah dinaikkan menjadi 700 °C. Baja austenit NF709 , HR3C , AC66 dan HR6W digunakan untuk meminimalisir ketebalan dari oksida. Tabel 2.4.7 dibawah ini memperlihatkan ketebalan oksida.

Tabel 4.6 dibawah ini menunjukka ketebalan oksidasi sisi uap yang diukur dalam uji coba pabrik [10] .

Tabel 4.6 Ketebalan oksidasi sisi uap yang diukur dalam uji coba pabrik

Paduan	Cr,%	Pembangkit listrik	Uap T (logam T), ° C	Waktu pemajanan, h	Ketebalan oksida, µm
T91	8-9.5	Wilhelmshaven	600-605 (621-636)	11.000	330
E911	8.5-9.5	Wilhelmshaven	600-605 (621-636)	11.000	460
NF616	8.5-9.5	Mizushima 2	(545)	10.149	105
NF616	8.5-9.5	Wilhelmshaven	600-605 (621-636)	11.000	325
HCM12	11-13	Mizushima 2	(545)	10.149	60
Esshete 1250	14-16	Wilhelmshaven	600	12.463	40-60
Esshete 1250	14-16	North Wilford	(660)	12.719	100-148
Esshete 1250	14-16	Skelton Grange	(633-677)	6.840	200-230
1.4910	...	Wilhelmshaven	600	12.463	909-120
Super 304H	17-19	Mizushima 2	(565)	10.149	40-50
NF709	19-22	Mizushima 2	(565)	10.149	20-25
HR3C	24-26	Mizushima 2	(565)	10.149	30
AC66	26-28	Wilhelmshaven	600	12.463	Dapat diabaikan

4.3 Ringkasan

Dari hasil analisa para peneliti dalam jurnal-jurnal internasional yang telah melakukan pengembangan pada baja dupleks dan austenite maka diketahui bahwa material-material yang lebih tepat untuk digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* adalah baja dupleks yang terdiri dari Hayness 230, Inconel 740 dan CCA 617 dan baja austenite yang terdiri dari HR6W dan SUPER 304.

Hasil tersebut dapat disimpulkan karena Hayness 230 pada tabel 4.1 kandidat paduan nya memiliki komposisi nominal 57Ni-22Cr-14W-2Mo-La, Inconel 740 pada kandidat paduan memiliki komposisi nominal 50Ni-25Cr-20Co-2Ti-2Nb-V-Al serta CCA 617 pada kandidat paduan memiliki komposisi nominal 55Ni-22Cr-3W-8Mo-11Co-Al yang diaplikasikan pada tabung P, SH / RH. Hayness 230 adalah solusi padat yang telah disetujui kode B&PV ASME yang diperkuat dengan paduan berbasis nikel.

Jika dilihat dari sifat creep nya maka dapat disimpulkan bahwa paduan baja dupleks Inconel 740 dan Hayness 230 memiliki kemampuan suhu yang jauh lebih tinggi dalam urutan yang lebih rendah dibandingkan dengan baja austenite yang dimana hal tersebut ditunjukkan pada gambar 4.2 yang menunjukkan tegangan actual pada beberapa tekanan uap.

Jika dilihat dari sifat oksidasi nya dan ditinjau dari ketebalan scalenya maka dapat disimpulkan bahwa baja paduan yang memiliki ketahanan oksidasi mulai dari urutan yang paling tinggi sampai urutan paling rendah adalah Inconel 740, CCA 617, HR6W dan SUPER 304H.

Tabel 4.7 Perbandingan material baja dupleks dan austenite

No	Material	Sifat Creep	Sifat Oksidasi	Kesimpulan
1.	Hayness 230	Tahan terhadap cree, rekristalisasi tidak mempengaruhi penurunan creep	Kandungan Cr mempengaruhi ketahanan oksidasi	Sifat creep dan oksidasi baik, dapat digunakan untuk komponen superheater

No	Material	Sifat Creep	Sifat Oksidasi	Kesimpulan
				tube boiler ultra- supercritical
2.	Inconel 740	Tahan terhadap creep	Kandungan Cr mempengaruhi ketahanan oksidasi	Sifat creep dan oksidasi baik, dapat digunakan untuk komponen superheater tube boiler ultra-supercritical
3.	CCA 617	Ketahanan creep tinggi pada suhu dan tekanan 725 °C 100 MPa	Laju oksidasi dipengaruhi temperatur, jenis baja, komposisi kimia dan tekanan	Sifat creep dan oksidasi nya baik, dapat digunakan untuk komponen superheater tube boiler ultra-supercritical
4.	HR6W	Perilaku creep dipengaruhi interaksi dislokasi endapan dan laju difusi yang relatif lambat	Laju oksidasi dipengaruhi temperatur, jenis baja, komposisi kimia dan tekanan	Sifat creep dan oksidasinya baik, dapat digunakan untuk komponen superheater tube boiler

No	Material	Sifat Creep	Sifat Oksidasi	Kesimpulan
				ultra-supercritical
5.	SUPER 304	Kekuatan pecah creep stabil pada suhu 600-800 °C	Teroksidasi 100 pada suhu 900 0C	Sifat creep dan oksidasi nya baik, dapat digunakan untuk komponen superheater tube boiler ultra-supercritical

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi literatur jurnal-jurnal yang penulis paparkan dalam skripsi ini maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Cara pemilihan material untuk tube boiler ultra-supercritical dilakukan dengan cara melihat sifat creep dan oksidasinya yang dimana baja dupleks dan austenite dapat digunakan untuk tube boiler ultra-supercritical dan Hayness 230 adalah solusi padat yang telah disetujui kode B&PV ASME yang diperkuat dengan paduan berbasis nikel
2. Material properties dari baja dupleks Hayness 230 adalah material yang tepat digunakan pada tube boiler *ultra-supercritical* karena kandidat paduannya memiliki komposisi nominal 57Ni-22Cr-14W-2Mo-La dan material properties dari baja austenite sendiri memiliki komposisi nominal 18Cr-8Ni-W-Nb-Ni.

Saran

Berdasarkan peninjauan dari studi literatur yang telah dilakukan, maka penulis dapat memberikan saran sebagai berikut :

1. Dapat melakukan penelitian yang lebih lanjut terhadap baja selain dupleks, austenite dan ferrit yang dapat digunakan dan diaplikasikan pada tube boiler Ultra-Supercritical.
2. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai Remaining Life Assessment pada baja austenite yang dilihat dari pengujian creep dan oksidasi yang dapat diaplikasikan pada tube boiler Ultra-Supercritical.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. I. Raufi and A. Setiyawan, “Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Supercritical pada Perangkat Lunak Cycle-Tempo dengan Analisa Variasi Beban,” *Repos. ITS*, p. 92, 2016, [Online]. Available: http://repository.its.ac.id/76170/1/2112100108-Undergraduate_Thesis.pdf.
- [2] F. Lin, S. Cheng, and X. Xie, “Ultrasupercritical power plant development and high temperature materials applications in China,” *Energy Mater. Mater. Sci. Eng. Energy Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 201–207, 2008, doi: 10.1179/174892408X12590734881063.
- [3] Y. Fukuda, “Development of advanced ultra supercritical fossil power plants in Japan: Materials and high temperature corrosion properties,” in *Materials Science Forum*, 2011, vol. 696, pp. 236–241, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.696.236.
- [4] R. Viswanathan, J. Tanzosh, B. Vitalis, and R. Power, “U . S . Program on Materials Technology for Ultrasupercritical Coal-Fired Boilers,” 2008.
- [5] A. Iseda, H. Okada, H. Semba, and M. Igarashi, “Long term creep properties and microstructure of SUPER304H, TP347HFG and HR3C for A-USC boilers,” *Energy Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 199–206, 2007, doi: 10.1179/174892408x382860.
- [6] J. P. Shingledecker, “Creep rupture behaviour and recrystallisation in HR6W and Haynes alloy 230 cold bent boiler tubing for ultrasupercritical steam boiler applications,” *Energy Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 235–240, 2007, doi: 10.1179/1174892408x383094.
- [7] S. R. Tubes, “Research Progress on High-temperature Oxidation of Austenitic Stainless Steel for Ultra-superCritical Boilers Research Progress on High-temperature Oxidation of Austenitic Stainless Steel for Ultra-superCritical Boilers,” 2020, doi: 10.1088/1757-899X/735/1/012008.
- [8] J. P. Shingledecker and N. D. Evans, “Creep-rupture performance of 0.07C-23Cr-45Ni-6W-Ti,Nb austenitic alloy (HR6W) tubes,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 87, no. 6, pp. 345–350, 2010, doi: 10.1016/j.ijpvp.2010.03.011.
- [9] Y. S. Yi, Y. Watanabe, T. Kondo, H. Kimura, and M. Sato, “Oxidation rate of advanced heat-resistant steels for ultra-supercritical boilers in pressurized superheated steam,” *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 123, no. 3, pp. 391–397, 2001, doi: 10.1115/1.1373656.
- [10] R. Viswanathan, J. Sarver, and J. M. Tanzosh, “Boiler Materials for Ultra-Supercritical Coal Power Plants — Steamside Oxidation,” vol. 15, no. June, pp. 255–274, 2006, doi: 10.1361/105994906X108756.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

a. Data Personal

NIM : 2016-12-002
Nama : Peter Marselinus Batubara
Tanggal Lahir : Medan, 2 Juni 1997
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Agama : Katolik
Status Perkawinan : Belum Kawin
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Alamat : Jl.Pembangunan Gg.Sejahtera No.101 Medan Helvetia
No HP : 0821-6725-5503
Email : petermarselinus8@gmail.com

b. Pendidikan

Jenjang	Nama Lembaga	Jurusan	Tahun Lulus
SD	SD Sutomo 1 Medan	-	2009
SMP	SMP Methodist 5 Medan	-	2012
SMA	SMA Negeri 12 Medan	IPA	2015

LEMBAR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Peter Marselinus Batubara
NIM : 2016-12-002
Fakultas : Fakultas Teknologi Bisnis dan Energi
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Martin Choirul Fatah, S.T.,M.Sc.,Ph.D.
Judul : Paper Review Pemilihan Material Berdasarkan Sifat Creep dan Oksidasi
Untuk Tube Boiler Ultra-Supercritical

No	Hari, Tanggal	Materi Bimbingan
1.	25 Oktober 2020	Diskusi mengenai gambaran skripsi kedepannya
2.	29 Oktober 2020	Diskusi mengenai rencana pengambilan judul proposal skripsi
3.	10 November 2020	Diskusi mengenai perkembangan proposal skripsi
4.	20 November 2020	Konsultasi mengenai proposal skripsi
5.	4 Desember 2020	Diskusi mengenai kesiapan untuk sidang proposal Skripsi
6.	15 Desember 2020	Diskusi terkait langkah selanjutnya pada skripsi
7.	25 Januari 2021	Konsultasi mengenai perubahan metode penelitian dari pengujian ke studi literature

8.	28 Januari 2021	Konsultasi mengenai jurnal yang akan dipakai pada Studi literature
9.	8 Februari 2021	Diskusi mengenai bagaimana memulai studi literature
10.	16 Februari 2021	Diskusi terkait penulisan dan kesiapan skripsi Bab 1-5
11.	21 Februari 2021	Konsultasi mengenai revisi yang dikasih pada bab 1-3
12.	22 Februari 2021	Diskusi mengenai review dari revisi bab 1-3
13.	24 Februari 2021	Diskusi terkait bab 4 dan ACC skripsi
14.	26 Februari 2021	Diskusi terkait kesiapan sidang skripsi

Jakarta, 19 Februari 2021

Dosen Pembimbing

 Digitally signed
by Martin Fatah
Date:
2021.03.09
14:05:42 +07'00'

(Martin Choirul Fatah, S.T.,M.Sc.,Ph.D)

	FORMULIR	Kode	
		Semester	Gasal
	RANGKUMAN PERBAIKAN SIDANG PROYEK AKHIR /SKRIPSI	Thn Akademik	2020/2021
		Halaman	1 Dari 1 Halaman

Sidang Proyek Akhir/Skripsi hari : **Sabtu** Jam: **12:00-13:00**
 Nama Mahasiswa : **Peter Marselinus Batubara**
 N.I.M : **201612002**
 Judul Proyek Akhir/Skripsi : **PEMILIHAN MATERIAL UNTUK TUBE BOILER ULTRA-SUPERCritical**

Oleh penguji yang bertanda tangan dibawah ini ditetapkan bahwa mahasiswa y.b.s harus menyempurnakan skripsinya dalam waktu satu minggu, yaitu pada tanggal 6 Maret 2021 dengan perbaikan – perbaikan sbb :

1. Diagram alir (flow chart dari metodologi) harap dikembangkan sesuai masukan dari saya
2. Setelah itu perbaiki kolom kesimpulan dari tabel di bagian akhir BAB \$, setelah anda mengikuti flow chart yang baru

Apabila dalam jangka waktu tersebut saya tidak dapat menyelesaikan REVISI dan saya bersedia kembali mengulang mengikuti ujian sidang Proyek Akhir/ Skripsi/ Tesis.

Mahasiswa
Peter Marselinus Batubara
Digitally signed by Peter Marselinus Batubara
 DN: C=ID, CN=Peter Marselinus Batubara,
 E=petermarselinus@gmail.com
 Reason: I am the author of this document
 Location: your signing location here
 Date: 2021.03.06 05:55:06+05'00'
 Foxit Reader Version: 10.1.1
Peter Marselinus Batubara

Penguji
Andika Widya Pramono
Digitally signed by Andika Widya Pramono
 Date: 2021.02.27 15:00:44 +07'00'
Andika Widya Pramono, Prof., Dr., Ing

Proyek Akhir/Skripsi/Tesis* telah diperbaiki sesuai yang ditetapkan, pada hari 5, MARET 2021

Mahasiswa
Peter Marselinus Batubara
Digitally signed by Peter Marselinus Batubara
 DN: C=ID, CN=Peter Marselinus Batubara,
 E=petermarselinus@gmail.com
 Reason: I am the author of this document
 Location: your signing location here
 Date: 2021.03.06 05:54:37+05'00'
 Foxit Reader Version: 10.1.1
Peter Marselinus Batubara

Penguji
Andika Widya Pramono
Digitally signed by Andika Widya Pramono
 Date: 2021.03.05 15:22:42 +07'00'
Andika Widya Pramono, Prof., Dr., Ing

	FORMULIR	Kode	
		Semester	Gasal
	RANGKUMAN PERBAIKAN SIDANG PROYEK AKHIR /SKRIPSI	Thn Akademik	2020/2021
		Halaman	1 Dari 1 Halaman

Sidang Proyek Akhir/Skripsi hari : **Sabtu** Jam: **12:00-13:00**
 Nama Mahasiswa : **Peter Marselinus Batubara**
 N.I.M : **201612002**
 Judul Proyek Akhir/Skripsi : **PEMILIHAN MATERIAL UNTUK TUBE BOILER ULTRA-SUPERCritical**

Oleh penguji yang bertanda tangan dibawah ini ditetapkan bahwa mahasiswa y.b.s harus menyempurnakan skripsinya dalam waktu satu minggu, yaitu pada tanggal

_____, 20____ dengan perbaikan – perbaikan sbb :

1. Pengertian PLTU super kritikal, diagram siklus rankine-nya
2. Revisi judul peper review, masukan dasar pemelihan material
3. Perbaiki metodologinya, dasar penelitian material apa
4. Spefikasi material yang sudah dipakai oleh PLTU
5. Contoh kasus PLTU superkritikal, coba cek PLTU Batang
6. Studi pustaka minimal 10-15 paper
7. Buat dasar-dasar pemelihan material

_____ Apabila dalam jangka waktu tersebut saya tidak dapat menyelesaikan REVISI dan saya bersedia kembali mengulang mengikuti ujian sidang Proyek Akhir/ Skripsi/ Tesis.

Mahasiswa

Peter Marselinus Batubara
Digitally signed by Peter Marselinus Batubara
 DN: C=ID, CN=Peter Marselinus Batubara,
 E=petermarselinus@gmail.com
 Reason: I am the author of this document
 Location: your signing location here
 Date: 2021.03.06 05:53:58-05'00'
 Foxit Reader Version: 10.1.1

Peter Marselinus Batubara

Penguji



Digitally signed
 by Prayudi
 Location: Jakarta

Date:
 2021-02-27 13:
 42:37

Prayudi, Drs., M.M, M.T

Proyek Akhir/Skripsi/Tesis* telah diperbaiki sesuai yang ditetapkan, pada hari _____, _____ 20_____

Mahasiswa

Peter Marselinus Batubara
Digitally signed by Peter Marselinus Batubara
 DN: C=ID, CN=Peter Marselinus Batubara,
 E=petermarselinus@gmail.com
 Reason: I am the author of this document
 Location: your signing location here
 Date: 2021.03.06 05:53:32-05'00'
 Foxit Reader Version: 10.1.1

Peter Marselinus Batubara

Penguji



Prayudi
 C=ID, OU=Fakultas
 Teknologi dan Bisnis
 Energi, O=Institut
 Teknologi PLN,
 CN=Prayudi,
 E=prayudi@itpln.ac.id
 Jakarta

2021-03-14 06:12:15

Prayudi, Drs., M.M, M.T

	FORMULIR	Kode	
	RANGKUMAN PERBAIKAN SIDANG PROYEK AKHIR /SKRIPSI	Semester	Gasal
Thn Akademik		2020/2021	
Halaman		1 Dari 1 Halaman	

Sidang Proyek Akhir/Skripsi hari : **Sabtu** Jam: **12:00-13:00**
 Nama Mahasiswa : **Peter Marselinus Batubara**
 N.I.M : **201612002**
 Judul Proyek Akhir/Skripsi : **PEMILIHAN MATERIAL UNTUK TUBE BOILER ULTRA-SUPERCRITICAL**

Oleh penguji yang bertanda tangan dibawah ini ditetapkan bahwa mahasiswa y.b.s harus menyempurnakan skripsinya dalam waktu satu minggu, yaitu pada tanggal _____,20____ dengan perbaikan – perbaikan sbb :

- 1) Sebutkan/kutip sumber setiap grafik atau gambar yang kamu pakai
- 2) Jelaskan dan uraikan komponen boiler apa yang dibahas di skripsi anda
- 3) Beda boiler super-ultra critical dengan sub-critical dibahas di studi pustaka, baik dari sisi komponen maupun dari sisi siklus rankine, sisi temperatur dan tekanan.
- 4)

Apabila dalam jangka waktu tersebut saya tidak dapat menyelesaikan REVISI dan saya bersedia kembali mengulang mengikuti ujian sidang Proyek Akhir/ Skripsi/ Tesis.

Mahasiswa

Peter Marselinus Batubara
Digitally signed by Peter Marselinus Batubara
 DN: C=ID, CN=Peter Marselinus Batubara,
 E=petermarselinus@gmail.com
 Reason: I am the author of this document
 Location: your signing location here
 Date: 2021.03.06 05:52:54-05'00'
 Foxit Reader Version: 10.1.1

Peter Marselinus Batubara

Penguji



Nofirman, S.T, M.Sc

Proyek Akhir/Skripsi/Tesis* telah diperbaiki sesuai yang ditetapkan, pada hari _____, _____,20____

Mahasiswa

Peter Marselinus Batubara
Digitally signed by Peter Marselinus Batubara
 DN: C=ID, CN=Peter Marselinus Batubara,
 E=petermarselinus@gmail.com
 Reason: I am the author of this document
 Location: your signing location here
 Date: 2021.03.06 05:52:25-05'00'
 Foxit Reader Version: 10.1.1

Peter Marselinus Batubara

Penguji



Digitally signed by Nofirman
 DN: C=ID, CN=Nofirman,
 E=nofirman@itpln.ac.id
 Reason: I am approving this document
 Location: Jatibening
 Date: 2021-03-06 14:57:00
 Foxit Reader Version: 10.0.1

Nofirman, S.T, M.Sc

	FORMULIR	Kode	
		Semester	Gasal
	RANGKUMAN DAFTAR PERBAIKAN SIDANG PROYEK AKHIR /SKRIPSI PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN	Thn Akademik	2020/2021
		Halaman	1 Dari 1 Halaman

Sidang Tugas Akhir hari : **Sabtu, 27 Februari 2021** Jam: 12:00-13:00
 Nama Mahasiswa : **Peter Marselinus Batubara**
 N I M : **201612002**
 Judul : **PEMILIHAN MATERIAL UNTUK TUBE BOILER ULTRA-SUPERCRITICAL**

Oleh sidang ditetapkan bahwa mahasiswa y.b.s harus menyempurnakan Proyek Akhir/Skripsi dalam waktu **satu minggu**, yaitu pada tanggal _____,20____ dengan perbaikan – perbaikan sbb :

1. Komponen utama boiler sub dan super critical
2. Pengutipan references pada bab 4.
3. Referensi di tambahkan
4. PEnggunaan material di komponen mana?
5. Judul
6. Rangkme PLTU supercritical
7. Standard material untuk boiler ultra supercritical (pressure, temperature).
8. Kerangka pemilihan, dasar pemilihan material apa?
9. Batasan masalah: tidak membahas cost.

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa y.b.s tidak dapat menyelesaikan REVISI harus kembali mengulang mengikuti ujian sidang Proyek Akhir/ Skripsi di periode selanjutnya.

<p>Mahasiswa</p>  <p>Peter Marselinus Batubara</p>	<p>Pembimbing</p>  <p>Martin Choirul Fatah, S.T, M.T, PhD</p>	<p>Ketua Sidang</p>  <p>Andika Widya Pramono, Prof., Dr., Ing</p>
--	---	---

Proyek Akhir/Skripsi telah diperbaiki sesuai yang ditetapkan, pada hari _____, _____ 20____

<p>Mahasiswa</p>  <p>Peter Marselinus Batubara</p>	<p>Pembimbing</p>  <p>Martin Choirul Fatah, S.T, M.T, PhD</p>	<p>Ketua Sidang</p>  <p>Andika Widya Pramono, Prof., Dr., Ing</p>
--	---	---